

INFORME

NOMBRE DEL PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO CONFORMADO POR UN STACK DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS-PANELES FOTOVOLTAICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y RADIACIÓN SOLAR.

FONDO: I0017 SEP-CONACYT

PROYECTO: 221433

**RESPONSABLE TÉCNICO. DR. EDSON BALTAZAR ESTRADA
ARRIAGA**

1. Pruebas preliminares

Antes de la elaboración del stack de celdas de combustible microbianas (CCM o Microbial fuel Cells (MFC), por sus siglas en inglés), se realizaron pruebas preliminares en celdas individuales de tipo aire-cátodo, esto con el objeto de determinar la configuración final del stack de CCMs. Una celda (MFC1) fue alimentada con agua porcina (ARP) y otra alimentada (MFC2) con agua residual sintética (ARS). Las dos MFCs fueron cilindros horizontales construidos en acrílico con un volumen de 183 mL. Como ánodo se utilizó tela de carbón. El cátodo estuvo constituido por dos capas en el siguiente orden: una membrana de intercambio catiónico (MIC) y fibra de carbón impregnada con $0.5 \text{ mg PbO}_2/\text{cm}^2$. La distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 10.1 cm. El área de los electrodos fue de 0.00166 m^2 . Los electrodos de las MFCs fueron conectados a través de una resistencia externa (R_{ext}) de $1,200 \Omega$ por medio de un alambre de cobre. Se colocaron tuberías con un diámetro interno de 0.5 cm en la parte inferior y superior de cada MFC para realizar la recirculación del agua residual. Para la recirculación del agua residual se utilizó una bomba peristáltica de doble cabezal asegurando el mismo flujo de recirculación en cada MFC.

La MFC1 fue alimentada con ARP proveniente de una granja porcina del área de maternidad. La MFC2, se alimentó con ARS el cual contenía sacarosa (4 g/L), NH_4Cl (0.2 g/L), CaCl_2 (0.19 g/L), KCl (0.33 g/L), NaCl (0.3 g/L), K_2HPO_4 (1.26 g/L), KH_2PO_4 (0.42 g/L), $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.68 mg/L), ZnCl_2 (1.25 mg/L), $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (12.5 mg/L), $(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_6\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.07 g/L), $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (3.75 mg/L), $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (2.5 mg/L), $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.5 g/L) y H_3BO_3 (1.25 mg/L).

2. Inoculation

Las MFCs fueron inoculadas con un lodo anaerobio granular proveniente de un reactor UASB que trata aguas residuales de una industria papelera. El lodo granular fue disuelto y mantenido en suspensión en agua residual porcina y sintética y fue incubado durante un periodo de 67 h a una temperatura de 30°C antes de ser inoculadas en las MFCs. La cantidad de TSS que se inocularon en cada MFC fue de 59,750 mg/L.

3. Condiciones de operación

Las MFCs fueron operadas en modo batch. Ambas MFCs trabajaron simultáneamente bajo tres condiciones de mezclado (variación en el flujo de recirculación). En la primera condición de operación (R1), las MFCs trabajaron de forma estática (sin recirculación). La segunda condición el flujo de recirculación fue de 74 mL/min (R2) y en la tercera, el flujo de recirculación fue 152 mL/min (R3). El ciclo de operación de las MFCs fue determinado de acuerdo a la disminución del voltaje a través del tiempo (aproximadamente el 80% respecto al voltaje máximo generado en cada MFC) para cada condición de operación. Al final de cada condición de operación, las membranas fueron extraídas y remplazadas por membranas vírgenes para comenzar con la siguiente condición de trabajo.

4. Análisis y cálculos

El desempeño de las MFCs fue evaluada a través de el voltaje (V), corriente eléctrica ($I = V/R_{ext}$), potencia ($P = I \times V$), densidad de potencia ($P/Area_{electrode}$), eficiencia coulombica (CE), y producción de energía real y teórica (W).

La CE, se define como la relación entre el número de coulombios realmente transferidos al ánodo desde el sustrato y el número máximo posible de coulombios transferidos si todo el sustrato fuera capaz de producir corriente. De acuerdo a Logan (2008), la CE para una MFC operada en batch esta dada por la ecuación 1.

$$CE = \frac{M \int_0^t I(t) dt}{F \times b \times v \times \Delta COD} \quad 1$$

Dónde, M = peso molecular del oxígeno (g/mol), $I(t)dt$ = coulombios reales generados por el periodo de tiempo (t), t = ciclo de operación de la MFC (h), F = constante de Faraday (9,6485 C/mol electrones), b = número de moles de electrones generados por mol de oxígeno, v = volumen de la MFC (L) y ΔCOD = COD removed (mg/L). El cálculo de la CE fue realizado por el método de los trapecios ($n = 16$).

La producción total de energía teórica ($W_{theoretical}$) generada a partir de la remoción de la COD es la energía que se pretende alcanzar de acuerdo a las características que se tienen de la MFC en relación con la COD utilizada (ecuación 2) (Li et al., 2010).

$$W_{teo} = \frac{\Delta COD}{M_{O_2}} \times 4 \times F \times V \quad 2$$

Dónde, $W_{teórica}$ = energía teórica (joules), ΔCOD = cantidad de COD removido (mg/mol), 4 = número de moles de electrones generados por mol de oxígeno, F = constante de Faraday (96485 C/mol electrones), V = voltaje generado (mV) y M_{O_2} = masa molar del oxígeno (32 g/mol).

La generación total de energía experimental ($W_{experimental}$) fue determinada durante el ciclo de operación de las MFCs y representa la energía que se logra generar a través de la remoción de la COD involucrando las resistencias internas de cada celda en cada condición de operación (ecuación 3).

$$W = \int_0^t \frac{V^2}{R_{ext}} dt \times \frac{R_{ext} + R_{int}}{R_{ext}} \quad 3$$

Dónde: $W_{experimental}$ = energía experimental (joules), t = ciclo de operación de la MFC (h), V = voltaje generado (mV), R_{ext} = resistencia externa (1,200 Ω) y R_{int} = resistencia interna (Ω).

La eficiencia de tratamiento del agua residual fue evaluada en términos de DQO, SST, nitrógeno amoniacal, (N-NH_4^+), fósforo total (PT) and nitratos (N-NO_3). Estos parámetros fueron medidos de acuerdo al Standard Methods (APHA, 2005).

5. Análisis de los ánodos y membranas a través de microscopía electrónica de barrido acoplado a espectroscopía de rayos X (EDX)

Al final de cada etapa de operación de las MFCs, las membranas fueron extraídas y observadas a través de un microscopio SEM LEO 1450VP. Posteriormente, las muestras fueron analizadas por medio de EDX. La morfología de la biopelícula desarrollada sobre el ánodo de cada MFC fue observada por medio de SEM. Las muestras del bioánodo y membrana fueron cortadas en piezas de 0.25 cm^2 y fijadas en 5% glutaraldehído and 5% de una solución de etanol-agua desonizada. Las muestras fueron lavadas con fosfato monosódico ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y fosfato disódico (Na_2HPO_4) a pH 7. Después, las muestras fueron sujetas a una deshidratación usando etanol al 50, 60, 70, 80, and 100%. Antes de su observación en el SEM-EDX, las muestras fueron cubiertas con oro-paladio durante 30 minutos a vacío en un equipo SC7620 Sputter Coater.

6. Características físico-químicas del agua residual

El agua residual porcina presentó altas concentraciones de materia orgánica, sólidos, fósforo nitrógeno. La DQO del agua residual porcina fue de 4,237 mg/L. El NH_4 se detectó en altas concentraciones (790 mg/L) y este compuesto inorgánico puede tener una influencia positiva para la generación de electricidad ya que de acuerdo al proceso de nitrificación/desnitrificación y anammox que pudiera ocurrir dentro de la MFC se pueden liberar protones (H^+) en el medio y estos pueden ser utilizados para generar una diferencia de potencial aumentando el flujo de electrones en la MFC (Zhang and He, 2012). La concentración de nitratos fue de 5 mg/L. Los TSS se encontraron en 2,502 mg/L y la conductividad eléctrica y el pH en 7.9 mS/cm y 7.7 unidades, respectivamente. El PT fue de 73 mg/L. Los valores de los contaminantes encontrados en el agua residual porcina están dentro los datos reportados en las granjas porcinas (Yong-Hui et al., 2011; Ichihashi et al., 2012; Guo et al., 2013). Para la caracterización de la ARS se evaluaron la DQO, NH_4 y PT. La DQO fue de 4,197 mg/L con una concentración de NH_4 de 51 mg/L y de PT de 8 mg/L. El pH y la conductividad eléctrica fueron de 7 unidades y 0.8 mS/cm, respectivamente.

7. Generación de electricidad

Antes de operar las celdas bajo diferentes condiciones de recirculación, las MFCs fueron previamente inoculadas y aclimatadas al agua residual porcina y sintética durante 50 días con el objetivo de formar la biopelícula sobre el ánodo y generar una estabilización del voltaje a circuito abierto. Durante la etapa de aclimatación se generó un voltaje máximo a circuito abierto de 765 mV para la MFC1 y de 543 mV para la MFC2. Fig. 1, se muestra el desempeño de la MFC1 bajo las tres condiciones de operación. Cuando el agua residual permaneció sin recirculación, el voltaje máximo alcanzado fue de 234 mV con una densidad de potencia de 27.5 mW/m^2 . El voltaje y la densidad de potencia para la condición sin

recirculación comenzaron a disminuir a partir de las 168 h de operación de la MFC. El ciclo de operación de la MFC1 con R1 fue de 218 h. Para un R2, el voltaje máximo fue de 221 mV. La densidad de potencia máxima para esta velocidad de recirculación fue de 24.5 mW/m^2 . El ciclo de operación fue de 94 horas. Para R3, el voltaje máximo fue de 223 mV (densidad de potencia de 24.96 mW/m^2) y el ciclo de operación fue de 74.5 h. Se observa que las densidades de potencia bajo los tres regímenes de recirculación no fueron afectados significativamente por la velocidad de recirculación, sin embargo, en los ciclos de operación de la MFC1 se reflejó una diferencia significativa. Incrementando el flujo de recirculación, los ciclos de operación de MFC se reducen. Este comportamiento indica que la biopelícula adherida sobre la tela de carbón, al entrar en contacto con un mezclado, la transferencia de masas en mayor permitiendo que la materia orgánica se degrade más rápido afectándose simultáneamente el tiempo de producción de electricidad. Por el contrario, cuando la MFC1 fue operada sin un flujo de recirculación, los microorganismos se encuentran en menor contacto con el sustrato generando posiblemente una menor transferencia de masas, lo que implica que la materia orgánica sea degradada más lentamente, estimulando una producción de electricidad más prolongada.

La MFC2 generó un menor voltaje en comparación con la MFC1. En la Fig. 2, se muestra la producción de electricidad durante el tratamiento de la ARS. El máximo voltaje que se obtuvo fue de 49 mV para un flujo de recirculación de 74 mL/min (R2). Bajo esta condición de operación, la densidad de potencia máxima fue de 1.21 mW/m^2 . Con R1, la producción de electricidad fue menor que R2 y R3. El mismo comportamiento fue observado en los ciclos de operación, a mayor flujo de recirculación la caída de voltaje es más rápida. El ciclo de operación para R1, R2 y R3 para la MFC2 fue de 212, 96 y 96 h, respectivamente. La diferencia entre los voltajes generados en la MFC1 y la MFC2 está influenciada por la concentración de nitrógeno amoniacal el cuál sirve como un tipo de sustrato o co-sustrato para producir electricidad, así mismo, la MFC1 se vio favorecida por la conductividad alta del agua residual porcina, el cual facilitó el flujo de electrones y protones en el medio acuoso en comparación con la MFC2. En la MFC2, la solución sintética generó altas resistencias internas generándose bajas densidades de potencia.

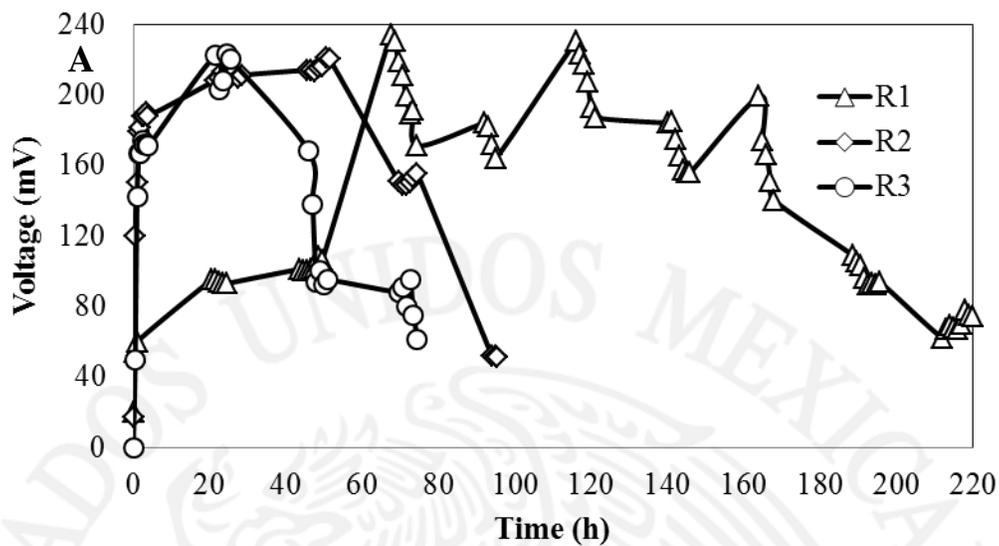


Fig 1. Voltajes obtenidos en la MFC 1

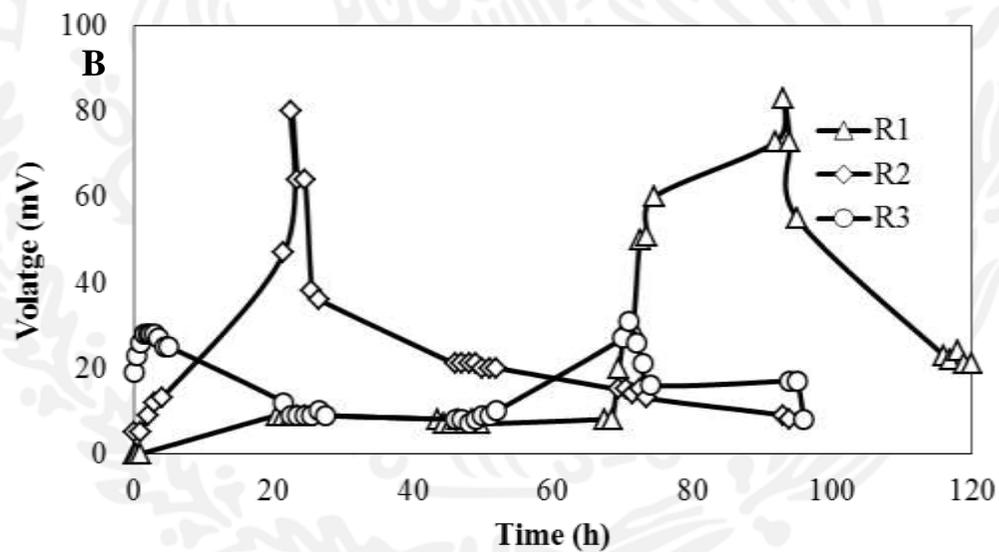


Fig 2. Voltajes obtenidos en la MFC 1

8. Tratamiento del agua residual

En la Tabla 1, se representa la remoción de DQO, SST, NH_4 y PT obtenidas en la MFC1 y MFC2 bajo las tres condiciones de operación. Para la MFC1, la mayor remoción de los contaminantes fue aplicando una velocidad de 74 mL/min (R2). La DQO se redujo hasta valores de 432.2 mg/L (89.8%), la concentración de nitrógeno amoniacal disminuyó de 790 a 172.2 mg/L (78.2%) y para el PT la remoción fue entre el 22.1-36.3%. Cierta cantidad del fósforo removido por la MFC1 y MFC2 fue precipitada en la CEM, los cuales se muestran en los análisis por SEM-EDX. Remociones entre el 14 y 82% del PT fueron obtenidas en una MFC similar a este trabajo (Cusick and Logan, 2012; Ichihashi and Hirooka, 2012; Ichihashi et al., 2012). Min et al. (2005) obtuvieron remociones de DQO y nitrógeno amoniacal del 86 y 83% respectivamente, sin embargo, estos investigadores realizaron una dilución del agua residual porcina ($1_{\text{pig wastewater}}/10_{\text{fresh water}}$). Hirooka and Ichihashi (2012) and Ichihashi et al. (2012) obtuvieron remociones de DQO entre el 76 y 91% en una celda de aire-cátodo con un ciclo de operación de 76 días. La remoción de los SST fue de hasta un 95% (125 mg/L). Las altas remociones de SST están relacionadas por un lado por la precipitación de las sales en la superficie de la membrana y por el otro, debido a que los sólidos particulados quedaron adheridos por atracción electrostática en la superficie de la membrana debido a la suspensión de los sólidos producto de la recirculación. Para la MFC2, la mayor remoción de DQO (73.1%), NH_4 (71.2%) y PT (25.5%) fue aplicando una recirculación de 154 L/min (R3). La MFC1 presentó una mayor actividad microbiana debido a la naturaleza del agua residual porcina y al tipo de inóculo que se utilizó, el cual ya estaba adaptado a un agua residual con alta concentración de materia orgánica. A medida que se incrementó la velocidad de recirculación, la remoción de contaminantes aumentó debido a que existe una mayor transferencia de masas y los microorganismos se encuentran en mayor contacto con el sustrato. A pesar de que la MFC1 con las condiciones de R2 y R3 se obtuvieron las mejores remociones de contaminantes, la condición sin recirculación también generó una buena remoción de DQO, NH_4 y PT, por lo que no debe descartarse esta condición de operación ya que además generó densidades de potencia ligeramente mayores comparados con R2 y R3. Las densidades de potencia obtenidas en la MFC1 fueron bajas comparadas con otros trabajos en donde se alcanzaron densidades de potencia de hasta 831 mW/m² utilizando agua residual porcina (Ichihashi et al., 2012). Las bajas densidades de este trabajo están ligadas a la presencia de altas concentraciones de SST ya que cerca del 50% de la DQO del agua residual porcina corresponde a material particulado lo que limitó la difusión del sustrato a través de las membranas celulares de las bacterias productoras de electricidad (microorganismos electrogénicos) generando bajas densidades de potencia.

En general, remociones del nitrógeno no ocurren en la digestión anaerobia, sin embargo, en este trabajo las dos MFCs generaron una remoción considerable de NH_4 el cual puede ser explicado por dos razones: 1.- a una parcial nitrificación dentro de la cámara anódica causada por la difusión de oxígeno a través del cátodo generando nitratos y sirviendo como un aceptor de electrones para realizar la desnitrificación y, 2.- debido a un proceso anammox. La concentración de nitritos y nitratos detectados en la MFC1 fue de 13 y 34 mg/L, respectivamente. En la MFC2 fue de 2 mg/L de nitritos y de 7 mg/L de nitratos. Tanto los nitritos y nitratos sirvieron como aceptores finales de electrones en la proceso desnitrificación y anammox. De acuerdo a Yan et al. (2012), Zhang and He (2012), Min et al. (2005) y Lui and Logan (2004), el proceso de nitrificación en una MFC ocurre cerca del cátodo. En este trabajo

el cátodo no fue cubierto con una capa de PTFE, lo que generó que el oxígeno atmosférico pasará a través del cátodo sin contener una barrera para su difusión hacia el interior de las MFCs.

Tabla 1. Remoción de contaminantes en las MFCs

Condiciones de operación	MFC1						MFC2				
	DQO (%)	NH ₄ (%)	PT (%)	SST (%)	Voltaje (mV)	Ciclo de operación (h)	DQO (%)	NH ₄ (%)	PT (%)	Voltaje (mV)	Ciclo de operación (h)
Sin mezcla	73.1	40.8	22.1	78.8	234	218	41.4	33.5	18	83	118
R2	89.8	78.2	36.3	95.0	221	94	54.6	65.4	19.3	80	94
R3	89.8	67.4	34.0	95.0	223	74	73.1	71.2	25.5	31	96

9. Curvas de polarización

Para la MFC1, la densidad de potencia para R1 fue de 19.64 mW/m² con una densidad de corriente de 59.87 mA/m² (Fig. 3). La densidad de potencia para R2 fue de 12.7 mW/m² para una densidad de corriente de 79.82 mA/m². Los valores máximos de densidad de potencia que se generaron fue de 23.32 mW/m² (densidad de corriente de 132.53 mA/m²) con R3. El valor máximo de densidad de potencia para la MFC2 fue de 3.8 mW/m² con una densidad de corriente de 53.46 mA/m² cuando la MFC fue operada sin recirculación. Para R2, la densidad de potencia fue de 3.5 mW/m² con una densidad de corriente de 42.16 mA/m². La densidad de potencia que se obtuvo para R3 fue de 0.55 mW/m², con una densidad de potencia de 10.04 mA/m².

Las resistencias internas se calcularon mediante el método de la pendiente del voltaje de las curvas de polarización ($R_{int} = m/A_{electrode}$). En la MFC1, las resistencias internas calculadas fueron de 2,596, 2,066 y 1,036 Ω para R1, R2 y R3, respectivamente. Para la MFC2, la resistencia interna para R1 fue de 2,500, de 3,777 Ω para R2 y para R3 de 1,837 Ω . Se determinó que con un flujo recirculación más alto, las resistencias internas en ambas MFCs fueron más bajas indicando que a mayor turbulencia en el interior de la MFCs se disminuyen las resistencias internas.

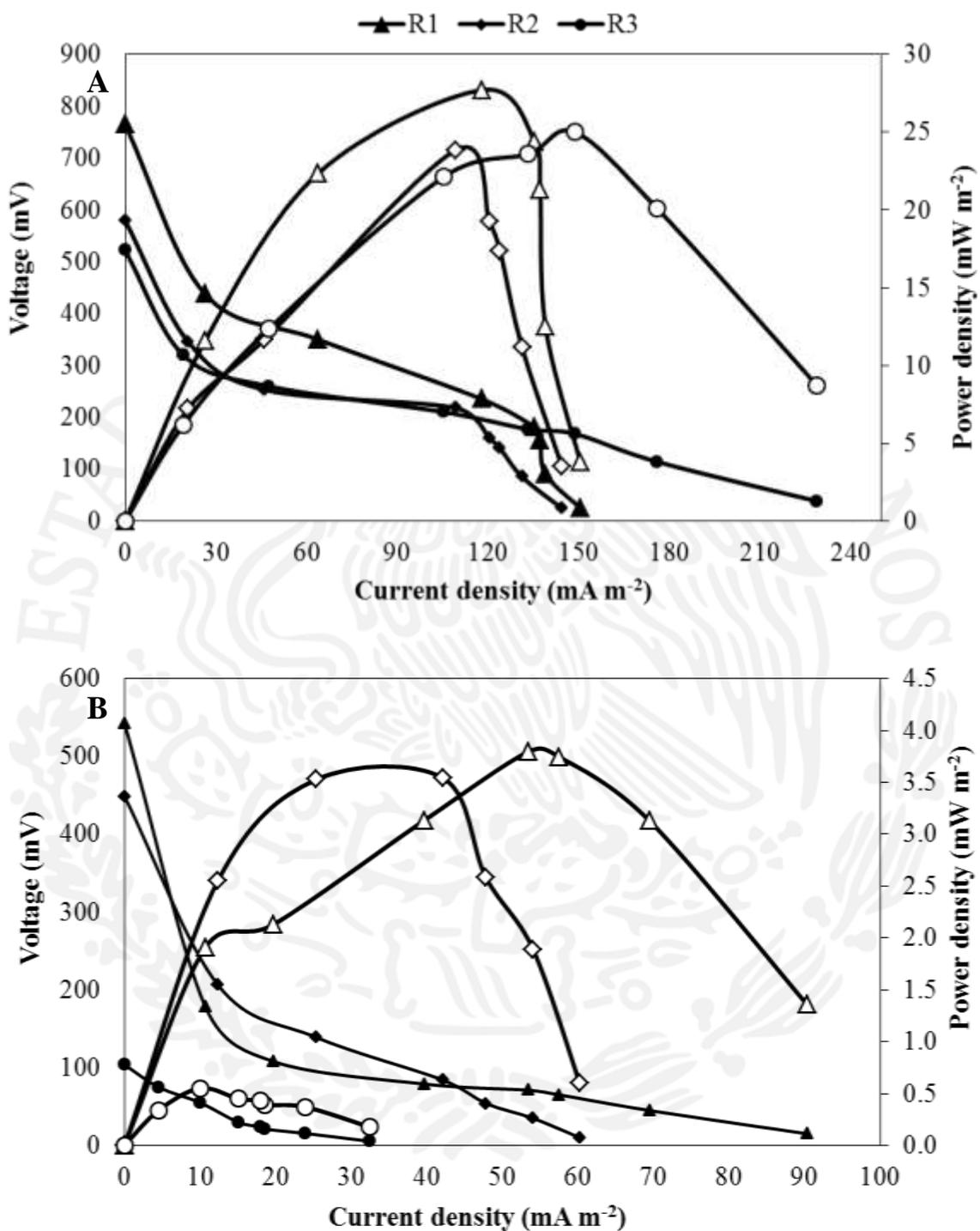


Fig. 3. Curvas de polarización

Para la determinación de la eficiencia coulombica, energía teórica y energía experimental se realizó una integración utilizando el método de los trapecios tomando como referencia 16 puntos. A partir de los coulombos generados los cuales se obtuvieron al integrar la corriente a través del tiempo, los valores de DQO inicial y final y las resistencias internas y externas se obtuvieron las eficiencias coulombicas y las energías teóricas y experimentales en las MFCs. En la Tabla 2 se muestran las eficiencias coulombicas y las energías teóricas y experimentales generadas con el agua residual porcina y sintética. Para la MFC1, la mayor eficiencia coulombica fue de 33.3% con una energía experimental de 374.2 joules, las cuales se obtuvieron en la condición de sin recirculación. En la MFC2, la mayor EC y energía experimental fue también con la condición de sin recirculación. Las máximas densidades de potencia generadas en la MFC1 y MFC2 corresponden a las mayores CE. En estudios realizados por Ichihashi and Hirooka (2012) para la remoción de fósforo y recuperación de estruvista durante el tratamiento de aguas residuales porcinas en MFCs obtuvieron EC entre 37 y 47%. En otros estudios durante el tratamiento del agua residual porcinas in MFC, la EC fueron del 30-38% (Ichihashi et al., 2012)

Una pérdida de la energía fue determinada en ambas MFCs posiblemente por una disipación de energía en forma de calor y no por las resistencias internas intrínsecas de las propias MFCs ya que las resistencia internas calculadas fueron más bajas cuando las MFCs fueron operadas con una mayor flujo de recirculación. Esto destaca la importancia de poder extraer la mayor cantidad de electrones y protones durante la degradación de la materia orgánica con una mínima pérdida de energía y que la fuerza electromotriz sea lo suficiente para producir la diferencia de potencia. El ciclo de operación es otro factor importante a considerar ya que a mayor ciclo de operación la energía se incrementa. La energía experimental de las MFCs disminuyeron al disminuir el ciclo de operación, esto sucedió por el mezclado del agua residual dentro de la biocelda. Estas pérdidas de energía se pueden dar a lo largo de la línea de recirculación por efecto de rozamiento y disipación de energía motivada por la turbulencia al momento del mezclado.

Tabla 2. ECs y energía experimental en las dos MFCs

	Condiciones de operación (mL min ⁻¹)	EC (%)	Energía experimental (Joules)	Ciclo de operación (h)
MCF1	Sin mezcla (R1)	33.3	374.2	218
	74 (R2)	12.2	175.4	94
	152 (R3)	1.4	34.3	74.5
MFC2	Sin mezcla (R1)	38.1	60	119
	74 (R2)	1.4	4.4	94
	152 (R3)	4.2	3.2	96

10. Análisis elemental

Los bioánodos de las MFCs fueron extraídos después de la experimentación y cortados en pequeñas piezas para su análisis por SEM. La membrana de cada MFC fue extraída después de cada condición de operación y fue observada y analizada por SEM-EDX para determinar el ensuciamiento de las membranas. Las biopelículas formadas sobre la tela de carbón de las MFCs fueron de buena estructura y morfología (Fig. 4). Para la MFC1 (Fig. 4A) varios componentes orgánicos fueron observados debido a la composición físico-química del agua residual porcina. En los ánodos de las MFCs, se encontraron microorganismos de diferentes formas y tamaños (bacilos por la forma de bastón que presentan, cocos por ser en forma esféricos, esporas y sustancias poliméricas extracelulares).

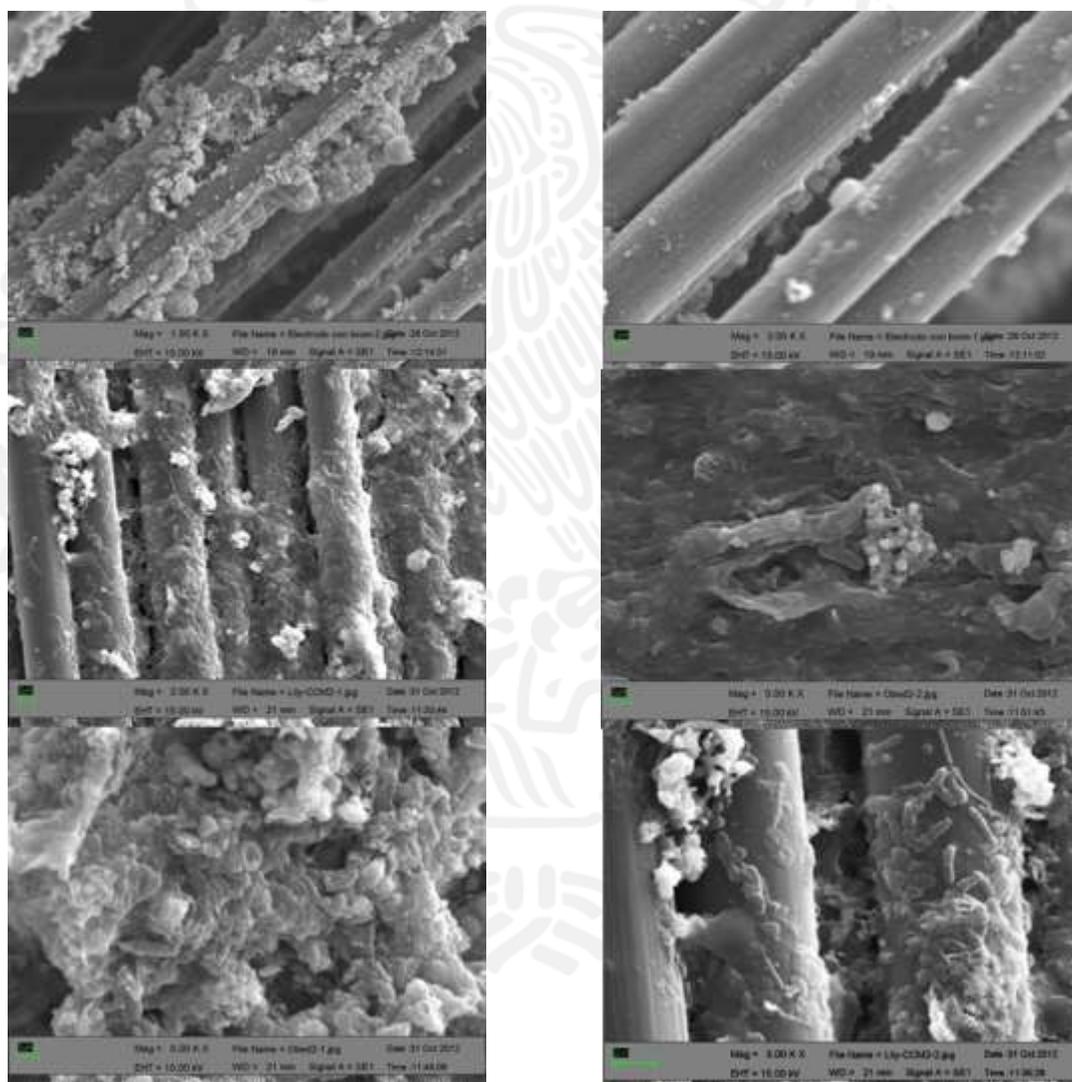
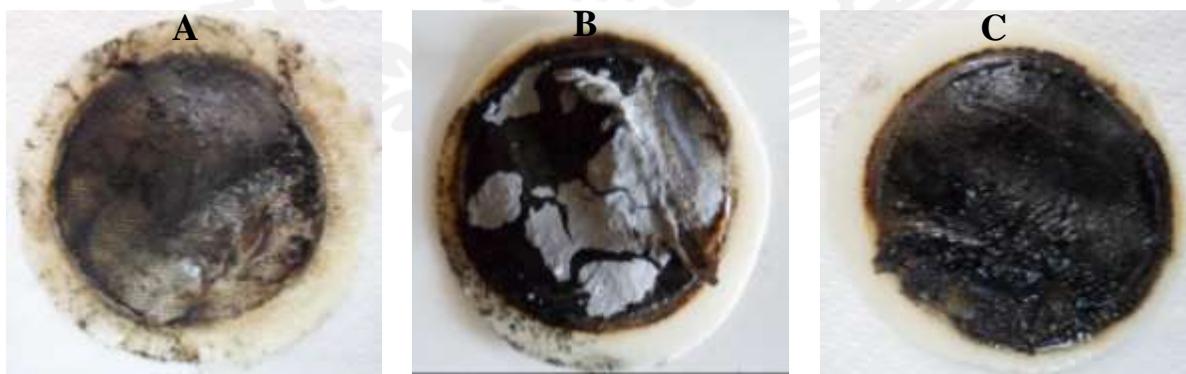


Fig. 4. Imágenes de los ánodos de las dos MFCs

En la Fig. 5 and 6, se puede observar la morfología de la superficie de las membranas de las MFCs después de ser utilizadas en cada condición de operación. Sobre la superficie de las MIC, se formó una película de sólidos delgada y uniforme compuesta principalmente por componentes inorgánicos e orgánicos (Fig. 5A, 5B, 5C, 6A, 6B and 6C). El análisis por SEM-EDX para la membrana virgen estuvo compuesta por un 61.1% de carbono, 23.3% de oxígeno, 10.9% de azufre y 4.6% de sodio.

Para la MFC1 con la condición de sin recirculación (R1), el espectro EDX mostró sales precipitadas principalmente de calcio (Ca), fósforo (P) y magnesio (Mg) con un porcentaje en peso de 17.2, 11.3, y 0.9%, respectivamente (Fig. 5A1 and 5A2). Para la membrana con un flujo de recirculación de 74 mL/min (R2), se detectaron elementos que corresponden en porcentaje en peso de 0.8% de Mg, 4.5% de P y 10% de Ca (Fig. 5B1 and 5B2). Los elementos inorgánicos encontrados para un flujo de recirculación de 152 mL/min (R3) fueron Mg 1.13, P 6.7, Ca 2.3% entre otros elementos (hierro, potasio y aluminio) (Fig. 5C1 and 5C2). De acuerdo a los espectros EDX y a las micrografías de SEM se puede apreciar que el incremento del flujo de recirculación disminuyó las concentraciones de P y Ca sobre la superficie de las membranas. La turbulencia que se generó dentro de la MFC1 al aumento del flujo de recirculación provocó el desprendimiento de las sales precipitadas sobre las membranas. Las sales precipitadas en la superficie de las MIC corresponden a la estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) generada por la remoción de fósforo y nitrógeno amoniacal en la fase líquida y precipitada en forma de cristales sobre el cátodo de la MFC1. La formación de estruvita fue detectada en las tres condiciones de operación de la MFC1 (Fig. 5A1, 5B1 and 5C1). Los cristales de estruvita fueron irregulares con una doble cara plana de textura lisa y estructura triclinico. Para que se de la cristalización y precipitación de la estruvita se requiere la adición de compuestos alcalinos, en este caso, la presencia de iones de Ca y Mg en el agua residual porcina (removida y precipitada en el cátodo) y a las condiciones ambientales de la MFC1 (potencial óxido reducción de entre -150 y -267 mV y pH ligeramente alcalino (7.6-7.8)) generaron la formación de cristales de struvite. De acuerdo a Ichihashi and Hirooka (2012), sugieren que la precipitación de la estruvita sobre el cátodo ocurre porque el pH cercano al electrodo en mayor que en la suspensión líquida de la MFC. Recientemente pocos trabajos han mostrado la formación de estruvita en MFCs utilizando como sustrato lodos residuales digeridos (Fischer et al., 2011) y agua residual porcina (Ichihashi and Hirooka, 2012).



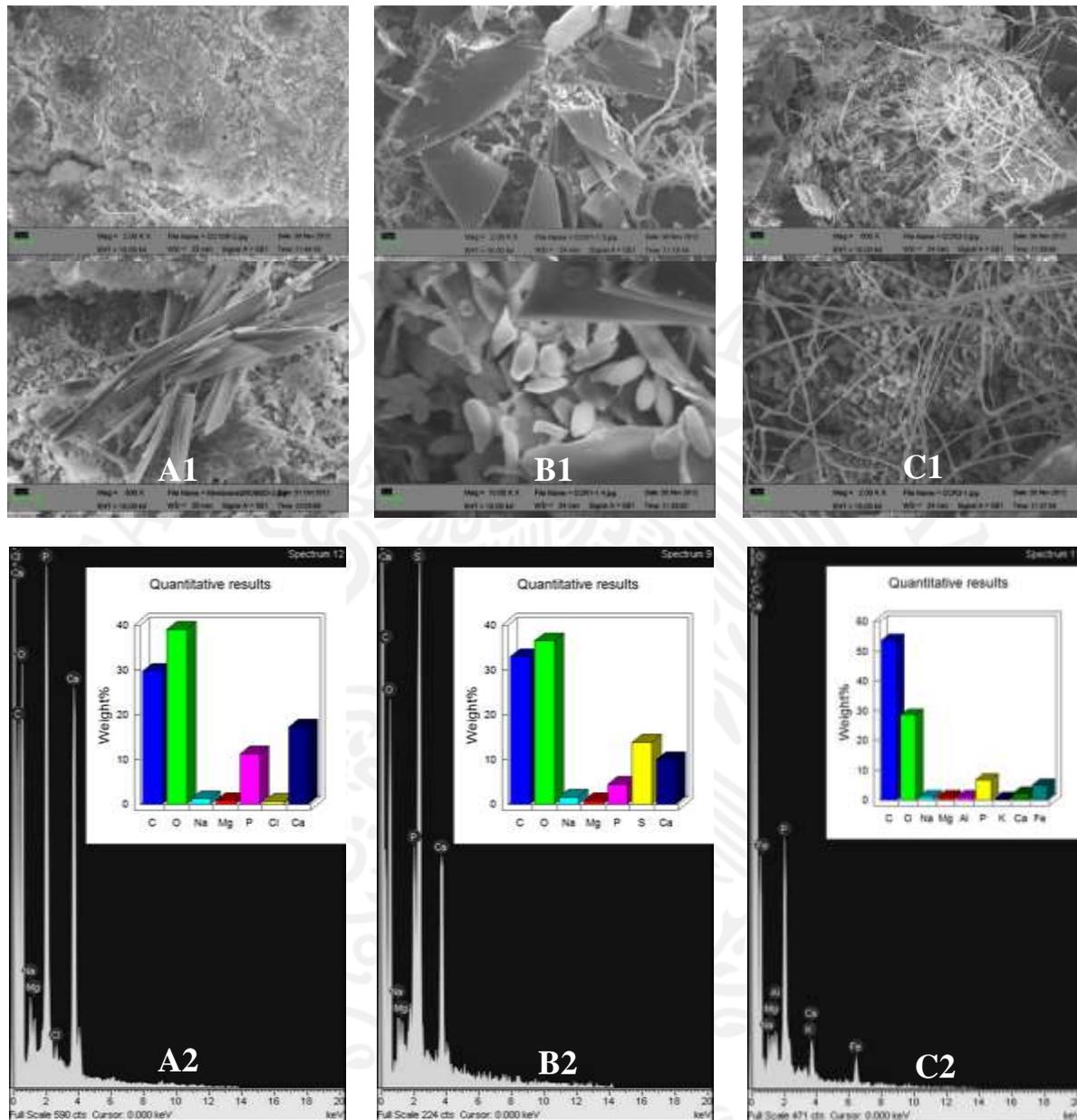
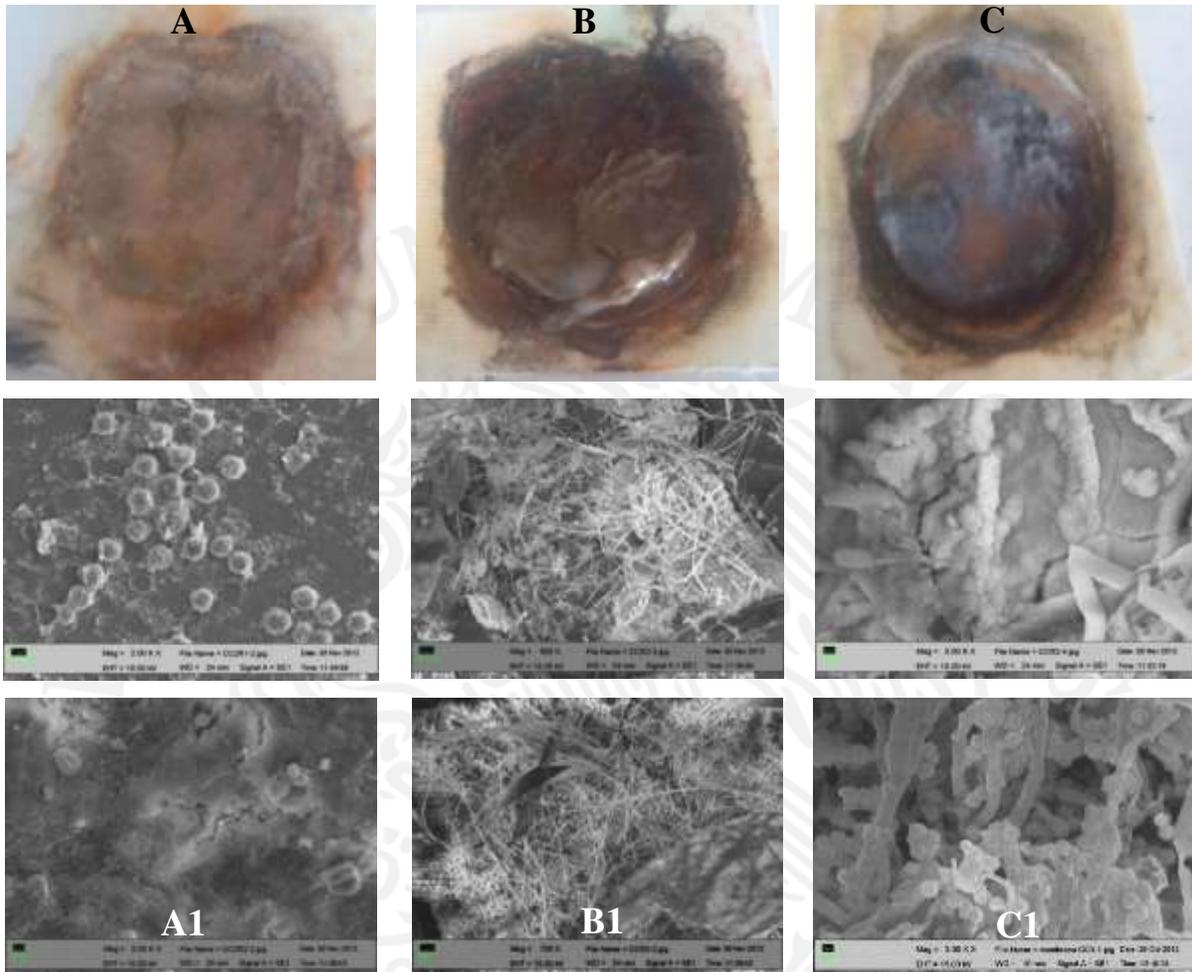


Fig. 5. Ensuciamiento de las membranas MFC 1

Para la MFC2, los elementos inorgánicos encontrados en las membranas para las diferentes condiciones de operación fueron Ca y P en forma de cristales de fosfato de calcio (Fig. 6A1, 6B1 and 6C1). Para R1, los porcentajes en peso de P y Ca fueron de 11 y 28.3 %, respectivamente (Fig. 6A2). En la MIC para la condición R2, el porcentaje en peso de P y Ca fue de 14.8 y 20.6%, respectivamente (Fig. 6B2). Para R3, no se encontró fósforo pero si Mg (1.2%) y Ca (0.8%) (Fig. 6C2). No se encontró estruvita en la MFC2, esto debido a la composición y concentración de los compuestos que constituyeron el agua

residual sintética. Como en la MFC1, al incrementarse el flujo de recirculación, la cantidad de iones de P y Ca se vio disminuida.



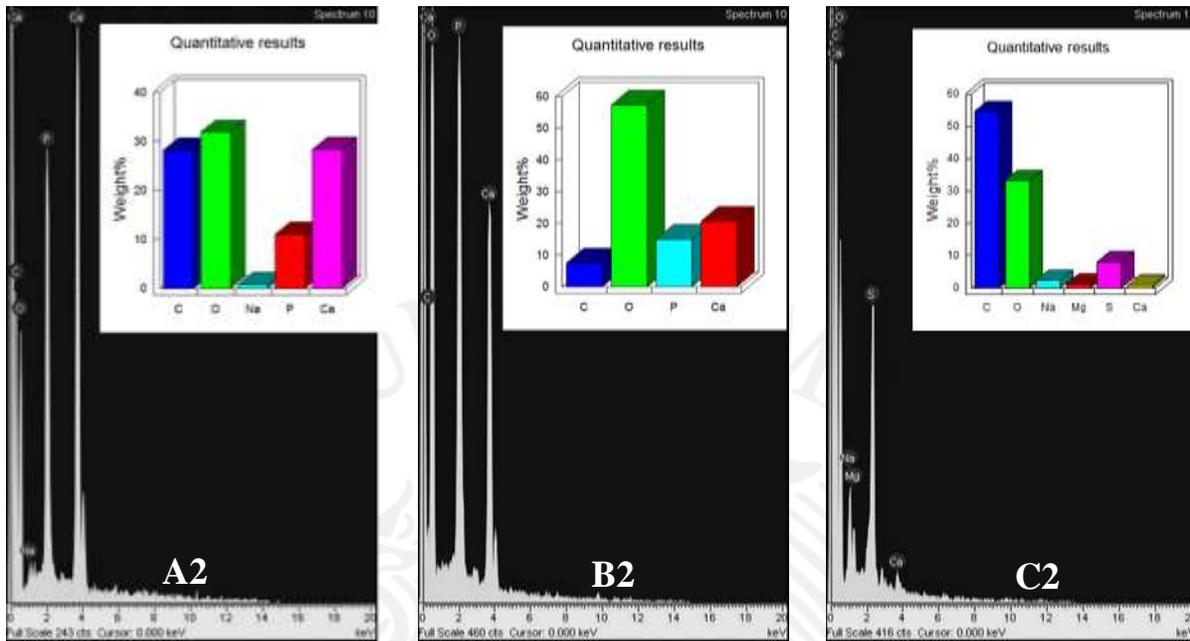


Fig. 6. Ensuciamiento de las membranas en la MFC 2

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FAO, Towards the future we want: End hunger and make the transition to sustainable agricultural and food systems. Rome, 2012.
2. A. ElMekawy, S. Srikanth, S. Bajracharya, H.M. Hegab, P.S. Nigam, A. S.V. Singh Mohan and D. Pant, Food and agricultural wastes as substrates for bioelectrochemical system (BES): The synchronized recovery of sustainable energy and waste treatment, *Food Res. Int.*, 73 (2015) 213-225
3. X. Li, I.M. Abu-Reesh and Z. He, Development of bioelectrochemical systems to promote sustainable agriculture, *Agriculture*, 5 (2015) 367-388
4. S. Seveda, X. Dominguez-Benetton, K. Vanbroekhoven, H. De Wever, T.R. Sreekrishnan and D. Pant, High strength wastewater treatment accompanied by power generation using air cathode microbial fuel cell, *Appl. Energy.*, 105 (2013) 194-206.
5. L.T. Angenent, K. Karim, M.H. Al-Dahhan, B.A. Wrenn and R. Domínguez-Espinosa, Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater, *Trends Biotechnol.*, 22 (2007) 477-485.
6. Y.J. Chan, M.F. Chong, C.L. Law and D.G. Hassell, A review on anaerobic aerobic treatment of industrial and municipal wastewater, *Chem. Eng. J.*, 155 (2009) 1-18.
7. D. Pant and A. Adholeya, Biological approaches for treatment of distillery wastewater: a review, *Bioresour. Technol.*, 98 (2007) 2321-2334.
8. T.H. Pham, K. Rabaey, P. Aelterman, P. Clauwaert, L.D. Schampelaire and N. Boon, Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology, *Eng. Life Sci.*, 6 (2006) 285-92.
9. J. Guo, C. Yang and G. Zeng, Treatment of swine wastewater using chemically modified zeolite and bioflocculant from activated sludge, *Bioresour. Technol.*, 143 (2013) 289-297.
10. S. Yong-Hui, Q. Guang-Lei, Y. Peng, C. Xiao-Yu, P. Jian-Feng, Z. Ping, D. Liang, X. Lian-Cheng and Q. Feng, Nutrients removal and recovery from anaerobically digested swine wastewater by struvite crystallization without chemical additions, *J. Hazard. Mater.*, 190 (2011) 140-149.
11. O. Ichihashi and K. Hirooka, Removal and recovery of phosphorus as struvite from swine wastewater using microbial fuel cell, *Bioresour. Technol.*, 114 (2012) 303-307.

12. W. Ben, Z. Qiang, X. Pan and M. Chen, Removal of veterinary antibiotics from sequencing batch reactor (SBR) pretreated swine wastewater by Fenton's reagent, *Water Res.*, 43 (2009) 4392-4402.
13. M. Chénier and P. Juteau, Fate of chlortetracycline- and tylosin- resistant bacteria in an aerobic thermophilic sequencing batch reactor treating swine waste, *Microb. Ecol.*, 58(2009) 86-97.
14. S. Sakar, K. Yetilmezsoy and E. Kocak, Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment-a literature review, *Waste Manage Res* 27 (2009) 3-18.
15. J. Stone, S. Clay, Z. Zhu, K. Wong, L. Porath and G. Spellman, Effect of antimicrobial compounds tylosin and chlortetracycline during batch anaerobic swine manure digestion, *Water Res.*, 43 (18) (2009) 4740-4750.
16. G. Buelna, R. Dubé and N. Turgeon, Pig manure treatment by organic bed filtration, *Desalination*, 231 (1-3) (2008) 297-304.
17. L. Angenent, M. Mau, U. George, J. Zahn and L. Raskin, Effect of the presence of the antimicrobial tylosin in swine waste on anaerobic treatment, *Water Res.*, 42 (2008) 2377-2384.
18. A. Kolz, S. Ong and T. Moorman, Sorption of tylosin onto swine manure, *Chemosphere*, 60 (2005) 284-289.
19. K.A. Lotfin, C. Henny, C.D. Adams, R. Surampali and M.R. Mormile, Inhibition of microbial metabolism in anaerobic lagoons by selected sulfonamides, tetracyclines, lincomycin and tylosin tartrate, *Environ. Toxicol. Chem.*, 24 (4) (2005) 782-788.
20. B. Min, J.R. Kim, S. Oh, J.M. Regan and B.E. Logan, Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells, *Water Res.*, 39 (2005) 4961-4968.
21. C.Y. Lee, C.C. Lee, F.Y. Lee, S.K. Tseng and C.J. Liao, Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads, *Bioresour. Technol.*, 92 (2004) 173-179.
22. B.E. Logan and K. Rabaey, Conversion of waste into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies, *Science*, 337 (2012) 686-690.
23. R.C. Wagner, J.M. Regan, S.E. Oh, Y. Zuo and B.E. Logan, Hydrogen and methane production from swine wastewater using microbial electrolysis cells, *Water Res.*, 43 (2009) 1480-1488.
24. K. Rabaey and W. Verstraete, Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation, *Trends Biotechnol.*, 23 (2005) 291-298.

25. M. Sharma, S. Bajracharya, S. Gildemyn, S.A. Patil, Y. Alvarez-Gallego, D. Pant, K. Rabaey and X. Dominguez-Benetton, A critical revisit of the key parameters used to describe microbial electrochemical systems, *Electrochim. Acta*, 140 (2014) 191-208.
26. O. Ichihashi, N. Yamamoto and K. Hirooka, Power generation by and microbial community structure in microbial fuel cell treating animal wastewater, *J. Jpn. Society Water Environ.*, 35 (1) (2012) 19-26.
27. S.B. Pasupuleti, S. Srikanth, S.V. Mohan and D. Pant, Continuous mode operation of microbial fuel cell (MFC) stack with dual gas diffusion cathode design for the treatment of dark fermentation effluent, *Hydrogen. Energy*, 40 (2015) 12424-12435.
28. B. Logan, *Microbial Fuel Cells*. Hoboken. New Jersey, Wiley, 2008.
29. APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st ed. APHA, AWWA, WOCF, Washington DC, USA, 2005.
30. F. Zhang and Z. He, Simultaneous nitrification and denitrification with electricity generation in dual-cathode microbial fuel cells, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 87 (2012) 153-159.
31. R.D. Cusick and B.E. Logan, Phosphate recovery as struvite within a single chamber microbial electrolysis cell, *Bioresour. Technol.*, 107 (2012) 110-115.
32. H. Yokoyama, H. Ohmori, M. Ishida, M. Waki and Y. Tanaka, Treatment of cow-waste slurry by a microbial fuel cell and the properties of the treated slurry as a liquid manure, *Anim. Sci.*, J 77 (2006) 634-638.
33. H. Yan, T. Saito and J.M. Regan, Nitrogen removal in a single-chamber microbial fuel cell with nitrifying biofilm enriched at the air cathode, *Water Res.*, 46 (2012) 2215-224.
34. H. Liu and B.E. Logan, Electricity generation using an aircathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane, *Environ. Sci. Technol.*, 38 (14) (2004) 4040-4046.
35. Y. Lee and N. Nirmalakhandan, Electricity production in membrane-less microbial fuel cell fed with livestock organic solid waste, *Bioresour. Technol.*, 102 (2011) 5831-5835.
36. X. Wang, J. Tang, J. Cui, Q. Liu, J.P. Giesy and M. Hecker, Synergy of electricity generation and waste disposal in solid-state microbial fuel cell (MFC) of cow manure composting, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9 (2014) 3144-3157.

37. F. Fischer, C. Bastian, M. Happe, E. Mabillard and N. Schmidt, Microbial fuel cell enables phosphate recovery from digested sewage sludge as struvite, *Bioresour. Technol.*, 102 (10) (2011) 5824-5830.



STACKS DE MULTICELDAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANAS

1.1 FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1.1 Energías alternativas

Se denominan energías alternativas a aquellas que se obtienen de recursos renovables, procesos o materiales que se generan de manera natural susceptibles de ser transformados en energía productiva para la sociedad. Esta se utiliza de manera alterna a las energías tradicionales, es decir, las que provienen de la quema de combustibles fósiles (Alatorre, 2009). En la Tabla 1 se presentan algunas de las energías alternativas así como una breve descripción de cada una de ellas.

Tabla 1. Energías alternativas (Cabello, 2006)

Energía	Descripción
Solar	<ul style="list-style-type: none"> • Solar térmica: esta se refiere a la captación de energía radiante del sol en forma de calor. • Solar fotovoltaica: esta consiste en la transformación de radiación solar en energía eléctrica directamente, por medio del efecto fotovoltaico.
Hidráulica	Consiste en el aprovechamiento de la energía potencial que contiene un curso de agua y transformarla en energía eléctrica.
Biomasa	Se refiere a la materia orgánica contenida en productos de origen vegetal y animal (incluyendo desechos orgánicos) que puede ser convertida en energía calorífica o eléctrica.
Eólica	Consiste en la transformación de la energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica.
Geotérmica	Se trata de la utilización de la energía calorífica presente en el interior de la tierra para aplicaciones térmicas o bien para la generación de electricidad.
Mareomotriz	Se refiere a la conversión de energía potencial que contienen las mareas, en electricidad.
Nuclear	Consiste en la obtención de energía a partir de la fisión de átomos, generalmente se utiliza uranio-235 y el plutonio-239. En este proceso se genera energía calorífica la cual posteriormente se utiliza para elevar la presión de vapor que mueve una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Las energías tiene diferentes tipos de beneficios tanto económicos, como sociales y principalmente ambientales. Ya que en estas energías las emisiones de gases de efecto invernadero son menores y en algunos casos nulas por ejemplo en la energía eólica, solar,

mareomotriz, etc. Puesto que en los procesos de producción no se queman combustibles fósiles, por lo tanto no participan en la problemática del cambio climático.

Algunas energías que no es posible obtenerlas de manera constante las 24 horas del día, como es el caso de la energía solar, eólica entre otras, es necesario el desarrollo de métodos capaces de almacenar la energía generada por estas tecnologías, ya que el almacenamiento es esencial para garantizar el abastecimiento de energía, pese a que el recurso natural que genera dicha energía decaiga (Chu, 2011).

Contamos con energías renovables en abundancia y el desarrollo de nuevas tecnologías para su aprovechamiento va en aumento con el paso del tiempo. Como es el caso de las celdas de combustible microbianas esta tecnología emergente que puede utilizar materia orgánica presente en el agua residual como sustrato para producir electricidad.

1.1.2 Celdas de combustible microbianas

Las celdas de combustible microbianas son dispositivos electroquímicos, que emplean microorganismos exoelectrógenos para transformar la energía química contenida en un sustrato a energía eléctrica. Esto es factible debido a que ciertos microorganismos, bajo ciertas circunstancias, ceden los electrones generados en su actividad metabólica a un electrodo en lugar de cederlos al oxígeno puesto que es un aceptor natural de electrones. Durante este proceso se degrada el sustrato o combustible que puede ser un compuesto orgánico o agua residual (Revelo, 2013).

1.1.3 Estructura y funcionamiento de las celdas de combustible microbianas

Existen dos tipos de CCM's, la CCM de dos cámaras y la CCM de una sola cámara. En la CCM de dos cámaras, existe una cámara anódica en donde se lleva la degradación microbiana del sustrato por medio de una formación de biopelícula para la liberación de electrones y protones hacia el cátodo y la cámara catódica en donde se lleva a cabo la reducción de un aceptor de electrones (O_2 , NO_3 , SO_4^{2-}) en una solución catolita (Estrada, *s.f*), las cámaras están separadas por una membrana de intercambio de protones (Min *et al.*, 2005). La cámara anódica se mantiene en condiciones anaerobias, mientras que la cámara catódica en contacto con el aire.

Los microorganismos en la cámara anódica oxidan los compuestos orgánicos mediante su metabolismo y durante este proceso de oxidación del sustrato se genera energía celular mediante molecular de adenosín trifosfato (ATP) y electrones los cuales logran salir de la célula a través de una serie de enzimas respiratorias. Posteriormente los electrones liberados son transferidos hacia el ánodo para después fluir hacia el cátodo, como resultado del potencial electroquímico que se produce entre el proceso de respiración enzimático y el aceptor de electrones.

El flujo de electrones de la cámara anódica a la cámara catódica se lleva a cabo a través de un circuito externo que típicamente puede ser un resistor o algún otro dispositivo eléctrico. Para mantener un balance de cargas en el sistema, la transferencia de electrones del ánodo al cátodo debe ir junto con un número igual de protones que atraviesen la membrana de intercambio

protónico, para que en la cámara catódica dichos protones en contacto con el oxígeno produzcan agua (Logan *et al.*, 2006). En la Figura 1 se presenta la estructura de una CCM típica de dos cámaras.

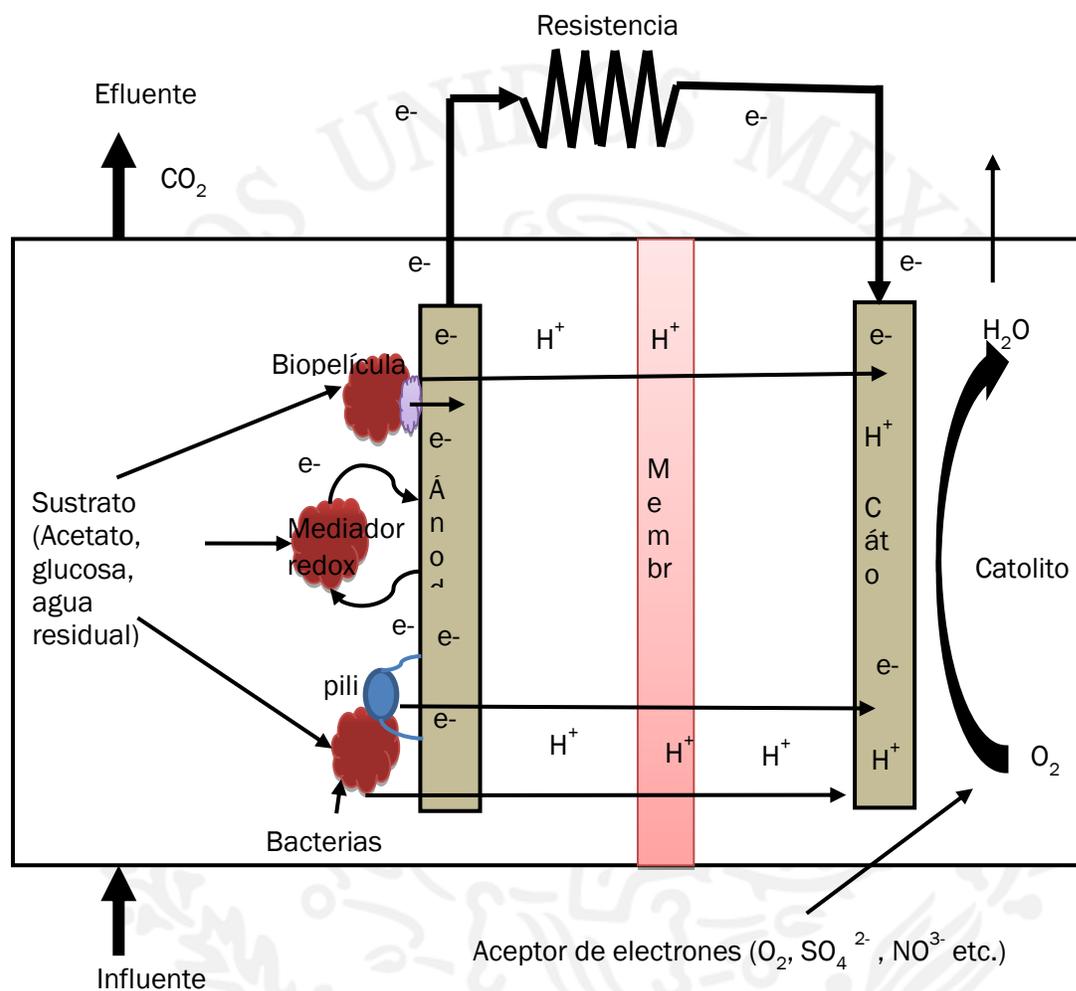


Figura 1. Estructura de una CCM típica de dos cámaras

En la configuración de una sola cámara, el cátodo es expuesto directamente al aire del ambiente con la ausencia de una solución catolita. La arquitectura de la CCM consiste en una cámara anódica y una cámara catódica separadas por una membrana. Los diseños pueden variar desde CCM con dos cámaras a CCM de una sola cámara CCM tubulares y CCM con y sin membranas o con puentes salinos. En la Figura 2 se presenta un diagrama de una CCM de una sola cámara.

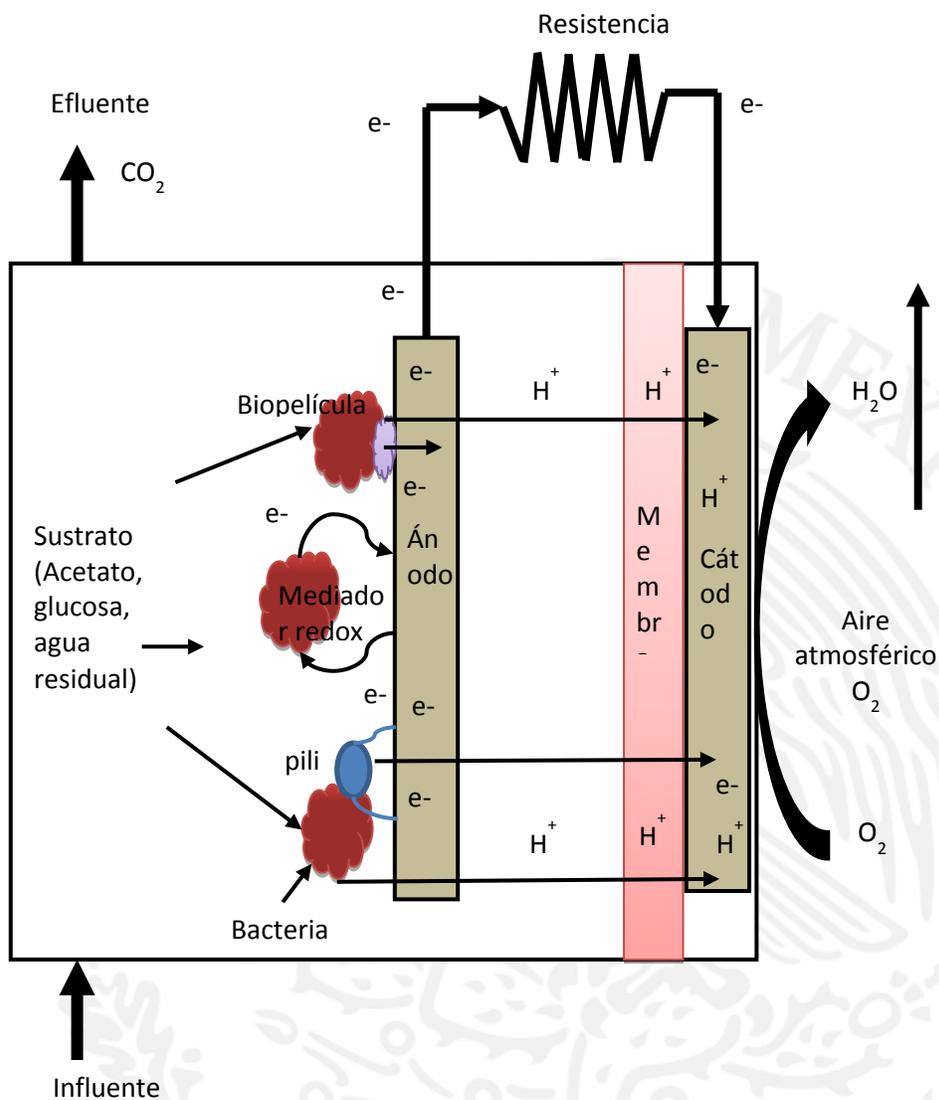


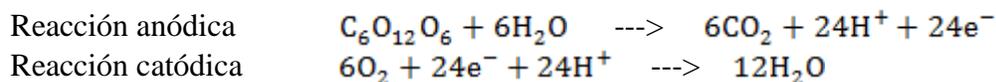
Figura 2. Estructura de una CCM de una sola cámara

Cabe mencionar que a pesar de que se obtiene como producto dióxido de carbono (CO_2) en la oxidación del sustrato, no hay emanación de éste al ambiente, debido a que se utiliza como fuente de carbono para la biomasa, ya que originalmente lo adquirirían de la atmósfera por medio de un proceso fotosintético.

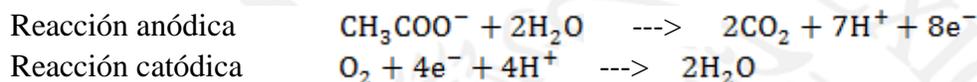
Para la generación de energía en los sistemas bio-electroquímicos se ha utilizado glucosa y acetato, esto nos permite implementar sustratos complejos y amigables para el medio ambiente. Al utilizar la materia orgánica de las aguas residuales como combustible, simultáneamente con la

producción de energía, se consigue una depuración de las aguas contaminadas (Revelo *et al.*, 2013).

Las reacciones que se llevan a cabo en celdas de combustible microbianas que utilizan glucosa como sustrato son las siguientes:



Las reacciones que se llevan a cabo en celdas de combustible microbianas que utilizan acetato como sustrato son las siguientes:



En las reacciones anteriores se muestra la oxidación tanto de la glucosa como del acetato a dióxido de carbono, dichas reacciones se lleva a cabo en la cámara anódica de la celda, produciendo protones y electrones con la actividad catalítica de los microorganismos en condiciones anaerobias.

El electrodo anódico toma el papel de un aceptor de electrones extracelular. El ánodo está relacionado con el crecimiento de una biopelícula formada por microorganismos generadores de electrones el cual juega un papel crucial en el rendimiento de la CCM para la generación de electricidad. Recientemente, se han tomado algunas medidas para mejorar el rendimiento del ánodo, que principalmente está incluido en el diseño de la arquitectura y la modificación de la superficie. El material de electrodo más versátil es el carbón, disponible como placas de grafito compacto, barras o gránulos, así como materiales fibrosos (fieltro, tela, papel, fibras, espuma) y carbón vítreo (Shen *et al.*, 2014).

1.1.4 Mecanismos de transferencia de electrones

La transferencia extracelular de electrones se puede definir como el proceso en el cual los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos son transferidos a la superficie externa de la célula para reducir un aceptor terminal de electrones extracelular (Lovley, 2008). Se han planteado diferentes mecanismos para explicar cómo los microorganismos liberan los electrones al electrodo: Transferencia directa con la participación de citocromos, transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el mismo organismo y transferencia por medio de los nanocables bacterianos o pili.

1.1.4.1 Transferencia directa de electrones al electrodo

Los microorganismos electrogénicos conocidos también como anodofílicos más estudiados son los *Geobacter* y *Rhodoferrax*; los cuales poseen mecanismos internos de transporte de electrones y no requieren la ayuda de mediadores para liberar dichos electrones al ánodo. La producción de electricidad utilizando microorganismos electrogénicos en la CCM tiene algunas ventajas

significativas (Bond y Lovley, 2003). Una de ellas es la completa oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono que estos microorganismos hacen posible y que se traduce en una alta eficiencia coulombica en el proceso (Lovley y Nevin, 2008). Otra ventaja utilizando estos microorganismos es su sustentabilidad a largo plazo. Se han reportado CCM que han sido operadas por más de 2 años sin bajar la producción de electricidad (Lovley y Nevin, 2008).

La reacción que se lleva a cabo en el ánodo sin mediadores se ha estudiado principalmente en los *Geobacteraceae*, en este proceso el ánodo actúa como aceptor final de electrones de manera similar a como lo hacen con los óxidos minerales sólidos que se encuentran en el subsuelo, su hábitat natural. Los *Geobacteraceae* son un grupo de microorganismos capaces de acoplar la respiración anaerobia a la reducción de metales en el ambiente. Debido a su metabolismo son capaces de biorremediar varios metales pesados incluyendo el Uranio (VI), Vanadio (VI) y Cromo (VI); así como biodegradar varios contaminantes orgánicos como los hidrocarburos monoaromáticos. Recientemente dicha especie se ha usado para generar electricidad a partir de desechos orgánicos, ya que su metabolismo único la hace sobresaliente en este campo (Lovley, 2008).

Rhodospirillum rubrum, es también una bacteria de especial importancia en la producción de bioelectricidad, fue aislada de sedimentos del subsuelo como un reductor de Fe (III), oxida azúcares como glucosa, fructosa, sacarosa, lactosa y xilosa a CO₂ con el 80% de la recuperación de los electrones en forma de electricidad. La gran producción de energía se le atribuye a la cantidad de células adheridas a la superficie del electrodo durante largos periodos de tiempo y a su habilidad para mantenerse activa. Por lo que, debido a la conversión de varios tipos de azúcares a electricidad y a su capacidad de mantenimiento sin disminuir su desempeño, *Rhodospirillum rubrum* es un candidato ideal para ser utilizado en las CCM's (Chaudhuri y Lovley, 2003; Du *et al.*, 2007; Risso *et al.*, 2009).

1.1.4.2 Transferencia con ayuda de mediadores

Un mediador es un compuesto que puede entrar en la célula, aceptar electrones de varios acarreadores intracelulares de electrones, salir de la célula en estado reducido y entonces donar los electrones al ánodo. Estos mediadores juegan un papel fundamental en la transferencia de electrones, en aquellos microorganismos que son incapaces de transferir electrones al ánodo directamente.

1.1.4.2.1 Mediadores producidos por el mismo microorganismo

Las bacterias del género *Shewanella* son miembros de las Proteobacterias, son microorganismos acuáticos con una amplia distribución alrededor del mundo: Forman un grupo diverso de bacterias anaerobias facultativas que se encuentran en ambientes marinos y de agua dulce (Hau y Gralnick, 2007). Son fisiológicamente diversos, por lo que pueden tener varias aplicaciones biotecnológicas, como son, la biorremediación de compuestos clorados, radioactivos y otros contaminantes ambientales, así como la generación de energía.

Diversos estudios han sugerido que las células de *Shewanella* tienen la capacidad para producir y secretar acarreadores endógenos de electrones para promover la reducción de óxidos de Fe (III), aunque dichos compuestos no han sido totalmente identificados, han surgido reportes que intentan identificarlos. Recientemente se demostró que este microorganismo produce flavinas que emplean como mediadores para la transferencia de electrones fuera de la célula (Canstein *et al.*, 2007).

El mecanismo de transferencia de electrones hacia la superficie del electrodo, por esta bacteria, no ha sido elucidado, pero son de vital importancia los citocromos localizados en la membrana. Sin embargo, se cree que los nanocables o pili de *Shewanella*, puede facilitar la transferencia de electrones en distancias muy largas. Las aplicaciones de esta bacteria en los aparatos generadores de corriente incluyen el tratamiento de aguas residuales, la conversión de biomasa de desecho y el uso como proveedor de electricidad a sensores ambientales en cuerpos acuáticos como lagos, ríos y océanos, donde los sedimentos ricos en materia orgánica proveen de una fuente de electrones (Hau y Gralnick, 2007).

1.1.4.2.2 Mediadores adicionados exógenamente

En el caso de microorganismos que no son capaces de producir sus propios mediadores y que son incapaces de transferir eficientemente los electrones derivados del metabolismo central afuera de la célula, requieren de la adición de mediadores exógenos que transporten los electrones al ánodo. Las propiedades que se buscan en un compuesto para ser utilizado como un buen mediador son (Bullen *et al.*, 2006):

- a) Un potencial diferente al del organismo para facilitar la transferencia de electrones mientras se mantiene un alto potencial electroquímico en la celda
- b) Un alto coeficiente de difusión en el electrolito y en la membrana celular.
- c) Rápida transferencia de electrones del organismo al electrodo.
- d) Capacidad para repetidos ciclos redox.
- e) No citotoxicidad.
- f) Buenos perfiles de absorción-adsorción-resorción de forma que permanezca en la solución y permanezca disponible para el proceso.

Ejemplos de compuestos de este tipo son; rojo neutro, fenazinas, fenotiazinas, entre otros (Lovley, 2006). Existen varios problemas y desventajas en el uso de mediadores para facilitar el transporte de electrones, entre ellos se encuentra el hecho de que los compuestos utilizados suelen ser tóxicos para los seres humanos, por lo que se debe evitar la utilización de estos compuestos en los procesos de producción de electricidad en lugares que se exponga el medio ambiente a ellos, como puede ser en plantas de tratamiento de aguas residuales, sedimentos acuáticos, entre otros.

1.1.4.2.3 Transferencia por medio de los nanocables bacterianos (pili)

En estudios recientes se ha descubierto la presencia de nanocables en algunos microorganismos electrogénicos. Estos pili se han identificado en bacterias como *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella oneidensis*, una cianobacteria fototrófica *Synechocystis* y un microorganismo fermentador termofílico *Pelotomaculum thermopropionicum* (Gorby *et al.*, 2006).

Existen opiniones encontradas con respecto a la presencia de estas estructuras en las bacterias que pueden reducir óxidos de Fe (III) o Mn (IV). El crecimiento en Fe (III) requiere de la presencia de pili especializados, los cuales son conductores de electrones y se encuentran localizados a un costado de la célula. Estos pili son los encargados de realizar la conexión eléctrica entre la célula y los óxidos de Fe (III) y deben estar en contacto directo con el ánodo de la CCM o formando una red entre las células para facilitar la transferencia de electrones a través de la biopelícula lo mejor posible, pues se sabe que *Geobacter* crece en monocapas y los pili proveen soporte estructural en la formación de dicha biopelícula y son esenciales en la generación de corriente (Lovley, 2006).

1.1.5 Géneros microbianos en las celdas de combustible microbianas

Se han realizado estudios de la diversidad microbiológica en CCM's relacionadas directamente con la generación de electricidad (Rubaba *et al.*, 2013). La caracterización de especies bacterianas electroquímicamente activas busca mejorar el rendimiento de las CCM's (Jung y Regan, 2007).

Estudios han evaluado la capacidad de los microorganismos electrogénicos tratando con cepas puras y poblaciones microbianas evaluando en términos de eficiencia coulombica, tratando con cepas puras de *Geobacter sulfurreducens* y *Rhodoferrax ferrireducens* que generan eficiencias coulombicas de 98%, mientras que tratando con poblaciones microbianas se generan eficiencias coulombicas de 90%. Para estos tratamientos se utilizó como combustible glucosa y acetato (Burgos, 2012). Otros estudios han determinado grupos de microorganismos presentes en las CCM's mediante electroforesis en gel desnaturizante en gradiente (bandas de DGGE), técnica molecular que implica la secuenciación de los genes 16S de los grupos bacterianos más representativos presentes en el compartimento anódico de las CCM's. Se determinó las comunidades bacterianas predominantes como asociadas a los géneros: *Geobacter*, *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Enterobacter*, *Dechlorosoma* (Mocali *et al.*, 2013). Estos organismos interactúan con el ánodo a través de una variedad de procesos directos e indirectos produciendo corriente en diversos grados

Las eficiencias coulombicas pueden variar en gran medida cuando se utilizan inóculos del medio ambiente, tales como aguas residuales, con un máximo de 65-89% después del enriquecimiento microbiano (Rabaey *et al.*, 2003).

1.1.6 Fundamentos de la generación de voltaje

La electricidad se genera en una CCM sólo si la reacción global es termodinámicamente favorable. La reacción puede ser evaluada en términos de la energía libre de Gibbs, expresada en Joules (J), la cual es una medida del trabajo máximo que se puede derivar de la reacción (Newman, 1973; Bard *et al.*, 1985), calculada como:

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln(\pi)$$

Dónde

ΔG_r (J): es la energía libre de Gibbs para las condiciones específicas.

ΔG_r^0 (J): es la energía libre de Gibbs en condiciones estándar: 298.15 K, 1 bar de presión y una concentración de 1 M para todas las especies.

R ($8.31447 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$): es la constante universal de los gases.

T (°K): es la temperatura absoluta

Π : es el cociente de la reacción calculada como las actividades de los productos divididas por las de los reactivos

En las CCM's, es más conveniente evaluar la reacción en términos de la fuerza electromotriz total de la celda (fem), E_{fem} (V), definido como la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo. Esto está relacionado con el trabajo, W (J), producido por la celda. Esta fem proporciona un límite superior para el voltaje de la celda; el potencial real derivado de las CCM's es más bajo debido a varias pérdidas de potencial.

1.1.7 Sobrepotenciales en una celda de combustible microbiana

En la práctica, el voltaje medido a circuito abierto (V_{ca}) es menor que el voltaje teórico (E_{fen}) debido a las pérdidas parásitas ($\eta_{parasitas}$) (procesos que compiten por el sustrato, tales como fermentación, metanogénesis y respiración aerobia) y al inherente crecimiento de la biomasa.

$$V_{ca} = E_{fen} - \eta_{parasitas}$$

Por otro lado, el voltaje medido a circuito cerrado es menor que el voltaje medido a circuito abierto. Estas diferencias son conocidas como sobrepotencial o sobrevoltaje (EG&G Technical Services, 2004). Son definidas como el voltaje necesario para activar las reacciones electroquímicas, a los procesos de transferencia de masa que ocurren en las cámaras y al transporte de cargas en las CCM's (Rismani-Yazdi *et al.*, 2008). El valor de estas pérdidas varía de un sistema a otro.

La siguiente ecuación sirve para calcular el voltaje producido por una CCM cuando se genera corriente (voltaje a circuito cerrado).

$$V_{cc} = V_{ca} - [(V_{act} + V_{conc} + \eta_{Ohomicas})_{cátodo} + (V_{act} + V_{conc} + \eta_{Ohomicas})_{ánodo}]$$

Dónde

V_{cc} : es el voltaje a circuito cerrado o voltaje real de salida

V_{act} : son los voltajes por pérdidas de activación

V_{conc} : son los voltajes por las pérdidas por concentración

η_{ohmicas} : son las pérdidas óhmicas

En la Figura 3 se presentan los diferentes tipos de pérdidas, en las celdas de combustible microbianas.

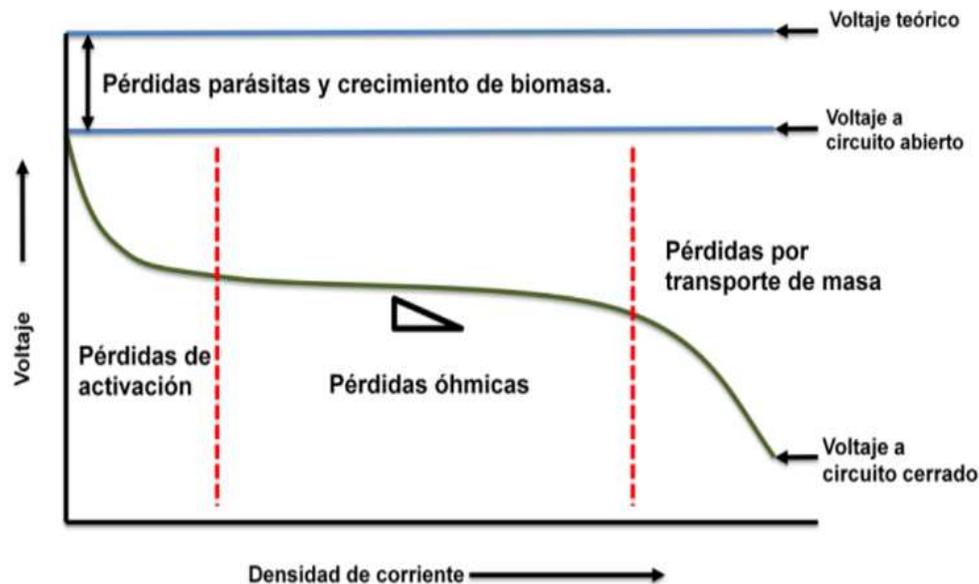


Figura 3. Tipos de pérdidas en las celdas de combustible microbianas

1.1.7.1 Pérdidas de activación

La cinética de las reacciones anódica y catódica está limitada por una barrera conocida como energía de activación, la cual impide que los sustratos reducidos se conviertan a productos oxidados, en el caso del ánodo; y que los sustratos oxidados se conviertan en productos reducidos, en el caso del cátodo. El voltaje empleado para vencer esta barrera es conocido como pérdidas de activación V_{act} .

Las pérdidas de activación dominan a densidades de corriente bajas y presentan una forma exponencial característica en las curvas densidad de corriente-voltaje (Figura 2). La magnitud de las pérdidas de activación depende de la cinética de las reacciones anódica y catódica. La cinética de la reacción se puede mejorar incrementando la temperatura de operación y a través de la formación de una biopelícula adecuada en los electrodos (Logan *et al.*, 2006).

1.1.7.2 Pérdidas óhmicas

Las pérdidas óhmicas son causadas por la resistencia al transporte de iones a través del electrolito y membrana, y la resistencia al flujo de electrones a través de los electrodos, colectores de corriente e interconexiones, y la resistencia de contacto (EG&G Technical Services, 2004). Por lo tanto, las pérdidas óhmicas representan el voltaje que se pierde cuando se transportan las cargas (es decir, los electrones, aniones y cationes) (Rismani-Yazdi *et al.*, 2008). Las pérdidas óhmicas

pueden ser reducidas disminuyendo el espacio entre los electrodos, empleando una membrana con una resistividad baja, disminuyendo la resistencia de contacto, e incrementando la conductividad de la solución al máximo tolerado por las bacterias (Logan *et al.*, 2006).

Las pérdidas óhmicas son más pronunciadas a densidades medias de corriente (la porción lineal del centro de la curva de densidad de corriente-voltaje), donde el voltaje de operación decrece linealmente cuando la corriente se incrementa.

1.1.7.3 Pérdidas por transporte de masa o por concentración

Las pérdidas por transporte de masa, se presentan cuando se agotan los reactivos y se acumulan los productos en el sitio de reacción (se forma un gradiente de concentración), lo que causa que el desempeño de la CCM baje. Las pérdidas por transporte de masa se manifiestan como la caída de voltaje debido al agotamiento de los reactivos y a la acumulación de los productos en el sitio de reacción. Las pérdidas por transporte de masa dominan a densidades de corriente altas y presentan una forma exponencial cóncava característica en las curvas de densidad de corriente-voltaje (Figura 3).

1.1.8 Desempeño eléctrico de las celdas de combustible microbianas

El desempeño eléctrico de una CCM se estudia a partir de las mediciones de voltaje que se realizan en la resistencia externa conectada entre el ánodo y el cátodo y los respectivos cálculos que se derivan de ellas. Su desempeño está relacionado con diversos factores, los cuales son evaluados mediante siguientes parámetros: voltaje, intensidad de corriente eléctrica o corriente eléctrica, potencia, densidad de corriente, densidad de potencia, potencia volumétrica y eficiencia coulombica.

1.1.8.1 Voltaje

Es la diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo (Chang, 2002). Es la magnitud física que en un circuito eléctrico impulsa a los electrones a moverse a lo largo de un conductor medido en Joules por coulombios.

$$V = \frac{w}{q}$$

Dónde

V: es el voltaje (V)

W: es la energía (J)

q: es la carga (C)

1.1.8.2 Corriente eléctrica

Es la circulación de electrones a través de un circuito eléctrico que se mueve del polo negativo al polo positivo de la fuente de suministro de fem.

$$I = \frac{V}{R_{\text{ext}}}$$

Dónde

I: es la intensidad de corriente (A)

V: es el voltaje en volts (V)

R_{ext} : es la resistencia externa en ohms (Ω)

1.1.8.3 Potencia

La potencia indica la cantidad de energía entregada o generada por la CCM en un tiempo determinado. Cuanto mayor sea la potencia mayor es la energía eléctrica suministrada por la CCM.

$$P = V * I = \frac{V^2}{R_{\text{ext}}} = I^2 * R_{\text{ext}}$$

Dónde

P: es la potencia (W) (1 watt = 1 Joules/s)

V: es el voltaje (V)

I: es la corriente eléctrica (A)

R_{ext} : es resistencia externa (Ω)

1.1.8.4 Densidad de corriente

Es la corriente eléctrica producida por unidad de área colonizada del ánodo (logan *et al.*, 2006).

$$J = \frac{I}{a}$$

Dónde

J = densidad de corriente (A/m^2)

I = corriente eléctrica (A)

a = área del electrodo (m^2)

1.1.8.5 Densidad de potencia

Es la potencia producida por unidad de área del ánodo colonizado (Logan *et al.*, 2006).

$$Dp = \frac{V^2}{aR_{\text{ext}}}$$

Dónde

Dp: es la densidad de potencia (W/m^2)

V: es el voltaje (V)

P: es la potencia (W)

a: es el área del electrodo (m^2)

R_{ext} : es la resistencia externa en ohms (Ω)

1.1.8.6 Potencia volumétrica

Es la corriente eléctrica producida por unidad de volumen de la CCM (Logan *et al.*, 2006).

$$P_v = \frac{V^2}{VR_{ext}}$$

Dónde

P_v : es potencia volumétrica en (W/m^3)

V: es el voltaje (V)

P: es la potencia (W)

V: es el volumen total del reactor (m^3)

R_{ext} : es la resistencia externa en ohms (Ω)

1.1.8.7 Resistencia interna

Con relación a la resistencia interna (RI) éste es un parámetro muy importante para caracterizar un generador de corriente como lo es una CCM. Se puede obtener a partir del análisis de las curvas de polarización que se derivan de las mediciones de voltaje en la resistencia externa (Rismani-Yazdy *et al.*, 2011), o por la técnica de espectroscopia de impedancias (Hou *et al.*, 2012), que se fundamenta en la aplicación de una pequeña señal de voltaje a la celda electroquímica y posterior medición de la corriente a través de ella (Ramírez *et al.*, 2009).

1.1.8.8 La eficiencia coulombica

La eficiencia coulombica (EC) es un parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la CCM a partir de un sustrato determinado. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño de diferentes CCM's. El total de Coulombs obtenidos se determina mediante la integración de la corriente en el tiempo, de modo que la eficiencia coulombica para una CCM en el modo de alimentación por lotes, ϵ_{Cb} evaluada durante un período de tiempo t_b , se calcula como (Rabaey *et al.*, 2005a).

$$\epsilon_{Cb} = \frac{M \int_0^{t_b} I(t) dt}{Fb v_{ánodo} \Delta DQO}$$

Dónde

M: es el peso molecular del oxígeno (32 g/mol)

I (t) dt: son coulombios reales generados en la operación de la CCM (C)

F: es la constante de Faraday (96485 C/mol e^-)

t: es el tiempo de reacción o ciclo de operación de la CCM en segundos (s)

b: es el número de electrones intercambiados por mol de oxígeno (4 mol)

$V_{\text{ánodo}}$: es el volumen de líquido en el compartimento del ánodo (L)

ΔDQO : es el cambio de la DQO en el tiempo en mg/L

Para un flujo continuo a través del sistema, la eficiencia coulombica, se calcula sobre la corriente generada en condiciones estables como:

$$\epsilon_{cb} = \frac{MI}{Fbq\Delta DQO}$$

Dónde

q: es la tasa de flujo volumétrico del influente (L/d)

ΔDQO : es la diferencia entre el influente y efluente de la DQO (mg/L)

La eficiencia coulombica se ve disminuida por la utilización de receptores de electrones alternativos por las bacterias, ya sea por los presentes en el medio (aguas residuales) o por aquellos que se difunden a través de la MIP, tales como el oxígeno. Otros factores que reducen la eficiencia coulombica son los procesos competitivos y el crecimiento bacteriano.

1.1.8.9 Curvas de polarización

Las curvas de polarización representan una herramienta importante para el análisis y caracterización de las celdas de combustible (Hoogers, 2003). Una curva de polarización representa el voltaje en función de la corriente (densidad), se mide el voltaje y la corriente se calcula utilizando la ley de Ohm. La curva de polarización debe registrarse tanto hacia arriba como hacia abajo (es decir, de una resistencia externa alta a una baja). Cuando se utiliza una resistencia externa variable para obtener una curva de polarización, los valores de corriente y de potencial deben tomarse sólo cuando se han establecido las condiciones de pseudo-equilibrio. El establecimiento del estado pseudo-estacionario puede tardar varios minutos dependiendo del sistema y la resistencia externa. En la Figura 4 se muestra un ejemplo del trazo de una curva de polarización.

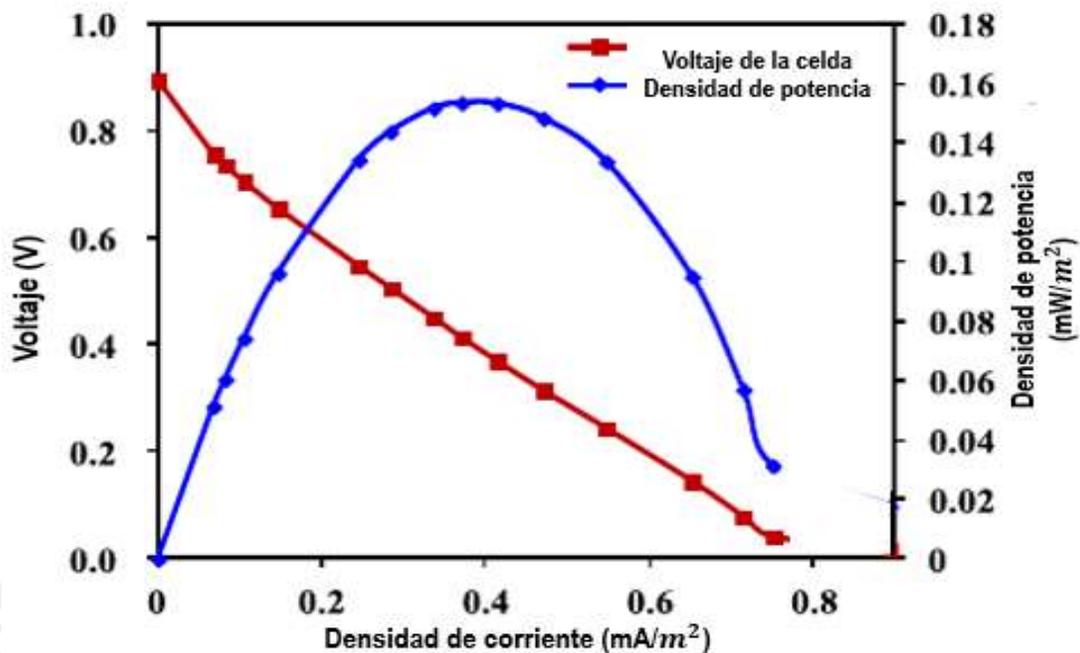


Figura 4. Estructura de una curva de polarización

1.2 ANTECEDENTES

Se cuenta con pocos estudios sobre CCM's apiladas (Multiceldas) ya que la mayoría se han enfocado en la producción de electricidad en una sola celda de combustible microbiana. Esta generación de electricidad es limitada debido a la baja tensión y densidad de corriente. Celdas apiladas en serie o en paralelo o su combinación parece ser una solución para el escalamiento de este tipo de sistemas. Los estudios en la literatura han reportado que el aumento de tensión o corriente de salida se puede lograr mediante celdas apiladas (Aelterman *et al.*, 2006). Sin embargo estos sistemas pueden ser afectados de manera significativa por una o unas pocas unidades de bajo rendimiento, un fenómeno llamado inversión de voltaje (Wang *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2011).

Kim y colaboradores publicaron en 2012 un estudio para el escalamiento de las celdas de combustible microbianas (CCM's) tomando en cuenta la configuración y estudio del fenómeno de caída de potencial en la conexión en serie de celdas con anolito compartido. Para aumentar la escala de las CCM's, propusieron la instalación de varias celdas en un solo reactor, idearon dos modelos diferentes. El primero fue una Multicelda en forma de prisma con tres conjuntos de electrodos de membranas (CEM's) a los cuales nombraron CEM-a, CEM-b y CEM-c. La cual siendo operada a circuito abierto arrojó los siguientes voltajes (VCA): 0.55 V, 0.55 V y 0.56 V respectivamente. Cuando los tres CEM's se conectaron en paralelo, cada uno mostró el mismo

voltaje (0.55 V). Sin embargo cuando los CEM's se conectaron en serie cada uno dio valores de voltaje diferentes incluso menor en comparación con el modo en paralelo.

El segundo modelo fue para verificar el fenómeno de caída de potencial en el modo de conexión en serie, se ideó un sistema de Multicelda básica de combustible microbiano (MB-CCM) usando dos módulos (MB-CCM1 y MB-CCM2) los cuales contaban con dos celdas cada uno. A las celdas unitarias (CU's) de cada módulo se les asignó una letra quedando CU-1a, CU-1b, CU-2a y CU-2b las cuales obtuvieron los siguientes valores de VCA: 0.75 V, 0.73 V, 0.70 V, y 0.78 V respectivamente. Posteriormente se colocó una resistencia de 1000 ohms obteniendo los siguientes valores de voltaje a circuito cerrado (VCC): 0.56 V, 0.54 V, 0.54 V y 0.56 V.

Seguido de las dos pruebas anteriores se experimentó no compartiendo anolito, uniendo los dos módulos y colocando acrílico entre los electrodos del ánodo de UC-A y UC-B y los valores de voltaje a circuito abierto (VCA) desarrollados fueron los siguientes: 0.73 V, 0.73 V, 0.74 V y 0.72 V. Cuando se conectaron en serie los dos módulos MB-CCM1 y MB-CCM2 los VCA fueron de 1.46 V y 1.47 V. Las placas acrílicas se retiraron entonces para permitir que CU-A y CU-B compartieran el anolito, se determinaron nuevamente los VCA y los valores fueron de 0.74 V, 0.61 V, 0.73 V, y 0.59 V. Sus voltajes total medido en el modo en serie que son 0.86 y 0.75 V de MB-CCM1 y MB-CCM2 respectivamente. Se observó degradación del rendimiento no sólo para el modo de circuito abierto, sino también para el modo de circuito cerrado. La densidad de potencia máxima (P_{max}) de MB-CCM1 fue de 1184.80 a 282.63 mW/m^2 después de que se comparte el anolito. Del mismo modo MB-CCM2 también disminuyó de 1084.12 a 206.78 mW/m^2 .

Los resultados mostraron que aumentando la distancia entre el CU-A y el CU-B (de 1 a 8 cm) disminuyó la caída de potencial. Este fenómeno es debido que los iones en el electrodo del ánodo viajan a través del electrolito para reducirse en el cátodo conectado en serie. A una distancia de 1 cm, el porcentaje de caída de potencial de MB-CCM1 y MB-CCM2 fueron 46.76 y 46.41%. Sin embargo, esto disminuyó cuando la distancia se incrementó a 8 cm 45.08 y 43.82%.

Ieropoulos y colaboradores en 2008 compararon el rendimiento de tres diferentes tamaños de celdas de combustible microbianas (CCM's) operadas en condiciones de flujo continuo utilizando acetato como sustrato y mostraron que múltiples unidades de pequeña escala pueden ser la mejor configuración para optimizar la potencia de salida. El material del electrodo utilizado fue velo de fibra de carbono para ambos electrodos ánodo y cátodo.

Las dimensiones internas para cada uno de los tres tamaños fueron: 2.85X1.7X0.3 cm para la pequeña, 5.3X4.3X1.3 cm para la mediana y 14.5X9X5 cm para la grande. El área superficial del electrodo fue 270 cm^2 para el tamaño de celda mediana, para la pequeña 67.5 cm^2 y la grande 5400 cm^2 . Cada CCM consistió en una sola cámara (ánodo) con un lado abierto que fue sellado con el PEM, en la que el electrodo del cátodo O_2 residió expuesto al oxígeno del aire. Los tamaños de membranas fueron 4.8, 18 y 36 cm^2 para el pequeño, mediano y gran tamaño de

CCM. Llevaron a cabo curvas de polarización para CCM's individuales de cada tamaño (chica, media y grande) con volúmenes vacíos anódicos de 6.3, 29.63 y 652.5 mL respectivamente y también para pilas de múltiples celdas microbianas a pequeña escala, en configuración en serie, paralelo y serie-paralelo. De las tres combinaciones, la serie-paralelo demostró ser la más eficiente para aumentar el voltaje y la corriente del sistema.

En operación de flujo continuo se llevaron a cabo las curvas de polarización para cada tamaño de CCM. La CCM de pequeña escala se alcanzó 0.41 mW/m^2 con una densidad de corriente correspondiente de 3 mA/m^2 . El voltaje de circuito abierto de la celda estuvo en consonancia con los otros tamaños de CCM's (es decir, 440 mV). La densidad de potencia producida por la CCM de tamaño mediano fue de 0.35 mW/m^2 con una densidad de corriente de 2.7 mA/m^2 . La densidad de potencias máxima producida en la CCM grande fue 0.21 mW/m^2 con una densidad de corriente fue 1.7 mA/m^2 . Estos valores fueron casi la mitad del pico de densidad de potencia producidos por las pequeñas y medianas CCM's. Dichos datos sugieren que las pérdidas de activación fueron prevaleciendo para valores de densidad de corriente de $0\text{-}3.5 \text{ mA/m}^2$ mientras que las pérdidas óhmicas fueron dominando el resto de la gama de densidad de corriente.

El siguiente estudio por estos autores fue conectar 10 CCM's pequeñas idénticas en serie, en paralelo y en serie-paralelo. Los tres conjuntos de experimentos se llevaron a cabo en flujo continuo y se alimentaron de una fuente común. La densidad de potencia de las CCM's conectadas en serie fue 0.42 mW/m^2 con la correspondiente densidad de corriente de 0.67 mA/m^2 . En comparación con una sola CCM en pequeña escala, el VCA de este experimento fue aproximadamente 1400 mV (3.2 veces mayor). Este valor fue inferior a la cifra teórica predicha, que (por 10 unidades en serie) se espera que sea 4400 mV (10 X 440 mV). La curva de voltaje de la celda sugirió que la pila de 10 CCM's en serie fue limitada principalmente por pérdidas óhmicas.

Cuando los 10 CCM's se conectan en paralelo, la densidad de potencia producida fue 0.75 mW/m^2 . La densidad de corriente correspondiente fue 3.9 mA/m^2 . En comparación con la CCM en pequeña escala el valor de VCA fue idéntico (440 mV), la densidad de potencia fue 1.8 veces mayor y la densidad de corriente fue 1.3 veces mayor. En comparación con una CCM de tamaño medio el VCA otra vez fue idéntico. La curva de voltaje de la pila sugiere que aunque las pérdidas principales que cubren la gama más amplia de la densidad de corriente fueron óhmicas, la pila también sufrió de los bajos niveles de pérdidas de activación.

Para la configuración en serie-paralelo el VCA fue 700 mV, que fue menor que el esperado 880 mV (2X440 mV). La densidad de potencia fue 0.52 mW/m^2 . El pico de densidad de potencia fue 1.27 veces, 1.1 veces y 2.4 veces mayor en comparación con los valores derivados de los tamaños de CCM's pequeña, mediana y gran tamaño, respectivamente.

Cuando las mismas 10 CCM's pequeñas se conectaron en la misma configuración serie-paralelo, pero alimentado desde líneas individuales la densidad de potencia producida fue 2.5 veces mayor que el registrado de la misma configuración en el cual las CCM's tenían el fluido puenteado. El

VCA fue 900 mV, que coincide con el teórico $2X440$ mV. La densidad de potencia fue 1.15 mW/m^2 con una densidad de corriente de 2.3 mA/m^2 . La densidad de potencia producida fue ligeramente superior en 1.25 mW/m^2 y la densidad de corriente de 2.9 mA/cm^2 . Cuando se compara contra una CCM en pequeña escala, esta pila produjo una densidad de potencia 2.74 veces mayor. Los VCA de la configuración de fluido aislado, en general, fueron más alto que el producido a partir del arreglo de fluido en puente.

Ieropoulos y colaboradores en 2013 estudiaron CCM's de pequeña escala, trabajándolas tanto como unidades individuales en cascada o en conjunto como una pila utilizando orina artificial. Las CCM's se construyeron a partir de polímero Nanocure® utilizando la tecnología de prototipado rápido. Los electrodos de ánodo y cátodo fueron de 15 cm^2 de velo de carbono, doblado hacia abajo para encajar en las pequeñas cámaras de 1 mL, separados por una membrana de intercambio catiónico para la transferencia de protones. Un total de 8 CCM's se inocularon usando lodo anaeróbico activado; después de 17 días de modo de alimentación en lotes fueron cambiados a flujo continuo, inicialmente a 0.09 mL/h, y posteriormente a 0.43 mL/h, lo que resulta en HRT de 12.69 min/CCM's.

Las CCM's mostraron un rendimiento estable tras el período de maduración y producción, en los experimentos de polarización, los niveles de potencia máxima fueron de $117 \mu\text{W}$, correspondientes a 974.66 mW/m^3 . Los datos de los experimentos de flujo continuo mostraron una mayor producción de energía, incrementando la concentración de la fuente de carbono/energía dentro de la orina artificial. El trabajo demostró que la orina artificial de composición variable se puede utilizar con éxito para la producción de energía. Cuatro configuraciones eléctricas diferentes se ensayaron para la pila de 8 CCM's, es decir, en serie, en paralelo y dos variantes de combinaciones serie-paralelo. El voltaje de circuito abierto de todas las CCM's conectados en serie fueron 3.1 V, aproximadamente un tercio de la suma de todas las tensiones de CCM's individuales (9 V). Las pérdidas óhmicas fueron dominantes y por lo tanto la principal limitación de rendimiento para esta configuración. La baja tensión a VCA se puede explicar por el fenómeno de "cortocircuito" efecto de los enlaces de fluido entre las CCM's en la cascada, que proporcionan una ruta alternativa para que los electrones fluyan.

EL voltaje a circuito abierto de la configuración de la pila en paralelo fue 1.1 V, que es la media de la tensión de circuito abierto de las CCM's individuales. Esta configuración produjo una corriente máxima de 1.227 mA y el punto máximo de potencia ($271 \mu\text{W}$ en $574 \mu\text{A}$), pero la tensión de funcionamiento más bajo en el punto máximo de potencia (495 mV). Los resultados mostraron que es necesario el uso de una combinación de serie/paralelo. Esto mostró el mejor nivel de tensión de trabajo (642 mV), corriente ($312 \mu\text{A}$) y potencia ($206 \mu\text{W}$).

Zhuang y colaboradores en 2012 llevaron a cabo una pila de CCM's de tipo serpiente de 10 litros mediante 40 unidades de tipo contacto aire cátodo tubulares (PVC) en un patrón de alineación 3D con electrodos de fieltro de grafito. Se operó en serie y alimentó con aguas residuales de la

industria de cerveza, la pila produjo una tensión de circuito abierto de 23 V y una densidad de potencia máxima de 4.1 W/m^3 (en 0.7 A/m^3).

Durante rendimiento a largo plazo (180 días), se llevaron a cabo ensayos electroquímicos para explorar las razones de deterioro en el funcionamiento del sistema de pila. Medidas de voltamperometría cíclica sugirieron que los cátodos, no los ánodos, fueron responsables de la disminución del rendimiento con el tiempo. Después de que la superficie del cátodo se enjuagó con agua, la densidad de potencia producida por el sistema de pila se recuperó de forma instantánea, debido a la disminución de la alcalinización del cátodo y el aumento de la humedad del lado del cátodo. Este estudio proporcionó una configuración óptima de pila de CCM's para la ampliación progresiva hacia aplicaciones a gran escala.

Las características de las aguas residuales fueron DQO 2.120 mg/L, TN 41 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 29 mg/L, SS 650 mg/L, pH 6,69. El modo por lotes se empleó inicialmente y el sistema se cambió al modo continuo cuando se alcanzó una producción de energía estable después de unos 3 días de incubación. El caudal de agua residual fue bombeada con un caudal de 5 L/d. Dos modos de conexión eléctrica se emplearon en las dos pilas de CCM's: serie y serie-paralelo. Para la evaluación a largo plazo, la pila de CCM's en la conexión en serie se hizo funcionar durante un período de tiempo de 180 días. Se consigue una máxima densidad de potencia de 4.1 W/m^3 (65.4 mW/m^2 , 0.7 A/m^3) para el modo de conexión en serie, y de 6 W/m^3 (97.2 mW/m^2 , 6.3 A/m^3) para el modo de conexión en serie-paralelo. En el mismo orden de magnitud como esta pila de CCM's, Dekker y colaboradores en 2009 informaron de una máxima densidad de potencia de 11 W/m^3 a una densidad de corriente de 0.3 A/m^2 de una pila de CCM's de 20 L alimentada con acetato 34 días.

El VCA generado en la pila de CCM's en serie fue de 23 V y la pila de CCM's en serie-paralelo 3.2 V sugiriendo un VCA promedio de 0.58 y 0.64 V para cada unidad de CCM en el modo de conexión en paralelo y el modo de serie-paralelo, respectivamente. Corriente parasitaria cruzada y la inversión de voltaje son las principales causas de la reducción del VCA. Presento altas eficiencias de remoción de DQO y NH_4^+ mayores del 85%. No hubo diferencia significativa entre las dos conexiones en la eliminación.

Liu y colaboradores en 2015 estudiaron los efectos de la forma de conexión de las CCM's en las propiedades de generación de electricidad y el tratamiento de aguas residuales con CCM's de una sola cámara con contacto aire cátodo de lecho fluidizado (0.032 m de diámetro y 0.6 m de altura). El cátodo fue de tela de carbón cubierto de catalizador de Pt/C y el ánodo consistió en UN barra de carbón. Además, estudiaron los efectos de área del electrodo, el volumen de carbono activado y la temperatura en la generación de electricidad. Los resultados obtenidos muestran que el voltaje de circuito abierto máximo de pila conectada en serie (tres celdas de combustible microbianas) fue de alrededor de 2100 mV equivalentes a la suma de las CCM's individuales (700, 820 y 680 mV, respectivamente). La potencia máxima de las de la serie y la pila de combustible solo eran 0.12 y 0.05 mW, respectivamente. En paralelo, el VCA total máximo fue

de 800 mV, que corresponde a la corriente máxima de 0.3 mA. Por otra parte, el máximo VCA se incrementó en un 78% (de 9 mW hasta 14 mW) cuando el área del ánodo aumento de 17 a 68 cm^2 .

La generación de electricidad se pudo aumentar con el aumento de volumen de carbón activado. La demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual simulada disminuyó a 31.75 a partir de 3859 mg/L después de 4 días en el sistema de CCM's. Las CCM's en serie podría funcionar con éxito sin inversiones de tensión. En la conexión en serie, el sistema de celdas de combustible, pueden generar protones a partir de la reacción de electrones en diferentes baterías. Pero el número de los electrones y protones podría ser distinto en diferentes celdas, por lo tanto, el potencial del electrodo podría variar. Cuando potencial del cátodo disminuye y potencial del ánodo se incrementa en la misma hora, se aparece la inversión de voltaje. En la conexión en serie de CCM's, la inversión de tensión es un fenómeno común, pero que no ocurrió en dicho estudio. La razón pudo haber sido que el aire del cátodo ofreció suficiente oxígeno y el agua residual simulada suficiente sustrato orgánico. Por lo tanto, se evitó la diferencia de potencial de electrodo entre diferentes las CCM's.

La potencia máxima de la conexión en serie de las CCM's fue de 0.12 mW y densidad de potencia máxima fue de 11.7 mW/m^2 . Los valores correspondientes una sola CCM fueron 0.05 mW y 14.70.05 mW/m^2 . La resistencia interna fue 10,000 ohms en serie, correspondiente a 3,000 ohms en la CCM de combustible individual. Los resultados mostraron que CCM's en conexión en paralelo no aumentaron la tensión de salida en este trabajo. La potencia máxima de CCM fue de 0.09 mW, y el valor correspondiente de una sola CCM fue de 0.05 mW. La densidad de potencia de las CCM's en paralelo fue de 8.9 mW/m^2 , mientras que el valor correspondiente de una sola CCM fue de 14.7 mW/m^2 . El volumen de llenado de carbón activo aumentó de 24-96 cm^2 , el máximo VCA se incrementó de 1089 mV hasta 1818 mV. La proporción de eliminación de DQO fue del 85% después de ejecutar 4 días. Por lo tanto, la eficiencia del tratamiento de tres CCM's fue mayor que el de solo una CCM.

Rahimnejad y colaboradores en 2012 llevaron a cabo un estudio en una novedosa pila de CCM's. Donde utilizaron *Saccharomyces cerevisiae* como un biocatalizador activo para la generación de energía. La pila de CCM's consistió de cuatro unidades que fue fabricada y operada en modo continuo. Como sustrato se utilizó glucosa pura con una concentración de 30 g/L en alimentación por lote junto con 200 $\mu\text{mol}/\text{L}$ de rojo natural (NR) como mediador en el ánodo y 400 $\mu\text{mol}/\text{l}$ de permanganato de potasio como agente oxidante en el cátodo. Se empleó la técnica de polarimetría para analizar las celdas individuales, así como el funcionamiento eléctrico de la pila. El rendimiento de la pila de CCM's se evaluó con respecto a la cantidad de generación de electricidad. La máxima generación de corriente y la potencia de la pila de CCM's fue de 6447 mA/m^2 y 2003 mW/m^2 respectivamente. La eficiencia coulombica fue de 22% en la conexión en paralelo. El alto rendimiento eléctrico de las CCM's se atribuyó al crecimiento uniforme de microorganismo en la superficie del grafito que fue confirmado por las imágenes obtenidas por microscopio de fuerza atómica con una ampliación de 5,000x.

La pila cúbica de CCM's se fabricó a partir de material de plexiglás se ensambló a partir de cuatro ánodos individuales y tres compartimentos de cátodos. El volumen de cada cámara (ánodos y cátodos cámaras) fue de 460 mL con un volumen de trabajo de 350 mL. Los electrodos para todas las CCM's fueron placas de grafito. Con membrana de intercambio de protones Nafion 117 para separar dos compartimentos. El voltaje de las CCM's aumentó gradualmente y alcanzó a 847 mV después de 38 h. Los datos fueron registrados por la duración de 75 h de funcionamiento. Cuando las CCM's se estabilizaron las curvas de polarización se obtuvieron por medio del ajuste de la resistencia externa para determinar la variación de la tensión con respecto a la densidad de corriente.

La energía generada máxima y densidad de corriente fueron de 241 mW/m^2 y 930 mA/m^2 respectivamente. Una vez voltaje estable se estableció en cada celda, la operación de carga se cambia al modo continuo a un TRH de 6 horas. La densidad de corriente y la potencia máxima generada fue de 2100 mA/m^2 y 490 mW/m^2 , respectivamente. En este trabajo, cuatro ánodos y tres cámaras de cátodos se conectaron entre sí para hacer una pila de CCM's. Todos los ánodos, a excepción del primer y último ánodo (CCM 1 y 7), se conectan con dos cátodos. Para mejorar la tensión o corriente, todas las celdas individuales se conectan en serie y en paralelo, respectivamente. Estas configuraciones especiales llevaron a un VCA de 3230 y 1005 mV para conexión en serie y la conexión en paralelo, respectivamente.

Wang y Han en 2008 estudiaron una pila de CCM's de una sola cámara que comprendía cuatro unidades con carbono vítreo reticulado como electrodos. Por separado, cada unidad generó una densidad de potencia volumétrica de 26.2 W/m^3 a 5.8 mA o 475 mV . La eficiencia coulombica total fue de 40% para cada unidad. La conexión en paralelo de cuatro unidades produjo el mismo nivel de salida de potencia (P_{max} de 22.8 W/m^3 a 27 mA), que era aproximadamente cuatro veces mayor que la de una sola unidad.

La conexión en serie de cuatro unidades sólo generó una potencia de salida máxima de 14.7 W/m^3 a 730 mV , que fue menor que al valor esperado. Esta pérdida de energía pudo ser causada por el flujo de corriente lateral entre dos unidades, en particular en el centro del sistema. El reactor también operó en modo continuo con una velocidad de flujo de 0.7 mL/min y una DQO en el influente de 128 mg/L . La eliminación total de esta fue 73.4% bajo esta condición. Los VCA de las cuatro unidades se mantuvieron similares con un promedio de 624 mV .

Kim y colaboradores en 2013 llevaron a cabo un estudio de una celda de combustible microbiana de múltiples electrodos de membrana instalados. Dicha CCM fue operada para obtener electricidad a partir de materiales orgánicos. En el reactor se instalaron cuatro membranas y la solución de electrolitos se compartió. Cada electrodo de membrana presentó $0.68 \pm 0.02 \text{ V}$ en voltaje a circuito abierto y $0.34 \pm 0.01 \text{ V}$ en el voltaje de circuito cerrado (VCC) a 1 kW de resistencia externa. Se observó la mejora de voltajes poco después de la conexión en serie ($2.06 \pm 0.03 \text{ V}$ como VCA y $0.73 \pm 0.01 \text{ V}$ como VCC, respectivamente). El VCA se aumentó idealmente a la suma de VCA de las celdas unitarias, mientras que las pérdidas de tensión se

generaron en conexión en serie en el modo de VCC. A pesar de las pérdidas de tensión que se generaron en VCC, la conexión en serie entre cada conjunto de membrana perteneciente al reactor individualmente aumentó la tensión de salida de la celda de múltiples electrodos de membranas compartiendo la solución electrolítica.

El reactor fue de construcción en forma rectangular, con un espacio interno de 530 mL. Los conjuntos de electrodos de membranas se componen de un electrodo de ánodo separado con un electrodo de cátodo hecho de tela de carbono, y una membrana de intercambio catiónico Nafion. El tiempo de retención hidráulico fue de 6 días a 34.57 ± 0.18 horas. Después de la inoculación microbiana en el electrodo, las CCM's fueron alimentadas con agua residual artificial con glucosa.

Yazdi y colaboradores en 2015 presentaron una pila de CCM's de operación fácil que consistió en una base común y varias unidades enchufables, que era posible conectar en paralelo o en serie para la generación de energía eléctrica durante el tratamiento de residuos en fosas sépticas. Los estudios de laboratorio mostraron que tal configuración puede obtener una densidad de potencia de 142 ± 6.71 mW/m² cuando 3 unidades están conectadas en paralelo y el cálculo preliminar indica que un sistema que cuesta aproximadamente US \$ 25 puede alimentar un 6 vatios de luz LED durante 4 horas por día con un gran potencial de mejora. Construyeron tres unidades de CCM's en columna de cátodo de aire sin catalizadores metálicos para envolver el conjunto de ánodo de tela de carbón activado. Se utilizó agua residual sintética y se operó en alimentación por lote.

Las unidades fueron operadas por separado bajo una resistencia externa de 100 ohms sin necesidad de conectarse entre sí, cuando se obtuvieron 3 ciclos de generación de tensión repetibles, las 3 unidades de CCM's (1, 2 y 3) se conectaron en serie o en paralelo y se operado por 3 meses más. La CCM 2 produjo la más alta tensión de salida con 0.23 V bajo una resistencia externa 100 ohms, y cada lote de 4-5 días. Las curvas de densidad de potencia muestran que la potencia máxima de salida fue 158 ± 10.01 mW/m². En comparación, las salidas de potencia de CCM 1 y CCM 3 eran más bajos. La potencia de salida máxima de CCM 1 y CCM 3 fue de 80 ± 6.23 mW/m² y 126 ± 2.42 mW/m², respectivamente. Debido a que las 3 CCM's de columna utilizaron el mismo inóculo y compartían la misma solución de anolito y se expusieron a la misma corriente de aire, las diferencias de rendimiento se cree que debido a las variaciones de electrodos durante el proceso de fabricación, tales como la aplicación desigual de la capa de difusión del cátodo causando transferencia de masa ineficaz. Debido al tipo sándwich hermético de la estructura, no fue posible probar potenciales catódicos individuales.

La eliminación de la DQO fue $94.5 \pm 2.67\%$ en el reactor común, y la eficiencia de Coulomb para CCM2, CCM3, y CCM1 fue de 35.6%, 20.1% y 17.3%, respectivamente. Las curvas de polarización mostraron que los 3 CCM's individuales presentan voltajes de circuito abierto casi idénticos (VCA), pero la CCM 1 muestra un VCA menor que la CCM 2 y la CCM 3 y por lo tanto menor densidad de potencia. Esto confirma que CCM 1 limita el rendimiento global del

sistema cuando se conecta en serie. Se obtuvo un VCA mucho mayor de 1.10 V cuando las 3 unidades se conectaron en serie, mientras que se obtuvo un VCA similar (0.57 V) en las CCM's individuales cuando se conectaron en paralelo, lo que está de acuerdo con la hipótesis de cómo diferentes conexiones afectar a la pila de salida de potencia.

En términos de densidad de potencia, cuando las unidades se conectaron en serie, se obtuvo la densidad de potencia máxima de $97.5 \pm 7.5 \text{ mW/m}^2$, y este número se aumentó a $142 \pm 6.7 \text{ mW/m}^2$ cuando se conectan en paralelo. La conexión en paralelo mostró potencia similar en comparación con la CCM 2 de mejor rendimiento, pero la salida de corriente absoluta (4,85 mA) a la potencia pico era 2.6 veces mayor que la CCM 2 individual (1,86 mA). En general, la conexión en paralelo mostró la menor resistencia interna ($395 \pm 1.16 \text{ ohms}$), como 27% más baja que la conexión en serie. La conexión en paralelo permite una mayor área de superficie para el flujo de electrones y por lo tanto reduce potencialmente el sobrepotencial del electrodo.

Cada ciclo de alimentación por lotes normalmente duró alrededor de 4-5 días, y las remociones de DQO en conexión en paralelo y la conexión en serie fueron del 95% y 87.5%, respectivamente, lo que resulta en las eficiencias coulombicas 22% y 8%, respectivamente.

Zhuang y Zhou en 2009 presentaron un estudio sobre un nuevo diseño de pila escalable de CCM's de tipo aire cátodo que comparte un conducto de alimentación de combustible común. Dos CCM's individuales se conectaron eléctricamente en serie por medio de cables de metal e hidráulicamente unidos por flujo sustrato conductor, se observó el fenómeno de degradación del rendimiento. La tensión de circuito abierto (VCA) fue bajo y el comportamiento de CCM's apiladas fue más bajo de lo que se esperaba. Dos CCM's de tipo contacto aire cátodo tubulares se conectaron en serie. Cada CCM fue construida con un tubo de plástico de 0.2 cm de espesor de cloruro de polivinilo. El tubo de PVC sirvió como el marco de la cámara anódica. Un conjunto tubular de membrana cátodo fue utilizado en este experimento por tela de fibra de carbono de prensado en caliente con un catalizador de MnO_2 . Con una misma membrana de intercambio de cationes.

La CCM 1 y 2 produjeron VCA de 652.2 y 654.1 mV, respectivamente. Cuando las dos CCM's estaban conectados eléctricamente, los VCA's para cada celda se mantuvo en un potencial similar, y el VCA de las CCM's gemelas casi igualaron a la suma matemática de las CCM's individuales, lo que demuestra la exitosa conexión en serie. Se encontró que cuando la válvula de bola estaba abierto (es decir, en conexión hidráulica), el VCA en las CCM's se reducía de manera significativa a 378.7 y 586.3 mV, respectivamente. El fenómeno de la caída de tensión fue consistente e instantáneo. Cuando se bloqueó la conexión hidráulica (es decir, cierre la válvula), los VCA's de ambas CCM's se recuperaron. Cuando se mantuvieron las CCM's en doble conexión hidráulica pero eliminado los hilos metálicos entre las células individuales, los potenciales de tensión se reanudaron a los valores de estado no conectado. En resumen, una disminución del rendimiento de la CCM ocurre en el caso de las dos conexiones de fluidos eléctricos y de sustrato.

An y colaboradores en 2015 presentaron un estudio, mostrando claramente que la inversión de voltaje se produce en CCM's apiladas si la densidad de corriente se mantiene por debajo de la corriente crítica donde el ánodo y el potencial del cátodo en una unidad inferior se vuelven idénticos, con una resistencia externa colocada entre las CCM's individuales. Definieron la resistencia umbral ($R_{\text{límite}}$) que permite a la densidad de corriente por debajo de la corriente crítica en CCM's apiladas, y demostraron la validez de la $R_{\text{límite}}$ teórica y experimentalmente. La inversión de voltaje se controló en una CCM apilada equipada con $R_{\text{límite}}$ por la cual la densidad de corriente en la CCM apilada se mantuvo por debajo de la corriente crítica. En comparación, una CCM apilada sin $R_{\text{límite}}$ enfrenta inversión de voltaje sobre la corriente crítica. La pérdida de energía en la $R_{\text{límite}}$ es comparable a la pérdida de energía con otros métodos de control de tensión, como los métodos pasivos o activos. Sin embargo, el enfoque $R_{\text{límite}}$ es una manera simple, de bajo costo, de control de inversión de voltaje, especialmente para las CCM's pequeñas (<50 mL).

Dichos autores reunieron dos CCM's idénticas (denotadas como las Unidades 1 y 2) compuestas de vidrio pyrex. Cada CCM se compuso de un ánodo y una cámara de cátodo, y el volumen de trabajo de cada cámara fue de 29 mL. Tela de carbono sin catalizadores metálicos se utilizó como el ánodo y el cátodo en las CCM's. El área de la superficie proyectada de los dos electrodos fue de 9.6 cm^2 . Se utilizó membrana de intercambio de cationes y se colocó entre los electrodos para evitar fugas de solución. Se colocó un electrodo de referencia Ag /AgCl con el fin de controlar el potencial del ánodo. La tensión de circuito abierto (VCA) cuando las unidades no estaban apiladas fue casi idéntica a 0.457 V. La densidad de corriente máxima en la unidad 1 fue del $44.2 \pm 2.64 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a la tensión de trabajo de 25 mV, mientras que en la unidad 2 fue de $69.7 \pm 0.42 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a la tensión de trabajo de 38 mV.

Zhang y Angelidaki en 2012 llevaron a cabo un estudio de una un CCM auto-sumergible con una cámara catódica y dos ánodos en un reactor de cristal, donde utilizaron para los electrodos del ánodo y el cátodo tela de carbono y una membrana de intercambio de protones. Se operó en modo por lote con TRH de 6 días, alimentada con sedimentos de un lago y una mezcla de acetato. Se observó la generación de energía estable después de tres meses de enriquecimiento. Los voltajes a circuito abierto fueron de 1.12 V y la densidad de potencia máxima fue de $294 \text{ mW}/\text{m}^2$ o la densidad de potencia volumétrica de $59 \text{ W}/\text{m}^3$ dichos valores en conexión en serie.

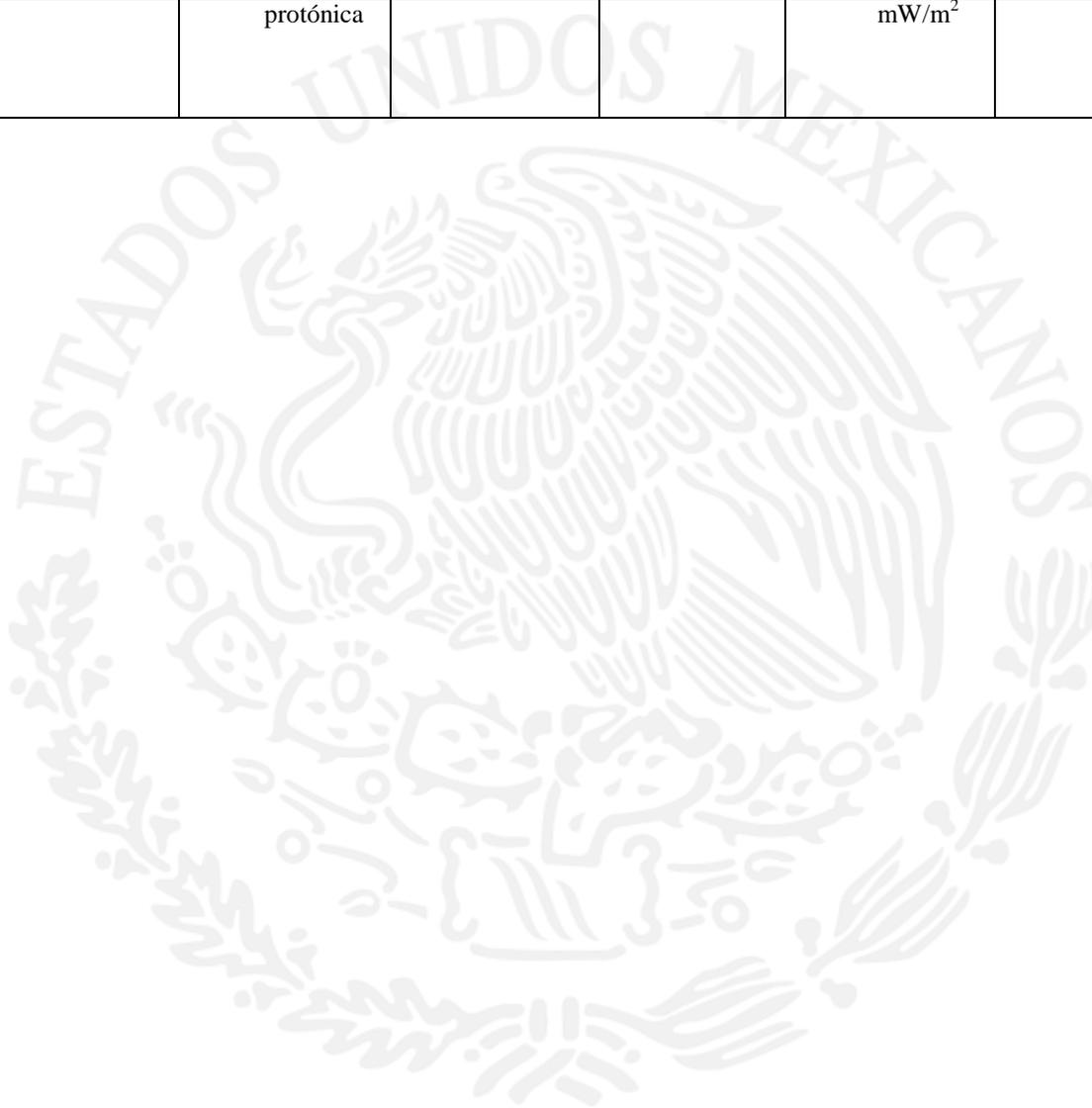
En la Tabla 2 se muestran un resumen de los resultados obtenidos en los estudios mencionados anteriormente.

Tabla 2. Estudios realizados en CCM's apiladas (Multiceldas)

Configuración de Multicelda	Material de electrodos y tipo de membrana	Sustrato, operación, TRH y % remoción de DQO	No. de CCM's y tipo de conexión	Máximo Voltaje, densidad de corriente y densidad de potencia	Referencia
CCM's de una sola cámara	Fibra de carbón, membrana de intercambio de protones	Acetato continuo	10 CCM's, serie, paralelo y serie-paralelo	Serie-paralelo VCA 900 mV, 1.15 mW/m ² y 2.3 mA/m ²	Ieropoulos <i>et al.</i> , 2008
CCM's tubulares aire-cátodo	Fibra de carbono, membrana de intercambio catiónico	A.R industria cervecera, Continuo, 24 horas	2 CCM's, VCA	654.1 mV	Zhuang y Zhou, 2009
CCM's en forma de prisma con tres conjuntos de electrodos de membranas (CEM's)	Tela de carbono, membrana de intercambio catiónico.	Acetato, lote, 10 días	1 CCM's VCA	550 mV	Daehee Kim <i>et al.</i> , 2012
CCM's en módulos	Tela de carbono, membrana de intercambio catiónico.	Acetato, continuo, 15 min	4 CCM's, serie	VCA 730 mV, VCC (1000 ohms) 560 mV, 1184.80 mW/m ²	Daehee Kim <i>et al.</i> , 2012
CCM's en cascada	Velo de carbono, membrana de intercambio catiónico	Orina artificial, continuo, 12.69 min	8 CCM's, serie, paralelo y serie-paralelo	Paralelo 3.1 V, 974.66 mW/m ³	Ieropoulos <i>et al.</i> , 2013
CCM's de tipo serpentín contacto aire cátodo tubulares	Filtro de grafito	A.R de la industria cervecera, continuo, 2 días 85%	40 CCM's, serie y serie-paralelo	Serie VCA 23 V, 4.1 W/m ³ en 0.7 A /m ³	Zhuang <i>et al.</i> , 2012
CCM's de una sola cámara con contacto aire cátodo de lecho	Tela de carbón y barra de carbón	Agua residual, lote, 4 días, 85%	3 CCM's, serie y paralelo	Serie 2100 mV 11.7 mW/m ²	Liu <i>et al.</i> , 2015

Configuración de Multicelda	Material de electrodos y tipo de membrana	Sustrato, operación, TRH y % remoción de DQO	No. de CCM's y tipo de conexión	Máximo Voltaje, densidad de corriente y densidad de potencia	Referencia
fluidizado					
CCM's con <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Placas de grafito, membrana de intercambio de protones	Glucosa, continuo, 6 horas	4 CCM'S	VCA 842 mV, 2100 mA/m ² y 490 mW/m ²	Rahimnejad <i>et al.</i> 2012
CCM's de una sola cámara	Carbono vítreo reticulado	Agua residual, continuo, 73.4 %	4 CCM's, serie	14.7 W / m ³ a 730 mV	Wang y Han, 2008
CCM de múltiples electrodos de membrana	Tela de carbono, membrana de intercambio catiónico Nafion	A.R sintética, lote, 6 días	Serie	VCA 2.06 V y VCC 0.73 V	Kim <i>et al.</i> , 2013
CCM's enchufables en columna cátodo de aire	Tela de carbón	A.R sintética, lote, 5 días, 94.5 %	3 CCM's, serie y paralelo	Paralelo 142 mW/m ²	Yazdi, Alzate-Gaviria y Ren, 2015
CCM's tubulares de tipo aire cátodo	Tela de carbono, membrana de intercambio de cationes	Agua residual, continuo	2 CCM's, serie	VCA 652.2 mV	Zhuang y Zhou, 2009
CCM's dos cámaras	Tela de carbono, membrana de intercambio de cationes	Agua residual	2 CCM's	VCA 457 mV, 69.7 μ A/cm ²	An, Sim y Lee, 2015
CCM's auto sumergible	Tela de carbono, membrana de intercambio	Sedimentos de un lago y una mezcla de acetato	2 CCM's, VCA, serie	VCA 0.63 V Serie 1.12 V 294	Zhang y Angelidaki, 2012

Configuración de Multicelda	Material de electrodos y tipo de membrana	Sustrato, operación, TRH y % remoción de DQO	No. de CCM's y tipo de conexión	Máximo Voltaje, densidad de corriente y densidad de potencia mW/m ²	Referencia
	protónica				



OBJETIVO DE LA PRIMER ETAPA

2.2.1. General

Diseñar, construir y poner en operación dos sistemas (stacks o multiceldas) de celdas de combustibles microbianas.

3.1 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el presente estudio se montaron dos sistemas a escala laboratorio con diferente tipo de configuración de celdas de combustible microbianas. El sistema con 20 CCM's correspondió a la Multicelda 1 y el sistema con 40 CCM's a la Multicelda 2.

3.1 Estructura del sistema de la Multicelda 1

La Multicelda 1 está construida de material acrílico compuesta por cinco módulos conectados entre sí formando un sistema de 20 unidades ya que cada módulo contiene cuatro monoceldas.

3.1.1 Cámara anódica

El volumen de la cámara anódica en cada CCM es de 300 mL (reactor anaerobio) con las siguientes dimensiones 8x7.5 por 5 cm de altura. Esta cámara tiene como ánodo un fieltro de carbono con un área de 25 cm^2 . Cuenta con una entrada y una salida de agua residual la cual se conduce a la siguiente celda y así sucesivamente hasta llegar al efluente de la última CCM (celda 20) del último módulo (modulo 5) a través de mangueras externas puesto que el sistema solo se intercomunica por medio de estas.

3.1.2 Cámara catódica

En la cámara catódica se colocó una membrana de intercambio catiónico y seguido de esta se colocó el cátodo; para el cual se utilizó tela de carbono impregnado con 0.5 mg/cm^2 de dióxido de plomo (PbO_2) como catalizador. En el cátodo se insertaron tornillos de latón con el objetivo de recibir los electrones provenientes del ánodo y distribuirlos a través del cátodo el cual se expuso al aire con la finalidad de recibir oxígeno del ambiente en forma pasiva.

En la Figura 5 y Figura 6 se muestra la estructura de un módulo de CCM's del sistema así como una fotografía del sistema completo en operación a voltaje a circuito abierto.

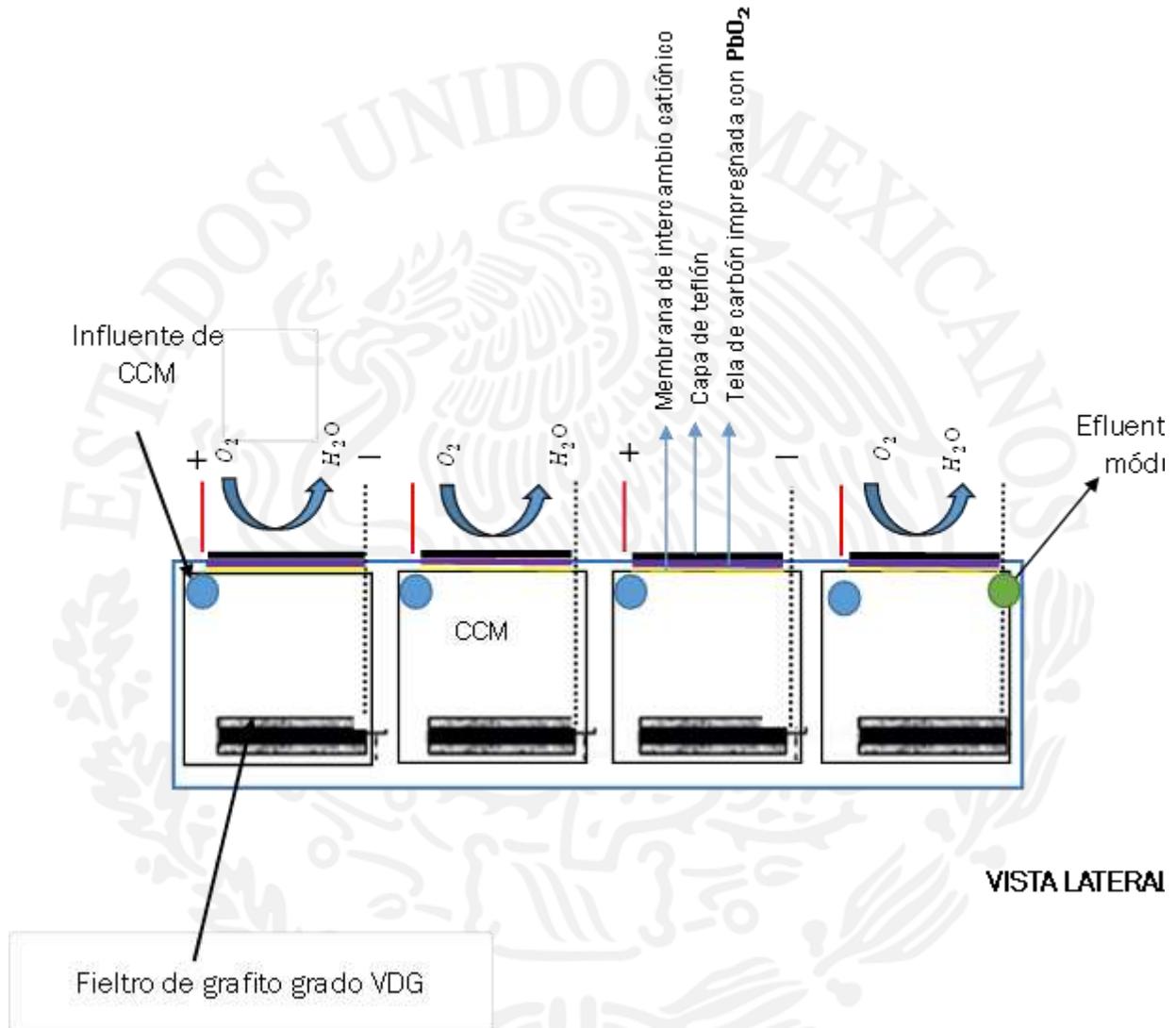


Figura 5. Sistema de multiceldas 1



Figura 5. Sistema de Multicelda 1 conformado por 20 CCM's

Las CCM's se enumeraron en cada uno de los cinco módulos del 1 al 20, siendo la celda no. 1 el influente del sistema y la celda no. 20 el efluente. En el sistema no se llevaron a cabo conexiones en serie ni en paralelo, solo se evaluó el comportamiento de cada celda de combustible microbiana bajo condiciones de voltaje a circuito abierto y con carga resistiva de 1000 ohms a diferentes tiempos de retención hidráulicos.

3.2 Estructura del sistema de la Multicelda 2

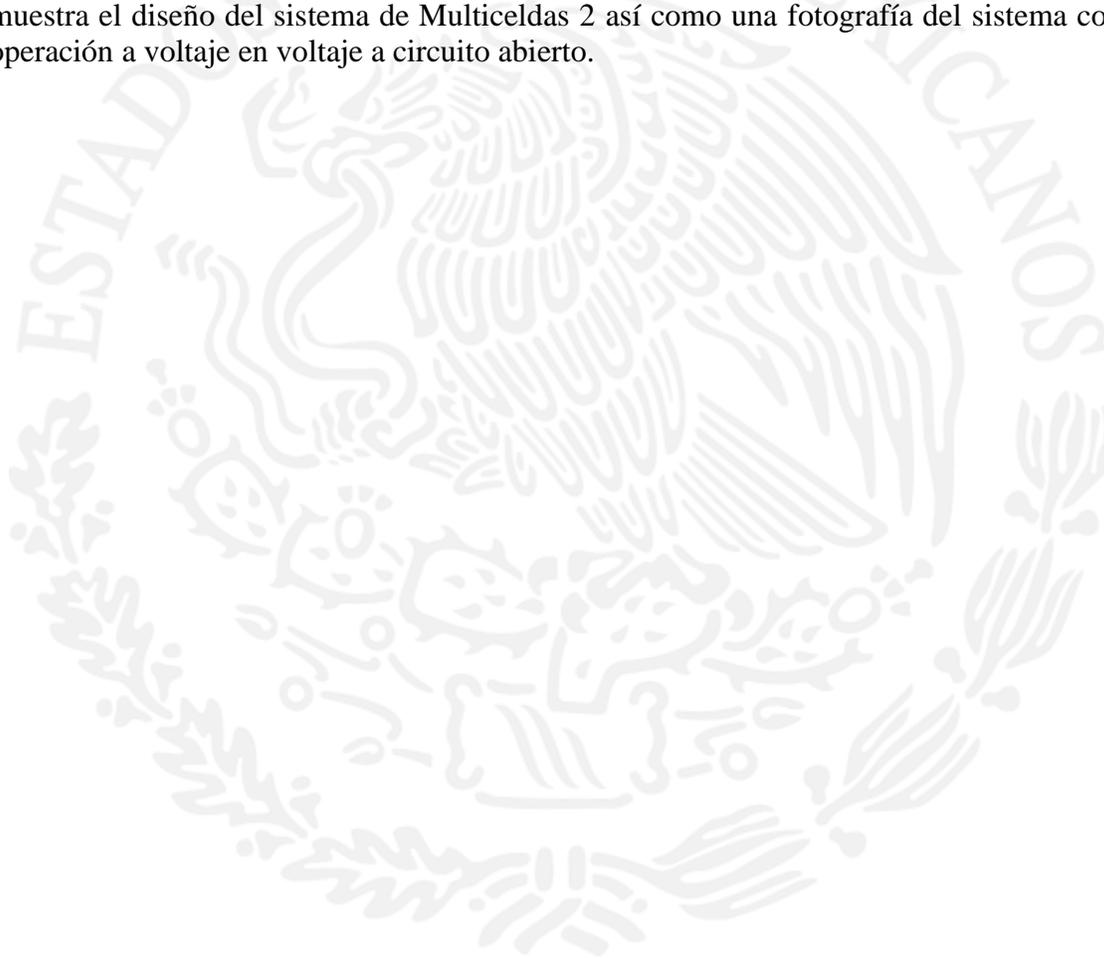
El sistema de la Multicelda 2 es un solo reactor y al igual que el sistema 1 también fue construido de acrílico con un volumen total de 16 litros, está dividido mediante dos separadores de acrílico en cuatro secciones y en cada una de estas contiene 10 CCM's por lo tanto 40 CCM's de una sola cámara (contacto aire-cátodo) forman este sistema. Los separadores de las secciones de la Multicelda están perforados con el objeto de mantener a todas las celdas en contacto con el agua residual de manera uniforme a través de las 40 cámaras anódicas del reactor, es decir, las 40 CCM's comparten el electrolito. El agua residual entra a la CCM no. 1 en la primera sección con un flujo descendente, pasa a través de la segunda sección con un flujo ascendente y está a la tercera sección con un flujo descendente para finalizar en la cuarta sección con un flujo ascendente teniendo el efluente final en la CCM no. 40.

3.2.1 Cámara anódica

El volumen de la cámara anódica de cada CCM es de 400 mL, cada CCM contiene tres ánodos de fieltro de carbono con un área de 25 cm^2 cada uno, por lo tanto suman un área superficial en total de 75 cm^2 .

3.2.2 Cámara catódica

Para separar la cámara anódica del cátodo de las CCM's se colocó una membrana de intercambio catiónico y seguida de esta el cátodo para el cual se utilizó tela de carbono con un área de 25 cm^2 que fue impregnado con 0.5 mg/cm^2 de dióxido de plomo (PbO_2). Se expuso al aire con la finalidad de recibir oxígeno del ambiente en forma pasiva al igual que el sistema 1 y sobre la superficie de la tela de carbono se le colocó una capa de teflón. En la Figuras 7 y Figura 8 se muestra el diseño del sistema de Multiceldas 2 así como una fotografía del sistema completo en operación a voltaje en voltaje a circuito abierto.



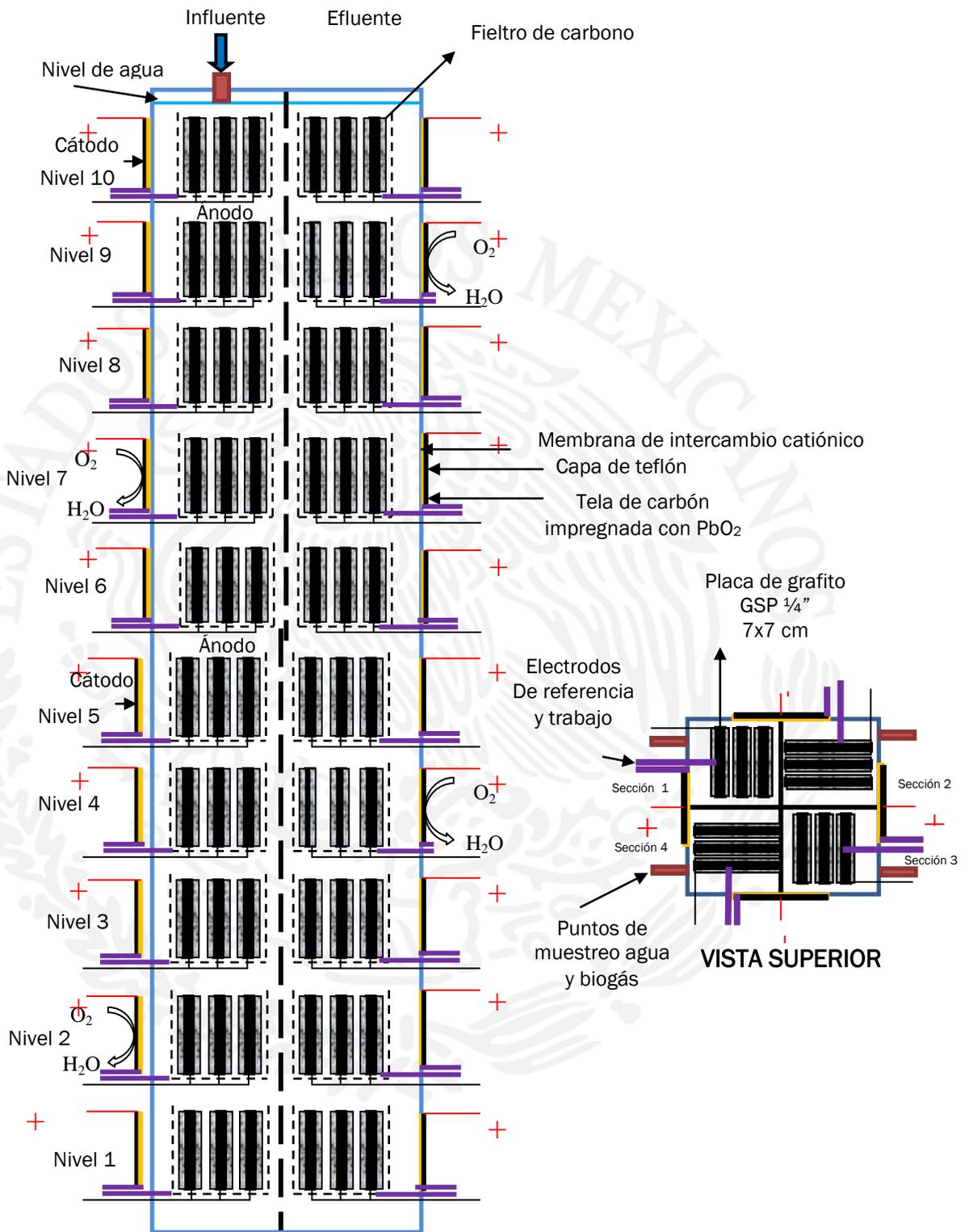


Figura 7. Sistema de multiceldas 2

Influente del
sistema



Efluente del
sistema

Figura 8. Sistema de multiceldas 2

Las CCM's se enumeraron en cada una de las cuatro secciones del 1 al 40, siendo la celda no. 1 el influente y la celda no. 40 el efluente del sistema. El sistema 2 tampoco se llevaron a cabo conexiones en serie ni en paralelo, al igual que el sistema 1 solo se evaluó el comportamiento de las 40 CCM's bajo condiciones de voltaje a circuito abierto y con cargar resistiva de 1000 ohms a diferentes tiempos de retención hidráulicos.

3.3 Operación de los sistemas de Multiceldas

Antes del arranque de los dos sistemas de Multiceldas, todas las CCM's fueron inoculadas con biomasa anaerobia, los ánodos de cada celda se sumergieron en una mezcla de agua residual más inóculo concentrado de manera independiente. El objetivo de esta técnica fue desarrollar y acelerar la formación de biopelícula sobre el ánodo. Una vez desarrollada, los ánodos se colocaron en sus respectivas cámaras anódicas del reactor.

Los dos sistemas de Multiceldas se alimentaron con agua residual de tipo municipal proveniente del influente de la planta de tratamiento de aguas residuales “El texcal” ubicada en el municipio de Jiutepec en Morelos, México. Los sistemas se trabajaron en continuo durante toda la etapa experimental. Se establecieron dos etapas en la cuales los sistemas estuvieron bajo tres tiempos de retención hidráulicos (3 días, 1 día y 12 horas) en cada etapa. La primera etapa (día de operación 1 al 74) correspondió a la estabilización de los sistemas, en este periodo de tiempo se trabajó con voltaje a circuito abierto. En la segunda etapa (día de operación 80 al 136) se colocó una resistencia externa de 1,000 ohms, con el objetivo de comparar la producción de electricidad y la remoción de materia orgánica y nutrientes del agua residual en ambos sistemas con tiempos de retención hidráulicos diferentes.

Para calcular el caudal en los sistemas de acuerdo a los tiempos de retención hidráulicos propuestos se utilizó la siguiente fórmula:

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Dónde

V: es el volumen de reacción (m³)

Q: es el caudal a tratar (m³/d)

TRH: es el tiempo de retención hidráulico (d)

De acuerdo con las dimensiones de las CCM's en el sistema de Multicelda 1 y el volumen del reactor en el sistema de Multicelda 2 los caudales fueron los que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 1. Caudales utilizados en los sistemas de Multiceldas 1 y 2

TRH	Caudal Multicelda 1	Caudal Multicelda 2
3 días	1.4 mL/min	3.6 mL/min
1 día	4.1 mL/min	10.9 mL/min
12 horas	8.3 mL/min	21.8 mL/min

Para la alimentación de los sistemas en proceso continuo se utilizaron dos bombas peristálticas masterflex.

3.4 Monitoreo de los sistemas de Multiceldas

A lo largo del experimento durante las dos etapas de operación y los diferentes tiempos de retención hidráulicos se midió el voltaje de manera manual diariamente con ayuda de un multímetro steren mul-600 y se llevaron a cabo algunos análisis fisicoquímicos del agua residual del influente y efluente de los sistemas de Multiceldas para determinar la eficiencia de remoción. En la Tabla 4 se muestran los parámetros para el monitoreo de los sistemas de Multiceldas, así como la frecuencia con la que se realizaban y el método que se utilizó para cada análisis.

Tabla 2. Parámetros realizados en los sistemas de Multiceldas 1 y 2

Parámetro	Frecuencia	Método
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2 v/s	NMX-AA-030-SFCI-2001 (CONAGUA, 2001)
Nitrógeno amoniacal	2 v/s	Hach DR/2500 Método 8030 (0.02-2.5 mg/L) NH ₄ -N
Nitratos	2 v/s	Hach DR/2500 Método 8039 (0.3-30 mg/L) NO ₃ ⁻
Nitrógeno total	2 v/s	Hach DR/2500 Método 10071 (10-150 mg/L) N
Fósforo total	2 v/s	Hach DR/2500 Método 8190 (1-100 mg/L) PO ₄ ⁻³
Azúcares reductores	2 v/s	Método de Somogyi-Nelson. (Castellanos , 1995)
Proteínas	2 v/s	Método de Lowry (Peterson, 1977)
pH	Diario	Medición con Multiparámetro Hach/Orion
Conductividad eléctrica	Diario	Medición con Multiparámetro Hach/Orion

v/s: veces por semana

3.5 Desempeño eléctrico de los sistemas de Multiceldas

Los sistemas de Multiceldas se evaluaron mediante distintos parámetros de medición, como el voltaje (V), corriente eléctrica ($I = V/R$), potencia eléctrica ($P = I * V$), densidad de corriente ($J = I/A_{Els. anodo}$) y densidad de potencia ($P/A_{Els anodo}$). Cuando se observan valores altos de densidad de potencia indica que la electricidad se está aprovechando eficientemente sobre la superficie del material utilizado.

3.6 Curva de polarización

Las curvas de polarización se realizaron al término de operación de cada TRH utilizado. Se realizó una curva por cada CCM ambos sistemas de Multiceldas. El objetivo fue analizar el comportamiento de la generación de voltaje (Capodaglio et al., 2013) y obtener el punto máximo de densidad de potencia de cada Multicelda así como analizar los tipos de pérdidas presentes en las CCM's de los sistemas.

Para el trazado de las curvas de polarización primeramente se tomó el voltaje a circuito abierto de cada CCM, hasta que se obtuvo un valor constante de VCA. Posteriormente se colocaron las resistencias externas de menor a mayor valor (10 Ω, 68 Ω, 180 Ω, 330 Ω, 680 Ω, 1000 Ω, 3300 Ω, 6100 Ω, 10000 Ω) en cada CCM de cada sistema durante 15 minutos hasta que el voltaje se estabilizó y se tomó lectura de este. Al finalizar la curva de polarización, se colocó nuevamente la

resistencia externa de 1000 Ω , para ello se esperó un tiempo aproximado de 1 h con el fin de llegar a una estabilización de voltaje.

4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1 Remoción de la materia orgánica y los nutrientes del agua residual

Con la remoción de materia orgánica representada como DQO, nutrientes y la generación de electricidad se evaluó la eficiencia de los sistemas de Multiceldas en las dos etapas de operación y con los tres diferentes tiempos de retención hidráulicos utilizados.

4.1.2 Remoción de demanda química de oxígeno

En la Figura 9 se muestran los valores de DQO del agua residual en el influente y efluente de los dos sistemas de Multiceldas de combustible microbianas en las dos etapas. Así como el porcentaje de remoción en cada tiempo de retención hidráulico. Los valores de DQO del influente no son uniformes debido a que se trató agua residual real y durante la etapa experimental se presentaron algunas lluvias.

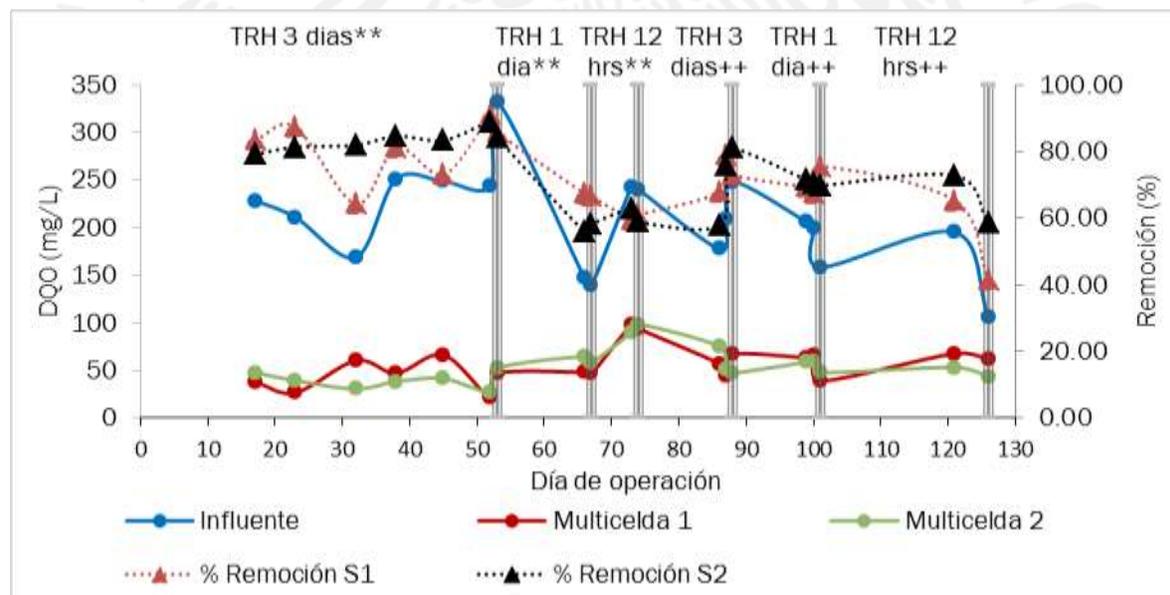


Figura 6. Remoción de la Demanda Química de Oxígeno de los sistemas de Multiceldas 1 y 2 (***) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms, (S) sistema

Como se puede observar en la Figura 9 el porcentaje de remoción de DQO fue mayor durante la primera etapa cuando los sistemas estuvieron bajo condición de circuito abierto (74 días de operación). En el TRH de 3 días los valores presentados de DQO en el agua residual del influente fueron de 240.69 ± 50 mg/L. Los valores en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 43.82 ± 17

mg/L con un porcentaje de remoción de $80.96 \pm 9\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron 39.62 ± 9 mg/L con un porcentaje de remoción de $83.34 \pm 3\%$. En el TRH de 1 día los valores de DQO en el agua residual del influente fueron de 143.23 ± 5 mg/L relativamente bajos ya que en esos días de operación fue periodo de lluvia. Los valores en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 47.34 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $66.94 \pm 1\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 61.59 ± 5 mg/L con un porcentaje de remoción de $57.03 \pm 2\%$. En el TRH de 12 horas los valores de DQO presentados en el agua residual en el influente fueron de 241.60 ± 2 mg/L. Los valores en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 96.10 ± 3 mg/L con un porcentaje de remoción de $60.23 \pm 1\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 94.46 ± 6 mg/L con un porcentaje de remoción de $60.89 \pm 3\%$. En la segunda etapa (52 días de operación) se colocó una carga resistiva de 1000 ohms a cada una de la CCM's de los sistemas de Multiceldas. En esta etapa la remoción de DQO disminuyó en comparación con la primera etapa, sin embargo en el TRH de 1 día la remoción aumentó. En el TRH de 3 días los valores presentados de DQO en el agua residual del influente fueron de 211.60 ± 35 mg/L. Los valores en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 55.97 ± 11 mg/L con un porcentaje de remoción de $73.30 \pm 5\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 57.60 ± 15 mg/L con un porcentaje de remoción de $71.51 \pm 12\%$.

En el TRH de 1 día los valores de DQO en el agua residual del influente fueron de 188.26 ± 26 mg/L este bajo valor se debe a que esta condición se presentó en periodo de lluvia. Los valores en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 55.83 ± 15 mg/L con un porcentaje de remoción de $70.71 \pm 4\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 55.16 ± 6 mg/L con un porcentaje de remoción de $70.63 \pm 1\%$. En el TRH de 12 horas los valores presentados de DQO en el agua residual del influente fueron de 150.29 ± 63 mg/L, este bajo valor se debe a que esta condición se presentó en periodo de lluvia. Los valores en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 64.85 ± 4 mg/L con un porcentaje de remoción de $53.27 \pm 17\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 48.41 ± 7 mg/L con un porcentaje de remoción de $65.66 \pm 10\%$.

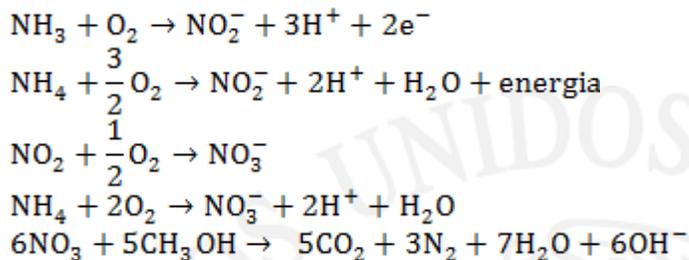
La mayor remoción presentada en los sistemas fue en el TRH de 3 días por la Multicelda 2 en la primera etapa alcanzando un porcentaje de remoción del 83.34% dicha eliminación de materia orgánica fue similar a la alcanzada por Li y colaboradores en 2008 de 88% de remoción por medio de celdas de una sola cámara de contacto aire cátodo (Li *et al.*, 2008).

4.1.3 Remoción de compuestos nitrogenados

En el agua los compuestos del nitrógeno se deben a causas naturales como la disolución atmosférica o de depósitos geológicos, escorrentías superficiales y subterráneas, fijación de organismos procariontes y la descomposición de la materia orgánica pero principalmente a causas antropogénicas.

Los compuestos inorgánicos más comunes en el agua residual son el amonio, nitrito y nitrato y de estos el principal es el amonio que se genera de la descomposición de materiales proteicos. Pero también se puede encontrar nitritos y nitratos cuando la contaminación es producida por fertilizantes (Singer *et al.*, 2008).

La remoción de estos compuestos se lleva a cabo por medio de la nitrificación-desnitrificación que permite una conversión biológica desde nitrógeno amoniacal a nitratos y posteriormente los nitratos a nitrógeno molecular; estas reacciones se realizan mediante la acción metabólica de microorganismos, unos aerobios y los otros anóxicos, las reacciones son las siguientes:



Debido a que las CCM's son sistemas anaerobios no ocurre el proceso de nitrificación y las remociones de nitrógeno amoniacal en estos sistemas fueron insignificantes. Las remociones de nitratos y por lo tanto de nitrógeno total se llevan a cabo por medio de la desnitrificación.

Para una eliminación del N se necesita que el nitrato pase al estado elemental del nitrógeno, esto se presenta en condiciones anóxicas con la acción de una población de bacterias heterotróficas desnitrificantes que usan los productos de degradación orgánica como fuentes de carbono y energía, y el nitrato como un aceptor de electrones. El proceso de desnitrificación se hace en cuatro fases:



Esta secuencia se logra principalmente gracias a la presencia de bacterias heterotróficas que oxidan aeróbicamente la materia orgánica y que en ausencia o baja concentración de oxígeno disuelto, pueden usar nitrato como aceptor final de electrones, funcionando como desnitrificantes facultativas. Entre los géneros conocidos de llevar a cabo desnitrificación se encuentran: *Pseudomonas* y *Alcaligenes*, pero también de géneros como *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Rhodopseudomonas* y *Propionibacterium* (Thomsen, 1994).

4.1.3.1 Remoción de nitrógeno amoniacal

En la Figura 10 se muestran las concentraciones de nitrógeno amoniacal del agua residual iniciales y las concentraciones después del tratamiento así como el porcentaje de remoción en cada sistema de Multiceldas.

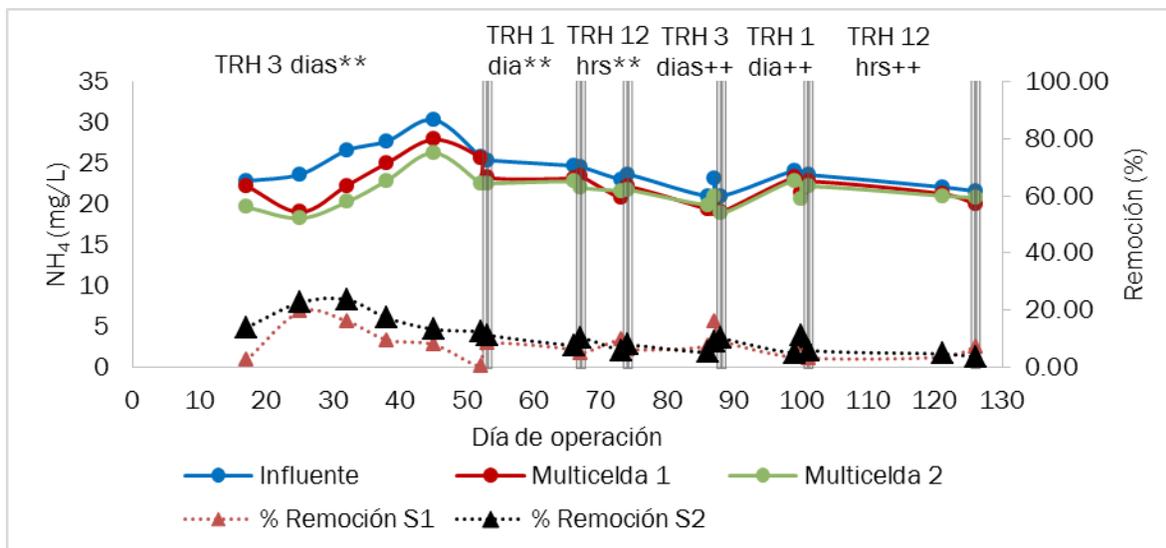


Figura 7. Remoción de nitrógeno amoniacal en los sistemas de Multiceldas 1 y 2. (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms, (S) sistema

Como se mencionó anteriormente los sistemas anaerobios no remueven el NH_4^+ ya que se necesita O_2 para que se lleve a cabo la nitrificación. Sin embargo, se utiliza el N como nutriente incorporando el nitrógeno amoniacal en la masa molecular, especialmente de las proteínas necesarias para el desarrollo de nuevas bacterias en un proceso que no consume oxígeno. Este proceso se basa en que los compuestos del nitrógeno conforman nutrientes clave para el crecimiento de los seres vivos, así que el N puede eliminarse del agua si es asimilado por los microorganismos (Cárdenas *et al.*, 2006). Estas remociones se le atribuyen a este proceso de asimilación de nitrógeno.

En la primera etapa cuando los sistemas fueron operados a circuito abierto con TRH de 3 días las concentraciones presentadas de NH_4^+ en el agua residual del influente fueron de 26.01 ± 3 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 23.60 ± 3 mg/L con un porcentaje de remoción de $9.29 \pm 7\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 21.75 ± 3 mg/L con un porcentaje de remoción de $16.45 \pm 5\%$.

En el TRH de 1 día las concentraciones presentadas de NH_4^+ en el agua residual del influente fueron de 24.62 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 las concentraciones fueron de 23.25 mg/L con un porcentaje de remoción de $5.58 \pm 1\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 22.38 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción del $9.12 \pm 2\%$.

En el TRH de 12 horas las concentraciones presentadas de NH_4^+ en el agua residual del influente fueron de 23.31 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 las concentraciones fueron de 21.44 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $8.07 \pm 2\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 21.69 mg/L con un porcentaje de remoción de $6.96 \pm 1\%$.

En la segunda etapa con carga resistiva de 1000 ohms en el TRH de 3 días las concentraciones en el influente de NH_4^+ en el agua residual fueron de 27.71 ± 1 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 fueron de 19.25 mg/L con un porcentaje de remoción de $11.17 \pm 4\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones presentadas fueron de 19.91 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $8.23 \pm 3\%$. En el TRH de 1 día las concentraciones en el influente de NH_4^+ en el agua residual fueron de 23.64 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 22.46 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $5.04 \pm 3\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 21.87 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $7.54 \pm 3\%$. En el TRH de 12 horas las concentraciones presentadas en el influente de NH_4^+ en el agua residual fueron de 21.88 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 20.63 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $5.45 \pm 3\%$ y las concentraciones en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 20.8 mg/L con un porcentaje de remoción de $4.28 \pm 1\%$. En base a los resultados presentados el sistema de Multicelda 2 removió más nitrógeno amoniacal del agua residual en la primera etapa en operación a circuito abierto con el TRH mayor de 3 días alcanzado una remoción del $16.45 \pm 5\%$.

4.1.3.2 Nitratos

En la Figura 11 se muestran las concentraciones de nitratos al inicio y al final de tratamiento mediante los sistemas de Multiceldas de combustible microbianas así como el porcentaje de remoción. Este proceso se lleva a cabo por medio de la desnitrificación.

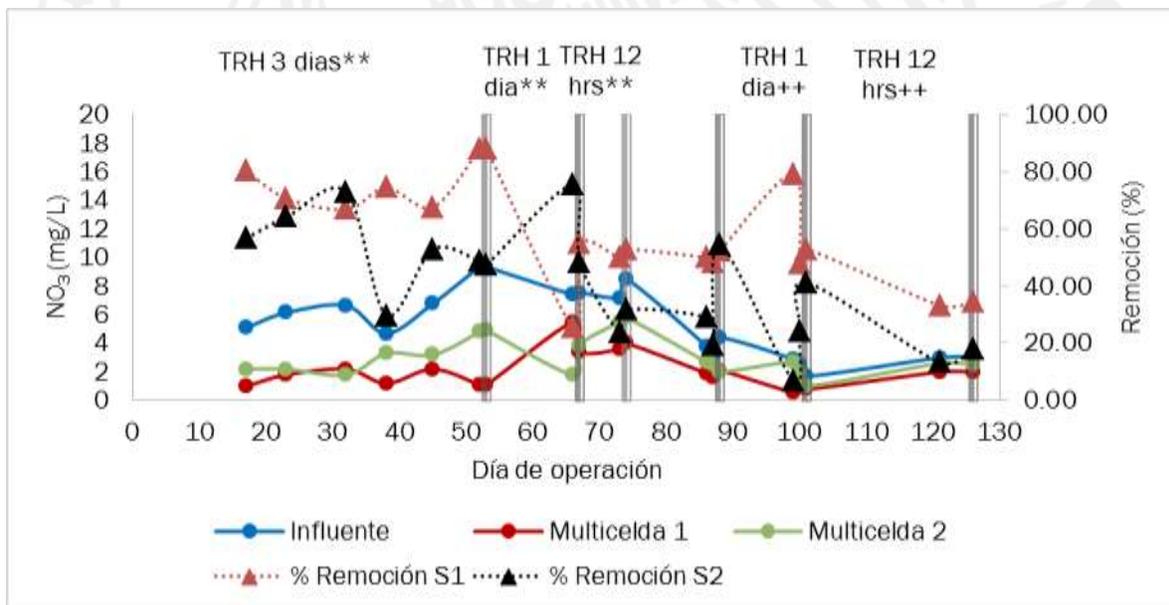


Figura 8. Remoción de nitratos en los sistemas de Multiceldas 1 y 2. (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms, (S) sistema

La presencia de nitratos en el agua residual cruda se le adjudica al uso de fertilizantes inorgánicos, incluyendo el amoniacal, y la contaminación causada por excretas humanas y animales que

contribuye a elevar la concentración de nitratos en agua (Barrenechea, 2004). Así como la formación de estos en el proceso de la recolección de las aguas residuales debido a que el nitrógeno amoniacal en contacto con el aire se oxida a nitritos y luego estos a nitratos. Las reacciones de transformación las realizan bacterias nitrificantes autótrofas aerobias, que utilizan el carbono orgánico como fuente de carbono celular. En la Figura 11 se muestra que el porcentaje de remoción de nitratos fue mayor en la primera etapa cuando los sistemas se operaron a circuito abierto, el porcentaje de remoción fue significativo en la Multicelda 1 en TRH de 3 días. Las remociones de la Multicelda 2 se mantuvieron por lo general por debajo de las remociones de la Multicelda 1. En la primera etapa con TRH de 3 días las concentraciones presentadas de NO_3^- en el influente fueron de 6.87 ± 2 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 las concentraciones fueron de 1.51 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $76.66 \pm 9\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 3.20 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $53.29 \pm 14\%$.

En el TRH de 1 día las concentraciones presentadas de NO_3^- en el influente fueron de 7.47 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 4.45 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $40.32 \pm 21\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 2.85 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $62 \pm 19\%$. En el TRH de 12 horas las concentraciones presentadas de NO_3^- en el influente fueron de 7.85 ± 1 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 las concentraciones fueron de 3.8 mg/L con un porcentaje de remoción de $51.47 \pm 2\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 5.65 mg/L con un porcentaje de remoción de $27.69 \pm 6\%$. En la segunda etapa con carga resistiva de 1000 ohms en el TRH de 3 días las concentraciones de NO_3^- presentadas en el influente del agua residual fueron de 3.77 ± 1 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 las concentraciones disminuyeron a 1.87 mg/L con un porcentaje de remociones de $50.22 \pm 2\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 2.40 mg/L con un porcentaje de remoción de $34.28 \pm 18\%$.

En el TRH de 1 día las concentraciones presentadas de NO_3^- en el influente fueron de 2.37 ± 1 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 fueron de 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $60.08 \pm 17\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 1.87 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $24.02 \pm 17\%$. En TRH de 12 horas las concentraciones de NO_3^- presentadas en el influente del agua residual fueron de 3.03 mg/L. En el efluente de la Multicelda 1 fueron de 2 mg/L con un porcentaje de remoción del $38.88 \pm 1\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 2.55 mg/L con un porcentaje de remoción de $15.68 \pm 1\%$. El mayor porcentaje de remoción fue de $62 \pm 19\%$ con el TRH de 3 días y esta remoción permanece por debajo de la registrada por Cucu y colaboradores en 2015 donde se removió el 96% de los nitratos presentados en el influente (Cucu *et al.*, 2015). Cabe mencionar que en dicho experimento, el sistema se inoculó con cultivos microbianos de sedimentos de una cuenca hidrográfica que regularmente recibía descargas de la agricultura local con altas cargas de nitratos.

4.1.3.4 Remoción de nitrógeno total

En la Figura 12 se muestran las concentraciones de nitrógeno total del agua residual cruda y tratada por los sistemas de Multiceldas así como el porcentaje de remoción durante todo el

tiempo experimental. Las concentraciones de nitrógeno total presentadas en el influente variaron en las dos etapas a lo largo de la experimentación. En la primera etapa se presentaron concentraciones de 40.73 ± 15 mg/L de N y en la segunda etapa de 26.22 ± 4 mg/L de N debido a que se trabajó con agua residual real y por lo tanto las concentraciones de nitrógeno no fueron uniformes puesto que dependen del uso a los que se somete el agua.

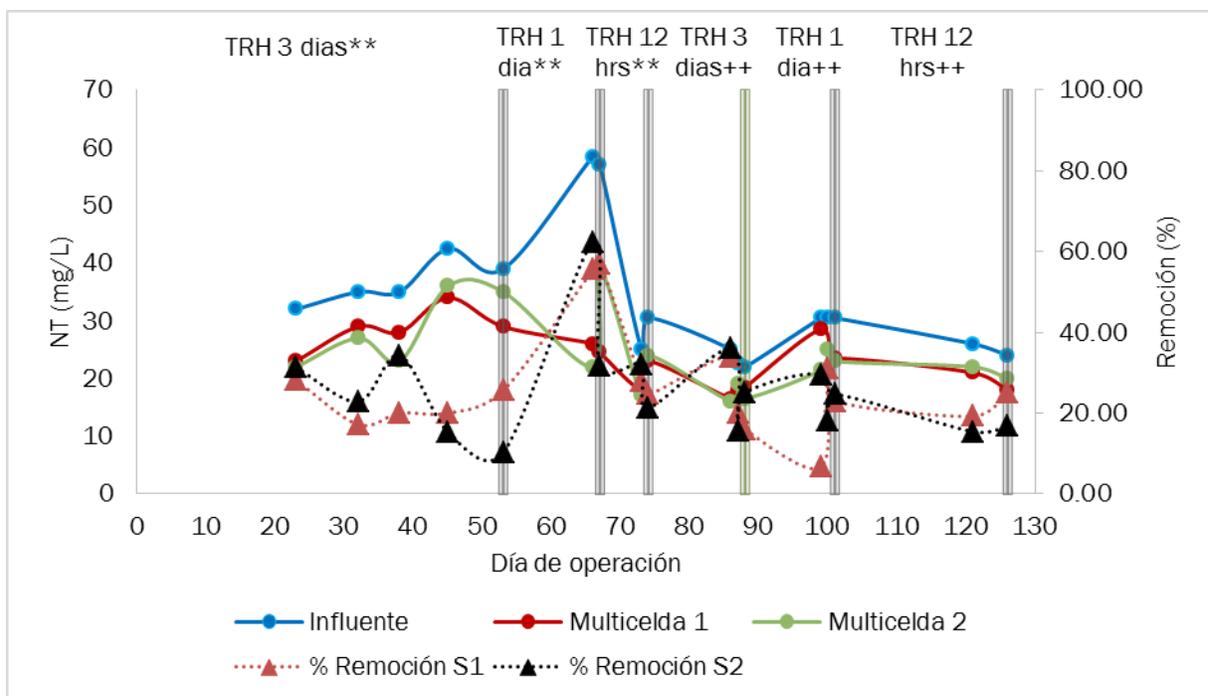


Figura 9. Remoción del nitrógeno total en los sistemas de Multiceldas 1 y 2. (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms, (S) sistema

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato. Las remociones de nitrógeno total se llevan a cabo por medio del proceso de nitrificación-desnitrificación pero como se mencionó anteriormente los sistemas de Multiceldas de combustible microbianas no pueden llevar a cabo la nitrificación. Sin embargo, es posible que en estos dispositivos se realice la desnitrificación debido a que esta fase se realiza en condiciones anóxicas. Este proceso implica la transferencia de electrones entre un dador de electrones reducido (materia orgánica) a un aceptor de electrones oxidado en este caso los nitratos convirtiéndolos a nitrógeno elemental. De este modo es como se realiza la remoción de nitrógeno total en los sistemas de Multiceldas en conjunto con la asimilación de una fracción de nitrógeno amoniacal por las bacterias.

En la Figura 12 se muestra que el mayor porcentaje de remoción se presentó en la primera etapa del experimento (circuito abierto). En el TRH de 3 días las concentraciones en el influente fueron de 36.7 ± 4 mg/L de N. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 de 28.6 ± 4 mg/L de N

con un porcentaje de remoción de $22.18 \pm 5\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 28.6 ± 7 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $22.79 \pm 10\%$. En el TRH de 1 día las concentraciones presentadas en el influente fueron de 57.75 ± 1 mg/L de N. Las concentraciones en el fluente de la Multicelda 1 de 25.25 ± 1 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $56.29 \pm 1\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 30.5 ± 12 mg/L de N con un porcentaje de remoción de 46.99 ± 22 mg/L %. En el TRH de 12 horas las concentraciones presentadas en el influente fueron de 27.75 ± 4 mg/L de N. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 fueron 20.5 ± 4 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $26.30 \pm 2\%$ y en la Multicelda 2 las concentraciones fueron 20.5 ± 5 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $26.66 \pm 8\%$.

En la segunda etapa (carga resistiva de 1000 ohms) no se presentaron variaciones significativa en las remociones entre cada TRH. Sin embargo, estos porcentajes fueron disminuyendo conforme el TRH disminuía. En el TRH de 3 días las concentraciones de nitrógeno presentadas en el influente que fueron de 23.17 ± 2 mg/L de N. En el efluente de la Multicelda 1 las concentraciones fueron de 17.67 ± 1 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $23.30 \pm 8\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 17.17 ± 2 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $25.52 \pm 10\%$. En el TRH de 1 día las concentraciones de nitrógeno presentadas en el influente fueron de 30.5 mg/L de N. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 24.33 ± 4 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $20.22 \pm 13\%$ y en la Multicelda 2 las concentraciones el efluente fueron de 23.17 ± 2 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $24.04 \pm 6\%$.

En el TRH de 12 horas las concentraciones de nitrógeno presentadas en el influente fueron de 25 ± 1 mg/L de N. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 de 19.5 ± 2 mg/L de N con un porcentaje de remoción de $22.12 \pm 4\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 21 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $16.03 \pm 1\%$. A lo largo de la experimentación las remociones fueron menores al 50% en la mayoría de los experimentos en los dos sistemas y los tres TRH. Sin embargo en el TRH de 1 día en la primera etapa cuando los sistemas se operaron a circuito abierto se alcanzó porcentajes de remoción de 57.02% y 62.39% en el sistema de Multiceldas 1 y 2, respectivamente.

4.1.4 Remoción de fósforo total

El fósforo presente en las aguas residuales municipales proviene principalmente de la materia fecal, de los residuos alimenticios y de los compuestos de fosfato inorgánico que contienen los detergentes. Se encuentra en tres formas distintas: fosfato orgánico (especies particuladas), ortofosfatos y polifosfatos (especies disueltas). Las cantidades excesivas de fósforo en aguas naturales llevan a desequilibrios ecológicos por la eutrofización y gran descenso de los niveles de oxígeno. En los sistemas biológicos las bacterias utilizan el fósforo únicamente para la síntesis de nuevas células. Bajas concentraciones de fósforo en el medio limita el crecimiento biológico e impide la eliminación del sustrato orgánico (Grady y Lim, 1980).

Para eliminar el fósforo de las aguas residuales por vía biológica es necesario conseguir que los microorganismos almacenen este elemento más allá de sus necesidades metabólicas de crecimiento. Este proceso consiste en someter el agua residual a una fase anaerobia seguida de

una fase aerobia. En la fase anaerobia, las bacterias que intervienen en la eliminación biológica del fósforo, usan sus reservas intracelulares de polifosfatos como fuente de energía, y almacenan sustratos orgánicos simples, como los ácidos grasos volátiles (acetato y propionato), lo que favorece la liberación de fósforo en forma de ortofosfatos en la fase anaerobia. En la fase aerobia los microorganismos consumen los compuestos orgánicos almacenados durante la fase anaerobia, utilizándolos como fuente de energía y carbono para el crecimiento celular y almacenan fósforo en forma de polifosfatos, de los ortofosfatos liberados en la fase anaerobia muy por encima de sus necesidades estequiométricas. El microorganismo comúnmente asociado a la eliminación biológica del fósforo pertenece al género *Acinetobacter* entre los cuales se han aislado e identificado las especies *A. lwoffii* (Fuhs y Chen, 1975) *A. Junii* y *A. Johnsonii* (Beacham *et al.*, 1990). El crecimiento de estos microorganismos es lento y utilizan en la fase anaerobia los sustratos más simples de la fermentación. Otro tipo de microorganismos identificados son *Aeromonas*, *Arthrobacter*, *Klebsiella*, *Moraxella* y *Pseudomonas* que pueden contener gránulos de polifosfatos y así contribuir al proceso de EBP (Wanner, 1997).

En los sistemas de Multiceldas de combustible microbianas se presentaron remociones de fósforo total debido a la asimilación de ortofosfatos por parte de los microorganismos para la síntesis de nuevas células pero también se le atribuye a la presencia de nitratos en el agua residual a tratar. Cuando los nitratos entran a los sistemas anaerobia, la liberación de fósforo se inhibe ya que se produce una respiración anóxica a base de nitratos, y el fenómeno que entonces ocurre es el de bioacumulación de fósforo (Wentzel *et al.*, 1985; Comeau *et al.*, 1987; Kern-Jespersen y Henze, 1993; Kern-Jespersen *et al.*, 1994).

En la Figura 13 se observan las concentraciones de fósforo total en el agua residual cruda y tratada por los sistemas de Multiceldas microbianas, así como los porcentajes de remoción en cada etapa con diferente TRH.

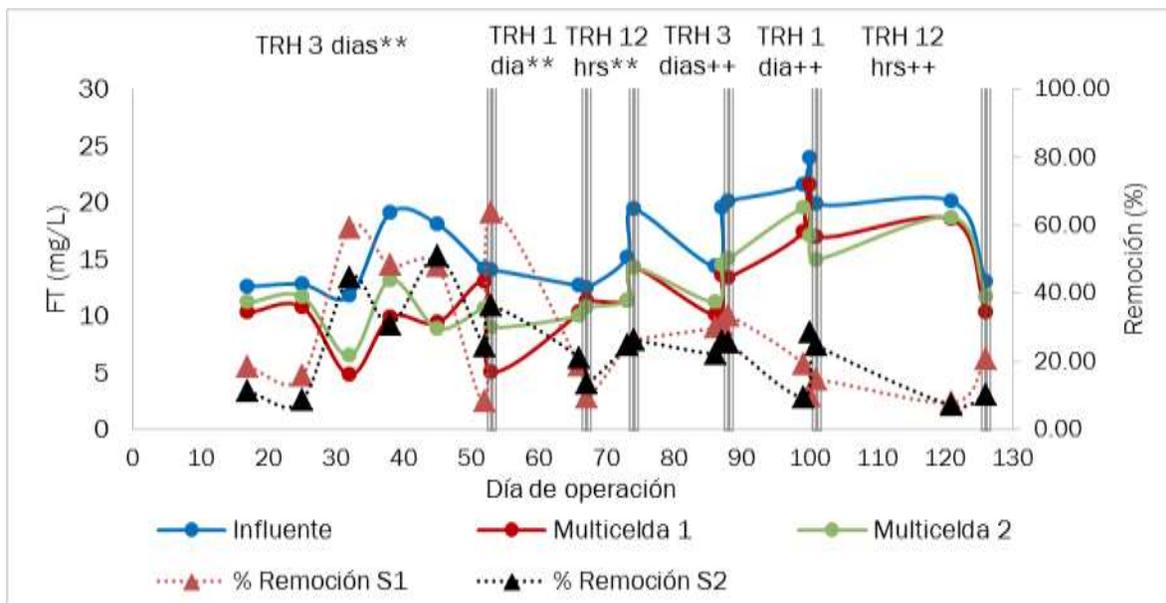


Figura 10. Remoción de fósforo total en los sistemas de Multiceldas 1 y 2. (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms, (S) sistema

El porcentaje mayor de remoción de fósforo total se obtuvo en la primera etapa en operación a circuito abierto; con el TRH de 3 días en los dos sistemas de Multiceldas. Después de dicho TRH y en la siguiente etapa las remociones fueron menores, este comportamiento se le atribuye a que las concentraciones de nitratos en el influente también disminuyeron y por lo tanto el proceso de bioacumulación también se redujo. En la primera etapa con los sistemas de Multiceldas operados en circuito abierto en el TRH de 3 días las concentraciones de fósforo total en el influente fueron de 14.64 ± 3 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 fueron de 9.04 ± 3 mg/L con un porcentaje de remoción de $37.32 \pm 23\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 fueron de 10.17 ± 2 mg/L con un porcentaje de remoción de $29.52 \pm 16\%$. En el TRH de 1 día las concentraciones de fósforo total en el influente fueron de 12.55 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 de 10.80 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción de $13.1 \pm 7\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 10.38 ± 1 mg/L con un porcentaje de remoción del $17.30 \pm 5\%$.

En el TRH de 12 horas las concentraciones de fósforo total en el influente fueron de 17.28 ± 3 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 de 12.85 ± 2 mg/L con un porcentaje de remoción de $25.52 \pm 1\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 12.85 ± 2 mg/L con un porcentaje de remoción de $25.52 \pm 1\%$. En la segunda etapa con carga resistiva de 1000 ohms en los sistemas de Multiceldas en el TRH de 3 días las concentraciones de fósforo total en el influente fueron de 18.05 ± 3 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 de 12.37 ± 2 mg/L con un porcentaje de remoción de $31.32 \pm 2\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 13.58 ± 2 mg/L con un porcentaje de remoción de $24.52 \pm 2\%$.

En el TRH de 1 día las concentraciones de fósforo total en el influente fueron de 21.78 ± 2 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 de 18.67 ± 3 mg/L con un porcentaje de remoción de $14.48 \pm 5\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 17.2 ± 2 mg/L con un porcentaje de remoción de $20.86 \pm 10\%$. En el TRH de 12 horas las concentraciones de fósforo total en el influente fueron de 16.55 ± 5 mg/L. Las concentraciones en el efluente de la Multicelda 1 de 14.4 ± 6 mg/L con un porcentaje de remoción de $14.36 \pm 9\%$ y en el efluente de la Multicelda 2 las concentraciones fueron de 15.20 ± 5 mg/L con un porcentaje de remoción de $8.48 \pm 2\%$.

4.1.5 pH

En la Figura 14 se muestra las unidades de pH del agua residual cruda y después del tratamiento mediante los sistemas de Multiceldas de combustible microbianas.

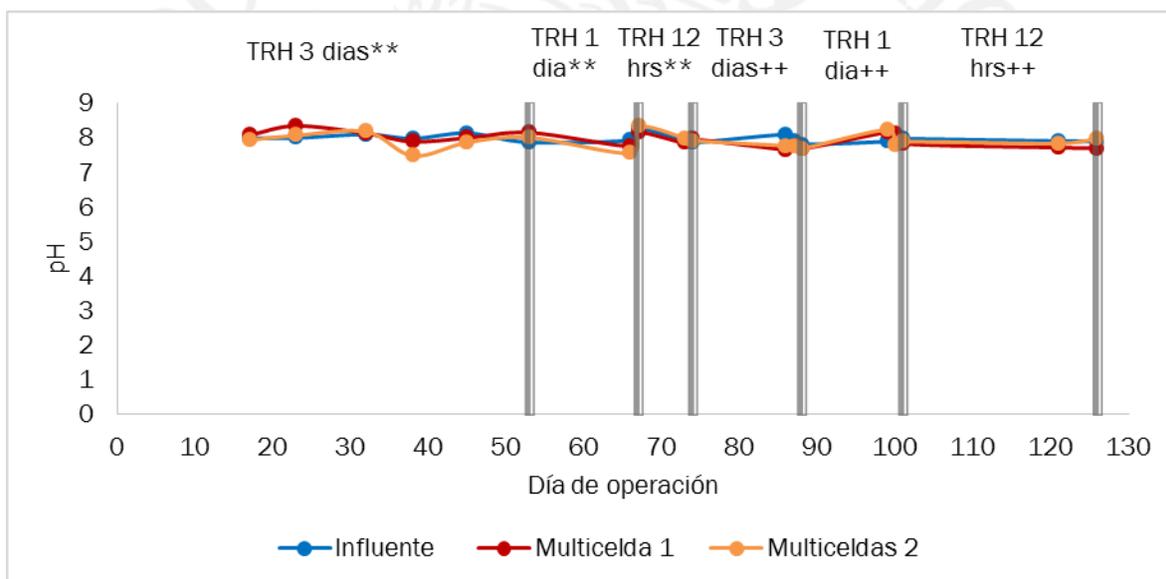


Figura 11. Unidades de pH en los sistemas de Multiceldas 1 y 2. (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms

El pH de entrada y salida de los sistemas de Multiceldas como se puede observar permaneció casi constante. En la primera etapa de operación (circuito abierto) el pH de influente fue 8.01 ± 0.1 y en los efluentes de los sistemas 1 y sistema 2 fueron de 8.03 ± 0.2 y 7.94 ± 3 , respectivamente. En la segunda etapa de operación (carga resistiva de 1000 ohms) el pH presentado en el influente fue de 7.94 ± 0.1 y en los efluentes de los sistemas de Multicelda 1 y 2 7.83 ± 0.2 y 7.87 ± 2 , respectivamente.

4.1.6 Conductividad eléctrica

En la Figura 15 se muestra la conductividad eléctrica del agua residual antes del tratamiento y posterior al tratamiento mediante los sistemas de Multiceldas.

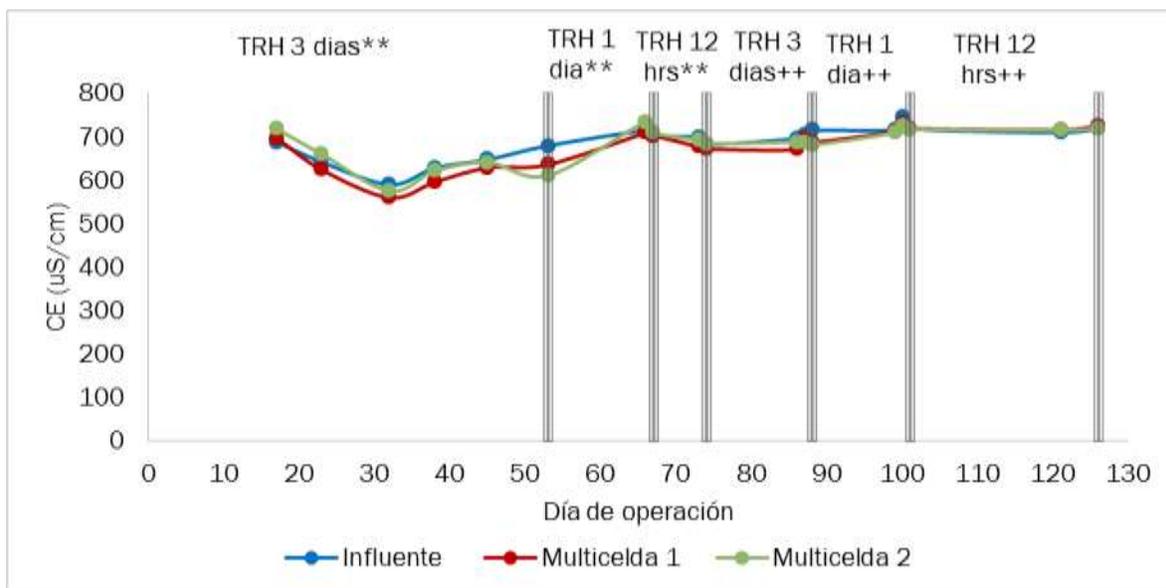


Figura 12. Conductividad eléctrica en los sistemas de Multiceldas 1 y 2 (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms

La conductividad eléctrica del agua residual en el influente y efluente de los sistemas fue menor en la primera etapa, en comparación con la segunda etapa de operación. En la primera etapa cuando los sistemas se operaron en circuito abierto la CE en el influente fue de $667.30 \pm 39 \mu\text{S/cm}$ y en los efluentes de los sistemas de Multicelda 1 y 2 $650.30 \pm 49 \mu\text{S/cm}$ y $664.70 \pm 52 \mu\text{S/cm}$, respectivamente. En la segunda etapa de operación con carga resistiva de 1000 ohms la CE presentada en el efluente fue de $715.44 \pm 14 \mu\text{S/cm}$ y en los efluentes de los sistemas de Multicelda 1 y 2 $707 \pm 21 \mu\text{S/cm}$ y $705.25 \pm 17 \mu\text{S/cm}$, respectivamente.

4.1.7 Comportamiento de proteínas y carbohidratos

La materia orgánica en el agua residual municipal puede dividirse en carbohidratos ($\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}_9$), grasas ($\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_2$) y proteínas ($\text{C}_{14}\text{H}_{12}\text{O}_7\text{N}_2$). La degradación y conversión microbiana de material orgánico en los sistemas de Multiceldas de combustible microbianas se llevó a cabo por medio de la ruta anaerobia. Este proceso inicia con la hidrólisis, donde las bacterias llamadas hidrolíticas, son las primeras en procesar y preparar el material para el siguiente paso de descomposición. Estos microorganismos segregan ciertas enzimas que hidrolizan los polímeros. Los carbohidratos, son convertidos a azúcares, las proteínas a aminoácidos y los lípidos son hidrolizados y convertidos a ácidos grasos de cadena más corta. La segunda fase es la acidogénesis o fermentación la cual se lleva a cabo cuando se completa la hidrólisis, por microorganismos de este tipo. Consiste en degradar los azúcares de cadena corta, los aminoácidos y los ácidos grasos formados en la primera fase. En este paso del metabolismo

anaerobio, los ácidos grasos se convierten a ácidos grasos volátiles de cadena corta como el ácido acético, butírico y propiónico principalmente. La tercera fase es la acetogénesis que consiste en la conversión a hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético de los ácidos y alcoholes carboxílicos formados en la acidogénesis. La cuarta fase es la metanogénesis donde el metabolismo anaerobio microbiano de los microorganismos metanogénicos metabolizan el ácido acético que se forma de los ácidos grasos, azúcares y aminoácidos y lo transforman a metano.

4.1.8 Proteínas

En la Figura 16 se muestra el contenido de proteínas en el agua residual antes y después del tratamiento mediante los sistemas de Multiceldas en los diferentes tiempos de retención hidráulicos. Se llevó a cabo la determinación de las proteínas ya que por medio de este parámetro se puede establecer la cantidad de materia orgánica en el agua residual.

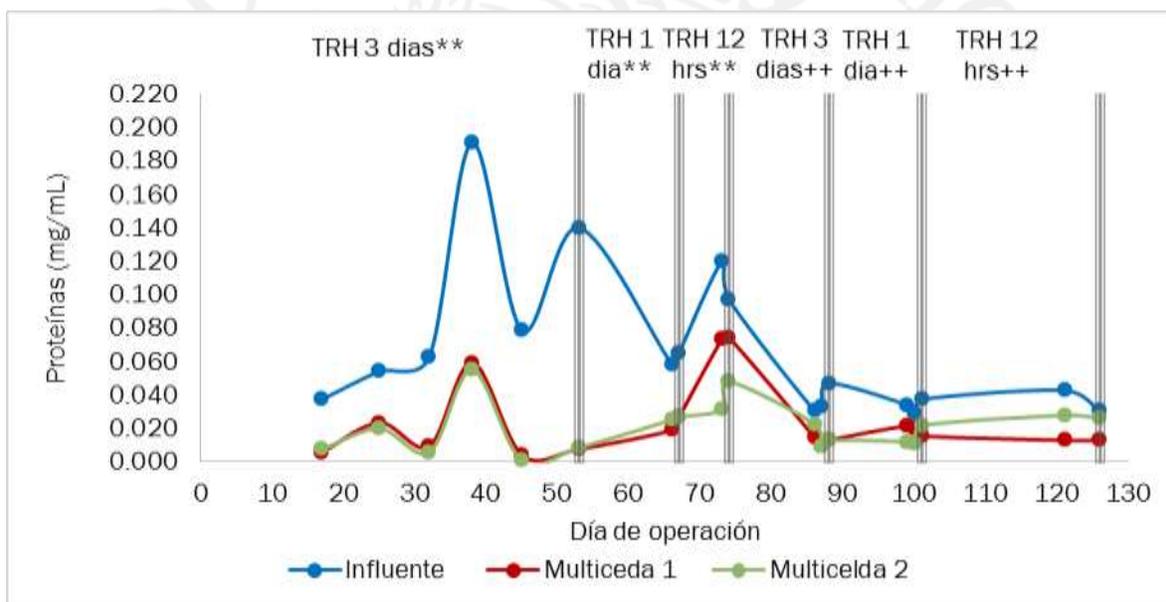


Figura 13. Concentración de proteínas (** Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms

Se observa que las concentraciones de proteínas disminuyeron en gran medida en la primera etapa cuando los sistemas se operaron a circuito abierto. Ya que las concentración promedio en el agua cruda de la primera etapa con TRH de 3 días fue de 0.094 ± 0.059 mg/mL y en los efluentes de los sistemas 0.018 ± 0.021 mg/mL y 0.016 ± 0.020 mg/mL, respectivamente. En el TRH de 1 día la concentración de proteínas en el influente fue de 0.062 ± 0.005 mg/mL y en los efluentes de la Multicelda 1 y Multicelda 2: 0.023 ± 0.006 mg/mL y 0.026 ± 0.001 mg/mL, respectivamente.

En el TRH de 12 horas la concentración de proteínas en el influente fue de 0.108 ± 0.016 mg/mL y en los efluentes de los sistemas: 0.074 ± 0.001 mg/mL y 0.040 ± 0.012 mg/mL, respectivamente.

En la segunda etapa (con carga de 1000 ohms) la concentración de proteínas presentada en el influente se redujo, esto se atribuye a que las concentraciones de nitrógeno y los valores de DQO también disminuyeron en esta etapa y las proteínas dependen del nitrógeno y la materia orgánica presentes en el agua residual. En el TRH de 3 días la concentración de proteínas en el influente fue de 0.037 ± 0.009 mg/mL y en los efluentes de la Multicelda 1 y Multicelda 2: 0.012 ± 0.003 mg/mL y 0.015 ± 0.007 mg/mL, respectivamente. En el TRH de 1 día la concentración de proteínas en el influente fue de 0.034 ± 0.004 mg/mL y en los efluentes de los sistemas: 0.019 ± 0.003 mg/mL y 0.015 ± 0.006 mg/mL, respectivamente. En el TRH de 12 horas la concentración de proteínas en el influente fue de 0.036 ± 0.009 mg/mL y en los efluentes de las Multiceldas: $0.013 \pm$ mg/mL y 0.027 ± 0.001 mg/mL, respectivamente.

Analizando las concentraciones de proteínas en las dos etapas de operación; en los diferentes tiempos de retención hidráulicos se observa que la disminución de proteínas en gran medida se realizó durante el TRH mayor (3 días) en las dos etapas. Debido a que el agua residual estuvo en contacto con los microorganismos que degradan las proteínas más tiempo. La disminución de proteínas en la segunda etapa se redujo en comparación con las concentraciones obtenidas en la primera etapa del experimento, esto se atribuye a la carga resistiva que se aplicó a los sistemas.

4.1.9 Azúcares reductores

En la Figura 17 se muestran las concentraciones de azúcares reductores del agua residual cruda y después del tratamiento mediante los sistemas de Multiceldas durante todo el tiempo de experimentación. Los azúcares reductores son carbohidratos y tienden a descomponerse por acción de las enzimas de bacterias y levaduras en el tratamiento anaerobio.

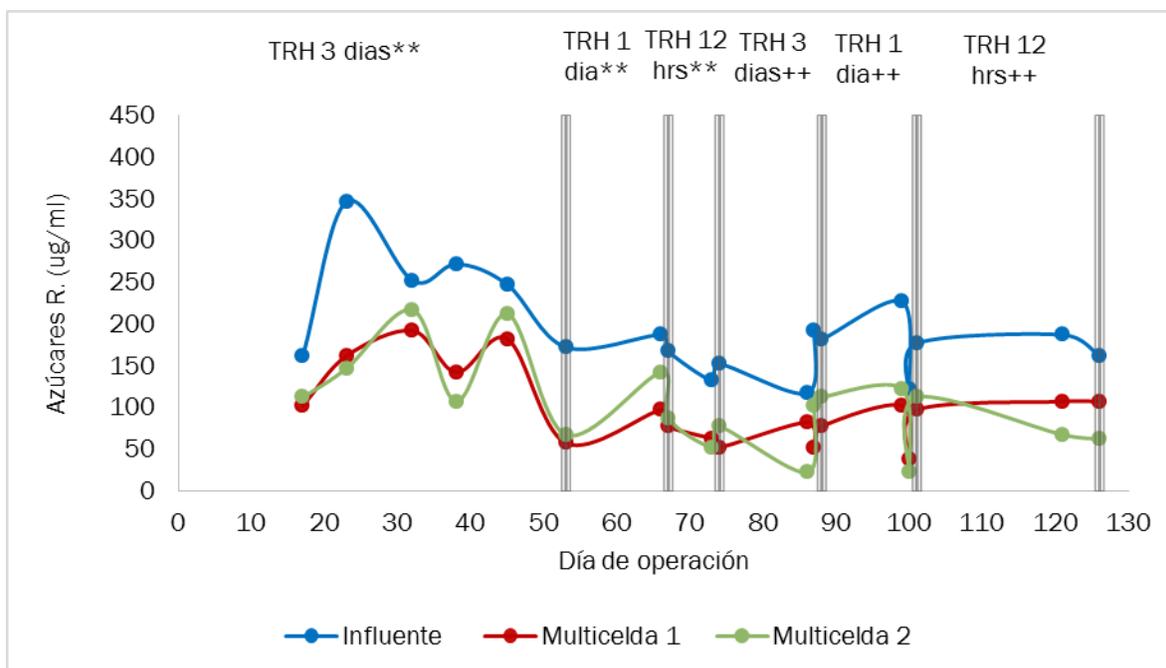


Figura 14. Concentración de azúcares reductores (** Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms

Las concentraciones en el influente de azúcares reductores al igual que las proteínas fueron mayores en la primera etapa de operación. La mayor disminución de estos compuestos se presentó en la Multicelda 2. En la primera etapa cuando se operaron los sistemas en circuito abierto con TRH de 3 días las concentraciones de azúcares reductores en el influente fueron de $242 \pm 68.34 \mu\text{g/mL}$ y en los efluentes de las Multiceldas 1 y 2 fueron de $139.50 \pm 51.55 \mu\text{g/mL}$ y $143.67 \pm 60.47 \mu\text{g/mL}$, respectivamente. En el TRH de 1 día las concentraciones de azúcares reductores en el influente fueron de $177 \pm 14.14 \mu\text{g/mL}$ y en los efluentes de las Multiceldas 1 y 2 fueron de $87 \pm 14.14 \mu\text{g/mL}$ y $114.50 \pm 38.89 \mu\text{g/mL}$, respectivamente. En el TRH de 12 horas en el influente las concentraciones de azúcares reductores fueron de $142 \pm 14.14 \mu\text{g/mL}$ y en los efluentes de las Multiceldas 1 y 2 fueron de $57 \pm 7.07 \mu\text{g/mL}$ y $64.50 \pm 17.68 \mu\text{g/mL}$, respectivamente.

En la segunda etapa con la aplicación de carga externa de 1000 ohms las concentraciones de azúcares reductores en el influente a TRH de 3 días fueron de $163.68 \pm 40.72 \mu\text{g/mL}$ y en los efluentes de las Multiceldas 1 y 2 fueron de $70.33 \pm 16.07 \mu\text{g/mL}$ y $78.67 \pm 49.33 \mu\text{g/mL}$, respectivamente. En el TRH de 1 día las concentraciones de azúcares reductores en el influente fueron de $175.33 \pm 52.52 \mu\text{g/mL}$ y en los efluentes de las Multiceldas 1 y 2 fueron de $78.66 \pm 36.17 \mu\text{g/mL}$ y $85.33 \pm 55.08 \mu\text{g/mL}$, para cada sistema. En el TRH de 12 horas las concentraciones de azúcares reductores en el influente fueron de $174.50 \pm 17.68 \mu\text{g/mL}$ y en los efluentes de las Multiceldas 1 y 2 fueron de $107 \mu\text{g/mL}$ y $64.50 \pm 3.54 \mu\text{g/mL}$, respectivamente.

4.2 Comparación de porcentajes de remoción de la materia orgánica y los nutrientes de los sistemas de Multiceldas

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los porcentajes de remoción promedio de la Demanda Química de Oxígeno, fósforo total, nitrógeno amoniacal, nitratos y nitrógeno total en las dos etapas de operación y los tres tiempos de retención hidráulicos utilizados.

Tabla 3. Porcentajes de remoción de contaminantes en los sistemas de Multiceldas

Multicelda 1						
Parámetros % remoción	TRH (Circuito abierto)			TRH (C/ 1000 Ohms)		
	3 días	1 día	12 horas	3 días	1 día	12 horas
DQO	80.96±9	66.94±1	60.23±1	73.30±5	70.71±4	53.27±17
NT	22.18±5	56.29±1	26.30±2	23.30±9	20.22±13	22.12±4
FT	37.32±23	13.91±7	25.52±1	31.32±2	14.48±5	14.36±9
NH ₄	9.29±7	5.58±1	8.07±2	11.17±4	5.04±3	5.45±3
NO ₃ ⁻	76.66±9	40.32±21	51.47±2	50.22±2	60.08±17	33.88±1
Multicelda 2						
Parámetros % remoción	TRH (Circuito abierto)			TRH (C/ 1000 Ohms)		
	3 días	1 día	12 horas	3 días	1 día	12 horas
DQO	83.34±3	57.03±2	60.89±3	71.51±12	70.63±1	65.66±10
NT	22.79±10	46.99±22	26.66±8	25.52±10	24.04±6	16.03±1
FT	29.52±16	17.30±5	25.52±1	24.52±2	20.86±10	8.48±2
NH ₄	16.45±5	9.12±2	6.96±1	8.23±3	7.54±3	4.28±1
NO ₃ ⁻	53.29±14	62.01±19	27.69±4	34.28±18	24.02±17	15.68±3

4.2.1 Demanda química de oxígeno

En operación de los sistemas a circuito abierto utilizando el TRH de 3 días en la Multicelda 1 la remoción de la DQO fue de 80.96±9%. Este porcentaje disminuyó en la segunda etapa cuando se colocó resistencias externas (1000 ohms) al sistema a una remoción de 73.30±5%. En la Multicelda 2 el comportamiento fue el mismo, en la primera etapa presentó una remoción de 83.34±3% y disminuyó en la segunda etapa a 71.51±12%. En el TRH de 1 día en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de la DQO de 66.94±1%. Este porcentaje aumentó en la segunda etapa a una remoción de 70.71±4%. La Multicelda 2 tuvo el mismo comportamiento 57.03±2% de remoción en la primera etapa y en la segunda etapa aumentó a 70.63±1%. En el TRH de 12 horas en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de la DQO de 60.23±1%. Esta remoción disminuyó en la segunda etapa a 53.27±17%. En la Multicelda 2 la remoción aumentó en la segunda etapa, ya que en la primera fue de 60.89±3% y en la segunda de 65.66±10% de remoción. En base a los porcentajes de remoción de la DQO durante la etapa experimental se observó que en el sistema de Multicelda 1 la aplicación de la resistencia externa disminuyó la remoción de la DQO. Mientras que en la Multicelda 2 la remoción aumentó con el TRH de 1 día y 12 horas en comparación con los

mismos TRH's en operación a circuito abierto. El mayor porcentaje de remoción de DQO fue para la Multicelda 2 el cual fue de $83.34 \pm 3\%$ con un tiempo de retención hidráulico de 3 días en operación a circuito abierto se asemeja con el obtenido por Zhuang y colaboradores en 2012 el cual fue de 85% en un sistema de Multicelda de 40 unidades de CCM's tubulares de tipo serpentín con contacto aire cátodo (Zhuang *et al.*, 2012).

4.2.2 Nitrógeno total

En operación de los sistemas a circuito abierto utilizando el TRH de 3 días en la Multicelda 1 la remoción de nitrógeno total fue de $22.18 \pm 5\%$ y en la segunda etapa este porcentaje fue similar presentando $23.30 \pm 9\%$ de remoción. En la Multicelda 2 en la primera etapa la remoción fue de $22.79 \pm 10\%$ y en la segunda $25.52 \pm 10\%$. En el TRH de 1 día en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de nitrógeno total de $56.29 \pm 1\%$ y en la segunda etapa la remoción disminuyó en gran medida a $20.22 \pm 13\%$. La Multicelda 2 presentó un comportamiento similar puesto que en la primera etapa la remoción fue de $46.99 \pm 22\%$ y en la segunda etapa también disminuyó a $24.04 \pm 6\%$ de remoción. En el TRH de 12 horas en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de nitrógeno total de $26.30 \pm 2\%$ y en la segunda etapa la remoción disminuyó a $22.12 \pm 4\%$. La Multicelda 2 presentó comportamiento similar ya que en la primera etapa la remoción fue de $26.66 \pm 8\%$ y en la segunda etapa disminuyó a $16.03 \pm 1\%$.

De acuerdo con los porcentajes de remoción obtenidos en la experimentación se determinó que la aplicación de la resistencia externa disminuye la remoción del nitrógeno total y que no causa efecto sobre la remoción de este, ya que los porcentajes se mantuvieron constantes en los tres TRH's utilizados. Con los porcentajes de remoción presentados en los dos sistemas de Multiceldas, se determina que el sistema más eficiente es la Multicelda 1 en operación a circuito abierto y el TRH óptimo es de 1 día para la remoción de nitrógeno total.

4.2.3 Fósforo total

En operación de los sistemas a circuito abierto utilizando el TRH de 3 días en la Multicelda 1 la remoción de fósforo total fue de $37.32 \pm 23\%$ y en la segunda etapa la remoción disminuyó a $31.32 \pm 2\%$. En la Multicelda 2 el comportamiento fue parecido, en la primera etapa la remoción fue de $29.52 \pm 16\%$ y en la segunda etapa la remoción disminuyó a $24.52 \pm 2\%$. En el TRH de 1 día en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción baja de fósforo total de $13.91 \pm 7\%$ y en la segunda etapa la remoción fue similar ya que fue de $14.48 \pm 5\%$. En la Multicelda 2 se presentó mayor porcentaje de remoción en la segunda etapa, ya que en la primera etapa fue de $17.30 \pm 5\%$ y en la segunda aumentó a $20.86 \pm 10\%$. En el TRH de 12 horas en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de fósforo total de $25.52 \pm 1\%$ y en la segunda etapa disminuyó a $14.36 \pm 9\%$ de remoción. En la Multicelda 2 de igual manera se presentó mayor remoción en la primera etapa ya que fue de $25.52 \pm 1\%$ y en la segunda etapa disminuyó a $8.48 \pm 2\%$.

Con los porcentajes de remoción obtenidos en la experimentación se determinó que la aplicación de la resistencia externa también disminuye la remoción de fósforo total en los sistemas a

diferentes TRH's utilizados. Con excepción del TRH de 1 día en la Multicelda 2 en el cual el porcentaje aumento en comparación con el obtenido en circuito abierto. En base a los porcentajes de remoción presentados en los dos sistemas de Multiceldas, se determina que el sistema más eficiente es la Multicelda 1 en operación a circuito abierto y el TRH óptimo es de 3 días para la remoción de fósforo.

4.2.4 Nitrógeno amoniacal

En operación de los sistemas a circuito abierto utilizando el TRH de 3 días en la Multicelda 1 la remoción de nitrógeno amoniacal fue de $9.29 \pm 7\%$ y en la segunda etapa aumento a $11.17 \pm 4\%$. En la Multicelda 2 el comportamiento fue lo contrario aumento en la primera etapa presento una remoción de $16.45 \pm 5\%$ y disminuyo en la segunda a $8.23 \pm 3\%$ de remoción. En el TRH de 1 día la Multicelda 1 no presentó cambios significativos en los porcentajes de remoción de nitrógeno amoniacal durante las dos etapas, puesto que en la primera etapa la remoción fue de $5.58 \pm 1\%$ y en la segunda etapa fue de $5.04 \pm 3\%$. La Multicelda 2 si presentó cambio en las remociones, ya que en la primera etapa fue de $9.12 \pm 2\%$ y en la segunda la remoción disminuyó a $7.54 \pm 3\%$. En el TRH de 12 horas en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de nitrógeno amoniacal de $8.07 \pm 2\%$ y en la segunda etapa una disminución en la remoción a $5.45 \pm 3\%$. En la Multicelda 2 el comportamiento fue parecido ya que en la primera etapa la remoción presentada fue de $6.96 \pm 1\%$ y en la segunda etapa también disminuyó a $4.28 \pm 1\%$. En base a los porcentajes obtenidos se determina que el TRH óptimo para la remoción de nitrógeno amoniacal es de 3 días en la condición de circuito abierto. La Multicelda 2 fue el sistema que mayor remoción presentó y por lo tanto el más eficiente.

4.2.5 Nitratos

En operación de los sistemas a circuito abierto utilizando el TRH de 3 días en la Multicelda 1 la remoción de nitratos fue de $76.66 \pm 9\%$ y en la segunda etapa el porcentaje de remoción disminuyó a $50.22 \pm 2\%$. La Multicelda 2 presento el mismo comportamiento ya que en la primera etapa la remoción fue de $53.29 \pm 14\%$ y en la segunda etapa la remoción disminuyó a $34.28 \pm 18\%$. En el TRH de 1 día en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de nitratos de $40.32 \pm 21\%$ y en la segunda etapa la remoción aumentó a $60.08 \pm 17\%$. En la Multicelda 2 el comportamiento fue lo contrario, en la primera etapa el porcentaje de remoción fue de $62.01 \pm 19\%$ y en la segunda etapa disminuyó a $24.02 \pm 17\%$. En el TRH de 12 horas en la primera etapa de operación la Multicelda 1 presentó una remoción de nitratos de $51.47 \pm 2\%$ y en la segunda etapa una disminución en la remoción a $33.88 \pm 1\%$. En la Multicelda 2 el comportamiento fue similar ya que en la primera etapa la remoción fue del $27.69 \pm 4\%$ y en la segunda etapa la remoción disminuyo a $15.68 \pm 3\%$. De acuerdo a dichos porcentajes se determina que el TRH óptimo para la remoción de nitratos es de 3 días en condición a circuito abierto. La Multicelda más eficiente fue la 1.

4.3 Comportamiento del pH, conductividad eléctrica proteínas y azúcares reductores en el sistema de Multiceldas 1

En la Tabla 6 y se muestra el promedio de los valores de pH y conductividad eléctrica así como las concentraciones de proteínas y azúcares reductores en el agua residual cruda y tratada

mediante los sistemas de Multiceldas operados a circuito abierto y con carga resistiva de 1000 ohms a diferentes TRH's.

Tabla 4. Valores de pH y conductividad eléctrica, concentraciones de proteínas y azúcares reductores en la Multicelda 1

Multicelda 1				
circuito abierto			C/1000 ohms	
TRH	3 días		3 días	
Parámetros	Influente	Efluente	Influente	Efluente
pH	8.01±0.1	8.10±0.2	7.94±0.1	7.70±0.1
CE (uS/cm)	645.92±36	623.67±46	705.17±10	684.33±12
Proteínas (mg/ml)	0.094±0.059	0.018±0.021	0.037±0.009	0.012±0.003
Azúcares R. (ug/ml)	242.00±68	139.50±52	163.67±41	70.33±16
TRH	1 día		1 día	
Parámetros	Influente	Efluente	Influente	Efluente
pH	8.11±0.2	7.96±0.3	7.96±0.1	8.04±0.2
CE (uS/cm)	708.00±9	706.00±4	726.67±16	720.67±9
Proteínas (mg/ml)	0.062±0.005	0.023±0.006	0.034±0.004	0.019±0.003
Azúcares R. (ug/ml)	177.00±14	87.00±14	175.33±53	78.67±36
TRH	12 horas		12 horas	
Parámetros	Influente	Efluente	Influente	Efluente
pH	7.90±0.05	7.91±0.08	7.91±0.01	7.71±0.01
CE (uS/cm)	690.75±12	674.50±4	714±6	720.5±6
Proteínas (mg/ml)	0.108±0.016	0.074±0.001	0.036±0.01	0.013
Azúcares R. (ug/ml)	142.00±14	57.00±7	174.5±18	107

4.3.1 Unidades de pH

En la primera etapa de operación (circuito abierto) los valores de pH permanecieron constantes. Mientras que en la segunda etapa (con 1000 ohms) el pH disminuyó en el TRH de 3 días y 12 horas.

4.3.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica disminuyó en el efluente del sistema durante las dos etapas de operación y los distintos tiempos de retención hidráulicos. A excepción del TRH de 12 horas en la segunda etapa (1000 ohms) ya que la CE aumento en el efluente.

4.3.3 Proteínas

Las concentraciones de proteínas en el efluente disminuyeron más en la primera etapa de operación cuando el sistema se operó en circuito abierto con TRH de 3 días.

4.3.4 Azúcares reductores

Las concentraciones de azúcares reductores disminuyeron más en la segunda etapa cuando al sistema se le aplicó carga resistiva (1000 ohms). Sin embargo, el TRH donde se redujo más la concentración fue en el de 12 horas en la condición de circuito abierto.

4.4 Comportamiento del pH, conductividad eléctrica, proteínas y azúcares reductores en el sistema de Multicelda 2

Tabla 5. Valores de pH, conductividad eléctrica, concentraciones de proteínas y azúcares reductores en la Multicelda 2

Multicelda 2				
Circuito abierto			C/1000 ohms	
TRH	3 días		3 días	
Parámetros	Influente	Efluente	Influente	Efluente
pH	8.01±0.1	7.93±0.2	7.94±0.1	7.74±0.04
CE (uS/cm)	645.92±36	637.83±49	705.17±10	685.00±4
Proteínas (mg/ml)	0.094±0.059	0.016±0.020	0.037±0.01	0.015±0.01
Azúcares R. (ug/ml)	242.00±68	143.67±60	163.67±41	78.67±49
TRH	1 día		1 día	
Parámetros	Influente	Efluente	Influente	Efluente
pH	8.11±0.2	7.95±0.2	7.96±0.05	7.98±0.23
CE (uS/cm)	708.00±9	722.00±18	726.67±16	717.67±8
Proteínas (mg/ml)	0.062±0.005	0.026±0.001	0.034±0.004	0.015±0.006
Azúcares R. (ug/ml)	177.00±14	114.50±39	175.33±53	85.33±55
TRH	12 horas		12 horas	
Parámetros	Influente	Efluente	Influente	Efluente
pH	7.90±0	7.96±0.05	7.91±0.01	7.91±0.10
CE (uS/cm)	690.75±12	688.00±6	714±6	717±3
Proteínas (mg/ml)	0.108±0.016	0.040±0.012	0.036±0.009	0.027±0.001
Azúcares R. (ug/ml)	142.00±14	64.50±18	174.5±18	64.5±4

4.4.1 Unidades de pH

En las dos etapas de operación el pH permaneció constante en cada tiempo de retención hidráulico a excepción del TRH de 3 días en el cual los valores de pH disminuyeron ligeramente.

4.4.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica disminuyó en las dos etapas de operación con excepción del TRH de 1 día en la primera etapa y el TRH de 12 horas en la segunda etapa en ambas condiciones la conductividad eléctrica aumento.

4.4.3 Proteínas

Al igual que en la Multicelda 1 las concentraciones de proteínas en el efluente disminuyeron más en la primera etapa de operación, cuando el sistema se operó en circuito abierto. El TRH en el cual se redujeron más las concentraciones de proteínas fue en el de 3 días.

4.4.4 Azúcares reductores

Las concentraciones de azúcares reductores disminuyeron más en la segunda etapa cuando al sistema se le aplicó carga resistiva (1000 ohms). El TRH donde se presentó mayor disminución en la concentración de azúcares fue el 12 horas. En base a las remociones de materia orgánica y nutrientes. Así como los valores de pH, CE, proteínas y azúcares reductores presentados por las Multiceldas en las dos etapas de operación se determina que la resistencia externa causa efecto sobre estos sistemas. Lyon y colaboradores en 2010 informaron que los cambios en la resistencia externa afectan no sólo la potencia generada, sino también la diversidad relativa de la comunidad microbiana para realizar sus funciones (Lyon *et al.*, 2010).

4.5 Generación de voltaje en la Multicelda 1.

En la Figura 18 se muestra el voltaje generado durante todo el tiempo de experimentación. El estudio se dividió en dos etapas y cada etapa en tres tiempos de retención hidráulica como se mencionó anteriormente (3 días, 1 día y 12 horas). Como se mencionó anteriormente los sistemas de Multiceldas no se sometieron a conexiones en serie ni en paralelo. Solo se realizó el seguimiento de los voltajes en cada CCM de los sistemas.

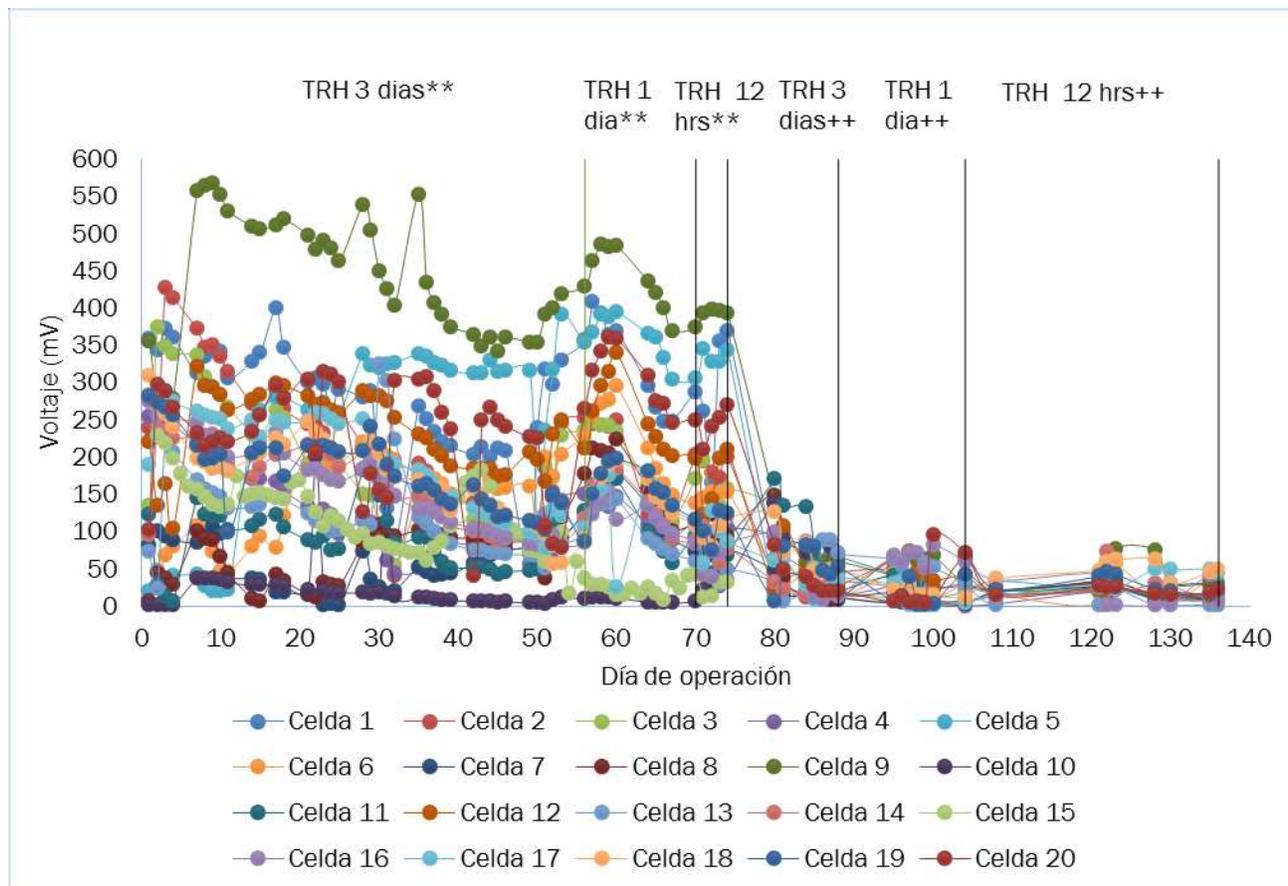


Figura 15. Voltaje generado en la Multicelda 1. (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms

4.5.1 Voltaje a circuito abierto (VCA)

La primera etapa correspondió a la estabilización del sistema en condición de voltaje a circuito abierto (VCA). Esta etapa comprendió hasta el día 74 de operación. Como se puede observar en las 20 CCM's del sistema, el voltaje de salida fue diferente para cada una de ellas. Algunas CCM's reportaron valores de VCA muy bajos como la celda no. 10 que llegó a reportar salidas de VCA de hasta 0.5 mV debido al lento desarrollo de la biopelícula, lo que disminuyó la transferencia de electrones entre los microorganismos y el ánodo. El resto permaneció en el rango de 174 ± 109 mV a excepción de la celda no.9 que llegó a presentar un VCA de 550 mV. Sin embargo, en un circuito abierto, el voltaje máximo registrado en una CCM hasta ahora es de 800 mV (Liu *et al.*, 2005a). Teóricamente, el VCA debe acercarse a la fem de la celda. No obstante, en la práctica el VCA es menor que la fem de la celda debido a varias pérdidas parasitarias. Analizando los voltajes en los tres tiempos de retención hidráulicos y mediante el análisis de varianza (Anexo 1) se determina que no hay diferencia significativa entre los voltajes en cada celda aplicando diferentes TRH a circuito abierto.

En la Tabla 8 se exponen los voltajes promedio a circuito abierto de cada una de las 20 unidades del sistema de Multiceldas 1 durante los diferentes tiempos de retención hidráulicos utilizados.

Tabla 6. Voltajes a circuito abierto del sistema de Multiceldas 1

Multicelda 1 VCA			
TRH	3 días	1 día	12 horas
No. de celda	VCA mV	VCA mV	VCA mV
1	274.67±79	319.86±64	288±95
2	216.72±94	181.37±67	186.5±13
3	189.39±83	189.39±53	153.6±31
4	131.94±61	118.56±21	98.3±12
5	236.96±123	357.08±35	335.83±9
6	147.39±56	216.10±60	150.55±4
7	57.84±35	130.88±37	70.83±4
8	71.01±40	163.81±49	101.4±15
9	436.09±86	434.86±47	395.28±2
10	23.65±40	7.94±3	28.02±6
11	89.52±41	119.81±46	53.5±12
12	235.59±52	254.59±52	168.63±42
13	122.88±63	102.42±33	39.95±9
14	162.85±56	138.27±38	79.23±21
15	132.10±49	141.73±32	72.15±9
16	165.16±59	119.14±22	59.43±23
17	196.80±64	137.13±48	93.1±29
18	178.92±57	155.59±30	99.28±17
19	180.20±50	162.17±28	106.95±24
20	228.30±73	302.94±45	243.38±25

4.5.2 Voltaje a circuito cerrado (1000 Ohms)

La siguiente etapa de operación con resistencia externa fija de 1000 ohms, comprendió del día 80 al 136 de operación. Nuevamente la primera condición en esta etapa fue la de TRH de 3 días y se observó una gran disminución de voltaje en comparación con el voltaje a circuito abierto, esto sucede debido a la aplicación de la resistencia externa al sistema lo que causó que el flujo de electrones fuera lento o las resistencias internas lo cual dificulta el transporte de los electrones hacia el cátodo y genera también que los potenciales electroquímicos sean bajos. En esta condición el voltaje máximo generado fue de 170 mV para la celda no. 11 y el voltaje mínimo de 7 mV para la celda no. 13, el resto se mantuvo en 46 ± 34 mV. La siguiente condición fue de TRH de 1 día y se puso en marcha del día de operación 95 hasta el 104, en este periodo el voltaje de las celdas se presentó más estable que en el TRH de 3 días. El voltaje máximo generado fue de 95

mV para la celda no. 20 y el mínimo de 0.2 mV para la celda no. 4, el resto se mantuvo en 25 ± 22 mV. El último TRH fue de 12 horas se llevó a cabo del día 108 hasta el 136 de operación. El voltaje máximo generado en este periodo fue de 77 mV para la celda no. 9 y el mínimo fue de 0.5 mV para la celda no. 13, el resto se mantuvo en 25 ± 20 mV. El voltaje generado como se puede observar en la Figura 15 fue disminuyendo a medida que el tiempo de retención hidráulico se reducía y a través del análisis de varianza se confirmó que el TRH causa efecto en la generación de energía a circuito cerrado. En la Tabla 9 se muestran los voltajes promedio del sistema de la Multiceldas 1 con carga de 1000 ohms en cada una de las 20 unidades durante los diferentes tiempos de retención hidráulicos utilizados.

Tabla 7. Voltajes con resistencia externa del sistema de Multiceldas 1

Multicelda 1			
TRH	3 días	1 día	12 horas
No. de celda	1000 Ω (mV)	1000 Ω (mV)	1000 Ω (mV)
1	50.60 \pm 16	31.53 \pm 7	17.08 \pm 3
2	22.21 \pm 13	27.69 \pm 20	22.96 \pm 9
3	42.20 \pm 46	7.99 \pm 2	22.06 \pm 13
4	39.06 \pm 33	14.77 \pm 14	12.58 \pm 10
5	15.99 \pm 6	14.63 \pm 4	18.58 \pm 9
6	34.37 \pm 15	19.51 \pm 14	27.15 \pm 23
7	17.84 \pm 13	23.33 \pm 27	18.31 \pm 9
8	43.69 \pm 49	21.49 \pm 23	21.99 \pm 10
9	77.39 \pm 31	52.31 \pm 18	39.40 \pm 23
10	68.14 \pm 40	9.84 \pm 8	18.24 \pm 9
11	85.39 \pm 60	13.93 \pm 15	18.25 \pm 9
12	44.21 \pm 29	51.13 \pm 14	17.55 \pm 5
13	46.39 \pm 35	39.97 \pm 22	3.61 \pm 7
14	31.53 \pm 10	11.14 \pm 11	25.85 \pm 21
15	42.00 \pm 29	16.93 \pm 6	28.51 \pm 11
16	45.06 \pm 40	66.20 \pm 10	16.98 \pm 19
17	44.63 \pm 15	11.07 \pm 14	36.15 \pm 14
18	67.49 \pm 29	17.16 \pm 6	49.11 \pm 12
19	55.71 \pm 28	15.44 \pm 18	28.78 \pm 12
20	36.51 \pm 23	28.87 \pm 38	20.36 \pm 5

4.6 Generación de voltaje en la Multicelda 2

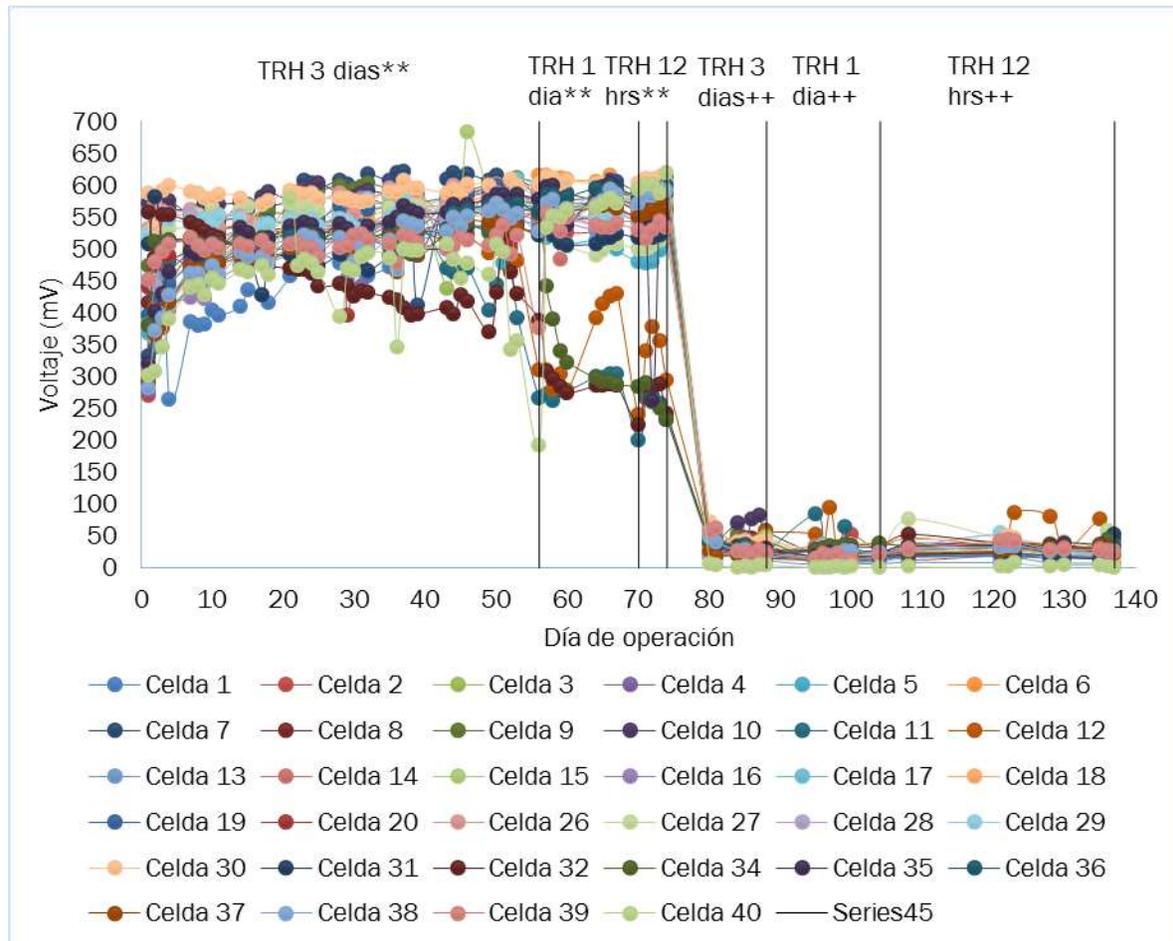


Figura 16. Voltaje generado en la Multicelda 2 (**) Voltaje a circuito abierto, (++) Resistencia externa de 1000 ohms

4.6.2 Voltaje a circuito abierto (VCA)

Al igual que el sistema de Multicelda 1, la primera etapa correspondió a la estabilización del sistema con voltaje a circuito abierto desde el día 01 al 74 de operación. Como se puede observar en la Figura 19 los valores de VCA en las 40 CCM se presentaron más uniformes y mayores en comparación con el sistema de Multiceldas 1. Debido a la arquitectura de las celdas en los reactores ya que en este sistema cuenta con tres ánodos por cada celda y por lo tanto aumenta la proporción de área del electrodo por volumen de compartimiento de ánodo. En esta condición el VCA mayor fue de 682 mV para la celda no. 15 este valor de VCA es similar al obtenido por Zhuang y Zhou en 2009 el cual fue 654.1 mV en un sistema de CCM's tubulares con contacto aire-cátodo alimentado con agua residual de la industria cervecera con TRH de 24 horas (Zhuang

y Zhou, 2009). El VCA mínimo fue de 191 mV para la celda no. 40, el resto de las celdas se mantuvo en 524 ± 92 mV.

Analizando los voltajes en los tres tiempos de retención hidráulicos y a través del análisis de varianza (Anexo 1) se determina que no hay diferencia significativa entre los voltajes en cada celda aplicando diferentes TRH a circuito abierto.

En la Tabla 10 se exponen los voltajes promedio a circuito abierto de cada una de las 40 unidades del sistema de Multiceldas 2 durante los diferentes tiempos de retención hidráulicos utilizados.

Tabla 8. Voltajes a circuito abierto del sistema de Multicelda 2

Multiceldas 2			
TRH	3 días	1 día	12 horas
No. de celda	VCA mV	VCA mV	VCA mV
1	466.75±77	561.00±12	584.75±9
2	516.71±69	540.44±16	563.00±13
3	515.56±66	572.11±11	592.50±7
4	514.93±69	579.33±12	600.75±5
5	513.31±36	510.33±16	491.50±16
6	537.37±47	602.22±13	600.00±11
7	577.89±54	590.56±10	594.75±20
8	534.45±29	553.56±10	560.75±10
9	565.84±37	578.89±5	585.00±8
10	578.58±20	569.33±5	578.50±9
11	493.08±57	276.91±33	256.40±18
12	507.22±50	340.94±74	341.65±36
13	519.31±42	552.33±6	555.75±8
14	519.64±57	541.56±25	561.00±9
15	531.71±68	571.67±11	578.75±1
16	497.44±62	542.33±13	562.25±17
17	530.49±70	577.22±16	589.00±11
18	521.22±67	560.89±18	582.75±14
19	529.89±60	563.56±14	576.75±12
20	508.00±35	571.11±10	584.25±6
21	532.00±65	543.22±14	555.00±9
22	494.22±94	565.22±11	575.00±5
23	533.98±36	540.33±13	538.25±7
24	532.71±21	538.67±9	536.75±7
25	586.03±20	607.11±10	622.50±7

Multiceldas 2			
TRH	3 días	1 día	12 horas
No. de celda	VCA mV	VCA mV	VCA mV
26	567.87±19	575.67±11	588.50±9
27	549.45±18	509.67±16	510.25±9
28	542.11±24	551.56±8	560.25±10
29	548.45±14	555.56±9	554.75±4
30	584.95±16	603.33±7	608.50±5
31	504.32±26	516.44±7	524.00±11
32	461.22±52	280.94±23	274.63±22
33	460.98±39	238.44±33	211.90±3
34	518.66±28	326.98±54	257.23±25
35	525.58±53	586.67±21	494.28±157
36	501.93±58	585.44±8	589.50±10
37	494.18±53	560.56±8	562.50±7
38	497.02±57	574.00±11	588.00±5
39	502.35±26	539.00±10	530.75±12
40	442.28±73	564.44±18	602.50±14

4.6.1 Voltaje a circuito cerrado (1000 ohms)

La siguiente etapa de operación con resistencia externa fija de 1000 ohms, se llevó a cabo a partir del día 80 al 136 de operación. La primera condición en esta etapa fue la del TRH de 3 días obteniendo un voltaje máximo de 82 mV en la celda no. 10 y el mínimo de 0.7 mV en la celda no. 40, en el resto de las celdas el voltaje se mantuvo en 29±12 mV. La siguiente condición fue el TRH de 1 día y se puso en marcha del día 95 hasta el 104, en este periodo el voltaje máximo generado fue de 94 mV para la celda no. 12 y el mínimo de 0.4 mV para la celda no. 40, el resto de las celdas presentaron un voltaje de 19±11 mV. El último TRH fue de 12 horas inicio del día de operación 108 hasta al 136. En este periodo el voltaje de las celdas fue estable, el voltaje máximo fue de 87 mV para la celda no. 12 y el mínimo de 0.3 mV para la celda no. 40, el resto mantuvo un voltaje de 27±11 mV.

De acuerdo con los voltajes obtenidos y el análisis de varianza (Anexo 1) realizado se determina que el TRH es un factor que causa efecto significativo en los voltajes de las celdas del sistema en circuito cerrado. En la Tabla 11 se muestran los voltajes con carga de 1000 ohms de cada una de las 40 unidades del sistema de Multiceldas 2 durante los diferentes tiempos de retención hidráulicos utilizados.

Tabla 9. Voltajes con resistencia externa del sistema de Multiceldas 2

Multicelda 2.			
TRH	3 días	1 día	12 horas
No. de celda	1000 Ω (mV)	1000 Ω (mV)	1000 Ω (mV)
1	23.13±1	16.43±2	27.08±3
2	24.13±3	20.47±14	22.34±4
3	28.51±14	14.94±2	28.54±3
4	28.39±8	12.46±3	23.76±4
5	30.26±12	20.69±8	23.12±7
6	31.57±7	13.33±3	27.71±5
7	26.26±4	15.20±3	25.99±7
8	28.25±9	10.83±1	15.56±5
9	42.19±4	13.99±2	18.81±3
10	59.81±16	19.93±4	31.94±6
11	29.69±5	35.24±27	17.73±3
12	42.73±6	37.16±28	49.97±24
13	17.49±10	10.76±11	8.51±3
14	27.09±8	12.74±9	18.31±3
15	35.41±6	11.94±1	22.74±5
16	25.51±3	11.41±2	19.69±2
17	29.83±4	15.83±11	19.63±2
18	31.30±3	15.41±4	24.77±6
19	21.34±5	13.31±5	19.84±9
20	24.76±3	18.79±4	27.19±4
21	21.03±9	23.24±15	26.10±8
22	12.81±3	10.83±2	20.23±4
23	21.01±4	21.17±5	35.27±7
24	24.79±20	20.54±5	35.52±5
25	32.07±17	22.71±5	37.13±8
26	25.33±10	18.64±4	32.33±3
27	29.10±5	26.47±5	44.67±16
28	24.87±6	20.61±3	27.33±5
29	28.34±11	19.46±3	30.89±10
30	46.81±13	32.01±6	36.41±10
31	26.84±9	15.63±1	23.33±11
32	29.20±9	31.46±2	35.80±8
33	28.89±8	27.67±11	31.62±6

Multicelda 2.			
TRH	3 días	1 día	12 horas
No. de celda	1000 Ω (mV)	1000 Ω (mV)	1000 Ω (mV)
34	33.54±8	33.36±3	35.78±5
35	32.50±6	22.37±4	33.59±4
36	29.53±7	19.69±4	30.07±3
37	20.29±6	18.77±4	28.73±3
38	29.04±11	20.91±5	29.19±4
39	34.47±18	16.76±5	32.61±8
40	2.96±2	0.87±1	2.54±2

Comparando los voltajes de los dos sistemas de Multiceldas en operación a circuito abierto, se determinó que en el sistema de Multicelda 2 el voltaje teórico es mayor. Ya que los valores de VCA de la Multicelda 2 fueron de 524±92 mV obteniendo en una celda un VCA máximo de 686 mV. Mientras que en la Multicelda 1 los valores de VCA fueron de 174±109 mV obteniendo en una celda un VCA máximo de 550 mV. Hipotéticamente el VCA debería acercarse a la fuerza electromotriz. Sin embargo el VCA es ligeramente menor debido a que en esta condición también ocurren pérdidas por tensión o sobrepotencial.

Aplicando resistencia externa a los sistemas de Multiceldas el voltaje disminuyó considerablemente debido a pérdidas irreversibles como de activación (energía de activación que se debe superar debido a las especies que reacción en la cámara anódica) y de concentración (incapacidad de mantener una concentración inicial de sustrato en el volumen del líquido). Presento variaciones significativas en cada tiempo de retención hidráulico propuesto. Siendo la Multicelda 1 la que presento voltajes mayores pero estos no se presentaron de manera uniforme en cada celda. Durante el TRH de 3 días el voltaje fue de 46±34 mV, en el TRH de 1 día el voltaje fue de 25±22 y en el TRH de 12 horas el voltaje fue de 25±20 mV. Mientras que en la Multicelda 2, en TRH de 3 días presento un voltaje de 29±12 mV, 19±11 mV en el TRH de 1 día y en el TRH de 12 horas aumentó a 27±11 mV. De acuerdo con los voltajes obtenidos en el sistema 1 y sistema 2 se determina que el TRH óptimo para las Multiceldas de combustible microbianas es de 3 días.

4.7 Curvas de polarización del sistema de Multiceldas 1 en función del TRH.

Este tipo de curvas se utilizó para encontrar los puntos máximos de potencia respecto a la corriente generada en cada CCM del sistema de Multicelda 1. En Función del tiempo de retención hidráulico.

4.7.1 Curva de polarización con TRH de 3 días

En la Figura 20 se presenta la curva de polarización del sistema de Multicelda 1 correspondiente al tiempo de retención hidráulico de 3 días.

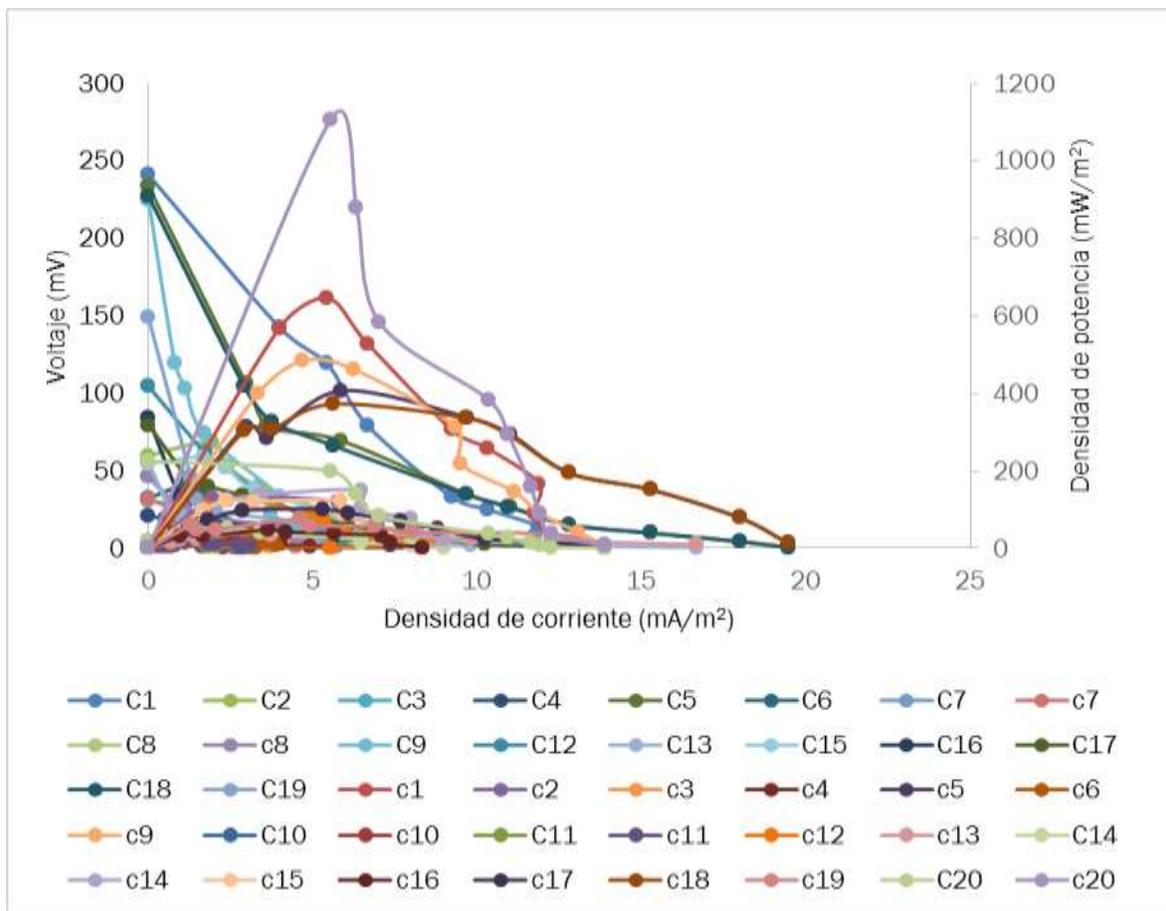


Figura 17. Curva de polarización de la Multicelda 1 en TRH de 3 días, (C) DC vs V, (c) DC vs DP

La densidad de potencia máxima en esta condición fue de 1106.67 mW/m^2 para una densidad de corriente de 5.54 mA/m^2 correspondiente a la celda no. 20 y la densidad de potencia mínima la presento la celda no. 10 la cual fue de 0.27 mW/m^2 para una densidad de corriente de 2.77 mA/m^2 . El resto de las celdas presento valores bajos de densidad de potencia, se mantuvieron en un rango de 5 a 110 mW/m^2 . Este valor de densidad de potencia máxima generada se asemeja a la obtenida por Kim y colaboradores en 2012 de 1184 mW/m^2 en un sistema de Multicelda de dos módulos con 4 CCM's en serie con electrodos de tela de carbono y membrana de intercambio catiónico, operado en lote con TRH de 10 días y alimentado con acetato. En la Figura 21 se puede observar la densidad de potencia de las 20 celdas que conforman el sistema 1 en un TRH de 3 día, como se puede notar solo cinco CCM's de este sistema presentaron densidades de potencia significativas (celda 20, 1, 9, 5 y 18). La densidad de corriente máxima fue de 19.44 mA/m^2 para la celda no. 18 y la mínima de 0.319 mA/m^2 para la celda no. 10.

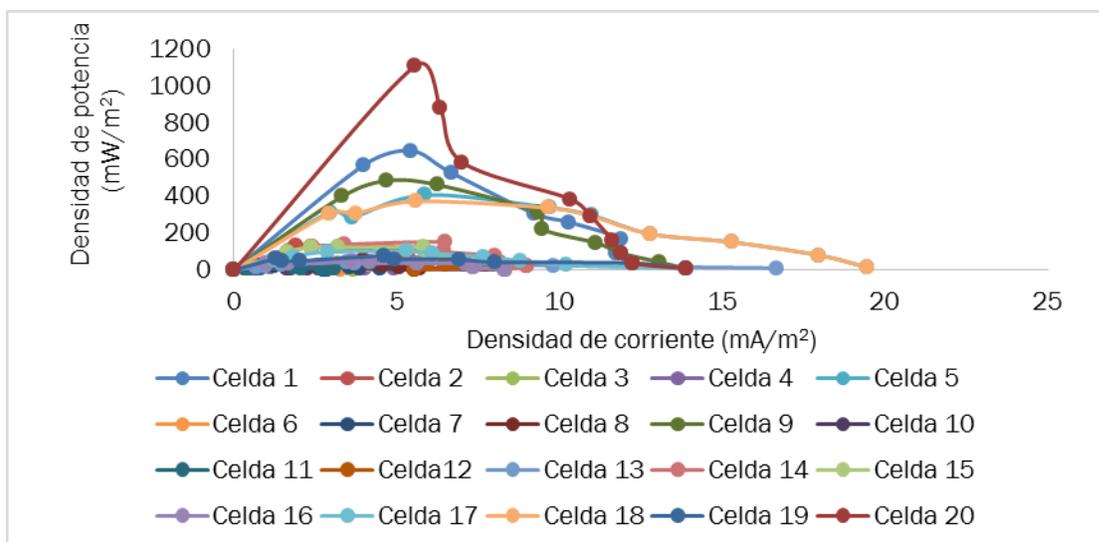


Figura 18. Densidad de potencia del sistema de Multicelda 1 en un TRH de 3 días

4.7.2 Curva de polarización con TRH de 1 día

En la Figura 22 se observa la curva de polarización del sistema de Multicelda 1 correspondiente al TRH de 1 día, donde se representa la densidad de potencia en función de la densidad de corriente generada.

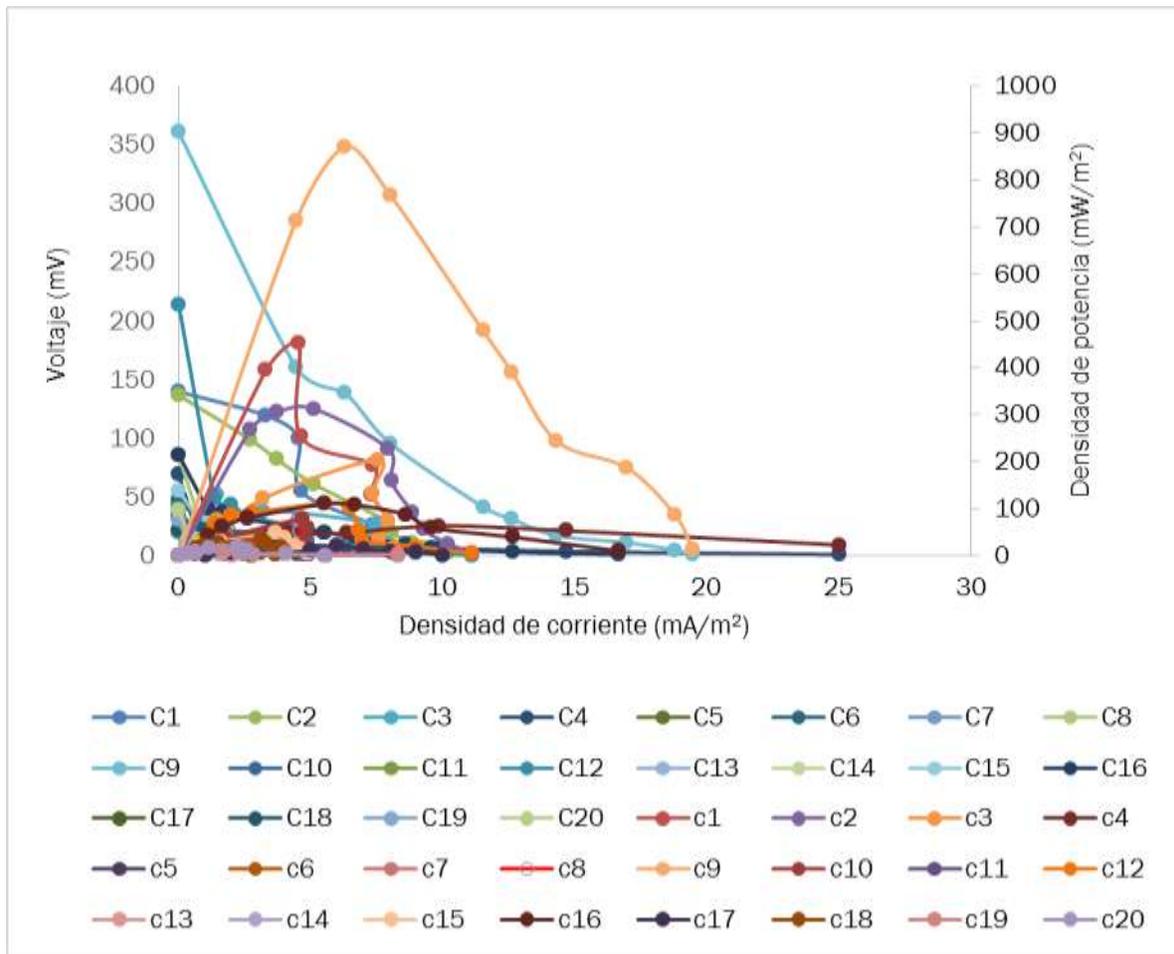


Figura 19. Curva de polarización de la Multicelda 1 en un TRH de 1 día (C) DC vs V, (c) DC vs DP

La densidad de potencia máxima fue generada por la celda no. 9 la cual fue de 870.98 mW/m^2 para una densidad de corriente de 6.29 mA/m^2 y la densidad de potencia mínima fue de 0.278 mW/m^2 para la celda no. 15 con una densidad de corriente de 2.78 mA/m^2 . El resto de las celdas se mantuvo en valores más bajos que en el TRH de 3 días, en un rango de 4 a 66 mW/m^2 .

La densidad máxima generada en este sistema tiene similitud con la obtenida por Ieropoulos y colaboradores en 2013 que obtuvieron 974.66 mW/m^2 . Esta se llevó a cabo en una Multicelda de 8 CCM's en cascada en conexión en paralelo con electrodos de velo de carbono y membrana de intercambio catiónico, operada en continuo con TRH de 12.69 minutos alimentada con orina artificial. En la Figura 23 se puede observar la densidad de potencia de las 20 celdas que conforman el sistema 1 con TRH de 1 día, como se puede notar solo seis CCM's de este sistema presentaron densidades de potencia significativas (celda 9, 1, 2, 3, 16 y 12). La mayor densidad de

corriente fue de 25 mA/m^2 generada por la celda no. 4 y la mínima fue de 0.3 mA/m^2 por la celda no. 13.

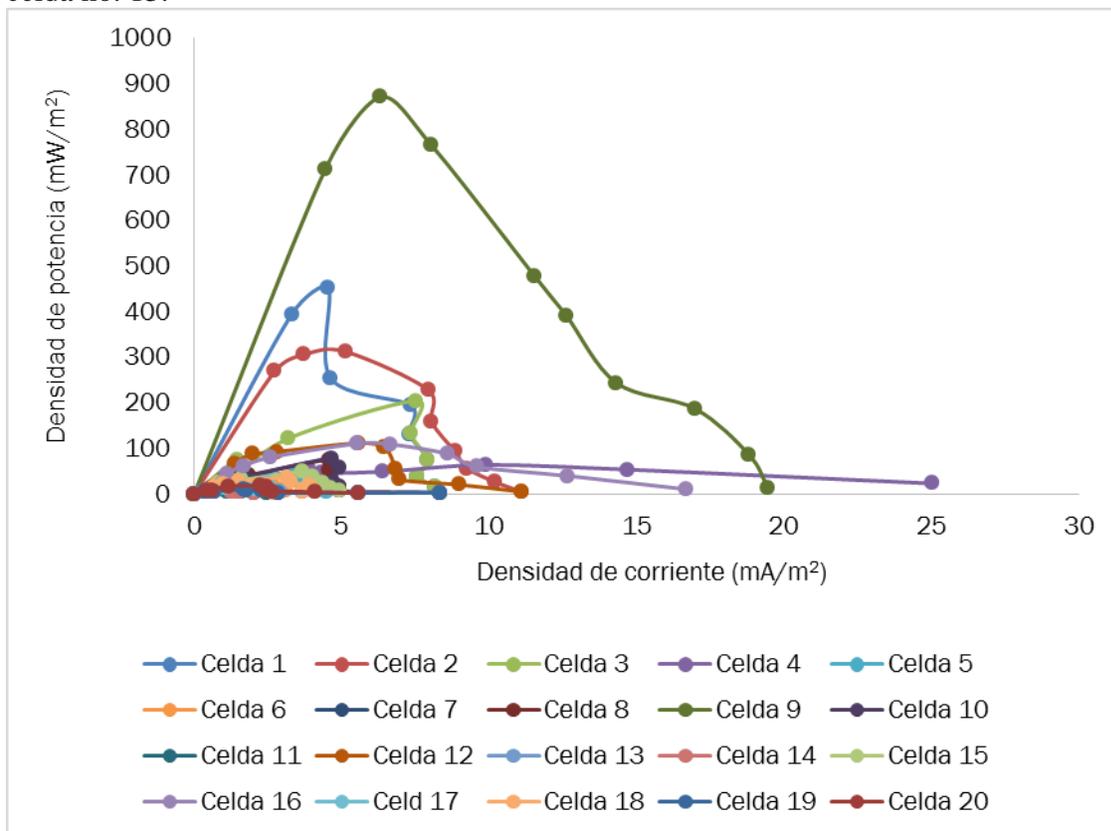


Figura 20. Densidad de potencia del sistema de la Multicelda 1 con un TRH de 1 día

4.7.3 Curva de polarización con TRH de 12 horas

En la Figura 24 se presenta la curva de polarización del sistema de la Multicelda 1 correspondiente al TRH de 12 horas. Donde se representa la densidad de potencia en función de la densidad de corriente generada.

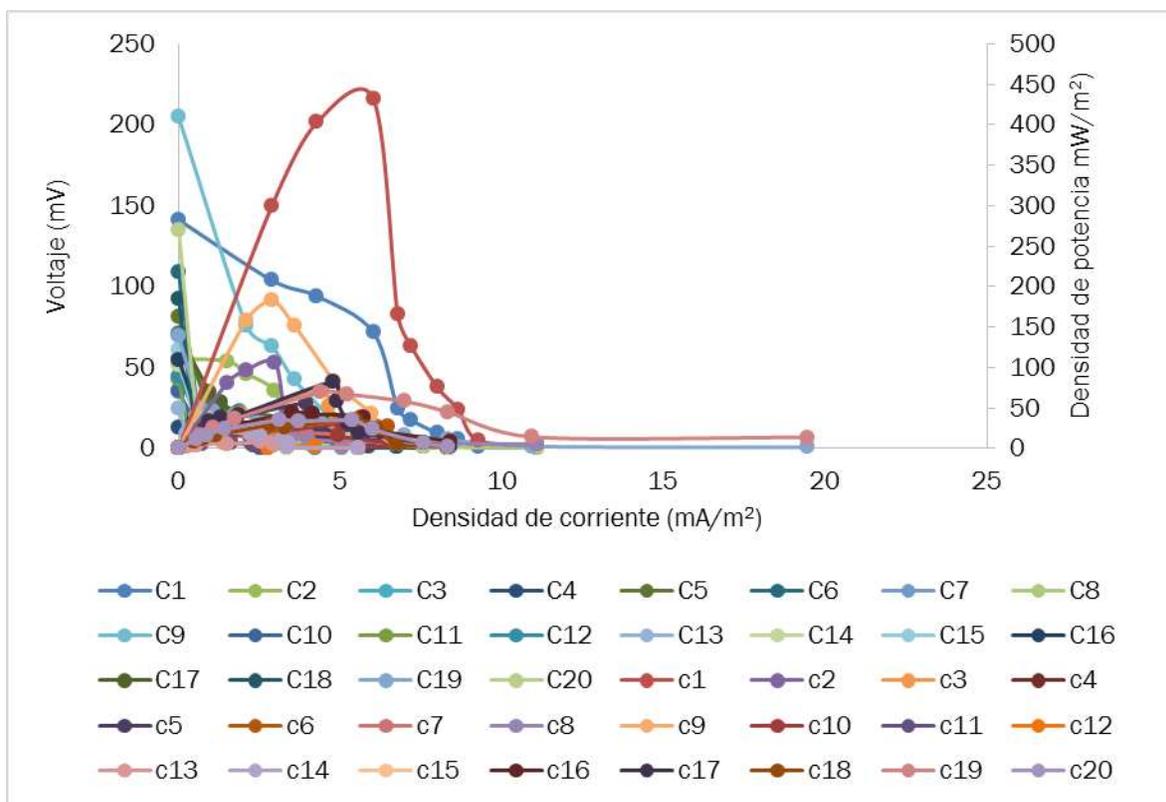


Figura 21. Curva de polarización de Multicelda 1 en TRH 12 hrs, (C) DC vs V, (c) DC vs DP

La máxima densidad de potencia fue generada por la celda no. 1 la cual fue de 431.52 mW/m^2 para una densidad de corriente de 6.02 mA/m^2 y la mínima densidad de potencia la presentó la celda no. 12 generando 0.27 mW/m^2 para una densidad de corriente de 2.78 mA/m^2 . El resto de las celdas presentó valores de densidad de potencia más bajos en comparación con los generados en los dos tiempos de retención hidráulicos anteriores, estuvieron en un rango de 3 a 34 mW/m^2 . La densidad de potencia generada en esta condición se asemeja a la obtenida por Oh y colaboradores en 2007 que alcanzó una densidad de potencia de 460 mW/m^2 . Con un sistema de Multiceldas de una sola cámara operada en lote y alimentada con acetato. En la Figura 25 se presentan las densidades de potencia de las 20 celdas que conforman el sistema 1 con una TRH de 12 horas en donde se observa que solo tres CCM's generaron densidad de potencia significativa (celda no. 9, 2 y 19). La mayor densidad de corriente fue de 19.44 mA/m^2 para la celda no. 19 y la mínima 0.25 mA/m^2 para la celda no. 13.

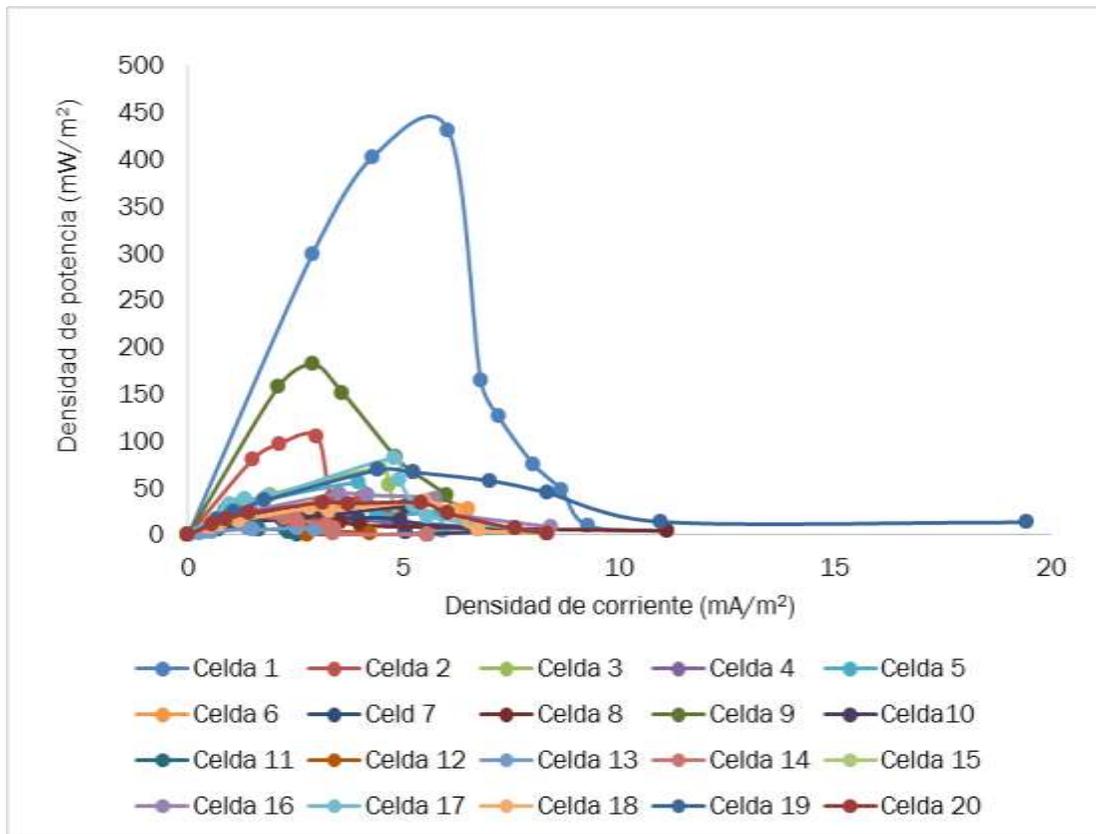


Figura 22. Densidad de potencia del sistema de Multicelda 1 (TRH 12 hrs)

4.8 Curvas de polarización del sistema de la Multicelda 2 en función del TRH

Este tipo de curvas se utilizó para encontrar los puntos máximos de potencia respecto a la corriente generada en cada CCM del sistema de la Multicelda 2. En función del tiempo de retención hidráulico.

4.8.1 Curva de polarización con TRH de 3 días

En la Figura 26 se presenta la curva de polarización del sistema de la Multicelda 2 correspondiente al TRH de 3 días.

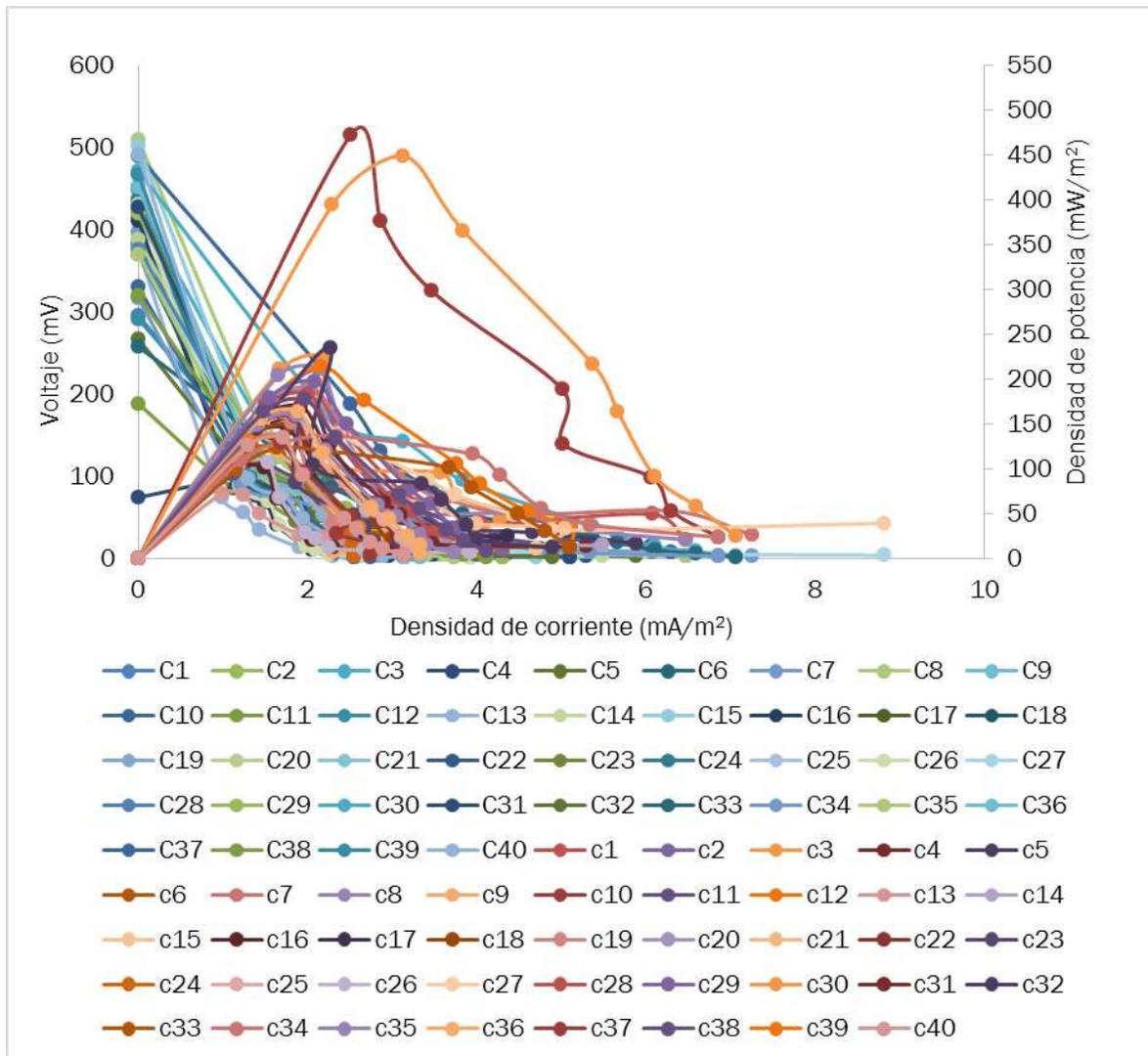


Figura 23. Curva de polarización de la Multicelda 2 en un TRH de 3 días, (C) DC vs V, (c) DC vs DP

La densidad de potencia máxima fue de 472.25 mW/m^2 para una densidad de corriente de 2.50 mA/m^2 generada por la celda no. 10 y la mínima densidad de potencia la generó la celda no. 24 con una densidad de potencia de 3.31 mW/m^2 para una densidad de corriente de 2.56 mA/m^2 . El resto de las CCM's del sistema se mantuvieron en un rango de densidad de potencia de 22 a 115 mW/m^2 . Este valor de densidad de potencia máxima fue similar al obtenido en la Multicelda 1 en el TRH de un 1 día en el cual se presentó una densidad de potencia máxima de 431.52 mW/m^2 . Mientras que para este sistema (Multicelda 2) fue para un TRH mayor. En la Figura 27 se presentan las densidades de potencia de las 40 celdas que conforman el sistema 2 con un TRH de

3 días, donde se observa que las CCM's que generaron mayor densidad de potencia fueron las no. 10 y 30. La densidad de corriente máxima fue de 8.82 mA/m^2 para la celda no. 27.

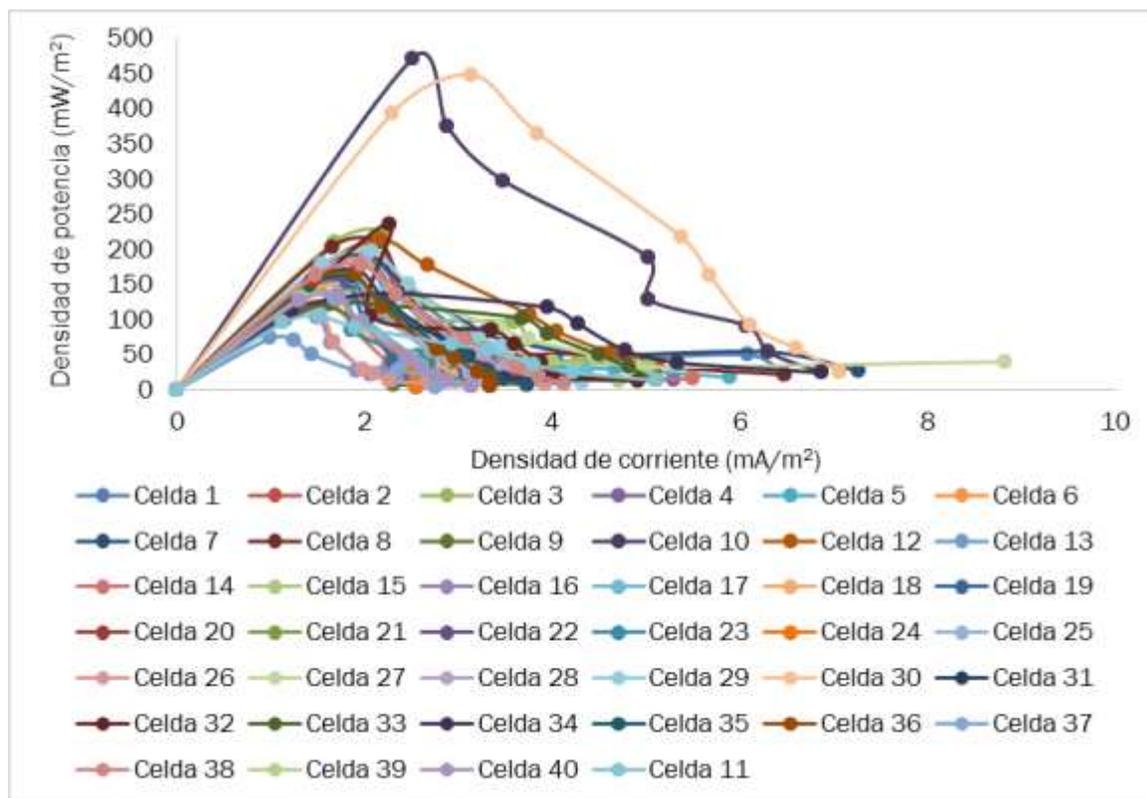


Figura 24. Densidad de potencia del sistema de la Multicelda 2 (TRH 3 días)

4.8.2 Curva de polarización con un TRH de 1 día

En la Figura 28 se observa la curva de polarización del sistema de Multicelda 1 correspondiente al TRH de 1 día, donde la densidad de potencia máxima fue de 292.60 mW/m^2 para una densidad de corriente de 2.52 mA/m^2 generada por la celda no. 32 y la densidad de potencia mínima generada fue para la celda no. 17 la cual genero 1.25 mW/m^2 para una densidad de corriente de 1.56 mA/m^2 . El resto se mantuvo en una densidad de potencia de 30 a 88 mW/m^2 .

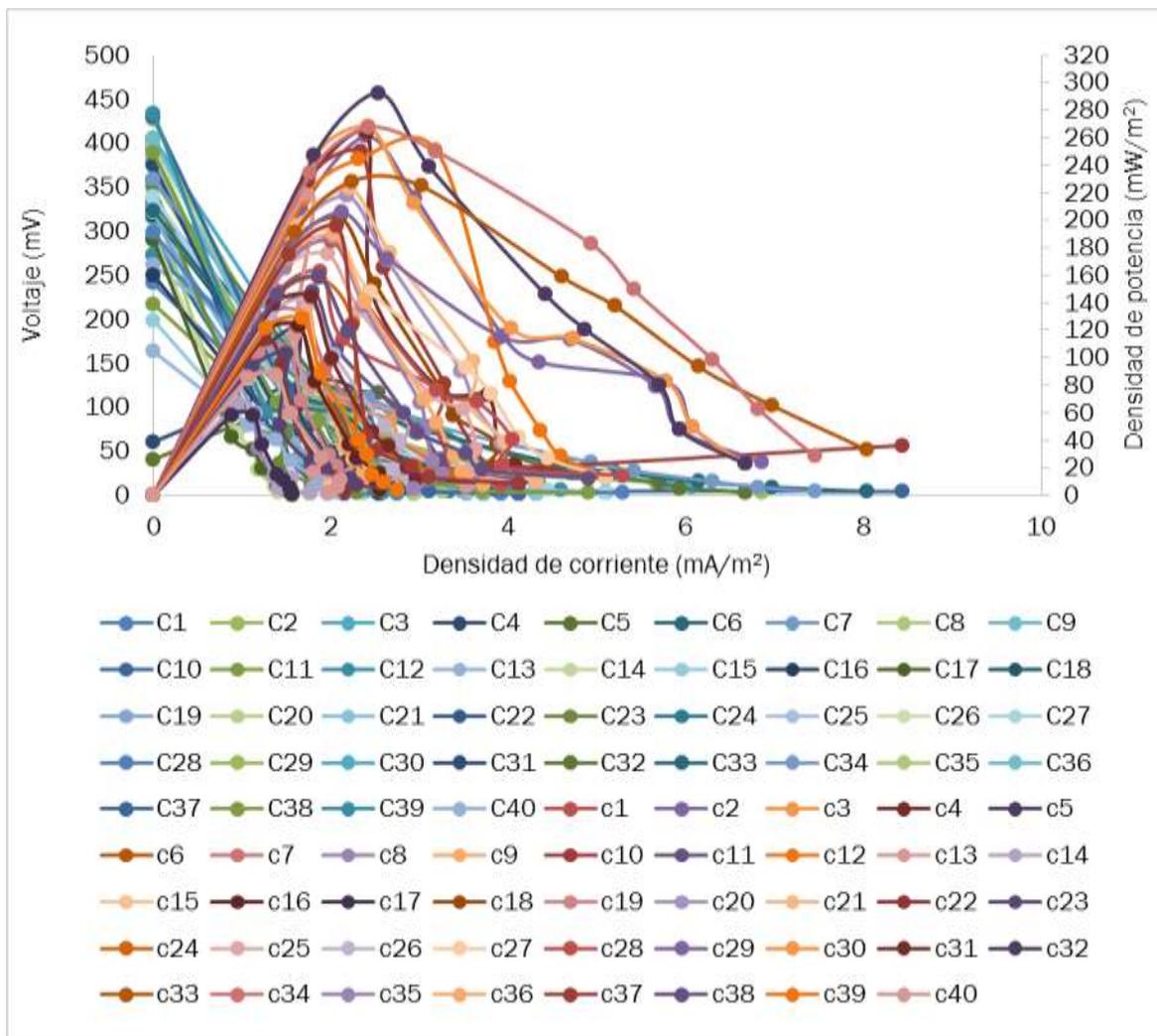


Figura 25. Curva de polarización de la Multicelda 2 en TRH de 1 día, (C) DC vs V, (c) DC vs DP

La densidad de potencia obtenida en este sistema se puede comparar con la obtenida por Zhang y Angelidaki en 2012 quienes obtuvieron 294 mW/m^2 en conexión en serie utilizaron una pila de 2 CCM's auto-sumergible en un reactor de vidrio, la cual tenía una cámara catódica y dos ánodos de tela de carbono con una membrana de intercambio de protones. Se alimentó con sedimentos de un lago y una mezcla de acetato en operación por lote con un TRH de 6 días (Zhang y Angelidaki, 2012). En la Figura 29 se muestran la densidad de potencia de las 40 celdas que conforman el sistema 2 con un TRH de 1 día. La mayor densidad de corriente en esta condición fue de 8.43 mA/m^2 para la celda no. 33.

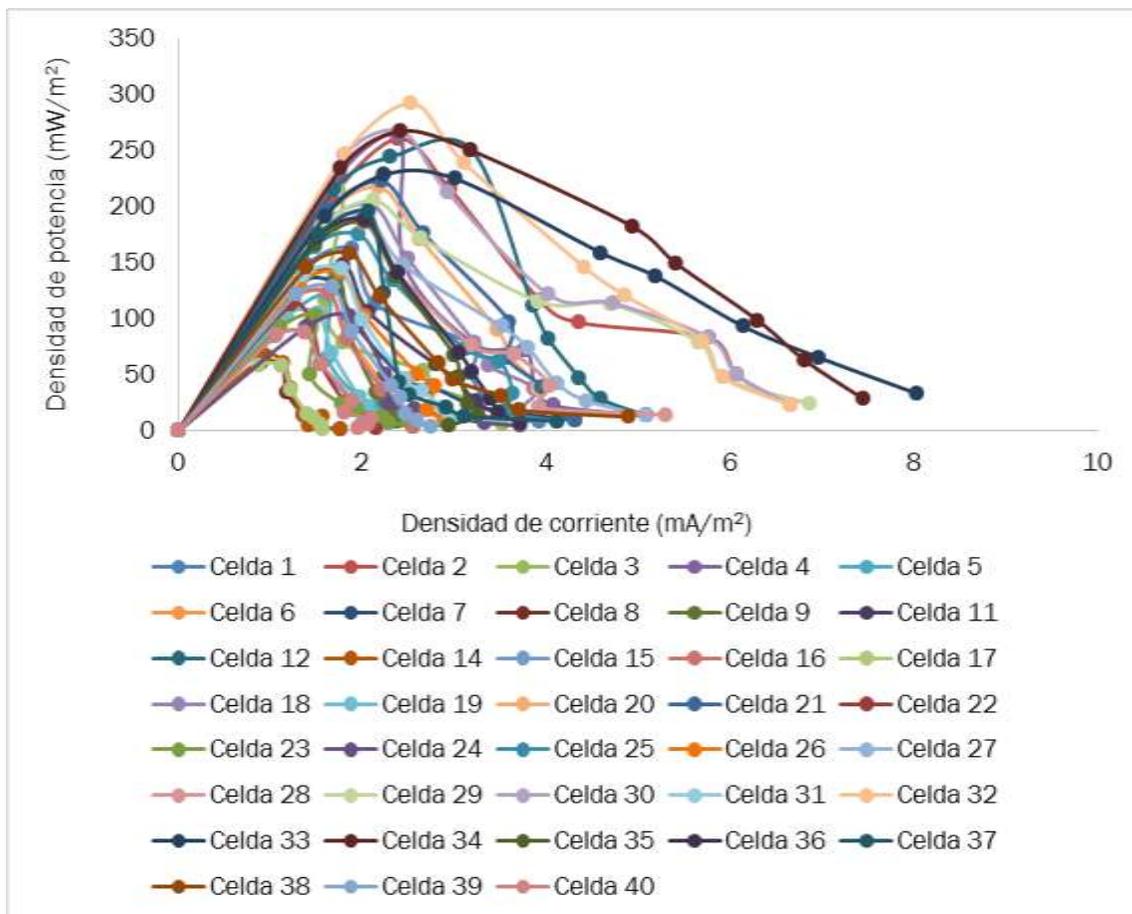


Figura 26. Densidad de potencia del sistema de la Multicelda 2 (TRH 1 día)

4.8.3 Curva de polarización con TRH de 12 horas

En la Figura 30 se presenta la curva de polarización del sistema de la Multicelda 2 correspondiente a un TRH de 12 horas. Donde la máxima densidad de potencia fue de 275.71 mW/m² generada por la celda no. 4 para una densidad de corriente de 1.91 mA/m² y la densidad de potencia mínima producida fue de 1.96 mW/m² para la celda no. 19 con una densidad de corriente de 1.96 mA/m². El resto de las celdas se mantuvieron en un rango de densidad de potencia de 7 a 80 mW/m².

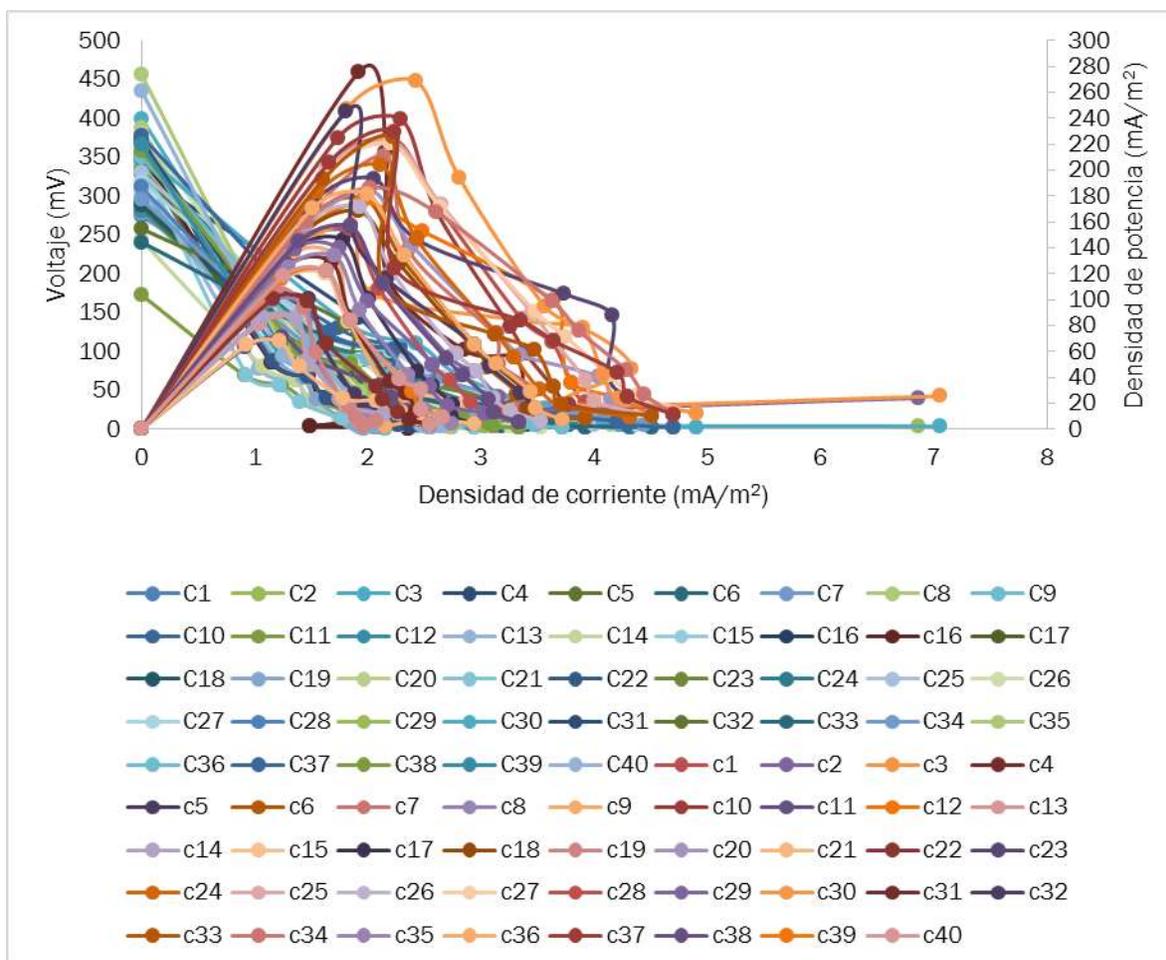


Figura 27. Curva de polarización de la Multicelda 2 con un TRH 12 hrs, (C) DC vs V, (c) DC vs DP

La densidad de potencia en esta condición disminuyó en comparación con los TRH's utilizados anteriormente, sin embargo esta disminución no fue tan significativa. En la Figura 31 se presentan las densidades de potencia de las 20 celdas que conforman el sistema 2 con un TRH de 12 horas. La densidad de corriente máxima generada en esta condición fue de 7 mA/m^2 por la celda 3.

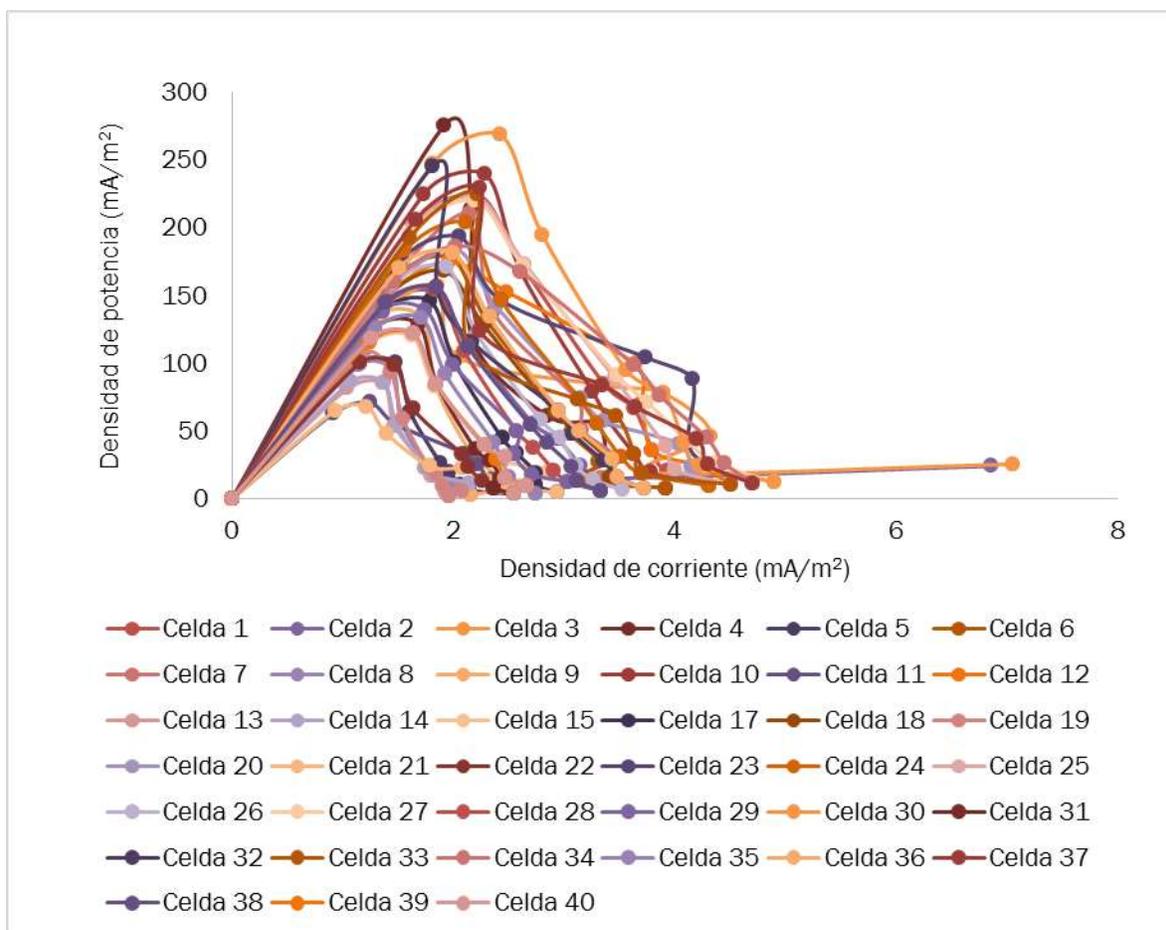


Figura 28. Densidad de potencia del sistema de la Multicelda 2 (TRH 12 hrs)

4.9 Comparación de la densidad de potencia máxima generada por cada TRH en los sistemas de Multiceldas

En la Tabla 12 y la Tabla 13 se exponen las densidades de potencia máxima alcanzada por cada una de las CCM's del sistema de la Multicelda 1 y el sistema de la Multicelda 2 variando los tiempos de retención hidráulico. La mayor densidad de potencia en el sistema de la Multicelda 1 se presentó utilizando el TRH de 3 días ya que el promedio de la densidad de potencia en dicho TRH fue de 198 mW/m^2 (Tabla 12). La densidad de potencia fue disminuyendo acorde al tiempo de retención hidráulico hasta llegar a 62 mW/m^2 en el TRH de 12 horas. Por lo tanto se determina que el TRH óptimo para la generación de energía en un sistema de Multiceldas de combustible microbiana es de 3 días.

Tabla 10. Densidad de potencia máxima generada en CCM's del sistema 1 en los tres TRH's.

Densidad de potencia (mW/m ²) Multicelda 1			
TRH	3 días	1 día	12 horas
No. de celda			
1	647.024	452.645	431.529
2	134.008	312.189	105.485
3	28.900	204.003	71.111
4	23.511	63.210	28.336
5	406.587	42.025	22.761
6	53.574	32.008	37.786
7	28.336	22.500	18.594
8	56.803	74.711	31.803
9	484.044	870.988	182.463
10	9.344	78.400	15.802
11	11.736	7.511	9.025
12	123.476	111.111	21.511
13	43.403	10.000	7.576
14	150.803	5.625	20.485
15	123.133	48.400	35.564
16	47.669	110.003	38.923
17	101.336	22.500	20.000
18	303.921	36.100	35.564
19	76.544	10.000	69.344
20	1106.671	17.778	34.844
Promedio (mW/m ²)	198.041	126.585	61.925

Tabla 11. Densidad de potencia máxima generada en las CCM's del sistema 2 en los tres TRH's.

Densidad de potencia (mW/m ²) Multicelda 2			
TRH	3 días	1 día	12 horas.
No. de celda			
1	189.049	162.791	224.742
2	210.781	260.648	152.764
3	222.531	218.112	157.552
4	156.071	264.000	275.713
5	182.600	121.317	100.181

Densidad de potencia (mW/m ²) Multicelda 2			
TRH	3 días	1 día	12
6	123.936	122.623	178.231
7	191.087	131.623	210.781
8	210.781	60.570	98.384
9	152.653	139.810	134.938
10	472.257	249.784	239.609
11	104.670	147.690	71.016
12	213.797	250.886	175.087
13	73.013	219.137	85.383
14	135.381	67.213	86.189
15	182.600	87.582	120.342
16	102.264	123.279	99.295
17	144.474	58.256	146.257
18	149.131	201.863	168.499
19	152.939	104.972	106.803
20	185.811	217.706	184.603
21	161.661	222.973	67.814
22	157.923	112.608	100.457
23	162.037	102.563	193.548
24	133.666	158.295	203.969
25	159.787	175.479	222.973
26	107.410	141.645	171.197
27	177.049	191.496	220.331
28	184.202	185.005	154.597
29	197.683	205.661	139.541
30	448.850	267.858	268.826
31	169.653	144.119	129.259
32	235.507	292.601	245.165
33	123.936	228.303	225.186
34	136.858	267.374	186.618
35	160.535	187.022	133.666
36	163.925	189.049	181.802
37	131.209	195.610	229.197
38	177.443	158.668	156.441
39	134.351	128.253	122.296
40	134.351	87.306	122.296

Densidad de potencia (mW/m ²) Multicelda 2			
TRH	3 días	1 día	12
Promedio (mW/m ²)	175.347	171.294	162.289

Al igual que en sistema de la Multicelda 1 el TRH optimo en este sistema es de 3 días debido a que en este TRH el promedio de la densidad de potencia máxima generada fue de 175 mW/m². Este sistema presento el mismo comportamiento que el sistema 1 ya que la densidad de potencia disminuyó conforme al TRH hasta llegar a 162 mW/m² del TRH de 12 días. En la tabla 14 se muestra la densidad de potencia máxima alcanzada en las celdas de combustible microbianas de cada sistema cuando se varió el tiempo de retención hidráulico.

Tabla 12. Valores máximos de densidad de potencia presentados en las CCM's de los dos sistemas en los diferentes TRH's.

Densidad de potencia (mW/m ²)						
Sistema	Multicelda 1			Multicelda 2		
TRH	3 días	1 día	12 horas	3 días	1 día	12 horas
Densidad de potencia máxima (mW/m ²)	1106.671	452.645	431.529	472.257	292.601	275.713

A pesar de que en la Multicelda 2 generó densidades de potencia menores que en la Multicelda 1, el sistema más eficiente fue la Multicelda 2 ya que las densidades de potencia fueron más estables. Mientras que la Multicelda 1 presentó algunas densidades de potencia altas como es el caso de la celda no. 20 (la cual generó 1106.67 mW/m²) pero el resto de las celdas presentaron valores muy bajos de densidad de potencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Romero A, M., Colín, A., Sánchez S, E. y Ortiz Hernández, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), p.158.
2. Gómez H. R., (2014). “Fiscalización Ambiental en Agua Residuales. Organismos de Evaluación y Fiscalización Ambiental” (OEFA), Lima, Perú. 1-10
3. CNA (2014). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México D.F. 74 pp.
4. INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). “Información estadística y geográfica sobre tres temas esenciales de la agenda ambiental de México: agua potable, residuos sólidos y hogares”. Aguascalientes, México. Disponible en la world wide web: <https://journalmex.wordpress.com/2013/04/09/estadistica-basica-sobre-medio-ambiente/> Consultado 12 de enero del 2016.
5. Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L. and Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), pp.1533-1543.
6. Kim, D., An, J., Kim, B., Jang, J., Kim, B. and Chang, I. (2012). Scaling-Up Microbial Fuel Cells: Configuration and Potential Drop Phenomenon at Series Connection of Unit Cells in Shared Anolyte. *ChemSusChem*, 5(6), pp.1086-1091.

7. Ieropoulos, I., Greenman, J. and Melhuish, C. (2008). Microbial fuel cells based on carbon veil electrodes: Stack configuration and scalability. *International Journal of Energy Research*, 32(13), pp.1228-1240.
8. Ieropoulos, I., Greenman, J., Lewis, D. and Knoop, O. (2013). Energy production and sanitation improvement using microbial fuel cells. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 3(3), p.383.
9. Zhuang, L., Yuan, Y., Wang, Y. and Zhou, S. (2012). Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater. *Bioresource Technology*, 123, pp.406-412.
10. Liu Xinmin, Wu Jianjun, Gong Benyue. (2016). Series and parallel connection of anaerobic fluidized bed microbial fuel cells (MFCs). *Reserved*, 4, 7-14.
11. Rahimnejad, M., Ghoreyshi, A., Najafpour, G., Younesi, H. and Shakeri, M. (2012). A novel microbial fuel cell stack for continuous production of clean energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), pp.5992-6000.
12. Wang, B. and Han, J. (2008). A single chamber stackable microbial fuel cell with air cathode. *Biotechnology Letters*, 31(3), pp.387-393.
13. Kim, B., An, J., Kim, D., Kim, T., Jang, J., Lee, B. and Chang, I. (2013). Voltage increase of microbial fuel cells with multiple membrane electrode assemblies by in series connection. *Electrochemistry Communications*, 28, pp.131-134.
14. Yazdi, H., Alzate-Gaviria, L. and Ren, Z. (2015). Pluggable microbial fuel cell stacks for septic wastewater treatment and electricity production. *Bioresource Technology*, 180, pp.258-263.
15. Zhuang, L. and Zhou, S. (2009). Substrate cross-conduction effect on the performance of serially connected microbial fuel cell stack. *Electrochemistry Communications*, 11(5), pp.937-940.
16. An, J., Sim, J. and Lee, H. (2015). Control of voltage reversal in serially stacked microbial fuel cells through manipulating current: Significance of critical current density. *Journal of Power Sources*, 283, pp.19-23.
17. Alatorre. F. C., (2009). "Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México". Valle P. J. A., Eckermann A. Primera Edición. D.F., MÉXICO. 3-19.
18. Cabello. Q, A (2006). Solución para el desarrollo sustentable. Chile: Refinor S.A.

19. Chu S., (2001). "Sustain a journal of environmental and sustainability issues". *Energy Efficiency: Achieving the Potential*. 2-7.
20. Revelo D. M., Hurtado N. H., Ruíz J. O., (2013). "Celdas de Combustible Microbianas (CCM's): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica". *Información Tecnológica*. 24(6): 17-28.
21. Min B, Cheng, S. & Logan BE (2005) Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Res.* 39: 1675- 1686.
22. Logan, B. Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. y Rabaey, K. 2006c. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ Sci Technol.* 40:5181-92
23. Lovley DR (2008) Extracellular electron transfer: wires, capacitors, iron lungs, and more. *Geobiol.* 6: 225-231.
24. Bond DR & Lovley DR (2003) Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl. Environ. Microbiol.* 69: 1548-1555
25. Nevin KP & Lovley DR (2002) Mechanisms for Fe (III) oxide reduction in sedimentary environments *Geomicrobiol. J.* 19: 141-159.
26. Chaudhuri SK & Lovley DR (2003) Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cell. *Nat Biotechnol* 21: 1229-1232
27. Du Z, Li H & Gu T (2007) A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnol. Adv.* 25: 464-482.
28. Risso C, Sun J, Zhuang K, Mahadevan R, *Microbiol. Technol.* 77: 689-697. DeBoy R, Ismail W, Shrivastava S, Huot H, Kothari S, Daugherty S, Bui O, Schilling CH, Lovley DR & Methé BA (2009) Genome-scale comparison and constraintbased metabolic reconstruction of the facultative anaerobic Fe (III)-reducer *Rhodospirillum rubrum*. *BMC Genomics.* 22: 10: 447.
29. Hau HH & Gralnick JA (2007) Ecology and biotechnology of the genus *Shewanella*. *Annu. Rev. Microbiol.* 61: 237-258.
30. Von Canstein H, Ogawa J, Shimizu S & Lloyd JR (2007) Secretion of Flavins by *Shewanella* species and their role in extracellular electron transfer. *Appl. Environ. Microbiol.* 74: 615-623.

31. Bullen RA, Arnot TC, Lakeman JB, Walsh FC (2006) Biofuel cells and their development. *Biosens. Bioelectron.* 21: 2015-2045.
32. Gorby YA, Yanina S, McLean JS, Rosso KM, Moyles D, Dohnalkova A, Beveridge TJ, Chang IS, Kim BH, Kim KS, Culley DE, Reed SB, Romine MF, Saffarini DA, Hill EA, Shi L, Elias DA, Kennedy DW, Pinchuk G, Watanabe K, Ishii S, Logan B, Neelson KH & Fredrickson JK. (2006) Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 103: 11358-11363.
33. Logan BE & Regan JM (2006) Microbial fuel cells: Challenges and applications. *Environ. Sci. Technol.* 40: 5172-5180.
34. Rubaba, Electricity producing property and bacterial community structure in microbial fuel cell equipped with membrane electrode assembly. (*Bioscience and Bioengineering*). Vol.116, No.1. March 2013, Japan, p. 106-113
35. Burgos, C., Rutely C. Evaluación Electroquímica de materiales anódicos y su aplicación en celdas de combustible microbianas. (Tesis) (Ing. Quim). Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería Química. Mérida- México. 2012, p.20-25
36. Mocali, S., Fani, R., Y Graziani, P. Resultados preliminares de un proyecto piloto en el territorio indígena Achuar del Ecuador. Macas-Ecuador. *Acra.* 2013, p. 40-
37. Newman J. S *Electrochemical Systems*; Prentice Hall; Englewood Cliffs, NJ, 1973
38. Bard A. J., Parsons R., Jordan, J. Eds. *Standard Potentials in Aqueous Solution*. Marcel Dekker. New York. 1985.
39. EG&G Technical Services, Inc. *Fuel Cell Handbook*. 7ª. Edición. U.S. Department of Energy. Office of Fossil Energy. 2004. pp.212 y 213.
40. Chang R. *Química general*. 7 edición. México. McGraw-Hill. 2002 943 p.
41. Rabaey K., Verstraete W., (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in biotechnology.* 23, 291-298.
42. Hoogers Gregor, (2003), *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press 2003.
43. Atlas R, Bartha R. *Ecología microbiana y Microbiología ambiental*. Madrid: Pearson Educación S.A.; 2002.

44. Diaz RJ, Nestlerode J, Diaz M. A Global perspective on the effects of eutrophication and hypoxia on aquatic biota. In: Rupp G, White M (Eds.), Seventh International Symposium: Fish Physiology, Toxicology, and Water Quality - Tallinn, Estonia. 2003: 1-34.
45. Camargo J, Alonso A. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Revista Ecosistemas [internet]. 2007: 16(2). Disponible en: www.revistaecosistemas.net.
46. Singer A, Parnes S, Gross A, Sagi A, Brenner A. A novel approach to denitrification processes in a zero-discharge recirculating system for small-scale urban aquaculture. Aquacultural Engineering. 2008; 1-6.
47. Thomsen JK, Geest T, Cox RP. Mass Spectrometric Studies of the Effect of pH on the Accumulation of Intermediates in Denitrification by *Paracoccus denitrificans*. Applied and Environmental Microbiology. 1994; 60(2): 536- 41.
48. Cárdenas C, Perruolo T, Ojeda M, Chirinos M, Yabroudi S, et al. Evaluación del proceso de nitrificación y desnitrificación en el tratamiento de aguas residuales utilizando un reactor por carga. Ciencia. 2006; 14 (March): 75-87.
49. Ada Barrenechea Martel. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. En Tratamiento de agua para consumo humano (39). Perú: CEPIS/OPS.
50. Wang, H., Park, J.D., Ren, Z., 2012. Active energy harvesting from microbial fuel cells at the maximum power point without using resistors. Environ. Sci. Technol. 46 (9), 5247–5252.
51. Castellanos, O., Proyecto de investigación sobre la relación entre las particularidades bioquímicas (enzimáticas) de la interacción del hongo *Beauveria bassiana* y la broca del café con el grado de patogenicidad del hongo, Bogotá, Universidad de La Salle, 1995, pp. 8-9.
52. Peterson GL. 1977. A simplification of the protein assay method of Lowry et al. which is more generally applicable. Analytical Biochemistry 83, 346-356
53. Singer A, Parnes S, Gross A, Sagi A, Brenner A. A novel approach to denitrification processes in a zero-discharge recirculating system for small-scale urban aquaculture. Aquacultural Engineering. 2008; 39(2-3):72-77.

54. Thomsen JK, Geest T, Cox RP. Mass Spectrometric Studies of the Effect of pH on the Accumulation of Intermediates in Denitrification by Paracoccusdenitrificans. *Applied and Environmental Microbiology*. 1994; 60(2): 536- 41.
55. Cárdenas C, Perruolo T, Ojeda M, Chirinos M, Yabroudi S, et al. Evaluación del proceso de nitrificación y desnitrificación en el tratamiento de aguas residuales utilizando un reactor por carga. *Ciencia*. 2006; 14 (March): 75-87.
56. Ada Barrenechea Martel. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. En *Tratamiento de agua para consumo humano (39)*. Perú: CEPIS/OPS.
57. Cucu, A., Tiliakos, A., Tanase, I., Serban, C., Stamatina, I., Ciocanea, A. and Nichita, C. (2016). Microbial Fuel Cell for Nitrate Reduction. *Energy Procedia*, 85, pp.156-161.
58. Grady, C.P.L. Jr. Y Lim, H.C. (1980) biological wastewater treatment, theory and applications. Marcel Dekker, New York., pp.895
59. Fuhs, G.W. y Chen, M. (1975) Microbiological basis of phosphate removal in the Activated Sludge Process for the Treatment of Wastewater. *Microbial Ecol.* 2, pp.119-138
60. Beacham, A.M.; Seviour, R.J.; Lindrea, K.C. y Livins-ton, Y. (1990). Genospecies diversity of Acinetobacter isolates obtained from a Biological Nutrient Removal pilot plant of a modified UCT configuration. *Wat. Res.*, 24 (1), pp. 23-29.

DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS VOLTAJES GENERADOS EN LAS CCM

Sistemas de Adquisición de Datos

Los sistemas de adquisición de datos son sistemas electrónicos completos, que contienen distintos dispositivos electrónicos. Su principal uso es la adquisición de señales electrónicas de interés, tales como: voltaje, corriente, temperatura, humedad, presión, etc. Esto es posible con el uso de sensores y transductores, quienes se encargan de convertir la variable física en una señal eléctrica para ser interpretados por algún computador personal. Un esquema general de conexión de una configuración Sensor - DAQ - PC está ilustrada en la Figura 1.

El sistema DAQ¹ está conformado por sensores, hardware de medición DAQ y una PC con software programable capaz de procesar y visualizar un fenómeno eléctrico detectado por un hardware de medición DAQ. Comparados con los sistemas de medición tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PC estándar, proporcionando una solución de medidas potente, flexible y rentable (National Instruments, s.f., 2015).



Figura 1. Sistema de adquisición de datos DAQ

¹ DAQ: Data Acquisition (Adquisición de datos).

Los sistemas de adquisición de datos son de gran utilidad para el monitoreo y control en tiempo real de los sistemas dinámicos. Esto es debido a que cuentan con una gran cantidad de entradas analógicas que permiten la lectura de señales eléctricas y una gran cantidad de entradas/salidas digitales, las cuales regularmente son utilizadas para el control de sistemas.

Con base en lo anterior, una tarjeta de adquisición de datos permite la comunicación entre una PC y señales del mundo exterior. Cada tarjeta de adquisición de datos cuenta con funcionalidades específicas, tales como la adquisición de señales analógicas o digitales, generar señales digitales o analógicas, medir corriente, voltaje o resistencia. El principio de su funcionamiento consta de la digitalización de señales analógicas para que sea posible interpretarlas por una PC. Este tipo de dispositivos cuentan con tres principales componentes para la lectura de una señal, el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Cabe mencionar que muchos de los dispositivos DAQ cuentan con funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos, como por ejemplo un convertidor digital-analógico (DAC) que envía señales analógicas a partir de señales digitales programadas por el usuario, líneas de E/S² digitales que reciben y envían señales digitales y los temporizadores que cuentan y generan pulsos digitales.

Tarjeta DAQ de National Instruments

Las tarjetas de adquisición de datos de National Instruments están caracterizadas por una serie de parámetros mecánicos y eléctricos que permiten identificar la aplicación de cada una de las tarjetas de adquisición de datos que ofertan. Estos parámetros mecánicos y eléctricos son definidos desde la fabricación destacando generalmente el número y tipo de canales de entrada y salida, número y resolución de convertidores analógico-digitales, sistemas de multiplexado y los rangos de operación. Las tarjetas DAQ de National Instruments normalmente encaminan las señales de entrada. Las funciones de cálculo, visualización de la señal de entrada, o incluso guardar datos de dicha señal se realizan en un ordenador.

Entradas Analógicas

Las entradas analógicas en las tarjetas de adquisición de National Instruments disponen principalmente de dos tipos de configuraciones, las que permiten entradas analógicas diferenciales y las que permiten entradas analógicas unipolares.

- **Entradas Analógicas Unipolares.** Están referenciadas a una tierra en común y es más utilizada cuando se trabaja con señales de alto nivel de voltaje, es decir, tensiones superiores a 1 V y no se requiera de mucha precisión.
- **Entradas Analógicas Diferenciales.** Cada entrada tiene su propia referencia a tierra. Esta configuración permite que el ruido eléctrico proveniente de la medición de alguna señal eléctrica sea rechazado, logrando con esto una mejor precisión en la lectura medida.

² E/S: Entradas y salidas.

Acondicionamiento de Señal

El acondicionamiento de señales eléctricas prepara a una señal para poder ser digitalizada por las tarjetas de adquisición de datos sin ningún problema. Las funciones principales que realiza el acondicionamiento de señales son las siguientes:

- **Amplificación.** Los amplificadores aumentan el nivel de voltaje para obtener una amplitud de la señal necesaria para el convertidor ADC, aumentando la resolución de la medición y la sensibilidad. Cabe mencionar que la amplificación deber ser tal que las variaciones de la señal estén dentro del rango de voltaje aceptable del convertidos ADC en la tarjeta de adquisición.
- **Atenuación.** La atenuación es lo contrario de la amplificación, es decir, que es necesario para tensiones que superan el rango de voltaje aceptable por el ADC. Para este caso disminuye la amplitud de la señal de modo que este dentro del rango de voltaje para el ADC, normalmente no supera los 10 V.
- **Filtrado.** El filtrado pretende rechazar ruido eléctrico no deseado dentro de un rango de altas frecuencias que pueden causar pérdidas en la exactitud a la tarjeta de adquisición de datos. La mayoría de las tarjetas de adquisición de datos utilizan un filtro anti-aliasing, la cual es un filtro analógico pasa bajo encargado de rechazar las frecuencias superiores a $\frac{F_e}{2}$ siendo F_e la frecuencia de muestreo.
- **Aislamiento.** Útil para proteger totalmente la tarjeta de adquisición de datos ante tensiones peligrosas o picos de tensión, es realizado un aislamiento entre los sistemas electrónicos como sensores y sistemas electrónicos internos propios de la tarjeta de adquisición de datos.
- **Excitación.** Los sensores requieren de una excitación en tensión para poder producir la variación proporcional en el sensor de la magnitud a medir. Por ejemplo, un termistor mediante una fuente de corriente convierte la variación de resistencia a un voltaje medible.

Conversión Analógica-Digital

Las señales analógicas deben ser convertidas en digitales antes de poder ser manipuladas por algún equipo digital como una PC. Un convertidor analógico-digital (por sus siglas en inglés ADC) es un dispositivo que tiene como objetivo obtener una representación digital de la señal analógica de entrada. Las señales analógicas varían constantemente en el tiempo, un ADC toma muestras de la señal analógica en determinados instantes de tiempo para posteriormente enviar estas muestras a una PC usando un bus de datos.

Las señales analógicas de entrada son muestreadas según el criterio de Nyquist, quien establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos dos veces mayor que la frecuencia más alta de la señal a muestrear y así la función original puede ser totalmente recuperada por medio de un filtro pasa bajos.

El proceso que debe llevar a cabo un ADC es la cuantificación (Figura 2), que consiste en transformar la señal analógica de entrada a una señal discreta, y codificación (Figura 3) que consiste en la asignación de un conjunto de bits a cada valor de la señal discreta.

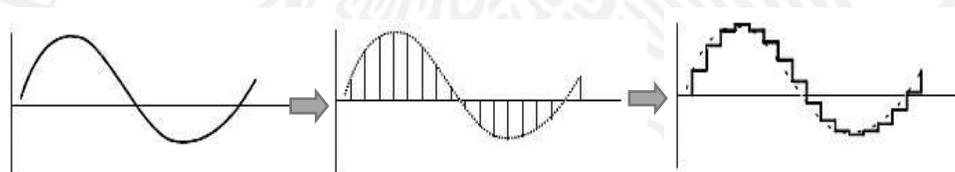


Figura 0. Cuantificación de una señal

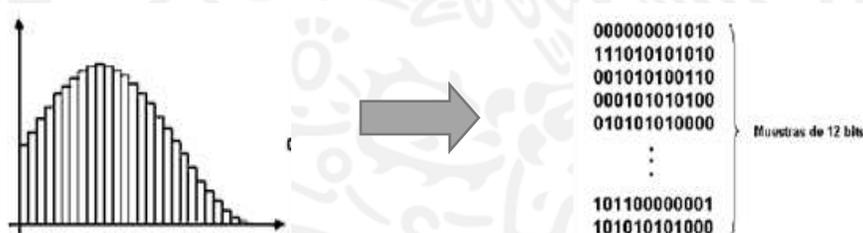


Figura 3. Codificación de una señal

Un parámetro importante en la conversión analógico digital es la resolución, que se define como el número de bits que utiliza el convertidor analógico digital para representar la señal original. Entre mayor sea el número de bits del ADC la tarjeta de adquisición de datos será capaz de detectar variaciones más pequeñas en la señal.

El número de los niveles en que se divide la señal está dado por la expresión 1, donde n es el número de bits.

$$\# \text{de niveles} = 2^n \quad (1)$$

El ancho de código (code width), también conocido como las variaciones mínimas que puede detectar la tarjeta está dado por la ecuación 2, donde V_r es el rango de voltaje de entrada en los puertos analógicos.

$$\text{code width} = \frac{V_r}{2^n} \quad (2)$$

En la Figura 4 se muestra la comparación de una señal cuantificada con una resolución de 3 bits con una señal cuantificada con una resolución de 16 bits.

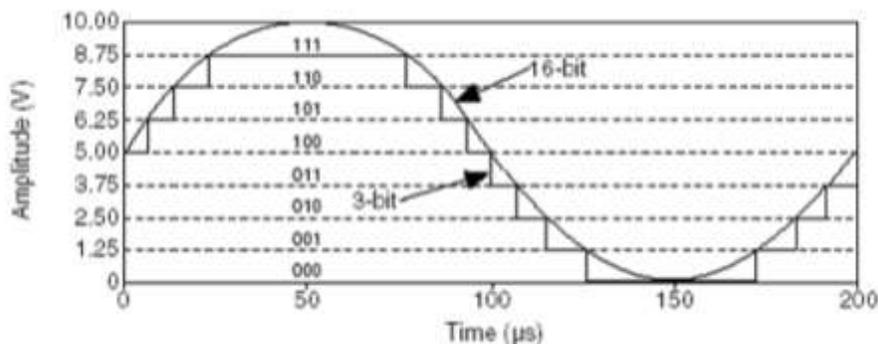


Figura 4. Comparación entre dos señales de distinta resolución

Entradas y salidas digitales

Son utilizados para el control de procesos, pues permiten realizar comparaciones, generar patrones y nos permiten generar y leer códigos binarios, cabe mencionar que cada puerto E/S (entra/salida) debe ser definido mediante código de programación.

Tarjeta de Adquisición de Datos NI USB 6008

Es una tarjeta de adquisición de funcionalidad básica para aplicaciones simples como medidas portátiles, y experimentos académicos de laboratorio. Esta tarjeta DAQ es compatible con LabVIEW, LabWindows, y Measurement Studio para VISUAL Studio .NET. En la Tabla 1 se enlistan sus principales características.

Tabla 1. Principales características de la tarjeta DAQ NI USB 6008.

Entradas Analógicas	
Entradas analógicas	
• Diferencial.	4
• Unipolar.	8, seleccionable por software.
Resolución de entrada	

• Diferencial	12 bits
• Unipolar.	11 bits
Rango de entrada	$\pm 10V$
Salidas Analógicas	
Salidas analógicas	2
Resolución de salida	12 bits
Frecuencia Máxima	150 KHz, Cronometrada por software.
Rango de salida	0V – 5V
Corriente de salida	5mA
E/S Digitales	
PO (0-7)	8
PI(0-3)	4
Rango máximo de voltaje	0.5V - 5.8V

Tarjeta de Adquisición de Datos NI USB 6225

Este módulo de National Instruments es un módulo de adquisición de datos DAQ de alto rendimiento para una precisión superior. Este dispositivo es ideal para la lectura de muchos canales, está diseñado especialmente para aplicaciones móviles y de restricciones de espacio. Esta tarjeta DAQ es compatible con LabVIEW, LabWindows, y Measurement Studio. En la Tabla 2 se aprecian sus principales características.

Tabla 0. Principales características de la tarjeta DAQ Ni USB 6225

Entradas Analógicas	
Entradas analógicas	
• Diferencial.	40
• Unipolar.	80, seleccionable por software.
Resolución de entrada	
• Diferencial	16 bits
• Unipolar.	11 bits
Rango de entrada	$\pm 10V$
Salidas Analógicas	
Salidas analógicas	2
Resolución de salida	16 bits
Frecuencia Máxima	150 KHz, Cronometrada por software.
Rango de salida	$\pm 10V$
Corriente de salida	5mA
E/S Digitales	
Canales bidireccionales	24
Maxima velocidad de reloj	1 MHz

LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) es un entorno de programación gráfica que permite visualizar, crear y codificar sistemas para aplicaciones de ingeniería y ciencia, está diseñado para acelerar la productividad de ingenieros y científicos. Sus principales aplicaciones son el adquirir y analizar datos de medida, control de instrumentos, sistemas de monitoreo y control embebido y sistemas de pruebas automatizadas. LabVIEW utiliza símbolos gráficos (lenguaje G) para describir acciones de programación en lugar de un lenguaje textual. Cada función en el código es representada mediante un símbolo gráfico llamado VI o SubVI. Estos establecen comunicación entre sí mediante hilos o cables para formar un código de programación. Cabe mencionar que la programación en LabVIEW no es secuencial si no que está basada en flujo de datos (DataFlow) debido al tipo de programación.

LabVIEW está formado principalmente por dos paneles principales, panel frontal utilizado para crear una interfaz de usuario con controles de entrada, visualizadores de salida, cuadros de dialogo etc., y panel de diagrama de bloques usado para desarrollar el código de programación donde define el tipo de hardware, tipo de comunicación, operaciones matemáticas, configuración de puertos etc.

Transistor MOSFET

Un MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) es un transistor unipolar en el que la corriente fluye desde un contacto llamado source (fuente) hasta un contacto llamado drain (drenaje), a través de un canal próximo a la superficie del semiconductor (Santamaría, E., 1993). La principal característica de este tipo de transistores está en que los MOSFET son controlados por tensión aplicada en la terminal gate (compuerta). En la Figura 5 se muestra la estructura interna de un MOSFET.

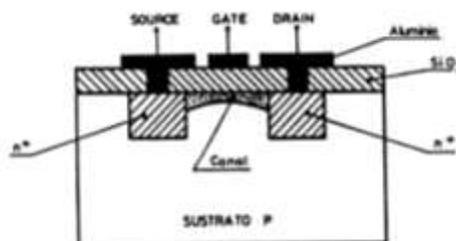


Figura 5. Estructura interna de un transistor MOSFET

El MOSFET de canal N cuenta con un sustrato de tipo P en donde se difunden las regiones altamente dopadas de tipo N. Estas dos regiones están ligeramente separadas y son las que actúan como source y como drain. El flujo de corriente se lleva a cabo de source a drain y es controlado por el número de portadores mayoritarios que existen en el canal, es decir, mediante el voltaje entre gate y source. Existen dos tipos de funcionamiento para estos tipos de transistores: forma de empobrecimiento y forma de enriquecimiento.

- La forma de trabajo de empobrecimiento se basa en el control de corriente en drain mediante un voltaje negativo en la compuerta del MOSFET, la tensión negativa aplicada en gate produce un ensanchamiento del canal N, debido al empobrecimiento de los portadores lo que hace que se reduzca la corriente de drain.

- La forma de trabajo de enriquecimiento es mediante una tensión positiva en gate, lo que provoca un aumento o enriquecimiento de los electrones en el canal, de tal forma que al aumentar la tensión positiva en gate aumenta la corriente en drain.

Banco de Resistencias Comerciales

A continuaciones se muestran algunos bancos de resistencias comerciales. Estos bancos de resistencias permiten asignar un rango de diferentes valores de cargas resistivas. Son utilizados normalmente para simulación de sensores como termistores, para calibración de medidor de ohmios y para pruebas de multímetros (MEATEST, 2015).

M602

En la Figura 6 y Tabla 3 se muestran el banco de resistencias M602 y sus características respectivamente.

Tabla 3. Principales características del banco de resistencias M602

Rango de resistencia.	10 – 10MΩ
Precisión.	0.02%
Potencia máxima de disipación	2W
Corriente y voltaje máximos	120V y 0.6A
Interfaz	RS232



Figura 6. Banco de resistencias M602

M622

En la Figura 7 y Tabla 4 se muestran el banco de resistencias M622 y sus características respectivamente.

Tabla 4. Principales características del banco de resistencias M622

Rango de resistencia.	1 – 1.2MΩ
Precisión.	0.005 a 0.015%
Potencia máxima de disipación	0.3W
Corriente y voltaje máximos	200V y 500mA
Interfaz	RS232



Figura 7. Banco de resistencias M622

M632

En la Figura 8 y Tabla 5 se muestran el banco de resistencias M632 y sus características respectivamente.

Tabla 5. Principales características del banco de resistencias M632

Rango de resistencia.	1 – 1.2MΩ
Precisión.	0.02%
Potencia máxima de disipación	0.25W
Corriente y voltaje máximos	200V y 500mA
Interfaz	RS232



Figura 8. Banco de resistencias M632

M194

En la Figura 9 y Tabla 6 se muestran el banco de resistencias M194 y sus características respectivamente.

Tabla 6. Principales características del banco de resistencias M194

Rango de resistencia.	10KΩ – 100GΩ
Precisión.	0.1 a 1%
Resistencia de exactitud	2 a 10V
Voltaje máximos	6kVDC
Interfaz	RS232



Figura 9. Banco de resistencias M194

Estado del Arte

En este apartado se mencionan los trabajos previos relacionados a la caracterización de las CCM mediante el uso de bancos de resistencias programables e interfaces gráficas que permiten observar el comportamiento del voltaje generado por las CCM.

Sistemas para la caracterización de CCM

La caracterización de las CCM es un tema de estudio relevante en la comunidad de CCM., tanto que en (N.Degrenne, 2012) utiliza un sistema de adquisición de datos desarrollado en LabVIEW para medir el voltaje en forma independiente de un stack de 10 CCM. En este sistema es posible controlar la carga de salida de cada CCM realizando los cambios de carga en forma automática. El tiempo de activación entre una carga y otra puede ser ajustado por el operador. En la Figura 10 se muestra la forma de conexión del sistema de adquisición de datos.

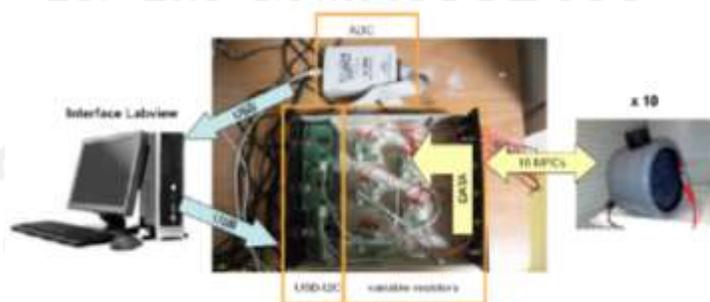


Figura 10. Sistema para caracterización de CCM

Otro trabajo relacionado con la caracterización de CCM lo encontramos en (Brower et al., 2013) quien utiliza un banco de resistencias comercial (Figura 11). Los rangos de operación están de 1Ω a $1M\Omega$ entre las terminales de las CCM. Las conexiones de las diferentes configuraciones de las resistencias son directamente seleccionadas por el usuario.



Figura 11. Banco de resistencia

Diseño del dispositivo electrónico

En este capítulo se explican las bases del diseño del Sistema de Monitoreo en Tiempo Real usando 5 tarjetas de Adquisición de Datos de National Instruments programadas con el Software de LabVIEW.

Además explica el diseño de cada una de las tarjetas electrónicas y diseño del banco de resistencias programables.

Análisis de Requisitos

El análisis de requisitos que se presenta en esta sección aborda únicamente el desarrollo del sistema de monitoreo en tiempo real de las CCM.

Requisitos Funcionales

Estos requisitos se clasifican en dos tipos: Requisitos nominales y requisitos no nominales.

1. Requisitos Nominales

Son aquellos requisitos necesarios para el funcionamiento de la interfaz bajo situaciones normales.

FN.1 Sistema de monitoreo en tiempo real para un stack de 40 CCM.

- Importancia: Esencial.
- Validez: Visualizar el comportamiento del voltaje del stack de las 40 CCM en la interfaz gráfica, conectadas las 40 CCM, en serie, en paralelo e independientemente, con y sin el banco de resistencias programables.

FN.2 Configuración de las CCM.

- Importancia: Esencial.
- Validez: Capacidad del sistema para el monitoreo en conexión de las CCM en serie y en paralelo.

FN.3 Elección de cargas resistivas desde la interfaz.

- Importancias: Esencial.
- Validez: El usuario debe tener la libertad de elegir desde la interfaz la carga deseada entre las terminales de una CCM, conectadas en serie y en paralelo.

FN.4 Equipo de cómputo.

- Importancia: Esencial.
- Validez: El equipo de cómputo debe de tener la capacidad de ejecutar el ejecutable de la interfaz gráfica desarrollado en LabVIEW sin tener instalado el software de LabVIEW. Esto requiere de una velocidad de procesador mínima aproximada de 1.4GHz.

2. Requisitos No Nominales

Son aquellos requisitos para el funcionamiento de la interfaz en condiciones anormales o de error.

FF.1 Indicador de conexión de tarjetas DAQ.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Indicar que haya comunicación entre software y las tarjetas DAQ para que el sistema pueda funcionar correctamente.

- Relevante: Nos indica una posible falla en la interfaz.

FF.2 Equipo libre de software malicioso.

- Importancia: Condicional.
- Alcanzable: Para evitar un mal funcionamiento de la interfaz se debe evitar la infección de algún software malicioso.
- Relevante: El correcto funcionamiento de la interfaz.

FF.3 Bus de transferencia de energía en buen estado.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Para evitar que el voltaje de las CCM sea leído correctamente por las DAQ, el bus que transporta su energía debe estar en buenas condiciones.
- Medible: Una buena medición de voltaje generados por las CCM.

Requisitos de calidad

CA.1 El sistema debe tener un aspecto ordenado.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Evitar una mala presentación del sistema de adquisición de datos que cause confusión entre la conexión de los buses de comunicación de las tarjetas.

CA.2 Los buses encargados de la transferencia de energía deberán tener un aspecto profesional.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Evitar confusiones de que número de CCM se estará midiendo voltaje.

CA.3 Pruebas de funcionamiento.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Realizar pruebas de medición para garantizar el funcionamiento del sistema.
- Medible: Mediciones de voltaje de las CCM.

Requisitos de Evolución

Ev.1 Aumentar el rango de establecimiento del perfil de cargas resistivas en el banco de resistencias programables.

Requisitos del Proyecto

Aquellos requisitos que condicionan y afectan al desarrollo del proyecto.

PR.1 El proyecto debe estar terminado en un periodo de 4 meses.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Desarrollar el proyecto siguiendo la metodología expuesta anteriormente.
- Relevante: Los objetivos y los resultados deberán ser satisfactorios.

Requisitos de Soporte.

SO.1 Software LabVIEW.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Contar con el software LabVIEW.

SO.2 Requisitos de ordenador para un correcto funcionamiento de la interfaz.

- Importancia: Esencial.
 - Alcanzable: Procesador aproximado a los 1.4 GHz.
- SO.2** Tarjetas de adquisición de datos para la medición de voltaje de las CCM.

- Importancia: Esencial.
- Alcanzable: Observar en tiempo real el voltaje generado por las CCM, además almacenar estos datos en un archivo txt.

Diseño de Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica desarrollada en el entorno del software LabVIEW de National Instruments tiene como objetivo monitorear los niveles de voltaje de un stack de 40 CCM. También incluye la función de comunicar y controlar un prototipo de banco de resistencias programables para definir los diferentes perfiles de carga a colocar en el stack de 40 CCM. El diseño de la interfaz gráfica fue realizado considerando el análisis de requisitos presentado en la sección anterior. Esto permite proponer un diagrama de flujo que ilustra las funcionalidades de la interfaz gráfica, el cual se muestra en la Figura 12.

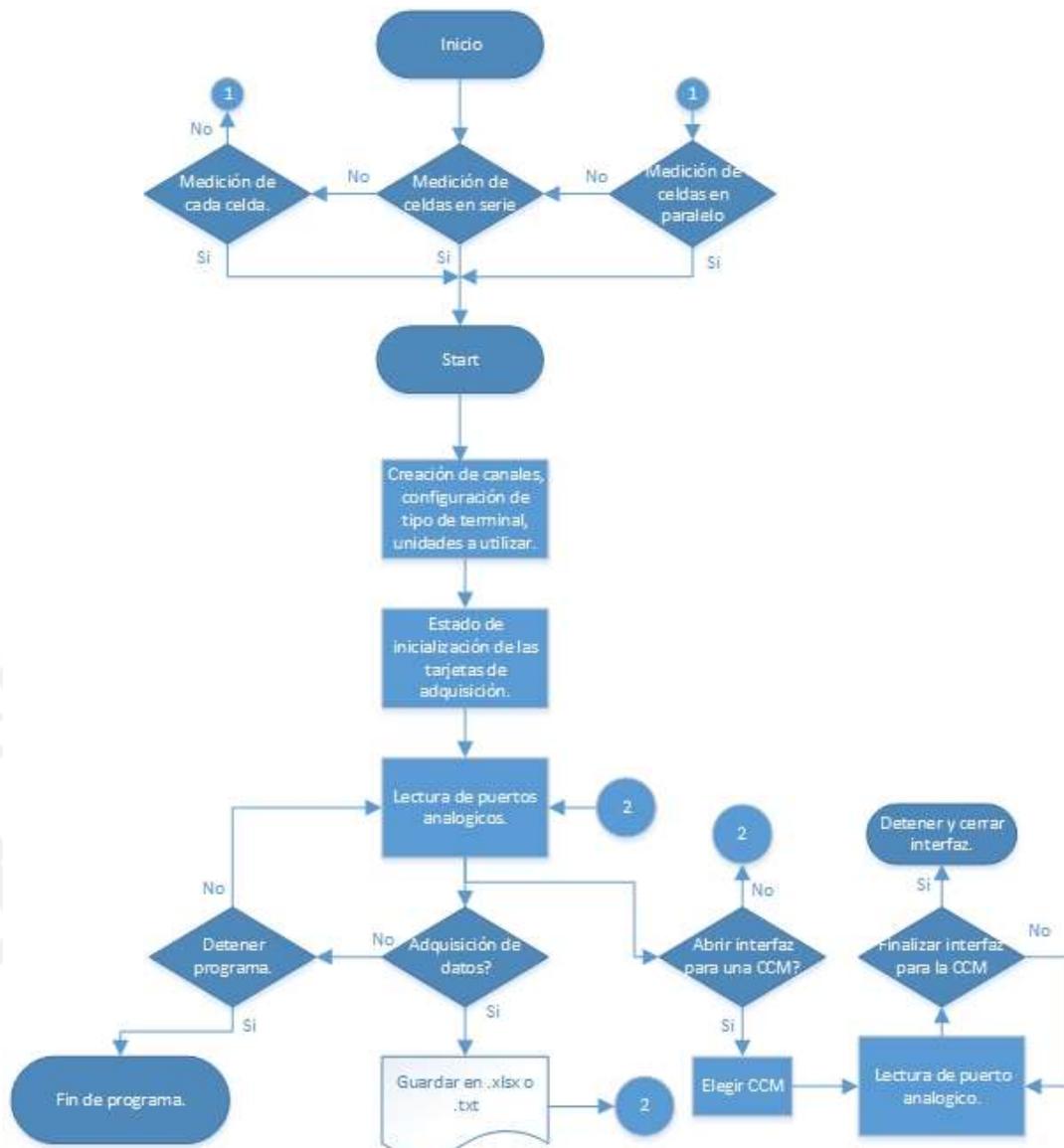


Figura 12. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica

A partir de la Figura 12, el diseño de la interfaz gráfica para monitorear un stack de 40 CCM tiene 4 principales funciones de operación:

- Monitorear cada una de las CCM, todas en el mismo instante de tiempo y en tiempo real.
- Monitorear la conexión en serie de las 40 CCM.
- Monitorear la conexión en paralelo de las 40 CCM.
- Monitorear a), b) y c) conectando cargas resistivas, configuradas por un prototipo de banco de resistencias programables.

Las cuatro funciones de operación mencionadas están ilustradas en la Figura 13, donde la pantalla principal contiene 4 pestañas, las cuales cada una representa una de las funciones de operación de la interfaz gráfica.

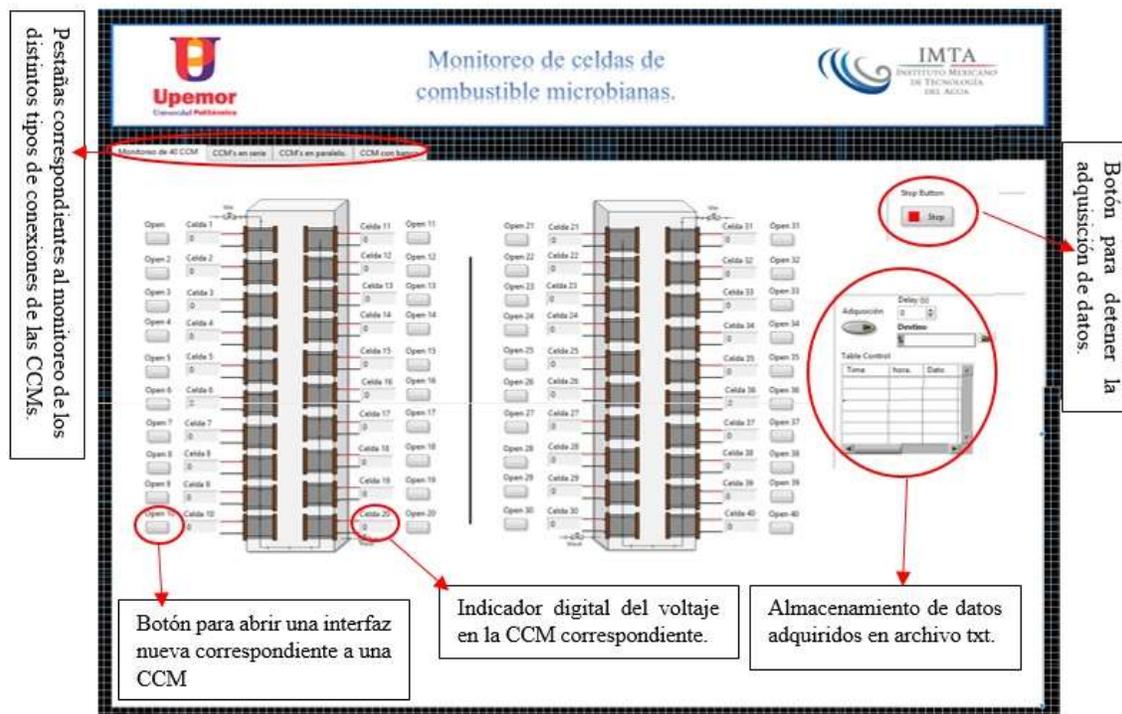


Figura 13. Interfaz principal para monitoreo de 40 CCM

La Figura 13 muestra la pantalla principal de la Interfaz Gráfica para monitorear el stack de 40 CCM. En esta pantalla principal se encuentran 40 indicadores digitales que visualizan los diferentes niveles de voltaje de las 40 CCM medidas de forma independiente. En la misma pantalla principal a un costado de cada uno de los indicadores está ubicado un botón encargado de abrir una pestaña que provee de información en tiempo real de cada CCM, tal como se observa en la Figura 14. La Figura 14 incorpora tres indicadores de voltaje: indicador digital, indicador analógico e indicador gráfico. Este último es útil debido a que es usado para observar las variaciones del nivel voltaje que tiene cada una de las CCM y su comportamiento conforme esté funcionando la CCM. Además, el indicador gráfico apoya a la caracterización de las CCM ante cambios del agua residual con la que se alimenta la CCM. Aunado a lo anterior, la pantalla de la interfaz gráfica tiene dos indicadores de advertencia, las cuales son: led rojo y led verde. El primero indica cuando la producción de voltaje supera los 0.4 V y el segundo indica cuando la producción de voltaje este por debajo de los 0.4V.

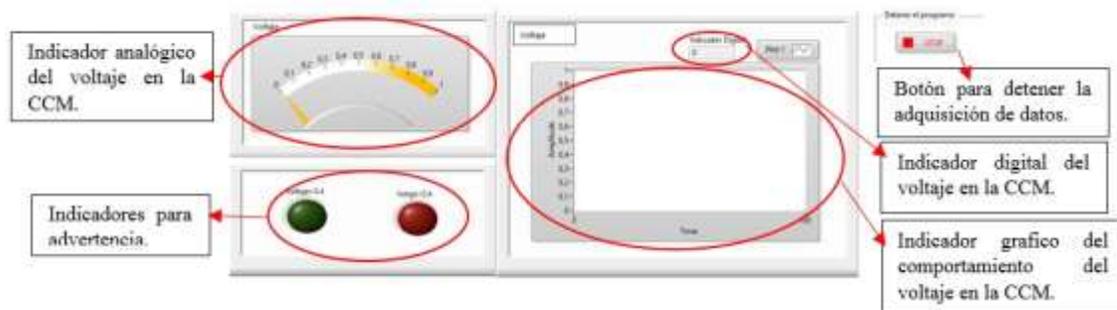


Figura 14. Interfaz gráfica para una sola CCM

La Figura 15 muestra la segunda pestaña para monitorear las 40 CCM conectadas en serie. Esta pestaña despliega el comportamiento de los niveles de voltaje, corriente y potencia. Los elementos que integran esta interfaz gráfica son: indicador analógico, indicador digital e indicador gráfico. Además cuenta con un control numérico para programar los perfiles de carga del prototipo del banco de resistencias programables, mismas que están conectadas al stack de 40 CCM.

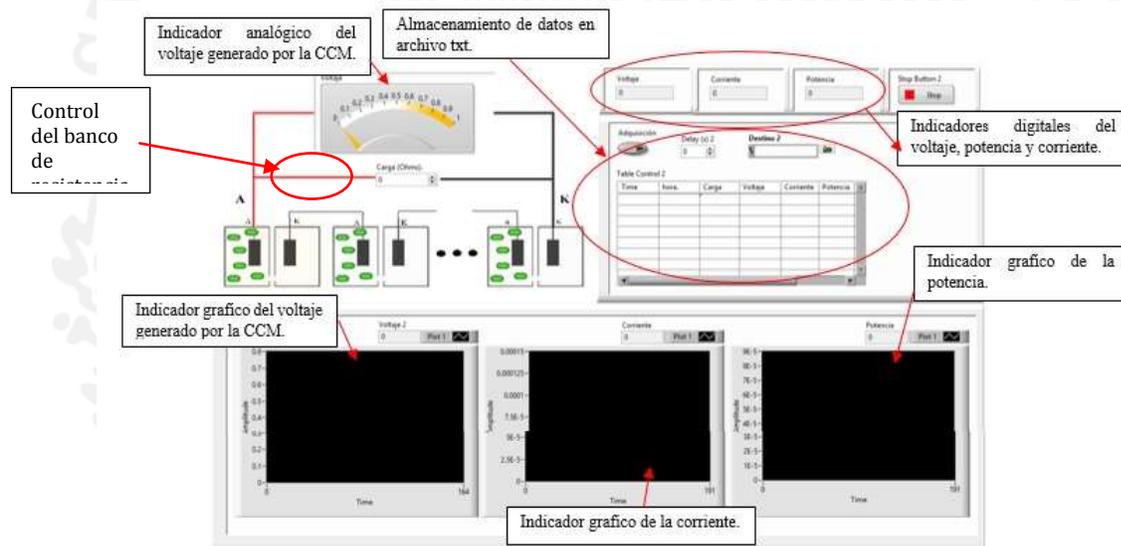


Figura 15. Interfaz Gráfica para monitoreo de las 40 CCM conectadas en serie

La Figura 16 muestra la tercera pestaña para monitorear las 40 CCM conectadas en paralelo. Esta pestaña permite visualizar el comportamiento de los niveles de voltaje, corriente y potencia. Además cuenta con un control numérico para programar los perfiles de carga del prototipo del banco de resistencias programables, mismas que están conectadas al stack de 40 CCM.

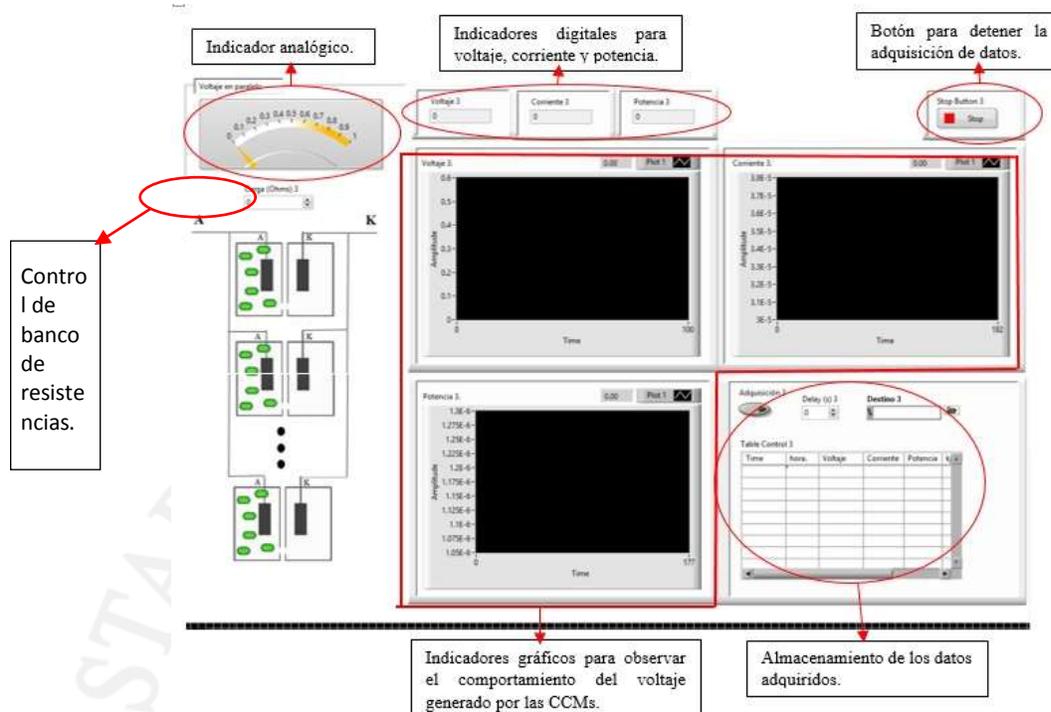


Figura 16. Interfaz gráfica para monitoreo de las 40 CCM conectadas en paralelo

La Figura 17 muestra la cuarta pestaña para programar los perfiles de cargas resistivas a través del prototipo de banco de resistencias programables conectadas a una sola CCM. Esta pestaña permite visualizar la variación de los niveles de voltaje, corriente y potencia. Las variaciones de los niveles de voltaje son visualizados usando un indicador gráfico, un indicador digital y un indicador analógico.

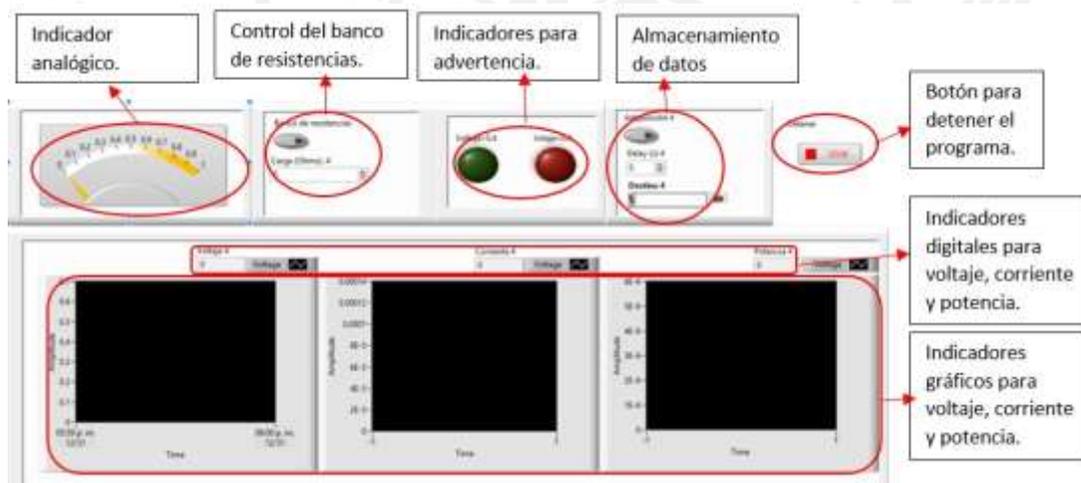


Figura 17. Interfaz gráfica para el control del banco de resistencias en una sola CCM.

En cada pestaña de la interfaz gráfica tiene la capacidad de almacenar la lectura de los datos medidos en un archivo electrónico en formato txt. El usuario tiene la libertad de elegir el destino en la que el archivo electrónico será guardado y además puede manipular los instantes de tiempo en el que cada dato puede ser guardado. En los datos guardados en el documento electrónico txt incluyen: fecha, hora, carga asignada con el banco de resistencias, voltaje, corriente y potencia. La Figura 18 muestra la parte de la interfaz encargada de almacenar los datos.

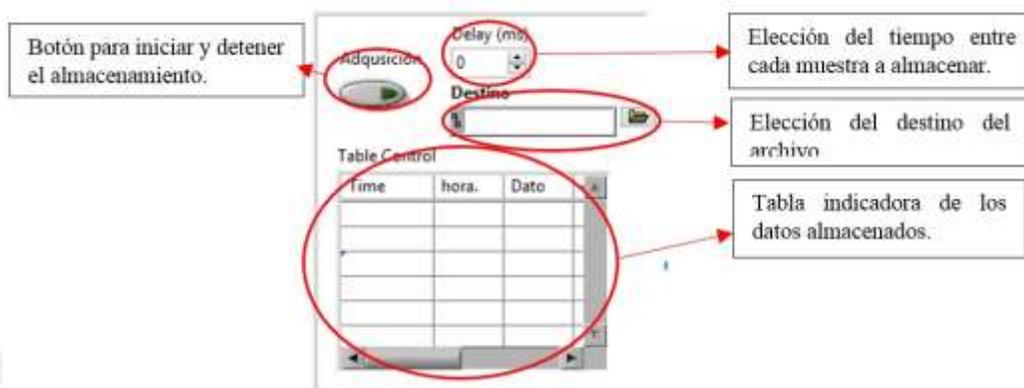


Figura 18. Parte de la interfaz encargada del almacenamiento de datos adquiridos

Diseño de Tarjetas Electrónicas

Una parte fundamental en la implementación de la interfaz gráfica en el stack de 40 CCM es el diseño de las tarjetas electrónicas para recopilar todos los voltajes producidos por las 40 CCM. El diseño de las tarjetas electrónicas redujo el número y longitud de los alambres utilizados para medir los niveles de voltajes de cada CCM. Para esto fueron diseñadas tres tarjetas electrónicas, las cuales fueron:

- Tarjeta electrónica para recopilación de las 40 señales de voltaje de las 40 CCM de forma independiente, las cuales cuentan con un ánodo y un cátodo. Esta tarjeta es indispensable para comunicar la tarjeta de adquisición de datos y stack de 40 CCM.
- Tarjeta electrónica para realizar la conexión en serie de las 40 CCM. Esta tarjeta facilita realizar pruebas en las CCM con conexión en serie y su desempeño ante condiciones de carga y sin carga resistiva. Esta tarjeta permite comunicar la tarjeta de adquisición de datos y la conexión en serie de las 40 CCM.
- Tarjeta electrónica para realizar la conexión en paralelo de las 40 CCM. Esta tarjeta facilita realizar pruebas en las CCM con conexión en paralelo y su desempeño ante condiciones de carga y sin carga resistiva. La tarjeta es indispensable para comunicar tarjeta de adquisición de datos y la conexión en paralelo de las 40 CCM.

La Figura 19 ilustra un diagrama a bloques de la implementación del sistema de banco de pruebas para el monitoreo de CCM, donde puede observarse la colocación de las tarjetas electrónicas dentro del sistema de monitoreo en tiempo real del stack de 40 CCM. Las conexiones que implica el sistema de monitoreo consiste en conectar las CCM a una tarjeta electrónica que posteriormente están conectadas al prototipo del banco de resistencias programables y este debe estar conectado a un puerto de entrada analógica de la tarjeta de adquisición de datos DAQ1. En caso de no usar el banco de resistencias

programables las tarjetas electrónicas para la conexión en serie y paralelo de las CCM deben estar conectadas de forma directa al puerto de entrada analógico de la tarjeta de adquisición de datos DAQ1. Finalmente la DAQ estará conectada a un puerto USB de la computadora para que la interfaz gráfica pueda leer los niveles de voltaje de las diferentes CCM.

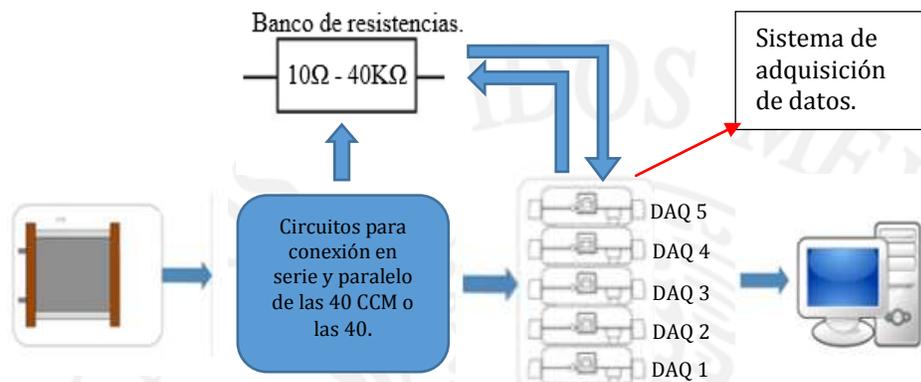


Figura 19. Conexión del sistema completo

Tarjeta Electrónica de Recolección de las 40 Señales Eléctricas

La función de esta tarjeta electrónica es la conexión de las 40 CCM hacia las tarjetas de adquisición de datos. La tarjeta electrónica para 40 canales de comunicación consta de 4 headers de dos líneas con 20 pines para conectar 4 conectores IDC FN20, donde cada conector permite la conexión de 10 CCM mediante el uso de cable plano. Además cuenta con otros 5 headers de dos líneas con 14 pines para conectar 5 conectores IDC FN14, los cuales conectan la tarjeta electrónica hacia a las 5 tarjetas de adquisición de datos DAQ. Cada conector FN14 corresponde a la conexión de una tarjeta DAQ, esto para evitar enredos entre cables en una tarjeta y otra. La Figura 20 muestra el diseño del PCB.

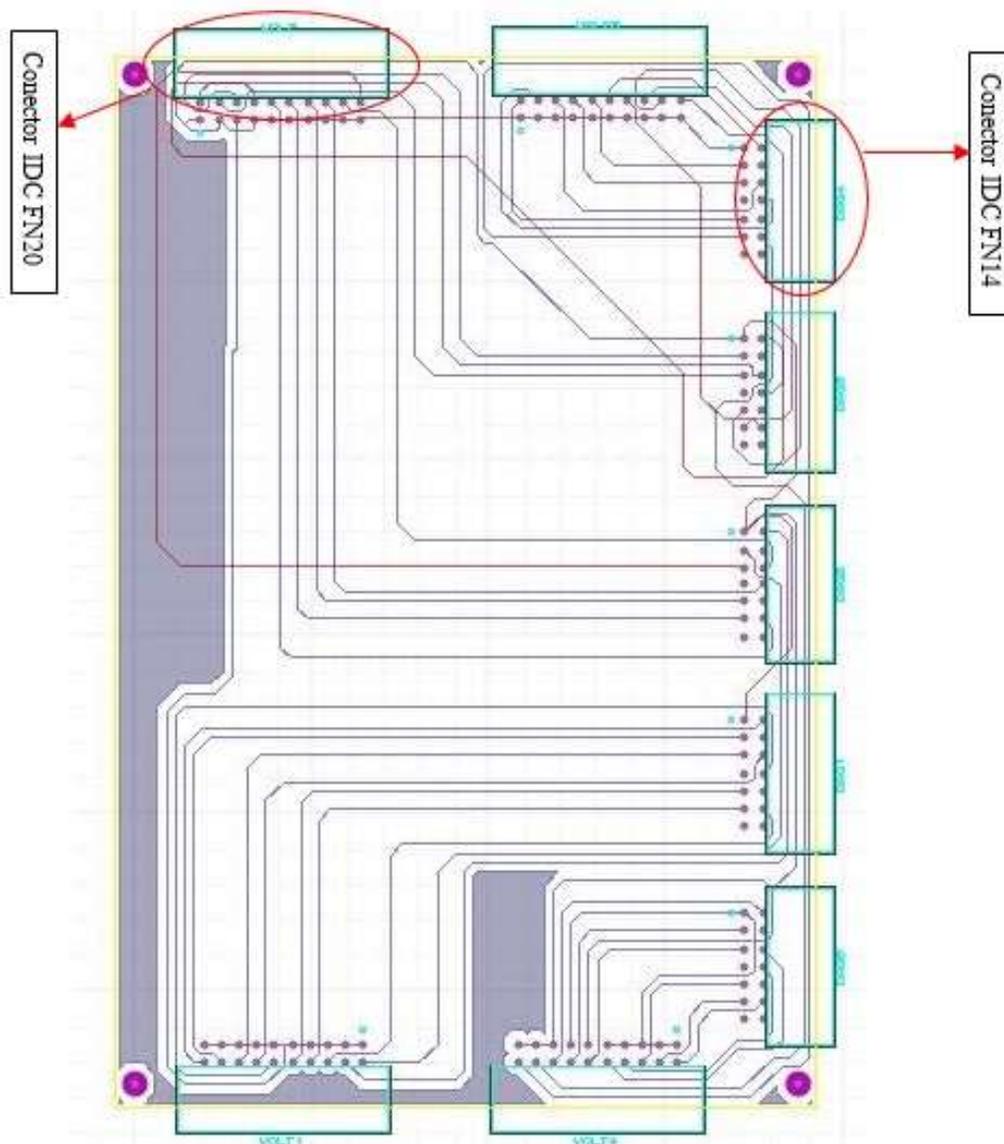


Figura 20. PCB para guiar el voltaje de las 40 CCM hacia las 40 entradas analógicas de las 5 tarjetas DAQ

Tarjeta Electrónica para la Conexión en Serie de las 40 CCM

La función de esta tarjeta es conectar las 40 CCM en serie. El circuito cuenta con 4 headers de dos líneas con 20 pines, para conectar 4 conectores IDC FN20, de los cuales cada conector es para la conexión de 10 CCM, también cuenta con un header de dos líneas con 14 pines para conectar un conector IDC FN14 que permite la conexión de las CCM conectadas en serie hacia el puerto analógico AIO de la tarjeta de adquisición 1. La Figura 21 muestra el PCB correspondiente a esta tarjeta electrónica.

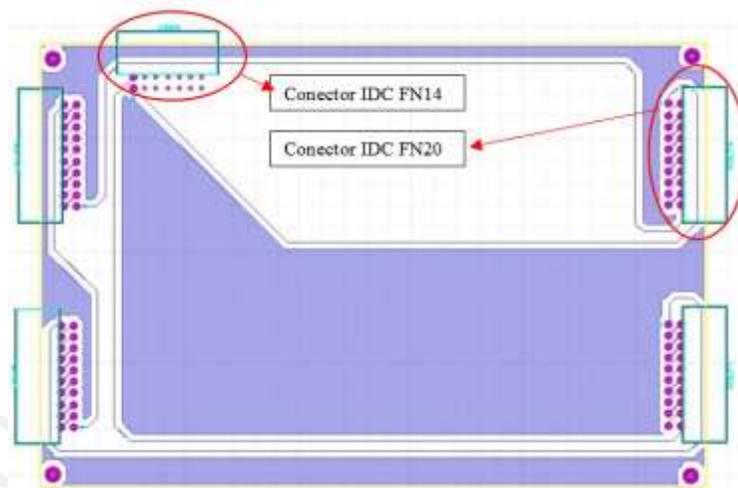


Figura 21. PCB diseñado para la conexión en serie de las 40 CCM

Diseño de la Tarjeta Electrónica para la Conexión en Paralelo de las CCM

La función de esta tarjeta es conectar las 40 CCM en paralelo. Este circuito cuenta con 4 headers de dos líneas con 20 pines que permiten conectar 4 conectores IDC FN20, de los cuales cada conector es para la conexión de 10 CCM, también cuenta con un header de dos líneas con 14 pines que permite conectar un conector IDC FN14 para la conexión de las 40 CCM en paralelo hacia el puerto analógico AIO de la tarjeta de adquisición 1. La Figura 22 muestra el PCB correspondiente a dicha tarjeta.

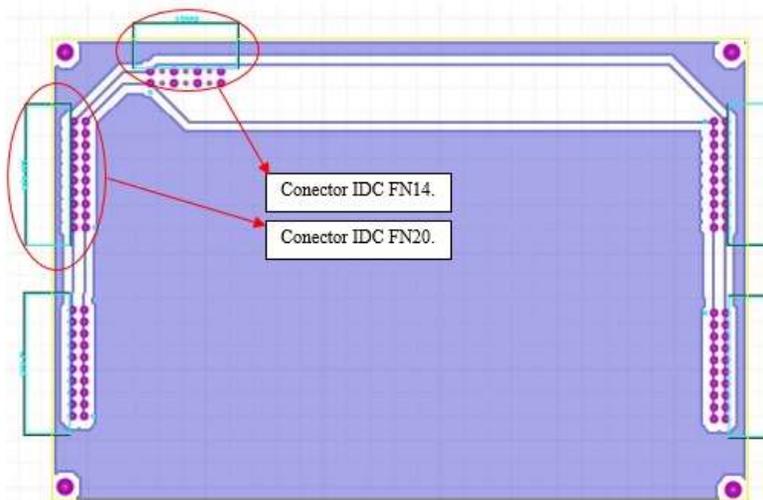


Figura 22. PCB diseñado para la conexión en paralelo de las 40 CCMs

Diseño de Banco de Resistencias Programables

El banco de resistencias programables se diseñó en base a las especificaciones de las CCM mostradas en la Tabla 7. Los cálculos para obtener los valores máximos y mínimos de resistencia a manejar el

banco de resistencias fueron realizados con base a los datos presentados en la Tabla 7 y para esto se utiliza la ecuación 3.

Tabla 7. Especificaciones de la energética generada por las CCM

	Voltaje	Corriente	Potencia
Máximo	0.6V	150uA	90uW
Mínimo	0.18V	40uA	7.2uW

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3)$$

$$R_{\max} = \frac{(0.6v)^2}{7.2uW} = 50K\Omega$$

$$R_{\min} = \frac{(0.18v)^2}{90uW} = 360\Omega$$

El diseño del prototipo de banco de resistencias consta de diferentes arreglos de resistencias controlado por bits que activan y desactivan el funcionamiento de los MOSFET BS170 como interruptor para la selección de las diferentes conexiones de las resistencias. La utilización de este tipo transistores MOSFET satisface los requisitos de voltaje y corriente suministrado por la CCM debido a que son transistores MOSFET de baja potencia, capaces de activarse con un voltaje de 5v entre sus terminales gate y source. También se optó por este tipo de transistores MOSFET debido a que el voltaje consumido entre drain y source es mucho menor al voltaje demandado entre colector y emisor en los transistores BJT. En base en la selección del transistor MOSFET BS170 por sus características en voltaje y corriente fueron conectados varios MOSFET BS170 en cascada, donde las terminales de drain y source están conectadas a una resistencia comercial de valor fijo. Los transistores MOSFET limitan o no el flujo de corriente en las resistencias, es decir, al colocar en corte un transistor MOSFET la corriente fluirá a través de la resistencia y no por el transistor MOSFET, en el caso contrario, cuando el MOSFET este activado o en saturación el flujo de corriente será entre las terminales drain y source del MOSFET y no a través de la resistencia. Cada transistor MOSFET BS170 es activado mediante un transistor BJT 2N2222a, tal como se muestra en la Figura 23. Una fuente de voltaje de 5v, 500mA permite alimentar el banco de resistencias. El transistor BJT 2N2222a es elegido para activar los MOSFET BS170 debido a que es un transistor de baja potencia y de uso común, además la corriente máxima en colector es de 600mA, mayor a la corriente entregada por la fuentes de voltaje para alimentar el banco de resistencias (500mA). La conexión en cascada de los doce transistores MOSFET permite conectar las resistencias en serie, así cuando un transistor o transistores MOSFET esté activo el flujo de corriente en la resistencia que este entre sus terminales drain y source será nulo y como consecuencia el número de resistencias en serie será menor, logrando así, obtener diferentes valores de resistencias finales. El diseño del banco de resistencias programables mostrado en la Figura 23 se considera que está configurado para una resolución de 12 bits. Esta propuesta se debe a las entradas y salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI 6008. A partir de esta configuración de

12 bits usando los transistores MOSFET BS170 se determinan el valor de resistencia máxima y mínima que puede manejar el banco de resistencias programables, es decir, un bit asigna un valor de resistencia y por lo tanto al tener 12 bits tiene una combinación 4092 valores de resistencias. La ecuación 4 determina el número de combinaciones posibles en 12 bits, donde n es el número de bits propuestos dentro del banco de resistencias programables.

$$\text{combinaciones} = 2^n \tag{4}$$

$$\text{combinaciones} = 2^{12}$$

$$\text{combinaciones} = 4092$$

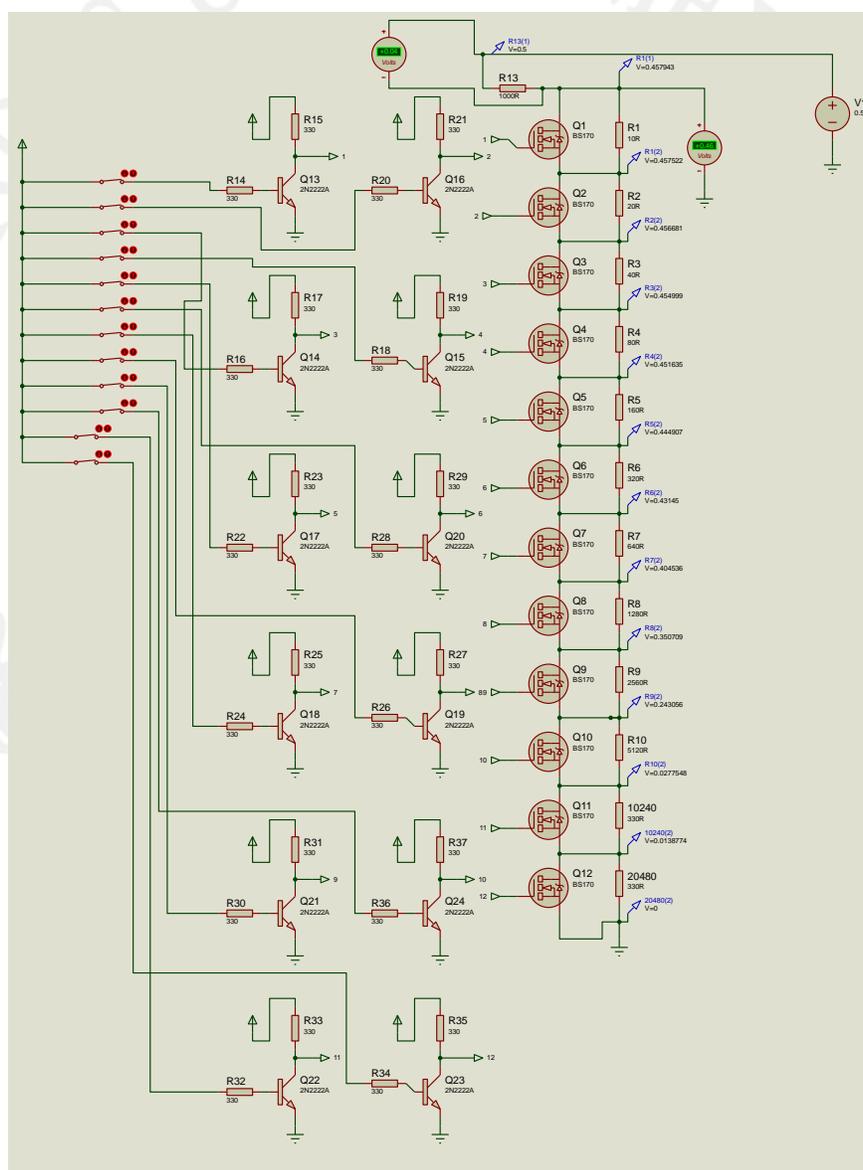


Figura 23. Simulación de banco de resistencias

A partir de la ecuación 4 con $n = 12$ bits existen 4092 combinaciones. Por lo tanto, con el banco de resistencias programables propuesto en la Figura 23 es posible asignar aproximadamente 4000 resistencias diferentes. Otra de las ecuaciones necesarias para calcular la variación resistiva en el banco de resistencias programables es la ecuación 5.

$$\Delta R = \frac{R_t}{(2^n) - 1} \quad (5)$$

Dónde: ΔR = variación resistiva o cambio mínimo entre una resistencia y otra, R_t = Resistencia máxima del banco de resistencias y n = Número de bits.

La resistencia máxima posible del banco de resistencias programables es obtenida despejando R_t de la ecuación 5. Para esto, se propuso que el cambio mínimo entre una resistencia y otra sea de 10Ω . Tomando como base que el número de combinaciones potenciales es 4092 se calcula la resistencia máxima, la cual es de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \therefore R_t &= \Delta R[(2^n) - 1] \\ R_t &= 10[(2^{12}) - 1] = \underline{40950} \end{aligned}$$

La resistencia máxima para una combinación de 4092 es de $40.9K\Omega$, la cual es un valor aproximado a los $50K\Omega$ calculados como resistencia máxima para las CCM. Por lo tanto, los 12 bits satisfacen para el control del banco de resistencias.

Ahora, al considerar que la resistencia mínima es de 10Ω y que el cambio mínimo entre una resistencia y otra es de 10Ω , y que la resistencia máxima debe ser de 40950Ω , se seleccionaron las siguientes 12 resistencias que deberán estar conectadas entre las terminales de drain y source de los 12 transistores

MOSFET:

10 Ω , 20 Ω , 40 Ω , 80 Ω , 160 Ω , 320 Ω , 640 Ω , 1280 Ω , 2560 Ω , 5120 Ω , 10240 Ω , 20480 Ω

Estas resistencias en el banco de resistencias programables fueron colocadas de menor a mayor en sentido del flujo de corriente del banco de resistencias y para considerar resistencias fijas se seleccionaron resistencias comerciales cercanas a los valores obtenidos bajo la consideración de tener incrementos de 10Ω .

Con base en el arreglo de los transistores MOSFET BS170 y a la colocación de resistencias comerciales entre drain y source puede lograrse obtener un valor máximo de 40950Ω cuando estén todos los transistores MOSFET en una región de corte, permitiendo que todas las resistencias estén en serie, es decir, colocar todas las resistencias en serie para obtener una resistencia final de 40950Ω . No

obstante cuando se desee obtener una resistencia final de 30Ω se activaran todos los MOSFET excepto el primero ni el segundo, logrando así una conexión en serie de las resistencias de 10Ω y 20Ω .

El prototipo de banco de resistencias programables propuesto en la Figura 23 quedo construido tal como se muestra en la Figura 24. Este banco cuenta con 3 headers de dos líneas con 14 pines para 3 conectores IDC FN14, cuyas sus funciones son: a) la asignación de bits para el control del banco, b) la lectura de voltaje en el banco de resistencias mediante el puerto AIO de la tarjeta 1 y c) la conexión de las tarjetas electrónicas con conexión en serie o paralelo de las 40 CCM hacia el banco de resistencias. También cuenta con dos conectores T-block, uno es encargado de la alimentación del banco de resistencias y el otro para la conexión de una sola CCM o alguna otra fuente de voltaje que se requiera caracterizar con ayuda del banco de resistencias.

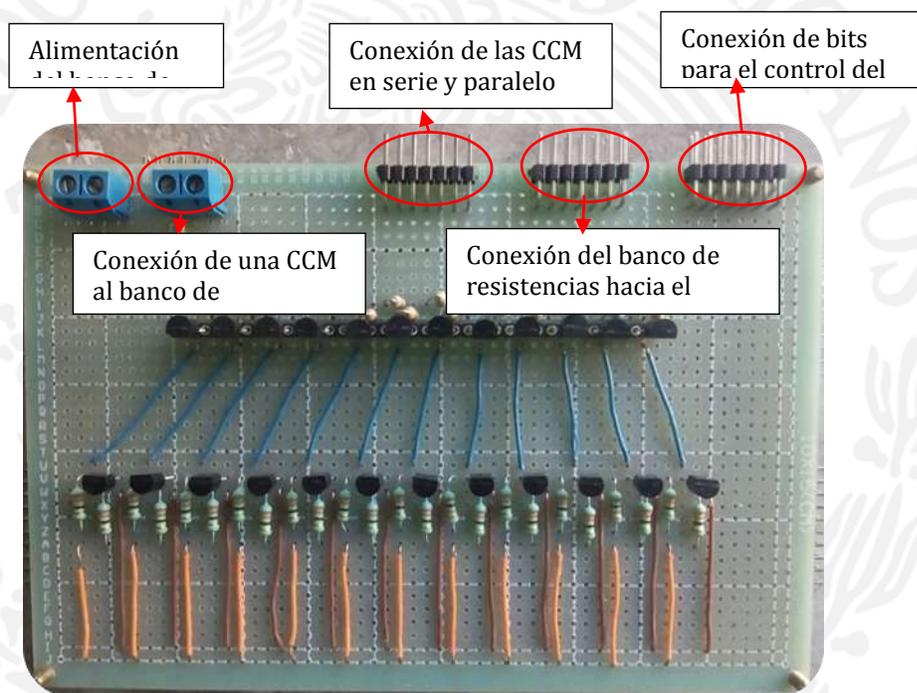


Figura 24. Circuito físico del banco de resistencia diseñado

La Figura 25 muestra el prototipo del banco de pruebas construido. Este sistema cuenta con el banco de resistencias, la placa encargada de la conexión en serie de las 40 CCM, la placa encargada de la conexión en paralelo de las 40 CCM y la placa encargada para guiar el voltaje de cada CCM en el stack de 40 CCM hacia las 40 entradas analógicas del sistema de adquisición de datos.

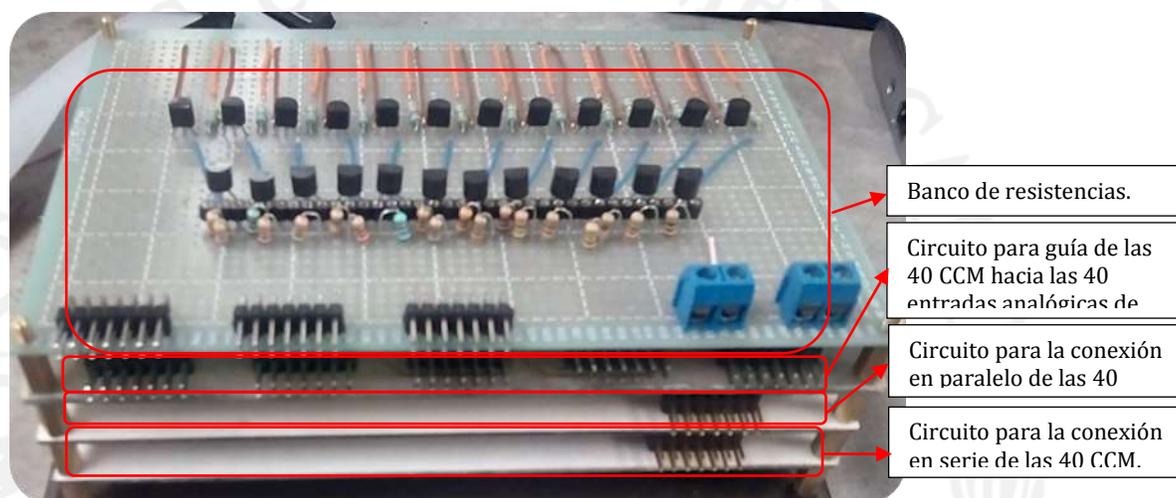


Figura 25. Sistema de comunicación final entre las CCM y el sistema de adquisición

Pruebas y Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas en el sistema de monitoreo y prototipo de banco de resistencias programables. Las pruebas para la validación experimental de la interfaz gráfica y banco de resistencias programables fueron realizadas con fuentes de CD y con el stack de 40 CCM. Ambas etapas de pruebas se realizaron conectando las fuentes de CD o 40 CCM con conexión en serie, en paralelo y de forma independientemente. Las pruebas fueron realizadas en el orden mostrado en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 26.

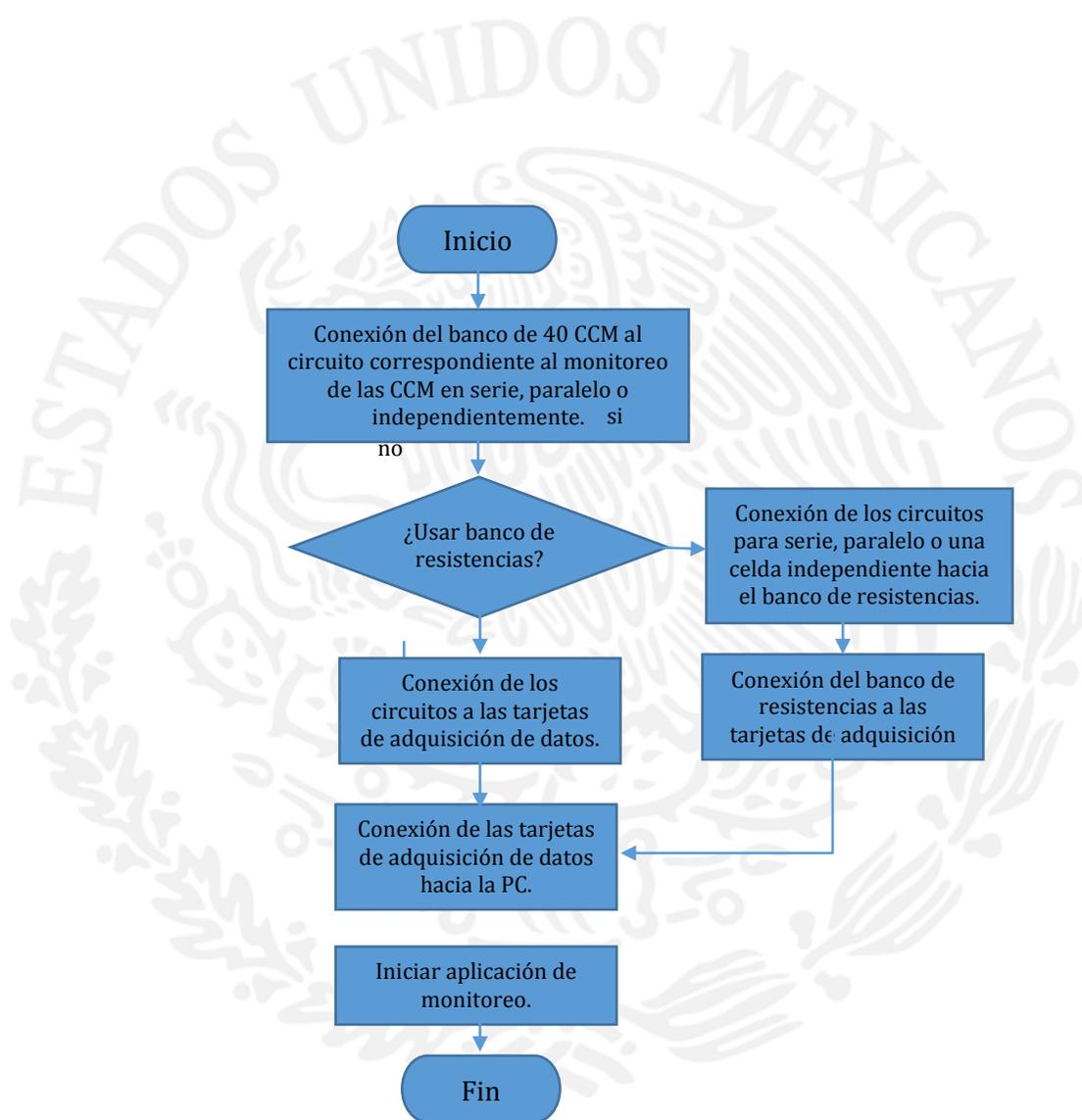


Figura 26. Diagrama de flujo del proceso del plan de pruebas

Pruebas y Resultados del Sistema de Monitoreo en Tiempo Real

Las pruebas realizadas para verificar que el sistema de monitoreo funciona correctamente fueron mediante el uso de una fuente de voltaje variable comercial ajustada a 0.5 V, la cual simula el voltaje promedio que generan las CCM. Una vez validado el correcto funcionamiento del monitoreo en tiempo real con la fuente de voltaje comercial se prosigue a realizar las pruebas con el stack de 40 CCM.

Resultados: Prueba del Sistema de Monitoreo en una Fuente de Voltaje de Corriente Directa

La Figura 27 ilustra la conexión del sistema de monitoreo en tiempo real usando una fuente de voltaje de corriente directa. La prueba fue realizada usando una fuente de voltaje variable comercial ajustada a 0.5 V con la intención de simular el voltaje generado por una CCM. Los dipolos positivo y negativo de la fuente representan el ánodo y cátodo de las CCM. La fuente de voltaje es conectada en la entrada analógica AI0 de la tarjeta de adquisición DAQ1 y posteriormente las tarjetas de adquisición de datos son conectadas a la PC mediante USB.



Figura 27. Diagrama de conexión del sistema de monitoreo en tiempo real

La 28 muestra la pantalla principal de la interfaz gráfica funcionando en el monitoreo de voltaje usando una fuente de voltaje de corriente directa comercial. La adquisición de datos del nivel de voltaje de la fuente de voltaje comercial ajustada a 0.5 V estuvo funcionando durante 20 minutos. La Figura 29 muestra los resultados de la adquisición de datos almacenados en un archivo electrónico (.txt).

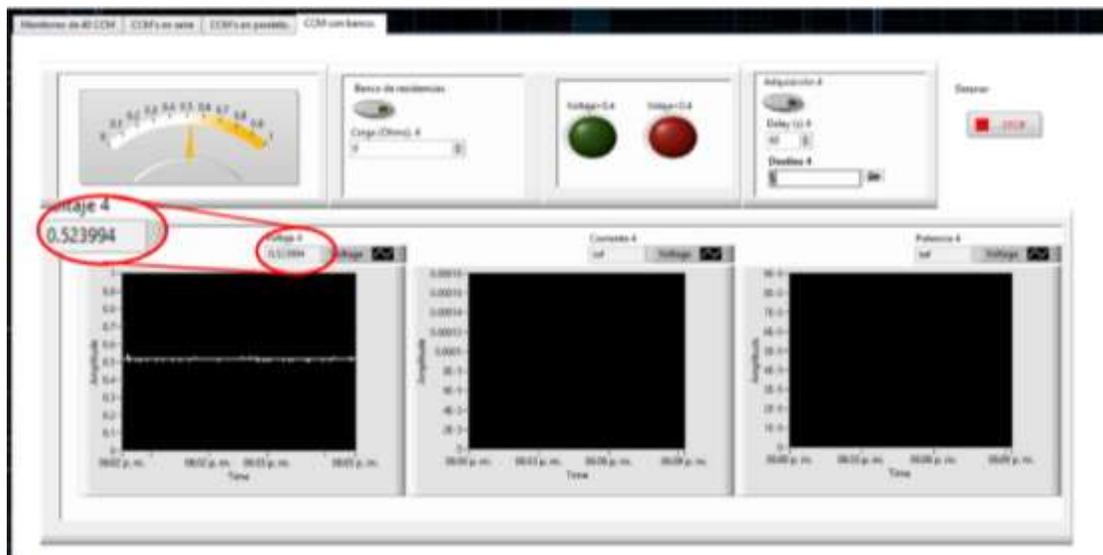


Figura 28. Captura de pantalla de la interfaz funcionando con una fuente comercial

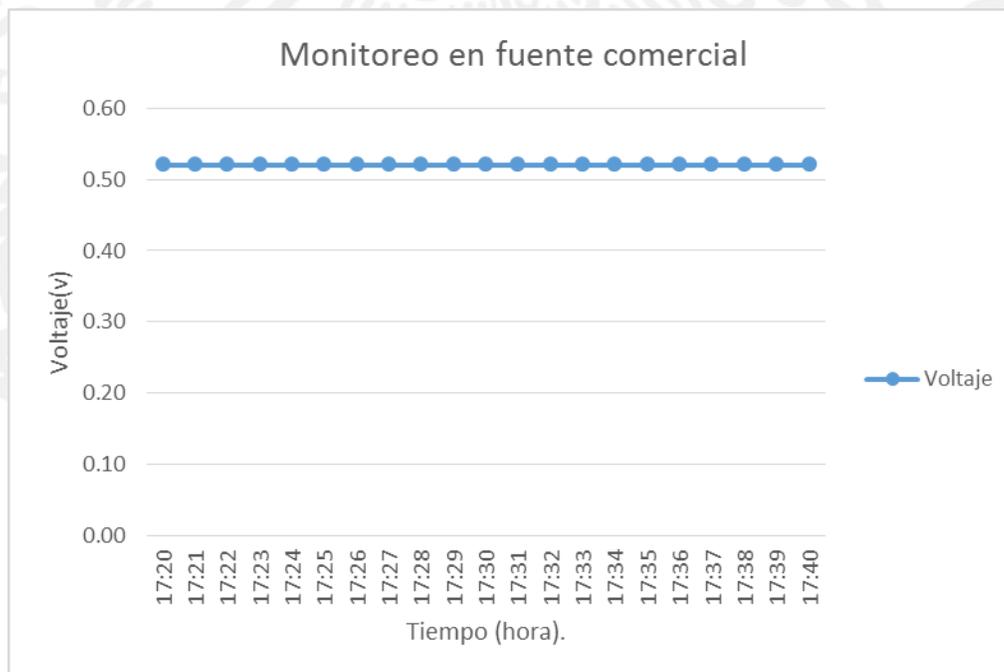


Figura 29. Comportamiento del voltaje en una fuente comercial ajustada a 0.5V

El sistema funciona correctamente debido a que las tarjetas de adquisición de datos no presentan problemas al detectar voltajes menores a 1v, la interfaz gráfica mostrada en la Figura 27 demuestra que es capaz de medir valores de voltaje menores a 1 V y además tiene la capacidad para almacenar los datos adquiridos en tiempo real.

Prueba del Sistema de Monitoreo con Fuentes de Voltaje de Corriente Directa Conectadas en Serie

La prueba del sistema de monitoreo en tiempo real usando varias fuentes de voltaje de corriente directa conectadas en serie fueron realizadas utilizando 40 baterías con 1.6V cada una. Este voltaje de 1.6 V de cada batería no representa el voltaje que produce en promedio cada CCM, por lo tanto, se realiza un arreglo de resistencias para lograr tener un divisor de tensión, tal como se observa en la Figura 30.

La determinación del voltaje a medir utilizando como fuente de alimentación las baterías fue considerada con base en la producción de voltaje de cada una de las CCM, logrando obtener valores de resistencia de 1 k Ω y 560 Ω , así se logró un voltaje de 0.58 V en R2, la cual es representativo al voltaje que produce cada una de las CCM.

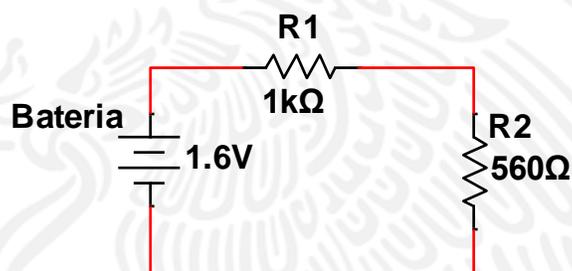


Figura 30. Divisor de tensión para obtener el voltaje que produce una CCM

Tomando en cuenta el voltaje en R2 como una fuente de 0.58 aproximadamente, la conexión en serie se realiza como se muestra en la Figura 31.

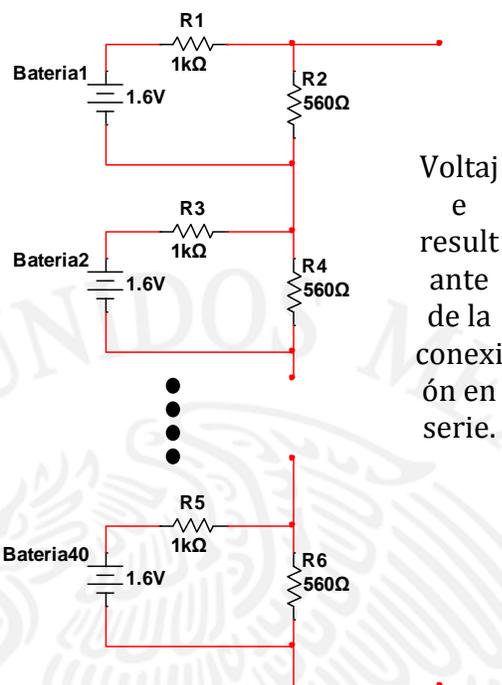


Figura 31. Conexión en serie de 40 Baterías con voltajes de 0.58V

La Figura 32 muestra la prueba realizada con la conexión en serie de las 40 baterías utilizando el arreglo del circuito resistivo para lograr un voltaje de 0.58 V. Las 40 baterías con arreglo del circuito resistivo conectadas en serie son conectadas a la entrada analógica AIO de la tarjeta de adquisición de datos DAQ1 y posteriormente las tarjetas se conectaron a la PC mediante USB.



Figura 32. Conexión del sistema para pruebas con 40 fuentes de voltaje de 0.58V conectadas en serie

La Figura 33 muestra la captura de pantalla de la interfaz gráfica en funcionamiento. El sistema es capaz de adquirir voltaje de fuentes de voltaje de 0.58V conectadas en serie.

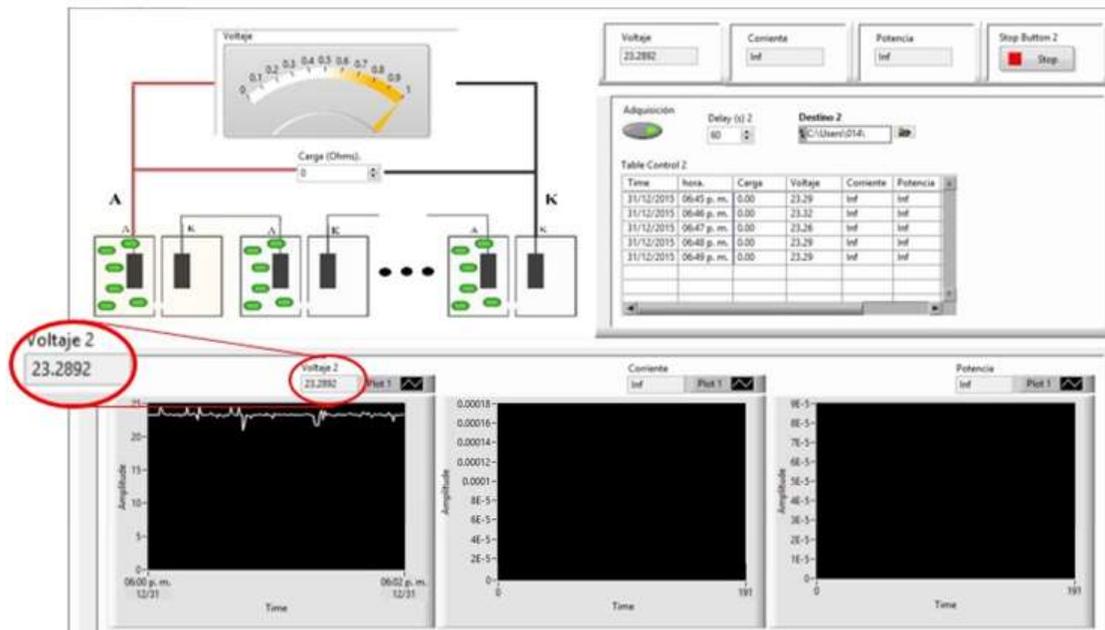


Figura 33. Interfaz gráfica funcionando para la conexión en serie

La prueba de adquisición de datos se realiza en un tiempo de 30 minutos tomando muestras de voltaje cada minuto. La Figura 34 muestra la gráfica donde se aprecia el comportamiento del voltaje de la conexión en serie de las CCM. Los resultados de los datos adquiridos son almacenados en un archivo electrónico. A partir de esta prueba conectando todas las baterías con los arreglos resistivos se concluye la validez del sistema de monitoreo en tiempo real con respecto al resultado teórico esperado de 23.2 V.

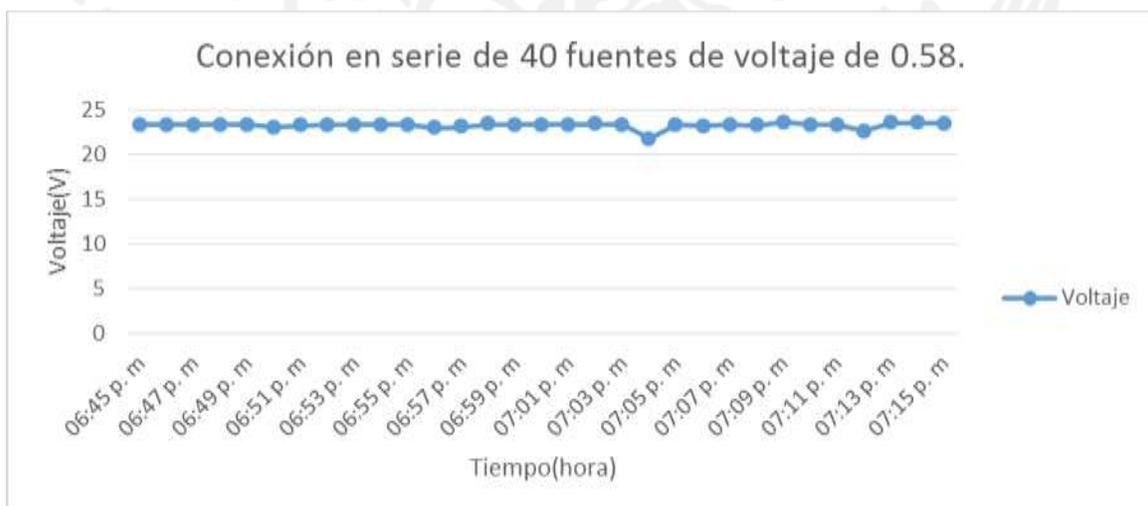


Figura 34. Comportamiento del voltaje en la conexión en serie de 40 fuentes de voltaje de 0.58V.

Prueba del sistema de monitoreo con fuentes de voltaje comerciales conectadas en paralelo

La prueba de conexión de 40 fuentes de voltaje comercial se realizó con ayuda del circuito mostrado en la Figura 27 para obtener un voltaje aproximado al de las CCM. Tomando en cuenta el voltaje en R2 como una fuente de 0.58 aproximadamente, la conexión en paralelo se realiza como se muestra en la Figura 35.

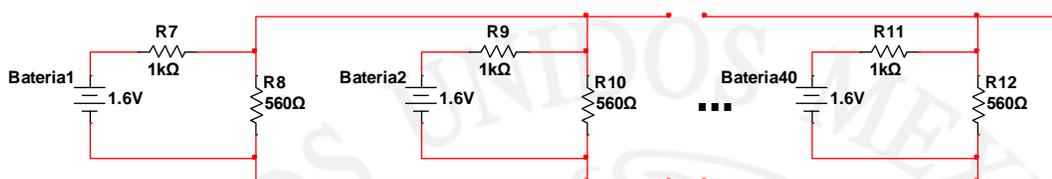


Figura 35. Conexión en paralelo de voltajes de aproximadamente 0.58V

La Figura 36 muestra la conexión del sistema para el caso de prueba del sistema de monitoreo en tiempo real con conexión en paralelo de las baterías con arreglo resistivo para lograr un voltaje de 0.58 V. Las 40 fuentes conectadas en paralelo fueron conectadas a la entrada analógica AI0 de la tarjeta de adquisición de datos DAQ1 y posteriormente las tarjetas se conectaron a la PC mediante USB.



Figura 36. Conexión del sistema para la prueba de 40 fuentes de 0.58V conectadas en paralelo

La Figura 37 muestra la captura de pantalla de la interfaz gráfica en funcionamiento. Se observa que el sistema es capaz de adquirir voltaje de fuentes de voltaje de aproximadamente 0.58V conectadas en paralelo.

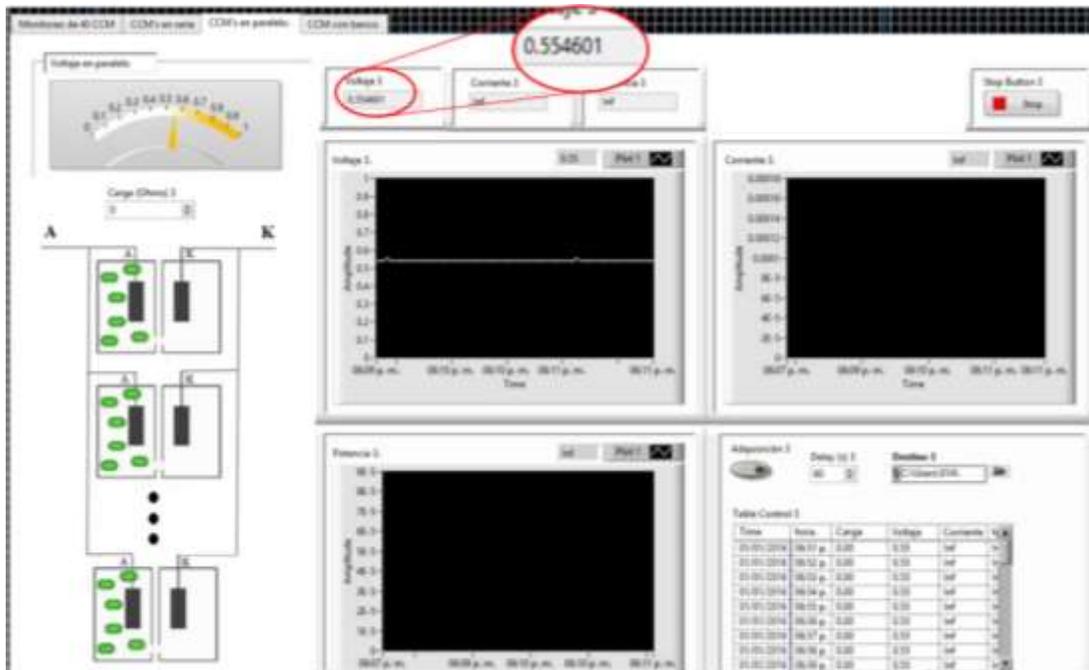


Figura 37. Interfaz funcionando para la conexión en paralelo de 40 fuentes de voltaje

Las muestras de lectura de voltaje son tomadas cada minuto en un período de 30 minutos. En la Figura 38 se muestra una gráfica donde se aprecia el comportamiento del voltaje de la conexión en paralelo de 40 fuentes de voltaje comerciales. Los resultados de la adquisición de datos son almacenados en un archivo electrónico.

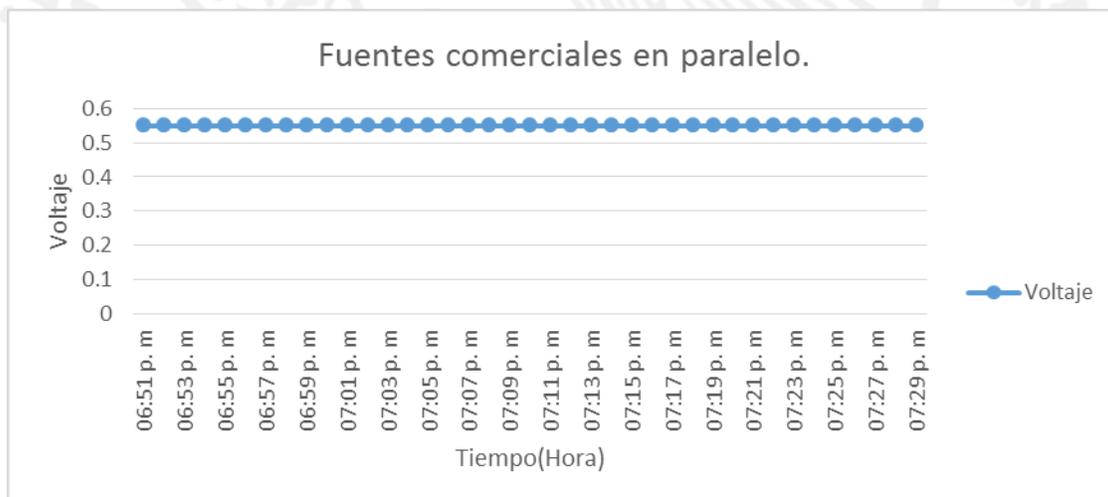


Figura 38. Comportamiento del voltaje en la conexión en paralelo de 40 fuentes de voltaje de 0.58V

La Figura 39 muestra la lectura de voltaje medida por un multímetro en la conexión en paralelo de las 40 fuentes de voltaje comerciales. La comparación de los resultados mostrados en las Figuras 37 y 39 permite concluir que el sistema funciona para 40 fuentes de voltaje conectadas en paralelo, debido a que los valores en ambos casos son muy cercanos.



Figura 39. Medición de voltaje con multímetro de la conexión en paralelo de 40 fuentes de voltaje de 0.58V

Prueba del sistema de monitoreo en una CCM

La Figura 40 muestra la conexión del sistema para el monitoreo en tiempo real de una CCM. El ánodo y el cátodo de la CCM fueron conectados a las entradas positiva y negativa del puerto analógico AI0 de la tarjeta de adquisición de datos DAQ1 y posteriormente las tarjetas de adquisición fueron conectadas a la PC para su posterior monitoreo.

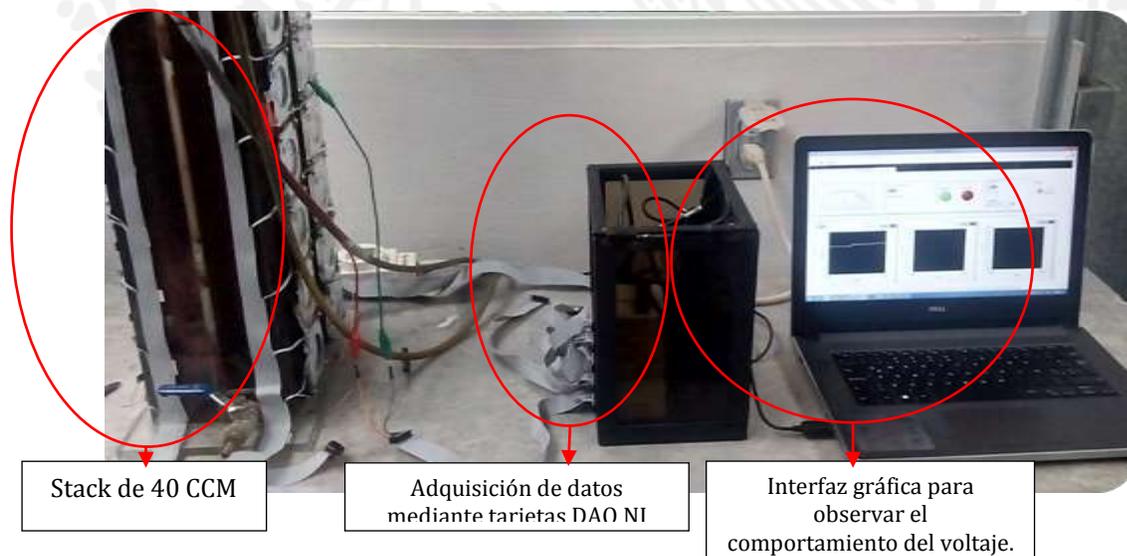


Figura 40. Conexión del sistema para prueba del monitoreo de una CCM

La Figura 41 muestra la captura de pantalla de la interfaz en funcionamiento para este caso de prueba de la CCM.



Figura 41. Interfaz funcionando en la adquisición de voltaje de una sola CCM

En la Figura 42 se muestra la lectura del voltaje en la misma celda realizada con un multímetro. Los valores obtenidos mediante el sistema de monitoreo y mediante el multímetro son cercanos por lo tanto el sistema funciona correctamente en una CCM. La diferencia entre estos valores es debido a que el multímetro y las tarjetas de adquisición tienen distinta resolución, además de la variación de voltaje en las CCM causada por los microorganismos y a la riqueza de la materia orgánica contenida en el agua residual.



Figura 02. Medición de voltaje con multímetro en la CCM correspondiente a esta prueba

Las muestras de lectura de voltaje obtenidas a través del sistema de monitoreo en tiempo real son tomadas cada minuto en un período de 30 minutos. En la Figura 43 se muestra la gráfica donde se aprecia el comportamiento del voltaje en una CCM. Los resultados de los datos adquiridos son almacenados en un archivo electrónico.

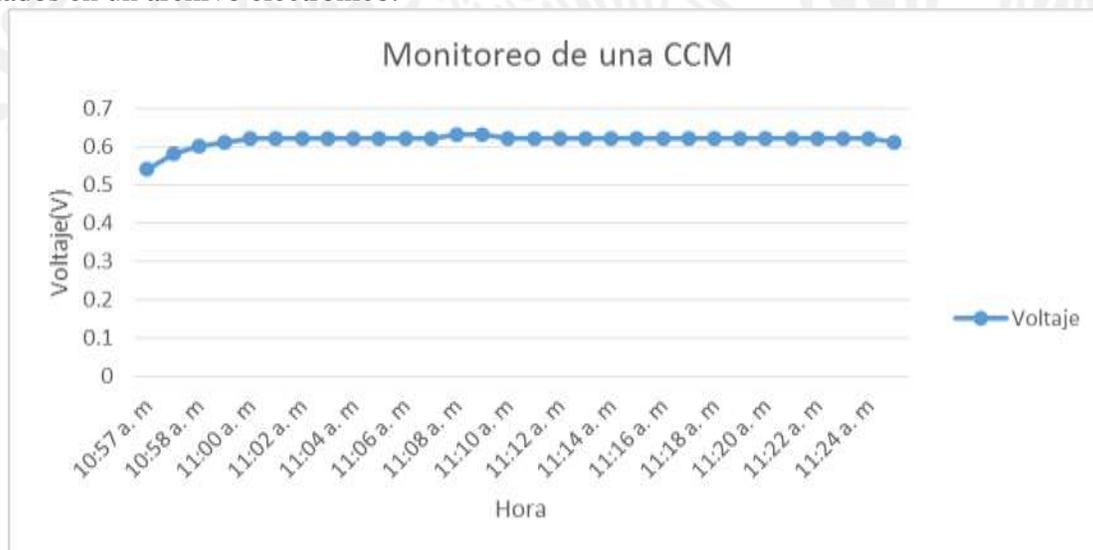


Figura 03. Comportamiento del voltaje en la CCM

Prueba del sistema de monitoreo para las CCM conectadas en serie

La Figura 44 muestra la conexión del sistema de monitoreo para obtener el voltaje de las 40 CCM conectadas en serie. Las CCM son conectadas a la tarjeta electrónica encargada de la conexión en serie

de las CCM, posteriormente la tarjeta electrónica es conectada a las tarjetas de adquisición de datos mediante cable plano IDC y sus respectivos conectores, finalmente las tarjetas de adquisición se conectan a la PC mediante bus USB.



Figura 44. Conexión del sistema para la prueba de las 40 CCM conectadas en serie

La Figura 45 se muestra la captura de pantalla de la interfaz funcionando para este caso, donde puede observarse el voltaje leído por las tarjetas de adquisición de datos.



Figura 05. Interfaz funcionando para la conexión en serie de las 40 CCM

La Figura 46 se muestra el comportamiento del voltaje de las 40 CCM conectadas en serie. La adquisición de datos para este caso estuvo en funcionamiento por un tiempo de 30 minutos, tomando muestras cada minuto.



Figura 06. Comportamiento del voltaje resultante de la conexión en serie de 40 CCM

El resultado de esta prueba no es el esperado dado que al conectar las CCM en serie, el voltaje de cada CCM en teoría debe sumarse, sin embargo se obtuvo un voltaje de 0.687 V, tal como se observa en la Figura 47. Con base en los resultados se puede inferir que existe un incremento de voltaje muy bajo, lo cual se concluye que no exista una suma de voltajes entre las CCM, esto se debe a que las 40 CCM

están alimentadas con un mismo sustrato de agua residual, lo que hace que todo el stack se comporte como una sola fuente de voltaje. La validación experimental del sistema de monitoreo conectado a la CCM fue realizada usando un multímetro digital mostrado en la Figura 47 y con esto se demuestra que los datos adquiridos por la interfaz gráfica son correctos.

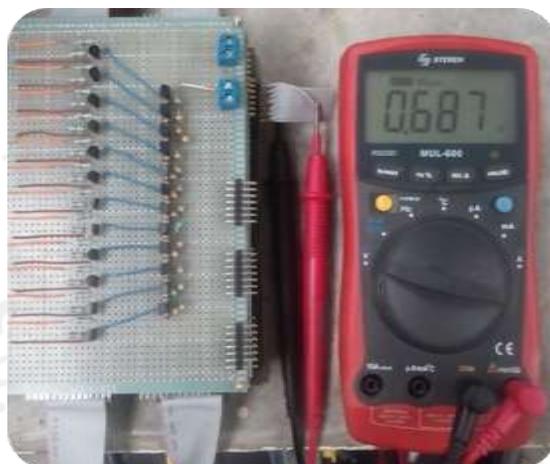


Figura 07. Medición con multímetro del voltaje resultante de la conexión en serie de las 40 CCMs

La diferencia de voltaje medida por el milímetro digital y la mostrada en la Figura 45 se debe a las variaciones de voltaje presentes en las CCM y a la diferencia de resoluciones entre ambos dispositivos de medición, DAQ NI USB 6008 y multímetro digital.

Resultados de la prueba del monitoreo para las CCM conectadas en paralelo

La Figura 48 muestra la conexión del sistema de monitoreo con el Stack de las 40 CCM conectadas en paralelo. Las 40 CCM son conectadas a la tarjeta electrónica encargada de conectar las CCM en paralelo, dicha tarjeta posteriormente es conectada a las tarjetas de adquisición de datos y finalmente las tarjetas de adquisición son conectadas a la PC a través del puerto USB.



Figura 48. Conexión del sistema para la prueba de este con las 40 CCM en paralelo

En la Figura 49 se muestra la interfaz gráfica funcionando para este caso de prueba.



Figura 09. Interfaz funcionando para la conexión en paralelo de las 40 CCM

El comportamiento del voltaje medido por el sistema de adquisición de datos se muestra en la Figura 50, el sistema de monitoreo estuvo funcionando durante 30 minutos, tomando muestras de voltaje cada minuto. Los resultados de la lectura de voltajes fueron almacenados en un archivo electrónico.



Figura 50. Comportamiento del voltaje resultante de la conexión en paralelo de las 40 CCM

Los resultados obtenidos mostrados en la Figura 50 no presentan grandes variaciones y el voltaje resultante está en el rango de voltaje que genera una CCM.

La Figura 51 muestra el voltaje de las 40 CCM conectadas en paralelo validado el sistema de monitoreo con un multímetro digital. La comparación de este resultado con el resultado mostrado en la Figura 49 permite concluir que el sistema funciona correctamente, debido a que ambos resultados son cercanos.



Figura 51. Medición con una multímetro del voltaje resultante de la conexión en paralelo de las 40 CCM

Pruebas y Resultados del Prototipo de Banco de Resistencias Programables

El funcionamiento del prototipo de banco de resistencias programables es validado con el uso de una fuente de voltaje de corriente directa comercial y con las CCM. En la realización de estas pruebas se conectaron las CCM o la fuente de voltaje variable comercial al banco de resistencias, y este fue conectado al puerto analógico AI0 de la tarjeta DAQ NI USB 6008. En la Figura 52 se muestra un diagrama de la conexión del sistema con el uso del banco de resistencias.

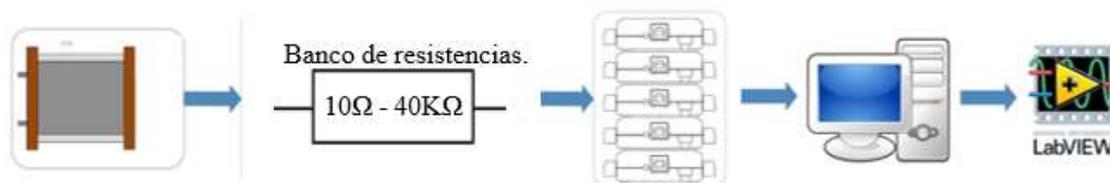


Figura 52. Diagrama de la conexión del sistema con el banco de resistencias

Resultados: Prueba del banco de resistencias con una fuente comercial

El objetivo de esta prueba fue verificar que el banco de resistencias estuviera funcionando correctamente, para esto se utilizó una fuente de voltaje de corriente directa comercial y con esto validar en forma experimental su funcionamiento. En la validación del prototipo de banco de resistencias programables se conecta una resistencia en serie con el banco de resistencias programables, tal como se muestra en la Figura 53, esto para evitar un corto circuito cuando todos los transistores MOSFET estén activados, es decir, en caso que el usuario seleccione una carga de $0\ \Omega$. En las pruebas la fuente fue ajustada a 0.6V debido a que es el voltaje máximo en promedio que produce una CCM, compensando la caída de tensión en la resistencia de $1\text{K}\Omega$.

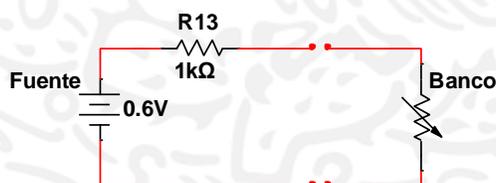


Figura 53. Conexión del banco de resistencias hacia la fuente comercial

La Figura 54 muestra la conexión del sistema para la realización de esta prueba.



Figura 54. Conexión del sistema para la realización de pruebas del banco de resistencias con fuente comercial

En la Figura 55 se muestra la interfaz en funcionamiento, donde se observa la variación del voltaje a distintos valores de cargas resistivas (1000Ω a $39,000 \Omega$, en intervalos de $1,000\Omega$ en $1,000\Omega$) dados por el banco de resistencias, cabe mencionar que el período de tiempo entre un cambio de una carga y otra se coloca de 1 minuto.

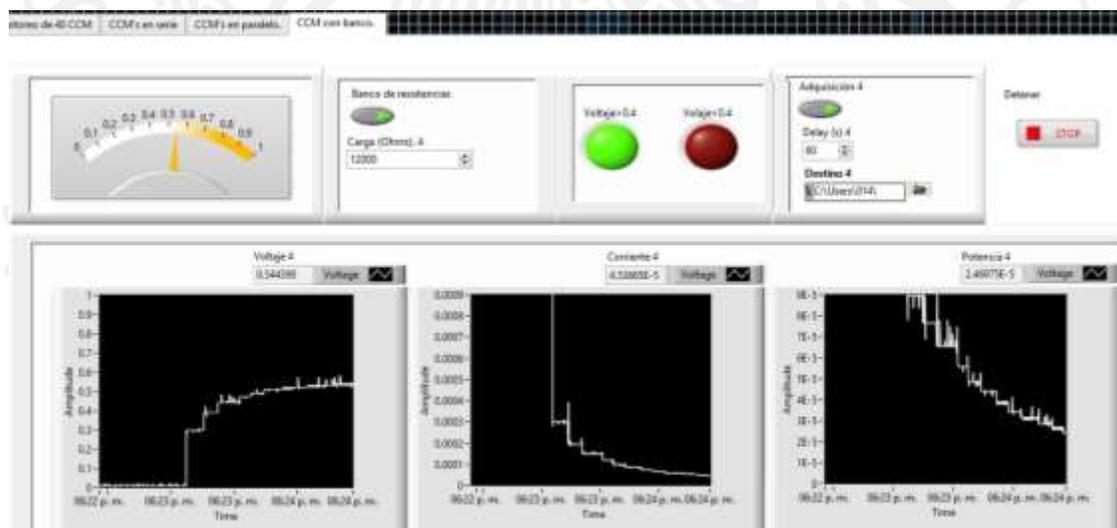


Figura 55. Interfaz funcionando en fuente comercial utilizando banco de resistencias

La Figura 56 muestra el comportamiento del voltaje y corriente en el banco de resistencias a distintas cargas resistivas seleccionadas por el usuario a través de la interfaz gráfica. Los resultados de los datos medidos son almacenados en un archivo electrónico.

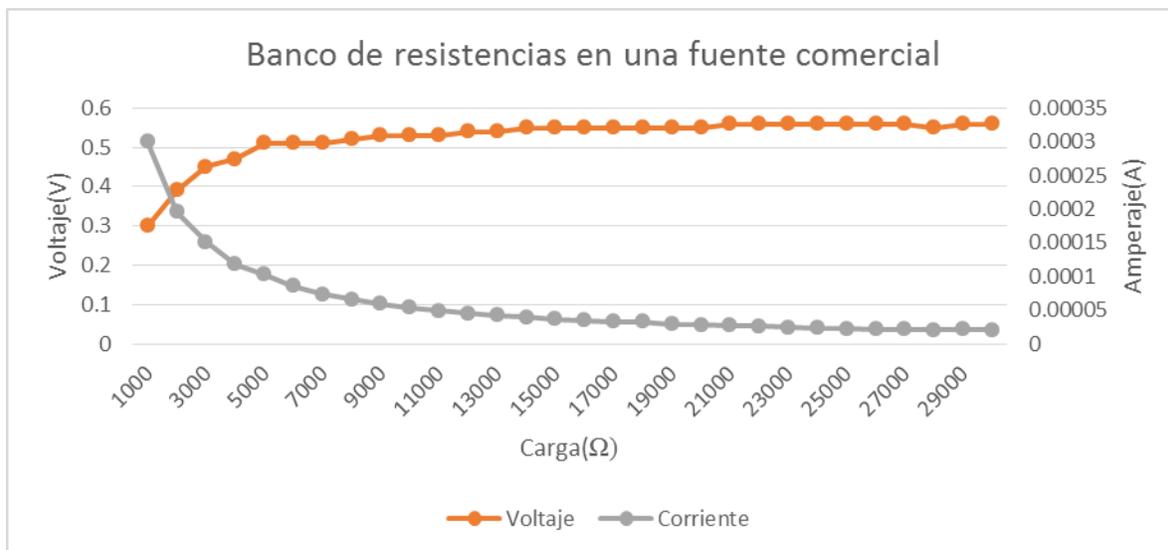


Figura 56. Comportamiento del voltaje y corriente en una fuente comercial a distintas cargas asignadas por el banco de resistencias

El cálculo de la caída de tensión en la resistencia asignada mediante el banco de resistencias programables permite validar el funcionamiento del sistema. El voltaje en una resistencia está dado por la ecuación 6.

$$V_R = \frac{V_T(R)}{R_T} \quad (6)$$

Donde: V_R es el voltaje en la resistencia, V_T es el voltaje de la fuente, R_T es la resistencia total, es decir, es la suma de la resistencia asignada por el banco de resistencias más la resistencia de $1K\Omega$ puesta en serie con el banco y R es la resistencia asignada por el banco de resistencias programable.

La caída de tensión en las resistencias de $1K\Omega$ y $27K\Omega$ asignadas por el banco de resistencias se obtiene a partir de la Ecuación 6, siendo:

$$V_{R_{1K\Omega}} = \frac{(0.6V)(1000\Omega)}{1000\Omega + 1000\Omega} = 0.3V$$

$$V_{R_{27K\Omega}} = \frac{(0.6V)(27000\Omega)}{1000\Omega + 27000\Omega} = 0.578V$$

Con base en el cálculo numérico anterior, los resultados presentados en la gráfica de la Figura 56 son similares, por lo tanto el banco de resistencias programable está funcionando correctamente.

Prueba del banco de resistencias con la conexión en serie de 40 fuentes de voltaje comerciales

El objetivo de esta prueba fue validar el funcionamiento del banco de resistencias junto con el sistema de adquisición de datos para fuentes de aproximadamente 0.5V conectadas en serie. En esta prueba se utiliza el mismo circuito mostrado en la Figura 4.5 para obtener un voltaje cercano al que generan las CCM. Tomando el voltaje de R2 como una fuente de voltaje de 0.58V, se conectaron las 40 fuentes en serie como se muestra en la Figura 4.6.

La Figura 57 muestra el sistema conectado para la realización de esta prueba. Las 40 fuentes de voltaje de 0.58V en serie fueron conectadas al banco de resistencias programables, posteriormente el banco fue conectado al puerto analógico AIO de la tarjeta DAQ1 y finalmente las tarjetas de adquisición son conectadas a la PC mediante USB para poder observar el comportamiento del voltaje en la pantalla de la interfaz gráfica.



Figura 57. Sistema conectado para la realización de la prueba del banco de resistencia con la conexión en serie de 40 fuentes de voltaje de 0.58V

El banco de resistencias programables es conectado en serie con una resistencia de 18KΩ para brindar protección en caso de cortocircuito cuando todos los transistores MOSFET estén activos. Además, ayuda a poder observar cambios en los niveles de voltaje ocasionados por los diferentes perfiles de carga. La conexión de la resistencia en serie con el banco de resistencias se muestra en la Figura 58.

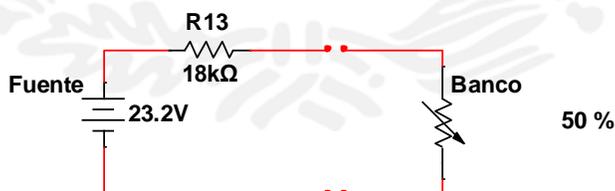


Figura 58. Banco de resistencias con conexión en serie de una resistencia y las 40 fuentes de voltaje de CD

En la Figura 59 se muestra la interfaz funcionando para este caso de prueba.

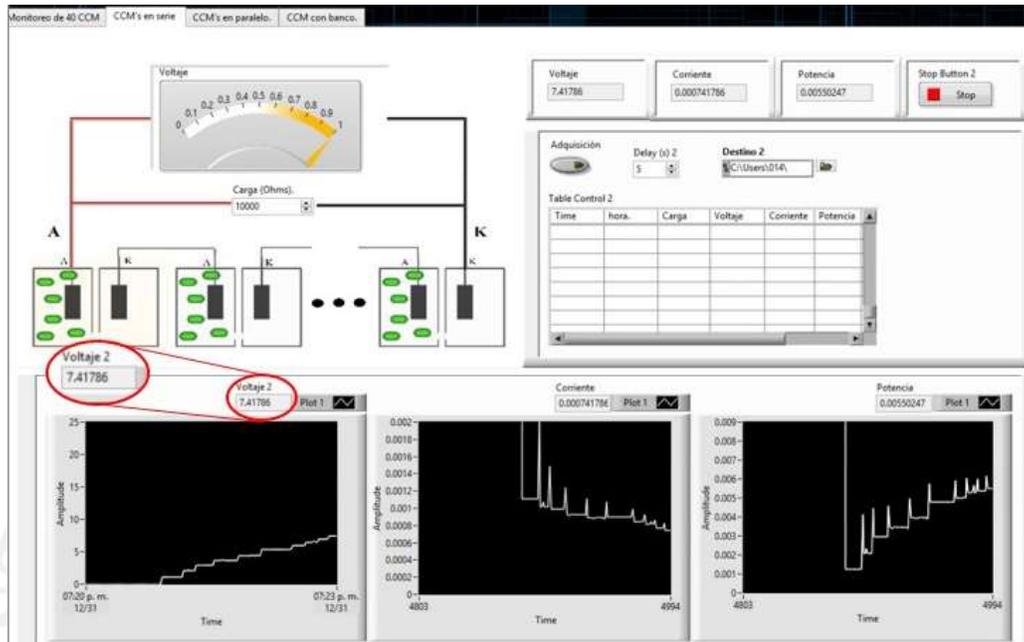


Figura 59. Interfaz gráfica funcionando en la prueba del banco de resistencia con 40 fuentes de voltaje de 0.58V conectadas en serie

A partir de la Figura 59 se observa que el banco de resistencias realiza correctamente los cambios de carga resistiva, esto se observa en las gráficas de la interfaz, cada uno de los cambios de voltaje relacionado con la carga asignada con el banco de resistencias programables. En la Figura 60 se muestra una gráfica del comportamiento del voltaje y corriente en este caso. El perfil de cargas resistivas fue considerando cambios de carga cada 60 segundos. Los cambios realizados en intervalos de 1,000 Ω hasta llegar a los 39K Ω . Los resultados obtenidos del monitoreo fueron almacenados en un archivo electrónico.

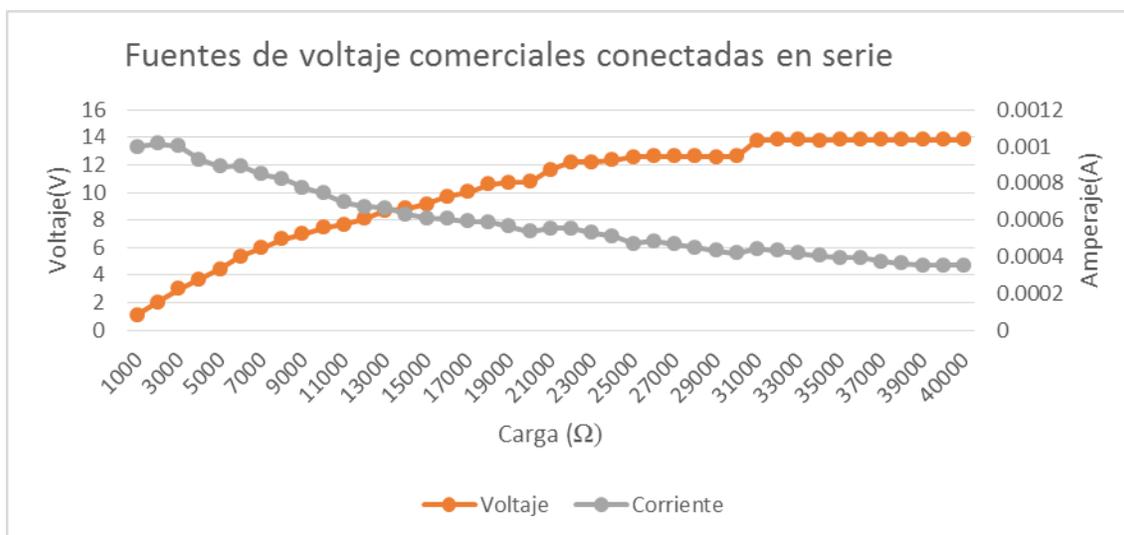


Figura 60. Comportamiento del voltaje y corriente en la prueba del banco de resistencia con 40 fuentes de voltaje de 0.58 V conectadas en serie

Al fin de comprobar que la asignación de las resistencias en el banco fuera correcta se colocó una resistencia comercial de 39KΩ en lugar del banco de resistencias y posteriormente se midió el voltaje en esta resistencia mediante un milímetro, véase la Figura 61, esto permitió comparar el voltaje medido con una resistencia comercial de 39KΩ con el valor del voltaje en el banco de resistencias con el mismo valor de resistencia.

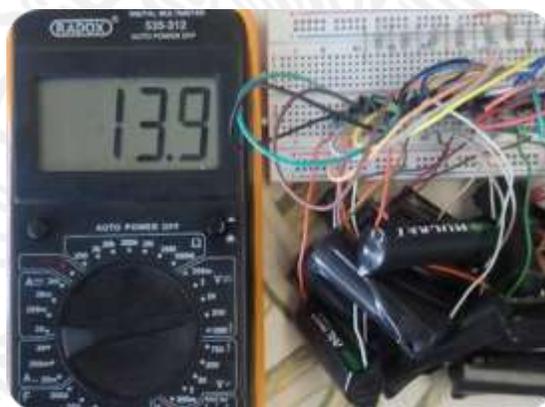


Figura 61. Medición de voltaje en una resistencia comercial de 39K en lugar de la resistencia de 39K asignada por el banco de resistencias

El voltaje medido con el multímetro digital es similar al adquirido por el sistema de monitoreo en tiempo real mostrado en la Figura 60.

Prueba del Banco de Resistencias Programables con la Conexión en Paralelo de las 40 Fuentes de Voltaje Comerciales

La prueba del banco de resistencia con la conexión en paralelo de 40 fuentes de voltaje comerciales permite validar el sistema para este caso. Para esta prueba se utilizó el mismo circuito mostrado en la figura 4.5 para obtener un voltaje aproximado al voltaje producido por las CCM. Tomando en cuenta el voltaje en R2 como una fuente de aproximadamente 0.5V, la conexión en paralelo es realizada como se muestra en la Figura 4.10. La realización de la prueba se hizo colocando una resistencia de 18K Ω en serie con el banco de resistencias, tal como se muestra en la Figura 61, esto para evitar un corto circuito en el banco de resistencias programables y así poder observar la variación del voltaje ante las diferentes cargas resistivas asignadas por el banco de resistencias.

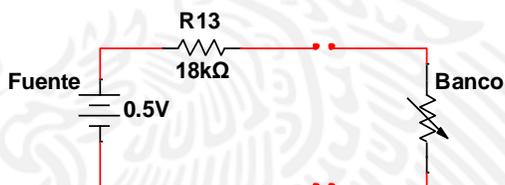


Figura 61. Conexión del banco de resistencias con conexión en paralelo de 40 fuentes de voltajes

La Figura 62 muestra el sistema conectado para la realización de la prueba del banco de resistencias ante 40 fuentes de 0.58V conectadas en paralelo. Las 40 fuentes de voltaje de 0.58V en paralelo fueron conectadas al banco de resistencias, posteriormente el banco es conectado al puerto analógico AIO de la tarjeta DAQ 1 y finalmente las tarjetas de adquisición son conectadas hacia la PC mediante USB.



Figura 62. Sistema conectado para la realización de la prueba del banco de resistencia con la conexión en paralelo de 40 fuentes de voltaje de 0.58V

En la Figura 63 se muestra la interfaz funcionando para este caso, se puede observar que el banco de resistencias realiza correctamente los cambios de carga resistiva, tal como se observa en la interfaz gráfica la variación de voltaje debido a los perfiles de carga establecidos.

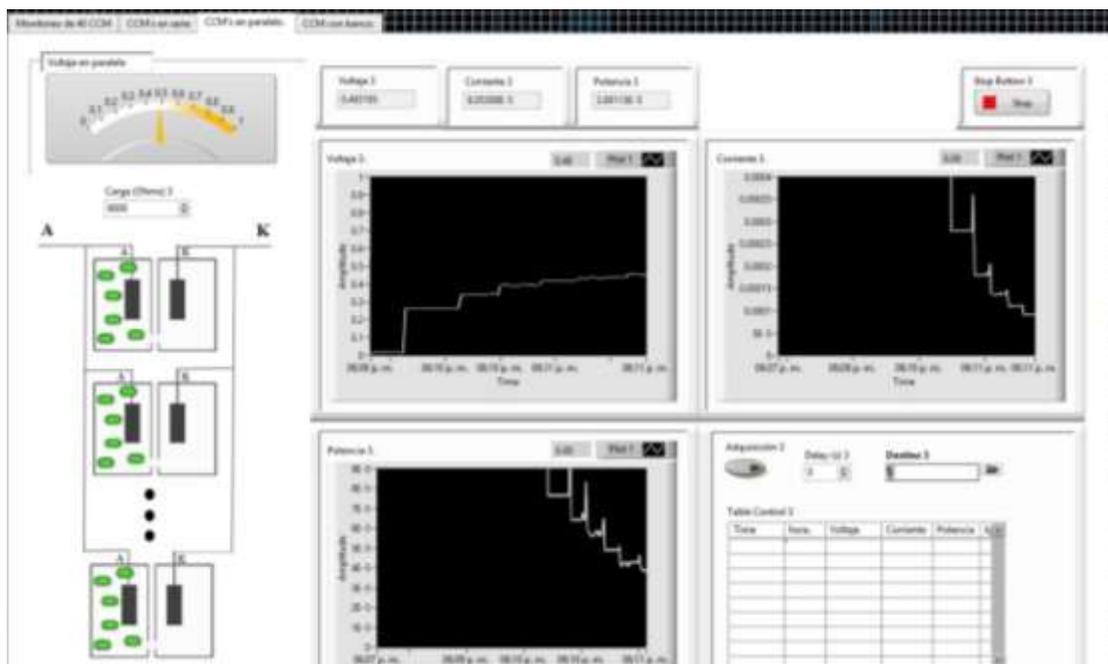


Figura 63. Interfaz gráfica funcionando en la prueba del banco de resistencia con 40 fuentes de voltaje de 0.58V conectadas en paralelo

En la Figura 64 se muestra una gráfica del comportamiento del voltaje y corriente para este caso. El valor de resistencias en el banco de resistencias programables es cambiado cada 60 segundos en intervalos de 1000 Ω hasta llegar a 39 K Ω , iniciando en 1000 Ω . Los resultados obtenidos son almacenados en un archivo electrónico.

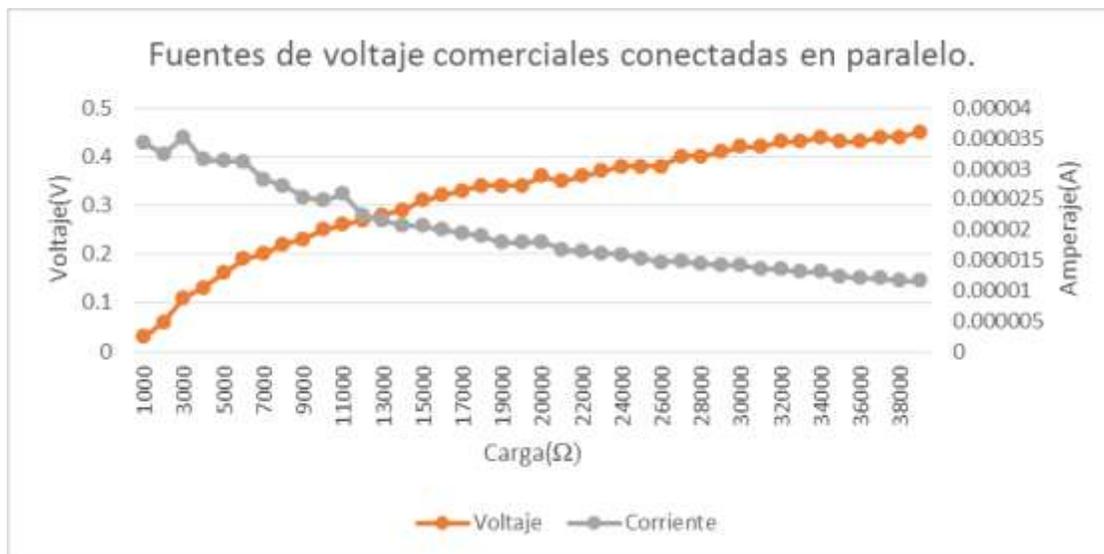


Figura 64. Comportamiento del voltaje y corriente en la prueba del banco de resistencia con 40 fuentes de voltaje de 0.58V conectadas en paralelo

La figura 65 muestra la lectura de voltaje en una resistencia comercial de 39KΩ conectada en lugar del banco de resistencias programables. La comparación del valor mostrado en la Figura 65 y el mostrado en la Figura 64 cuando el banco de resistencias asigna una carga de 39KΩ son aproximados y permite concluir que el banco de resistencias programable funciona correctamente para este caso de prueba.

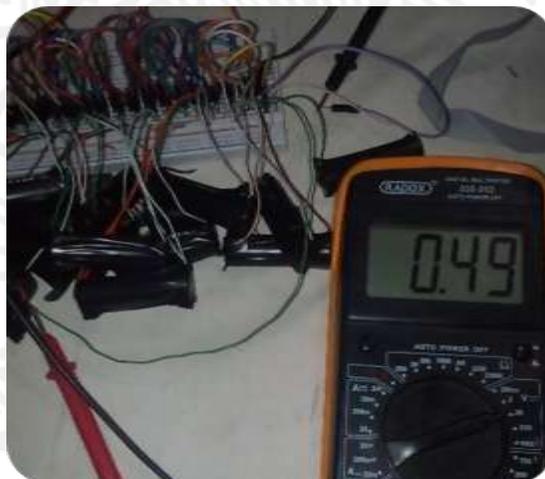


Figura 65. Medición de voltaje en una resistencia comercial de 39KΩ en lugar de la resistencia de 39KΩ asignada por el banco de resistencias

Prueba del Banco de Resistencias Programable en una CCM

Con la finalidad de comprobar el funcionamiento del banco de resistencias en las CCM, se conectó una de las 40 CCM al banco de resistencias y se mide el voltaje en la CCM bajo condiciones de diferentes perfiles de cargas mencionados más adelante. La conexión del banco de resistencias se realiza a la entrada analógica AI0 de la tarjeta DAQ1 y las tarjetas DAQ fueron conectadas a la PC mediante USB (véase la Figura 66). Para este caso el banco de resistencias programable fue conectado en paralelo con la CCM sin preocupación de que cause un cortocircuito al estar activados todos los transistores MOSFET, debido a que la corriente generada por las CCM es pequeña del orden de microamperes.

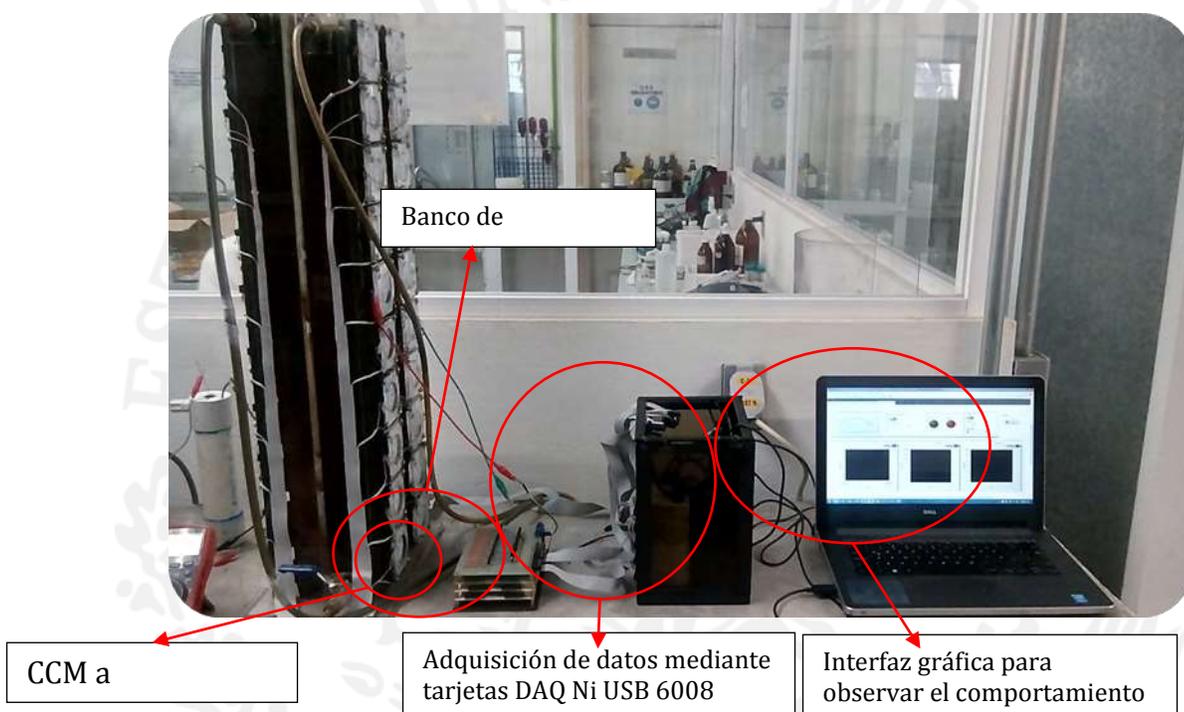


Figura 66. Sistema conectado para la realización de la prueba del banco de resistencia con la conexión en una CCM

En la Figura 67 se muestra la interfaz gráfica funcionando, donde se observa el comportamiento del voltaje a diferentes valores de resistencias propuestas por el usuario. Estas cargas resistivas fueron asignadas en intervalos de 1000Ω hasta lograr $39K\Omega$ cambiando cada 60 segundos.

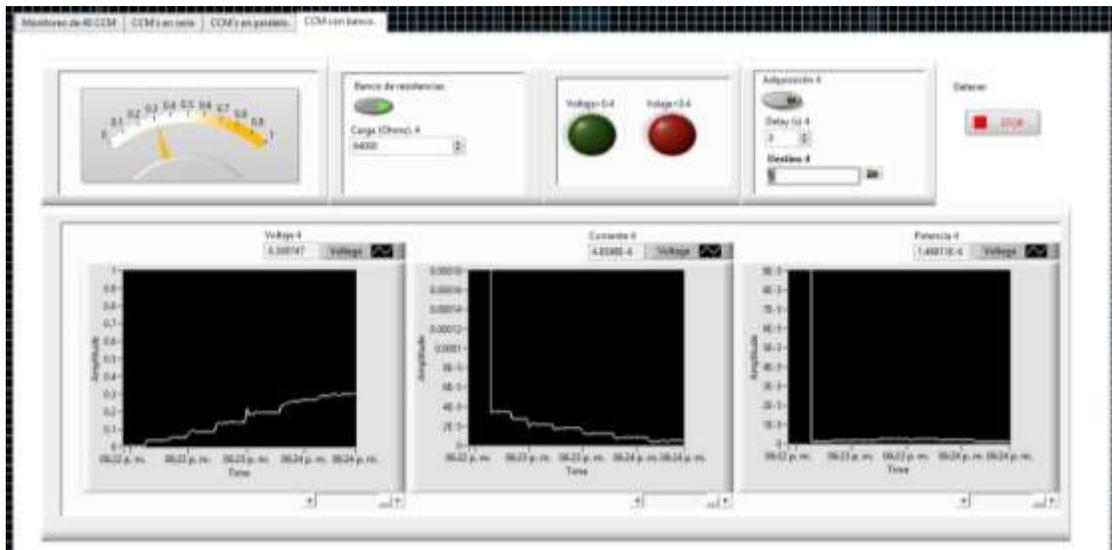


Figura 67. Interfaz funcionando en una sola CCM utilizando un banco de resistencias

En la Figura 68 se muestra el comportamiento del voltaje y corriente en la CCM a diferentes cargas resistivas programadas en el banco de resistencia.



Figura 68. Comportamiento del voltaje y corriente en una CCM a distintas cargas programadas en el banco de resistencias

A fin de comprobar la correcta asignación de cargas resistivas entre las terminales del ánodo y cátodo de la CCM mediante el banco de resistencias, se coloca una resistencia comercial de 39KΩ entre la terminales de la CCM y posteriormente se mide el voltaje en esta resistencia mediante el uso de un multímetro digital, la cual permite comparar el voltaje en la CCM conectada a una resistencia

comercial con la resistencia asignada por el banco de resistencias. En la Figura 69 se muestra el voltaje medido por el multímetro digital.



Figura 69. Lectura de voltaje en una resistencia comercial de $39\text{K}\Omega$ en lugar de la resistencia de $39\text{K}\Omega$ programada en el banco de resistencias

El voltaje medido por el multímetro digital mostrado en la Figura 69 es aproximado al voltaje de la carga resistiva de $39\text{K}\Omega$ asignada por el banco de resistencia, por lo tanto, se concluye que el sistema funciona correctamente. También, es importante resaltar que el error que existe entre ambas mediciones es debido a la resolución de la tarjeta de adquisición de datos, cuya resolución es mayor a la del multímetro digital y también por el consumo de voltaje entre las terminales entre drain y source de los transistores MOSFET.

Banco de Resistencias en CCM Conectadas en Serie

La validación experimental del banco de resistencias programable conectado al Stack de 40 CCM, donde cada CCM es conectada en serie se muestra en la Figura 70. En esta Figura 70 observamos la conexión del Stack de 40 CCM conectada a la tarjeta electrónica encargada de conectar a las 40 CCM en serie, luego conectada esta tarjeta electrónica al prototipo del banco de resistencias programables, misma que está conectada a la entrada analógica AI0 de la tarjeta de adquisición de datos DAQ1, quien se encuentra conectado a la computadora a través del puerto USB.

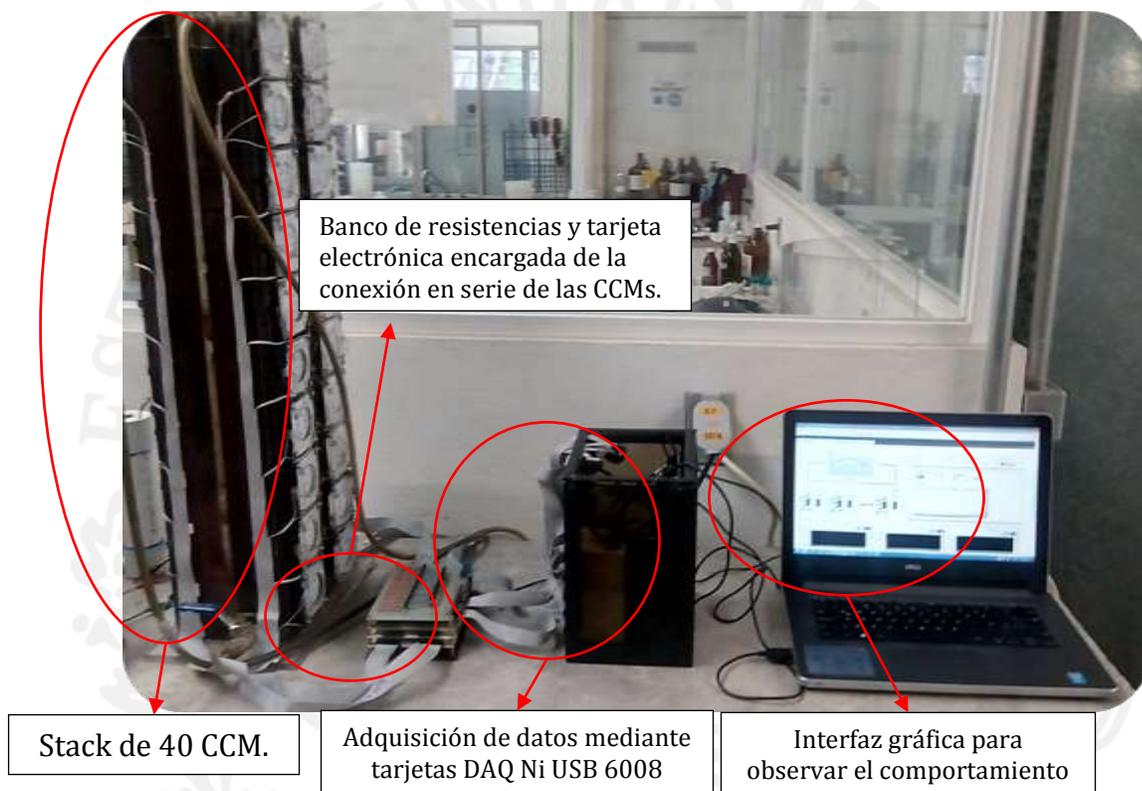


Figura 70. Sistema conectado para la realización de la prueba del banco de resistencia con la conexión en serie de las 40 CCM

La Figura 71 muestra la captura de pantalla de la interfaz gráfica durante la prueba del monitoreo de las CCM en serie a diferentes valores de cargas resistivas programadas en el banco de resistencias. Cada valor de carga resistiva en el banco de resistencias es cambiado cada 60 segundos iniciando con 1000 Ω y cambiando en intervalos de 1000 Ω hasta lograr 39K Ω .



Figura 71. Interfaz funcionando en las 40 CCM conectadas en serie utilizando banco de resistencias

En la Figura 72 se muestra el comportamiento del voltaje y corriente en la CCM a diferentes cargas resistivas asignadas mediante el banco de resistencias. Cada valor de carga resistiva se cambia cada minuto.

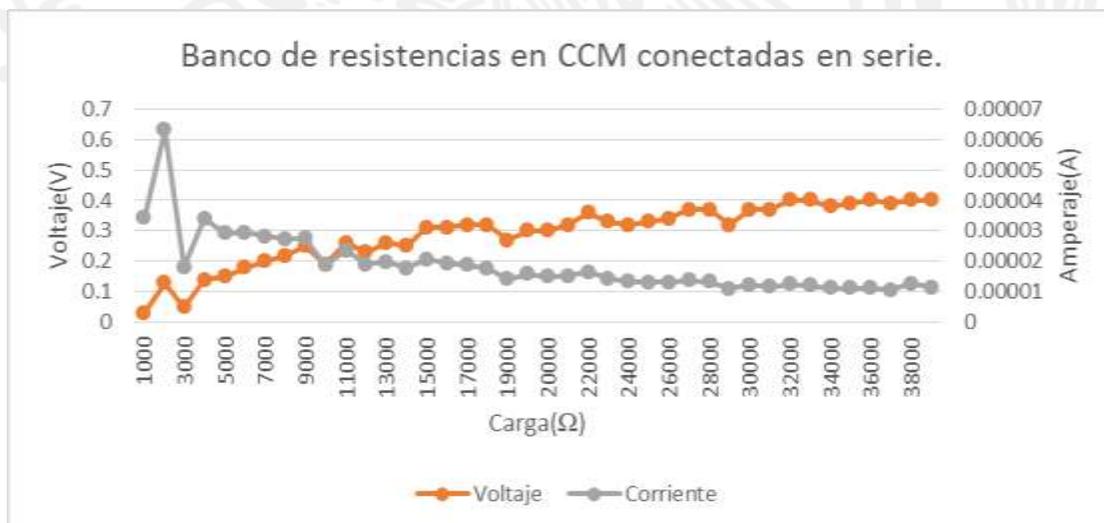


Figura 72. Comportamiento del voltaje y corriente en la conexión en serie de las 40 CCMs a distintas cargas asignadas por el banco de resistencias

La comparación de los resultados mostrados en la Figura 72 con el voltaje medido por un multímetro digital mostrado en la Figura 73 conectada a una carga comercial de 39000Ω , con las puntas de medición entre las terminales de ánodo y cátodo resultantes de la conexión en serie de las CCM, valida experimentalmente que el banco de resistencias funciona correctamente para este caso de pruebas.



Figura 73. Medición de voltaje en una resistencia comercial de $39K\Omega$ en lugar de la resistencia de $39K\Omega$ asignada por el banco de resistencias

Prueba del banco de resistencia en la CCM conectadas en paralelo

Con el propósito de comprobar que el sistema funciona cuando las CCM están conectadas en paralelo se conectaron las CCM a la tarjeta electrónica encargada de conectar las 40 CCM en paralelo. Esta tarjeta electrónica fue conectada al banco de resistencias programables, misma que se conectó a una de las entradas analógicas de las tarjetas de adquisición de datos y finalmente a las tarjetas de adquisición de datos conectadas a la PC mediante el puerto USB, tal como se observa en la Figura 74.

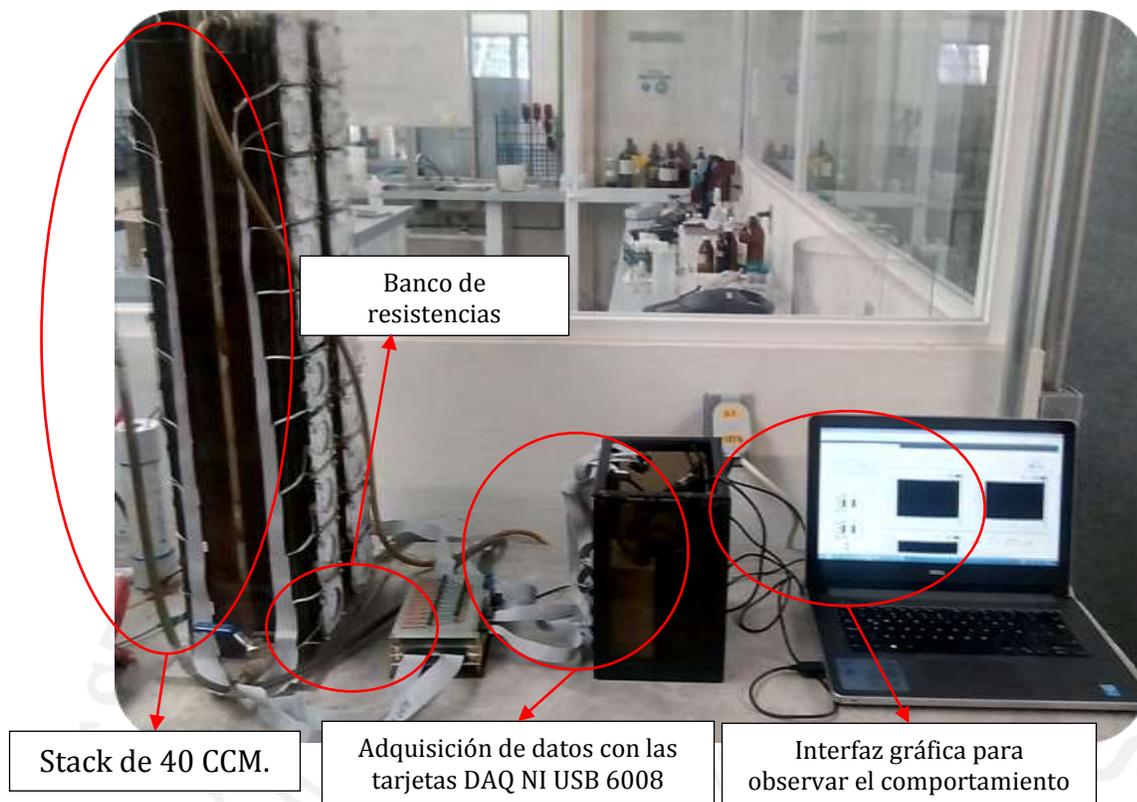


Figura 74. Sistema conectado para la realización de la prueba del banco de resistencia con la conexión en paralelo de las 40 CCM

En la Figura 75 se muestra la interfaz funcionando para este caso, donde se puede observar el comportamiento del voltaje a diferentes valores de resistencias entre las terminales de ánodo y cátodo resultantes de la conexión en paralelo de las CCM con las resistencias asignadas en el banco de resistencias. Los cambios de carga resistencia a la que se somete la conexión en paralelo se inicia con un valor de 1000Ω , que posterior se incrementa en intervalos de 1000Ω cada 60 segundos hasta lograr 39000Ω . El tiempo de cambio de una carga resistiva a otra es de 60 segundos para darle tiempo de estabilización en el voltaje de la CCM.

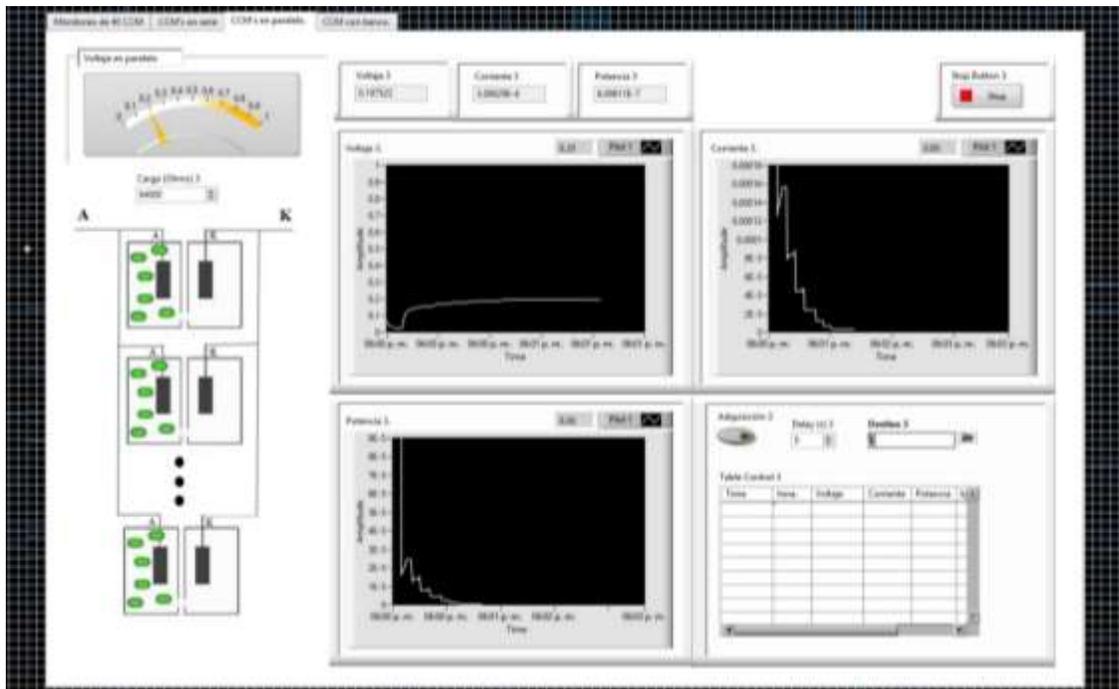


Figura 75. Interfaz gráfica funcionando con 40 CCM conectadas en paralelo utilizando banco de resistencias programables

En la Figura 76 se muestra el comportamiento del voltaje y corriente en la CCM a distintas cargas asignadas mediante el banco de resistencias, estas cargas fueron asignas de 1000Ω en 1000Ω comenzando de 1000Ω hasta $39K\Omega$. Cada carga se cambiaba cada minuto.

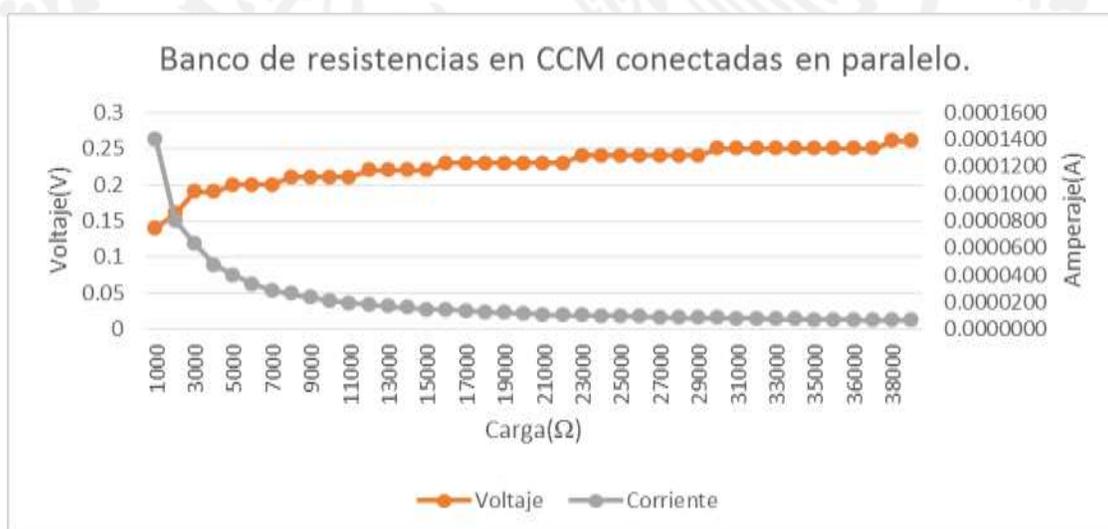


Figura 76. Comportamiento del voltaje y corriente en la conexión en paralelo de las 40 CCMs a distintas cargas asignadas por el banco de resistencias

Con los resultados mostrados en la Figura 76 se comparó el voltaje resultante al asignar una carga de 39000Ω mediante el banco de resistencias, con el voltaje medido por un multímetro digital mostrado en la Figura 77 con una carga comercial de 39000Ω colocada entre las terminales ánodo y cátodo.

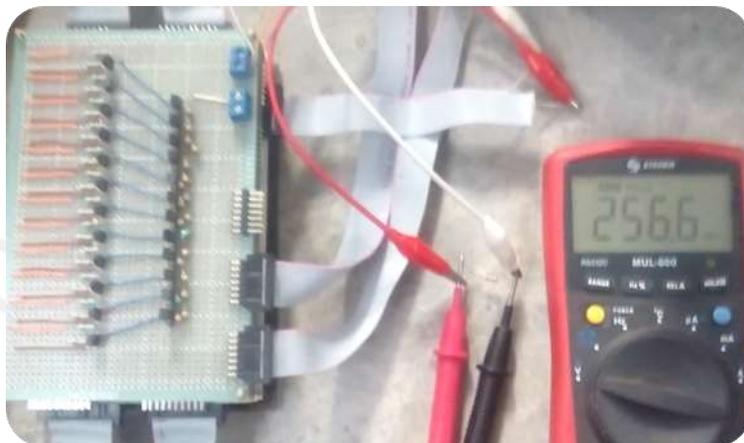


Figura 77. Medición de voltaje en una resistencia comercial de $39K\Omega$ en lugar de la resistencia de $39K\Omega$ asignada por el banco de resistencias

Prueba del monitoreo de las 40 CCM al mismo tiempo.

Las 40 CCM se conectaron al circuito encargado de guiar el voltaje hacia los puertos analógicos de las 5 tarjetas DAQ NI USB 6008, posteriormente el circuito fue conectado a las 40 entradas analógicas y finalmente el sistema de adquisición de datos, donde están las 5 tarjetas DAQ NI USB 6008 conectadas a la PC mediante el puerto USB, esto con el fin de validar la interfaz gráfica, tal como se muestra en la Figura 78.

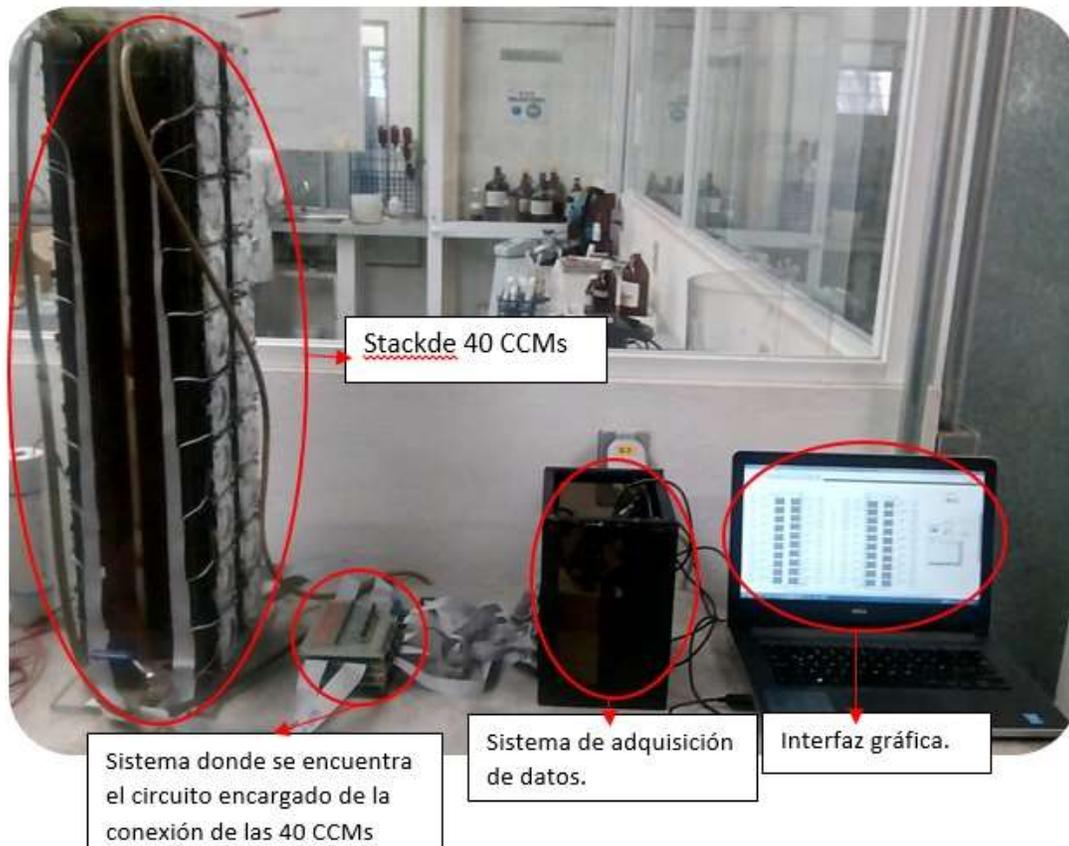


Figura 78. Conexión del sistema para la prueba de monitoreo de las 40 CCM al mismo tiempo

En la Figura 79 se muestra la interfaz gráfica funcionando. Se observa que el voltaje mostrado en la interfaz de cada CCM está dentro del rango de voltaje que generan las CCM, por lo tanto se concluye que el sistema es capaz de medir el voltaje de las 40 CCM en un mismo tiempo determinado.

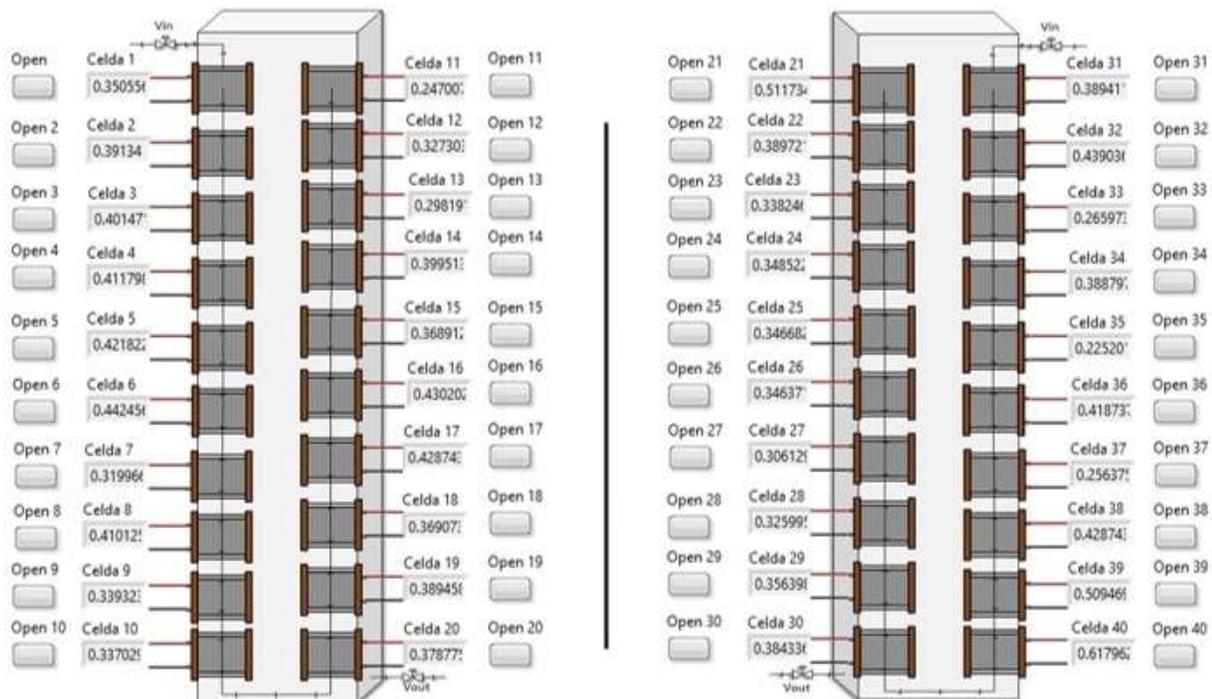


Figura 79. Interfaz funcionando para el monitoreo de las 40 CCM al mismo tiempo

Otro dispositivo electrónico similar al de stack de 40 CCMs fue colocado en el stack de 20 CCMs.