



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“Simulación CFD de compartimientos de una celda de electrodiálisis para aplicaciones de almacenamiento de energía”.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

MARTÍNEZ LÓPEZ JUAN CARLOS

ASESOR: Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez

COASESORA: Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**



ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE**

ATN: DRA. MARIA DEL CARMEN ALDERRAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Titulación
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis.**

Simulación CFD de los compartimientos de una celda de electrodiálisis para el almacenamiento de energía.

Que presenta el pasante: **Juan Carlos Martínez López**

Con número de cuenta: **416053711** para obtener el título de: **Ingeniero Químico.**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 01 de febrero de 2023.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez	
VOCAL	I.Q. Carlos Orozco Hernández	
SECRETARIO	I.A. Francisco Javier López Martínez	
1er. SUPLENTE	Dr. Rodolfo Gómez Balderas	
2do. SUPLENTE	I.Q. Elvia Mayen Santos	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

Ndi paa
Nio se kuanda
Tin lí jíí
Kuá nìo
Txa tíjna jin
Xhi nta
Xi jíí
Nga je tíí
Tue líí
Xron lí
Ndi nahí naá
Tíí xi chí con
Tanylí nga jsaíí
To ña ní
Nga kui to
Jmai jíí'
To kía ska jían ña
Ndí paa tíí kinde yoli'.

Agradecimientos.

Investigación financiada por el fondo mixto CONACyT-SENER Sustentabilidad Energética (actualmente Programa F003 CANACyT) bajo el proyecto número 292862 “Desarrollo de Tecnologías de Almacenamiento de Energía de Bajo Costo: Baterías de Flujo y Celdas de Combustible Alcalinas”.

Agradezco el apoyo recibido en el marco del proyecto CONACyT 292862.

Además, mi más preciado agradecimiento a la Facultad Estudios Superiores Cuautitlán UNAM, que recibió y formó a un foráneo oaxaqueño, el que salió de su estado natal en busca de cumplir su gran sueño de ser un puma y egresado de la máxima casa de estudios de México, el cual con todo lo aprendido y aplicado regresará para apoyar a su gente, trabajar duro para nuestro presente y mirar con esperanza hacia un futuro mejor.

Agradezco infinitamente a mis asesores de la tesis al Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez, así como a la Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez por haberme ayudado, enseñado y guiado en esta travesía para obtener mi título, también, a la persona que ha sido un pilar para mí en esta travesía y patoaventuras dentro y fuera de la universidad, que siempre hemos sido uña y muga desde que nos conocimos, quien me ayudó cuando estuve en problemas y me acompañó en los momentos más felices de la carrera, me refiero a su majestad la reina Lizbeth alias la gomas y carnicera de IQ, mi mejor amiga, que digo amiga, hermana, mi comadre, que siempre nos la pasamos en chisme y realizando nuestras actividades académicas, agradezco mucho al destino por haberte encontrado en estas tierras, del mismo modo, agradecer a todas las amistades que construí en todos mis años universitarios por haberme proporcionado su ayuda, comprensión, regaños, risas, etc., atesoro todos los recuerdos con cada uno de ustedes, mis queridos y raros ciudadanos.

En un especial y agradecimiento a mis señores padres Carmen y Santos por haberme apoyado en todo momento en esta aventura, por haberme dado las alas para cumplir mis sueños y mis metas a pesar de que al principio del camino fue difícil, pero se logró el cometido, sin ustedes no podría haber llegado tan lejos. Del mismo modo, agradecer a la familia que dejé cuando salí de mi pueblito siendo un muchito, y encontré años más tarde en la ciudad, cuando me aventuré para realizar mis estudios universitarios, a mi madrina Leticia y a mis primos Laly, Uli, Uri y mi tío Erick quienes me ayudaron a cumplir mi travesía en esta vasta ciudad.

Y, por último, a todas las personas que directamente y/o indirectamente me ayudaron a ver y soñar alto, en que puedo realizar todo lo que me proponga, a todos mis amigos del rancho, profesores, familia, que me aportaron un consejo, un granito de arena para construir mi camino.

ÍNDICE

Introducción	1
Objetivo General.....	2
Objetivos Particulares	2
Justificación	3
1. Antecedentes.....	4
1.1. Almacenamiento de energía.....	4
1.1.1. Almacenamiento eléctrico	4
1.1.2. Tecnologías para el almacenamiento de energía.	6
1.1.2.1. Almacenamiento hidroeléctrico por rebombeo	6
1.1.2.1.1. Ventaja/Desventaja.....	7
1.1.2.2. Baterías plomo-ácido.....	8
1.1.3.2.1. Ventaja/Desventajas	8
1.1.2.3. Baterías de Ion-Litio.....	9
1.1.2.3.1. Ventajas/Desventajas.....	11
1.1.2.4. Baterías de flujo redox de vanadio	14
1.1.2.4.1. Ventaja/Desventaja.....	16
1.1.2.5. Almacenamiento de energía con aire comprimido.....	16
1.1.2.5.1. Ventaja/Desventaja y ambiente	17
1.1.2.6. Supercondensadores	19
1.1.2.6.1. Ventajas/Desventajas y ambiente	21
1.1.2.7. Volantes de inercia	22
1.1.2.7.1. Ventaja/Desventaja y ambiente	22
1.2. Baterías de flujo ácido-base	23
1.2.1. Espaciadores de membrana	25
1.2.1.1. Criterios de mejora para la membrana.....	27
1.2.1.2. Conceptos teóricos en membranas.....	28

1.2.1.2.1. Resistencia de área en las membranas.....	28
1.2.1.2.2. Permselectividad	29
1.2.2. Eficiencia teórica de la batería de flujo ácido-base	29
1.3. Hidrodinámica.....	30
1.3.1. Ley de Darcy.....	30
1.3.2. Ecuación de Brinkman.....	30
1.4. Elementos sobre la distribución de potencial y de corriente.....	31
1.4.1. Distribución primaria	31
1.4.2. Distribución secundaria	31
1.4.3. Distribución terciaria	32
1.4.4. Equilibrio de Donnan.....	32
1.5. CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).....	32
2. Metodología.....	34
2.1. Sistema real	34
2.1.1 Datos técnicos generales de la celda FT-ED-100-3-10	34
2.2. Modelos en 3D	37
2.3. Estudio hidrodinámico	40
2.4. Estudio de distribuciones de corriente	42
3. Resultados y análisis.....	48
3.1. Estudio Hidrodinámico	48
3.1.1. Modelo en 3D de la celda FT-ED-100-3-10.....	48
3.1.2. Modelo en 3D de la malla de un espaciador de membrana ED-100-4ES	57
3.2. Estudio de Distribución de Corrientes	62
Conclusiones.....	67
Bibliografía	68
Abreviaturas.....	71
Apéndice	73

Introducción

Hoy en día, generar energía eléctrica a partir de combustibles fósiles genera problemas medioambientales, por lo que, una manera de producirla es mediante recursos que sean más amigables con el planeta. Estos recursos son proporcionados por fuentes naturales tales como el viento (energía eólica), el mar (mareomotriz), el sol (fotovoltaica), entre otros. Sin embargo, la energía eléctrica producida por estas fuentes depende de factores naturales, por lo que el suministro de energía eléctrica es interrumpido. Para resolver este problema, se necesita desarrollar sistemas robustos de almacenamiento de energía que permitan un suministro eléctrico estable con la calidad requerida. Los sistemas típicamente utilizados solo pueden almacenar una pequeña cantidad del total producido, además, existen pérdidas de energía al momento de utilizar los almacenadores. Por ello, se han realizado estudios para diseñar y construir almacenadores de energía más eficientes, seguros, económicos y menos contaminantes. Un sistema de almacenamiento con estas características es la batería de flujo ácido-base en donde se aprovechan las reacciones de disociación de agua y neutralización ácido-base en un dispositivo de electrodiálisis. El poder del gradiente de salinidad por electrodiálisis inversa es una tecnología para almacenar y generar energía eléctrica de la mezcla de soluciones de sal a diferentes concentraciones. Este sistema en particular permite el almacenamiento de energía eléctrica mediante las diferencias de potenciales químicos entre dos soluciones salinas que fluyen en canales alternos separados por membranas de intercambio iónico selectivo (IEM, por sus siglas en inglés). Una pila contiene varias unidades repetidas, cada uno consta de una membrana de intercambio catiónico (CEM por sus siglas en inglés), un compartimento alimentado por una solución de sal más concentrada, una membrana de intercambio aniónico (AEM por sus siglas en inglés) y un compartimento alimentado por una solución de sal más diluida. Los espaciadores se emplean generalmente para:

- Separar las membranas, creando así los canales y
- Promover la mezcla de los fluidos.

La diferencia de potencial químico entre las dos soluciones salinas genera un transporte de iones desde la solución concentrada hacia la diluida: los cationes se mueven selectivamente a través de los CEM y los aniones a través de los AEM, hacia el cátodo y ánodo respectivamente. En el siguiente trabajo se realizan estudios de hidrodinámica en una celda de electrodiálisis utilizada como batería de flujo ácido-base mediante la técnica de simulación numérica conocida como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés). El

propósito de estos estudios es conocer el comportamiento de los fluidos en la celda en operación y estimar la caída de presión y los coeficientes de transferencia de masa, como dos de los factores más importantes que impactan en la eficiencia de las baterías de flujo ácido-base. Se complementa el estudio de estos factores con el cálculo de la caída de potencial eléctrico para conocer las pérdidas de energía durante los procesos de carga y descarga de la batería. La solución numérica de las ecuaciones gobernantes se realiza con el programa Comsol Multiphysics en el cual se llevan a cabo las simulaciones del flujo de solución básica, ácida y salina en sus respectivos compartimentos de la celda. Las simulaciones CFD son importantes para visualizar el efecto del diseño de la celda y obtener una estimación de su desempeño. El diseño de la geometría de la celda se lleva a cabo con el programa SOLIDWORKS en el cual se hacen dibujos tridimensionales de la celda.

Objetivo General

Desarrollar modelos mediante la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) que permitan simular con realismo los comportamientos de una celda de electrodiálisis comercial, con el fin de analizar y comprender los factores que influyen en su desempeño.

Objetivos Particulares

- Generar un modelo geométrico detallado y preciso de la celda de electrodiálisis mediante el software SOLIDWORKS, con el fin de utilizarlo para la realización de simulaciones de CFD y así poder analizar el comportamiento hidrodinámico de la celda de electrodiálisis.
- Determinar las caídas de presión que se presentan en el modelo de la celda de electrodiálisis a través de la técnica de CFD utilizando el modelo de Brinkman, bajo diferentes flujos volumétricos, con el fin de evaluar la resistencia hidráulica de la celda de electrodiálisis.
- Predecir la caída de presión que se produce en el modelo del espaciador entretejido a través de la técnica de CFD utilizando el modelo de flujo en medios porosos, con el fin de observar la caída presión a través del espaciador de membrana.
- Analizar los patrones de flujo que se producen en las mallas entretejidas del espaciador de membrana, a través de la técnica de CFD, con el fin de observar cómo los fluidos se distribuyen a través del espaciador de membrana.

- Estimar los coeficientes de transferencia de masa en relación con el tamaño del elemento del mallado, mediante la utilización de la técnica de CFD, con el fin de observar si existe independencia entre ellos.
- Examinar las resistencias óhmicas que se presentan en el modelo de la celda de electrodiálisis, a través de la técnica CFD utilizando el modelo de distribución de corrientes secundarias, con el fin de evaluar el potencial eléctrico a través de la celda de electrodiálisis.
- Identificar las diferentes tecnologías de almacenamiento eléctrico disponibles en el mercado, tales como baterías, supercondensadores, entre otros, con el fin de evaluar sus ventajas y desventajas.

Justificación

El uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica tiene la desventaja de que la producción de energía es intermitente, ya que esta depende en gran medida de factores meteorológicos. Los almacenadores de energía comerciales tienen como desventaja la utilización de recursos tales como los iones de Litio y Vanadio son sus altos costos debido a que no son muy escasos en la naturaleza además de su alta demanda en el mercado, y aplicarlos a gran escala para el almacenamiento de energía eléctrica obtenida de las energías limpias, además, otro inconveniente, sobre todo las baterías de vanadio es su alta toxicidad. Por lo tanto, utilizar materiales menos contaminantes para el almacenamiento de energía eléctrica además de que estos sean de costos más asequibles es de suma importancia.

La mejora del diseño de las baterías de flujo comerciales de manera experimental involucra tanto el gasto de capital, así como de tiempo, por lo que, el uso de nuevas técnicas informáticas, como lo es la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), permiten desarrollar simulaciones de diseños realistas que den una solución eficiente a esta problemática. Estos diseños pueden ser posteriormente probados a nivel laboratorio para aplicarlos a gran escala.

1. Antecedentes

1.1. Almacenamiento de energía

1.1.1. Almacenamiento eléctrico

El almacenamiento eléctrico es una tecnología clave para habilitar la siguiente fase de transición energética, impulsado por el despliegue a gran escala de fuentes de energía renovables variables (VRES) como energía solar y eólica. Los retos que surgen en la integración de fuentes energéticas intermitentes como lo son; mantener el balance de producción, la demanda en tiempo real, la confiabilidad y calidad del suministro energético mientras se aprovecha con eficiencia la sobreproducción de electricidad en horizontes temporales diferentes; sin embargo, también debe preverse la diversificación de las opciones tecnológicas para proporcionar los servicios requeridos en las operaciones de la red eléctrica para su operación óptima y garantizar los niveles de eficiencia, confiabilidad, continuidad y seguridad del sistema eléctrico [1].

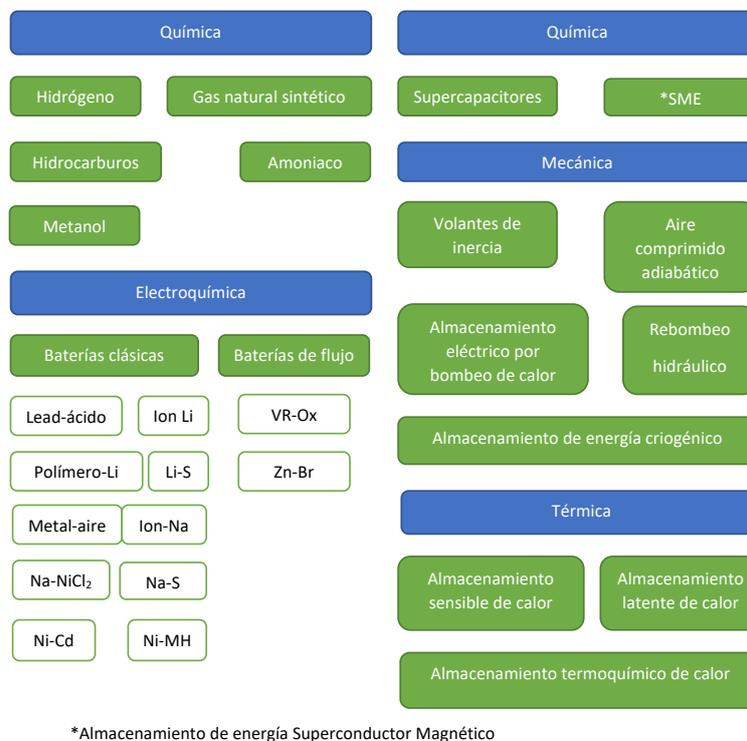


Figura 1.1. Clasificación de los sistemas de almacenamiento energético eléctrico de acuerdo con la forma de energía. Fuente: Adaptado de [2].

En 2017, de acuerdo con International Renewable Energy Agency (IRENA por sus siglas en inglés), se ha calculado que existían 4.67 TWh de almacenamiento eléctrico; se contempla que

la cantidad total de almacenamiento eléctrico en todo el mundo se triplique de 2017 a 2030, con una reducción previsible de la parte de energía hidroeléctrica por bombeo a favor de Sistemas de Almacenamiento Energético con Baterías (BESS por sus siglas en inglés), cuya capacidad se contempla que aumente 17 veces impulsada por el crecimiento de la escala de los servicios y aplicaciones locales [3].

Mientras que los sistemas de almacenamiento energético eléctrico se identifican por el hecho de que pueden utilizarse para intercambiar potencia con la red, las tecnologías de almacenamiento energético se clasifican por lo general de acuerdo con su tipo, dependiendo de la forma de energía que se almacena definitivamente como se aprecia en la figura 1.1 [1]. Según datos del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), registrados en enero de 2019, la distribución de potencia de almacenamiento instalada de cada tecnología fue: hidroeléctrico por bombeo 171.35 GW (96.01%); electroquímico (con baterías) 2.76 GW (1.55%); almacenamiento mecánico 1.34 GW (0.75%) (ver figura 1.2) [4].

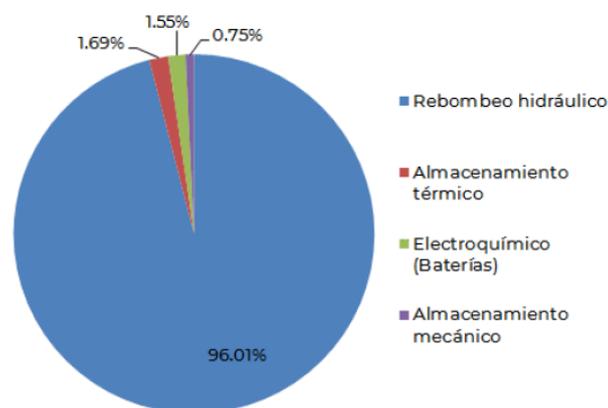


Figura 1.2. Capacidad eléctrica mundial de almacenamiento de energía instalada y en funcionamiento (GW) por clasificación de la tecnología en 2019. Fuente [4].

El almacenamiento hidroeléctrico por rebombeo (PHS por sus siglas en inglés) es una tecnología de almacenamiento altamente madura. Sus requisitos principales y riesgo tecnológico son relativamente bajos. El almacenamiento energético de aire comprimido (CAES por sus siglas en inglés), las baterías de sulfuro de sodio, el volante (baja velocidad), la sal fundida y los iones de litio están en la etapa de tecnología de despliegue, pero sus requisitos de capital y riesgo tecnológico son altos. Por último, las baterías de flujo y supercondensadores están en la etapa tecnológica demostrativa. Sus requisitos principales y riesgo tecnológico también son altos [1].

1.1.2. Tecnologías para el almacenamiento de energía.

Existen varias tecnologías para el almacenamiento de energía, las distintas tecnologías se diferencian por los distintos niveles de rendimiento de la batería. Para medir el rendimiento de una batería, la variable más básica se enfoca en establecer la densidad de energía (Wh/kg) y la densidad de potencia pico (W/kg). Este enfoque es adecuado para mostrar el rendimiento relativo de diversas baterías. Los principales tipos de baterías en uso en el mercado se basan en plomo-ácido, níquel metal hidratado o ion-litio [5].

En la tabla 1.1 se identifican los tipos de almacenamiento de energía más relevantes en actual uso y sus características primordiales:

Tabla 1.1. Tipos de baterías y acumuladores de energía y características. Fuente: [5].

Tipo de batería	Eficiencia energética (%)	Densidad de energía (Wh/kg)	Densidad de potencia (W/kg)	Ciclos de vida	Nivel de autodescarga
Ácido-Plomo	70-80	20-35	25	200-2000	Bajo
Ni-Cd	60-90	40-60	140-180	500-2000	Bajo
Ni-MH	50-80	60-80	220	<3000	Alto
Ion-Litio	70-85	100-200	360	500-2000	Medio
Litio polímero	70	200	250-1000	>1200	Medio
NaS	70	120	120	2000	-
CAES	40-50	10-30	-	>20 años	Poco significativo
Bombeo hidráulico – PHS	65-80	0.3	-	>20 años	Poco significativo
VRB	80	25	80-150	>16000	Poco significativo

1.1.2.1. Almacenamiento hidroeléctrico por rebombeo

El almacenamiento hidroeléctrico por bombeo (PHS), es una tecnología de almacenamiento energético eléctrica madura y usada ampliamente y funciona con un principio simple: convertir la energía eléctrica en energía potencial elevando el agua a un depósito de nivel más alto. Para operar de esta manera, la energía eléctrica es usada por el sistema de bombeo; por lo tanto, se

busca operar periodos de baja demanda o cuando la electricidad tiene menor costo. Subsecuentemente, la energía eléctrica se genera liberando el agua que se almacenó en el depósito superior por medio de turbinas. Esto ocurre en la misma forma que una central hidroeléctrica convencional. En general, la electricidad se genera cuando la demanda es alta y, por lo tanto, los precios del mercado son altos. Cuando el agua viaja por medio del circuito del depósito menor hacia el superior, entonces se completa un ciclo de almacenamiento. El PHS representa actualmente más de 96% de la capacidad de almacenamiento global instalada y más de 99% en términos de energía eléctrica almacenada [3]. El PHS puede balancear la variación de la energía eólica y solar proporcionando energía confiable cumpliendo la demanda durante cambios sostenidos y cada vez más prolongado, mientras evita la necesidad de “acortamiento” durante el periodo de suministro de exceso. Por lo tanto, el PHS puede seguir sustentando el desarrollo de energía renovable variable y hace que la operación de la red eléctrica sea flexible. El principio mecánico del sistema PHS funciona con energía gravitacional potencial. Cuando hay exceso de potencia en la red, el agua en el depósito inferior se bombea hacia el superior. Cuando la red necesita energía, el agua en el depósito superior se deja caer hacia una turbina hidroeléctrica (HT) para producir electricidad. La producción energética se da porque hay una diferencia de presión positiva entre el depósito superior y el inferior.

1.1.2.1.1. Ventaja/Desventaja

El almacenamiento de energía, en especial en la forma de PHS, tiene un papel crucial en la habilitación de los niveles más altos de penetración solar y eólica variable, añadiendo servicios de flexibilidad de rango amplio sobre escalas de tiempos múltiples. El nivel de generación libre de carbono necesario para cumplir con las metas climáticas ambiciosas significa que se requerirá que el PHS trabaje junto con otras tecnologías de almacenamiento energético, en especial baterías, además de otros recursos de flexibilidad de red. Al almacenar electricidad, las instalaciones de PHS pueden proteger el sistema eléctrico de los cortes eléctricos. En conjunto con la electrónica avanzada, los sistemas de PHS también pueden reducir distorsiones armónicas y eliminar las caídas y subidas de voltaje. Es importante recordar la definición de armónico como un componente sinusoidal de una ola que es un múltiplo integral de frecuencia fundamental [6] que, para el caso particular de México, es de 60 Hertz.

De todos los tipos de generadores de potencia, los generadores de carga pico por lo general producen electricidad a costos mucho mayores que los de carga base. El PHS proporciona una alternativa a la potencia pico almacenando la electricidad de carga base barata y liberándola

durante horas pico. Las instalaciones de PHS proporcionan grandes capacidades eléctricas, con costos operativos y de mantenimiento bajos y alta confiabilidad.

Hay varias desventajas para la tecnología de PHS. El despliegue del PHS requiere un terreno adecuado con una diferencia importante de elevación entre los dos depósitos y una cantidad importante de recursos hídricos. Las instalaciones típicas de PHS tienen una altura hidráulica de 200-300 m con depósitos de volumen en el orden de millones de m³. La construcción de una estación de PHS por lo general tarda muchos años, en ocasiones más de una década, como ocurre con proyectos a gran escala que requiere obras civiles grandes, aunque el costo de operación y mantenimiento es muy bajo, existe una inversión de capital inicial grande en construcción civil que solo puede recuperarse por décadas.

1.1.2.2. Baterías plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido las inventó en 1859 [7] Gaston Planté [8]. El concepto de la placa empastada lo propuso Camille Fauré [8]. El plomo-ácido es la batería recargable de uso más extendido [9]. Las baterías de plomo-ácido son una forma de almacenar energía eléctrica a escala local [10] y de servicio público. Se les considera como una tecnología electroquímica [11] y operan a temperatura ambiente [12]. Pueden ser de tipo inundada o regulada con válvula sellada (VRLA). Esta tecnología puede reciclarse en su totalidad [13] y son las baterías más comunes en el mercado [14]. Las baterías de plomo-ácido se usan cuando costo, confiabilidad y tolerancia al abuso son cruciales [7].

1.1.3.2.1. Ventaja/Desventajas

Las ventajas y desventajas de las baterías de plomo-ácido se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Ventaja y desventajas de baterías de ácido de plomo. Fuente: [15].

Factor	Ventaja	Desventaja
Electrodo positivo	<ul style="list-style-type: none"> • La batería se mantiene en el voltaje de carga cuando se sumerge en ácido sulfúrico. • Alta resistencia a la corrosión cuando el material del electrodo positivo es plomo-antimonio, plomo-calcio-estaño, plomo-estaño o plomo puro. • Los parámetros de diseño de la red proporcionan metal de electrodos suficientes para la vida de la batería. • El voltaje se configura para alcanzar una batería de carga total sin una pérdida excesiva de agua y la corrosión se mantiene a un nivel para alcanzar la vida del diseño. 	<ul style="list-style-type: none"> • La corrosión de la red se acelera con voltajes de mayor carga y es sensible a la temperatura. • La resistencia de la red aumenta durante la vida de la batería, acelerándose hacia el final de la vida. • Cuando envejece la batería, los cambios en el volumen del material activo y el volumen del producto de la corrosión ponen esfuerzos en las redes. • Ocurre un corto circuito cuando las redes crecen para tener contacto con el grupo negativo.
Sulfatación	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato de plomo fácil de recuperar por recarga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de capacidad con el tiempo y ciclación. La sulfatación aumentará cuando la batería quede en un estado de descarga parcial o total por periodos extendidos.
Ablandado de activo del material	<ul style="list-style-type: none"> • Para placas positivas puede reducirse usando pastas de densidad mayor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser más rápido si la batería se cicla con descarga profunda.
Producción de hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Si usa ventilas de retardante de flama no tendrá ignición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ignición externa por hidrógeno.
Características técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Costo bajo. • Madurez técnica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad energética. • Densidad de potencia baja. • Ciclo de vida corto.

1.1.2.3. Baterías de Ion-Litio

Una batería de iones de litio (LIB) (ver figura 1.3) puede almacenar energía eléctrica como energía química y las LIBs tanto recargables como no recargables, están disponibles en el mercado. Las LIBs no recargables tienen una vida útil larga y tasas de autodescarga bajas y por

lo general se fabrican como celdas de botón pequeño como, por ejemplo, electrónica de consumidores portátiles, relojes pulsera y ayudas auditivas. Las LIBs recargables se aplican en todo tipo de electrónica de consumo y actualmente entran en mercados nuevos como lo son vehículos y el almacenamiento eléctrico a gran escala [10]. Las LIBs recargables pueden usarse para suministrar servicios a nivel del sistema como lo es una variedad de operaciones, incluyendo la regulación de frecuencia, seguimiento de carga, soporte de voltaje, cambio temporal, firmado de capacidad de renovables, entre otros, además del almacenamiento eléctrico local en hogares individuales. Un LIB contiene dos electrodos porosos separados de una membrana porosa. Un electrolito líquido llena los poros en los electrodos y la membrana. Por convención, los electrodos negativos y positivos (ánodo, cátodo). Las LIBs más comunes contienen un ánodo grafitico (microperlas de mesocarbono, MCMB, un cátodo (óxido metálico de litio o fosfato, por ej., LiCoO_2) y el electrolito que consta de una solución de una sal de litio (por ej., LiPF_6) en un solvente orgánico mixto (por ejemplo, la mezcla de carbonato-dimetil con carbonato de etileno, EC-DMC) incrustado en un fieltro separado [16].

Las baterías de iones de litio (Li^+) entre el ánodo y cátodo, que están hechas de compuestos de intercalación de litio. Los materiales de electrodos tanto positivos como negativos pueden reaccionar con los iones Li^+ . Como los iones Li^+ se mueven de un portador a otro al cargarse y descargarse.

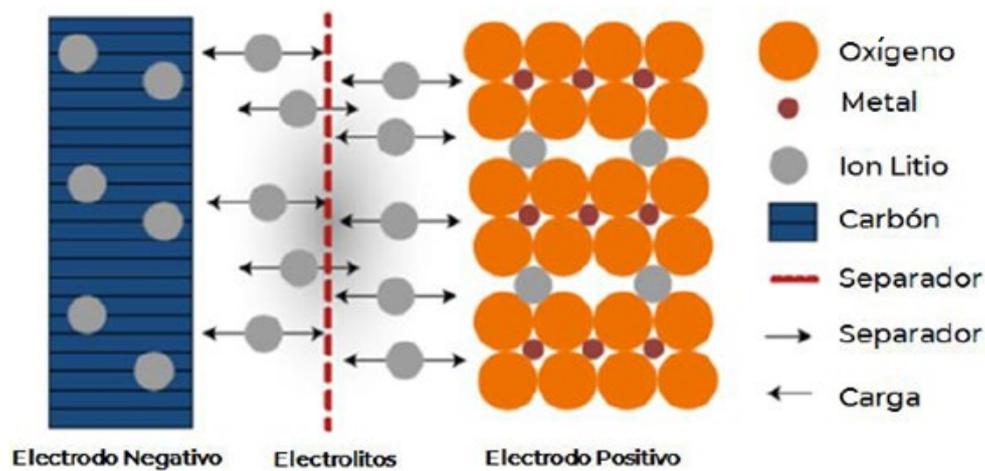


Figura 1.3. Principio de operación de un cátodo de óxido metálico de litio y celda de iones de litio de ánodos basada en carbono. Fuente: [3].

Cuando los dos electrodos se conectan vía un circuito externo, la batería comienza a descargarse. Durante el proceso de descarga, los electrones fluyen vía el circuito externo desde el electrodo negativo al positivo. Al mismo tiempo, se extraen los iones intercalados en el ánodo de grafito (Li_xC_6), trasladados a través del electrolito y se intercalan finalmente en el

material hospedante en el cátodo (óxido metálico de litio, aquí $\text{Li}(1-x)\text{CoO}_2$). El enlace químico entre el material del cátodo y el litio es más fuerte que entre el material del ánodo y el litio. Así se reduce la energía química almacenada en la batería. El excedente de energía se libera como potencial electroquímico durante la descarga. Lo cual impulsa un electrón para cada ion de litio movido del ánodo al cátodo, por medio del circuito externo. Por lo contrario, durante el proceso de carga, la energía eléctrica se suministra para impulsar iones de litio del cátodo al ánodo, aumentando la energía del sistema [14].

Las baterías de iones de litio tienen la ventaja de energía específica alta, además de energía alta y densidad de potencia altas en relación con otras tecnologías de batería. También exhiben una capacidad de descarga de potencia alta (más de 90%), una vida relativamente alta y una tasa de autodescarga baja [3]. Los problemas relacionados con la estabilidad térmica y seguridad de las baterías de iones de litio se relacionan con las reacciones químicas que liberan oxígeno cuando se sobrecalientan los cátodos de óxido metálico de litio. Esta “ruptura térmica” puede generar fugas y llenar de humo la ventila del gas y puede conducir a que la celda se incendie. Mientras que existe un riesgo inherente de las baterías de iones de litio, puede dispararse por influencias externas ajenas al diseño tales como condiciones térmicas externas, sobrecarga o carga de corriente alta. Por lo tanto, los sistemas de almacenamiento de energía de baterías de iones de litio contienen gestión térmica integral y procesos de monitoreo y se hace un enorme esfuerzo en mejorarlos [3].

1.1.2.3.1. Ventajas/Desventajas

Dentro de la última década, el interés comercial del almacenamiento eléctrico utilizando sistemas de LIB ha aumentado dramáticamente. El volumen de producción sigue limitado y existe un potencial prometedor para las reducciones de costos por medio del escalamiento. La tecnología goza de independencia y requiere un mantenimiento mínimo después de la instalación inicial [10]. Los contenedores vienen en tamaños estándar. Para los sistemas pequeños, esto tiene impacto en el CAPEX del sistema de LIB, aunque, cuando el tamaño del sistema excede varias unidades de contenedores, el precio puede considerarse como lineal. Por ejemplo, en comparación con la tecnología de celdas de combustible, el CAPEX por capacidad de almacenamiento es relativamente alto. Esto se debe a que la electricidad se almacena en los electrodos de baterías mientras que para las celdas de combustible la electricidad se almacena como combustible separado. Entonces, agregar cada vez más capacidad energética a un sistema de baterías se considera como algo relativamente barato. El CAPEX específico de energía relativamente alta, combinado con la autodescarga gradual y las pérdidas parasíticas en BOP

hace de la tecnología menos atractiva para el almacenamiento a largo plazo más allá de algunos días [10]. Debido a la gran variación entre las químicas posibles, estas también diferencian ciertas ventajas con respecto a su composición (ver tabla 1.3).

Tabla 1.3. Comparación de ventajas y desventajas de la química de los iones de litio. Fuente: [1].

Material activo clave	NMC (Níquel-Manganeso-Óxido de Cobalto)	LMO (Litio-Óxido de Manganeso)	NCA (Litio-Níquel-Cobalto-Aluminio)	LFP (Litio-Fosfato de hierro)	LTO (Titanio de litio)
Ventajas	<p>Puede personalizarse para potencia o energía alta.</p> <p>Perfil térmico estable.</p> <p>Puede operar en voltajes altos.</p>	<p>Costo bajo debido a la abundancia de manganeso.</p> <p>Muy buena estabilidad térmica.</p> <p>Muy buena capacidad de potencia.</p>	<p>Muy buena energía y capacidad de potencia.</p> <p>Vida de ciclo buena en sistemas más recientes.</p> <p>Vida del calendario de almacenamiento prolongado.</p>	<p>Muy buena estabilidad térmica.</p> <p>Vida de ciclo muy buena.</p> <p>Capacidad de potencia muy buena.</p> <p>Costos bajos.</p>	<p>Muy buena estabilidad térmica.</p> <p>Tiempo de vida prolongado.</p> <p>Capacidad de descarga de tasa alta.</p> <p>No hay problema de interfase del electrolito sólido.</p>
Desventajas	<p>Problemas de patentes en algunos países.</p> <p>El cobalto se relaciona con cuestiones éticas y de precio/abundancia.</p> <p>El contenido de Co bajo y contenido de Ni alto presenta inestabilidad.</p>	<p>Vida de ciclo moderada, insuficiente para algunas aplicaciones.</p> <p>Desempeño energético bajo.</p>	<p>Estabilidad térmica de estado cargado moderado que puede reducir la seguridad.</p> <p>La capacidad puede esfumarse a una temperatura de 4074 °C.</p> <p>El cobalto se relaciona con cuestiones éticas y de precio/abundancia.</p>	<p>Densidad energética menor debido al voltaje celular menor.</p>	<p>Costo alto de titanio.</p> <p>Voltaje celular reducido.</p> <p>Baja densidad energética.</p>

1.1.2.4. Baterías de flujo redox de vanadio

A principios de la década de los 70's, la NASA desarrolló la batería de flujo redox de vanadio (VRFB) para las misiones espaciales a largo plazo [17]. Se considera como un sistema electroquímico, una batería secundaria y aplica a escala de la red y niveles locales del usuario [14]; [18]. El componente básico de una batería de VRFB aparece en la figura 1.4.

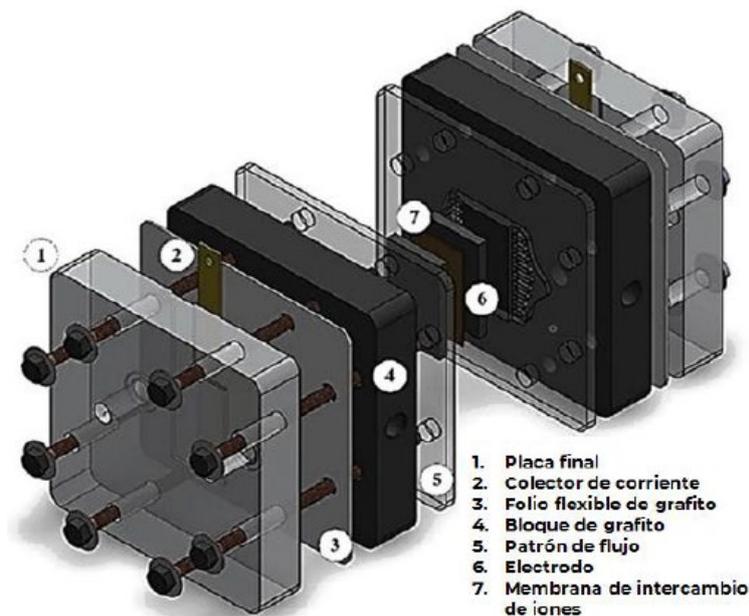


Figura 1.4. Componentes de la celda de batería de VRF única. Fuente: [18].

El electrolito se produce disolviendo el vanadil sulfato en ácido sulfúrico, que es corrosivo para los metales durante la operación con baterías de VRFB [18]. Se almacena en dos tanques separados y se bombea en las celdas en donde ocurre la reacción de oxidación [17]. El anolito está en un tanque y el catolito en otro. Durante la operación de carga, el anolito se oxida, el catolito se reduce y ambos electrolitos se almacenan en tanques diferentes. El proceso de descarga es cuando el anolito oxidado se reduce, el catolito reducido se oxida y si se almacenan en los mismos tanques que al principio.

La membrana puede ser una membrana de intercambio iónico. Su rol principal es evitar un corto circuito entre el electrodo y la transferencia de protones o sulfatos para balancear la carga. Es importante tener una buena estabilidad bajo un ambiente altamente oxidante, baja permeabilidad de iones vanadio y baja resistividad [18].

Una batería de VRFB es un sistema de almacenamiento energético que se usa en un servicio público eléctrico a gran escala [18]. Pero VRFB también es capaz del almacenamiento estacional. La tecnología de batería de VRFB se usa con más frecuencia para [17]:

- Aplicaciones de almacenamiento energético eléctrico en la industria

- Sistemas fijos y grandes de almacenamiento eléctrico
- Desplazamiento temporal de pico

La batería de VRF consta de una pila de celdas de reacción, al menos un tanque de almacenamiento lleno de electrolito (anolito) que consta de reactivos en solución para el electrodo de batería negativo (ánodo), al menos un tanque de almacenamiento lleno con electrolito (catolito), tubería que conecta los tanques de almacenamiento con la pila de celdas de reacción y bombas mecánicas para circular los electrolitos en el sistema [14] (ver Figura 1.5).

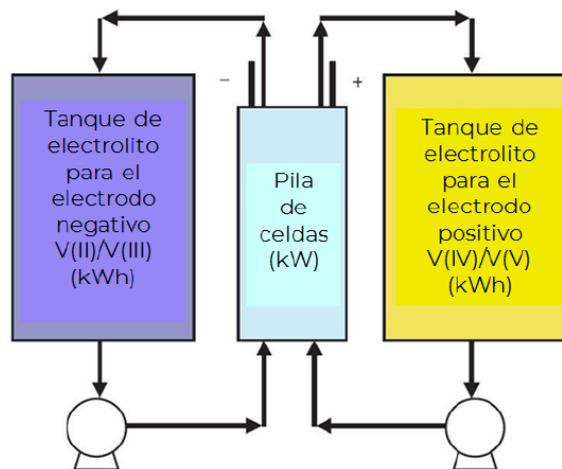


Figura 1.5. Concepto de flujo redox. Fuente: [19].

1.1.2.4.1. Ventaja/Desventaja

Hay varias ventajas y desventajas de la tecnología de la batería de VRF. La tabla 1.4 resume esta ventajas y desventajas.

Tabla 1.4. Ventaja y desventaja de la batería de VRF. Fuente: [20].

Ventaja	Desventaja
Niveles menores de evolución del gas durante ciclos de carga rápida en relación con otras baterías de flujo	La carga de la batería se agotó y el área de la superficie del electrodo se redujo a partir de la evolución del gas
No hay contaminación de la solución con difusión de iones de vanadio en la membrana	La evolución del gas puede dañar y reducir la eficiencia de la celda
Eficiencia (70 a 90 %)	Propiedades oxidativas altas de V^{5+}
Potencial para el reciclaje de electrolitos entre aplicaciones	Regulación térmica (10 a 40 °C)
La regeneración del cruce de iones ocurre por medio de la operación normal de la batería	

1.1.2.5. Almacenamiento de energía con aire comprimido

Un almacenamiento de Energía con Aire Comprimido (CAES por sus siglas en inglés) almacena energía cinética en forma de aire comprimido en un reservorio aumentado la presión con un compresor de gas. Los reservorios de aire de gran volumen por lo general son cavernas, las cuales son esenciales para centrales de CAES a gran escala. Para encontrar cavernas de almacenamiento adecuadas para el aire comprimido, se pueden usar depósitos de sal natural viejos o yacimientos de gas agotados. Los costos son significativamente menores en donde esté disponible una caverna existente y adecuada. Construir una caverna especializada para retener el aire comprimido aumenta dramáticamente los costos del almacenamiento energético [3].

El calor generado durante la compresión puede almacenarse para aumentar la eficiencia de ciclo completo. Durante la descarga, el aire de la caverna o contenedor presurizado se libera e impulsa el expansor de un expansor turbo, de pistones o radial. Antes de la expansión, el aire comprimido debe precalentarse para evitar el congelamiento del expansor. En caso de que el calor de la compresión se use para precalentar el aire antes de la expansión, el proceso es adiabático (A-CAES por sus siglas en inglés). Si la entrada térmica externa se usa para precalentar el aire por combustión, el proceso es diabático (D-CAE por sus siglas en inglés)

[2]. Para compensar la caída de la temperatura, la tecnología CAES se usa en combinación con la combustión en turbina de gas. Por lo tanto, el CO₂ se libera en el CAES tradicional [10].

Los sistemas de almacenamiento adiabático energético por aire comprimido (AA-CAES, a veces llamado almacenamiento adiabático avanzado de energía por aire comprimido, AA-CAES) son un concepto desarrollado más recientemente que aborda esta cuestión. En el concepto de A-CAES, el calor que por lo general se liberará a la atmósfera durante la fase de compresión se almacena en un sistema de almacenamiento energético térmico (TES). Este calor se añade de regreso por medio de intercambiadores térmicos al aire en expansión que se libera desde la reserva durante la operación del modo de expansión. Esto habilita que los sistemas de A-CAES conviertan la energía en el aire comprimido sin involucrar un proceso de combustión, el proceso es adiabático (D-CAE por sus siglas en inglés S) [2].

En contraste con esto, los sistemas de CAES convencionales son diabáticos debido al intercambio de calor entre el sistema de almacenamiento y el medio ambiente. La Figura 1.6 hace una comparación esquemática de estos dos sistemas.

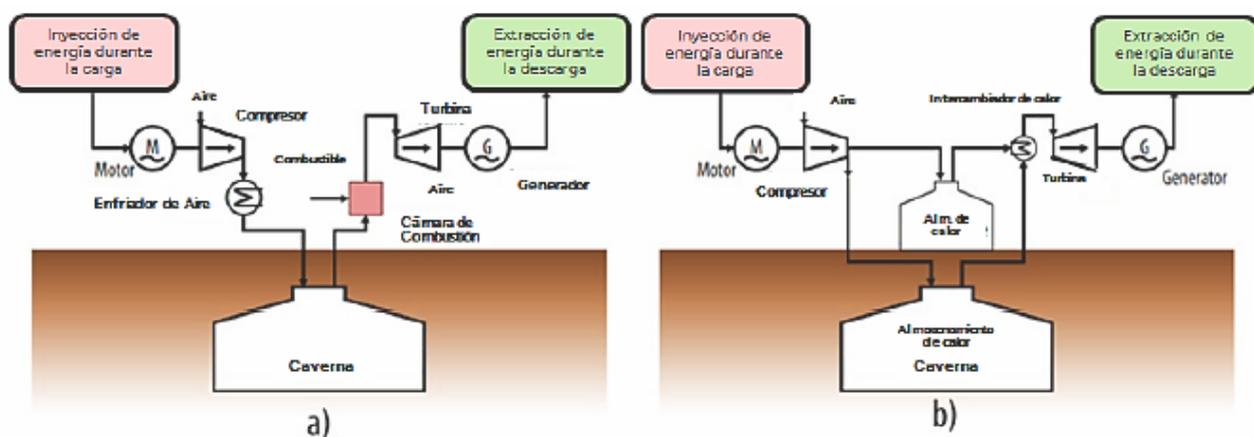


Figura 1.6. Diagrama esquemático de los sistemas de CAES diabáticos (a) y adiabáticos (b). Fuente: [3].

Por lo general, el sistema CAES se usa para almacenamiento a gran escala con capacidades de ciclaje frecuentes porque es una tecnología efectiva en costos, madura y confiable [15].

1.1.2.5.1. Ventaja/Desventaja y ambiente

Hay usualmente dos sistemas de CAES, llamados central Huntorf (Alemania, 1978) y McIntosh (EE. UU., 1991). En consecuencia, las ventajas y desventajas son acerca de estas plantas. Ventajas [10]; [15]:

- La central de CAES puede proporcionar almacenamiento energético importante (por lo general alrededor de algunos GWh por central) en costos relativamente bajos (aproximadamente en 2033 en USD) \$1/kWh a \$40/kWh. La central tiene flexibilidad

prácticamente ilimitada para proporcionar gestión de carga relevante al nivel de servicio público o regional.

- Los expansores tienen un rango grande y pueden usarse con facilidad de manera modular. Las unidades turboexpansoras comerciales varían en tamaño de 10-20 MWca (Rolls Royce-Allison) a 135 MWca (Dresser-Rand) a 300-400 MWac (Alstom).
- La tecnología de CAES puede optimizarse con facilidad para condiciones y economía de las condiciones del sitio.
- Las centrales de CAES son capaces de realizar arranque de emergencia. Tanto las centrales Huntorf como McIntosh tienen una capacidad de arranque de emergencia que se requiere ocasionalmente [21].
- Las centrales de CAES tienen un tiempo de arranque rápido. Si una central CAES se opera como una reserva centrífuga caliente, puede alcanzar capacidad máxima dentro de algunos minutos.
- Los tiempos de arranque de emergencia a partir de condiciones frías en las centrales Huntorf y McIntosh son de aproximadamente 5 minutos. Sus tiempos de arranque normal son de aproximadamente 10 a 20 minutos.
- Las centrales de CAES tienen una velocidad de rampa de aproximadamente 30% de la carga máxima por minuto.
- Una central de CAES puede y de hecho opera como condensador síncrono cuando se abren ambos embragues (desconectar el motogenerador del tren del compresor y el tren expansor) y el motogenerador se sincroniza a la red. La potencia reactiva puede inyectarse y retirarse de la red modulando los voltajes del excitador. Tanto la central Huntorf como McIntosh se usan de este modo. Como esta operación no requiere el uso de aire almacenado, el operador de la central puede elegir operar la central en este modo por tanto tiempo como sea necesario.
- El CAES puede tener en potencia una capacidad de almacenamiento de energía alta si una caverna con un volumen de gas grande está disponible.
- El CAES es una tecnología con madurez técnica. Principalmente, usa un compresor y tecnología de turbina.

Desventajas [10]:

- Para el CAES tradicional, el uso de gas natural implica emisiones de CO₂.

- La ubicación geográfica se limita a lugares en donde la presión alta del aire puede almacenarse en cantidades suficientes. Varias formaciones geológicas subterráneas son adecuadas, pero la restricción pone limitaciones a dónde puede almacenarse el CAES.
- Fuga de aire en las paredes de las cavernas.
- En México, las cuevas por lo general son áreas difíciles de acceder y lejanas de centros de demanda.
- Se requieren algunas precauciones de seguridad para usar sistemas con presión de gas demasiado alta.
- La eficiencia es variable en cada CAES debido a que depende de la ubicación, el tamaño de la cueva y el terreno.

Los impactos ambientales principales por operar una central de CAES, con excepción de la impronta superficial se relacionan con el uso de la energía fósil en la fase de expansión. La preparación de nuevas cavernas de sal se asocia con inquietudes ambientales, porque los metales pesados se disuelven juntos con la sal puesto que la caverna se mina con soluciones [10]. También se consideran algunos impactos menores para el paisaje.

1.1.2.6. Supercondensadores

Los supercondensadores son un tipo de dispositivo de almacenamiento de energía que tiene velocidad alta de carga y descarga, una alta densidad de potencia y una vida útil en ciclos prolongada. Los supercondensadores usan materiales de electrodos de área superficial alta y dieléctrica delgada. Se les considera como un dispositivo de almacenamiento energético y se llaman condensadores electroquímicos y ultracondensadores [22]. Los elementos de un supercondensador son un electrodo positivo, material dieléctrico, electrodo negativo, voltaje y resistencia de carga (Figura 1.7). El almacenamiento energético ocurre cuando el voltaje se aplica al sistema, en consecuencia, las cargas positivas se acumulan en la superficie de cada electrodo. El material dieléctrico que separa estas cargas genera un campo eléctrico que permite que los supercondensadores almacenen energía [22].

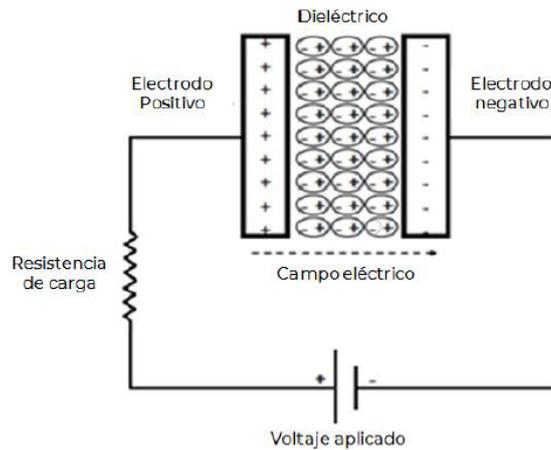


Figura 1.7. Diagrama esquemático del condensador convencional. Fuente: [22].

Cuando se descarga un supercondensador, la energía se almacena en el material dieléctrico en un campo electrostático. Su voltaje operativo máximo depende de las características de degradación del material dieléctrico. Este mecanismo es altamente reversible, por lo tanto, también se conocen los condensadores convencionales y electroquímicos (EC) y se conocen también como “supercondensadores” o “ultracondensadores” que almacenan carga eléctrica en cada capa eléctrica doble en la interfase entre el electrodo del carbono de área superficial alta y un electrolito líquido, el cual puede cargarse y descargarse miles de veces. El área superficial del electrodo determina la capacitancia y, por lo tanto, la capacidad de almacenamiento energético del dispositivo. La cantidad de energía que almacena un supercondensador es muy grande en comparación con un condensador estándar porque el área superficial es enorme que generan los electrodos de carbono poroso y la separación de la carga es muy pequeña generada en la capa doble. Los condensadores son adecuados para almacenar cantidades pequeñas de energía eléctrica y conducir un voltaje variante; tienen una densidad de potencia mayor y tiempo de carga más corto en comparación con las baterías convencionales. Sin embargo, tienen capacidad energética limitada, densidad energética relativamente baja y disipación energética alta debido a las pérdidas de autodescarga altas. De acuerdo con estas características, los condensadores pueden usarse para algunas aplicaciones de calidad de potencia, como lo son corrección de potencia de alto voltaje, alisamiento de la salida de los suministros de potencia, puenteo y recuperación de energía en sistemas de tránsito masivo [9].

Los supercondensadores pueden clasificarse como asimétricos, simétricos e híbridos [23]. El fabricante de supercondensadores Maxwell Technologies menciona que sus aplicaciones principales están en el control de frecuencia de área, reserva rodante, estabilidad de línea de transmisión, sistema de control de inclinación de la turbina de viento y suministro eléctrico interrumpible (UPS) industrial [24].

1.1.2.6.1. *Ventajas/Desventajas y ambiente*

Ventajas [10]; [15]:

- Los supercondensadores son atractivos para una variedad de aplicaciones en redes eléctricas: tiempo de respuesta rápida en milisegundos, eficiencia de ciclo completo alto (más de 95%), alta densidad de potencia y tiempos de vida calendario y de ciclo prolongados.
- Los supercondensadores son interesantes por su capacidad para almacenar potencia muy alta en un pequeño volumen y peso con alta estabilidad por un periodo prolongado.
- Densidad de potencia alta.

Desventajas [2]; [15]:

- La densidad energética baja y costos de capital altos (calculado en el rango de 1,100-2,000 €/kW, incluyendo costos de instalación) limitan el uso de supercondensadores en redes eléctricas a aplicaciones de potencia alta (hasta 10 MW) con un mayor interés a partir de los servicios eléctricos públicos, los cuales miran hacia estos dispositivos para la mejoría y confiabilidad del desempeño en una variedad de áreas, con niveles de potencia altos y con distribuciones de voltajes por arriba de los 600 V.
- Tiene posibles implicaciones ambientales tales como contaminación del suelo para el proceso de síntesis.
- Interdependencia de las celdas.
- El ciclo de vida es dependiente de desbalances de voltaje entre celdas y de umbrales máximos de voltaje.
- Problemas de seguridad relacionados a químicos y voltaje.

Como con las baterías, los supercondensadores presentan niveles de voltaje potencialmente peligrosos los cuales, para aplicaciones de la red, representan un riesgo incremental muy pequeño. Los electrolitos acuosos pueden contener materiales peligrosos, incluyendo hidróxido de potasio y cianuro de metilo. Adicionalmente, determinados electrolitos son inflamables, como es el acetonitrilo, que libera cianuro de hidrógeno cuando se quema. Esto puede proporcionar un riesgo limitado en aplicaciones de la red, en donde hay un riesgo menor de liberación y la expectativa es que la instalación y el mantenimiento los realizaría solo personal capacitado. Como con las baterías, los supercondensadores deben desecharse o reciclarse adecuadamente al final de la vida. La mayoría de los materiales en los supercondensadores incluyen materiales comunes como lo son carbono, níquel, acero, aluminio y una variedad de

plásticos. Los supercondensadores asimétricos avanzados usarían varios materiales que se usan en baterías avanzadas, como litio y vanadio. Es difícil calcular los requisitos totales del material, pero es improbable que sean mayores que para las baterías y este requisito debe colocarse en el contexto de que las aplicaciones objetivo para condensadores son las que tienen capacidad energética real limitada [2].

1.1.2.7. Volantes de inercia

Se considera que los volantes de inercia son una tecnología con la característica principal de densidad de potencia y energía altas [15] y la posibilidad de desacoplar la potencia y energía en la etapa de diseño. Adicionalmente, puede instalarse en cualquier ubicación y alta potencia, pero por lo general con energía baja en comparación con algunos otros dispositivos de almacenamiento energético, son otras características importantes [2].

Los volantes almacenan energía como energía cinética rotatoria acelerando y desacelerando una masa rotatoria. Los sistemas de almacenamiento de volantes de inercia (FESS por sus siglas en inglés) consta una masa rotatoria alrededor de un eje fijo (es decir, el rotor del volante) que se conecta a una máquina eléctrica reversible que actúa como motor durante la carga que jala electricidad desde la red para hacer girar el volante a velocidad operativa y como generador durante la descarga cuando el volante que ya gira entrega torque al generador para proporcionar potencia a la red o carga externa [3].

1.1.2.7.1. Ventaja/Desventaja y ambiente

Las ventajas son:

- Capacidades de carga rápida
- Densidad de almacenamiento de energía alta
- El ciclo de vida prolongado y la ausencia de degradación de la capacidad (tiempo de vida no afectado en gran manera por el número de ciclos de carga/descargas)
- Densidad de potencia alta, altamente independiente del nivel de energía almacenado
- Mantenimiento bajo requerido
- El estado de carga es fácil de determinar (por medio de velocidad rotatoria)
- Amplia experiencia operativa (debido al uso en motores y otras aplicaciones industriales)
- Ausencia de contaminación
- Requisito de área pequeña

Las desventajas son:

- Baja densidad energética en comparación con sistemas de baterías
- Pérdidas en inactividad muy altas (velocidades de autodescarga)
- Necesidad de mantenimiento de cojinetes o potencia para cojinetes magnéticos energéticos
- Las cargas dinámicas o choques externos inesperados pueden conducir a fallas
- Problemas de ruido cuando se opera el volante
- Problemas de seguridad
- Costo alto por unidad de energía almacenada

Esta tecnología tiene un impacto ambiental muy bajo debido a los materiales y principios mecánicos usados [25].

1.2. Baterías de flujo ácido-base

La batería de flujo de gradiente de concentración (CGFB por sus siglas en inglés) es una batería electrodiálítica innovadora que utiliza soluciones de NaCl inocuas a diferentes salinidades como vehículos de almacenamiento procesados en unidades provistas de membranas de intercambio iónico monopolar. Los gradientes de salinidad se generan durante la fase de carga por electrodiálisis (ED por sus siglas en inglés), y se utilizan, mediante una mezcla controlada (transporte selectivo a través de las membranas) durante la fase de descarga por electrodiálisis inversa (RED por sus siglas en inglés), para devolver la energía eléctrica [26].

La densidad de energía puede mejorarse agregando una membrana bipolar (BPM por sus siglas en inglés), lo que permite el almacenamiento de energía en forma de soluciones ácidas, básicas y salinas (es decir, gradiente de pH y salinidad). Este sistema, llamado batería de flujo ácido/base (AB-FB por sus siglas en inglés), podría representar una forma innovadora, segura y sostenible de almacenar energía con alto rendimiento. El AB-FB es una batería electrodiálítica basada en la disociación reversible del agua. En particular, el proceso de electrodiálisis de membrana bipolar (BMED por sus siglas en inglés) utiliza energía eléctrica para producir soluciones ácidas y alcalinas que luego explotan en el proceso inverso, es decir, la electrodiálisis de membrana bipolar inversa (BMRED) [26].

El proceso BMED tiene una multitud de aplicaciones potenciales para la producción/regeneración de soluciones ácido/base. El BPM está formado por una capa de intercambio catiónico y una capa de intercambio aniónico, que promueven catalíticamente la disociación del agua en la capa de intercambio bajo el efecto de un campo eléctrico, liberando protones y iones hidroxilo. La pila BMED es una de las unidades de reacción del AB-FB [26].

Una batería contiene varias unidades repetitivas, cada uno consta de una membrana de intercambio catiónico (CEM por sus siglas en inglés), una membrana de intercambio aniónico (AEM por sus siglas en inglés) [27] y un BPM separados por espaciadores de red (malla entretejida) [26].

Los espaciadores se emplean generalmente para [27]:

- I) Separar las membranas, creando así los canales, por donde fluyen las soluciones de electrolitos (es decir, ácido, base y sal).
- II) Promover la mezcla de fluidos

Durante la fase de carga (BMED), la disociación del agua ocurre dentro del BPM, mientras que una durante la fase de descarga (BMRED) tiene lugar la reacción de neutralización, como se muestra en la figura 1.8 [26].

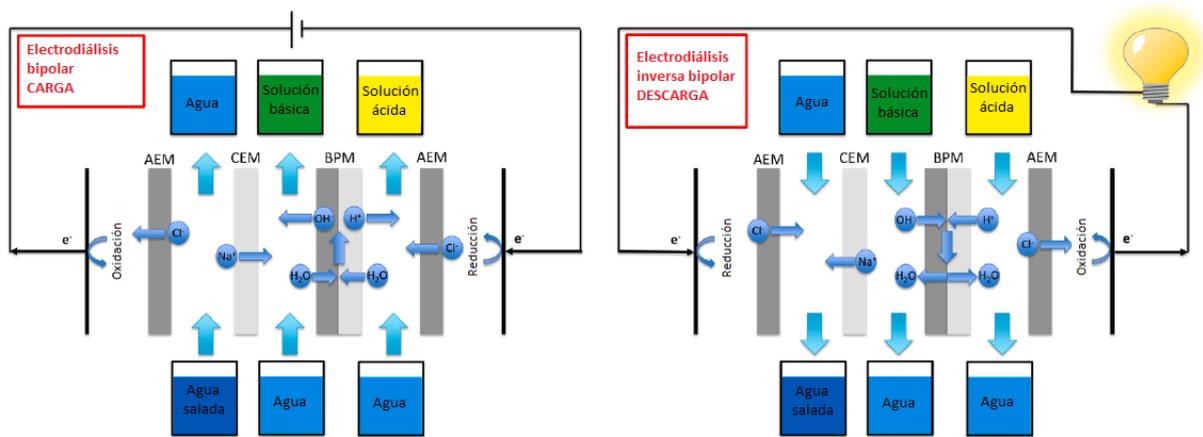


Figura 1.8. Carga a) y descarga b) funcionamiento de la batería de flujo ácido/base. Fuente: [26].

La diferencia de potencial químico entre las dos soluciones salinas genera un transporte de iones desde la solución concentrada hacia la diluida en cada par de celdas: los cationes se mueven selectivamente a través de los CEM y los aniones a través de los AEM, hacia el cátodo y el ánodo, respectivamente. En los electrodos, el transporte iónico se convierte mediante reacciones redox en una corriente de electrones que suministra una carga externa. La continuidad del potencial electroquímico a través del sistema hace que la diferencia de potencial químico genere una diferencia de potencial eléctrico a través de cada membrana. La suma de los voltajes generados en todas las membranas es la diferencia general de potencial eléctrico disponible en los electrodos (voltaje de circuito abierto) [27].

Muchos factores afectan el desempeño de este proceso [27]:

- Propiedades de componentes como membranas
- Espaciadores
- Sistemas electródicos

- Geometría de la pila
- Condiciones de funcionamiento
- Propiedades de alimentación

La dinámica de fluidos influye en cantidades cruciales que afectan el rendimiento del proceso, es decir, la caída de presión y la polarización de concentración. Es bien sabido que los fenómenos de polarización afectan en la eficiencia de los procesos de separación de membranas al reducir la fuerza impulsora teórica: el flujo de masa a través de las membranas de intercambio iónico, acompañado por una diferencia entre la movilidad de los iones en la membrana y las fases de la solución, da lugar a gradientes de concentración en la capa límite entre la superficie de la membrana y la masa bien mezclada. En la electrodiálisis inversa, los fenómenos de polarización de la concentración dan como resultado un aumento de la concentración de la sal en la superficie de la membrana en el canal diluido y una disminución de la concentración de sal en la superficie de la membrana en el canal concentrado. Como consecuencia, la diferencia de concentración en las interfases membrana-solución se vuelve más pequeña que la diferencia de concentración entre las soluciones en el seno del líquido, la fuerza electromotriz resultante se vuelve menor que el valor teórico y se obtiene un voltaje más bajo sobre la pila [27].

Las caídas de los potenciales debidas a los efectos de la capa límite generalmente se dividen por la corriente eléctrica para obtener una “resistencia no óhmica” que se puede comparar con la resistencia óhmica correspondiente dentro del canal [27].

El aumento de la densidad de corriente con el objetivo de mejorar las densidades de potencia conduce a un efecto más fuerte de las resistencias no óhmicas en el rendimiento del proceso. Según Vermaas et al., la resistencia no óhmica debe dividirse en dos contribuciones diferentes, una relacionada con el fenómeno de polarización de concentración, el cual puede reducirse aumentando la velocidad del fluido y, por lo tanto, la eficacia del mezclado [27].

La polarización de concentración puede afectar considerablemente el potencial de membrana real, reduciendo así la potencia bruta producida; pero la magnitud de la polarización de concentración en la capa límite y su relevancia para el rendimiento del proceso dependen del caudal y la concentración de la solución de alimentación y de la geometría de la celda y el espaciador [27].

1.2.1. Espaciadores de membrana

La fuerza impulsora para la mezcla es el cambio en la energía libre de Gibbs que se puede convertir en electricidad a través del transporte de iones directo a través de membranas

selectivas de iones. Cuando se considera que todas las corrientes de agua de los ríos se descargan en el mar, el potencial global de la potencia del gradiente de salinidad es enorme, con una potencia estimada de 2.1-2.6 TW. Por lo tanto, la importancia de las tecnologías que pueden recolectar de manera eficiente la energía del gradiente de salinidad está creciendo rápidamente [28].

Anteriormente se han propuesto varias formas de generar energía a partir de gradientes de salinidad, como la ósmosis retardada por presión (PRO por sus siglas en inglés) y la electrodiálisis inversa (RED por sus siglas en inglés). PRO usa un flujo de fluido inducido que ocurre cuando dos soluciones de diferentes concentraciones se ponen en contacto a través de una barrera (es decir, una membrana) que es permeable al agua solamente, pero impermeable a los iones. Por otro lado, RED utiliza un flujo de iones que se induce cuando el agua de mar y el agua dulce se ponen en contacto a través de membranas selectiva de iones. Estudios recientes han concluido que RED es más apropiado para su uso con agua de mar y agua de río, mientras que PRO es más favorable para la generación de energía a partir de salmueras [28].

Una batería RED típica consta de una serie de membranas de intercambio aniónico y membranas de intercambio catiónico alternas. Los espaciadores entre las membranas separan las mismas, formando compartimentos estrechos por los que el agua fluye, a continuación, los iones se transportan desde el lado concentrado al diluido, promovidos por el gradiente de salinidad. Dado que las membranas son selectivas solo para tipos específicos de iones (es decir, las membranas de intercambio de cationes permiten el paso de cationes y las membranas de intercambio de aniones permiten el paso de aniones), los cationes migran a un lado y los aniones migran al otro lado, lo que resulta en una diferencia de potencial. La electroneutralidad de las soluciones en los compartimentos de electrodos se mantiene mediante reacciones redox en los electrodos. Los electrones se transfieren de ánodo a cátodo a través de un circuito eléctrico externo, y esta corriente se puede utilizar para alimentar un consumidor de energía externo [28].

En RED y ED convencionales, se utilizan espaciadores no conductores para separar las membranas entre sí para permitir que el líquido fluya entre ellas. Estos espaciadores cubren parte del área de la membrana conductora, lo que da como resultado un área de membrana más pequeña disponible para el transporte de iones y una mayor resistencia eléctrica, el llamado efecto de sombra espaciadora. Además, los espaciadores suelen tener estructuras tejidas o no tejidas que están formadas por hilos (donde se unen los filamentos espaciadores), lo que provoca un flujo tortuoso que da como resultado una fricción hidráulica adicional. Además,

este flujo no deseado permite el ensuciamiento de los espaciadores, que es el problema más común en muchos procesos de membrana [28].

Para los espaciadores con filamentos perpendiculares, es decir, Fumatech (A), Deukum (D) y el espaciador ideal (B), ver figura 1.9, la dirección del flujo es paralela a un filamento o biseca el ángulo formado por los filamentos; para el espaciador DelStar Naltex (C) la dirección del flujo biseca cualquiera de los ángulos formados por los filamentos. Por conveniencia, en lo sucesivo, los casos de prueba estudiados se indicarán con una letra seguida de un número; la letra identifica el espaciador (A, B, C o D) mientras que el número especifica el ángulo de incidencia del flujo. En la proximidad de los puntos de contacto entre filamentos, puede observarse una compenetración (diseño superpuesto) o una compresión (diseño tejido) en los filamentos. De manera similar, ocurren problemas de compresión en las áreas de contacto entre el espaciador y las membranas [27].

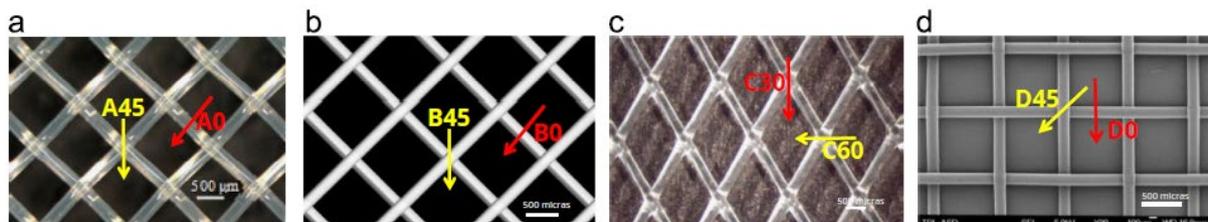


Figura 1.9. Espaciadores comerciales suministrados por A) Fumatech, C) Delstar (Naltex) y D) Deukum. B) es un espaciador ideal estudiado con fines de comparación que no existe físicamente. Las flechas indican las diferentes direcciones de flujo con respecto al espaciador que se investigaron. Fuente: [27].

1.2.1.1. Criterios de mejora para la membrana

Uno de los remedios para reducir la resistencia en la membrana es utilizar membranas microestructuradas (también llamadas membranas perfiladas u onduladas), que integran la funcionalidad de membrana y espaciador. Tales membranas proporcionan canales para que el agua de alimentación fluya a través y al mismo tiempo mantiene las membranas separadas en la pila. Debido a su carácter totalmente conductor, la resistencia eléctrica en la pila se reduce significativamente y la fricción hidráulica permanente baja debido a la geometría de canal abierto [28]. Las membranas perfiladas también reducen significativamente la fricción hidráulica. Por lo tanto, el uso de dichas membranas se ha convertido en un requisito previo para obtener un alto rendimiento en RED [28].

Las membranas microestructuradas se pueden producir mediante diferentes técnicas, como el calandrado (prensado con rodillo) de una película termoplástica de intercambio iónico entre rodillos ondulados a temperatura elevada, prensado en caliente de un polímero termoplástico que contiene grupos funcionales adecuados, y vertiendo una solución de un polímero de

intercambio iónico en un molde seguido de la evaporación del solvente. El prensado en caliente y el calandrado suelen ser ventajosos para fabricar membranas estructuradas en ambos lados, pero solo son aplicables para termoplásticos. La mayoría de los problemas en el prensado en caliente (a veces denominado estampado en caliente) ocurren durante la liberación de la película de la membrana del molde, generalmente relacionados con la rotura o deformación de las microestructuras. Los problemas de desprendimiento se pueden reducir cuando el molde tiene paredes laterales ligeramente inclinadas o cuando se utilizan revestimientos anti-adhesivos que facilitan el desprendimiento de la película del molde. Las dimensiones del molde también influyen. Además, las propiedades electroquímicas no siempre se conservan durante el prensado en caliente; estudios previos demostraron que la resistencia eléctrica aumenta y la permeabilidad selectiva puede disminuir cuando se presionan en caliente las membranas heterogéneas [28]. Para superar estos inconvenientes, se propone el uso de membranas fundidas para preparar membranas de intercambio aniónico homogéneas microestructuradas. Este método proporciona más libertad para separar una variedad de membranas poliméricas homogéneas densas con varias estructuras [28].

La geometría de las estructuras y las dimensiones de las características de las membranas son críticas, ya que tienen un impacto directo en la mezcla de los flujos y las resistencias de la capa límite, pero también en la fricción hidráulica y el consumo de energía de las bombas. La relación entre el ancho del canal y la cresta para el flujo de agua es un parámetro importante y caracteriza las membranas estructuradas. Este parámetro proporciona información sobre la proporción de región conductora ocupada por las estructuras y el volumen del espacio disponible para el transporte por agua. También está relacionado con la cantidad de fricción hidráulica que se experimenta [28].

1.2.1.2. Conceptos teóricos en membranas

1.2.1.2.1. Resistencia de área en las membranas

La resistencia del área (R) es la resistencia eléctrica de la membrana. Es un parámetro importante que determina el desempeño de generación de energía en RED. Desde el punto de vista de la ingeniería, la unidad de resistencia de la membrana se denomina $\Omega \text{ cm}^2$ o $\Omega \text{ m}^2$. Por lo general, depende de la capacidad de intercambio iónico y la movilidad de los iones dentro de la matriz de la membrana. Además, se ve afectado por la temperatura.

1.2.1.2.2. Permselectividad

La Permselectividad de las membranas se define como el flujo de un componente específico en relación con el flujo de masa a través de la membrana bajo una fuerza impulsora dada. La permselectividad de una membrana de intercambio iónico es una medida de qué tan bien la membrana discrimina entre aniones (por ejemplo, cloro; Cl^-) y cationes (por ejemplo, sodio; Na^+).

1.2.2. Eficiencia teórica de la batería de flujo ácido-base

Teóricamente, puede almacenarse una densidad de energía de aproximadamente 11 kWh/m^3 en soluciones ácidas y alcalinas de 1 M, aunque una densidad de energía medida de 2.9 kWh/m^3 ha sido reportada por Culcasi [26].

Van Egmond et al., midieron una densidad de potencia de 3.7 W/m^2 por membrana y una eficiencia de ciclo de carga y descarga de hasta el 13.5%, con una densidad de energía de hasta 2.9 Wh/kg , por lo que, las eficiencias culómbicas fueron moderadas (13-27%), principalmente debido al transporte no deseado de protones y iones hidroxilo, lo que provocó una pérdida de energía de aprox. 50%. Además, una alta resistencia interna provocó bajas eficiencias de voltaje, aprox. 50%. Curiosamente, durante la fase de descarga, la densidad de corriente se limitó a 15 A/m^2 por problemas de delaminación, debido a una tasa de recombinación de protones y iones hidroxilo mayor que la difusión del agua producida. Para mejorar la densidad de potencia y la eficiencia del proceso, se necesitan membranas adecuadas hechas especialmente para esta aplicación [26].

Además, el rendimiento de AB-FB podría mejorarse teóricamente mediante el uso de concentraciones de ácido/base más altas (1 M era el máximo estándar utilizado hasta ahora), por lo que se requieren propiedades de transporte mejoradas de las membranas. Otro aspecto importante se refiere a la necesidad de procesar mayores volúmenes de las soluciones de electrolitos para convertir mayores cantidades de energía, requiriendo así el uso de baterías con un mayor número de tripletes (unidades repetitivas) [26]. Además, es vital lograr una alta densidad de potencia neta (es decir, la densidad de potencia bruta menos la potencia perdida), por lo que la resistencia eléctrica interna de la pila y las pérdidas por fricción hidráulica dentro de la pila deben ser bajas. Se requiere una baja resistencia eléctrica de la pila que permita la transferencia de iones deseada, y una baja fricción hidráulica que minimice la energía consumida para bombear el líquido a través de la pila [28].

1.3. Hidrodinámica

1.3.1. Ley de Darcy

En un medio poroso, el transporte global de cantidad de movimiento por esfuerzos cortantes en el fluido a menudo es insignificante, porque las paredes de los poros impiden el transporte de cantidad de movimiento al fluido fuera de los poros individuales. Una descripción detallada, hasta la resolución de cada poro, no es práctica en la mayoría de las aplicaciones. Una homogeneización de los medios porosos y fluidos en un solo medio es un enfoque alternativo común. La ley de Darcy junto con la ecuación de continuidad y la ecuación de estado para el fluido (o gas) de los poros proporcionan un modelo matemático completo adecuado para una amplia variedad de aplicaciones que involucran flujos de medios porosos, para los cuales el gradiente de presión es la principal fuerza impulsora [29].

La ley de Darcy describe el movimiento de fluidos a través de intersticios en un medio poroso. Debido a que el fluido pierde una cantidad considerable de energía debido a la resistencia friccional dentro de los poros, las velocidades de flujo en los medios porosos son muy bajas. La ley de Darcy describe el flujo en medios porosos impulsado por gradientes en el campo de potencial hidráulico, que tiene unidades de presión [29].

1.3.2. Ecuación de Brinkman

En dominios porosos, las variables de flujo y las propiedades del fluido se definen en cualquier punto dentro del medio mediante el promedio de las variables y propiedades reales sobre un cierto volumen que rodea el punto. Este volumen de control debe ser pequeño en comparación con las dimensiones macroscópicas típicas del problema, pero debe ser lo suficientemente grande como para contener muchos poros y elementos sólidos de la matriz [29].

La porosidad se define como la fracción del volumen de control que está ocupada por poros. Así, la porosidad puede variar desde cero para regiones sólidas puras hasta la unidad para dominios de flujo libre [29].

Las propiedades físicas del fluido, como la densidad y la viscosidad, se definen como promedios de volumen intrínseco que corresponden a una unidad de volumen de los poros. Definidos de esta manera, presentan los parámetros físicos relevantes que pueden medirse experimentalmente, y se supone que son continuos con los parámetros correspondientes en el flujo libre adyacente [29].

La velocidad de flujo se define como un promedio de volumen superficial y corresponde a una unidad de volumen del medio que incluye tanto los poros como la matriz. A veces se le llama

velocidad de Darcy, definida como la tasa de flujo de volumen por unidad de sección transversal del medio. Tal definición hace que el campo de velocidad sea continuo a través de los límites entre regiones porosas y regiones de flujo libre [29].

1.4. Elementos sobre la distribución de potencial y de corriente

La densidad de corriente local i sobre el electrodo está ligada a la sobretensión local de activación y por consiguiente al potencial de electrodo correspondiente. En ciertas aplicaciones, las matrices mismas de los electrodos no son equipotenciales, lo que significa entonces que, además de la distribución de potencial en la solución, existe también una distribución en ellas. En algunos casos (electrodos del tipo largas láminas delgadas) es necesario tomar en cuenta esta distribución; en otros, donde existe, pero sin poder ser gobernada (electrodo de lecho fluidizado), es difícil poder incluirla. Hay que señalar que estas nociones de distribución espacial de la densidad de corriente y de potencial son particularmente importantes en aplicaciones de tratamiento electrolítico de superficies, en electrodos porosos, etc.

En caso de electrodos porosos es posible deducir la distribución de potencial de electrodo (o de sobretensión) y, sobre todo, para el interés del diseñador, la caída de potencial global, por integración del balance de cargas eléctricas en un volumen de referencia.

Se consideran que existen, por lo general, tres categorías específicas de distribución de corriente de polarización correspondientes cada una a una condición particular de sobretensión sobre el electrodo [30].

1.4.1. Distribución primaria

La distribución primaria corresponde a la situación para la que todo sucede como si ninguna sobretensión existiese en los electrodos y como si toda variación de concentración fuera despreciable en la solución. En consecuencia, ni la cinética de reacción, ni el transporte de materia intervienen.

La distribución primaria depende esencialmente de parámetros geométricos y es independiente de la conductividad eléctrica del electrolito [30].

1.4.2. Distribución secundaria

Este tipo de distribución corresponde a la presencia de una sobretensión de activación en el electrodo. La distribución de corriente puede ser diferente de la distribución primaria; se dice entonces que se está en un caso de distribución secundaria de corriente.

Se admite que la sobretensión de concentración debida a los cambios de concentración cerca del electrodo es despreciable, lo que implica que, si bien se tiene en cuenta la cinética de reacción, no hay influencia del transporte de materia [30].

1.4.3. Distribución terciaria

Cuando existe una variación de concentración cerca del electrodo, la sobretensión de concentración debe estar asociada a la sobretensión de activación. De esta manera, el acceso a la solución que describe la distribución de densidad de corriente local resulta un problema matemático complejo.

Sin embargo, en la situación particular donde el electrodo funciona en las condiciones de corriente límite (limitación difusional), la sobretensión de concentración es preponderante. La distribución espacial del coeficiente local de transferencia de materia [30].

1.4.4. Equilibrio de Donnan

Es un equilibrio especial que se establece entre dos fases, sujetas a la limitación de que uno o más de los componentes iónicos no pueden pasar de una fase a la otra fase. Esta condición de exclusión, conocida como exclusión de Donnan, es establecida por la presencia de una membrana de intercambio iónico. La presencia de una membrana no es esencial, puesto que la restricción de movimientos puede ser debida a un campo centrífugo o gravitacional, o a la coherencia de un gel. Como consecuencia inmediata de dicha restricción, se produce en un sistema en equilibrio una distribución desigual de los iones difusibles [31].

El equilibrio de Donnan comporta tres importantes características, que son:

- a) Desigual distribución de los iones
- b) Diferencia de potencial eléctrico entre las fases
- c) Presión osmótica

1.5. CFD (Dinámica de Fluidos Computacional)

La mecánica de fluidos es la rama de la mecánica que se encarga del estudio de los fluidos (líquidos y gases) ya sea en reposo o en movimiento. Para los fluidos en reposo, la rama especialidad es la estática de fluidos. Para los fluidos en movimiento, la rama especializada en su análisis y comprensión es la dinámica de fluidos. La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es una rama de la dinámica de fluidos. Este,

es un campo del conocimiento dedicado a obtener soluciones aproximadas de las ecuaciones de flujo de fluidos mediante la implementación de computadores y algoritmos numéricos [32]. Las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos son las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones aún no tienen solución teórica y es por esto por lo que es necesario hacer algunas suposiciones para poder reducirlas a términos que tengan solución mediante la implementación de métodos numéricos. El método numérico más común para analizar el fenómeno de flujo de fluidos se llama Método de volúmenes finitos (en inglés FVM). Su principal ventaja es que es un método conservativo por naturaleza, lo que implica que la ley de conservación es satisfecha exactamente sobre el volumen de control elegido [32]. Este método requiere la solución de ecuaciones en forma de integrales en el dominio físico (discretización espacial del problema) el cual se divide en volúmenes de control finitos. Su metodología implica los siguientes pasos [32]:

- Integración de las ecuaciones diferenciales en el volumen de control. Para esto se aplica el teorema de la divergencia (También conocido como teorema de Gauss).
- Se evalúan los términos derivados en las caras de las celdas de cada volumen de control.
- Se crea un sistema algebraico de ecuaciones para cada término
- Finalmente se resuelven las ecuaciones en cada volumen de control de forma simultánea e iterativa.

2. Metodología

2.1. Sistema real

La celda FT-ED-100-3-10 (ver figura 2.1) es un módulo de membrana a escala de laboratorio el cual tiene las siguientes aplicaciones:

- Electrodialisis de 2 compartimentos con membrana monopolar para desalinización o concentración.
- Electrodialisis de 2 compartimentos con membrana bipolar para división de sal (y formación de ácido y base).
- Electrodialisis de 3 compartimentos con membrana bipolar para división de sal.
- Electrodialisis de 3 compartimentos con membrana bipolar para división de sal con un 4º compartimento para la solución de enjuague.¹

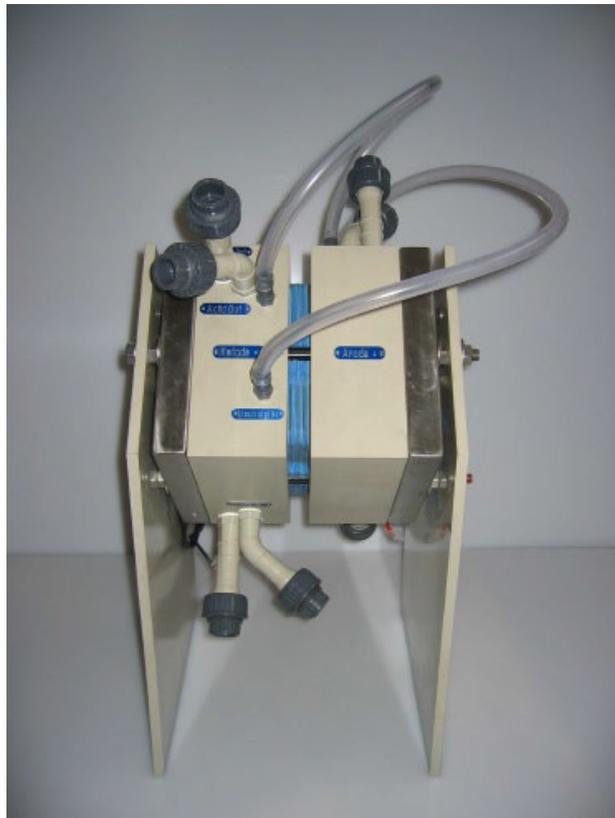


Figura 2.1. Configuración de la celda FT-ED-100-3-10. Fuente: [33].

2.1.1 Datos técnicos generales de la celda FT-ED-100-3-10

La celda consta de:

¹ Sistema utilizado en este trabajo.

- Módulo de membrana de electrodiálisis FT-ED-100-2-x para tecnología de 2 compartimentos (electrodiálisis bipolar).
- Módulo de membrana de electrodiálisis FT-EDR-100-2-x para tecnología de 2 compartimentos con inversión de polaridad (desalinización/concentración).
- Módulo de membrana de electrodiálisis FT-ED-100-3-x para tecnología de 3 compartimentos (electrodiálisis bipolar, división de sal/modificación de sal).
- Módulo de membrana de electrodiálisis FT-ED-100-4-x para tecnología de 3 compartimentos con solución de bloque (electrodiálisis bipolar, división de sales).²
- Módulo de membrana de electrodiálisis FT-ED-100-4-x para tecnología de 4 compartimentos (modificación de sal).
- Área efectiva de la membrana por celda 0.01 m².

Dimensiones de la membrana (ver tabla 2.1).

Tabla 2.1. Dimensiones de la membrana de la celda. Fuente: [33].

Dimensiones	Cuadro	Ancho total (mm)	160
		Largo total (mm)	160
		Ancho efectivo (mm)	100
		Longitud efectiva (mm)	100
	Altura de la cámara (mm)	0.5	
	Longitud de los colectores del marco (mm)	14	

Condiciones de operación (ver tabla 2.2).

Tabla 2.2. Condiciones de operación de la celda. Fuente: [33].

Caudal de alimentación (L/h)	
<ul style="list-style-type: none"> • Por celda • Compartimiento de enjuague de los electrodos 	20 150
Temperatura máxima de operación (°C)	40
pH de operación (espaciador y placa final)	0-14
Presión máxima de operación (bar)	2.5
Caída máxima de voltaje (V/rpu [unidad de procesamiento resistivo por sus siglas en inglés])	4
Densidad de corriente (depende también del tipo de membrana) (A/m ²)	
<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo DSA/DSA • Electrodo DSA/SS 	400 1000

² Sistema utilizado en este trabajo.

La distribución de las soluciones en la celda puede verse en la figura 2.2.

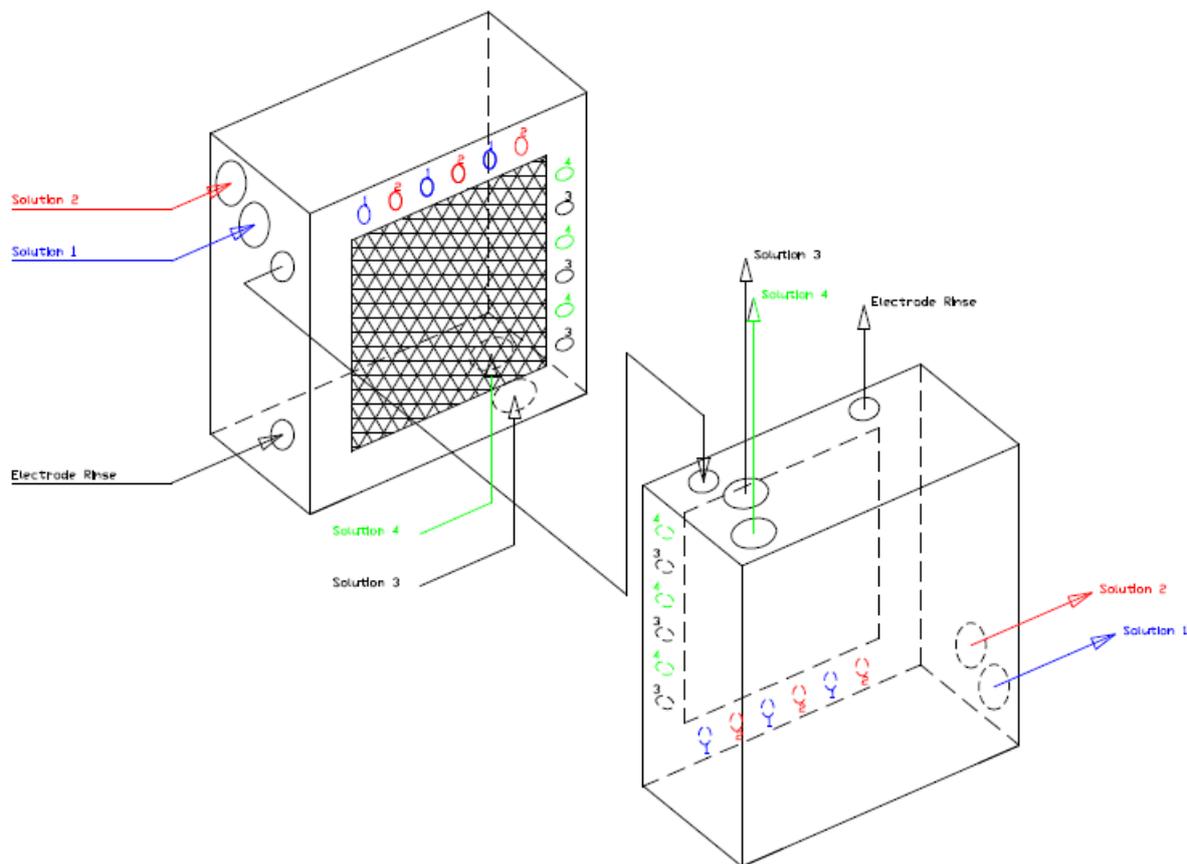


Figura 2.2. Distribución de las soluciones en la celda. Fuente: [33].

Para evitar que el transporte de iones cloruro hacia el compartimento de enjuague se coloca una membrana catiónica en ambos extremos de la celda que separa las soluciones de sal y base de las de enjuague. De cualquier manera, las soluciones de enjuague se deben regenerar regularmente. Estos cuidados son necesarios porque el cloruro puede formar cloro en el compartimento anódico que dañaría la membrana.

Los compartimentos de electrodos se pueden conectar en serie, pero se recomienda utilizar una manguera con una longitud suficiente, dependiendo de la conductividad del electrolito, para la prevención de los cortos circuitos. Se debe tener en cuenta que en los electrodos se producirá oxígeno e hidrógeno equivalentes a la corriente eléctrica.

El oxihidrógeno es explosivo a partir del 4% en volumen de H_2 . El aire de escape del tanque de enjuague de electrodos debe ser ventilado.

Las 4 barras de tensión deben apretarse hasta un par máximo de 40 Nm.

La transferencia de masa por electrodiálisis estará controlada por el fenómeno de la capa límite. Para aumentar la transferencia de masa (eficiencia de corriente, densidad de corriente) así como para la estabilidad del proceso (evitando precipitaciones en concentrado por formadores de

dureza) es importante minimizar la influencia de la capa límite, esto podría ser alcanzado mediante la reducción del espesor de la capa límite como resultado de la alta velocidad de flujo dentro de la cámaras, se recomienda una "velocidad en el espacio vacío" de un mínimo de 10 cm/s o 18 L/h por celda (180 L/h por bucle de proceso) [33].

2.2. Modelos en 3D

Para realizar los estudios de hidrodinámica de la celda FT-ED-100-3-10, se realizó el dibujo de esta celda en 3D, siendo una parte el de los cabezales y subcabezales de entrada de las soluciones (en la figura 2.3 se muestra la entrada de NaCl y HCl). Para la salida de las soluciones el dibujo es idéntico.

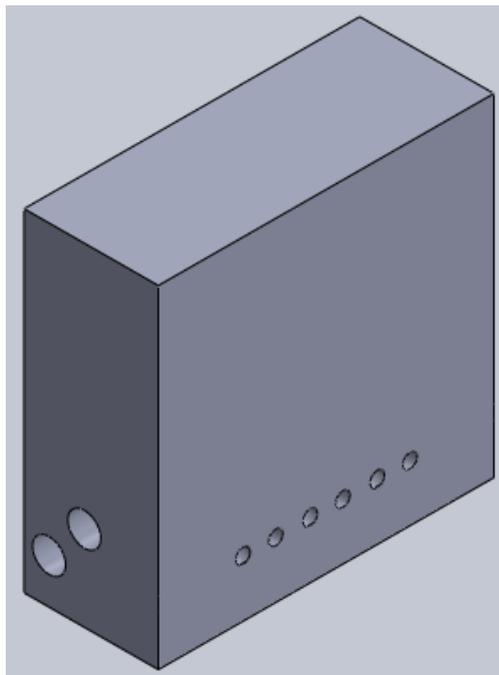


Figura 2.3. Dibujo en 3D de la celda FT-ED-100-3-10.

Además, se realizaron dibujos para los espaciadores de membrana y las membranas de intercambio iónico (ver figura 2.4 y 2.5).

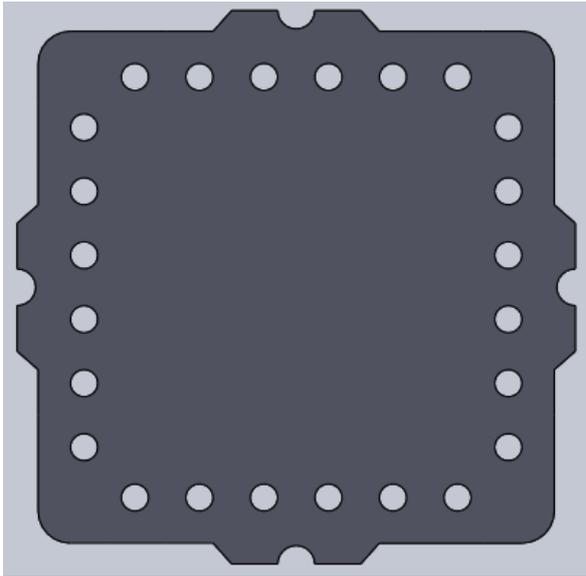


Figura 2.4. Dibujo en 3D de la membrana de intercambio iónico tipo FKB-PK-130.

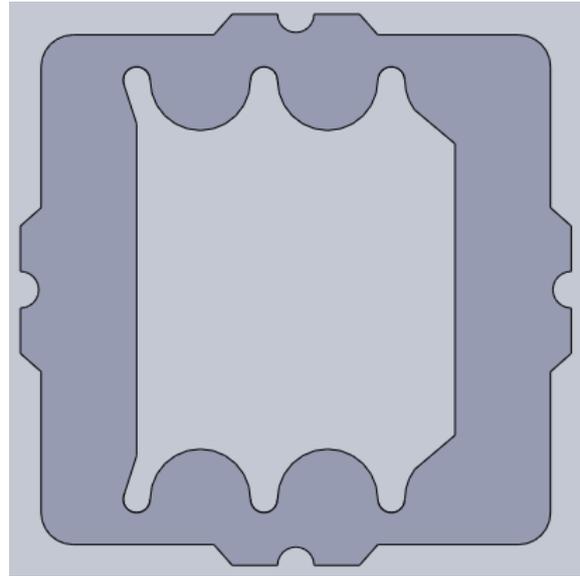


Figura 2.5. Dibujo en 3D del espaciador de membrana tipo ED-100-4ES.

Hay que tomar en cuenta que el espaciador de membrana tiene una malla entrelazada con juntas integradas de cloruro de polivinilo, por lo que, también se realizaron dibujos en 3D de la parte entrelazada del espaciador (ver figura 2.6), en la que puede comprenderse la deformación que pueden sufrir los filamentos.

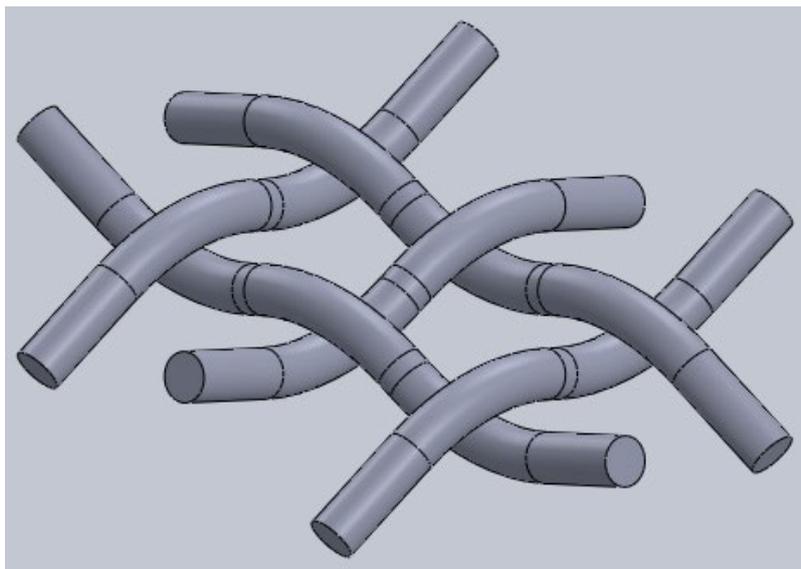


Figura 2.6. Dibujo en 3D de la parte entrelazada del espaciador de membrana.

Para realizar los estudios en el programa Comsol Multiphysics, se elaboró el modelo geométrico de la figura 2.7, donde se muestra las características internas de la celda, la forma geométrica de los cabezales, subcabezales, el área efectiva de las membranas de intercambio iónico, así como de los espaciadores de membrana.

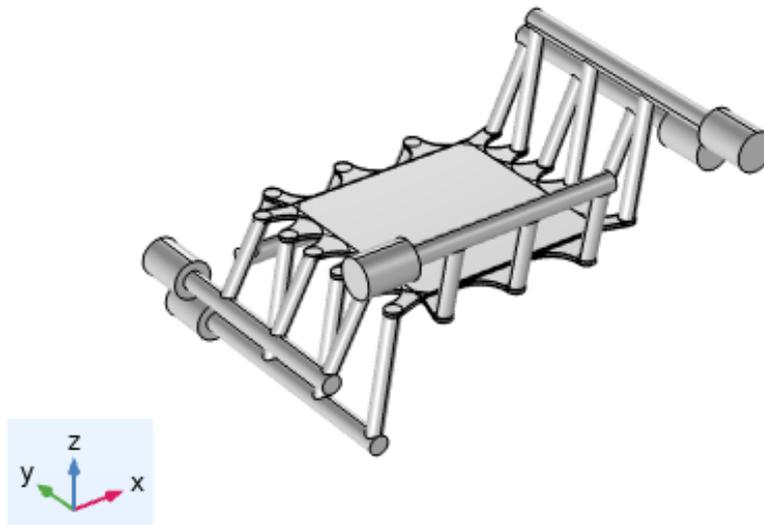


Figura 2.7. Vista isométrica del modelo de estudio.

En este modelo tenemos tres entradas y las tres salidas de las soluciones, que son ácido clorhídrico, hidróxido de sodio y cloruro de sodio, el cual se ve esquemáticamente en la figura 2.8.

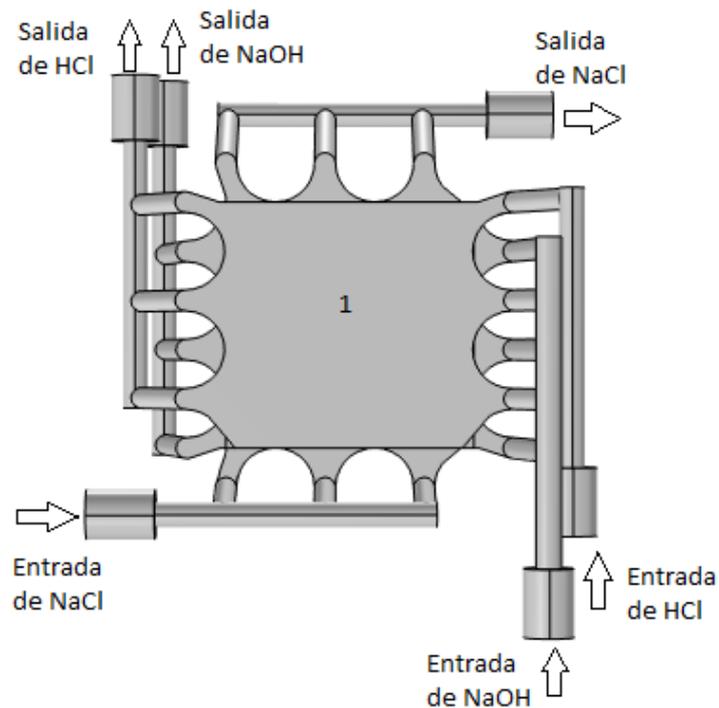


Figura 2.8. Vista aérea del modelo de estudio.

La zona marcada con el número 1, es la zona efectiva de los espaciadores de membrana y donde se encuentra el entretejido, en el cuál para realizar los estudios se tuvieron ciertas consideraciones que se describen en el apartado del estudio hidrodinámico.

2.3. Estudio hidrodinámico

Las propiedades de los fluidos están calculadas a 43 °C que es la temperatura máxima de trabajo de la celda FT-ED-100-3-10, en la tabla 2.3 están los valores de estas.

Tabla 2.3. Tabla de valores de las propiedades de los fluidos utilizados en el estudio hidrodinámico.

Propiedad a 43°C	Cloruro de sodio (NaCl)	Hidróxido de sodio (NaOH)	Ácido clorhídrico (HCl)
Densidad (kg/m ³)	999.88	1002.6	996.33
Viscosidad (Pa·s)	6.19x10 ⁻⁴	6.4895x10 ⁻⁴	6.4125x10 ⁻⁴
Concentración (mol/m ³)	250	250	250

Las propiedades establecidas para la zona 1 de la fig. 2.8 para este estudio, se consideró teóricamente como matriz porosa en la que se aplican dos términos teóricos, el cual son la porosidad y la permeabilidad que existe en el mallado del espaciador de membrana.

En el modelado en 3D de la celda, se hicieron estudios a diferentes flujos volumétricos de las soluciones, así como, los valores de la matriz porosa (zona 1 de la figura 2.8) descritas en la tabla 2.4 y en la figura 2.9 se representa el diagrama de flujo para realizar el estudio de flujo en medio libre y poroso.

Tabla 2.4. Valores de los flujos y de las propiedades de la matriz porosa.

Propiedad	Valores
Flujo (L/h)	1, 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30
Porosidad ³ (adimensional)	0.824
Permeabilidad ⁴ (m ²)	3.242678x10 ⁻⁹

Para realizar el estudio en la parte de la malla entretejida del espaciador de membrana ED-100-4ES de la celda (ver figura 2.6), se obtuvo un prisma rectangular (ver figura 2.10 y 2.11), donde se describe la entrada y salida del fluido. La dirección de flujo es sobre el eje z del sistema de coordenadas o a 45° respecto al cuadrado formado por los hilos del mallado; el espacio formado por el entretejido es un cuadrado rotado donde los iones de las especies se transportan.

³ Reportado en [35]

⁴ Reportado en [35]

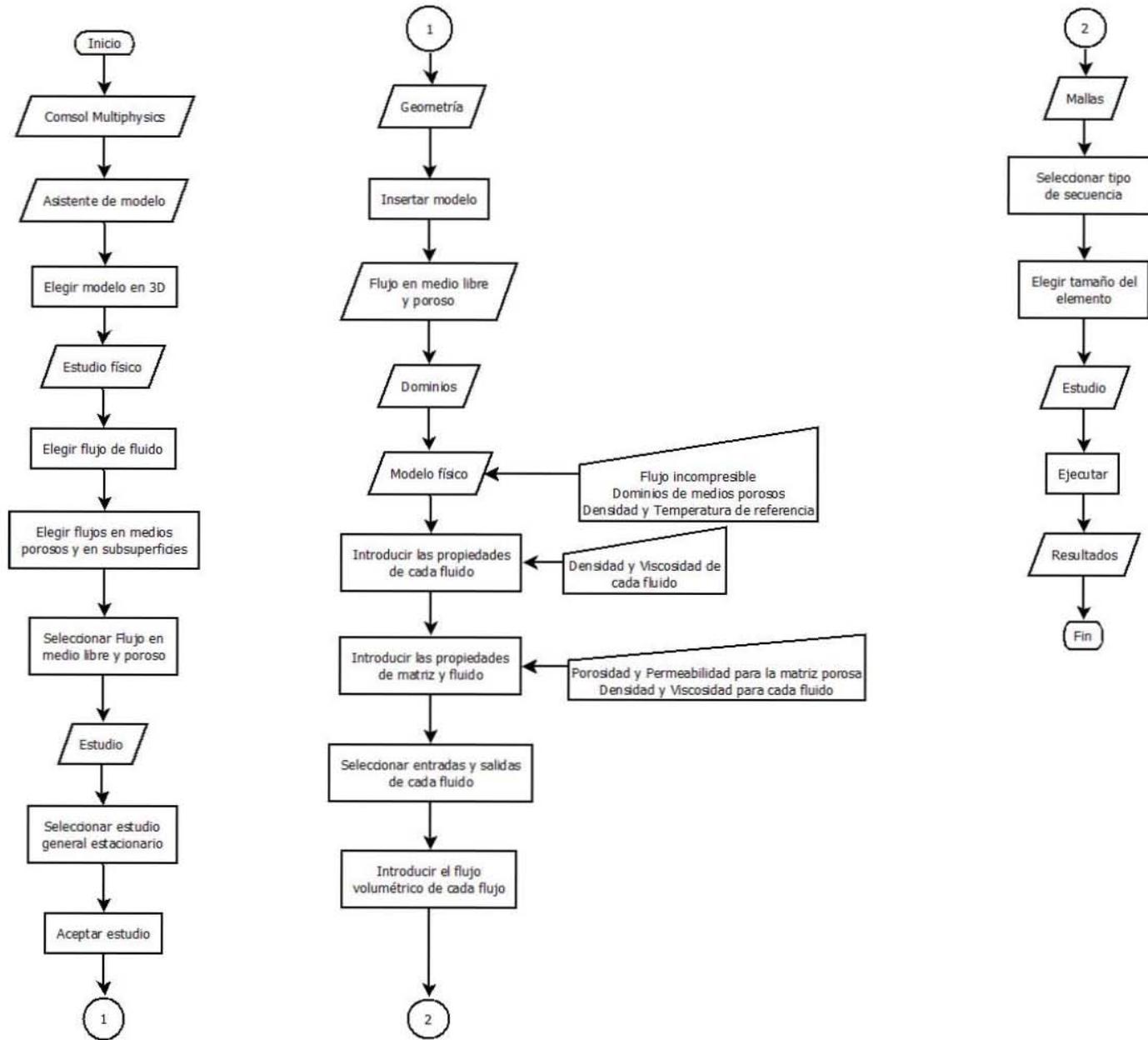


Figura 2.9. Diagrama de flujo para realizar el estudio hidrodinámico en el modelo de la celda FT-ED-100-3-10.

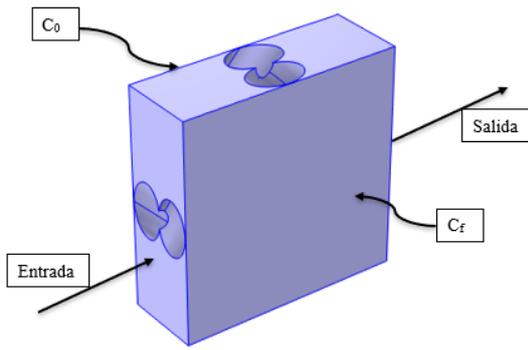


Figura 2.10. Modelo en 3D de la malla del espaciador de membrana ED-100-4ES, especificando las características para el estudio (vista isométrica).

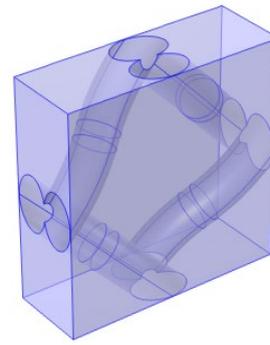


Figura 2.11. Modelo en 3D de la malla del espaciador de membrana ED-100-4ES, vista del interior del prisma (vista isométrica).

2.4. Estudio de distribuciones de corriente

Para realizar los estudios sobre cómo es la migración de los iones al imponerse una corriente eléctrica en el sistema, se tiene el siguiente modelo (ver figura 2.12).

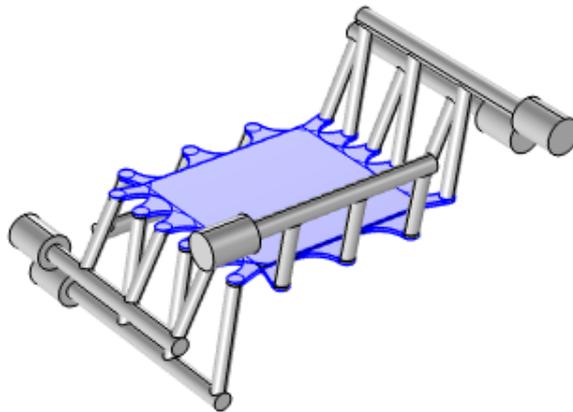
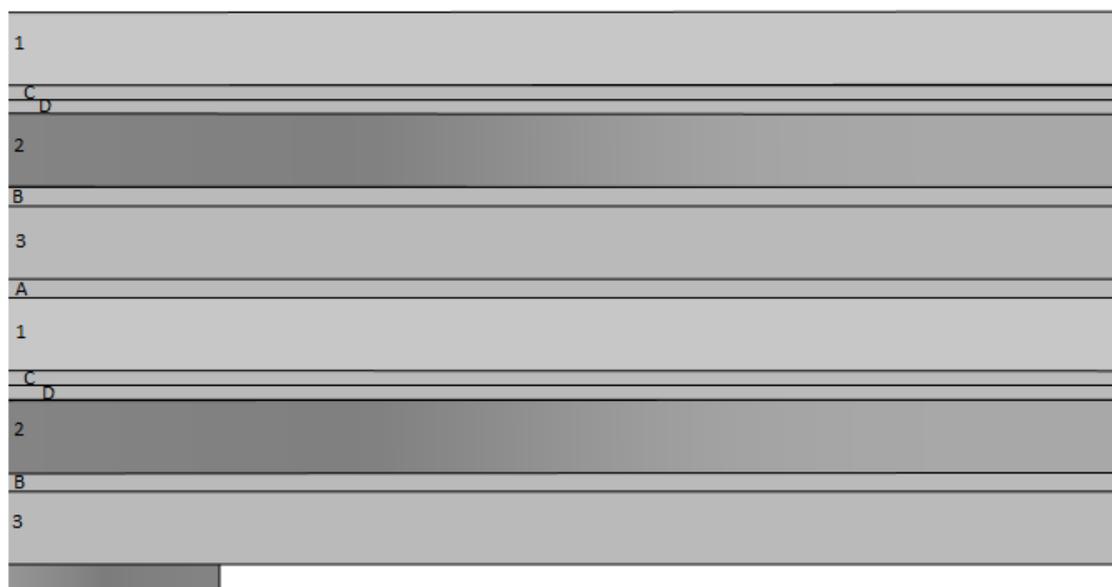


Figura 2.12. Modelo para la realización del estudio de distribución de corriente.

La zona sombreada de color azul es la más importante que comprende la zona efectiva del espaciador de membrana, para la parte de las membranas de intercambio iónico y bipolar se considera un prisma cuadrangular con base en las medidas reales y área efectiva de las membranas (ver tabla 2.1), además, no se toma en cuenta los cabezales y subcabezales del sistema debido a la complejidad del modelo 3D.

En la figura 2.13 se muestran la distribución de los componentes de la celda, donde se establecieron criterios de distribución de corriente secundaria para realizar el estudio.



- Zonas:
- 1. Compartimento de HCl
 - 2. Compartimento de NaOH
 - 3. Compartimento de NaCl
 - A. Membrana de Intercambio Aniónico
 - B. Membrana de Intercambio Catiónico
 - C. Membrana Bipolar parte Catiónica
 - D. Membrana Bipolar parte Aniónica

Figura 2.13. Distribución de los componentes de la celda para el estudio eléctrico.

Como se ha mencionado, para realizar el estudio eléctrico se establecieron distribuciones de corriente secundaria, por lo que, se tuvieron que calcular la conductividad eléctrica de las soluciones utilizadas, las membranas de intercambio aniónico y catiónico, así como la parte aniónica y catiónica de la membrana bipolar. Para realizar los cálculos de conductividad eléctrica de las soluciones se utilizó la Ecuación de Nernst-Einstein el cual se basa en la estimación teórica de la conductividad la cual se estima con la ecuación 2.1:

$$\kappa = \frac{F^2}{RT} \sum (c_i \cdot z_i^2 \cdot D_i) \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Donde:

κ = conductividad eléctrica [S/m]

F = constante de Faraday 9.64867×10^4 [C/mol]

R = constante del gas ideal 9.3143 [J/mol K]

T = Temperatura [K]

D_i = Coeficiente de difusión de la especie i [m^2/s]

c_i = Concentración de la especie i [mol/m^3]

z_i = Carga de la especie i

La ecuación es válida para las soluciones diluidas.

La concentración (c_i), corresponde a la de cada ion presente en la solución, esta se halla realizando la especiación del sistema, mientras que el valor de la carga del ion (z_i) depende de cada ion.

En la tabla 2.5, están los valores utilizados para realizar los cálculos con la ecuación.

Tabla 2.5. Valores utilizados para calcular la conductividad de las soluciones.

Característica	Valor
C_i (mol/m ³)	250
D_{Na} (m ² /s)	1.5328×10^{-9}
D_H (m ² /s)	1.07×10^{-8}
D_{OH} (m ² /s)	6.044×10^{-9}
D_{Cl} (m ² /s)	2.3429×10^{-9}
T (K)	316.15
Z_{Na}	1+
Z_H	1+
Z_{OH}	1-
Z_{Cl}	1-

Los valores del coeficiente de difusión⁵ de cada especie están calculados a 316.15 K.

La parte F^2/RT de la ecuación es constante por lo que se obtiene:

$$\kappa = \frac{F^2}{RT} \sum (c_i \cdot z_i^2 \cdot D_i)$$

$$\kappa = \frac{\left(9.64867 \times 10^4 \frac{C}{mol}\right)^2}{\left(9.3143 \frac{J}{mol K} \cdot 316.15 K\right)} \sum (c_i \cdot z_i^2 \cdot D_i)$$

$$\kappa = 3161487.712 \frac{C^2}{J mol} \sum (c_i \cdot z_i^2 \cdot D_i)$$

Sumatoria y conductividad para el NaCl

$$\sum (c_i \cdot z_i^2 \cdot D_i) = (c_{Na} D_{Na} z_{Na}^2) + (c_{Cl} D_{Cl} z_{Cl}^2)$$

$$= \left[\left(250 \frac{mol}{m^3}\right) \left(1.5328 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}\right) (+1)^2 + \left(250 \frac{mol}{m^3}\right) \left(2.3429 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}\right) (-1)^2 \right]$$

$$= 9.68925 \times 10^{-7} \frac{mol}{m s}$$

$$\kappa = 3161487.712 \frac{C^2}{J mol} \cdot 9.68925 \times 10^{-7} \frac{mol}{m s} = 3.0632 \frac{S}{m}$$

⁵ [35]

Continuando con las operaciones matemáticas; la sumatoria y conductividad para el HCl

$$\begin{aligned} \sum (c_i \cdot z_i^2 \cdot D_i) &= (c_H D_H z_H^2) + (c_{Cl} D_{Cl} z_{Cl}^2) \\ &= \left[\left(250 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right) \left(1.07 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) (+1)^2 + \left(250 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right) \left(2.3429 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) (-1)^2 \right] \\ &= 3.260725 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m s}} \\ \kappa &= 3161487.712 \frac{\text{C}^2}{\text{J mol}} \cdot 3.26072 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m s}} = 10.3087 \frac{\text{S}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Sumatoria y conductividad para el NaOH

$$\begin{aligned} \sum (c_i \cdot z_i^2 \cdot D_i) &= (c_{Na} D_{Na} z_{Na}^2) + (c_{OH} D_{OH} z_{OH}^2) \\ &= \left[\left(250 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right) \left(1.5328 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) (+1)^2 + \left(250 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right) \left(6.044 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) (-1)^2 \right] \\ &= 1.8942 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m s}} \\ \kappa &= 3161487.712 \frac{\text{C}^2}{\text{J mol}} \cdot 1.8942 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m s}} = 5.9884 \frac{\text{S}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Para las conductividades de las membranas de intercambio iónico y bipolar se obtuvieron a partir de los datos del manual *Ion Exchange Membranes*, teniendo los siguientes valores:

Tipo	Resistencia (Ω/cm^2)	Conductividad ⁶ (S/m)
FAB Aniónico	4-7	0.3928
FKB Catiónico	4-6	0.3229
FBM Catiónico Bipolar	-	1.7053
FBM Aniónico Bipolar	-	0.9106

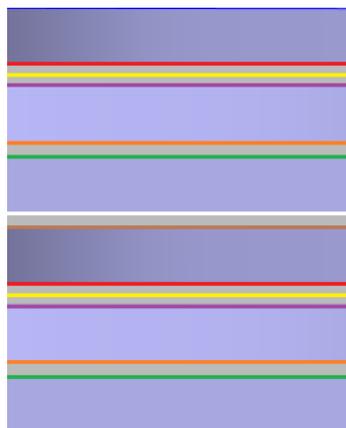


Figura 2.14. Delimitación de las fronteras entre soluciones y membranas de intercambio iónico y bipolar.

⁶ [35]

En la tabla 2.6 están descritas las fronteras marcadas por distintos colores de la figura 2.14.

Tabla 2.6. Descripción de las fronteras marcadas en la figura 2.14.

Color (línea)	Fronteras donde se aplica las condiciones de potenciales de Donnan
Rojo	Frontera entre la solución de ácido clorhídrico (HCl) con la parte catiónica de la membrana bipolar.
Amarillo	Frontera entre la parte catiónica con la parte aniónica de la membrana bipolar.
Violeta	Frontera entre la parte aniónica de la membrana bipolar con la solución de hidróxido de sodio (NaOH).
Naranja	Frontera entre la solución de NaOH con la membrana de intercambio catiónico.
Verde	Frontera entre la membrana de intercambio catiónico con la solución de cloruro de sodio (NaCl).
Blanco	Frontera entre la solución de NaCl con la membrana de intercambio aniónico.
Marrón	Frontera entra la membrana de intercambio aniónico con la solución de HCl.

Para llevar a cabo el estudio (ver figura 2.15), se aplican dos potenciales de electrolito en los extremos del modelo, el potencial de 0 V se aplica en la parte superior del compartimento del ácido clorhídrico mientras el voltaje total que comprende de 0.4 a 2.4 V en intervalos de 0.1 se aplica en la parte inferior del compartimento del cloruro de sodio.

En el modelo en 3D del sistema se omite la película de agua de la membrana bipolar de 9 nm de anchura aproximadamente (entre la parte catiónica y aniónica de la membrana) debido a sus dimensiones, en consecuencia, el modelo sería más complejo, en comparación al modelo en 2D, donde si se contempla (ver trabajo de tesis “Simulación de transporte de iones en una batería de flujo basado en electrodiálisis con membrana bipolar”).

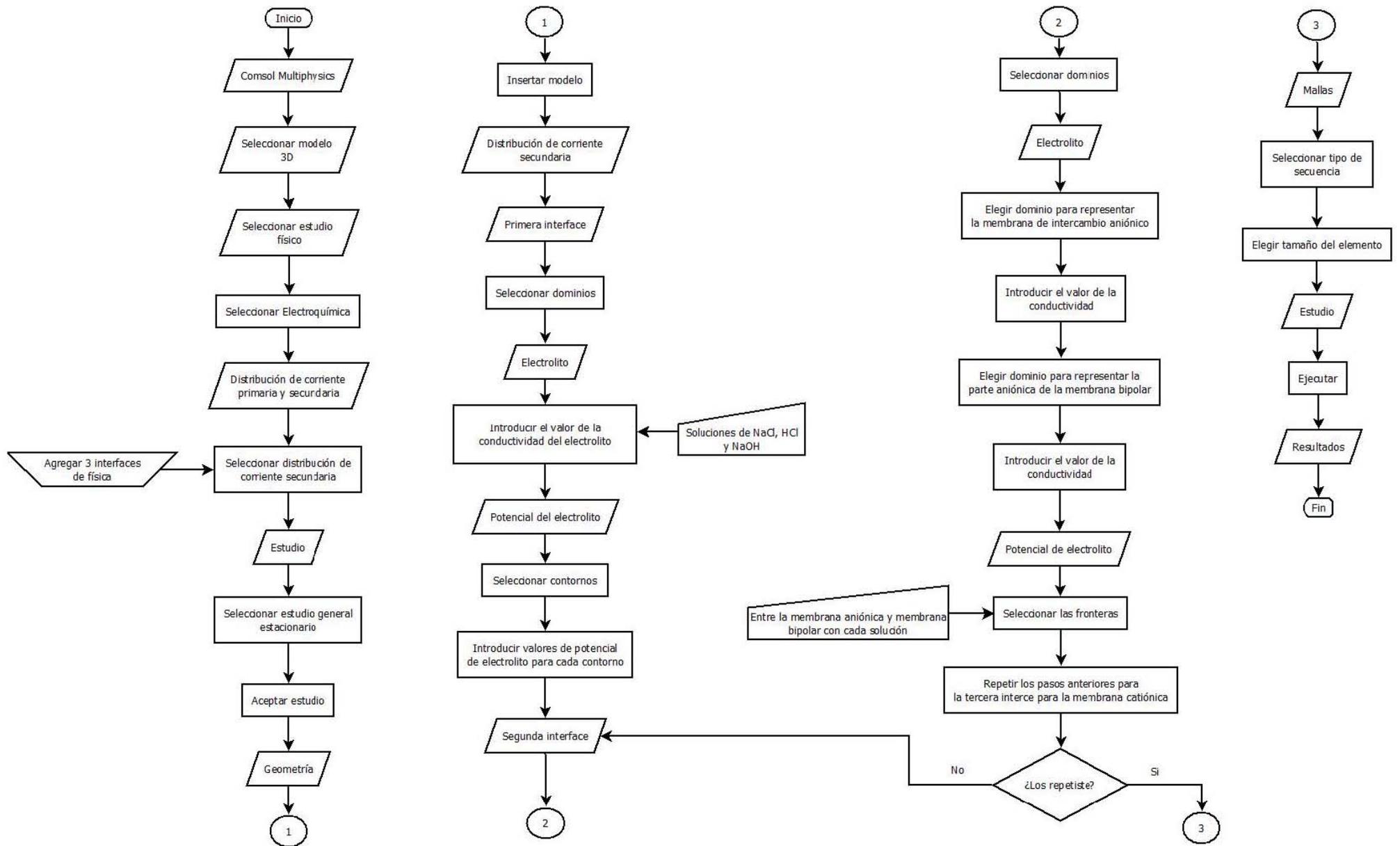


Figura 2.15. Diagrama de flujo para realizar el estudio de distribución de corriente en el modelo de la celda FT-ED-100-3-10.

3. Resultados y análisis

3.1. Estudio Hidrodinámico

3.1.1. Modelo en 3D de la celda FT-ED-100-3-10

Para la realización de los estudios, debido a la técnica de CFD se hizo el mallado del modelo para resolver numéricamente las ecuaciones por cada una de las partes del modelo teniendo 4.0493×10^5 elementos en el mallado (ver figura 3.1).

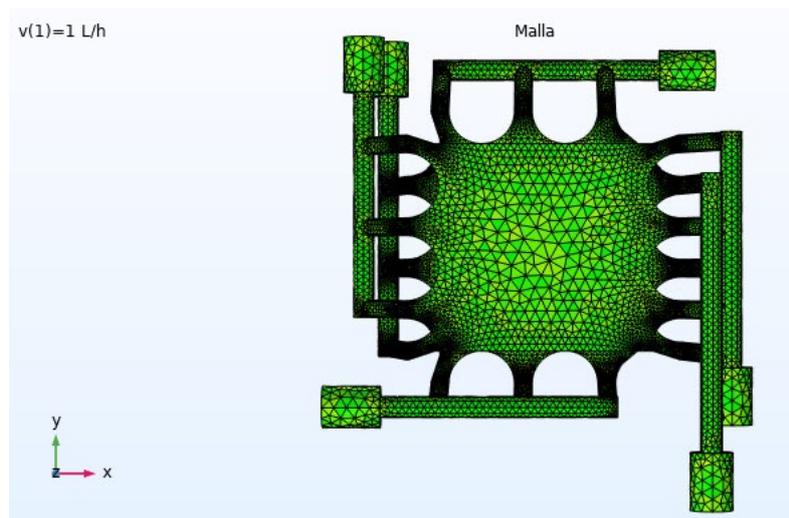


Figura 3.1. Mallado del modelo en 3D de la zona de estudio de la celda.

Los resultados obtenidos del estudio hidrodinámico en el modelo en 3D, como es la distribución de la velocidad, a un flujo de 30 L/h en los espaciadores de membrana se muestran en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 donde la flecha representa la dirección del flujo en cada una, para las soluciones de cloruro de sodio, hidróxido de sodio y ácido clorhídrico, respectivamente, mientras que en la figura 3.5 se observa en los cabezales de entrada y salida de todas las soluciones. Como se observa en la figura 2.8, la geometría del área efectiva del espaciador de membrana es muy característico y complejo, por ello, la distribución de cada una de las soluciones es distinta respecto a la otra por sus características físicas, un ejemplo de ello es la distribución de la velocidad de las soluciones en los cabezales de entrada y salida (ver figura 3.5) y en los espaciadores de membrana (ver figuras 3.2, 3.3 y 3.4), donde se observa que, de acuerdo a la simbología del lado derecho de cada figura, hay zonas donde el fluido puede tener una velocidad prácticamente nula, por lo que, no se aprovecha totalmente el área efectiva de este.

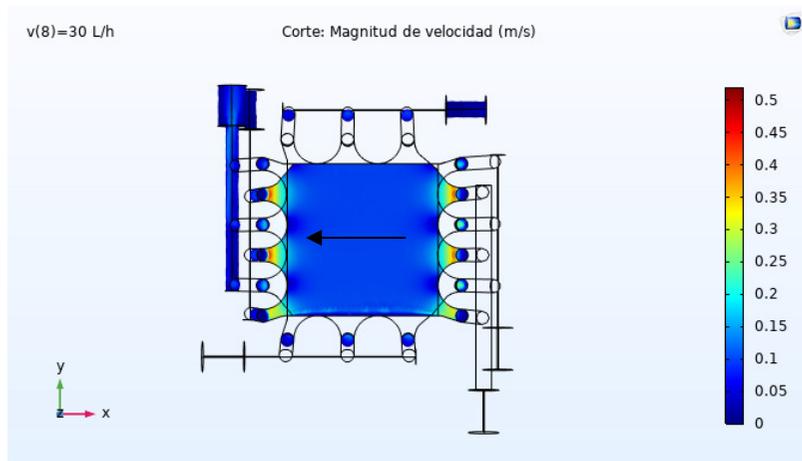


Figura 3.2 Distribución de la velocidad en el espaciador de membrana de la solución de NaOH sobre el eje x.

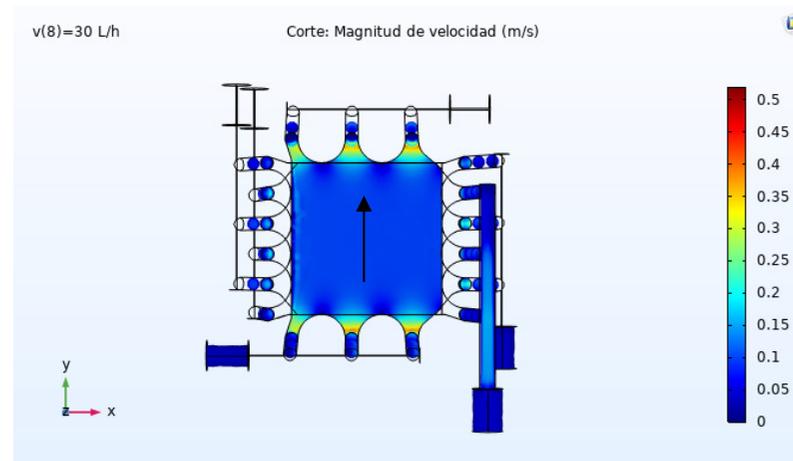


Figura 3.3. Distribución de la velocidad en el espaciador de membrana de la solución de NaCl sobre el eje y.

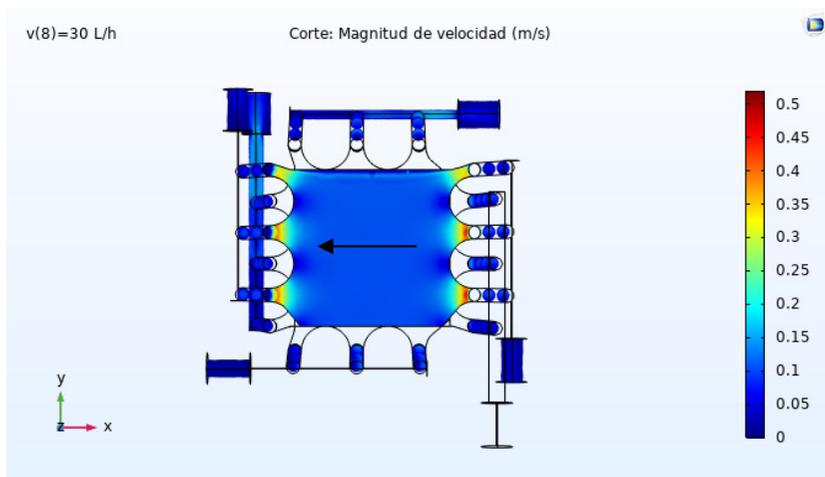


Figura 3.4. Distribución de la velocidad en el espaciador de membrana de la solución de HCl sobre el eje x.

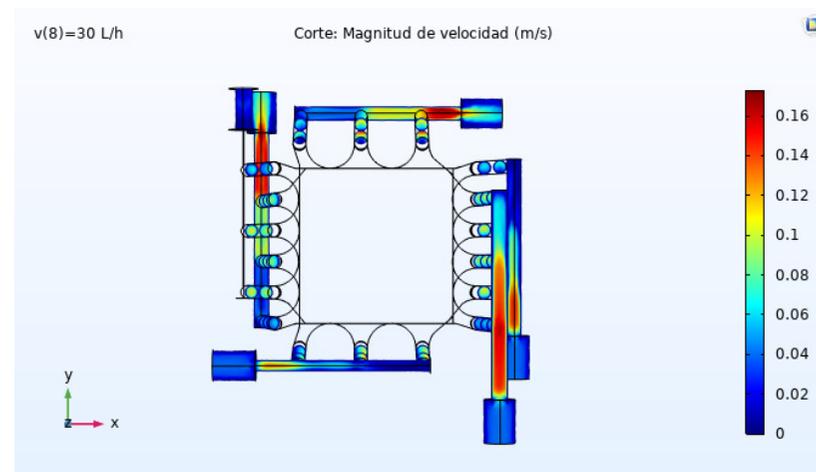


Figura 3.5. Distribución de la velocidad en los cabezales de las soluciones.

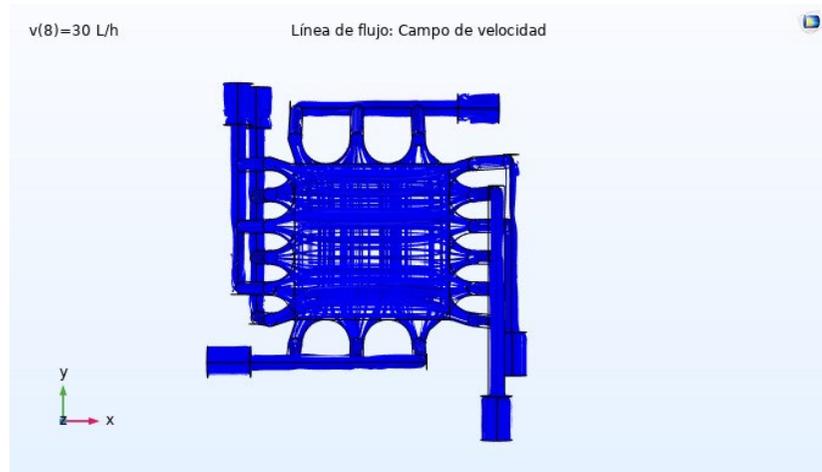


Figura 3.6. Flujo preferencial representados por líneas en el modelo en 3D.

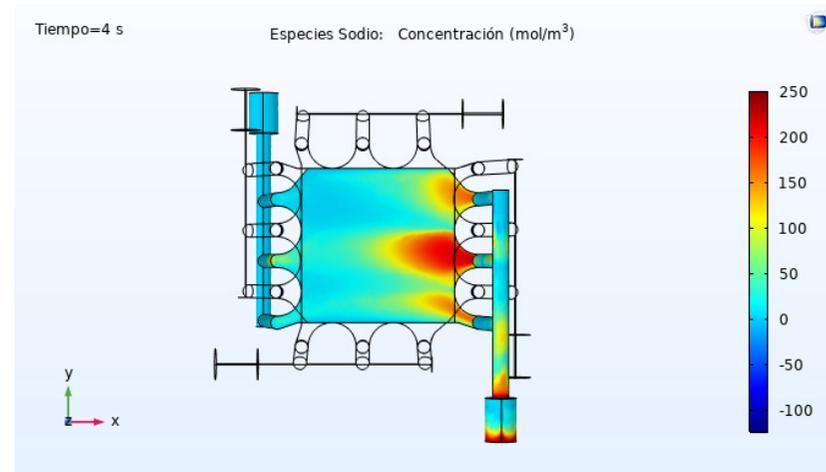


Figura 3.7. Comportamiento del NaOH a la entrada del espaciador de membrana a $t=4s$.

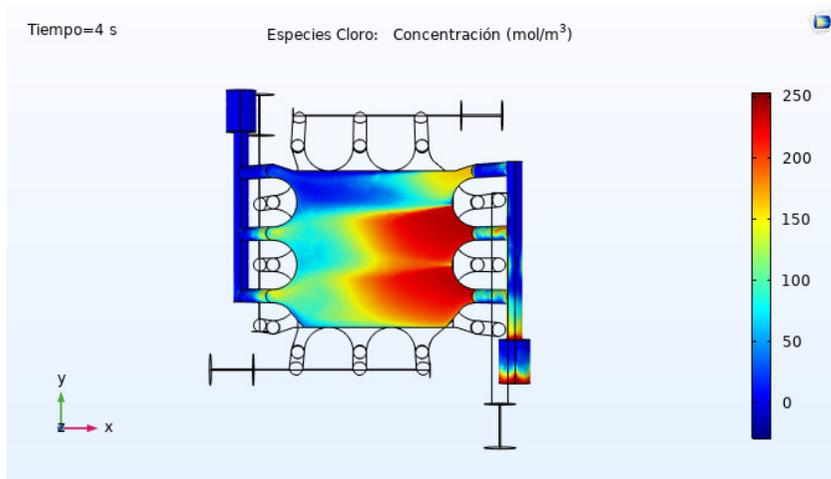


Figura 3.8. Comportamiento del HCl a la entrada del espaciador de membrana a $t=4s$.

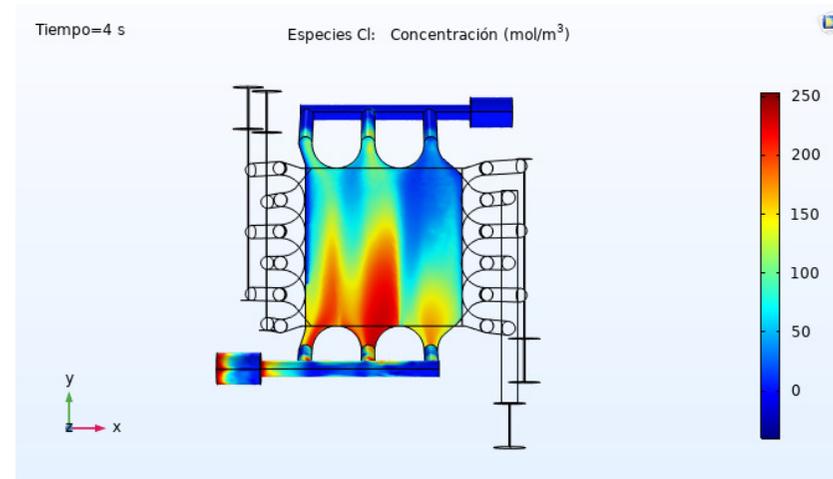


Figura 3.9. Comportamiento del NaCl a la entrada del espaciador de membrana a $t=4s$.

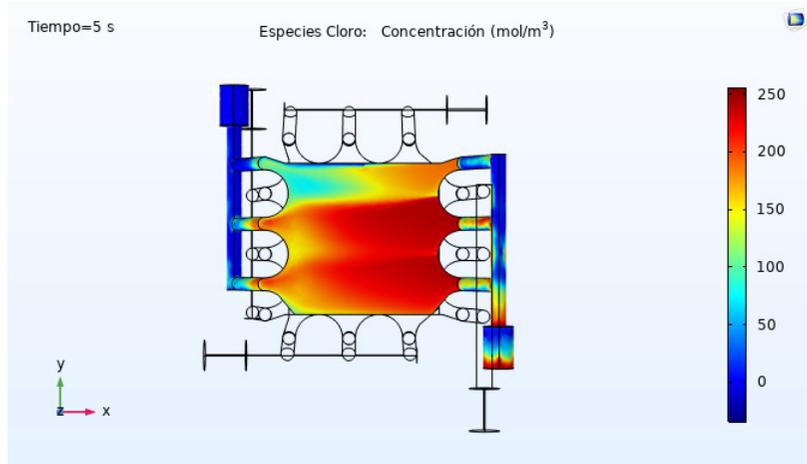


Figura 3.10. Distribución del flujo (HCl) en el espaciador de membrana a $t=5s$.

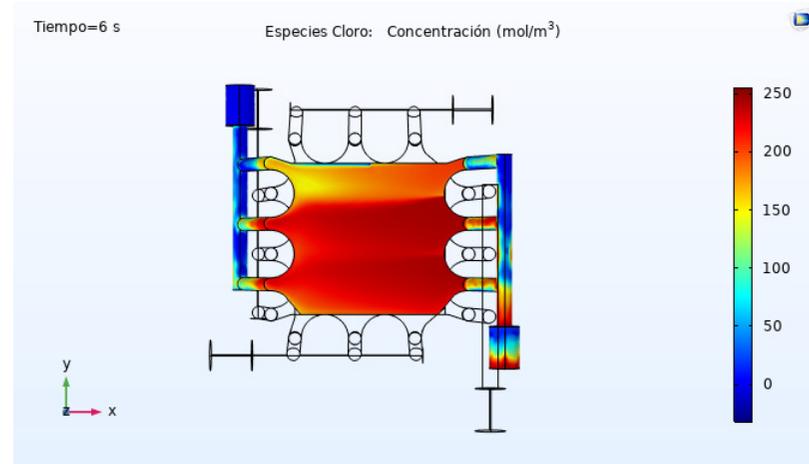


Figura 3.11. Distribución del flujo (HCl) en el espaciador de membrana a $t=6s$.

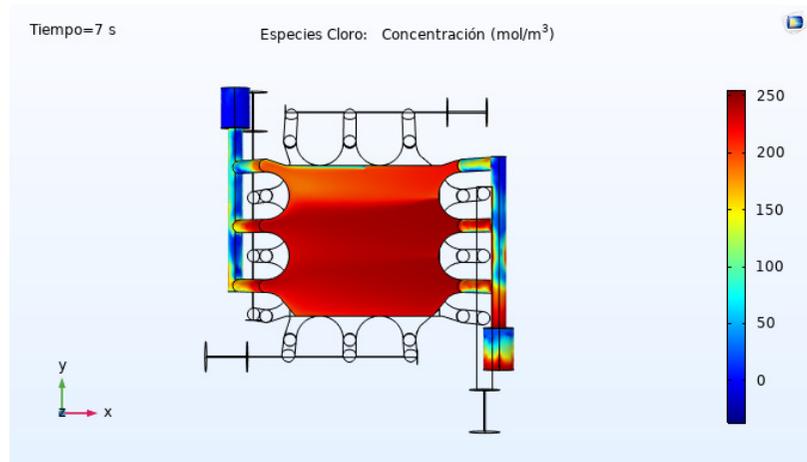


Figura 3.12. Distribución del flujo (HCl) en el espaciador de membrana a $t=7s$.

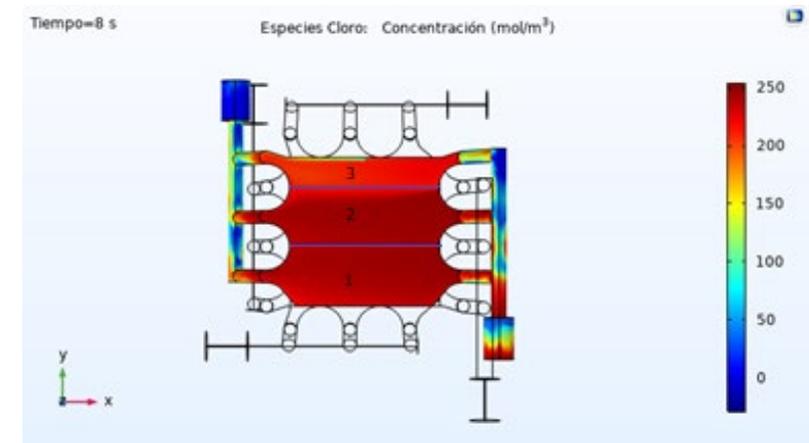


Figura 3.13. Distribución del flujo (HCl) en el espaciador de membrana a $t=8s$.

Además, debido también a esta característica, puede decirse que, dentro del sistema, existen flujos preferenciales (ver figura 3.6) por lo que, no hay una distribución completamente homogénea de los fluidos en el área efectiva de los espaciadores de membrana ampliando así, las zonas de no aprovechamiento.

Retomando la idea de la distribución de los fluidos, en las figuras 3.7 a la 3.9 se observa que, la entrada del flujo al espaciador no es uniforme, tal es el caso de las soluciones de NaOH y NaCl, dónde el fluido entra preferencialmente por el segundo subcabezal mientras en la solución de HCl se distribuye con los dos primeros subcabezales. Estas figuras se obtuvieron a partir del estudio de transporte de especies diluidas con dependencia del tiempo, por lo que, se observa el comportamiento de las especies en el modelo a un determinado tiempo del que comprende de 0 segundos a 20 segundos con intervalos de 0.1 segundos. Las figuras 3.10 a la 3.13 muestran la distribución de flujo en el área activa del espaciador de membrana, utilizando la solución de HCl como caso ilustrativo. En estas figuras pueden distinguirse claramente tres zonas. El líquido se distribuye primeramente por la zona 1, a medida que el tiempo transcurre el líquido fluye en la zona 2, y la zona 3 es donde flujo se distribuye finalmente, teniendo así, una distribución no homogénea, en consecuente, debe esperarse el tiempo requerido para que el sistema se estabilice, cuando el fluido se distribuya lo más homogéneo posible.

Los datos obtenidos de la simulación CFD en el área efectiva del espaciador de membrana están descritos en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 por cada solución.

En las figuras 3.14, 3.15 y 3.16, se representa el cambio de presión a lo largo del trayecto de los fluidos a través del espaciador de membrana teniendo así el mismo comportamiento de las tres soluciones utilizadas. El cambio de las curvas se debe a la orientación del espaciador de membrana en el modelo, teniendo así, que en el caso de las soluciones de HCl y NaOH la dirección de flujo es de derecha a izquierda sobre el eje x, mientras que en el caso de la solución de NaCl la dirección de flujo es de izquierda a derecha sobre el eje y por cada flujo volumétrico.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos en el espaciador de membrana de la solución de NaCl.

Solución de cloruro de sodio					
Densidad (kg/m ³)		Flujo volumétrico (L/h)	Velocidad intersticial (m/s)	Velocidad superficial (m/s)	Presión (Pa)
999.88		1	0.00296	0.00244	60.31
Longitud (m)		2	0.00590	0.00486	120.16
0.1		5	0.01481	0.01220	300.67
Fracción porosa		10	0.02961	0.02440	616.24
0.824		15	0.04451	0.03667	929.37
Viscosidad dinámica (Pa s)		20	0.05942	0.04896	1255.10
6.19E-04		25	0.07433	0.06125	1586.40
		30	0.08926	0.07355	1923.20

Tabla 3.2. Resultados obtenidos en el espaciador de membrana de la solución de HCl.

Solución de ácido clorhídrico					
Densidad (kg/m ³)		Flujo volumétrico (L/h)	Velocidad intersticial (m/s)	Velocidad superficial (m/s)	Presión (Pa)
996.33		1	0.00296	0.00244	62.25
Longitud (m)		2	0.00588	0.00484	124.34
0.1		5	0.01464	0.01207	312.25
Fracción porosa		10	0.02978	0.02453	638.05
0.824		15	0.04452	0.03669	964.17
Viscosidad dinámica (Pa s)		20	0.05968	0.04917	1303.10
6.41E-04		25	0.07477	0.06161	1647.70
		30	0.08984	0.07403	1997.90

Tabla 3.3. Resultados obtenidos en el espaciador de membrana de la solución de NaOH.

Solución de hidróxido de sodio					
Densidad (kg/m ³)		Flujo volumétrico (L/h)	Velocidad intersticial (m/s)	Velocidad superficial (m/s)	Presión (Pa)
1002.6		1	0.00296	0.00244	63.46
Longitud (m)		2	0.00587	0.00484	126.41
0.1		5	0.01456	0.01200	316.44
Fracción porosa		10	0.02965	0.02443	647.05
0.824		15	0.04426	0.03647	975.96
Viscosidad dinámica (Pa s)		20	0.05925	0.04882	1316.50
6.49E-04		25	0.07416	0.06111	1662.30
		30	0.08904	0.07337	2013.20

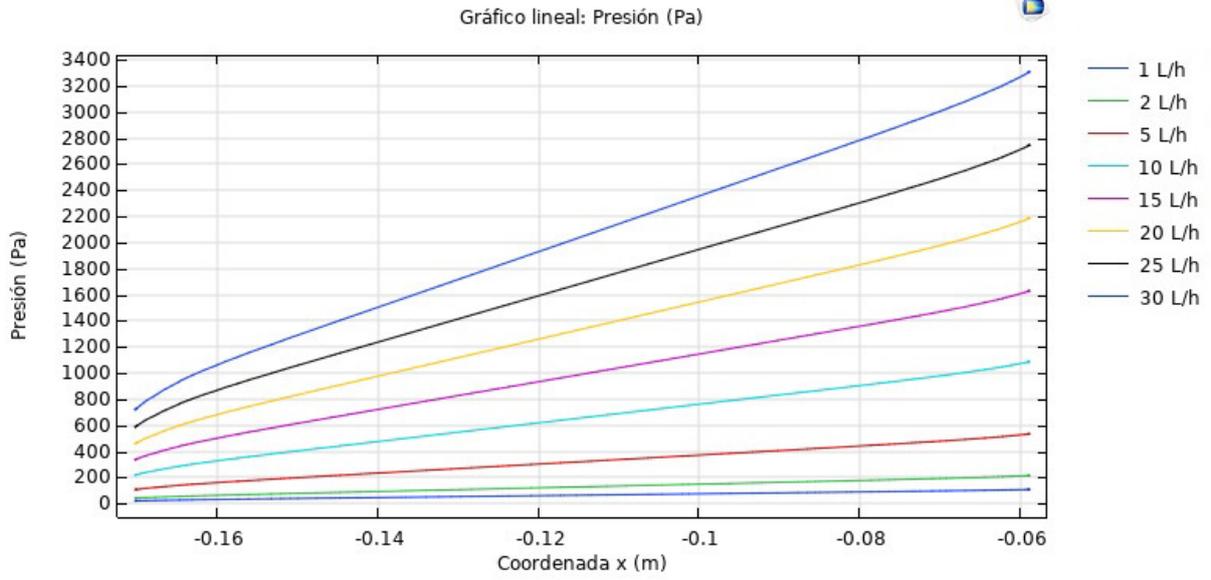


Figura 3.14. Presión vs Distancia en x en el espaciador de membrana de la solución de HCl.

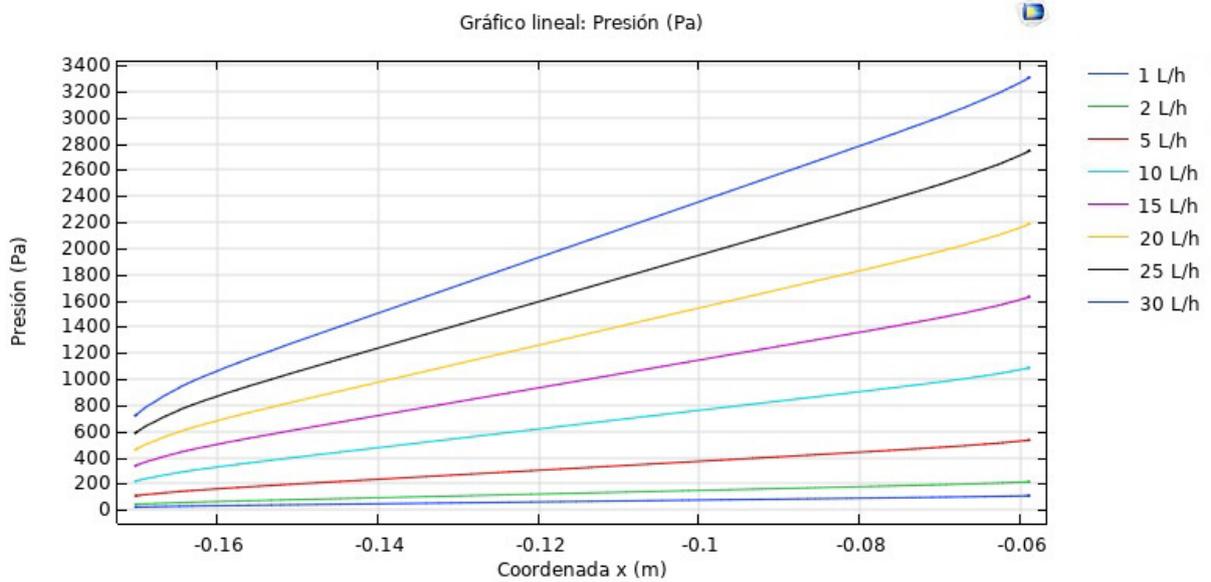


Figura 3.15. Presión vs Distancia en x en el espaciador de membrana de la solución de NaOH.

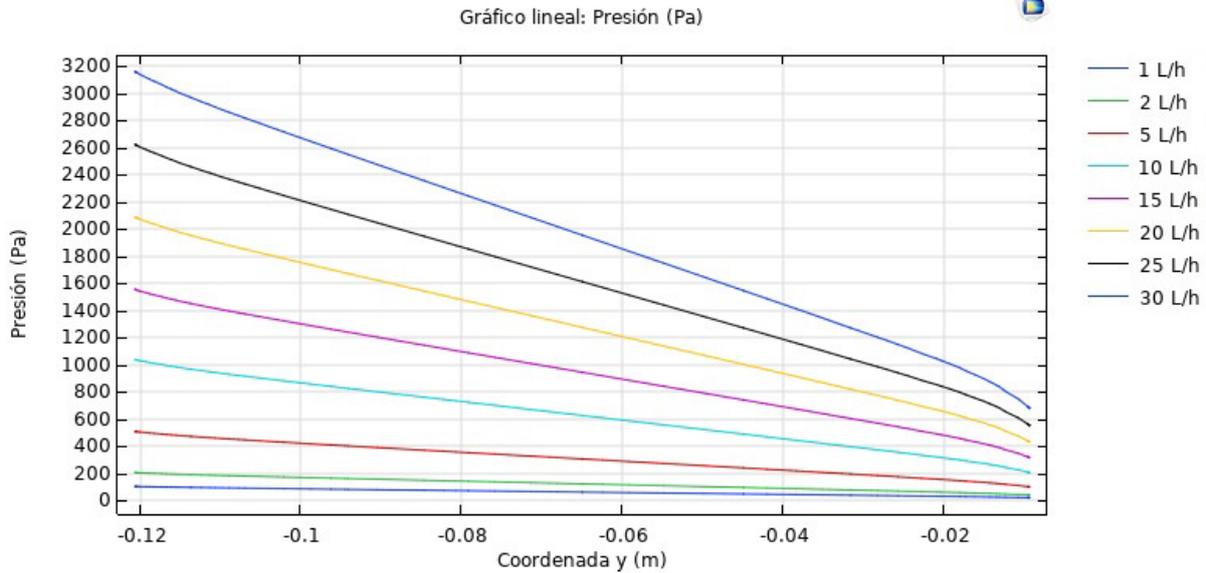


Figura 3.16. Presión vs Distancia en y en el espaciador de membrana de la solución de NaCl.

Las caídas de presión en todo el sistema (cabezales y espaciadores de membrana) se presentan en la tabla 3.4, donde las presiones de entrada y salida de cada una de las soluciones a cada flujo volumétrico son obtenidas promediando la presión sobre la superficie de las entradas y salidas, respectivamente. Debido a las condiciones de salida asumidas de cada flujo en el modelo donde la presión es igual a cero, en consecuencia, la presión obtenida a la salida de cada solución es muy baja por lo que pueden considerarse cero. Es importante tener en cuenta que los modelos son simplificaciones y que las presiones de salida obtenidas en el modelo no necesariamente significan que éstas presiones en el sistema real sean cero. La relación del flujo volumétrico respecto a las caídas de presión de cada solución es directamente proporcional, por lo que, a medida que aumenta el flujo volumétrico también aumenta la caída de presión (ver figura 3.17), en consecuencia, incrementa la energía requerida para hacer fluir las soluciones a través del sistema, lo que conlleva a aumentar la potencia de bombeo para vencer estas caídas de presión. También en la figura 3.17 se observa que la solución de HCl y NaOH tienen prácticamente el mismo comportamiento, mientras que la solución de NaCl presenta una pendiente ligeramente menor respecto a las otras dos soluciones. En la figura 3.18, se observa la distribución de la presión en el modelo de modo esquemático a un flujo de 30 L/h.

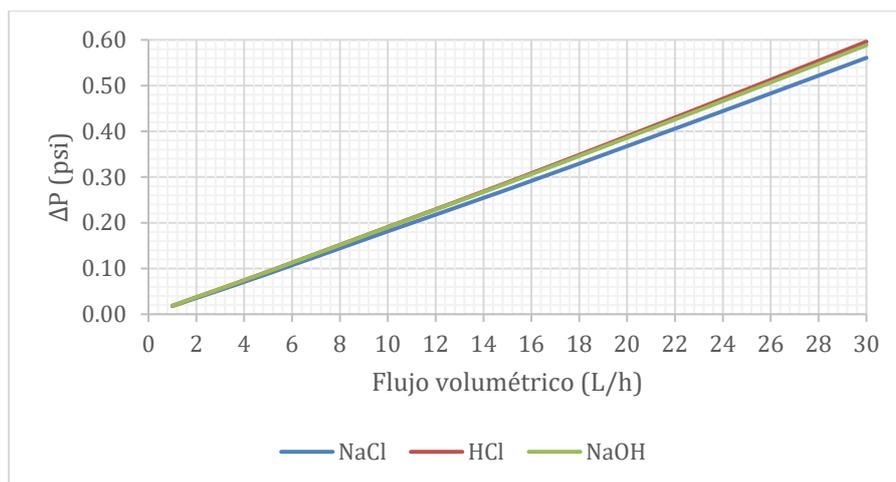


Figura 3.17. Caídas de presión respecto al flujo volumétrico de cada solución.

Tabla 3.4. Flujos volumétricos y caídas de presión de las soluciones en el sistema.

Flujo volumétrico (L/h)	Presión a la entrada (psi)	Presión a la salida (psi)	ΔP (psi)
Cloruro de Sodio			
1	0.0178	1.12E-08	0.0178
2	0.0355	1.18E-09	0.0355
5	0.0887	7.51E-07	0.0887
10	0.1813	3.67E-06	0.1813
15	0.2728	8.49E-06	0.2728
20	0.3676	1.53E-05	0.3676
25	0.4636	2.41E-05	0.4636
30	0.5609	3.42E-05	0.5608
Ácido Clorhídrico			
1	0.0186	1.05E-08	0.0186
2	0.0371	4.76E-09	0.0371
5	0.0934	8.30E-07	0.0934
10	0.1909	3.82E-06	0.1909
15	0.2883	8.61E-06	0.2883
20	0.3894	1.54E-05	0.3894
25	0.4920	2.44E-05	0.4920
30	0.5962	3.56E-05	0.5962
Hidróxido de sodio			
1	0.0187	1.03E-08	0.0187
2	0.0373	5.26E-09	0.0373
5	0.0933	7.07E-07	0.0933
10	0.1904	2.66E-06	0.1903
15	0.2866	6.44E-06	0.2866
20	0.3860	1.21E-05	0.3860
25	0.4866	1.20E-05	0.4866
30	0.5884	2.92E-05	0.5884

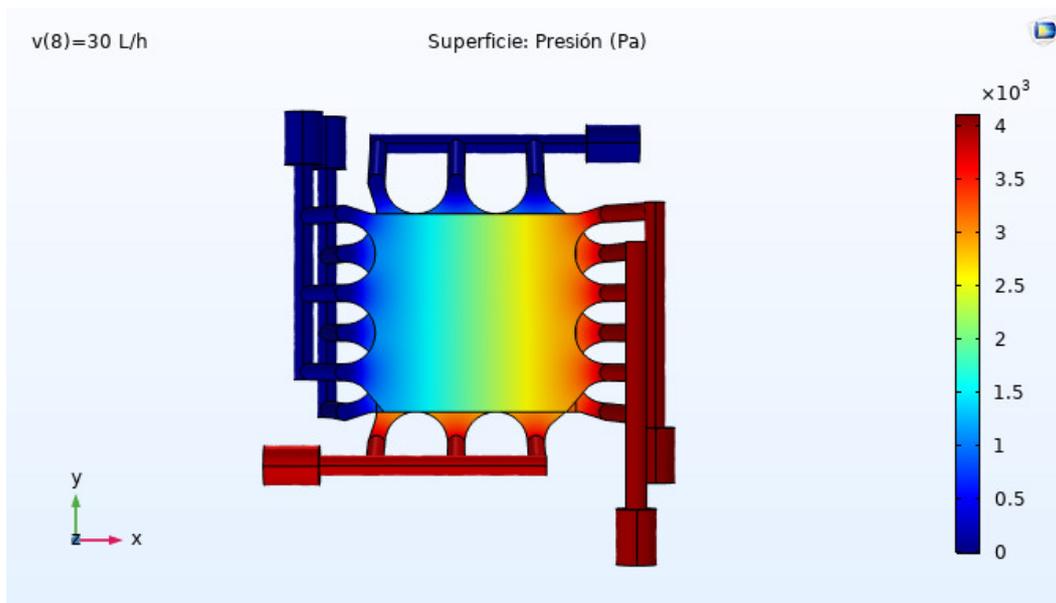


Figura 3.18. Distribución de la presión en el modelo a un flujo volumétrico de 30 L/h de cada solución.

3.1.2. Modelo en 3D de la malla de un espaciador de membrana ED-100-4ES

En la parte entretejida del espaciador de membrana mostrada en la figura 2.7, observamos cómo se comportan las soluciones en dicha zona, por ejemplo, las figuras 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 muestran el comportamiento de la solución de NaCl al estar en contacto con los filamentos del espaciador de membrana. Los filamentos de la malla entretejida provocan cambios de velocidad y zonas de mezclado que ayudan al transporte de los iones hacia o desde las membranas. En las figuras se observan cortes de la magnitud de velocidad en los planos xy, xz y yz para tener un amplio panorama del comportamiento del fluido.

Para observar el efecto de las mallas entretejidas en el transporte de masa, la figura 3.23 muestra los resultados de simulación de la transferencia de masa bajo condiciones de corriente límite. En esta figura, se representa la concentración de NaCl como un caso de ejemplo. En las figuras 3.24 y 3.25 se observan como es el movimiento de los iones del modelo tomando en cuenta la diferencia de concentración, las líneas de flujo están con base en el flux total.

Los coeficientes de transferencia de masa obtenidos en la parte de C_f de la figura 2.10 con relación a los distintos tipos de mallado controlados por la física del programa Comsol Multiphysics (ver tabla 3.5) no se alcanzó a tener una independencia del mallado respecto a los resultados de los coeficientes de transferencia de masa, comparando los coeficientes del mallado más fino con el mallado extra fino obtenemos 2.58% de cambio en el coeficientes de transferencia de masa del Na^+ y el 1% de cambio para el coeficiente de transferencia de masa del Cl^- . Para obtener una independencia entre estos factores se debe aumentar los detalles en el

mallado, pero al realizar esta acción en el programa, aumenta la memoria computacional, lo que es un inconveniente ya que el estudio es más tardado y no siempre se resuelve. En la figura 3.26 y 3.27 se observan como son los distintos tipos de mallado y qué tan detallados son en el modelo, en este caso, en la parte entretejida del espaciador de membrana.

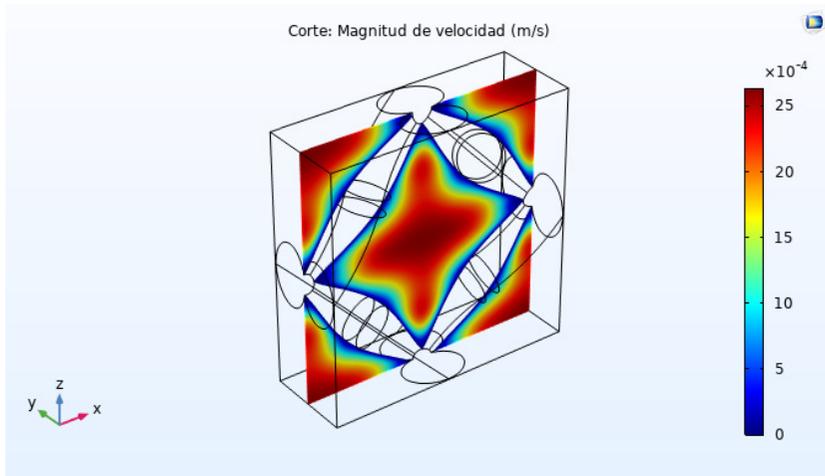


Figura 3.19. Corte a la mitad del modelo de la magnitud de velocidad en el plano xz.

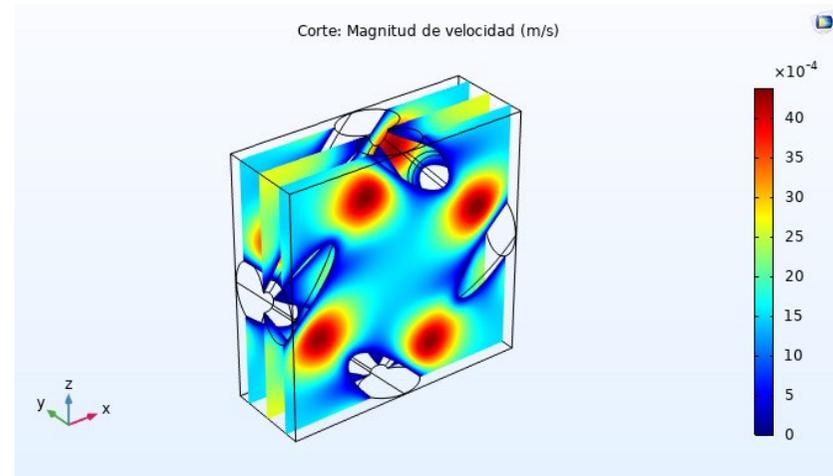


Figura 3.20. Cortes en el plano xz de la magnitud de la velocidad en el modelo.

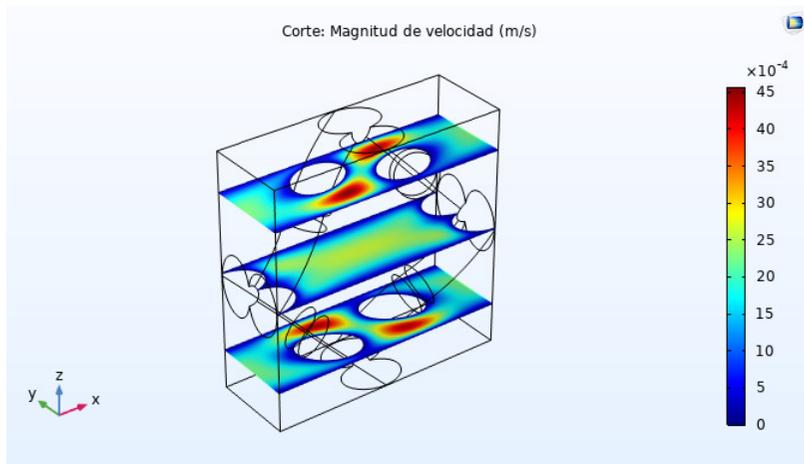


Figura 3.21. Cortes en el plano xy de la magnitud de la velocidad en el modelo.

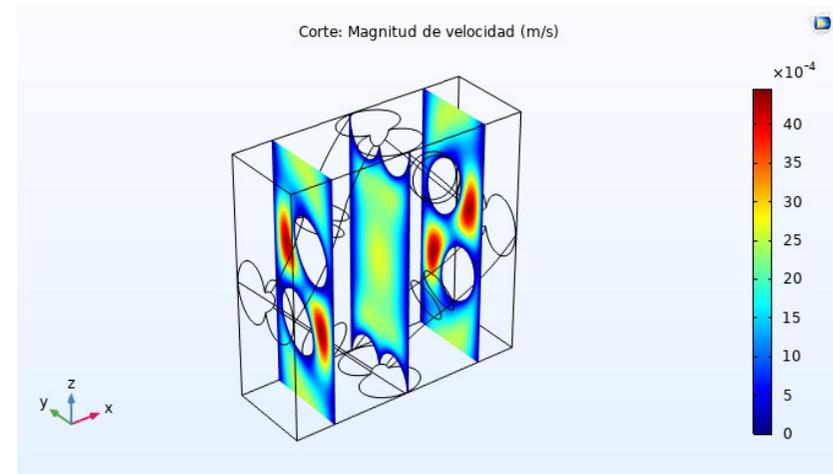


Figura 3.22. Cortes en el plano yz de la magnitud de la velocidad en el modelo.

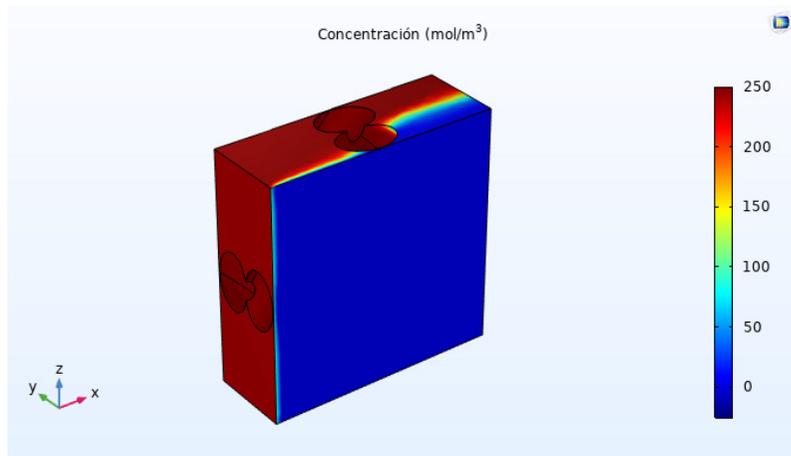


Figura 3.23. Diferencia de concentración del NaCl en el entretejido.

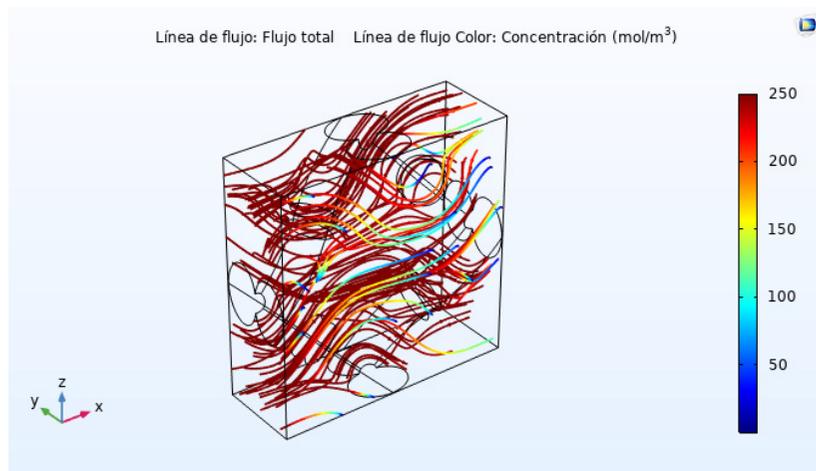


Figura 3.24. Líneas de flujo del ion cloruro a través del entretejido.

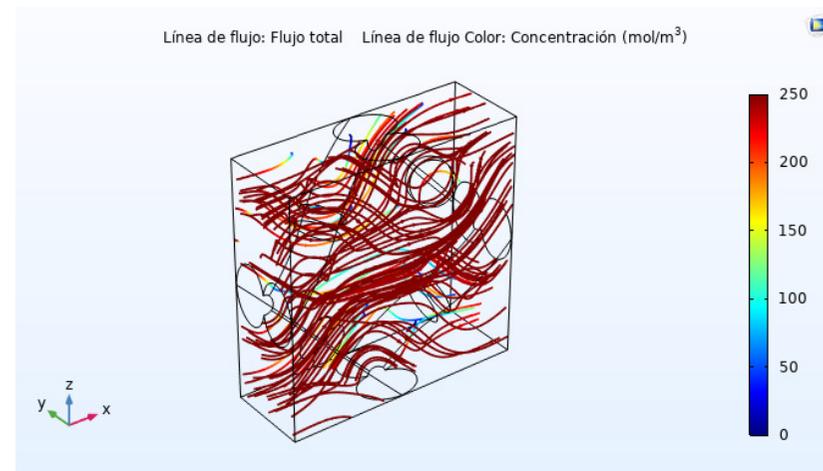


Figura 3.25. Líneas del ion sodio a través del entretejido.

Tabla 3.5. Tipos y valores del tamaño del mallado y de los coeficientes de transferencia.

Tipo de Mallado	Tamaño del elemento	Coeficiente de transferencia de masa (m/s)	
		Sodio (Na ⁺)	Cloro (Cl ⁻)
MEG	1.21E-04	3.51E-05	4.66E-05
MmG	7.92E-05	3.50E-05	4.51E-05
MG	5.53E-05	3.47E-05	4.39E-05
MN	4.37E-05	3.39E-05	4.24E-05
MF	3.05E-05	3.25E-05	4.10E-05
MmF	1.91E-05	3.10E-05	3.97E-05
MEF	1.09E-05	3.02E-05	3.93E-05

Donde:

MEG: mallado extremadamente grueso

MmG: mallado más grueso

MG: mallado grueso

MN: mallado normal

MF: mallado fino

MmF: mallado más fino

MEF: mallado extra fino

En las figuras 58 y 59 se encuentra como es la diferencia entre los mallados en el modelo.

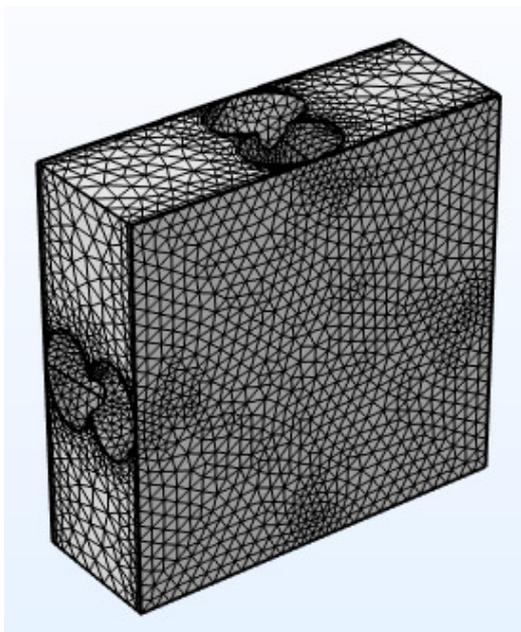


Figura 3.26. Representación esquemática del mallado tipo grueso.

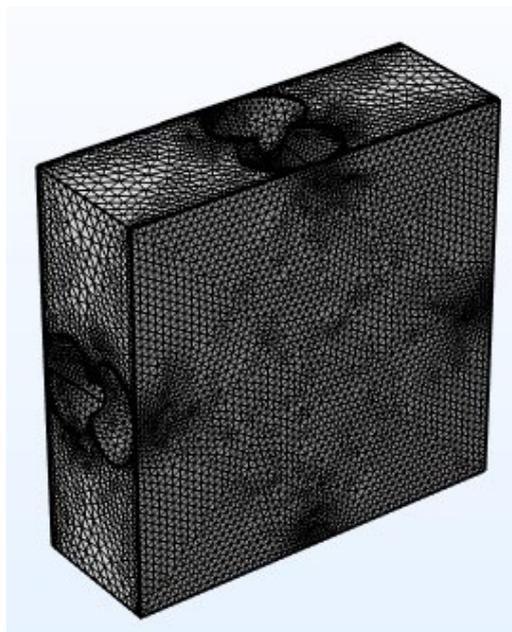


Figura 3.27. Representación esquemática del mallado tipo fino.

3.2. Estudio de Distribución de Corrientes

Al imponer potenciales de electrolito en el modelo, obtenemos la distribución del potencial a través de los compartimentos de las soluciones de cloruro de sodio, ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, así como, las membranas de intercambio catiónico, aniónico y membrana bipolar solamente. El modelo considera el transporte de iones a través de cada compartimento y membrana simplemente como el paso de cargas eléctricas a través de diferentes conductores. Cada membrana y compartimento posee su propia geometría 3D y conductividad. La geometría de cada compartimento se mostró en la figura 2.13 y la geometría de las membranas es la de un prisma cuadrangular de área igual al área activa de la celda (10 cm x 10 cm) y altura igual al espesor de las membranas.

Al modelo se le realizó un corte 1D sobre el eje z en el centro del área activa. La figura 3.28 muestra el potencial eléctrico a lo largo de este corte en una celda de dos unidades repetitivas, cada una compuesta por tres compartimentos y las respectivas membranas. Las líneas punteadas de color negro son las fronteras entre membranas y electrolitos. Las zonas marcadas con letras en la figura 60 son cada uno de los elementos de la celda (tabla 3.6).

Tabla 3.6. Zonas marcadas de la figura 60.

Zona	Letras
Compartimento de cloruro de sodio	A
Compartimento de hidróxido de sodio	B
Compartimento de ácido clorhídrico	C
Membrana catiónica	D
Membrana aniónica	E
Membrana bipolar parte aniónica	F
Membrana bipolar parte catiónica	G

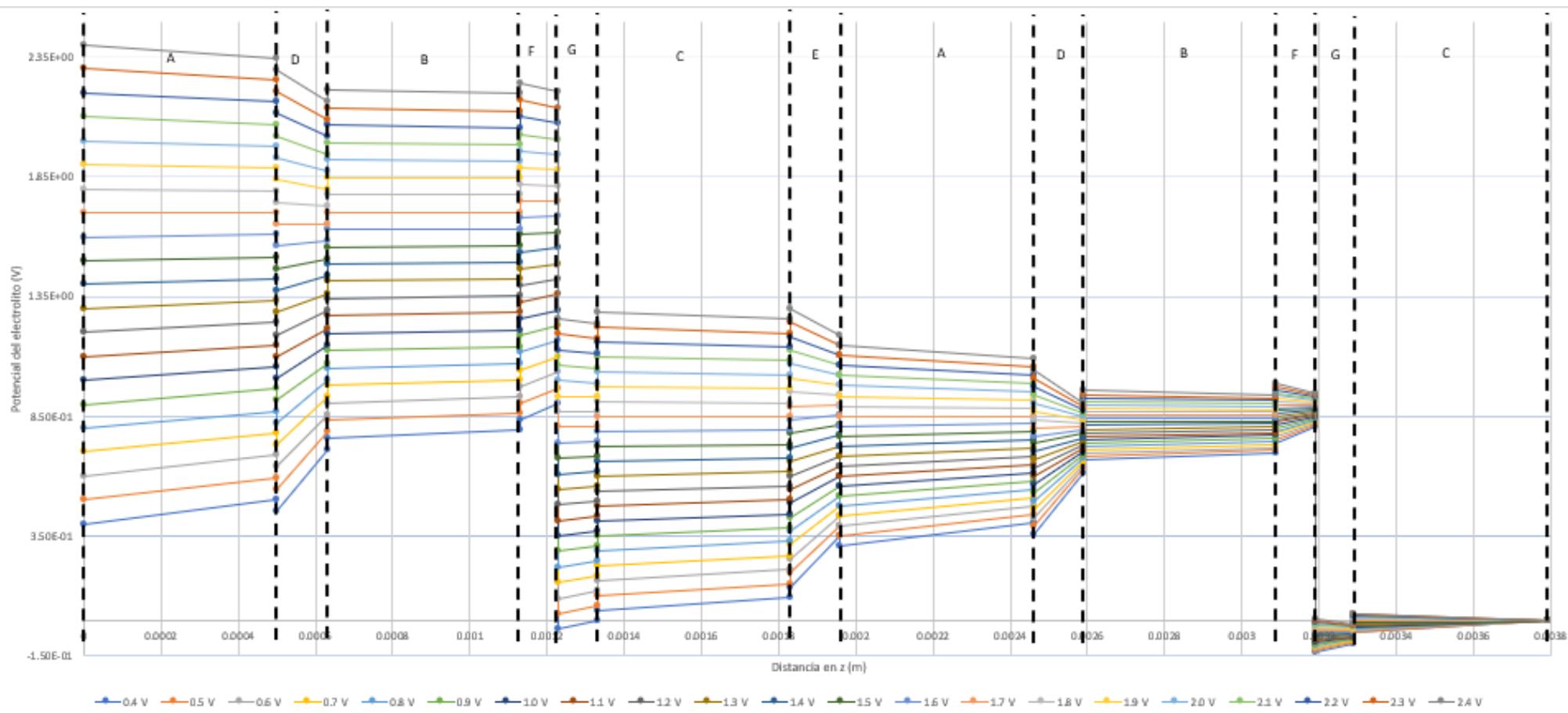


Figura 3.28. Potencial del electrolito vs distancia sobre el eje z del modelo en 3D.

En la figura 3.28 se observan que los potenciales de 0.4 a 1.6 V, en el cual va de derecha a izquierda; el comportamiento del potencial (representado por las líneas) a través de los compartimentos, así como en las membranas de intercambio iónico tienen una pendiente negativa, esto se interpreta, que a estos potenciales se lleva a cabo el proceso de descarga eléctrica en la celda, por lo que, la densidad de corriente eléctrica tiene valores negativos. A un potencial eléctrico de 1.7 V obtenemos una línea con pendiente cero aproximadamente, por lo que, la densidad de corriente eléctrica es prácticamente cero, además a partir de este hay cambio en el sentido de la pendiente. En los potenciales eléctricos que van de 1.8 a 2.4 V obtenemos pendientes positivas por lo que, se lleva a cabo el proceso de carga eléctrica de la celda, en consecuencia, la densidad de corriente eléctrica tiene valores positivos.

Con la figura 3.29, observamos que la relación entre la densidad de corriente respecto a la diferencia de potencial del electrolito es directamente proporcional. Con ayuda de la ecuación de ajuste de la figura 3.29 obtenemos el valor de 1.713 V en el cual la pendiente es exactamente cero, además coincide con la sumatoria de los potenciales de Donnan de toda la celda.

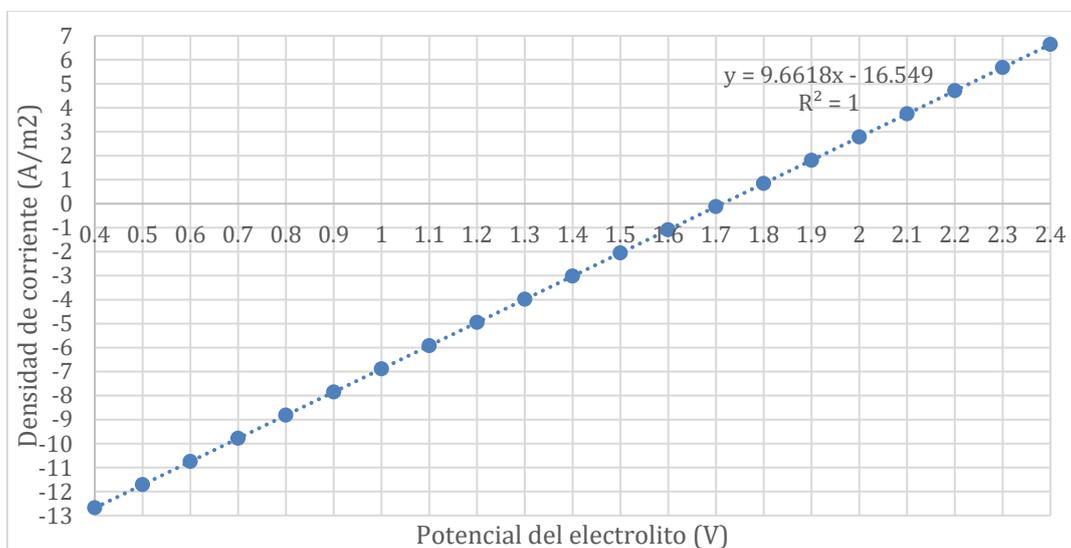


Figura 3.29. Densidad de corriente vs diferencia de potencial del electrolito.

El ajuste de los resultados de densidad de corriente versus el voltaje aplicado es:

$$y = 9.6618x - 16.549$$

$$x = \frac{y + 16.549}{9.6618}$$

Donde y es la densidad de corriente (A/m^2) y x es el potencial del electrolito (V), cuando la densidad de corriente toma el valor de cero obtenemos 1.713 V, como se mencionó anteriormente, este valor también es el resultado de la sumatoria de los potenciales de Donnan que son los equilibrios que existen entre las soluciones y las membranas de intercambio iónico (ver tabla 3.7)

Tabla 3.7. Potenciales de Donnan entre los compartimentos de las soluciones con las membranas de intercambio iónico de la celda.

Frontera ⁷	Potencial de Donnan (V)	
C. NaCl	0.049	
M. Catiónica		
C. NaOH	-0.044	-0.049
M.B. Aniónica		
M.B. Catiónica	-0.044	0.945
C. HCl		
M. Aniónica	0.044	-0.044
C. NaCl		
M. Catiónica	-0.049	0.049
C. NaOH		
M. B. Aniónica	0.945	-0.044
M. B. Catiónica		
C. HCl		-0.044
Σ	1.714	

El mayor valor en el potencial de Donnan corresponde a la membrana bipolar en el cual se conjuntan tres zonas, la parte aniónica, catiónica y en dónde se ve este salto (ver figura 3.28 entre las zonas F y G) de potencial en la zona de la película de agua de 9nm de espesor aproximadamente de la unión bipolar.

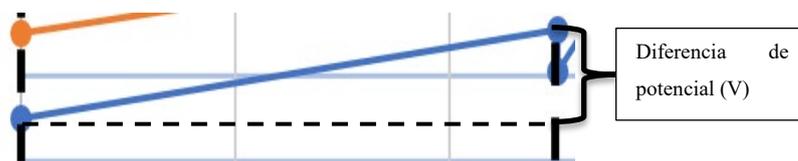


Figura 3.30. Representación gráfica de la diferencia de potencial (V) en el ancho de cada elemento de la celda.

En cada zona de la celda existen pérdidas óhmicas (resistencia eléctrica) representada en la figura 3.30, por ejemplo, en la misma figura se observa la diferencia de potencial con respecto a la distancia que es el ancho en este caso del compartimento de la solución del cloruro de sodio.

⁷ Donde C. es Compartimento, M. es Membrana y M. B. es Membrana bipolar.

Con la figura 3.31 observamos la distribución de las resistencias eléctricas en las zonas de la celda, se tomaron las resistencias eléctricas a un potencial de electrolito de 2.4 V teniendo una caída óhmica total de 0.57 V. Las zonas con mayor resistencia eléctrica se encuentran en las membranas de intercambio catiónico y aniónico, en las cuales tenemos el 26% y 19% del total, en comparación la membrana bipolar que comprenden la parte catiónica y aniónica sumada da el 20% del total. En el caso de las soluciones utilizadas, la solución con mayor resistencia eléctrica es el cloruro de sodio con un 19% del total, en comparación de la solución del hidróxido de sodio con un 6% del total.

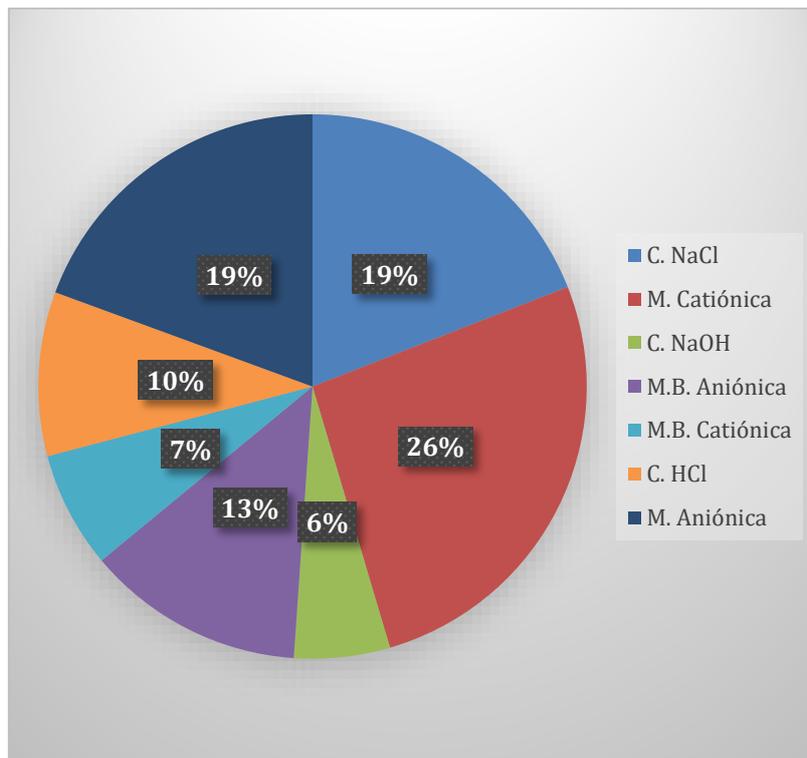


Figura 3.31. Porcentaje de las pérdidas de potencial eléctrico en cada zona de la celda a una diferencia de potencial eléctrico de 2.4V.

Conclusiones

Al desarrollar modelos geométricos detallados y precisos en 3D de una celda de electrodiálisis comercial, se realizaron simulaciones con la técnica de CFD para analizar el comportamiento hidrodinámico de cada fluido. Se observó la distribución de los fluidos a través de los cabezales, subcabezales y espaciadores de membrana, componentes de la celda de electrodiálisis. Además, se utilizó el modelo de Brinkman en la técnica de CFD para determinar la relación entre la caída de presión y el flujo volumétrico en toda la celda de electrodiálisis. También se aplicó el modelo de flujo en medios porosos para predecir y observar las caídas de presión a través del espaciador de membrana para cada flujo volumétrico de cada fluido.

Con el modelo del entretejido, se analizó la distribución del flujo a través de los espacios intersticiales formados por el espaciador de membrana y se estimaron los coeficientes de masa en relación con el tamaño del elemento del mallado en el modelo. Se observó que no se alcanza una independencia entre ellos, por lo que, si se desea llegar a una independencia, se debe realizar un mallado más fino y exacto del modelo, lo que requiere aumentar la memoria computacional del equipo utilizado.

El modelo en 3D de la celda de electrodiálisis incluye cabezales, subcabezales, espaciadores de membrana y membranas de intercambio iónico. Con la técnica de CFD aplicando el modelo de distribución de corriente secundaria, se examinaron las resistencias óhmicas presentes en las membranas y los espaciadores. Se propone que las membranas de intercambio iónico deben ser más conductoras para evitar las caídas excesivas de potencial y disminuir el problema de las corrientes parásitas, que significa que los iones deben transitar a través de las membranas de intercambio iónico y no por los ductos donde fluyen las soluciones; estos factores afectan el almacenamiento de energía eléctrica.

En comparación con otras tecnologías para el almacenamiento de energía eléctrica que existen en el mercado, esta propuesta de almacenamiento de energía eléctrica es interesante debido a que aprovecha las reacciones de neutralización. Por lo tanto, no utiliza químicos tóxicos de alto impacto ambiental o que sean de alta demanda debido a su escasez en forma natural o alto coste de producción; esto hace que sea competitivo en la industria eléctrica.

Bibliografía

- [1] J. A. Monreal Cruz, D. De la Merced Jiménez y J. J. Vidal Amaro, Catálogo de tecnologías de almacenamiento de energía, Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2020.
- [2] EASE/EERA, EUROPEAN ENERGY STORAGE TECHNOLOGY DEVELOPMENT ROADMAP TOWARDS 2030, 2017.
- [3] IRENA, «Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [4] U. DOE, «DOE Global Energy Storage Database,» Departamen of Energy, Office of Electricity & Energy Reliability, United States, 2019.
- [5] S. L. Vazquez, «Energy storage systems for transport and grid applications., 57(12), 3881-3895.,» 2010.
- [6] Society, IEEE Power and Energy, «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std. 519-2014.,» 2014.
- [7] C. Zuo, L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, T. Wik y M. Pecht, «A review of fractional-order techniques applied to lithium-ion batteries, lead-acid batteries, and supercapacitors,» *Journal of Power Sources*, 390, 286–296., 2018.
- [8] D. A. J. Rand y P. T. Moseley, «SECONDARY BATTERIES – LEAD– ACID SYSTEMS,» de *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Amsterdam, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 2009, pp. 550-575.
- [9] X. Luo, J. Wang, M. Dooner y J. Clarke, «Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,» *Applied Energy*, 137, 511–536., 2015.
- [10] Danish Energy Agency-ENERGINET, «Technology Data for Energy Storage,» 12 07 2019. [En línea]. Available: https://ens.dk/en:https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_energy_storage.pdf.
- [11] Deloitte, «Energy Storage: Tracking the technologies that will transform the power sector.,» 9 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/energy-resources/us-er->

- energy-storage-tracking-technologies-transform-power-sector.pdf. [Último acceso: 10 Octubre 2022].
- [12] DNVGL, «Safety, operation and performance of grid-connected energy storage systems,» 2017. [En línea]. Available: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2017-09/DNVGL-RP-0043.pdf>.
- [13] G. J. May, A. Davidson y B. Monahov, «Lead batteries for utility energy storage,» *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157., 2018.
- [14] E. DTU, «Energy storage technologies in a Danish and international perspective.,» 2019.
- [15] S. Koochi-Fayegh y M. A. Rosen, «A review of energy storage types, applications and recent developments.,» *Journal of Energy Storage*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>, 2020.
- [16] B. Scrosati y J. Garche, «Lithium batteries: Status, prospects and future,» *J. Power Resources*, vol. 195, no. 9. pp 2419-2430., 2010.
- [17] P. L'Abbate, M. Dassisti y A. G. Olabi, «Small-Size Vanadium Redox Flow Batteries: An Environmental Sustainability Analysis via LCA.,» de *Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies: The Italian Experience*, Springer International Publishing, 2019, pp. 61-78.
- [18] T. Jirabovornwisut y A. Arpornwichanop, «A review on the electrolyte imbalance in vanadium redox flow batteries,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(45), 24485–24509., 2019.
- [19] M. Skyllas-Kazacos, «SECONDARY BATTERIES – FLOW SYSTEMS,» de *Vanadium Redox-Flow Batteries.*, Amsterdam, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 2009, pp. 444-453.
- [20] K. Lourenssen, J. Williams, F. Ahmadpour, R. Clemmer y S. Tasnim, «Vanadium redox flow batteries: A comprehensive,» *Journal of Energy Storage*, 25, 100844., 2019.
- [21] EPRI-DOE., *Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications.*, Palo Alto and Washington DC., 2003.
- [22] A. Afif, S. M. H. Rahman, A. T. Azad, J. Zaini, M. A. Islan y A. K. Azad, «Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage,» *Journal of Energy Storage*, 25, 100852., 2019.

- [23] A. Berrueta, A. Ursua, I. S. Martín, A. Eftekhari y P. Sanchis, «Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends,» *IEEE Access*, 7, 50869–50896., 2019.
- [24] M. Technologies., «Datasheet: 204 V 3.75 F Ultracapacitor Module.,» 2019.
- [25] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud y D. Habibi, «Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1205–1230., 2018.
- [26] A. Culcasi, L. Gurreri, A. Zaffora, A. Cosenza, A. Tamburini y G. Micale, «On the modelling of an Acid/Base Flow Battery: An innovative electrical energy storage device based on pH and salinity gradients,» *Applied Energy* 277 (2020) 115576, 19 Julio 2020.
- [27] L. Gurreri, A. Tamburini, A. Cipollina, G. Micale y M. Ciofalo, «CFD prediction of concentration polarization phenomena in spacer-filled channels for reverse electrodialysis,» *Journal of Membrane Science* 468 (2014) 133–148, 13 Mayo 2014.
- [28] E. Güler, R. Elizen, M. Saakes y K. Nijmeijer, «Micro-structured membranes for electricity generation by reverse electrodialysis,» *Journal of Membrane Science* 458 (2014) 136–148, 25 Enero 2014.
- [29] 1.-2. COMSOL, «Battery Design Module User's Guide». Estados Unidos Patente 7,519,518; 7,596,474; 7,623,991; 8,457,932; 9,098,106; 9,146,652; 9,323,503; 9,372,673; 9,454,625; 10,019,544; 10,650,177; 10,776,541., 2020.
- [30] F. Coeuret, Introducción a la Ingeniería Electroquímica, Barcelona: REVERTÉ, S.A., 1992.
- [31] J. A. Ibañez Mengual, Fundamentos de los procesos de transporte y separación en membranas, EDITUM, 1989.
- [32] D. Calderón Villegas, «Integral S.A.,» 12 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.integral.com.co/dinamica-de-fluidos-computacional/>. [Último acceso: 10 Abril 2023].
- [33] f. Funktionelle Membranen und Anlagentechnologie, *Membrane Module FT-ED-100-3-10*.
- [34] f. Functional membranes for fuel cells, *Ion Exchange Membranes*.
- [35] A. Ortega, L. F. Arenas, J. J. Pijpers, D. L. Vicencio, J. C. Martínez, F. A. Rodríguez y E. P. Rivero, «Modelling water dissociation, acid-base neutralization and ion transport in bipolar membranes for acid-base flow batteries,» *Journal of Membrane Science* 641 (2022) 119899, 2021.

Abreviaturas

IEM	Membrana de intercambio iónico selectivo
CEM	Membrana de intercambio catiónico
AEM	Membrana de intercambio aniónico
CFD	Dinámica de fluidos computacional
VRES	Fuentes de energía renovables variables
PHS	Almacenamiento hidroeléctrico por rebombeo
CAES	Almacenamiento energético de aire comprimido
IRENA	Agencia internacional de energías renovables
BESS	Sistema de almacenamiento energético con baterías
DOE	Departamento de energía de EE. UU.
HT	Turbina hidroeléctrica
VRLA	Batería de ácido-plomo regulada por válvula
LIB	Batería de ion litio
MCMB	Microesferas de carbono meso
LFP	Fosfato de hierro de litio
CAPEX	Gasto en capital
BOP	Balance de planta
VRF	Batería de flujo vanadio-redox
DTU	Universidad tecnológica de Dinamarca
A-CAES	Almacenamiento energético de aire comprimido adiabático
D-CAES	Almacenamiento energético de aire comprimido diabático
AA	Almacenamiento adiabático
UPS	Sistema de almacenamiento ininterrumpido
FESS	Sistema de almacenamiento energético de volante de inercia
CGFB	Batería de flujo gradiente de concentración
ED	Electrodialisis
RED	Electrodialisis inversa
BPM	Membrana bipolar
AB-FBR	Batería de flujo ácido-base
BMED	Membrana bipolar de electrodiálisis

BMRED	Membraba bipolar de electrodiálisis inversa
PRO	Ósmosis retardada por presión
RPU	Unidad de procesamiento resistivo

Apéndice

Tabla A. Valores de la figura 3.28.

z (m)	0	0.0005	0.0005	0.00063	0.00063	0.00113	0.00113	0.00123	0.00123	0.00133	0.00133
Potencial del electrolito (V)	0.00379	0.00329	0.00329	0.00319	0.00319	0.00309	0.00309	0.00259	0.00259	0.00246	0.00246
	5.41E-18	-0.052908	-0.096967	-0.13447	0.81005	0.74011	0.69605	0.6653	0.61618	0.35988	0.40899
	5.00E-18	-0.048878	-0.092937	-0.12758	0.81694	0.75232	0.70827	0.67986	0.63074	0.39396	0.44308
	4.59E-18	-0.044848	-0.088907	-0.1207	0.82383	0.76454	0.72048	0.69442	0.6453	0.42804	0.47716
	4.17E-18	-0.040818	-0.084877	-0.11381	0.83071	0.77675	0.7327	0.70897	0.65985	0.46212	0.51124
	3.76E-18	-0.036788	-0.080847	-0.10692	0.8376	0.78897	0.74491	0.72353	0.67441	0.4962	0.54532
	3.35E-18	-0.032758	-0.076816	-0.10004	0.84449	0.80118	0.75712	0.73809	0.68897	0.53028	0.5794
	2.94E-18	-0.028727	-0.072786	-0.09315	0.85138	0.8134	0.76934	0.75264	0.70353	0.56436	0.61348
	2.53E-18	-0.024697	-0.068756	-0.086263	0.85826	0.82561	0.78155	0.7672	0.71808	0.59844	0.64756
	2.11E-18	-0.020667	-0.064726	-0.079376	0.86515	0.83783	0.79377	0.78176	0.73264	0.63252	0.68164
	1.70E-18	-0.016637	-0.060696	-0.072489	0.87204	0.85004	0.80598	0.79631	0.7472	0.6666	0.71572
	1.29E-18	-0.012607	-0.056666	-0.065602	0.87892	0.86226	0.8182	0.81087	0.76175	0.70068	0.7498
	8.77E-19	-0.0085767	-0.052636	-0.058715	0.88581	0.87447	0.83041	0.82543	0.77631	0.73476	0.78388
	4.65E-19	-0.0045466	-0.048606	-0.051828	0.8927	0.88669	0.84263	0.83999	0.79087	0.76884	0.81796
	5.28E-20	-5.16E-04	-0.044575	-0.044942	0.89958	0.8989	0.85484	0.85454	0.80542	0.80292	0.85204
	-3.59E-19	0.0035136	-0.040545	-0.038055	0.90647	0.91112	0.86706	0.8691	0.81998	0.837	0.88612
	-7.72E-19	0.0075438	-0.036515	-0.031168	0.91336	0.92333	0.87927	0.88366	0.83454	0.87108	0.9202
	-1.18E-18	0.011574	-0.032485	-0.024281	0.92025	0.93555	0.89149	0.89821	0.84909	0.90516	0.95428
	-1.60E-18	0.015604	-0.028455	-0.017394	0.92713	0.94776	0.9037	0.91277	0.86365	0.93924	0.98836
	-2.01E-18	0.019634	-0.024425	-0.010507	0.93402	0.95997	0.91592	0.92733	0.87821	0.97332	1.0224
-2.42E-18	0.023664	-0.020395	-0.0036198	0.94091	0.97219	0.92813	0.94188	0.89276	1.0074	1.0565	
-2.83E-18	0.027694	-0.016364	0.0032672	0.94779	0.9844	0.94035	0.95644	0.90732	1.0415	1.0906	

Tabla A. Continúa tabla.

v (m)	0.00183	0.00183	0.00196	0.00196	0.00246	0.00246	0.00259	0.00259	0.00309	0.00309	0.00319
Potencial de electrolito (V)	0.00196	0.00196	0.00183	0.00183	0.00133	0.00133	0.00123	0.00123	0.00113	0.00113	0.00063
	0.30546	0.34952	0.1387	0.094646	0.041642	-0.0024172	-0.040032	0.90449	0.8345	0.79044	0.75967
	0.34743	0.39148	0.19673	0.15267	0.1037	0.059645	0.024896	0.96942	0.90476	0.8607	0.83228
	0.38939	0.43345	0.25475	0.2107	0.16577	0.12171	0.089824	1.0343	0.97502	0.93096	0.90488
	0.43136	0.47542	0.31278	0.26872	0.22783	0.18377	0.15475	1.0993	1.0453	1.0012	0.97748
	0.47333	0.51739	0.37081	0.32675	0.28989	0.24583	0.21968	1.1642	1.1155	1.0715	1.0501
	0.51529	0.55935	0.42883	0.38477	0.35195	0.3079	0.28461	1.2291	1.1858	1.1417	1.1227
	0.55726	0.60132	0.48686	0.4428	0.41402	0.36996	0.34953	1.2941	1.2561	1.212	1.1953
	0.59923	0.64329	0.54488	0.50082	0.47608	0.43202	0.41446	1.359	1.3263	1.2823	1.2679
	0.64119	0.68525	0.60291	0.55885	0.53814	0.49408	0.47939	1.4239	1.3966	1.3525	1.3405
	0.68316	0.72722	0.66093	0.61687	0.6002	0.55615	0.54432	1.4888	1.4668	1.4228	1.4131
	0.72513	0.76919	0.71896	0.6749	0.66227	0.61821	0.60924	1.5538	1.5371	1.493	1.4857
	0.7671	0.81115	0.77698	0.73292	0.72433	0.68027	0.67417	1.6187	1.6074	1.5633	1.5583
	0.80906	0.85312	0.83501	0.79095	0.78639	0.74233	0.7391	1.6836	1.6776	1.6336	1.6309
	0.85103	0.89509	0.89303	0.84897	0.84845	0.8044	0.80403	1.7486	1.7479	1.7038	1.7035
	0.893	0.93706	0.95106	0.907	0.91052	0.86646	0.86896	1.8135	1.8181	1.7741	1.7761
	0.93496	0.97902	1.0091	0.96502	0.97258	0.92852	0.93388	1.8784	1.8884	1.8443	1.8487
	0.97693	1.021	1.0671	1.023	1.0346	0.99058	0.99881	1.9433	1.9586	1.9146	1.9213
	1.0189	1.063	1.1251	1.0811	1.0967	1.0526	1.0637	2.0083	2.0289	1.9848	1.9939
	1.0609	1.1049	1.1832	1.1391	1.1588	1.1147	1.1287	2.0732	2.0992	2.0551	2.0665
1.1028	1.1469	1.2412	1.1971	1.2208	1.1768	1.1936	2.1381	2.1694	2.1254	2.1391	
1.1448	1.1889	1.2992	1.2551	1.2829	1.2388	1.2585	2.203	2.2397	2.1956	2.2117	

Tabla A. Continúa tabla

z (m)	0.00319	0.00329	0.00329	0.00379
Potencial de electrodo (V)	0.00063	0.0005	0.0005	0
	0.71055	0.45434	0.50346	0.4
	0.78316	0.54646	0.59558	0.5
	0.85576	0.63858	0.6877	0.6
	0.92836	0.7307	0.77982	0.7
	1.001	0.82282	0.87194	0.8
	1.0736	0.91494	0.96406	0.9
	1.1462	1.0071	1.0562	1
	1.2188	1.0992	1.1483	1.1
	1.2914	1.1913	1.2404	1.2
	1.364	1.2834	1.3325	1.3
	1.4366	1.3755	1.4247	1.4
	1.5092	1.4677	1.5168	1.5
	1.5818	1.5598	1.6089	1.6
	1.6544	1.6519	1.701	1.7
	1.727	1.744	1.7931	1.8
	1.7996	1.8361	1.8852	1.9
	1.8722	1.9282	1.9774	2
	1.9448	2.0204	2.0695	2.1
	2.0174	2.1125	2.1616	2.2
	2.09	2.2046	2.2537	2.3
	2.1626	2.2967	2.3458	2.4