



ANDRIAN POTAP

Licenciado em Ciências da Engenharia Química e Bioquímica

# ENHANCING ELECTRICITY GENERATION BY REVERSE ELECTRODIALYSIS

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA E BIOQUÍMICA

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2025





# ENHANCING ELECTRICITY GENERATION BY REVERSE ELECTRODIALYSIS

**ANDIRAN POTAP**

Licenciado em Ciências da Engenharia Química e Bioquímica

**Orientador:** Doutor Sylwin Pawlowski,  
Investigador Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

## Júri:

**Presidente:** Professor Doutor Mário Eusébio,  
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

**Arguentes:** Professor Doutor Vítor Geraldes,  
Professor Associado, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa

**Orientador:** Doutor Sylwin Pawlowski,  
Investigador Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa



## **Enhancing Electricity Generation by Reverse Electrodialysis**

Copyright © Andrian Potap, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



“Try not to become a man of success, but rather  
become a man of value.” (Albert Einstein).



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representa o culminar de um percurso desafiante e enriquecedor, que não teria sido possível sem o apoio, a orientação e o incentivo de várias pessoas a quem expresso a minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à NOVA School of Science and Technology pela excelência do ensino, pelas oportunidades de crescimento académico e profissional e pelo ambiente inspirador que proporcionou ao longo do meu percurso. A todos os professores e colegas que contribuíram para a minha formação, deixo o meu sincero reconhecimento.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Doutor Sylwin Pawlowski, pelo seu inestimável apoio, pela orientação dedicada e pelos conhecimentos partilhados. A sua paciência, disponibilidade e incentivo foram fundamentais para a concretização deste trabalho, e por isso expresso a minha mais sincera gratidão.

Aos meus familiares, cuja confiança e apoio incondicional foram pilares fundamentais ao longo deste percurso, expresso a minha mais profunda gratidão. A vossa presença, incentivo e compreensão foram essenciais para ultrapassar os desafios que enfrentei. Um agradecimento muito especial à minha mãe Lyubov, pelo amor inabalável, pelo apoio incansável e pelas palavras de encorajamento que, em cada momento, me deram força para seguir em frente. Sem o seu suporte, este caminho teria sido muito mais difícil.

À minha namorada, Madalena Teixeira, pelo amor, paciência e apoio incondicional, mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigado por estares sempre ao meu lado, a incentivar-me e a recordar-me da importância de cada pequena conquista ao longo do caminho.

Aos meus amigos, pelo companheirismo, pelas palavras de motivação e pelas pausas necessárias que ajudaram a manter o equilíbrio entre o estudo e a vida pessoal. A vossa amizade foi e continuará a ser uma parte essencial da minha jornada.

Um agradecimento muito especial a Mekhna Venu, pela sua ajuda e disponibilidade ao longo da realização desta dissertação. A sua orientação, partilha de conhecimentos e apoio foram essenciais para ultrapassar diversos desafios deste trabalho. A sua generosidade e espírito colaborativo fizeram toda a diferença, e sou profundamente grato por isso.

Por fim, um agradecimento especial à minha fiel companheira, a minha cadela Kima, cuja presença inigualável trouxe momentos de alegria, conforto e descontração ao longo deste processo. O seu carinho incondicional e energia contagiante foram, sem dúvida, um apoio essencial.

A todos vós, o meu mais sincero obrigado.

“You cannot teach a man anything; you can only help him discover it in himself.” (Galileo).



## RESUMO

A eletrodialise inversa tem-se destacado como uma tecnologia promissora para a conversão de energia do gradiente de salinidade em eletricidade. No entanto, a sua eficiência é fortemente influenciada pela geometria dos espaçadores, que afetam a distribuição do fluxo e a resistência elétrica do sistema. Neste estudo, investigou-se a aplicação do efeito Coanda no design dos espaçadores, com o objetivo de otimizar a circulação do fluido e melhorar o desempenho da eletrodialise inversa. Foram desenvolvidos e fabricados, através de impressão 3D, espaçadores inovadores que foram comparados com espaçadores comerciais, avaliando parâmetros como a tensão de circuito aberto, resistência elétrica do módulo e densidade de potência bruta. No total, foram testados oito espaçadores com diferentes geometrias e configurações.

Os resultados demonstraram que o espaçador Coanda 2x com grelha apresentou um desempenho superior ao espaçador comercial com grelha. O valor máximo da tensão de circuito aberto atingido foi de 0.439 V, superior ao valor máximo de 0.434 V do espaçador comercial. Verificou-se ainda uma redução da resistência elétrica do módulo para 6.27  $\Omega$  e um aumento da densidade de potência bruta para  $1.53 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , em comparação com os 10.56  $\Omega$  e  $9.50 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  obtidos com o espaçador comercial. As melhorias na densidade de potência relativamente ao espaçador comercial foram de 61,1% no modelo Coanda 2x, 57,9% no Coanda 3x e 51,6% no Coanda 4x com grelha. No entanto, a análise de fluxo realizada num módulo transparente indicou que, apesar do efeito Coanda promover a adesão do fluido às superfícies das estruturas do espaçador, o refluxo esperado não ocorreu devido à predominância do fluxo ascendente, limitando o comportamento hidrodinâmico inicialmente projetado.

Este trabalho contribui para um melhor entendimento da influência da geometria dos espaçadores na eficiência da eletrodialise inversa, demonstrando que a otimização hidrodinâmica pode melhorar a conversão energética.

**Palavras-chave:** eletrodialise inversa, efeito Coanda, espaçadores, otimização de fluxo, impressão 3D.



## ABSTRACT

Reverse electrodialysis (RED) has gained attention as a promising technology for converting salinity gradient energy into electricity. However, its efficiency is highly dependent on the geometry of the spacers, which directly affect flow distribution and the system's electrical resistance. This study investigated the application of the Coanda effect in spacer design, aiming to optimize fluid circulation and improve RED performance. Innovative spacers were developed and fabricated using 3D printing, and their performance was compared to that of commercial spacers. The evaluation considered open-circuit voltage (OCV), electrical resistance of the module, and gross power density. A total of eight spacers with different geometries and configurations were tested.

The results showed that the Coanda 2x spacer with mesh exhibited superior performance compared to the commercial mesh spacer. The maximum open-circuit voltage recorded was 0.439 V, higher than the 0.434 V achieved by the commercial model. Additionally, the electrical resistance of the module was reduced to 6.27  $\Omega$ , and the gross power density increased to  $1.53 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , compared to 10.56  $\Omega$  and  $9.50 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  for the commercial spacer. The improvements in gross power density relative to the commercial reference were 61.1% for the Coanda 2x model, 57.9% for the Coanda 3x, and 51.6% for the Coanda 4x with mesh.

However, flow analysis in a transparent module revealed that although the Coanda effect promoted fluid adhesion to the surfaces of the internal structures, the expected lateral recirculation did not occur due to the dominance of upward flow, which limited the intended hydrodynamic behaviour.

This study contributes to a deeper understanding of how spacer geometry influences RED efficiency, demonstrating that hydrodynamic optimization can significantly enhance energy conversion performance.

**Keywords:** reverse electrodialysis, Coanda effect, spacers, flow optimization, 3D printing.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DE ARTE.....</b>	<b>3</b>
2.1	Energia do gradiente de salinidade .....	3
2.1.1	Energia livre de Gibbs .....	5
2.1.2	Tecnologias de extração de energia do gradiente de salinidade .....	6
2.2	Eletrodiálise inversa.....	9
2.2.1	Tensão de circuito aberto .....	11
2.2.2	Resistência do módulo de eletrodiálise inversa .....	12
2.2.3	Densidade de potência .....	13
2.2.4	Membrana de permuta iônica .....	14
2.2.5	Efeito dos espaçadores num módulo de eletrodiálise inversa .....	19
2.2.6	Sistemas de elétrodos .....	19
2.2.7	Polarização da concentração.....	20
2.2.8	<i>Fouling</i> de membranas.....	21
2.2.9	Efeito de sombra dos espaçadores .....	21
2.2.10	Efeito da variação dos parâmetros de operação do processo.....	22
2.3	Efeito Coanda .....	23
2.3.1	Aplicações do efeito Coanda .....	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
3.1	Módulo de eletrodiálise inversa .....	25
3.2	Alimentação ao módulo .....	26

3.3	Sistema de elétrodos do módulo .....	27
3.4	Descrição da montagem do sistema.....	27
3.5	Espaçadores .....	28
3.5.1	Espaçadores com efeito Coanda.....	28
3.5.2	Espaçadores comerciais.....	31
3.6	Dados experimentais .....	31
3.7	Análise do módulo transparente e verificação do efeito Coanda.....	32
3.7.1	Metodologia experimental.....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>33</b>
4.1	Introdução dos resultados.....	33
4.2	Análise dos resultados obtidos.....	39
4.2.1	Tensão de circuito aberto .....	39
4.2.2	Resistência elétrica do módulo.....	43
4.2.3	Densidade de potência bruta.....	46
4.2.4	Resistência ôhmica e não ôhmica.....	49
4.3	Discussão global dos resultados.....	52
4.4	Resultados do comportamento dos espaçadores num módulo transparente.....	53
4.4.1	Considerações finais sobre os resultados obtidos.....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
5.1	Perspetivas futuras.....	56
	Tensão de circuito aberto.....	69
	Resistência elétrica do módulo .....	70
	Densidade de potência bruta .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos diferentes tipos de processo associados à extração de SGE (Adaptado de [8]).....	6
Figura 2 - Representação esquemática de um módulo de RED (Adaptado de [34]).....	9
Figura 3 - Representação esquemática de um módulo de RED (Adaptado de [24]).....	10
Figura 4 - Representação esquemática do mecanismo de operação de um módulo de RED (Adaptado de [24]) .....	11
Figura 5 - Representação esquemática do funcionamento das membranas de permuta iônica (Adaptado de [24]) .....	14
Figura 6 - Representação esquemática do efeito de Coanda (Adaptado de [66]).....	23
Figura 7 - Representação esquemática da geometria de um módulo de RED (Adaptado de [67]) .....	25
Figura 8 - Representação esquemática do processo de RED à escala laboratorial (Adaptado de [25]) .....	28
Figura 9 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada uma vez e o restante canal de fluxo sem grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 0.51 cm <sup>3</sup> ).....	29
Figura 10 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada uma vez e o restante canal de fluxo com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 0.77 cm <sup>3</sup> ).....	29
Figura 12 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada duas vezes e o restante canal de fluxo com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 1.23 cm <sup>3</sup> ) .....	29
Figura 11 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada duas vezes e o restante canal de fluxo sem grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 1.02 cm <sup>3</sup> ) .....	29

Figura 13 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada três vezes e o restante canal de fluxo sem grelha ((volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 1.53 cm <sup>3</sup> ) .....	30
Figura 14 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada três vezes e o restante canal de fluxo com grelha ((volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 1.65 cm <sup>3</sup> ) .....	30
Figura 15 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada quatro vezes e o restante canal de fluxo sem grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 2.04 cm <sup>3</sup> ) .....	30
Figura 16 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada quatro vezes e o restante canal de fluxo com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 2.07 cm <sup>3</sup> ) .....	30
Figura 17 - Espaçador desenhado e impresso em 3D apenas com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 0.515 cm <sup>3</sup> ) .....	30
Figura 18 - Espaçadores comerciais utilizados durante o estudo (em cima comercial com canal de fluxo sem grelha e em baixo comercial com canal de fluxo com grelha) .....	31
Figura 19 - Gráfico da variação da tensão de circuito aberto em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçadores comerciais sem grelha e com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x em branco) .....	39
Figura 20 - Gráfico da variação da tensão de circuito aberto em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, impresso em 3D com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha) .....	39
Figura 21 - Gráfico da variação da resistência elétrica do módulo em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, espaçador com grelha impresso em 3D e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha) .....	43
Figura 22 - Gráfico da variação da resistência elétrica do módulo em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçadores comerciais com e sem grelha e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha).....	43
Figura 23 - Gráfico da variação da densidade de potência bruta em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, espaçador com grelha impresso em 3D e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha) .....	46
Figura 24 - Gráfico da variação da densidade de potência bruta em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha e sem grelha, espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha) .....	46

Figura 25 - Gráfico da variação da resistência ôhmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, impresso em 3D com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha) .....	49
Figura 26 - Gráfico da variação da resistência ôhmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha e sem grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha).....	49
Figura 27 - Gráfico da variação da resistência não-ôhmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, impresso em 3D com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha) .....	50
Figura 28 - Gráfico da variação da resistência não-ôhmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha e sem grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha).....	50
Figura 29 - Movimento do traçador num espaçador com efeito Coanda aplicado com grelha dentro do módulo transparente.....	54
Figura 30 - Exemplo de um espaçador com efeito Coanda aplicado com a realocação do ramo de entrada.....	57
Figura 31 - Montagem do sistema de RED em laboratório .....	67
Figura 32 - Ilustração do módulo de RED e respectivos caudais de entrada e saída (na esquerda está o ânodo e na direita o cátodo).....	68
Figura 33 - Gráfico da variação da tensão de circuito aberto em função da taxa de fluxo para os diferentes tipos de espaçadores em estudo .....	69
Figura 34 - Gráfico da variação da resistência do módulo em função da taxa de fluxo para os diferentes espaçadores em estudo.....	70
Figura 35 - Gráfico da variação da densidade de potência bruta em função da taxa de fluxo para os diferentes espaçadores em estudo .....	71
Figura 36 - Interface do software NOVA Autolab utilizada para a avaliação do desempenho do módulo de eletrodialise inversa. A imagem apresenta a estrutura do protocolo experimental dividido em seis partes. ....	76
Figura 37 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores de OCV .....	76
Figura 38 - Especificações e métodos utilizados na determinação da permuta iônica do sistema .....	77
Figura 39 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores de OCV .....	77
Figura 40 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores da resistência do módulo.....	78
Figura 41 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores da cronopotenciometria .....	78

Figura 42 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores da cronopotenciometria .....	79
--	----

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial energético teórico e técnico do gradiente de salinidade por região (Adaptado de [9]) .....	4
Tabela 2 - Propriedades de membranas de permuta iônica disponíveis no mercado (Adaptado de [39]) .....	17
Tabela 3 - Dimensões do módulo de RED utilizado para os ensaios experimentais (Adaptado de [67]) .....	26
Tabela 4 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros.....	35
Tabela 5 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros (continuação 1) .	36
Tabela 6 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros (continuação 2) .	37
Tabela 7 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros (continuação 3) .	38
Tabela 8 - Densidade de potência para diversos espaçadores e membranas retirado da literatura (Adaptado de [28]) .....	72



## GLOSSÁRIO

<b>Permselectividade</b>	Capacidade de uma membrana de permitir a passagem seletiva de determinados iões.
<b>Eletrodialise Inversa</b>	Processo de conversão de energia do gradiente de salinidade através da utilização de membranas de permuta iónica.
<b>Energia do Gradiente de Salinidade</b>	Energia obtida pela diferença de salinidade entre duas soluções aquosas.
<b>Tensão de Circuito Aberto</b>	Diferença de potencial gerada entre os eléctrodos sem circulação de corrente eléctrica.
<b>Membranas de Permuta Iónica</b>	Membranas que permitem a passagem seletiva de iões em processos electroquímicos.
<b>Membrana de Permuta Catiónica</b>	Tipo de membrana que permite a passagem seletiva de cations.
<b>Membrana de Permuta Aniónica</b>	Tipo de membrana que permite a passagem seletiva de anions.
<b>Efeito Coanda</b>	Fenómeno fluido-dinâmico em que um fluido tende a aderir a uma superfície curva em vez de seguir em linha reta.
<b>Densidade de Potência Bruta</b>	Potência gerada por unidade de área das membranas em um módulo de RED.
<b>Resistência Eléctrica do Módulo</b>	Resistência total do sistema à passagem de corrente eléctrica.

<b>Camada Limite de Difusão</b>	Região de interface entre o fluido e a superfície da membrana, onde ocorre resistência ao transporte de massa.
<b>Elétrodo de Referência</b>	Elétrodo utilizado para medir o potencial em sistemas eletroquímicos.
<b>Impedância Eletroquímica</b>	Técnica utilizada para caracterizar a resistência do sistema.
<b>Mistura Capacitiva</b>	Tecnologia que utiliza elétrodos capacitivos para armazenar energia proveniente de gradientes de salinidade.
<b>Osmose de Pressão Retardada</b>	Tecnologia baseada no transporte osmótico de água para geração de energia.
<b>Gerador Hidrocrático</b>	Sistema baseado na mistura direta de soluções para extração de energia.
<b>Dilatação e Contração de Hidrogéis</b>	Processo que utiliza hidrogéis para adsorção/dessorção de água em gradientes de salinidade.
<b>Compressão Inversa de Vapor</b>	Tecnologia que explora a diferença de pressão de vapor entre soluções de diferentes salinidades.
<b>Mistura Mediada por Acumulador</b>	Processo baseado na mistura iônica em sistemas de armazenamento eletroquímico.
<b>Camada Limite de Difusão</b>	Região de interface entre a membrana e a solução, onde ocorre resistência ao transporte de massa.
<b>Camada Elétrica Dupla</b>	Estrutura formada na interface entre uma superfície carregada e uma solução eletrolítica.
<b>Densidade de Carga Fixa</b>	Quantidade de grupos carregados fixos na estrutura de uma membrana de permuta iônica.
<b>Capacidade de Permuta Iônica</b>	Número de grupos carregados fixos numa membrana, expresso em mili-equivalentes por grama de membrana seca.
<b>Polarização da Concentração</b>	Fenômeno causado pela acumulação ou depleção de íons na interface membrana-solução devido ao transporte iônico.

## SIGLAS

<b>SGE</b>	<i>Salinity Gradient Energy</i> ou Energia do Gradiente de Salinidade
<b>RED</b>	<i>Reverse Electrodialysis</i> ou Eletrodiálise Inversa
<b>OCV</b>	<i>Open Circuit Voltage</i> ou Tensão de Circuito Aberto
<b>IEMs</b>	<i>Ionic Exchange Membranes</i> ou Membranas de Permuta Iónica
<b>CEM</b>	<i>Cation Exchange Membrane</i> ou Membrana de Permuta Catiónica
<b>AEM</b>	<i>Anion Exchange Membrane</i> ou Membrana de Permuta Aniónica
<b>ERS</b>	<i>Electrolyte Rinse Solution</i> ou Solução de Lavagem de Elérodos
<b>EIS</b>	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> ou Espetroscopia de Impedância Eletroquímica
<b>PRO</b>	<i>Pressure Retarded Osmosis</i> ou Osmose de Pressão Retardada
<b>MFC</b>	<i>Microbial Fuel Cell</i> ou Célula de Combustível Microbiana
<b>AccMix</b>	<i>Accumulator Mediated Mixing</i> ou Mistura Mediada por Acumulador
<b>CapMix</b>	<i>Capacitive Mixing</i> ou Mistura Capacitiva
<b>MEB</b>	<i>Mixing Entropy Battery</i> ou Mistura de Baterias de Entropia
<b>HG</b>	<i>Hydrocratic Generator</i> ou Gerador Hidrocrático
<b>SSH</b>	<i>Swelling and Shrinking of Hydrogels</i> ou Dilatação e Contração de Hidrogéis
<b>RVC</b>	<i>Reverse Vapour Compression</i> ou Compressão Inversa de Vapor
<b>IEC</b>	<i>Ionic Exchange Capacity</i> ou Capacidade de Permuta Iónica
<b>FCD</b>	<i>Fixed Charge Density</i> ou Densidade de Carga Fixa

<b>DBL</b>	<i>Diffusion Boundary Layer</i> ou Camada Limite de Difusão
<b>EDL</b>	<i>Electrical Double Layer</i> ou Camada Elétrica Dupla
<b>PLA</b>	<i>Polylactic Acid</i> ou Ácido Polilático
<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamics</i> ou Dinâmica de Fluidos Computacional

## SÍMBOLOS

<b>N</b>	Número de pares de células
<b>h</b>	Distância intermembranar (mm)
<b><math>C_c</math></b>	Comprimento do canal (mm)
<b><math>L_c</math></b>	Largura do canal (mm)
<b><math>L_r</math></b>	Largura do ramo (mm)
<b><math>C_b</math></b>	Soma do comprimento dos ramos no compartimento (mm)
<b><math>r_d</math></b>	Raio do orifício (mm)
<b><math>\delta_{CEM} = \delta_{AEM}</math></b>	Espessura da membrana (mm)



## INTRODUÇÃO

A crescente procura por fontes de energia renováveis e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias para a conversão de energia. Neste contexto, a energia do gradiente de salinidade (SGE, "*Salinity Gradient Energy*") surge como uma alternativa promissora, sendo obtida a partir da diferença de concentração entre duas soluções aquosas com distintos teores salinos. Entre as diversas abordagens tecnológicas para a captação desta energia, a eletrodialise inversa (RED, "*Reverse Electrodialysis*") destaca-se pelo seu elevado potencial de eficiência na produção de eletricidade.

A RED baseia-se no uso de membranas de permuta iônica, que permitem a passagem seletiva de íons, promovendo a conversão da energia química armazenada na diferença de salinidade em energia elétrica. O desempenho deste sistema é influenciado por diversos fatores, incluindo o tipo de membranas utilizadas, a configuração dos espaçadores e os parâmetros operacionais do processo. A otimização destes elementos é essencial para maximizar a eficiência da tecnologia e torná-la competitiva no panorama energético atual.

Neste trabalho, é explorado o impacto do efeito Coanda na otimização dos espaçadores utilizados no processo de RED. O efeito Coanda, que descreve a tendência de um fluido a aderir a uma superfície curva, foi incorporado no design dos espaçadores com o objetivo de melhorar a distribuição do fluxo e reduzir perdas energéticas. Para tal, foram desenvolvidos espaçadores inovadores, projetados e fabricados através de impressão 3D, e posteriormente testados em condições laboratoriais.

O principal objetivo desta dissertação é avaliar a viabilidade e eficiência destes novos espaçadores com o efeito Coanda aplicado no seu design, comparando-os com espaçadores comerciais tradicionais, de forma a compreender o seu impacto na produção de eletricidade por RED. Os resultados obtidos contribuirão para o avanço do conhecimento na área da energia azul e para a melhoria do desempenho das tecnologias de conversão de energia do

gradiente de salinidade, promovendo soluções mais eficientes e sustentáveis para o futuro da produção de eletricidade.

A estrutura deste documento está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma revisão do estado da arte, abordando os princípios da energia do gradiente de salinidade, a eletrodialise inversa e a relevância dos espaçadores no desempenho do sistema. O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados, incluindo a caracterização dos espaçadores, os ensaios experimentais e as metodologias de análise. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos, analisando o impacto das diferentes geometrias na eficiência do módulo RED. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões finais e as perspectivas futuras para o desenvolvimento desta tecnologia.

## ESTADO DE ARTE

### 2.1 Energia do gradiente de salinidade

A energia do gradiente de salinidade (SGE, "*salinity gradient energy*") ou energia azul, é nome de uma fonte de energia renovável que é produzida através da conversão de uma diferença de potencial químico entre duas soluções em energia elétrica ou mecânica [1]. Esta energia renovável é obtida através da mistura de duas soluções aquosas com diferentes pressões osmóticas, num exemplo prático, a SGE é libertada quando uma água com baixo teor de salinidade (por exemplo água do rio) entra em contacto com água com elevado teor de salinidade (por exemplo água do mar), mais precisamente onde o rio desagua no mar, no estuário [2].

Em 1974, R. Norman propôs o conceito de SGE, afirmando que, como é necessária energia para extrair água doce da água do mar em qualquer processo de dessalinização, então em teoria, o inverso desse processo deveria de libertar energia [3]. No entanto, a SGE foi mencionada pela primeira vez em estudos em 1954, onde Pattle, R. E. afirmava que quando se mistura de forma irreversível um volume  $V$  de solvente puro numa quantidade substancialmente superior de solução, sendo  $P$  a pressão osmótica, então a energia livre libertada corresponde a  $PV$  [4]. Estudos indicam que a diferença entre a pressão osmótica da água do mar e a água do rio é cerca de 24 atmosferas, logo quando a água do mar se mistura com a água do rio, a energia livre que é libertada é equivalente a uma queda de água com uma altura de 240m [4], [5], [6].

Para extrair esta energia é necessário um dispositivo para garantir uma "mistura controlada" de dois caudais com diferentes níveis de salinidade. Esta operação resultaria no aproveitamento de energia disponível em vez da sua dissipação completa. A sustentabilidade da SGE é garantida através do ciclo hidrológico, o que garante restabelecimento dos caudais originais e dos níveis de salinidade.

Portanto, para além da SGE ser uma fonte de energia renovável bastante limpa, sem emissão de CO<sub>2</sub> e sem consumo dos sais contidos nos caudais, também tem vantagens em relação a outras fontes de energia renovável que apresentam flutuações na produção, como aquelas que dependem do vento, do sol e das marés [1].

Considera-se que existe um potencial de gradiente salino global entre 1,4 – 1,7 TW associado apenas a estuários, ou seja, por cada 1m<sup>3</sup> de água do rio que é misturado com 1 m<sup>3</sup> de água do mar iria resultar numa variação da energia livre de Gibbs na ordem dos 1.4 - 1.8 MJ [7]. Este valor pode ser amplificado para 15 MJ se a mistura ocorrer entre 1 m<sup>3</sup> de água do rio com 1 m<sup>3</sup> de salmoura saturada [8].

Tabela 1 - Potencial energético teórico e técnico do gradiente de salinidade por região (Adaptado de [9])

Região	Nº de rios	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Potencial Teórico (GW)	Potencial Técnico (GW)
África	391	170294	311	190
Ásia	1243	236769	374	206
Austrália	251	15818	30	20
Europa	779	74569	94	56
América do Norte	1878	191434	321	189
Oceânia	540	149748	278	175
América do Sul	390	320078	316	148
<b>Total</b>	<b>5472</b>	<b>1158709</b>	<b>1724</b>	<b>983</b>

## 2.1.1 Energia livre de Gibbs

A quantidade teórica de energia que pode ser extraída a partir de uma mistura controlada de duas soluções com diferentes níveis de salinidade corresponde a variação da energia livre de Gibbs, e é representada pela seguinte equação:

$$\Delta G_{mix} = G_m - (G_c - G_d) \quad [2.1]$$

onde  $G_c$ ,  $G_d$  e  $G_{mix}$  representam a energia livre de Gibbs da solução de concentrado, diluído e misturado respectivamente, a energia livre de Gibbs ( $G$ ) é definida pela seguinte equação:

$$G = \sum_i^s \mu_i n_i \quad [2.2]$$

onde,  $\mu_i$  (J/mol) representa o potencial químico da  $i$ -ésima espécie e  $n_i$  representa o número de moles da  $i$ -ésima espécie de um sistema com um número total de  $s$  espécies.

Para uma dada temperatura  $T$  e pressão  $P$  o potencial químico do solvente  $i$  é definido como:

$$\mu_i = \mu_i^* + v_i \Delta p + |z_i| F \Delta \psi + RT \ln \gamma_i x_i \quad [2.3]$$

onde,  $v$  é o volume parcial molar (m<sup>3</sup>/mol),  $\Delta p$  corresponde à diferença de pressão (Pa),  $z$  corresponde à valência (equiv./mol),  $F$  é a constante de Faraday (96,485 C/equiv.),  $\Delta \psi$  é a diferença de potencial elétrico (V),  $R$  é a constante dos gases perfeitos (8.314 J.mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>),  $T$  corresponde à temperatura (K),  $\gamma$  é o coeficiente de atividade e  $x$  é a fração molar. Sob pressão constante e ausência de um campo elétrico, a equação [2.3] simplifica para:

$$\mu_i = \mu_i^* + RT \ln \gamma_i x_i \quad [2.4]$$

O número de moles,  $n_i$ , da  $i$ -ésima espécie pode ser expresso em termos da concentração molar,  $c_i$ , como é indicado na seguinte expressão:

$$n_i = c_i \cdot V \quad [2.5]$$

onde,  $V$  é o volume total do sistema (m<sup>3</sup>) e  $c_i$  é a concentração molar (mol/m<sup>3</sup>).

Portanto, recorrendo à equação [2.1] e fazendo os ajustes necessários utilizando às equações [2.2]-[2.5], obtém-se a seguinte expressão:

$$\Delta G_{mix} = \sum_i^s (c_{i,m} V_m \cdot RT \ln(x_{i,m} \gamma_{i,m}) - ((c_{i,c} V_c \cdot RT \ln(x_{i,m} \gamma_{i,m}) + (c_{i,d} V_d \cdot RT \ln(x_{i,d} \gamma_{i,d})))) \quad [2.6]$$

A equação [2.6] pode ser utilizada para calcular o valor teórico da energia livre de Gibbs produzida a partir de duas soluções com diferentes níveis de salinidade.

## 2.1.2 Tecnologias de extração de energia do gradiente de salinidade

Existem diversos processos através dos quais é possível aproveitar energia a partir de um gradiente salino. A figura 1 representa um esquema que classifica as diferentes tecnologias com base no tipo de processo. Estes processos podem ser classificados em diferentes categorias, como por exemplo, processos de permuta iónica, processos osmóticos, processos de mistura direta, processos de adsorção/dessorção, e processos baseados na diferença de pressão de vapor [8].

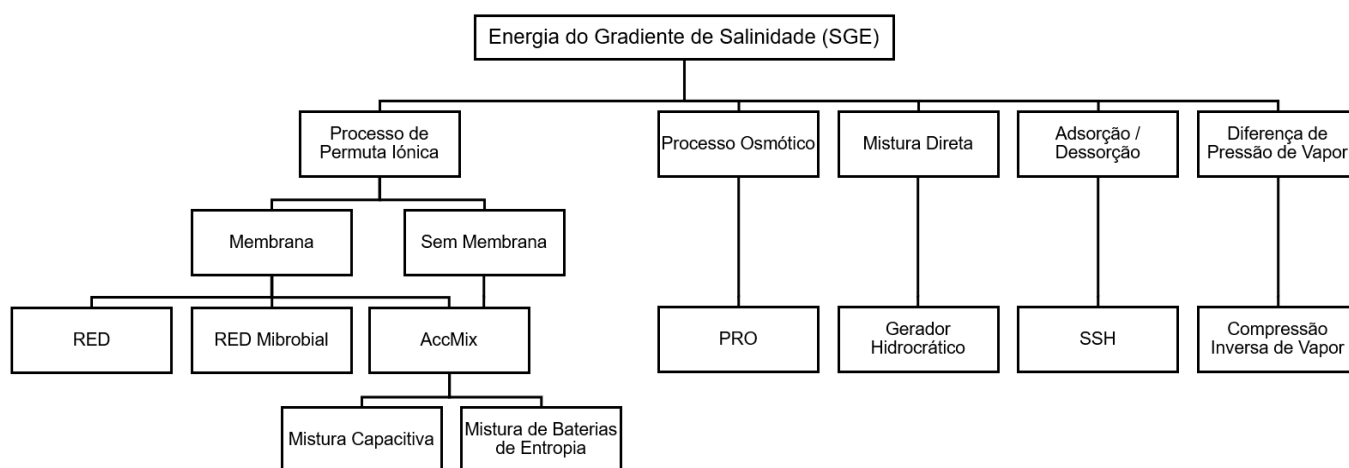


Figura 1 - Representação esquemática dos diferentes tipos de processo associados à extração de SGE (Adaptado de [8])

Dentro dos processos de permuta iónica tem-se a Eletrodialise Inversa e a Eletrodialise Microbiana. A RED Microbiana é uma tecnologia híbrida que consiste num módulo de RED colocado entre os elétrodos de uma célula de combustível microbiana (MFC, "microbial fuel cell"). Desta forma, as águas residuais são utilizadas para gerar energia, resultando numa maior produção de energia quando comparada com uma MFC isolada. Para ser possível a extração de SGE através destes processos é necessário recorrer ao uso de membranas [1], [10], [11], [12].

Ainda dentro dos processos de permuta iónica, mas sem recorrer ao uso de membranas tem-se a mistura mediada por acumulador (AccMix, "*accumulator mediated mixing*"), na qual o transporte da permuta iónica em direção aos elétrodos ocorre com ou sem membrana. Dentro da AccMix tem-se a Mistura Capacitiva (CapMix, "*capacitive mixing*") e a Mistura de Baterias de Entropia (MEB, "*mixing entropy battery*"). A Mistura Capacitiva utiliza elétrodos especiais chamados elétrodos capacitivos. O processo baseia-se num ciclo de quatro etapas durante o qual os elétrodos acumulam a carga elétrica na presença do fluxo de alta salinidade e, subsequentemente, descarregam-na na presença do fluxo de baixa salinidade. É produzida uma quantidade líquida de energia, uma vez que a quantidade de energia necessária para carregar os elétrodos capacitivos é inferior à libertada durante a fase de descarga [13], [14]. A

MEB utiliza dois elétrodos farádicos diferentes que reagem especificamente com apenas uma espécie de ião. A MEB não armazena carga capacitivamente, mas sim pseudocapacitivamente, como energia química dentro da estrutura cristalina do eletrodo, e utiliza a dependência do potencial de Nernst da concentração de sal [15].

Os processos osmóticos são aqueles em que o transporte do solvente (por exemplo, a água) é o mecanismo responsável pela alteração da concentração de duas correntes com salinidades diferentes. A Osmose de Pressão Retardada (PRO, "*pressure retarded osmosis*") baseia-se na utilização de uma membrana osmótica, que separa duas soluções de salinidades diferentes. Esta membrana semipermeável permite a passagem do solvente e retém o soluto [16], [17]. A diferença de potencial químico entre as soluções provoca o transporte de água da solução diluída para a solução mais concentrada. Se for aplicada uma pressão hidrostática inferior à pressão osmótica no lado do concentrado, o transporte de água será parcialmente retardado. O transporte de água da solução diluída a baixa pressão para a solução concentrada a alta pressão resulta numa pressurização do volume de água transportado. Embora a PRO não seja capaz de gerar eletricidade diretamente, como no caso dos processos RED ou CapMix, no entanto, o volume pressurizado de água transportada pode ser utilizado numa turbina hidráulica para gerar energia mecânica que pode ser convertida em eletricidade através do acoplamento da turbina a um gerador [18], [19], [20].

A mistura direta é uma categoria através da qual é possível realizar a extração de energia proveniente de um gradiente salino. O processo consiste no transporte e na mistura dos iões e do solvente de uma corrente diretamente com a outra corrente, sem a utilização de membranas. O Gerador Hidrocrático (HG, "*hydrocratic generator*") é um dispositivo constituído por um tubo vertical com uma série de aberturas, este tubo encontra-se completamente submerso em água do mar. A água doce é injetada na entrada inferior do tubo vertical, provocando o arrastamento da água do mar a partir das aberturas e o afloramento de correntes de alta e baixa salinidade. Um balanço energético global mostra que o caudal total gerado na saída superior do tubo vertical deve-se não só à carga hidráulica e à flutuabilidade, mas também ao SGE resultante da mistura direta dos dois fluxos e pode ser utilizado para gerar energia mecânica através de uma turbina hidráulica [8], [21].

A adsorção/dessorção é uma tecnologia do processo de extração da SGE em que é utilizado um material de adsorção adequado para remover o solvente de uma corrente e, subsequentemente, descarregá-lo na outra corrente por meio de dessorção. A tecnologia que se utiliza é a Dilatação e Contração de Hidrogéis (SSH, "*swelling and shrinking of hydrogels*"). Esta tecnologia é relativamente recente e baseia-se nas propriedades de dilatação e contração dos hidrogéis poliméricos. A extração da SGE é efetuada expondo os hidrogéis a água doce e fazendo-os inchar devido à absorção da água. A SGE extraída durante o processo de dilatação é

convertida em energia potencial devido à presença de um peso no topo da coluna de hidrogel. Este peso é levantado a uma determinada altura que corresponde à dilatação dos hidrogéis dentro da coluna. Posteriormente, os hidrogéis são colocados em contacto com a água do mar de modo que encolham, libertando assim a água capturada na etapa anterior [8], [22].

Por fim, a diferença de pressão de vapor é uma tecnologia do processo de extração da SGE que se baseia na diferença de pressão de vapor existente entre as correntes de baixa e alta salinidade. Para a extração de SGE foi proposta uma tecnologia designada por Compressão Inversa de Vapor (RVC, "*reverse vapour compression*"), que pode ser considerada como o inverso da tecnologia de compressão mecânica de vapor amplamente estabelecida na dessalinização. Em condições de vácuo, as duas correntes de salinidades diferentes evaporam-se em câmaras separadas, gerando diferentes pressões de vapor. O vapor gerado a uma pressão mais elevada na câmara de baixa salinidade flui para a câmara de alta salinidade, onde o vapor é gerado a uma pressão mais baixa. Para recuperar esta energia basta colocar uma turbina entre as duas câmaras [8], [23].

Embora existam diversas tecnologias para o aproveitamento da energia que é produzida através de um gradiente de salinidade, a RED e a PRO são as duas tecnologias (ambas membranas) mais promissoras e que se encontram num estado mais avançado a nível de desenvolvimento [1], [8].

## 2.2 Eletrodialise inversa

A Eletrodialise Inversa (RED, "*reverse electrodialysis*") é o nome dado ao processo que utiliza membranas de permuta iônica (IEMs, "*ionic exchange membranes*") responsáveis pela mistura controlada dos íons entre os correntes com diferentes salinidades. Os principais componentes de uma unidade RED são as IEMs, nomeadamente membranas seletivas catiónicas (CEMs, "*cation exchange membranes*") e membranas seletivas aniónicas (AEMs, "*anion exchange membranes*") que são montadas alternadamente num módulo. A distância entre duas membranas subsequentes (ou seja, a espessura do compartimento) é geralmente ocupada por espaçadores poliméricos. A figura 3 ilustra esta configuração. A unidade de repetição do módulo (geralmente designada por par de células) é constituída por quatro elementos, uma membrana de permuta catiónica, um compartimento para o fluxo da solução concentrada (compartimento do concentrado), uma membrana de permuta aniónica e um compartimento para o fluxo da solução diluída (compartimento da solução diluída), como se pode observar na figura 2.

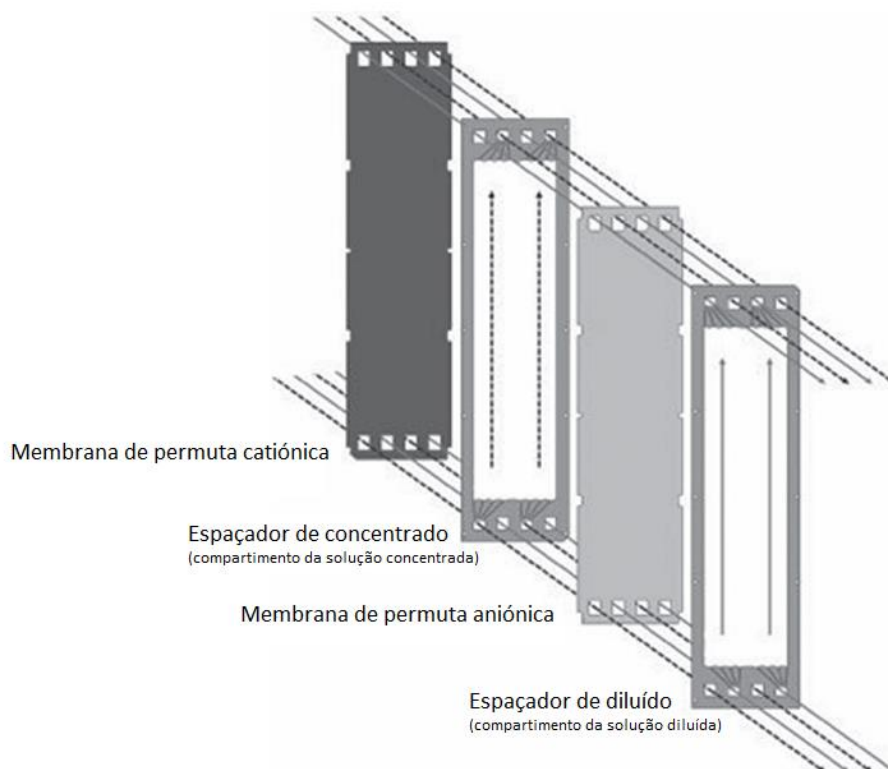


Figura 2 - Representação esquemática de um módulo de RED (Adaptado de [34])

As duas soluções escoam através do módulo em canais alternados por meio de sistemas de distribuição de entrada e saída com formas adequadas. O gradiente de concentração entre o concentrado e o diluído atua como força motriz para o transporte de íons através das membranas. A passagem de íons através de uma membrana é regulada pela sua permselectividade, ou seja, a seletividade para a passagem de íons com carga positiva ou negativa em vez de outros (por exemplo, os cátions passam através da CEM, enquanto os aniões são rejeitados).

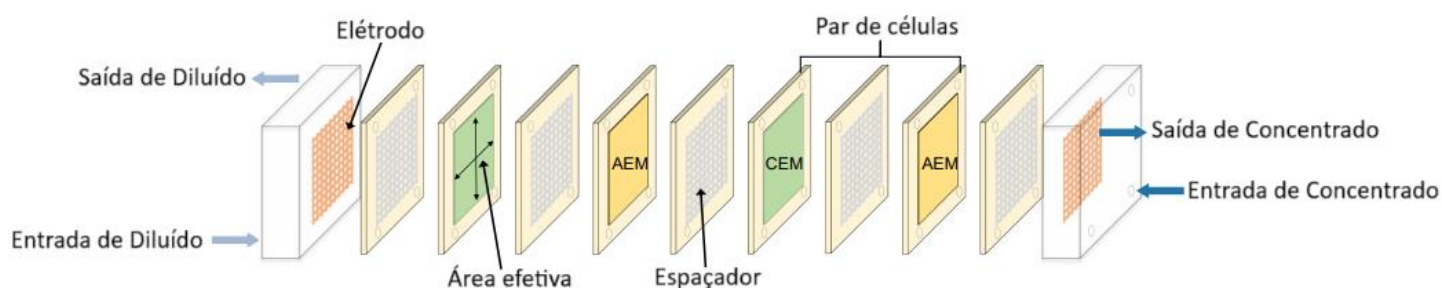


Figura 3 - Representação esquemática de um módulo de RED (Adaptado de [24])

Em condições ideais, os cátions fluem apenas através das membranas de permuta catiónica, enquanto os aniões passam apenas através das membranas de permuta aniónica, movendo-se assim em direções opostas. Estes fluxos iónicos através das membranas constituem a corrente iónica através do módulo, que é convertida numa corrente eléctrica através de reações de oxidação e redução nas duas extremidades do módulo onde estão colocados os eléctrodos. As reações de oxidação e redução ocorrem em cada eléctrodo (ânodo e cátodo, respetivamente) por diferença de potencial como força motriz, pelo que a transferência de carga (ou corrente iónica) é convertida em corrente eléctrica. Os eléctrodos contêm uma solução de eletrólitos em fluxo designada por solução de lavagem do eléctrodo (ERS, "*electrolyte rinse solution*") com um par redox adequado, como por exemplo o par  $K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]$  [24]. Na figura 4 está representado o mecanismo de operação deste processo.

Quando nenhuma carga externa é ligada aos eléctrodos (condições de tensão de circuito aberto), a diferença de potencial químico entre as duas soluções é contrabalançada pela tensão

elétrica que surge nas interfaces das membranas e não é gerada qualquer corrente iônica no interior do módulo.

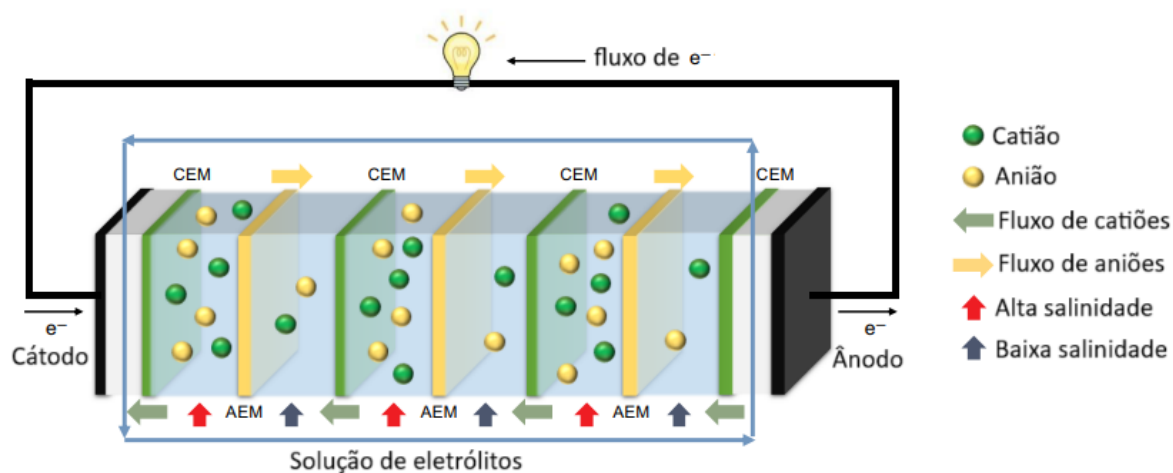


Figura 4 - Representação esquemática do mecanismo de operação de um módulo de RED (Adaptado de [24])

Na extração de energia de um gradiente salino através do processo RED, cada componente tem a sua importância, mas elementos específicos tais como os eletrodos, as membranas de permuta iônica, os canais de fluxo, o número de pares de células numa pilha, as concentrações do diluído e do concentrado têm um impacto crítico na performance do processo de extração de energia. A diferença de concentração entre o diluído e o concentrado é um pré-requisito para a extração de energia de um gradiente salino, isto é, é esta diferença de concentração que vai determinar a quantidade de energia que pode ser extraída, assumindo que todas as outras variáveis previamente mencionadas são constantes.

### 2.2.1 Tensão de circuito aberto

Para um módulo de RED, a tensão de circuito aberto corresponde a diferença de potencial elétrico medido entre os terminais do módulo (eletrodos) quando não há corrente elétrica a circular através do circuito, ou seja, quando o sistema se encontra em condições de circuito aberto. Logo, a tensão de circuito aberto pode ser calculada teoricamente através da equação de Nernst [25], [26]:

$$OCV_{\text{módulo}} = \frac{NRT}{F} \left[ \frac{\alpha_{CEM}}{Z_{ct}} \ln \frac{\gamma_{c,ct} C_c}{\gamma_{d,ct} C_d} + \frac{\alpha_{AEM}}{Z_{an}} \ln \frac{\gamma_{c,an} C_c}{\gamma_{d,an} C_d} \right] \quad [2.7]$$

onde N corresponde ao número de pares de membranas (pares de células), R é a constante dos gases perfeitos ( $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), T é a temperatura (K), e F é a constante de Faraday ( $96,485 \text{ C/mol}$ ).  $\alpha_{CEM}$  é a permselectividade da membrana de permuta catiónica e  $\alpha_{AEM}$  é a permselectividade da membrana de permuta aniônica, Z corresponde a carga do íon que está a ser transportado (para  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Cl}^-$ ,  $Z = 1$ ),  $\gamma_c$  corresponde ao coeficiente de atividade do sal na

solução concentrada e  $\gamma_d$  corresponde ao coeficiente de atividade do sal na solução diluída, e os índices "ct" e "an" correspondem ao catião e anião respetivamente.

Para simplificar, ou estimar por grosso, em vez de usar o coeficiente de atividade pode-se o substituir pela concentração ( $C$ ), assim a equação simplifica para:

$$OCV_{módulo} = \frac{NRT}{F} \left[ \frac{\alpha_{CEM}}{Z_{ct}} \ln \frac{C_c}{C_d} + \frac{\alpha_{AEM}}{Z_{an}} \ln \frac{C_c}{C_d} \right] \quad [2.8]$$

onde,  $C_c$  e  $C_d$  correspondem as concentrações molares do sal nas soluções de concentrado e diluído, respetivamente.

Experimentalmente, a tensão de circuito aberto pode ser medida diretamente do módulo de RED com recurso a um potencióstato ou um multímetro. Posteriormente pode ser comparado com o valor teórico para verificar a permselectividade das membranas e, para além disso, pode ser utilizado como um método para verificar o desempenho real do módulo em comparação com o teórico, o que é muito útil para perceber se o módulo de RED foi montado corretamente [1].

Quando o módulo de RED está ligado a uma carga externa, a tensão de saída  $U$ , calcula-se através da diferença entre a tensão de circuito aberto e a queda de tensão através da resistência interna  $R_{stack}$ :

$$U = OCV_{módulo} - IR_{stack} \quad [2.9]$$

onde,  $I$  (A) é a corrente do circuito elétrico.

## 2.2.2 Resistência do módulo de eletrodialise inversa

A resistência interna do módulo de RED consiste na resistência óhmica e não óhmica. A resistência óhmica do módulo RED é constituída pela soma das resistências dos compartimentos da solução e das resistências da membrana, como se pode observar na seguinte equação:

$$R_{\acute{o}hmica} = N_{cél}(\beta_{sol}(R_c + R_d) + \beta_{mem}(R_{AEM} + R_{CEM})) \quad [2.10]$$

onde,  $N_{cél}$  corresponde ao número de pares de células.  $R_c$  e  $R_d$  são as resistências dos compartimentos de concentrado e diluído, respetivamente.  $R_{AEM}$  corresponde à resistência associada a membrana de permuta aniónica, e  $R_{CEM}$  à resistência associada a membrana de permuta catiónica,  $\beta_{sol}$  é o efeito de sombra do espaçador nos compartimentos da solução, e  $\beta_{mem}$  é o efeito de sombra do espaçador na resistência da membrana [27].

Embora não exista nenhum consenso relativamente à qualificação do efeito de sombra, é possível estimá-lo recorrendo ao rácio entre a tensão de circuito aberto experimental e a tensão de circuito aberto teórico, isto verifica-se através da seguinte equação [28]:

$$\beta = \left(1 - \frac{OCV_{experimental}}{OCV_{teórico}}\right) \cdot 100 \quad [2.11]$$

A resistência não ôhmica é atribuída à resistência elétrica de dupla camada  $R_{edl}$  e à resistência da camada limite de difusão  $R_{dbl}$ .  $R_{dbl}$  e  $R_{edl}$  podem ser monitorizadas utilizando ferramentas analíticas como a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS, "electrochemical impedance spectroscopy") [29] ou cronopotenciometria o que foi feito neste trabalho.

$$R_{n\grave{a}o\ \acute{o}hmica} = R_{dbl} + R_{edl} \quad [2.12]$$

### 2.2.3 Densidade de potência

Para um módulo de RED cuja configuração consiste na passagem contínua dos caudais de concentrado e diluído, isto é, as concentrações das correntes de alimentação mantem-se constantes, logo a potência de saída é também constante, assim a densidade de potência ( $W/m^2$ ) pode ser determinada através da seguinte equação [30]:

$$P_{densidadeBruta} = \frac{OCV^2}{4 \cdot R_{total} \cdot A_t} \quad [2.13]$$

onde,  $OCV$  corresponde a tensão de circuito aberto (V),  $R_{total}$  corresponde a resistência elétrica do módulo ( $\Omega$ ) e  $A_t$  corresponde a área total útil das membranas do módulo ( $m^2$ ).

Pode-se obter a densidade de potência líquida ( $W/m^2$ ) subtraindo da equação anterior a potência que é gasta para bombear as soluções através do módulo, isto verifica-se através da seguinte equação [30]:

$$P_{densidadeLíquida} = P_{densidadeBruta} - \frac{\Sigma \Delta p \cdot Q}{A_t} \quad [2.14]$$

onde  $\Sigma$  representa as duas soluções (concentrado e diluído) em circulação no módulo de RED,  $\Delta p$  corresponde a queda de pressão dentro do módulo de RED (Pa) e  $Q$  corresponde ao caudal de líquido ( $m^3/s$ ).

A  $P_{densidadeLíquida}$  é o melhor indicador de eficiência de um módulo de RED porque tem em conta a energia produzida e a energia consumida pelo sistema. Também deve ser considerado que a potência de saída não pode ser mantida no valor máximo na prática porque a  $P_{densidadeBruta}$  é baseada na diferença de concentração das soluções no início do processo. Assim, a diferença de concentração diminui ao longo do processo e por sua vez irá diminuir a potencia de saída.

## 2.2.4 Membrana de permuta iónica

As membranas de permuta iónica são películas finas com grupos iónicos distribuídos uniformemente pela espessura da membrana que são utilizados para separar iões, permitindo o transporte de iões com cargas opostas, quer catiões quer aniões, dependendo dos grupos fixos iónicos presentes na estrutura da membrana [31].

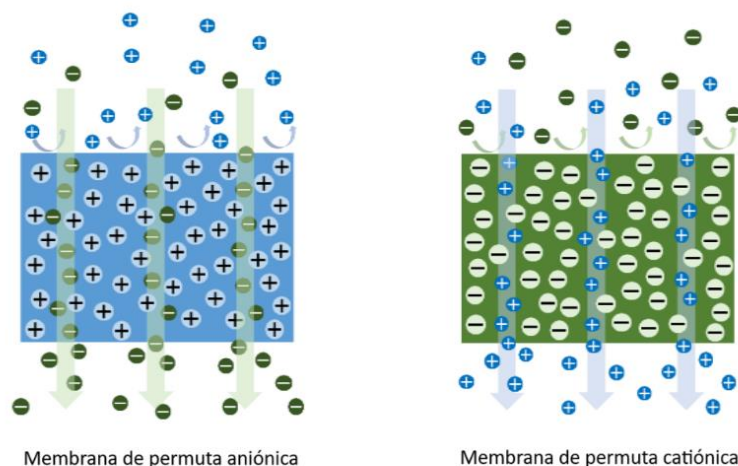


Figura 5 - Representação esquemática do funcionamento das membranas de permuta iónica (Adaptado de [24])

As membranas de permuta iónica podem ser classificadas em dois tipos, isto é, em membranas de permuta catiónica (CEMs, "*cation exchange membranes*") e em membranas de permuta aniónica (AEMs, "*anion exchange membranes*"). Estas membranas são semipermeáveis e permitem o transporte de contra-iões e bloqueiam o transporte de co-iões e de moléculas neutras. No caso das membranas de permuta catiónica, se estivermos perante uma solução de cloreto de sódio, esta membrana irá facilitar o transporte dos iões  $\text{Na}^+$ , e bloquear o transporte dos iões  $\text{Cl}^-$ , o oposto ocorre nas membranas de permuta aniónica, ou seja, ocorre o transporte dos iões de  $\text{Cl}^-$  e é bloqueado o transporte de iões  $\text{Na}^+$  [32], [33].

As IEMs classificam-se ainda como estruturas homogéneas e heterogéneas dependendo do método de fabrico e da sua estrutura física. Nas membranas homogéneas, a parte de permuta iónica é introduzida diretamente na matriz polimérica durante o processo de fabrico. As IEMs heterogéneas, por outro lado, têm uma distribuição de carga não uniforme resultante do seu método de preparação, que consiste em misturar ou fundir a resina de permuta iónica carregada com o polímero de ligação não carregado, seguido de prensagem ou moldagem na membrana. Por conseguinte, em geral, a sua resistência mecânica é superior à da membrana homogénea, enquanto as propriedades eletroquímicas, como a capacidade de permuta iónica, a permselectividade e a resistência de área são comparativamente inferiores às das membranas homogéneas [24].

### 2.2.4.1 Propriedades das membranas de permuta iónica

As propriedades mais importantes das IEMs incluem a permselectividade e a resistência elétrica, que determinam de forma crítica o desempenho elétrico da pilha de RED. Outros parâmetros, como o teor de água, a capacidade de permuta iónica (IEC, "ionic exchange capacity") e a densidade de carga fixa (FCD, "fixed charge density") podem afetar o desempenho da pilha de RED através da sua influência na permselectividade e na resistência elétrica [34], [35].

O teor de água tem uma elevada importância na estabilidade dimensional da membrana e também para as propriedades de transporte iónico. Um elevado teor de água implica uma estrutura mecânica instável e resulta frequentemente numa fraca permselectividade, apesar do seu efeito positivo na condutividade da membrana. O teor de água é influenciado pelo material da membrana, pelos grupos fixos iónicos, pelo grau de reticulação da matriz da membrana e pelas condições da solução circundante. O teor de água de uma membrana pode ser quantificado experimentalmente através da medição do grau de dilatação da membrana (SD):

$$SD = \frac{m_{molhada} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 10 \quad [2.15]$$

onde  $m_{molhada}$  é a massa da membrana quando esta se encontra molhada e  $m_{seca}$  é a massa da membrana quando a mesma esta numa fase seca [36].

A capacidade de permuta iónica (IEC) representa o número de grupos carregados fixos na matriz da membrana. É determinada como o mili-equivalente (mEq) de grupos carregados por grama de membrana seca. Outro conceito útil é a densidade de carga fixa (FCD), que é definida como os mili-equivalentes de grupos carregados por grama de água na membrana (mEq/g H<sub>2</sub>O). A FCD pode ser utilizada para uma melhor correlação com a permselectividade e a resistência da membrana, e o seu valor pode ser determinado como o rácio entre IEC e SD [36], [37].

$$FCD = \frac{IEC}{SD} \quad [2.16]$$

A permselectividade indica a capacidade das IEMs para transportar seletivamente contra-íões (por exemplo, catiões no caso das CEMs) e excluir co-íões (por exemplo, aniões no caso das CEMs). Idealmente, uma IEM perfeita deve ter uma permselectividade de 1, de modo que os co-íões sejam completamente impedidos de migrar através da matriz da membrana. Na prática, o transporte de co-íões é inevitável, resultando numa permselectividade da membrana inferior a 1. A permselectividade é normalmente calculada como a razão entre a diferença de potencial elétrico medido através de uma amostra de membrana sob um determinado gradiente de concentração e o valor teórico correspondente com uma membrana ideal [37].

$$Permselectividade = \frac{E_{medido}}{E_{teórico}} \times 100\% \quad [2.17]$$

A resistência da membrana indica o impedimento da matriz polimérica ao transporte da corrente iônica. Representa uma contribuição importante para a resistência interna de uma pilha RED, e uma maior resistência da membrana provoca uma diminuição do potencial elétrico da pilha RED, reduzindo assim a energia elétrica disponível [37].

A resistência da membrana pode ser medida em soluções salinas pelo método da corrente contínua ou da corrente alternativa. A cronopotenciometria é um método de caracterização da resistência da membrana por corrente contínua amplamente utilizado, cujo resultado inclui também a resistência ao transporte iônico nas camadas aquosas adjacentes à superfície da membrana (ou seja, camada limite de difusão (DBL) e dupla camada elétrica) [38], [39].

Tabela 2 - Propriedades de membranas de permuta iônica disponíveis no mercado (Adaptado de [39])

Tipo de membrana	IEC (meq g <sub>seco</sub> <sup>-1</sup> )	Permselectividade (%)	Resistência ( $\Omega cm^2$ )	Grau de dilatação (%)	Espessura ( $\mu m$ )	Ref.
<b>Membranas de permuta catiónica</b>						
<b>Homogéneas</b>						
Fumasep® FKD	1.14	89.5	2.14	29	113	[38]
Fumasep® FKS	1.54	94.2	1.5	13.5	40	[36]
Qianqiu CEM	1.21	82.0	1.97	33.0	205	[36]
Neosepta® CMX	1.62	99.0	2.91	18	164	[37]
Neosepta® CMX	1.5-1.8	97	1.8-3.8	25-30	140-200	[40]
Selemion® CMV	2.0-2.4	95.0-98.8	2.3-2.9	20-25	101-150	[37], [40]
0.7wt% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> sPPO	1.40	87.7	0.97	26	100	[41]
SPEEK 40	1.23	95.3	2.05	23	53	[36]
SPEEK 65	1.76	89.1	1.22	35.6	72	[36]
JJC-82	-	99.6	3.1	-	-	[42]
<b>Heterogéneas</b>						
Ralex® CMH-PES	2.34	94.7	11.33	31	764	[37]
<b>Membranas de permuta aniônica</b>						
<b>Homogéneas</b>						
Fumasep® FAD	1.42	86.0	0.89	34	74	[36], [37]
Neosepta® ACS	1.4-2.0	-	2.0-2.5	17.0	150-200	[43]
Neosepta® AMV	1.78-1.9	87.3	3.15	20-30	120-124	[36], [40]
Neosepta® AMX	1.4-1.7	90.7	2.0-3.5	17.0	120-180	[43], [44]
Selemion® ASV	-	97	3.7	25-30	120	[36]

Fumasep® FAS	1.12	89.4	1.03	-	33	[36]
Qianqiu AEM	1.33	86.3	2.85	8.0	294	[36]
PECH A	1.31	90.3	2.05	35.0	77	[45]
PECH B-1	1.68	86.5	0.82	32.2	33	[45]
PECH B-2	1.68	87.2	0.94	49	77	[45]
PECH B-3	1.68	87.0	1.32	49	130	[45]
PECH C	1.88	79.2	1.14	49.1	77	[45]
<b>Heterogéneas</b>						
JJA-72	-	99	3.0	53.5	-	[42]
Ralex® AMH-PES	1.97	89.3	7.66	56	714	[37]

---

## 2.2.5 Efeito dos espaçadores num módulo de eletrodialise inversa

Os espaçadores são normalmente utilizados em pilhas de Eletrodialise Inversa para suportar as membranas de permuta iónica, proporcionar canais de fluxo e promover a mistura. O aumento da mistura tende a minimizar a polarização da concentração e, assim, reduzir a resistência não-ohmica. Ao mesmo tempo, a presença de espaçadores não condutores reduz a área efetiva da membrana para a condução iónica (também conhecida como efeito de sombra do espaçador) e torna o caminho de transporte iónico mais difícil, resultando numa resistência ohmica mais elevada, particularmente nos compartimentos de baixa salinidade [46], [47]. Além disso, o bombeamento de soluções através dos canais dos espaçadores pode ser uma importante fonte de perda de energia devido às significativas quedas de pressão, particularmente para canais mais finos. Os impactos substanciais dos espaçadores dependem dos materiais e da geometria do espaçador [48], [49], [50].

Num módulo de RED, a espessura do espaçador representa um papel crítico no valor do potencial elétrico, uma vez que afeta diretamente a resistência elétrica dos compartimentos da solução. Assim, os espaçadores mais finos são geralmente utilizados para reduzir a resistência interna de um módulo de RED [51]. No entanto, a utilização de espaçadores demasiado finos pode aumentar significativamente o consumo de energia para bombear devido ao aumento da queda de pressão nos canais de fluxo, o que reduz a densidade de potência líquida disponível. Assim, o elevado consumo de energia para bombear o caudal de alimentação torna os espaçadores mais finos ineficazes para o processo de RED, logo a espessura do espaçador tem de ser cuidadosamente otimizada para obter uma densidade de potência líquida maximizada. Estima-se que a distância ótima entre as membranas seja na ordem de 0,15 - 0,5 mm [6], [38], [52].

## 2.2.6 Sistemas de eléctrodos

O sistema de eléctrodos é constituído por eléctrodos e uma solução de eletrólitos, a sua função é converter a corrente iónica em corrente elétrica através de reações oxidação-redução. Os sistemas mais utilizados podem ser classificados em duas categorias: com ou sem reações de eléctrodos opostos [53], [54].

Os sistemas classificados como sem reações de eléctrodos opostos geralmente envolvem reações de oxidação-redução com formação de gases, por exemplo, a formação de H<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>. Estes sistemas de eléctrodos apresentam geralmente elevadas perdas de carga devido a formação de gases e, para além disso são necessários equipamentos adicionais para a recolha desses gases tóxicos [55], [56].

De modo a melhorar o desempenho da produção de energia e garantir a segurança, geralmente são utilizados sistemas de elétrodos com reações opostas. Esses sistemas de elétrodos podem ainda ser divididos em dois subgrupos: os sistemas com elétrodos reativos, por exemplo, o sistema Cu-CuSO<sub>4</sub> e o sistema Zn-ZnSO<sub>4</sub>, e os sistemas com pares de oxidação-redução homogêneos, por exemplo, o par FeCl<sub>3</sub>/FeCl<sub>2</sub> ou o par [Fe(CN)<sub>6</sub>]<sup>3-</sup>/[Fe(CN)<sub>6</sub>]<sup>4-</sup> com elétrodos inertes [57].

Uma das principais desvantagens dos elétrodos reativos é a necessidade de mudança periódica das soluções de alimentação e a inversão da corrente elétrica [53], [55]. Conseqüentemente, são preferíveis elétrodos inertes com pares de oxidação-redução homogêneos.

Estes sistemas de elétrodos têm outras limitações operacionais. O eletrólito Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-/4-</sup> pode decompor-se num composto químico altamente tóxico, o cianeto, sob a ação da luz solar e do oxigênio ou em condições ácidas, e o Fe<sup>2+/3+</sup> pode formar precipitados acima do pH 2-3. Além disso, foi observada uma precipitação azul no ânodo onde ocorreram reações de oxidação, indicando que o Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-</sup> foi decomposto devido às alterações bruscas de pH causadas pela eletrólise da água [58].

## 2.2.7 Polarização da concentração

A polarização da concentração é um fenômeno que ocorre em processos com interfaces, incluindo em eletrodialise inversa, caracterizado pela formação de gradientes de concentração na interface entre a solução e a membrana de permuta iônica. Esse efeito é causado pela migração de íons através das membranas sob a influência de um campo elétrico, sendo que a velocidade de transporte iônico pode ser maior do que a taxa de reposição dos íons na solução adjacente. Como resultado, há uma depleção de íons no lado do concentrado e um acúmulo no lado do diluído, criando uma diferença significativa na concentração entre a solução a granel e a interface da membrana [59], [60].

### 2.2.7.1 Fatores que influenciam a polarização da concentração

A polarização da concentração no processo de eletrodialise inversa resulta da interação entre a concentração da solução de alimentação, a velocidade do fluxo, a densidade de corrente e a geometria dos espaçadores. Soluções com maior concentração, como salmouras e água do mar, apresentam menor polarização, enquanto soluções diluídas, como água de rio, sofrem mais com esse efeito. O aumento da taxa de fluxo melhora a mistura e reduz a camada limite difusiva, minimizando polarização de concentração. No entanto, densidades de corrente elevadas podem intensificar a polarização, levando até à dissociação da água e alterações de pH. O design dos espaçadores também influencia esse fenômeno, pois espaçadores bem projetados reduzem a polarização ao melhorar a circulação da solução, enquanto modelos inadequados

podem aumentar a resistência hidráulica. Assim, mitigar a polarização exige equilibrar esses fatores para otimizar o transporte iônico sem comprometer a eficiência energética do sistema [61], [62].

### 2.2.7.2 Consequências da polarização da concentração

A polarização da concentração na eletrodialise inversa causa aumento da resistência elétrica do módulo, pois reduz a disponibilidade de íons para transporte, exigindo maior potencial elétrico e aumentando o consumo energético. Também diminui a eficiência do sistema, pois a menor concentração de íons na interface da membrana reduz o potencial eletroquímico disponível.

Além disso, pode ocorrer precipitação de sais na membrana, formando incrustações que diminuem a vida útil do sistema e aumentam a resistência hidráulica. Outro problema é a alteração do pH na interface da membrana, devido à dissociação da água em altas densidades de corrente, o que pode degradar quimicamente as membranas.

Para mitigar esses efeitos, estratégias como otimização do fluxo, uso de espaçadores eficientes, controle da densidade de corrente e escolha de membranas adequadas são essenciais para melhorar o desempenho e a eficiência energética da RED [59].

### 2.2.8 *Fouling* de membranas

O *fouling* de membranas na eletrodialise inversa consiste no processo de acumulação de partículas, compostos orgânicos, biofilmes e sais na superfície das membranas de permuta iônica, reduzindo a eficiência do transporte iônico e aumentando a resistência elétrica do sistema. O *fouling* pode ser causado por matéria orgânica dissolvida, crescimento microbológico (*biofouling*), precipitação de sais como carbonato de cálcio e fosfato (*scaling*). Esse fenômeno afeta diretamente a conversão de energia na RED, podendo reduzir a densidade de potência gerada em até 40% caso não sejam adotadas medidas de mitigação. O impacto do *fouling* depende da composição da água utilizada e da configuração das membranas, sendo que membranas sem espaçadores apresentam menor tendência ao acúmulo de partículas. Para minimizar esse problema, são recomendadas estratégias como inversão periódica do fluxo, aplicação de pulsos elétricos curtos para remoção de depósitos, e modificação química das membranas para reduzir a adesão de contaminantes e garantir um desempenho mais estável ao longo do tempo [63].

### 2.2.9 Efeito de sombra dos espaçadores

O efeito de sombra dos espaçadores em processos de RED ocorre devido à presença de espaçadores plásticos entre as membranas de permuta iônica, que criam regiões de menor

condutividade elétrica dentro do módulo. Estes espaçadores são essenciais para manter a separação das membranas e garantir a circulação da solução, mas acabam por bloquear parcialmente o fluxo iônico, reduzindo a área efetiva para o transporte de íons e aumentando a resistência elétrica do sistema.

Este efeito pode levar a uma redução de 30 a 40% na energia recuperada, representando uma perda significativa na eficiência da RED. Os espaçadores criam zonas onde a migração iônica é menos eficiente, o que resulta num aumento da resistência interna da célula e, consequentemente, numa menor densidade de potência gerada [64].

Para mitigar o efeito de sombra, é proposto na literatura a utilização de espaçadores condutivos, reduzindo a resistência elétrica e melhorando o transporte de íons através das membranas [64].

Assim, o efeito de sombra dos espaçadores constitui um fator limitante no desempenho de eletrodialise inversa, mas pode ser minimizado através do desenvolvimento de espaçadores condutivos ou membranas perfiladas, promovendo um transporte iônico mais eficiente e uma maior recuperação de energia a partir do gradiente de salinidade [31], [64].

## **2.2.10 Efeito da variação dos parâmetros de operação do processo**

### **2.2.10.1 Propriedades das soluções de alimentação**

As soluções de alimentação determinam a força eletromotriz e contribuem para a resistência interna. Em particular, a solução salina diluída de baixa condutividade em compartimentos de baixa salinidade é um dos principais contribuintes para a resistência interna global, por exemplo, a baixa salinidade pode representar até 45% da resistência interna global quando se utiliza água do mar e água do rio [58].

Uma série de estudos foi realizada para investigar o efeito das concentrações da solução de alimentação na produção de energia através do processo de RED. De um modo geral, o desempenho de RED pode ser melhorado através do aumento da concentração da corrente de alta salinidade, bem como através de uma maior diferença de salinidade entre as correntes de concentrado e diluído. Por exemplo, a densidade de potência pode ser aumentada em aproximadamente dez vezes com o aumento da concentração da corrente de concentrado de 0,5 M para 5 M [65]. Consequentemente, existe um valor ótimo para a concentração das soluções de alimentação, que também depende de outras condições de funcionamento da pilha de RED, como a velocidade do fluxo, a temperatura, o comprimento e a espessura dos canais [1].

### **2.2.10.2 Velocidade e temperatura do caudal de alimentação**

O aumento da velocidade do fluxo das soluções de alimentação melhora a mistura hidrodinâmica/iônica e reduz o fenómeno de polarização da concentração e a resistência da

camada limite de difusão na interface da membrana. Existe uma velocidade de fluxo ótima para maximizar a densidade de potência líquida, no entanto este valor depende da configuração da pilha de RED, como por exemplo da espessura do canal e geometria do espaçador, e das condições de operação, por exemplo, a concentração da alimentação [59], [66]. Segundo estudos da literatura, é recomendado para ensaios de RED à escala laboratorial uma velocidade de fluxo de alimentação na ordem de 1cm/s [67].

A temperatura das soluções de alimentação também deve ser tida em consideração devido à sua grande influência na força eletromotriz e na condutividade tanto das soluções como das IEMs [67], [68]. A temperatura das fontes naturais de água pode ter variações sazonais e diurnas muito significativas, que podem ter uma influência considerável no desempenho de RED. Uma temperatura elevada aumenta a condutividade da alimentação, facilita as trocas iônicas, reduz as perdas ôhmicas e, por isso, aumenta a potência de saída.

## 2.3 Efeito Coanda

O efeito Coanda é um fenômeno que foi observado pela primeira vez em 1910 por um matemático chamado Henri Coanda. Ele afirmou que “quando um fluido entra em contacto com uma superfície curva, curva-se para seguir a superfície, arrastando grandes quantidades de ar/líquido ao fazê-lo”, e este fenômeno tornou-se conhecido como o “Efeito Coanda”. Quando existe uma superfície próxima do fluxo de fluido, forma-se uma região de baixa pressão, a formação desta região de baixa pressão faz com que o movimento do fluxo de fluido seja desviado em direção à essa superfície, como se pode observar na figura 5 [69].

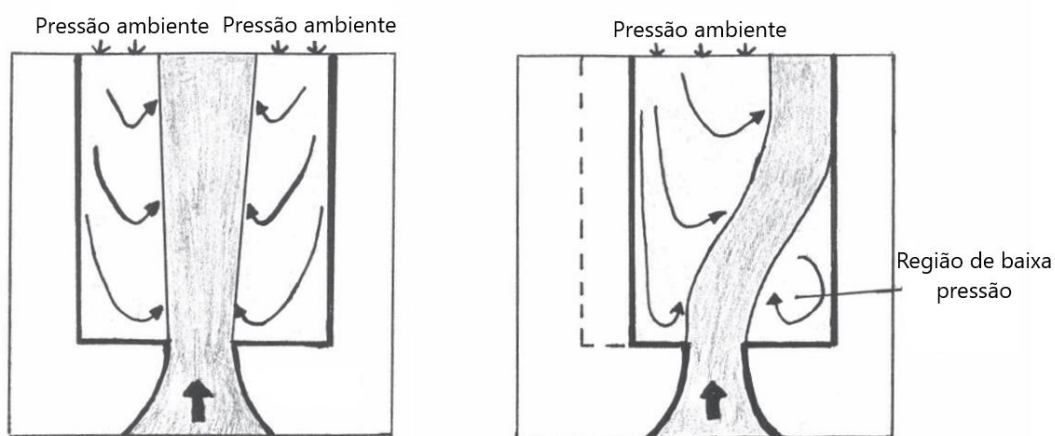


Figura 6 - Representação esquemática do efeito de Coanda (Adaptado de [66])

O efeito Coanda também pode ser demonstrado sem a presença de uma superfície sólida, isto é, utilizando duas velas acesas colocadas em paralelo. O ar aquecido ascendente de

cada vela tenta arrastar o ar ambiente (comum) na área acima e entre as chamas, fazendo com que os dois fluxos de fumo sejam desviados um para o outro [70].

### 2.3.1 Aplicações do efeito Coanda

Algumas das aplicações mais relevantes do efeito Coanda encontram-se nos ramos da aerodinâmica, da tecnologia marinha e da indústria. O efeito tem vindo também a ser reconhecido como responsável por fenómenos observados na natureza.

O efeito Coanda tem muitas aplicações na aviação e na navegação. O princípio de Coanda tem sido utilizado na construção de aeronaves desde meados da década de 1950 e continua a ser utilizado atualmente, sendo um dos métodos mais eficientes de atingir uma maior elevação.

Existem diversas áreas na engenharia em que o princípio de Coanda tem sido utilizado com grande eficácia, incluindo turbinas, processos de arrefecimento e técnicas de galvanização. Na medicina, este fenómeno também pode ser aplicado no tratamento de problemas cardiovasculares e ainda no auxílio do processo de respiração artificial. Ainda dentro das engenharias, este princípio tem também aplicações na navegação naval, principalmente em manobras de navios a baixas velocidades [71].

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Módulo de eletrodialise inversa

Realizou-se onze montagens diferentes com uma unidade EDR-Z / 10-0.8 (MEGA a.s. - República Checa), equipada com três pares de células compostas por membranas do tipo CMH-PES para as membranas de permuta catiónica e AMH-PES para as membranas de permuta aniónica do tipo RALEX® (MEGA a.s. - República Checa) e os respetivos espaçadores em estudo inseridos entre as membranas, utilizou-se ainda um par de espaçadores comerciais de polietileno da RALEX® inseridos juntamente aos eléctrodos, cuja função é facilitar a circulação da solução de eletrólito. A geometria e o modo de funcionamento do módulo de RED estão representados nas figuras 2,3 e 7 [72].

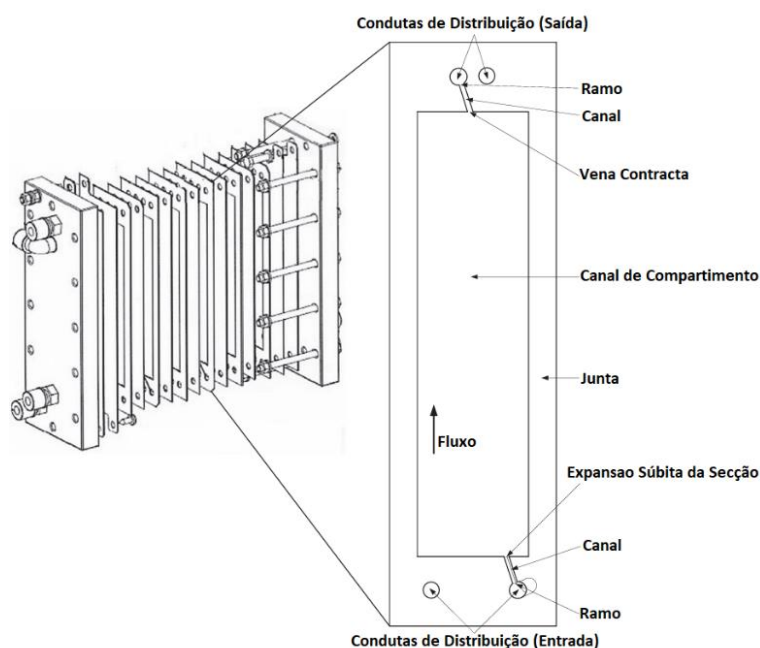


Figura 7 - Representação esquemática da geometria de um módulo de RED (Adaptado de [67])

Cada membrana tem uma área efetiva de 64 cm<sup>2</sup> (4 x 16 cm, largura x comprimento). A distância intermembranar nos compartimentos do módulo é de 0.8 mm, dado que os espaçadores que se utilizaram tinham essa espessura. O módulo é composto por dois elétrodos de titânio nas extremidades revestidos por uma camada de platina, para além disso estas extremidades têm a função de comprimir as células do módulo de modo que não haja fuga das soluções em circulação dentro do módulo.

Tabela 3 - Dimensões do módulo de RED utilizado para os ensaios experimentais (Adaptado de [67])

Parâmetros	Módulo de RED à escala laboratorial
N	3
h	0.8 mm
$C_c$	160 mm
$L_c$	40 mm
$L_r$	2.4 mm
$C_b$	28.8 mm
$r_d$	3 mm
$\delta_{CEM} = \delta_{AEM}$	0.8 mm

### 3.2 Alimentação ao módulo

Utilizou-se uma solução artificial de 0.5 M NaCl (LabChem, Portugal) como água do mar e uma solução de 0.017 M NaCl como água do rio. Para bombear as soluções recorreu-se a uma bomba peristáltica (Lead Fluid YZ15 BT1005), cujo funcionamento consiste em comprimir e descomprimir um tubo flexível com roletes, movidos por um rotor, este movimento cria um vácuo que puxa e desloca o fluido ao longo do tubo, gerando um fluxo contínuo. Utilizaram-se tubagens de 150 cm de comprimento e 4 mm de diâmetro interno para os fluxos de alimentação ao módulo de RED.

Durante os testes aos diferentes espaçadores utilizou-se uma variação na velocidade de alimentação ao módulo do concentrado e do diluído entre 12 mL/min e 72 mL/min, com incrementos de 12 mL/min.

Dado que o caudal utilizado nos ensaios variou entre 12 mL/min e 72 mL/min, o que, para esta configuração, corresponde a números de Reynolds entre aproximadamente 9.76 e 58.59, respetivamente. Estes valores indicam que o escoamento se manteve dentro do regime laminar.

### 3.3 Sistema de elétrodos do módulo

Nas extremidades do módulo de RED encontra-se o sistema de elétrodos que é composto por um ânodo e um cátodo, estes elétrodos são constituídos por uma placa de titânio revestida por uma camada de platina e as suas dimensões são de 4 cm x 16 cm.

Utilizou-se uma solução de eletrólito composta por 0.25 M NaCl, 0.1 M  $K_3Fe(CN)_6$  e 0.1 M  $K_4Fe(CN)_6$  (LABORSPIRIT Lda., Portugal) previamente preparada e recorreu-se a uma bomba peristáltica (Lead Fluid YZ15 BT1005, Baoding Lead Fluid Technology Co., Ltd., China) a uma velocidade constante de 200 mL/min.

O transporte de água através das membranas e a oxidação pode degradar a qualidade da solução de eletrólito, assim a solução deve ser substituída por uma nova após alguns ensaios de modo a obter dados experimentais mais assertivos. A qualidade desta solução pode ser verificada através da medição da condutividade da mesma, que deverá rondar os 120 mS/cm. A mudança de cor de amarelo para azul ou verde é também um sinal de degradação da solução e poderá ser utilizado como indicador [73]. No entanto, durante os ensaios experimentais realizados a solução de eletrólito utilizada foi sempre a mesma.

### 3.4 Descrição da montagem do sistema

O sistema de RED (Figura 8) montado no laboratório era composto por dois tanques, um para a solução de concentrado (0.5 M NaCl) e outro para a solução de diluído (0.017 M NaCl), ambos os tanques estavam sobre uma placa de aquecimento (Velp Scientifica, Itália) com um sensor de temperatura com o objetivo de manter a solução a uma temperatura desejada (20°C), e um agitador magnético para manter a solução homogénea. Ambas as soluções são bombeadas para o módulo de RED com uma bomba peristáltica (Lead Fluid YZ15 BT1005, Baoding Lead Fluid Technology Co., Ltd., China).

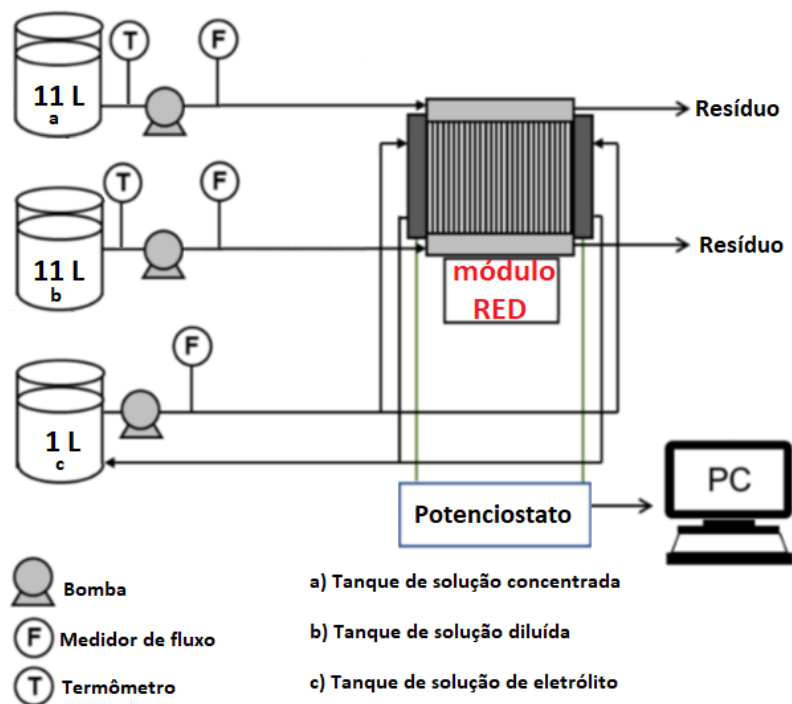


Figura 8 - Representação esquemática do processo de RED à escala laboratorial (Adaptado de [25])

No apêndice A.1 encontra-se a ilustração da montagem do sistema utilizado em laboratório.

## 3.5 Espaçadores

### 3.5.1 Espaçadores com efeito Coanda

No desenvolvimento deste estudo utilizou-se espaçadores com o efeito Coanda aplicado com o objetivo de testar a viabilidade desse design na otimização da distribuição do fluxo de fluido. O efeito Coanda refere-se à tendência que o fluido tem de aderir a superfícies curvas e seguir sua forma. Este efeito incorporou-se ao design dos espaçadores para melhorar a dinâmica do fluido dentro do módulo de modo a promover um melhor aproveitamento das membranas e, potencialmente, aumentar a eficiência do processo de RED. A implementação desse conceito tinha como objetivo não só melhorar a performance do sistema, mas também avaliar se a aplicação do efeito Coanda no design dos espaçadores poderia proporcionar vantagens operacionais. O teste foi realizado para verificar a eficácia desse design em termos de eficiência operacional, oferecendo uma perspectiva de melhoria no desempenho do módulo.

O design dos espaçadores para o módulo de RED realizou-se utilizando o software *Autodesk Fusion*, que permitiu criar modelos tridimensionais adaptados às necessidades do sistema. Os espaçadores foram projetados com a incorporação do efeito Coanda, que visa otimizar o fluxo do líquido e melhorar a eficiência do processo, promovendo uma melhor dinâmica do fluido nas membranas do módulo. Este design realizou-se recorrendo a artigos da literatura, mas precisamente ao artigo de Madane K., onde é feito um estudo relativamente a melhor configuração geométrica de osciladores fluido-dinâmicos [74]. Após a finalização do design, os espaçadores foram fabricados através de impressão 3D, utilizando filamento de ácido polilático (PLA, "*polylactic acid*"), e com recurso a uma impressora 3D (Prusa MK4S, Praga, República Checa). O volume do canal de fluxo disponível nos espaçadores aberto é de  $5.15 \text{ cm}^3$ .



Figura 9 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada uma vez e o restante canal de fluxo sem grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de  $0.51 \text{ cm}^3$ )

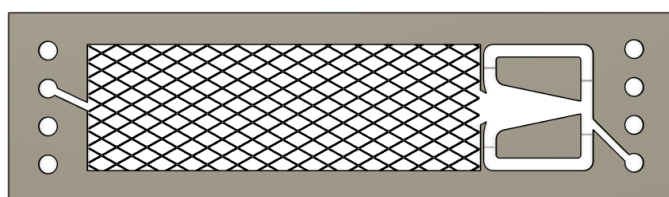


Figura 10 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada uma vez e o restante canal de fluxo com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de  $0.77 \text{ cm}^3$ )

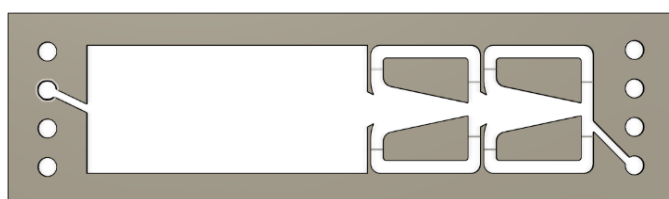


Figura 12 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada duas vezes e o restante canal de fluxo sem grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de  $1.02 \text{ cm}^3$ )

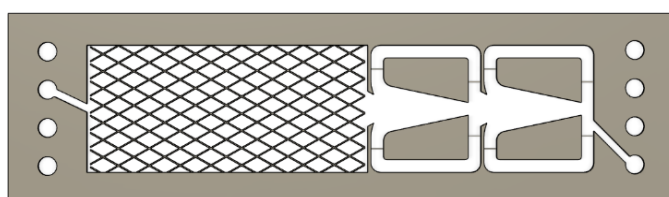


Figura 11 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada duas vezes e o restante canal de fluxo com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de  $1.23 \text{ cm}^3$ )

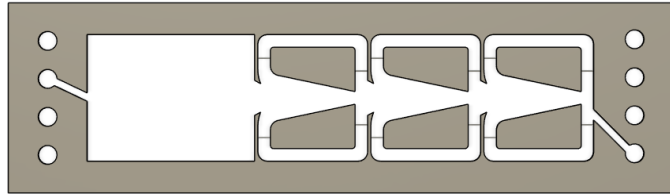


Figura 13 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada três vezes e o restante canal de fluxo sem grelha ((volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 1.53 cm<sup>3</sup>)

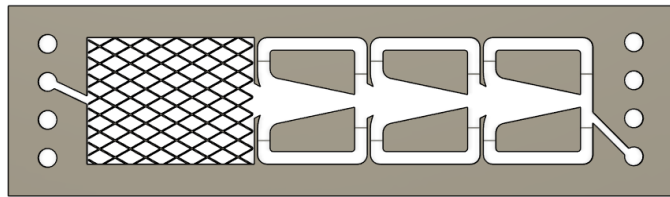


Figura 14 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada três vezes e o restante canal de fluxo com grelha ((volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 1.65 cm<sup>3</sup>)

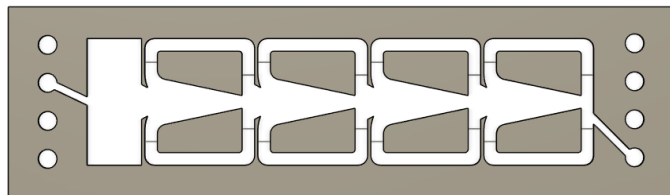


Figura 15 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada quatro vezes e o restante canal de fluxo sem grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 2.04 cm<sup>3</sup>)

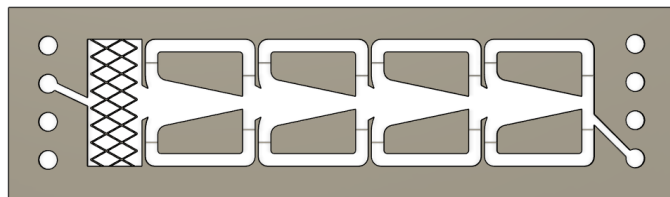


Figura 16 - Espaçador desenhado com a estrutura que promove o efeito Coanda replicada quatro vezes e o restante canal de fluxo com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 2.07 cm<sup>3</sup>)

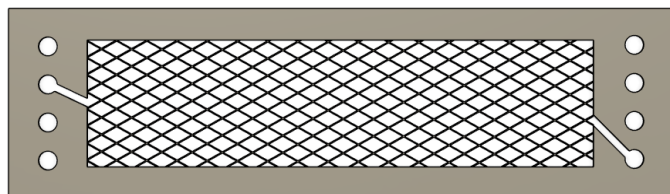


Figura 17 - Espaçador desenhado e impresso em 3D apenas com grelha (volume ocupado pela estrutura dentro do canal de fluxo é de 0.515 cm<sup>3</sup>)

### 3.5.2 Espaçadores comerciais

Os espaçadores comerciais foram utilizados neste estudo como referência para comparar o desempenho dos espaçadores projetados com o efeito Coanda.

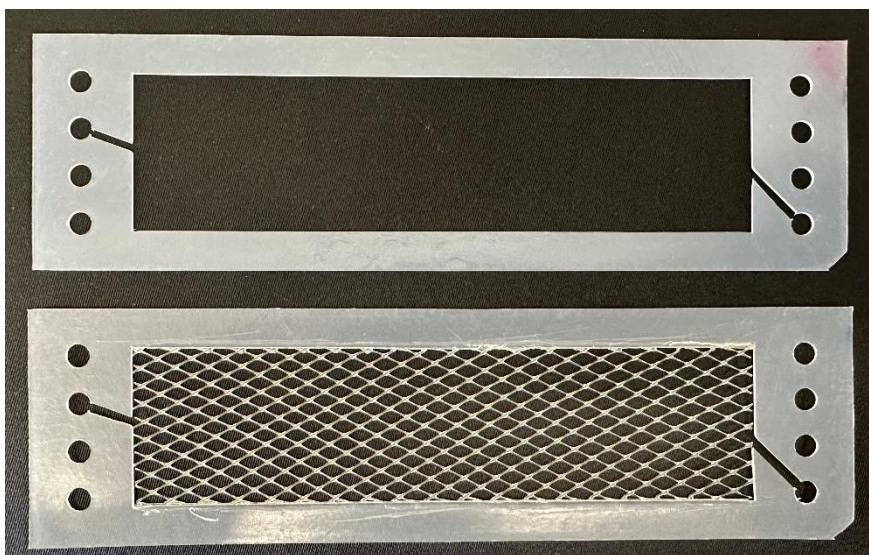


Figura 18 - Espaçadores comerciais utilizados durante o estudo (em cima comercial com canal de fluxo sem grelha e em baixo comercial com canal de fluxo com grelha)

## 3.6 Dados experimentais

Para recolher os dados experimentais recorreu-se ao potencióstato Autolab PGSTAT204 e ao software NOVA 2.1.8 (Metrohm Autolab, Holanda). Este conjunto permitiu realizar uma análise eletroquímica e foi também uma fonte de corrente elétrica.

O modelo utilizado no software NOVA 2.1.8 era composto por seis etapas, sendo a primeira etapa uma análise à tensão de circuito aberto do módulo. Na segunda etapa fez-se a análise à permuta de iões do sistema, onde aplicou-se uma corrente com uma intensidade de  $-0.01$  A e posteriormente registrou-se os dados, isto permitiu estabilizar módulo de modo a obter um valor de tensão de circuito aberto mais "fiável" na terceira etapa. Na quarta etapa analisou-se a resistência elétrica do módulo de RED onde aplicou-se uma corrente direta ao módulo em 11 fases diferentes, de 20 segundos cada, de 0 até  $-0.025$  A, seguido do caminho inverso para verificar possível histerese, tendo cada incremento  $0.0025$  A. Após a medição da resistência do módulo fez-se a cronopotenciometria, com o objetivo de conseguir determinar a resistência ôhmica e não ôhmica do sistema.

Para avaliar a viabilidade dos espaçadores que foram projetados no Fusion 360 e posteriormente impressos em 3D, primeiro recolheu-se os dados experimentais do módulo com os espaçadores comerciais e posteriormente recolheu-se os dados experimentais dos espaçadores

projetados, com o objetivo de comparar os valores e avaliar a eficiência dos espaçadores com efeito Coanda.

Para além disso, como o módulo de RED era composto por poucos pares de células decidiu-se calcular a resistência do branco, que consiste na resistência associada ao sistema de elétrodos. É importante determinar este valor devido ao baixo número de pares de células, o que torna esta resistência significativa e pode levar a uma subestimação dos parâmetros quando comparados com sistemas com um elevado número de pares de células, onde esta resistência torna-se desprezável.

### **3.7 Análise do módulo transparente e verificação do efeito Coanda**

Para validar a ocorrência do efeito Coanda dentro do módulo de eletrodialise inversa, foi desenvolvido um ensaio experimental utilizando um módulo transparente e um espaçador projetado especificamente para induzir esse efeito. O objetivo principal deste estudo foi observar o comportamento do fluxo no interior do módulo e determinar se o efeito Coanda estava a ocorrer conforme esperado. Para isso, utilizou-se um traçador de cor azul, injetado de forma contínua e periódica, permitindo a visualização da trajetória do fluido e a identificação de padrões de escoamento.

#### **3.7.1 Metodologia experimental**

O ensaio foi conduzido com um módulo transparente, garantindo uma visão clara do comportamento do fluxo dentro do sistema. O espaçador desenvolvido Coanda 1x com grelha foi inserido no módulo, e a solução contendo o traçador azul foi injetada em condições controladas para monitorizar o escoamento ao longo do espaçador.

O desenho do espaçador foi baseado na premissa de que o efeito Coanda induziria refluxo nos canais adjacentes às estruturas internas do espaçador, criando um movimento de recirculação e promovendo uma maior renovação da solução junto às membranas. No entanto, a análise visual do comportamento do traçador revelou que os resultados diferiram significativamente das previsões iniciais.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Introdução dos resultados

Nesta secção, são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios realizados com os diferentes espaçadores desenvolvidos, comparando-os com os espaçadores comerciais utilizados como referência. Os principais parâmetros avaliados foram a tensão de circuito aberto, a resistência elétrica do módulo e a densidade de potência bruta. Estes parâmetros são essenciais para determinar o desempenho do sistema de eletrodialise inversa e compreender o impacto das modificações introduzidas nos espaçadores.

A tensão de circuito aberto é um indicador direto do potencial eletroquímico do sistema e reflete a capacidade do módulo de RED em gerar eletricidade a partir da diferença de salinidade entre as soluções. A resistência elétrica do módulo influencia diretamente a eficiência do processo, uma vez que uma resistência elevada pode limitar o fluxo de corrente iónica e reduzir o desempenho do sistema. Por fim, a densidade de potência bruta é um dos parâmetros mais críticos, pois representa a quantidade de energia gerada por unidade de área de membrana e permite uma comparação direta entre diferentes configurações de espaçadores.

Os ensaios laboratoriais foram realizados sob condições controladas, garantindo a reprodutibilidade dos resultados e permitindo uma avaliação objetiva dos efeitos da incorporação do efeito Coanda no design dos espaçadores. Espera-se que os espaçadores modificados proporcionem uma distribuição de fluxo mais eficiente, reduzam zonas mortas e melhorem a transferência iónica, resultando num aumento da densidade de potência gerada pelo sistema. Os dados obtidos serão discutidos em detalhe nas secções seguintes, comparando os desempenhos dos diferentes espaçadores e analisando a viabilidade da aplicação do efeito Coanda na otimização de sistemas RED.



Tabela 4 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros

Tipo de espaçador	Taxa de fluxo ( <i>mL/min</i> )	OCV (V)	Resistência ( $\Omega$ ) <sup>a</sup>	Densidade de potência ( <i>W/m</i> <sup>2</sup> )	Cronopotenciometria 1 ( $\Omega$ ) <sup>b</sup>	Cronopotenciometria 2 ( $\Omega$ )
<b>Comercial com grelha</b>	12	0.419	12.07	7.78E-04	13.24	13.25
	24	0.423	12.84	7.46E-04	13.72	14.18
	36	0.426	12.71	7.66E-04	13.61	13.67
	48	0.428	12.07	8.13E-04	12.94	13.06
	60	0.430	11.47	8.63E-04	12.18	11.77
	72	0.434	10.56	9.50E-04	11.22	11.13
<b>Comercial em branco</b>	12	0.412	4.82	1.78E-03	5.31	6.00
	24	0.429	4.72	1.96E-03	5.44	5.29
	36	0.434	4.58	2.06E-03	5.24	5.40
	48	0.438	4.49	2.13E-03	5.09	5.15
	60	0.439	4.45	2.17E-03	4.89	4.91
	72	0.444	4.23	2.32E-03	4.96	5.14
<b>Impresso em 3D com grelha</b>	12	0.424	27.18	3.62E-04	28.58	28.08
	24	0.420	23.16	4.16E-04	23.64	23.71
	36	0.422	19.32	5.00E-04	20.13	20.28
	48	0.425	16.89	5.78E-04	17.42	17.58
	60	0.428	14.29	6.89E-04	14.87	14.79
	72	0.430	12.72	7.81E-04	13.09	13.07

Tabela 5 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros (continuação 1)

Tipo de espaçador	Taxa de fluxo ( <i>mL/min</i> )	OCV (V)	Resistência ( $\Omega$ ) <sup>a</sup>	Densidade de potência ( <i>W/m</i> <sup>2</sup> )	Cronopotenciometria 1 ( $\Omega$ ) <sup>b</sup>	Cronopotenciometria 2 ( $\Omega$ )
Coanda 1x com grelha	12	0.400	22.18	3.93E-04	23.21	23.76
	24	0.409	20.87	4.37E-04	21.65	22.36
	36	0.422	16.33	5.90E-04	17.11	17.25
	48	0.427	14.36	6.85E-04	15.13	15.16
	60	0.431	13.18	7.56E-04	13.81	13.90
	72	0.433	12.29	8.16E-04	12.84	10.94
Coanda 1x em branco	12	0.418	5.33	1.67E-03	5.22	6.39
	24	0.434	4.92	1.93E-03	4.96	4.53
	36	0.438	4.62	2.08E-03	5.32	5.58
	48	0.440	4.54	2.13E-03	5.20	5.14
	60	0.441	4.46	2.18E-03	5.12	5.10
	72	0.442	4.44	2.19E-03	5.08	5.12
Coanda 2x com grelha	12	0.421	6.36	1.44E-03	7.09	7.31
	24	0.431	6.27	1.53E-03	6.99	7.10
	36	0.433	6.38	1.52E-03	7.10	7.17
	48	0.436	6.40	1.53E-03	7.08	7.13
	60	0.437	6.54	1.51E-03	7.22	7.24
	72	0.439	6.63	1.51E-03	7.30	7.31

Tabela 6 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros (continuação 2)

Tipo de espaçador	Taxa de fluxo ( <i>mL/min</i> )	OCV (V)	Resistência ( $\Omega$ ) <sup>a</sup>	Densidade de potência ( <i>W/m</i> <sup>2</sup> )	Cronopotenciometria 1 ( $\Omega$ ) <sup>b</sup>	Cronopotenciometria 2 ( $\Omega$ )
Coanda 2x em branco	12	0.420	4.86	1.83E-03	5.31	5.72
	24	0.440	4.42	2.19E-03	5.08	5.19
	36	0.445	4.23	2.32E-03	4.94	4.97
	48	0.445	4.12	2.38E-03	4.91	4.86
	60	0.442	4.08	2.38E-03	4.78	4.86
	72	0.443	4.38	2.23E-03	4.92	6.75
Coanda 3x com grelha	12	0.422	7.61	1.22E-03	8.43	8.65
	24	0.429	7.74	1.24E-03	8.60	8.67
	36	0.430	7.78	1.24E-03	8.51	8.63
	48	0.431	7.79	1.25E-03	8.51	8.63
	60	0.433	7.84	1.25E-03	8.58	8.66
	72	0.434	7.85	1.26E-03	8.57	8.56
Coanda 3x em branco	12	0.415	6.00	1.48E-03	6.95	6.96
	24	0.426	6.08	1.53E-03	6.94	6.82
	36	0.428	6.23	1.51E-03	6.86	6.96
	48	0.429	6.26	1.51E-03	6.87	7.00
	60	0.431	6.31	1.51E-03	6.99	7.06
	72	0.432	6.29	1.53E-03	6.98	7.01

Tabela 7 - Resultados obtidos para os diferentes espaçadores e parâmetros (continuação 3)

Tipo de espaçador	Taxa de fluxo ( <i>mL/min</i> )	OCV (V)	Resistência ( $\Omega$ ) <sup>a</sup>	Densidade de potência ( <i>W/m<sup>2</sup></i> )	Cronopotenciometria 1 ( $\Omega$ ) <sup>b</sup>	Cronopotenciometria 2 ( $\Omega$ )
<b>Coanda 4x com grelha</b>	12	0.413	8.37	1.07E-03	9.17	9.43
	24	0.425	8.53	1.11E-03	9.30	9.38
	36	0.428	8.48	1.13E-03	9.25	9.27
	48	0.429	8.44	1.15E-03	9.15	9.16
	60	0.430	8.43	1.15E-03	9.12	9.16
	72	0.431	8.41	1.16E-03	9.08	9.11
<b>Coanda 4x em branco</b>	12	0.416	7.91	1.15E-03	8.46	8.87
	24	0.426	7.85	1.21E-03	8.46	8.73
	36	0.428	7.75	1.24E-03	8.40	8.59
	48	0.428	7.67	1.25E-03	8.29	8.56
	60	0.429	7.68	1.26E-03	8.41	8.49
	72	0.431	7.66	1.27E-03	8.39	8.46

a - Valores da resistência já se encontram com a resistência do branco subtraída

b - Valores da cronopotenciometria indicam a soma da resistência ôhmica e não ôhmica e foram calculados manualmente diretamente dos gráficos obtidos no software Nova 2.1.8

## 4.2 Análise dos resultados obtidos

### 4.2.1 Tensão de circuito aberto

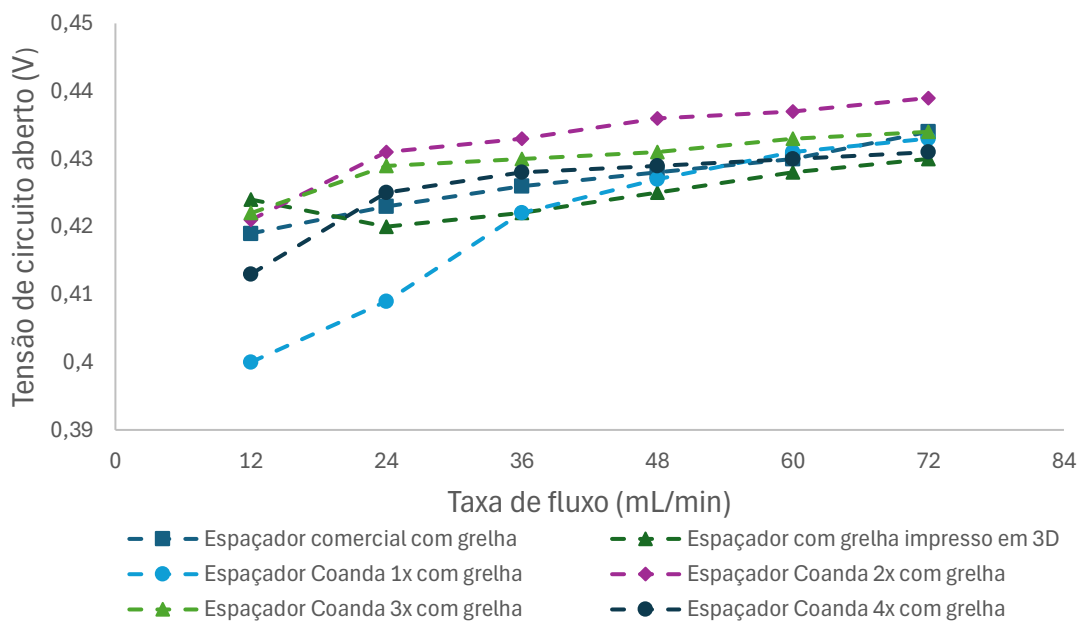


Figura 20 - Gráfico da variação da tensão de circuito aberto em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, impresso em 3D com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha)

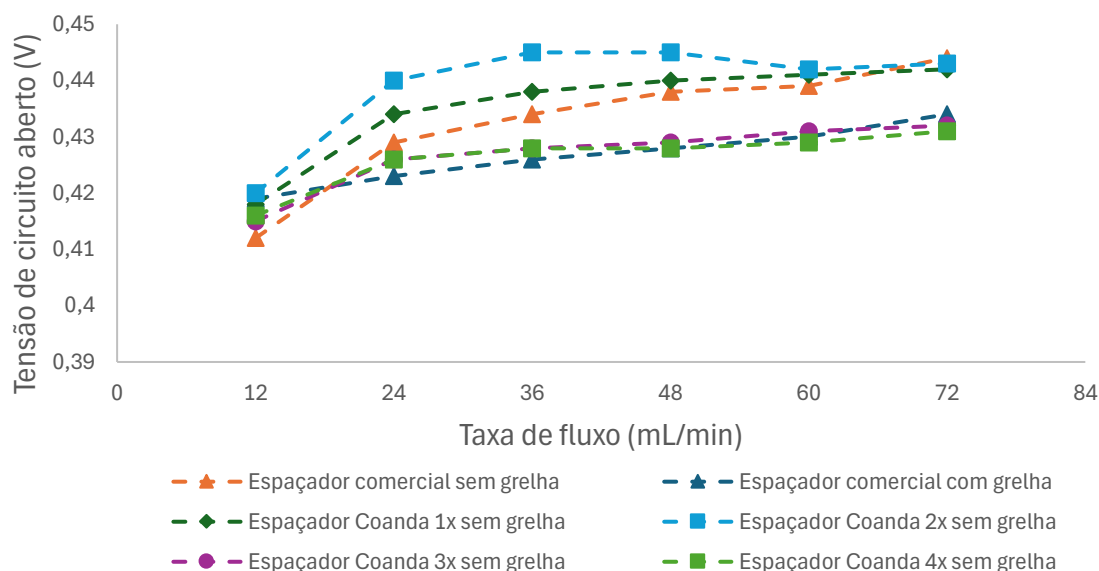


Figura 19 - Gráfico da variação da tensão de circuito aberto em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçadores comerciais sem grelha e com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x em branco)

A tensão de circuito aberto é um dos principais parâmetros na avaliação do desempenho de um módulo de eletrodialise inversa. A sua variação pode ser diretamente influenciada pelo design dos espaçadores, uma vez que a geometria do espaçador impacta a distribuição da solução dentro do módulo, afetando a eficiência da troca iônica nas membranas.

Para avaliar esse comportamento, foram realizados ensaios experimentais comparando os espaçadores comerciais com os espaçadores projetados com o efeito Coanda aplicado. Os gráficos das Figuras 19 e 20 ilustram a variação do OCV em função da taxa de fluxo para os diferentes espaçadores em estudo.

#### 4.2.1.1 Variação do OCV em função da taxa de fluxo

Analisando os gráficos (Figura 19 e Figura 20) observa-se que, de uma forma geral, o OCV aumenta com o aumento da taxa de fluxo, este comportamento já era esperado uma vez que um maior caudal de fluido em circulação melhora a renovação da solução dentro dos compartimentos do módulo e reduz a polarização da concentração na superfície das membranas. Essa tendência foi observada para todos os espaçadores testados, tanto os comerciais quanto os projetados com o efeito Coanda. No entanto, esse aumento varia de acordo com a configuração dos espaçadores.

Na Figura 19, que representa o gráfico dos espaçadores com grelha, verifica-se que o espaçador Coanda 2x com grelha apresenta os valores mais elevados de OCV a partir dos 24 mL/min, indicando que essa configuração contribui para um transporte iônico mais eficiente. Em contraste, o espaçador Coanda 1x com grelha apresenta os valores mais baixos de OCV para fluxos mais baixos (12 - 36 mL/min), no entanto estes valores aumentam à medida que a taxa de fluxo aumenta. O espaçador Coanda 4x com grelha, embora apresente um OCV inicial competitivo, não mantém um crescimento tão acentuado, implicando que a replicação excessiva da estrutura pode gerar perturbações no fluxo que reduzem a eficiência da conversão eletroquímica. O espaçador comercial com grelha mantém um comportamento relativamente estável, mas é superado pelos modelos otimizados em taxas de fluxo mais altas.

Na Figura 20, referente aos espaçadores com canal de fluxo sem grelha, observa-se que o desempenho do OCV é, de forma geral, superior aos espaçadores com grelha. O Coanda 2x sem grelha destaca-se como o espaçador com a maior OCV em todo o intervalo em estudo, atingindo valores superiores aos dos espaçadores comerciais e dos restantes espaçadores desenvolvidos. O Coanda 1x sem grelha apresenta um crescimento mais equilibrado e consistente, destacando-se logo a seguir ao Coanda 2x na maior parte do intervalo testado. Já os espaçadores Coanda 3x e 4x sem grelha demonstram uma tendência mais moderada de crescimento do OCV, indicando que a replicação excessiva das estruturas pode não ser vantajosa para otimizar o transporte iônico. O espaçador comercial sem grelha mostra um

comportamento estável e competitivo, mas ainda assim fica atrás dos modelos otimizados em grande parte dos pontos avaliados.

#### **4.2.1.2 Comparação entre espaçadores com e sem grelha**

A influência da presença da grelha nos espaçadores é evidente na análise dos gráficos. Comparando os espaçadores com e sem grelha, verifica-se que os modelos sem grelha apresentam valores superiores de OCV na maior parte das taxas de fluxo testadas. Isso prova que a presença da grelha aumenta o efeito de sombra do espaçador sobre a membrana e prejudica o transporte iônico.

O espaçador Coanda 2x sem grelha demonstrou o melhor desempenho geral, atingindo os maiores valores de OCV, seguido de perto pelo Coanda 1x sem grelha. Já os espaçadores Coanda 3x e 4x sem grelha, apesar de apresentarem melhorias em relação aos modelos comerciais, tiveram um crescimento mais moderado da OCV, sugerindo que o excesso da replicação da estrutura que promove o efeito de Coanda pode não ser vantajoso.

Nos espaçadores com grelha, o Coanda 2x com grelha também se mostrou o mais eficiente, seguido pelo Coanda 3x com grelha, que manteve valores razoáveis para os intervalos de fluxo em estudo. No entanto, o espaçador 4x com grelha apresentou um desempenho inferior, reforçando a hipótese de que a replicação excessiva da estrutura pode reduzir a eficiência do transporte iônico.

Os espaçadores comerciais sem grelha demonstraram um desempenho ligeiramente superior à versão com grelha, indicando que a remoção da grelha pode reduzir barreiras ao transporte iônico, nomeadamente o efeito de sombra, e favorecer a eficiência eletroquímica do sistema. Entretanto, a presença da grelha pode ser vantajosa para fornecer suporte estrutural, prevenindo deformações do espaçador durante a operação prolongada.

#### **4.2.1.3 Considerações finais sobre o OCV**

Os resultados apresentados confirmam que a taxa de fluxo impacta positivamente o OCV, e que os espaçadores otimizados com o efeito Coanda demonstraram um desempenho superior aos modelos comerciais. Entre os espaçadores testados, os Coanda 2x e 1x sem grelha se destacaram, atingindo os maiores valores de OCV e demonstrando uma melhor eficiência eletroquímica em comparação aos demais modelos.

A análise comparativa entre espaçadores com e sem grelha revela que os modelos sem grelha promovem um transporte iônico mais eficiente, pois apresentam menores restrições hidráulicas e permitem uma melhor circulação do fluido. No entanto, a presença da grelha pode ser necessária para garantir maior estabilidade estrutural do espaçador e evitar deformações que poderiam comprometer o desempenho a longo prazo.

Os espaçadores Coanda 3x e 4x, tanto com quanto sem grelha, apresentaram desempenho inferior aos modelos Coanda 2x e 1x, o que sugere que a replicação excessiva do efeito Coanda pode introduzir turbulências e aumentar o efeito de sombra do espaçador sobre a membrana que prejudicam a eficiência do transporte iônico.

Dessa forma, conclui-se que a aplicação do efeito Coanda no design dos espaçadores é uma abordagem promissora para otimizar a eficiência do sistema RED, mas o design ideal deve equilibrar a otimização do fluxo e a minimização de restrições ao transporte iônico. Os espaçadores Coanda 2x e 1x sem grelha destacam-se como os mais promissores para futuras otimizações da tecnologia, apresentando um excelente compromisso entre eficiência eletroquímica e facilidade de fabricação.

## 4.2.2 Resistência elétrica do módulo

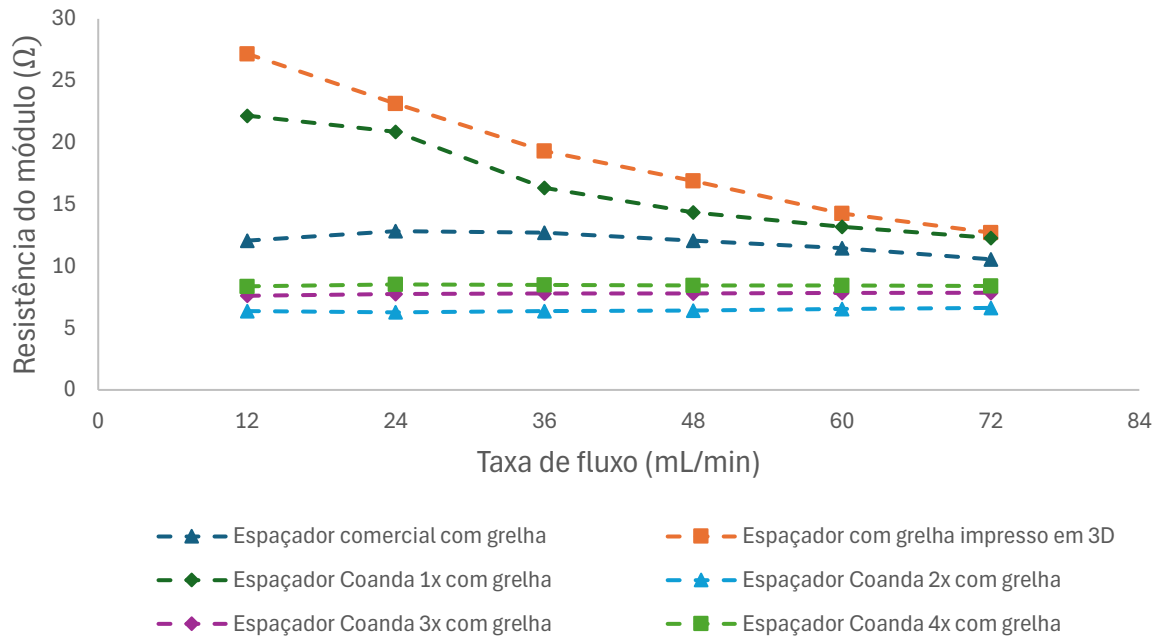


Figura 21 - Gráfico da variação da resistência elétrica do módulo em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, espaçador com grelha impresso em 3D e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha)

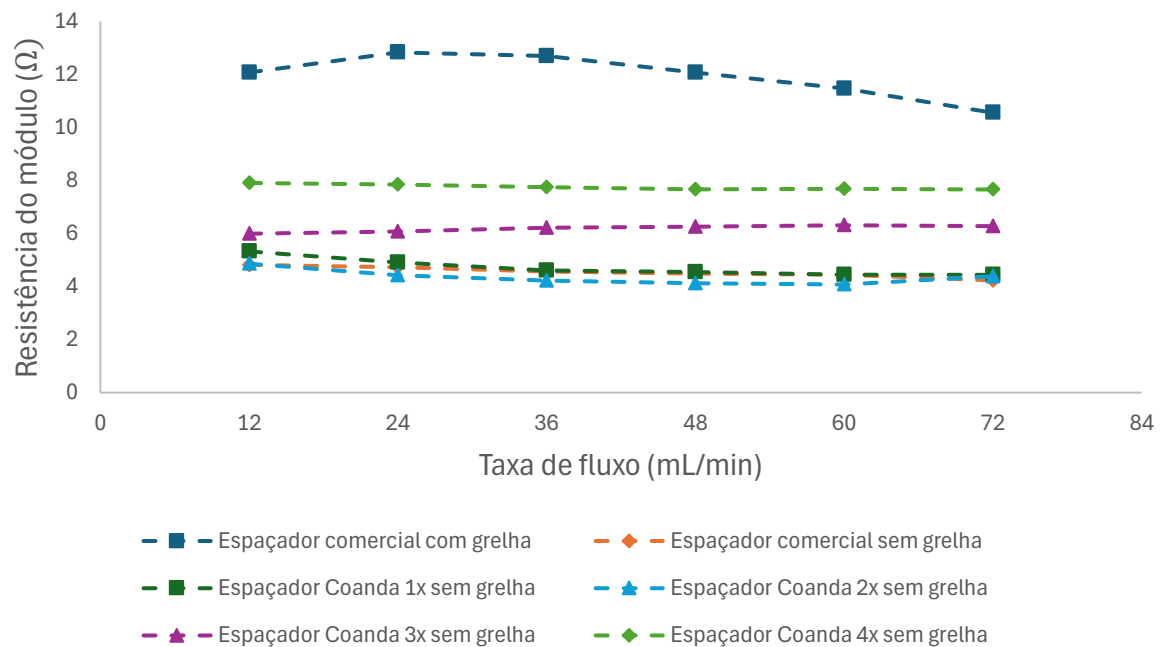


Figura 22 - Gráfico da variação da resistência elétrica do módulo em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçadores comerciais com e sem grelha e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha)

A resistência elétrica do módulo é um parâmetro crucial na avaliação do desempenho da eletrodialise inversa, pois influencia diretamente a eficiência do transporte iônico e a conversão eletroquímica do sistema. Uma resistência elevada pode resultar em perdas elétricas significativas, limitando a produção energética, enquanto valores mais baixos indicam um melhor transporte iônica através da membrana e um sistema mais eficiente. O presente estudo analisou a variação da resistência do módulo em função da taxa de fluxo para diferentes configurações de espaçadores, incluindo os comerciais e os otimizados com o efeito Coanda.

#### **4.2.2.1 Variação da resistência do módulo em função a taxa de fluxo**

A análise dos gráficos mostra que, de forma geral, a resistência do módulo diminui com o aumento da taxa de fluxo, o que é esperado, pois um fluxo mais elevado reduz a camada limite de difusão e melhora a renovação do fluido dentro do módulo. No entanto, essa redução varia conforme o design dos espaçadores.

No gráfico referente aos espaçadores com grelha (Figura 21), observa-se que o espaçador comercial com grelha apresenta valores de resistência elevados, sendo superado pelos espaçadores com efeito Coanda. O espaçador impresso em 3D com grelha apresenta os valores mais altos de resistência, isto deve-se ao facto de os ensaios com este espaçador terem sido feitos alguns dias depois dos ensaios com os restantes espaçadores, tendo o módulo permanecido montado durante este período, sendo que as membranas acabaram por danificar, e estes danos acabaram por influenciar de forma negativa o transporte iônico. Por outro lado, os espaçadores Coanda 2x, 3x e 4x com grelha apresentam os menores valores de resistência, mantendo-se próximos entre si e indicando que o efeito Coanda contribui para um fluxo mais eficiente.

No gráfico dos espaçadores sem grelha (Figura 22), a tendência se mantém, com os espaçadores Coanda 2x e 1x sem grelha apresentando as menores resistências, seguidos pelos modelos Coanda 3x e 4x sem grelha, que mantêm valores intermediários. O espaçador comercial sem grelha apresenta uma resistência mais elevada ao longo do intervalo de fluxo em estudo, sendo superado pelos modelos otimizados.

Esses resultados indicam que os espaçadores projetados com efeito Coanda são mais eficientes na redução da resistência do módulo em comparação aos espaçadores comerciais, com os modelos Coanda 2x e 1x apresentando os melhores desempenhos.

#### **4.2.2.2 Comparação entre espaçadores e impacto do efeito Coanda**

A presença da grelha nos espaçadores pode impactar significativamente a resistência do módulo, pois pode tanto estruturar melhor o fluxo quanto introduzir barreiras ao transporte iônico, nomeadamente o efeito de sombra do espaçador.

Comparando os gráficos, verifica-se que os espaçadores sem grelha apresentam, de forma geral, valores de resistência inferiores, indicando que a remoção da grelha pode favorecer um transporte iônico mais eficiente ao reduzir a resistência elétrica do sistema.

Os espaçadores Coanda 2x e 1x sem grelha demonstraram os melhores desempenhos, atingindo os menores valores de resistência entre todos os espaçadores testados. Isso sugere que esses modelos permitem um fluxo mais homogêneo, reduzindo as perturbações que poderiam aumentar a resistência. Dado que o efeito de sombra está relacionado com a resistência não ôhmica do sistema, era expectável que os espaçadores sem grelha apresentassem resistências inferiores às dos espaçadores com grelha. Já os espaçadores Coanda 3x e 4x sem grelha, embora apresentem resistência inferior à dos modelos comerciais, não conseguem reduzir tanto a resistência quanto os modelos Coanda 2x e 1x, indicando que a replicação excessiva das estruturas que promovem o efeito Coanda aumenta a resistência não ôhmica do sistema.

Nos espaçadores com grelha, o Coanda 2x com grelha apresenta a menor resistência dentro desse grupo, seguido pelos modelos Coanda 3x e 4x com grelha, que se mantêm próximos.

#### **4.2.2.3 Considerações finais sobre a resistência do módulo de eletrodialise inversa**

Os resultados apresentados confirmam que a resistência do módulo diminui com o aumento da taxa de fluxo, e que os espaçadores projetados com efeito Coanda apresentam desempenho superior aos comerciais, especialmente os Coanda 2x e 1x, que demonstraram os menores valores de resistência ao longo da faixa testada.

A comparação entre espaçadores com e sem grelha revela que os modelos sem grelha tendem a apresentar menor resistência, pois removem barreiras ao transporte iônico e favorecem um fluxo mais eficiente. No entanto, a grelha pode ser necessária para garantir a estabilidade mecânica do espaçador.

Os espaçadores Coanda 3x e 4x, tanto com grelha quanto sem grelha, apresentaram valores intermediários de resistência, sugerindo que a replicação excessiva do efeito Coanda pode não gerar benefícios adicionais e, em alguns casos, pode até dificultar a circulação do fluido.

Dessa forma, conclui-se que a aplicação do efeito Coanda no design dos espaçadores é uma estratégia eficiente para reduzir a resistência elétrica do módulo, mas a escolha da configuração ideal deve equilibrar a otimização do fluxo com a necessidade de suporte mecânico. Os espaçadores Coanda 2x e 1x sem grelha destacam-se como os mais promissores para futuras aplicações, pois apresentam a menor resistência elétrica e favorecem um melhor transporte iônico dentro do sistema RED.

### 4.2.3 Densidade de potência bruta

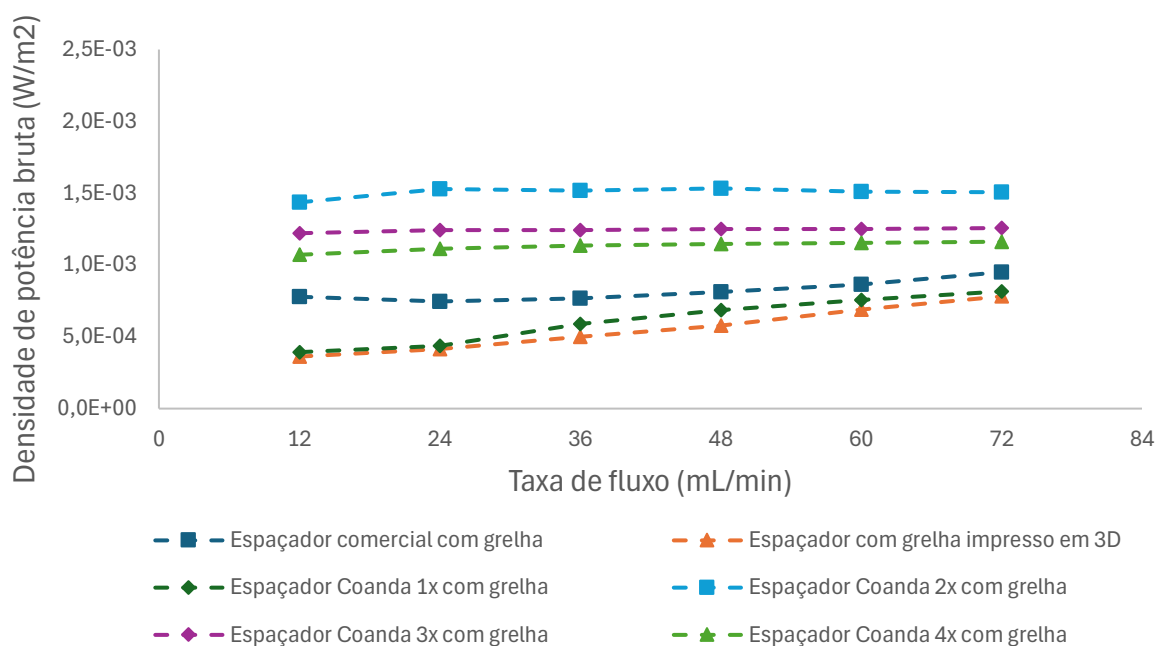


Figura 23 - Gráfico da variação da densidade de potência bruta em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, espaçador com grelha impresso em 3D e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha)

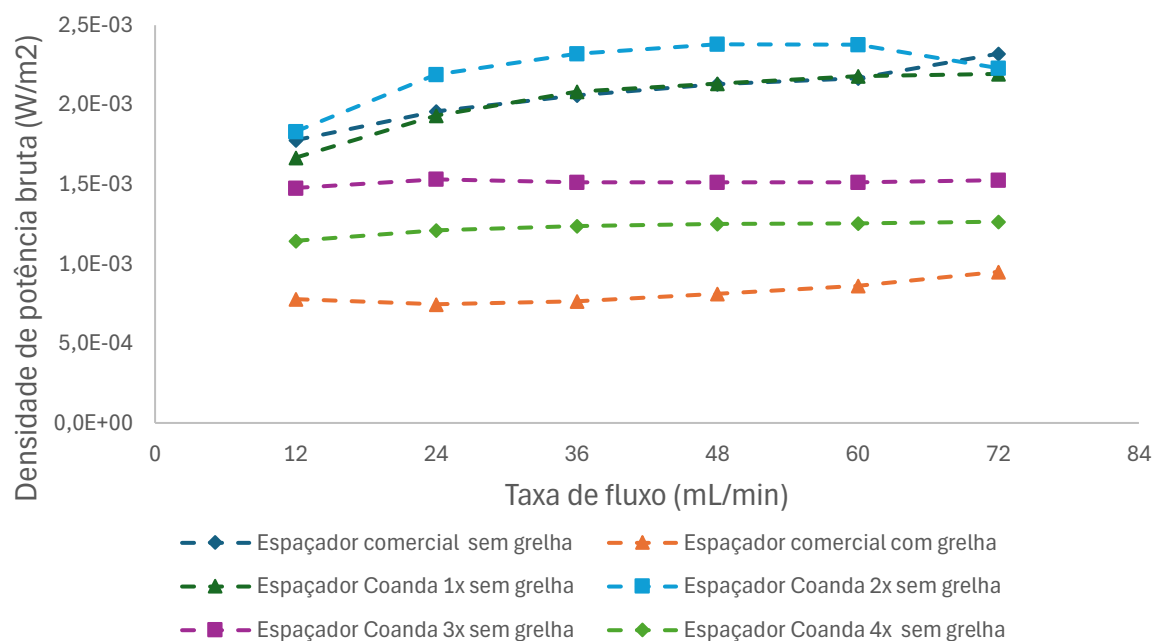


Figura 24 - Gráfico da variação da densidade de potência bruta em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha e sem grelha, espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha)

A densidade de potência bruta é um parâmetro fundamental para a avaliação da eficiência da eletrodialise inversa, pois representa a taxa de conversão da energia do gradiente de salinidade em energia elétrica. Esse parâmetro é influenciado por fatores como o design dos espaçadores, a resistência elétrica do módulo e a taxa de fluxo, que afetam diretamente o transporte iônico dentro do sistema.

Os gráficos apresentados mostram a relação entre a taxa de fluxo (mL/min) e a densidade de potência bruta ( $W/m^2$ ) para os diferentes espaçadores, comparando modelos comerciais com espaçadores projetados com efeito Coanda, tanto com grelha quanto sem grelha (branco). Nesta subsecção, analisa-se a evolução da densidade de potência em função da taxa de fluxo para diferentes configurações de espaçadores, incluindo os comerciais e os otimizados com efeito Coanda.

#### **4.2.3.1 Variação da densidade de potência em função da taxa de fluxo**

A análise dos dados apresentados no gráfico indica que, de maneira geral, a densidade de potência bruta aumenta com a taxa de fluxo. Este comportamento ocorre porque, a taxas de fluxo mais elevadas, há uma maior renovação das soluções nos compartimentos dos espaçadores do módulo. No entanto, a relação entre o fluxo e a densidade de potência não é linear, pois valores excessivamente elevados do fluxo podem fazer diminuir o tempo de residência da solução no módulo e afetar a eficiência global do sistema.

No gráfico referente aos espaçadores com grelha (Figura 23), o espaçador Coanda 2x com grelha apresenta os maiores valores de densidade de potência, mantendo um desempenho consistente ao longo de todo o intervalo de fluxos testada. O Coanda 3x com grelha é o espaçador otimizado que mais se aproxima desse desempenho, sugerindo que sua geometria favorece a circulação do fluido e reduz perdas iônicas. O espaçador Coanda 4x com grelha apresenta valores intermediários, enquanto o Coanda 1x é o espaçador que apresenta uma densidade de potência inferior quando comparado ao espaçador comercial.

No gráfico dos espaçadores sem grelha (Figura 24), a tendência de crescimento da densidade de potência também é observada, mas com algumas diferenças. O Coanda 2x sem grelha atinge os maiores valores, superando o espaçador comercial sem grelha para caudais de entrada intermediários e elevados. O Coanda 1x sem grelha também apresenta um bom desempenho, enquanto os espaçadores Coanda 3x e 4x sem grelha demonstram um crescimento mais estável, sem grandes variações.

#### **4.2.3.2 Comparação entre espaçadores e impacto do efeito Coanda**

A análise comparativa entre os espaçadores com e sem grelha revela que os modelos sem grelha, de maneira geral, apresentam valores superiores de densidade de potência,

sugerindo que a remoção da grelha pode favorecer um transporte iônico mais eficiente ao reduzir barreiras ao fluxo.

O espaçador Coanda 2x sem grelha demonstrou os melhores desempenhos, atingindo os maiores valores de densidade de potência ao longo do intervalo de fluxos testado. Já os espaçadores Coanda 1x, 3x e 4x sem grelha, embora apresentem valores superiores aos modelos comerciais, não conseguem aumentar a densidade de potência de forma tão significativa quanto os modelos Coanda 2x e 1x, indicando que a replicação excessiva da estrutura pode não trazer benefícios adicionais.

Nos espaçadores com grelha, o Coanda 2x com grelha apresentou a melhor performance, superando os restantes modelos otimizados e também o espaçador comercial. Já os espaçadores Coanda 3x e 4x com grelha mantiveram desempenhos intermediários, enquanto o Coanda 1x com grelha apresentou a menor densidade de potência entre os espaçadores otimizados.

Esses resultados sugerem que a remoção da grelha pode ser vantajosa para aumentar a densidade de potência, mas a sua presença pode ser necessária para garantir suporte estrutural.

#### **4.2.3.3 Considerações finais sobre a densidade de potência**

Os resultados confirmam que a geometria do espaçador tem um impacto na densidade de potência bruta gerada pelo sistema, sendo que os modelos otimizados com efeito Coanda demonstram desempenhos superiores em comparação com os espaçadores comerciais.

O espaçador Coanda 2x com grelha mostrou-se um dos mais promissores, com um excelente equilíbrio entre eficiência de fluxo e conversão eletroquímica, enquanto os modelos Coanda 3x e 4x com grelha também apresentaram bons desempenhos, especialmente para fluxos mais elevados.

A tendência geral de aumento da densidade de potência com o fluxo confirma que a otimização da geometria dos espaçadores pode ser uma estratégia viável para melhorar a eficiência dos sistemas de RED, reduzindo perdas energéticas e maximizando a conversão da energia do gradiente de salinidade em eletricidade.

#### 4.2.4 Resistência ôhmica e não ôhmica

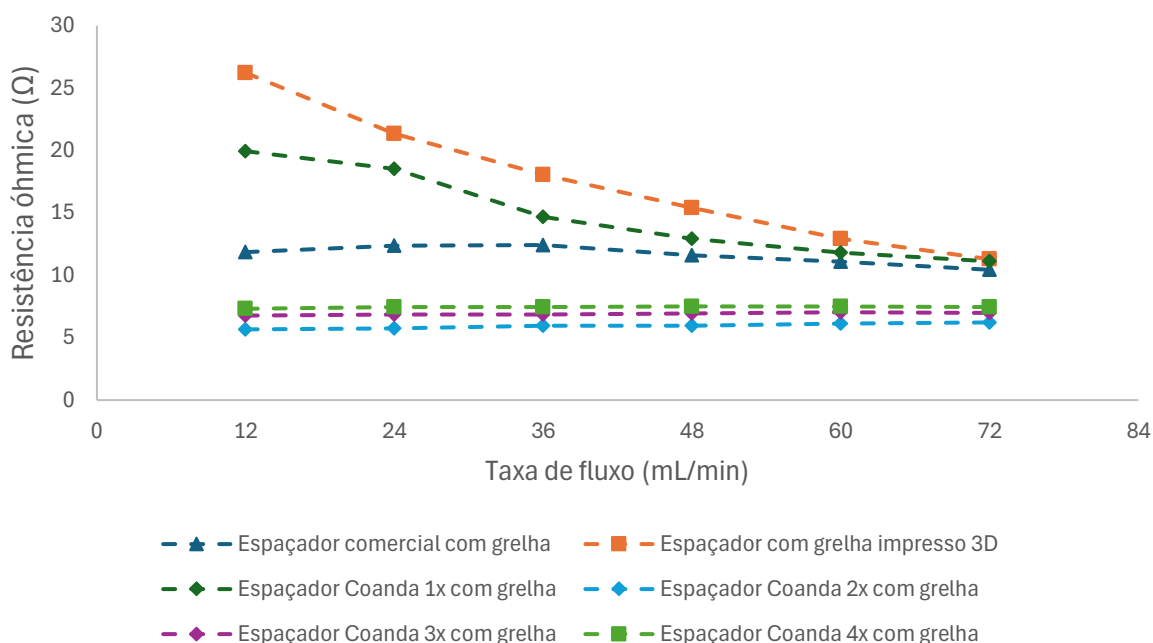


Figura 25 - Gráfico da variação da resistência ôhmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, impresso em 3D com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha)

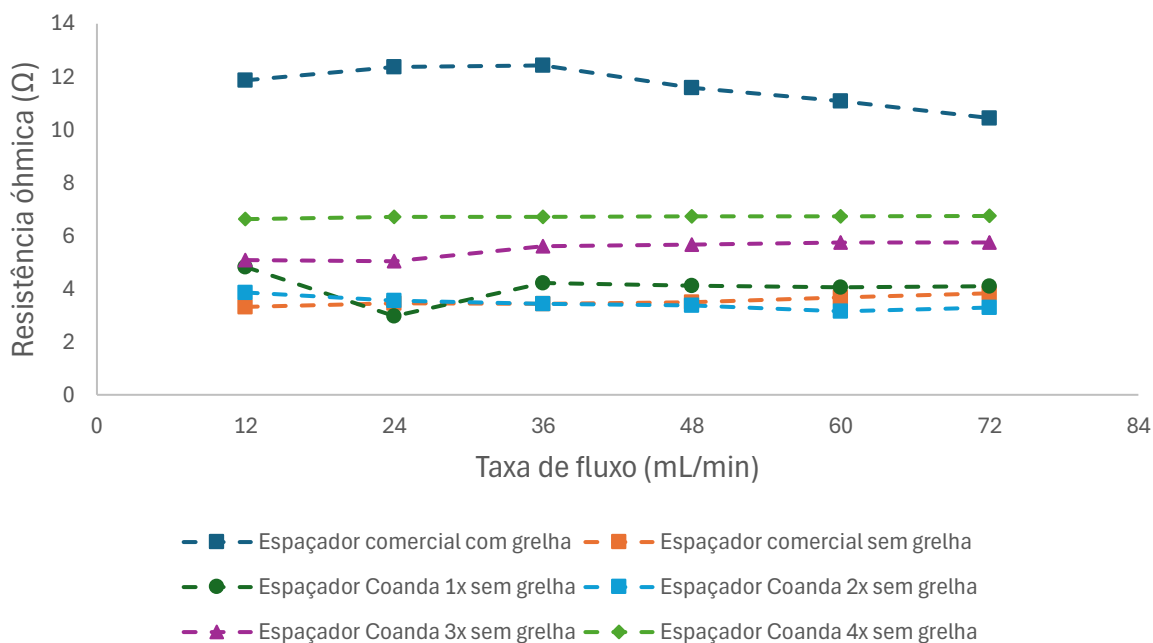


Figura 26 - Gráfico da variação da resistência ôhmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha e sem grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha)

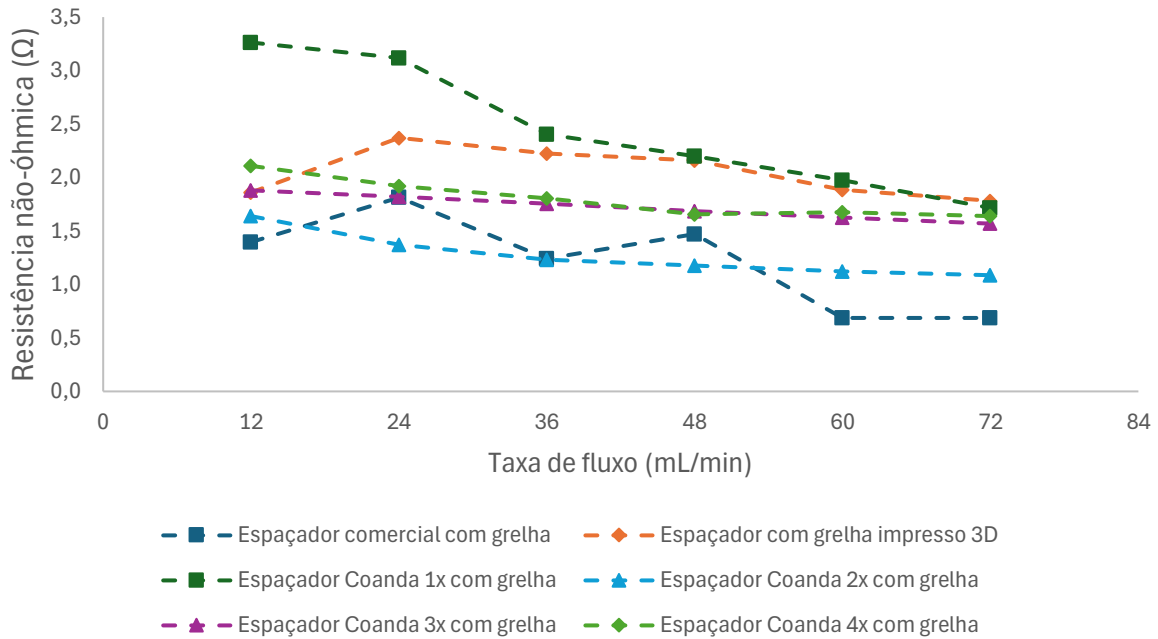


Figura 27 - Gráfico da variação da resistência não-ohmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha, impresso em 3D com grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x com grelha)

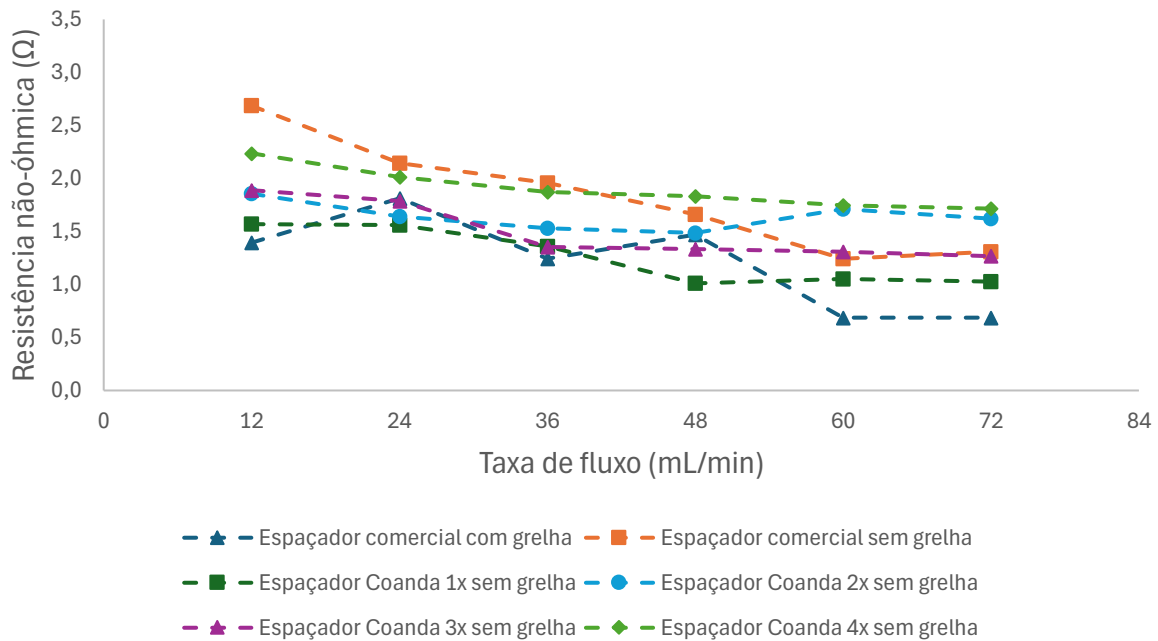


Figura 28 - Gráfico da variação da resistência não-ohmica em função da taxa de fluxo para diferentes tipos de espaçadores (espaçador comercial com grelha e sem grelha, e espaçadores desenvolvidos com efeito Coanda 1x, 2x, 3x e 4x sem grelha)

A resistência total do módulo de eletrodialise inversa é composta por dois componentes principais: a resistência ôhmica, associada à condução iônica através das membranas e dos espaçadores, e a resistência não ôhmica, que inclui efeitos como a polarização da concentração e perdas hidrodinâmicas. A análise da variação dessas resistências em função da taxa de fluxo é essencial para avaliar a eficiência do sistema e o impacto do design dos espaçadores na melhoria do desempenho eletroquímico.

#### **4.2.4.1 Variação das resistências ôhmicas e não-ôhmicas em função da taxa de fluxo**

Os resultados experimentais indicam que a resistência ôhmica tende a diminuir com o aumento da taxa de fluxo, comportamento esperado devido à maior renovação da solução e redução dos gradientes de concentração.

Os gráficos da resistência ôhmica (Figuras 25 e 26) mostram que o espaçador comercial com grelha, apresenta valores de resistência ôhmica superiores em comparação com os espaçadores otimizados com efeito Coanda, à exceção dos espaçadores Coanda 1x com grelha e impresso em 3D com grelha. Dentre os espaçadores com efeito Coanda aplicado, os modelos Coanda 2x e 3x destacaram-se por apresentarem os menores valores de resistência ôhmica ao longo do intervalo de taxas de fluxo testado. Esse comportamento sugere que a otimização da geometria dos espaçadores favorece um transporte iônico mais eficiente, reduzindo as perdas elétricas associadas à resistência do módulo.

A resistência não ôhmica, por outro lado, apresentou uma tendência diferente. Embora os valores de resistência não ôhmica também reduzam com o aumento da taxa de fluxo, essa variação foi menos acentuada do que a observada para a resistência ôhmica. Isso ocorre porque a resistência não ôhmica está mais diretamente relacionada a efeitos como a polarização da concentração e a formação da camada de dupla difusão, os quais podem não ser completamente eliminados apenas pelo aumento do fluxo.

#### **4.2.4.2 Comparação entre os espaçadores e o impacto do efeito Coanda**

A análise comparativa entre os espaçadores revela que a presença da grelha tem um impacto significativo sobre as resistências ôhmica e não ôhmica do sistema. Os espaçadores sem grelha apresentaram, de forma geral, resistências mais baixas, sugerindo que a remoção da grelha pode minimizar os efeitos de sombra e barreiras ao transporte iônico.

Os modelos Coanda 2x e 3x sem grelha foram os que apresentaram os menores valores de resistência ôhmica e não ôhmica entre todos os espaçadores testados, indicando que a sua geometria promove uma melhor distribuição do fluxo e minimiza perturbações que possam aumentar a resistência elétrica.

Nos espaçadores com grelha, o Coanda 2x com grelha demonstrou o melhor desempenho, seguido pelos modelos Coanda 3x e 4x com grelha. Esses resultados indicam que, embora

a grelha possa estruturar melhor o fluxo, ela também pode introduzir resistências adicionais, reduzindo a eficiência do transporte iônico.

#### **4.2.4.3 Considerações finais sobre as resistências ôhmica e não-ôhmica**

Os resultados obtidos confirmam que o design do espaçador influencia diretamente as resistências ôhmica e não ôhmica do módulo. A implementação do efeito Coanda demonstrou ser uma estratégia eficaz para reduzir essas resistências, especialmente nos modelos Coanda 2x e 3x, que apresentaram os menores valores ao longo de toda a faixa de taxa de fluxo testada.

Além disso, a remoção da grelha mostrou-se uma abordagem promissora para reduzir ainda mais a resistência elétrica do sistema, uma vez que minimiza o efeito de sombra do espaçador e facilita o transporte iônico. No entanto, a presença da grelha pode ser necessária para garantir estabilidade estrutural ao módulo.

Em suma, os resultados reforçam a importância da otimização geométrica dos espaçadores para maximizar a eficiência dos sistemas de RED, permitindo a redução das perdas elétricas e a melhoria da conversão eletroquímica do sistema.

### **4.3 Discussão global dos resultados**

A análise dos resultados obtidos ao longo dos ensaios experimentais evidencia a influência da geometria dos espaçadores no desempenho do sistema. A implementação do efeito Coanda mostrou-se uma estratégia eficaz para otimizar a distribuição do fluxo e melhorar a eficiência global do sistema, reduzindo a resistência elétrica e aumentando a densidade de potência gerada.

Os resultados da tensão de circuito aberto indicam que os espaçadores otimizados com o efeito Coanda apresentam, de forma geral, um desempenho superior em comparação com os espaçadores comerciais. Destaca-se o espaçador Coanda 2x com grelha, que obteve valores elevados de OCV ao longo de todas as taxas de fluxo, confirmando a sua capacidade de promover um fluxo mais homogêneo e minimizar a polarização da concentração. As geometrias Coanda 3x e 4x com grelha também demonstraram bons resultados.

No que diz respeito à resistência elétrica do módulo, verificou-se uma tendência de redução da resistência à medida que a taxa de fluxo aumentava, sendo este efeito mais acentuado nos espaçadores otimizados. Mais uma vez, o espaçador Coanda 2x com grelha destacou-se com os valores mais baixos de resistência elétrica ao longo dos ensaios, demonstrando que um design equilibrado pode reduzir perdas elétricas e melhorar a eficiência do transporte iônico. Os espaçadores Coanda 3x e 4x com grelha também apresentaram resistências

reduzidas, especialmente em fluxos elevados, reforçando a vantagem da aplicação do efeito Coanda na melhoria da condutividade do sistema RED.

A densidade de potência bruta revelou uma forte correlação com os parâmetros analisados, sendo significativamente influenciada pela resistência elétrica e pela tensão de circuito aberto. Os espaçadores otimizados com o efeito Coanda apresentaram desempenhos superiores, com destaque para os modelos Coanda 2x, 3x e 4x com grelha, que atingiram valores próximos ou até superiores aos espaçadores comerciais mais eficientes. Estes resultados demonstram que a aplicação do efeito Coanda nos espaçadores pode contribuir para o aumento da conversão eletroquímica e, conseqüentemente, para uma melhor produção de energia.

No que se refere à resistência elétrica do módulo, observou-se uma redução progressiva desse parâmetro com o aumento da taxa de fluxo. Esse comportamento foi mais evidente nos espaçadores otimizados, reforçando a eficácia do efeito Coanda na melhoria da condutividade do sistema RED. O espaçador Coanda 2x com grelha, mais uma vez, apresentou os valores mais baixos de resistência elétrica, demonstrando que um design bem equilibrado pode minimizar as perdas elétricas e otimizar o transporte iônico. Modelos como Coanda 3x e 4x com grelha também mostraram reduções significativas na resistência, sobretudo em condições de fluxo elevado, confirmando a vantagem dessa configuração.

De forma geral, os resultados confirmam que a modificação da geometria dos espaçadores utilizando o efeito Coanda tem um impacto positivo no desempenho da RED, reduzindo perdas energéticas e otimizando a conversão de energia. A escolha da intensidade do efeito Coanda revelou-se um fator crucial, com o espaçador Coanda 2x com grelha a destacar-se como um dos melhores.

#### **4.4 Resultados do comportamento dos espaçadores num módulo transparente**

Contrariamente ao esperado, o refluxo projetado não se verificou. Observou-se que, embora o efeito Coanda tenha causado adesão da água à superfície das estruturas do espaçador, a recirculação do fluido nos canais adjacentes foi impedida pelo fluxo ascendente dominante da água. Assim, em vez de ocorrer um movimento de recirculação nos canais laterais, o fluido continuava a ser conduzido para cima, sem retornar e sem formar o padrão de escoamento desejado.

Este fenómeno deve-se ao facto de, mesmo que o efeito Coanda tenha induzido a aderência do fluido às superfícies internas do espaçador, a força do fluxo ascendente era suficientemente forte para impedir que a água retornasse pelos canais adjacentes. Dessa forma, o traçador azul deslocou-se principalmente na direção do fluxo principal.

Os resultados deste ensaio evidenciam que a simples introdução de estruturas no espaçador não é suficiente para garantir a ocorrência do efeito Coanda na forma esperada. A interação entre o fluxo principal e as zonas de recirculação precisa de ser cuidadosamente considerada no design do espaçador.

Este comportamento sugere que o efeito Coanda pode ser mais bem aproveitado se houver uma reconfiguração da geometria do espaçador, de forma a favorecer uma distribuição de fluxo que permita a recirculação.

#### 4.4.1 Considerações finais sobre os resultados obtidos

O ensaio realizado permitiu verificar a limitação do atual design do espaçador no que diz respeito à indução do efeito Coanda. Embora a adesão do fluido às superfícies das estruturas tenha sido confirmada, a recirculação esperada não ocorreu devido à predominância do fluxo ascendente, que impediu o refluxo nos canais laterais.

Com base nestas observações, é recomendável a reformulação do design do espaçador, considerando novos parâmetros para maximizar os benefícios do efeito Coanda e melhorar a eficiência do sistema RED.

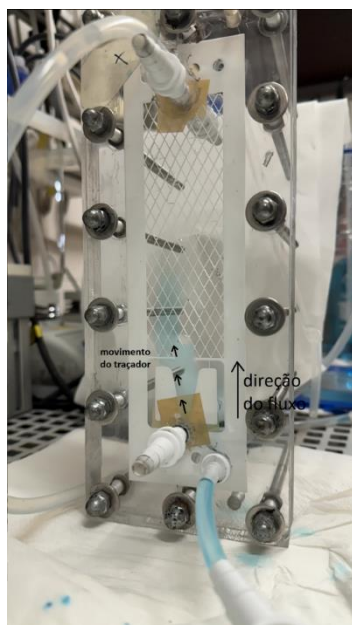


Figura 29 - Movimento do traçador num espaçador com efeito Coanda aplicado com grelha dentro do módulo transparente

## CONCLUSÕES

A crescente necessidade de fontes de energia renováveis e sustentáveis impulsionou a investigação na área da energia do gradiente de salinidade, com a eletrodialise inversa a emergir como uma das tecnologias mais promissoras para a conversão desta energia em eletricidade. Este estudo teve como principal objetivo avaliar a influência do efeito Coanda no desempenho dos espaçadores utilizados em módulos de RED, analisando a sua influência em parâmetros críticos como a tensão de circuito aberto, a resistência elétrica do módulo e a densidade de potência bruta.

Os resultados obtidos ao longo dos ensaios laboratoriais mostraram que os espaçadores com estruturas internas baseadas no efeito Coanda apresentaram melhorias significativas em vários parâmetros, quando comparados com os espaçadores comerciais. O modelo Coanda 2x com grelha destacou-se como o mais eficiente, atingindo uma tensão de circuito aberto máxima de 0.439 V, uma resistência elétrica mínima de 6.27  $\Omega$  (a 24 mL·min<sup>-1</sup>) e uma densidade de potência bruta máxima de  $1.53 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (a 36 mL·min<sup>-1</sup>). Em comparação, o espaçador comercial com grelha registou uma OCV máxima de 0.434 V, uma resistência mínima de 10.56  $\Omega$  e uma densidade de potência máxima de  $9.50 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Outros modelos desenvolvidos com o efeito Coanda, como o Coanda 3x com grelha e o Coanda 4x com grelha, também demonstraram desempenhos superiores. O modelo Coanda 3x com grelha atingiu uma OCV máxima de 0.437 V, resistência de 6.60  $\Omega$ , e densidade de potência de  $1.50 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Já o modelo Coanda 4x com grelha registou 0.433 V de OCV, 6.36  $\Omega$  de resistência e  $1.44 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  de densidade de potência bruta. Estes resultados mostram que a modificação da geometria dos espaçadores tem um efeito direto na eficiência da RED, melhorando o transporte iónico e a conversão eletroquímica de energia.

Observou-se também que o aumento da taxa de fluxo levou a uma subida geral da OCV e a uma redução da resistência elétrica em todos os espaçadores, confirmando a importância da renovação das soluções junto às membranas para minimizar a polarização de concentração. A melhoria da densidade de potência foi especialmente visível nas geometrias otimizadas com grelha, o que mostra o benefício combinado do efeito Coanda com a estabilização do escoamento.

Através da observação visual num módulo transparente, verificou-se que o fluido tendia a aderir às superfícies curvas dos espaçadores, em linha com o efeito Coanda. No entanto, não se observou a recirculação lateral esperada, devido à predominância do fluxo ascendente, o que indica que a geometria atual pode ainda ser melhorada para potenciar os efeitos hidrodinâmicos desejados.

Em suma, este estudo demonstrou que é possível melhorar o desempenho eletroquímico da eletrodialise inversa através da otimização da geometria dos espaçadores, mesmo mantendo constantes as restantes condições operatórias e a energia química disponível. A aplicação do efeito Coanda permitiu aumentar a potência gerada pelo sistema, com melhorias de até 61,1% na densidade de potência bruta em relação ao espaçador comercial, apenas com alterações geométricas nos espaçadores. Estes resultados reforçam a importância do design interno dos espaçadores como ferramenta eficaz para aumentar o rendimento dos sistemas RED.

## 5.1 Perspetivas futuras

Os resultados deste estudo demonstraram que a otimização da geometria dos espaçadores pode ter um impacto significativo na eficiência do sistema de eletrodialise inversa, abrindo caminho para futuras investigações e desenvolvimentos nesta área. O efeito Coanda mostrou-se uma abordagem promissora para a melhoria da distribuição do fluxo e da eficiência da conversão eletroquímica, contudo, alguns desafios e limitações foram identificados, sugerindo a necessidade de novos estudos para a sua implementação mais eficaz.

Um dos principais pontos a explorar em trabalhos futuros é a reformulação do design dos espaçadores. A presente investigação demonstrou que a ocorrência do efeito Coanda pode ser limitada pelo fluxo ascendente dentro do módulo, impedindo a recirculação desejada do fluido.

Outro aspeto relevante para investigações futuras é a avaliação da influência de diferentes materiais na fabricação dos espaçadores. O presente estudo utilizou materiais de impressão 3D não condutivos. A utilização de materiais com propriedades específicas, como por exemplo o material que é utilizado para o fabrico das membranas pode diminuir a resistência interna do módulo RED.

A reformulação do design, focando na realocação da entrada (Figura 30) pode maximizar o efeito Coanda, direcionando o caudal de água para o centro da estrutura e reduzindo o fluxo nos canais adjacentes. Essa modificação pode induzir a recirculação das soluções dentro dos compartimentos dos espaçadores, promovendo uma melhor renovação dos fluidos e otimizando o transporte iônico tornando a eletrodialise inversa mais eficiente e viável para a conversão de energia do gradiente de salinidade.

Com base nestas recomendações, espera-se que futuras investigações possam aprofundar o conhecimento sobre a otimização dos espaçadores na RED e contribuir para o avanço desta tecnologia como uma fonte de energia sustentável e viável para o futuro.

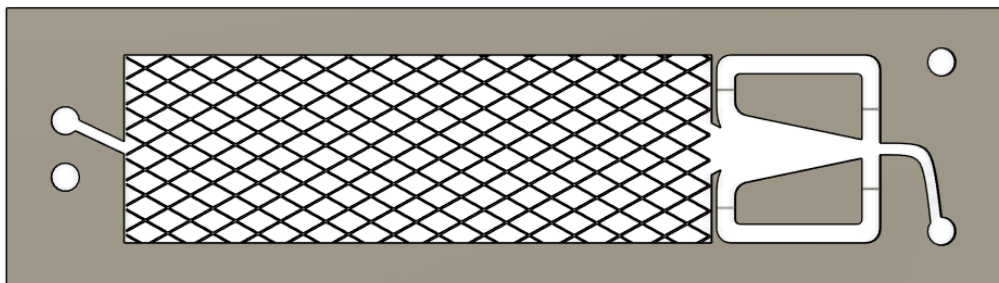


Figura 30 - Exemplo de um espaçador com efeito Coanda aplicado com a realocação do ramo de entrada



## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. A. Tufa *et al.*, «Progress and prospects in reverse electro dialysis for salinity gradient energy conversion and storage», 1 de Setembro de 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.111.
- [2] G. L. Wick, «Power from Salinity Gradients».
- [3] A. Zoungrana e M. Çakmakci, «From non-renewable energy to renewable by harvesting salinity gradient power by reverse electro dialysis: A review», 10 de Março de 2021, *John Wiley and Sons Ltd.* doi: 10.1002/er.6062.
- [4] R. E. Pattle, «Production of Electric Power by mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile», Out. 1954, doi: <https://doi.org/10.1038/174660a0>.
- [5] Y. Emami, S. Mehrangiz, A. Etemadi, A. Mostafazadeh, e S. Darvishi, «A Brief Review about Salinity Gradient Energy», Mai. 2013.
- [6] J. W. Post, H. V. M. Hamelers, e C. J. N. Buisman, «Energy recovery from controlled mixing salt and fresh water with a reverse electro dialysis system», *Environ Sci Technol*, vol. 42, n. 15, pp. 5785–5790, Ago. 2008, doi: 10.1021/es8004317.
- [7] F. Helfer, C. Lemckert, e Y. G. Anissimov, «Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends - A review», 1 de Março de 2014. doi: 10.1016/j.memsci.2013.10.053.
- [8] G. Micale, A. Cipollina, e A. Tamburini, «Salinity gradient energy», em *Sustainable Energy from Salinity Gradients*, Elsevier Inc., 2016, pp. 1–17. doi: 10.1016/B978-0-08-100312-1.00001-8.
- [9] J. Kuleszo, C. Kroeze, J. Post, e B. M. Fekete, «The potential of blue energy for reducing emissions of CO<sub>2</sub> and non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases», *Journal of Integrative Environmental Sciences*, vol. 7, n. SUPPL. 1, pp. 89–96, Jul. 2010, doi: 10.1080/19438151003680850.
- [10] Y. Kim e B. E. Logan, «Microbial reverse electro dialysis cells for synergistically enhanced power production», *Environ Sci Technol*, vol. 45, n. 13, pp. 5834–5839, Jul. 2011, doi: 10.1021/es200979b.

- [11] A. D'Angelo, A. Galia, e O. Scialdone, «Cathodic abatement of Cr(VI) in water by microbial reverse-electrodialysis cells», *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 748, pp. 40–46, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.jelechem.2015.04.010.
- [12] J. Y. Nam, R. D. Cusick, Y. Kim, e B. E. Logan, «Hydrogen generation in microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells using a heat-regenerated salt solution», *Environ Sci Technol*, vol. 46, n. 9, pp. 5240–5246, Mai. 2012, doi: 10.1021/es300228m.
- [13] D. Brogioli, «Extracting renewable energy from a salinity difference using a capacitor», *Phys Rev Lett*, vol. 103, n. 5, Ago. 2009, doi: 10.1103/PhysRevLett.103.058501.
- [14] R. A. Rica, R. Ziano, D. Salerno, F. Mantegazza, R. van Roij, e D. Brogioli, «Capacitive mixing for harvesting the free energy of solutions at different concentrations», 2014, *MDPI AG*. doi: 10.3390/e15041388.
- [15] F. La Mantia, M. Pasta, H. D. Deshazer, B. E. Logan, e Y. Cui, «Batteries for efficient energy extraction from a water salinity difference», *Nano Lett*, vol. 11, n. 4, pp. 1810–1813, Abr. 2011, doi: 10.1021/nl200500s.
- [16] J. Maisonneuve, P. Pillay, e C. B. Laflamme, «Pressure-retarded osmotic power system model considering non-ideal effects», *Renew Energy*, vol. 75, pp. 416–424, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.011.
- [17] A. Achilli e A. E. Childress, «Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation - Review», 2010, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.desal.2010.06.017.
- [18] A. Altaee, G. Zaragoza, e A. Sharif, «Pressure retarded osmosis for power generation and seawater desalination: Performance analysis», *Desalination*, vol. 344, pp. 108–115, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.desal.2014.03.022.
- [19] S. Loeb, «Energy production at the Dead Sea by pressure-retarded osmosis: challenge or chimera?», 1998.
- [20] A. Yaroshchuk, «Optimal hydrostatic counter-pressure in Pressure-Retarded Osmosis with composite/asymmetric membranes», *J Memb Sci*, vol. 477, pp. 157–160, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.memsci.2014.12.034.
- [21] W. Finley e A. T. Jones, «Development of a Salinity Gradient Power: Upwelling Tests Using FLIP».
- [22] X. Zhu, W. Yang, M. C. Hatzell, e B. E. Logan, «Energy recovery from solutions with different salinities based on swelling and shrinking of hydrogels», *Environ Sci Technol*, vol. 48, n. 12, pp. 7157–7163, Jun. 2014, doi: 10.1021/es500909q.
- [23] M. Olsson, G. L. Wick, e J. D. Isaacs, «Salinity Gradient Power: Utilizing Vapor Pressure Differences», *Science (1979)*, vol. 206, n. 4417, pp. 452–454, 1979, doi: 10.1126/science.206.4417.452.

- [24] J. Jang, Y. Kang, J. H. Han, K. Jang, C. M. Kim, e I. S. Kim, «Developments and future prospects of reverse electrodialysis for salinity gradient power generation: Influence of ion exchange membranes and electrodes», 1 de Outubro de 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.desal.2020.114540.
- [25] S. Mehdizadeh, Y. Kakihana, T. Abo, Q. Yuan, e M. Higa, «Power generation performance of a pilot-scale reverse electrodialysis using monovalent selective ion-exchange membranes», *Membranes (Basel)*, vol. 11, n. 1, pp. 1–25, Jan. 2021, doi: 10.3390/membranes11010027.
- [26] E. Mercer *et al.*, «Hybrid membrane distillation reverse electrodialysis configuration for water and energy recovery from human urine: An opportunity for off-grid decentralised sanitation», *J Memb Sci*, vol. 584, pp. 343–352, Ago. 2019, doi: 10.1016/j.memsci.2019.05.010.
- [27] S. Mehdizadeh, M. Yasukawa, T. Abo, Y. Kakihana, e M. Higa, «Effect of spacer geometry on membrane and solution compartment resistances in reverse electrodialysis», *J Memb Sci*, vol. 572, pp. 271–280, Fev. 2019, doi: 10.1016/j.memsci.2018.09.051.
- [28] J. G. Hong *et al.*, «Potential ion exchange membranes and system performance in reverse electrodialysis for power generation: A review», 5 de Julho de 2015, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.memsci.2015.02.039.
- [29] H. Tian, Y. Wang, Y. Pei, e J. C. Crittenden, «Unique applications and improvements of reverse electrodialysis: A review and outlook», 15 de Março de 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114482.
- [30] S. Pawlowski, T. Rijnaarts, M. Saakes, K. Nijmeijer, J. G. Crespo, e S. Velizarov, «Improved fluid mixing and power density in reverse electrodialysis stacks with chevron-profiled membranes», *J Memb Sci*, vol. 531, pp. 111–121, 2017, doi: 10.1016/j.memsci.2017.03.003.
- [31] D. A. Vermaas, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Power generation using profiled membranes in reverse electrodialysis», *J Memb Sci*, vol. 385–386, n. 1, pp. 234–242, Dez. 2011, doi: 10.1016/j.memsci.2011.09.043.
- [32] A. Nazif, H. Karkhanechi, E. Saljoughi, S. M. Mousavi, e H. Matsuyama, «Recent progress in membrane development, affecting parameters, and applications of reverse electrodialysis: A review», 1 de Junho de 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102706.
- [33] L. Novák, «Electromembrane Processes», 2021. Acedido: 6 de Março de 2025. [Em linha]. Disponível em: <https://www.asau.ru/files/pdf/3102570.pdf>

- [34] Y. Mei e C. Y. Tang, «Recent developments and future perspectives of reverse electro-dialysis technology: A review», 1 de Janeiro de 2018, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.desal.2017.10.021.
- [35] G. M. Geise, M. A. Hickner, e B. E. Logan, «Ionic resistance and permselectivity tradeoffs in anion exchange membranes», *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 5, n. 20, pp. 10294–10301, Out. 2013, doi: 10.1021/am403207w.
- [36] E. Güler, R. Elizen, D. A. Vermaas, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Performance-determining membrane properties in reverse electro-dialysis», *J Memb Sci*, vol. 446, pp. 266–276, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.memsci.2013.06.045.
- [37] P. Długolecki, K. Nijmeijer, S. Metz, e M. Wessling, «Current status of ion exchange membranes for power generation from salinity gradients», *J Memb Sci*, vol. 319, n. 1–2, pp. 214–222, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.memsci.2008.03.037.
- [38] P. Długolecki, A. Gambier, K. Nijmeijer, e M. Wessling, «Practical potential of reverse electro-dialysis as process for sustainable energy generation», *Environ Sci Technol*, vol. 43, n. 17, pp. 6888–6894, Set. 2009, doi: 10.1021/es9009635.
- [39] P. Długolecki, P. Ogonowski, S. J. Metz, M. Saakes, K. Nijmeijer, e M. Wessling, «On the resistances of membrane, diffusion boundary layer and double layer in ion exchange membrane transport», *J Memb Sci*, vol. 349, n. 1–2, pp. 369–379, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.memsci.2009.11.069.
- [40] R. K. Nagarale, G. S. Gohil, e V. K. Shahi, «Recent developments on ion-exchange membranes and electro-membrane processes», 28 de Fevereiro de 2006. doi: 10.1016/j.cis.2005.09.005.
- [41] J. G. Hong e Y. Chen, «Nanocomposite reverse electro-dialysis (RED) ion-exchange membranes for salinity gradient power generation», *J Memb Sci*, vol. 460, pp. 139–147, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.memsci.2014.02.027.
- [42] J. Jagur-Grodzinski e R. Kramer, «Novel process for direct conversion of free energy of mixing into electric power», *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 25, n. 2, pp. 443–449, 1986, doi: 10.1021/i200033a016.
- [43] A. Elattar, A. Elmidaoui, N. Pismenskaia, C. Gavach, e G. Pourcelly, «Comparison of transport properties of monovalent anions through anion-exchange membranes».
- [44] E. Volodina, N. Pismenskaya, V. Nikonenko, C. Larchet, e G. Pourcelly, «Ion transfer across ion-exchange membranes with homogeneous and heterogeneous surfaces», *J Colloid Interface Sci*, vol. 285, n. 1, pp. 247–258, Mai. 2005, doi: 10.1016/j.jcis.2004.11.017.
- [45] E. Güler, Y. Zhang, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Tailor-made anion-exchange membranes for salinity gradient power generation using reverse electro-dialysis», *ChemSusChem*, vol. 5, n. 11, pp. 2262–2270, Nov. 2012, doi: 10.1002/cssc.201200298.

- [46] D. A. Vermaas, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Enhanced mixing in the diffusive boundary layer for energy generation in reverse electrodialysis», *J Memb Sci*, vol. 453, pp. 312–319, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.memsci.2013.11.005.
- [47] N. Y. Yip e M. Elimelech, «Comparison of energy efficiency and power density in pressure retarded osmosis and reverse electrodialysis», *Environ Sci Technol*, vol. 48, n. 18, pp. 11002–11012, Set. 2014, doi: 10.1021/es5029316.
- [48] J. Veerman, M. Saakes, S. J. Metz, e G. J. Harmsen, «Reverse electrodialysis: A validated process model for design and optimization», *Chemical Engineering Journal*, vol. 166, n. 1, pp. 256–268, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.cej.2010.10.071.
- [49] D. A. Vermaas, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Doubled power density from salinity gradients at reduced intermembrane distance», *Environ Sci Technol*, vol. 45, n. 16, pp. 7089–7095, Ago. 2011, doi: 10.1021/es2012758.
- [50] J. Veerman, M. Saakes, S. J. Metz, e G. J. Harmsen, «Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water», *J Memb Sci*, vol. 327, n. 1–2, pp. 136–144, Fev. 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2008.11.015.
- [51] P. Długołęcki, J. Dabrowska, K. Nijmeijer, e M. Wessling, «Ion conductive spacers for increased power generation in reverse electrodialysis», *J Memb Sci*, vol. 347, n. 1–2, pp. 101–107, Fev. 2010, doi: 10.1016/j.memsci.2009.10.011.
- [52] D. A. Vermaas, E. Guler, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Theoretical power density from salinity gradients using reverse electrodialysis», em *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2012, pp. 170–184. doi: 10.1016/j.egypro.2012.03.018.
- [53] J. Veerman, M. Saakes, S. J. Metz, e G. J. Harmsen, «Reverse electrodialysis: Evaluation of suitable electrode systems», *J Appl Electrochem*, vol. 40, n. 8, pp. 1461–1474, Ago. 2010, doi: 10.1007/s10800-010-0124-8.
- [54] N. Y. Yip, D. A. Vermaas, K. Nijmeijer, e M. Elimelech, «Thermodynamic, energy efficiency, and power density analysis of reverse electrodialysis power generation with natural salinity gradients», *Environ Sci Technol*, vol. 48, n. 9, pp. 4925–4936, Mai. 2014, doi: 10.1021/es5005413.
- [55] O. Scialdone, C. Guarisco, S. Grispo, A. D. Angelo, e A. Galia, «Investigation of electrode material - Redox couple systems for reverse electrodialysis processes. Part I: Iron redox couples», *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 681, pp. 66–75, Ago. 2012, doi: 10.1016/j.jelechem.2012.05.017.
- [56] M. Turek e B. Bandura, «Renewable energy by reverse electrodialysis», *Desalination*, vol. 205, n. 1–3, pp. 67–74, Fev. 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.04.041.

- [57] O. S. Burheim, F. Seland, J. G. Pharoah, e S. Kjelstrup, «Improved electrode systems for reverse electro-dialysis and electro-dialysis», *Desalination*, vol. 285, pp. 147–152, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.desal.2011.09.048.
- [58] J. H. Han *et al.*, «Electrode system for large-scale reverse electro-dialysis: Water electro-lysis, bubble resistance, and inorganic scaling», *J Appl Electrochem*, vol. 49, n. 5, pp. 517–528, Mai. 2019, doi: 10.1007/s10800-019-01303-4.
- [59] L. Gurreri, A. Tamburini, A. Cipollina, G. Micale, e M. Ciofalo, «CFD Simulation of Mass Transfer Phenomena in Spacer Filled Channels for Reverse Electro-dialysis Appli-cations», 2013. [Em linha]. Disponível em: [www.aidic.it/cet](http://www.aidic.it/cet)
- [60] H. Strathmann, «Electro-dialysis, a mature technology with a multitude of new applica-tions», *Desalination*, vol. 264, n. 3, pp. 268–288, Dez. 2010, doi: 10.1016/j.de-sal.2010.04.069.
- [61] M. Sharma, P. P. Das, A. Chakraborty, e M. K. Purkait, «Clean energy from salinity gradients using pressure retarded osmosis and reverse electro-dialysis: A review», 1 de Fevereiro de 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.seta.2021.101687.
- [62] S. K. A. Al-Amshawee e M. Y. B. M. Yunus, «Electro-dialysis membrane with concentra-tion polarization - A review», *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 201, pp. 645–678, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.cherd.2023.10.060.
- [63] D. A. Vermaas, D. Kunteng, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Fouling in reverse electro-dialy-sis under natural conditions», *Water Res*, vol. 47, n. 3, pp. 1289–1298, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.watres.2012.11.053.
- [64] A. M. Lopez, H. Dunsworth, e J. A. Hestekin, «Reduction of the shadow spacer effect using reverse electrodeionization and its applications in water recycling for hydraulic fracturing operations», *Sep Purif Technol*, vol. 162, pp. 84–90, Abr. 2016, doi: 10.1016/j.seppur.2016.02.020.
- [65] J. W. Post *et al.*, «Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electro-dialysis», *J Memb Sci*, vol. 288, n. 1–2, pp. 218–230, Fev. 2007, doi: 10.1016/j.memsci.2006.11.018.
- [66] M. Tedesco, A. Cipollina, A. Tamburini, W. van Baak, e G. Micale, «Modelling the Re-verse ElectroDialysis process with seawater and concentrated brines», *Desalination Wa-ter Treat*, vol. 49, n. 1–3, pp. 404–424, 2012, doi: 10.1080/19443994.2012.699355.
- [67] Tadesco M *et al.*, «Reverse electro-dialysis with saline waters and concentrated brines - A laboratory investigation towards technology scale-up», Mai. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.05.020>.

- [68] A. T. G. M. J. H. M. Tedesco A. Cipollina e M. Papapetrou, «REAPower: use of desalination brine for power production through reverse electro dialysis», *Desalination Water Treat*, vol. 53, n. 12, pp. 3161–3169, 2015, doi: 10.1080/19443994.2014.934102.
- [69] I. Cîrciu e C. Rotaru, «Theoretical and practical aspects of the Coandă effect applied in aeronautics», doi: 10.1051/mateconf/20192.
- [70] S. F. Kistler e L. E. Scriven, «The Teapot Effect: Sheet-Forming Flows With Deflection, Wetting and Hysteresis», *J Fluid Mech*, vol. 263, pp. 19–62, 1994, doi: 10.1017/S0022112094004027.
- [71] C. Lubert, «On Some Recent Applications of the Coanda Effect».
- [72] S. Pawlowski, J. G. Crespo, e S. Velizarov, «Pressure drop in reverse electro dialysis: Experimental and modeling studies for stacks with variable number of cell pairs», *J Memb Sci*, vol. 462, pp. 96–111, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.memsci.2014.03.020.
- [73] R. A. Tufa *et al.*, «Salinity gradient power-reverse electro dialysis and alkaline polymer electrolyte water electrolysis for hydrogen production», *J Memb Sci*, vol. 514, pp. 155–164, Set. 2016, doi: 10.1016/j.memsci.2016.04.067.
- [74] K. Madane e V. Ranade, «Jet Oscillations and Mixing in Fluidic Oscillators: Influence of Geometric Configuration and Scale», *Ind Eng Chem Res*, 2023, doi: 10.1021/acs.iecr.3c02077.
- [75] J. N. Weinstein e F. B. Leitz, «Electric Power from Differences in Salinity: The Dialytic Battery», *Science (1979)*, vol. 191, n. 4227, pp. 557–559, 1976, doi: 10.1126/science.191.4227.557.
- [76] F. Suda, T. Matsuo, e D. Ushioda, «Transient changes in the power output from the concentration difference cell (dialytic battery) between seawater and river water», *Energy*, vol. 32, n. 3, pp. 165–173, 2007, doi: 10.1016/j.energy.2006.04.005.
- [77] J. Veerman, R. M. de Jong, M. Saakes, S. J. Metz, e G. J. Harmsen, «Reverse electro dialysis: Comparison of six commercial membrane pairs on the thermodynamic efficiency and power density», *J Memb Sci*, vol. 343, n. 1–2, pp. 7–15, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2009.05.047.
- [78] J. Veerman, J. W. Post, M. Saakes, S. J. Metz, e G. J. Harmsen, «Reducing power losses caused by ionic shortcut currents in reverse electro dialysis stacks by a validated model», *J Memb Sci*, vol. 310, n. 1–2, pp. 418–430, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.memsci.2007.11.032.
- [79] E. Güler, R. Elizen, M. Saakes, e K. Nijmeijer, «Micro-structured membranes for electricity generation by reverse electro dialysis», *J Memb Sci*, vol. 458, pp. 136–148, Mai. 2014, doi: 10.1016/j.memsci.2014.01.060.

- [80] J. Veerman, M. Saakes, S. Metz, e J. Harmsen, «Electrical Power from Sea and River Water by Reverse Electrodialysis: A First Step from the Laboratory to a Real Power Plant», *Environ Sci Technol*, vol. 44, pp. 9207–9212, Mar. 2010, doi: 10.1021/es1009345.

## APÊNDICE

## A.1 Sistema de RED utilizado no laboratório

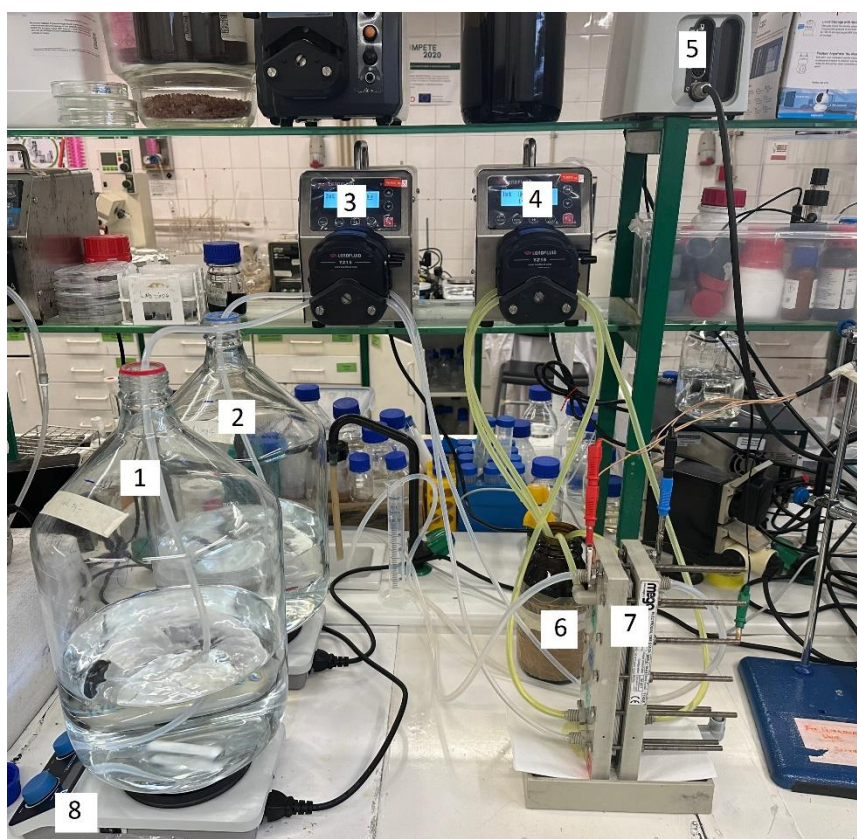


Figura 31 - Montagem do sistema de RED em laboratório

**Legenda:**

1) Tanque da solução diluída; 2) Tanque da solução concentrada; 3) Bomba das soluções de concentrado e diluído; 4) Bomba da solução de eletrólito; 5) Potencióstato; 6) Tanque da solução de eletrólito; 7) Módulo de eletrodialise inversa; 8) Placa de aquecimento e agitação.

## A.2 Módulo de RED utilizado no laboratório

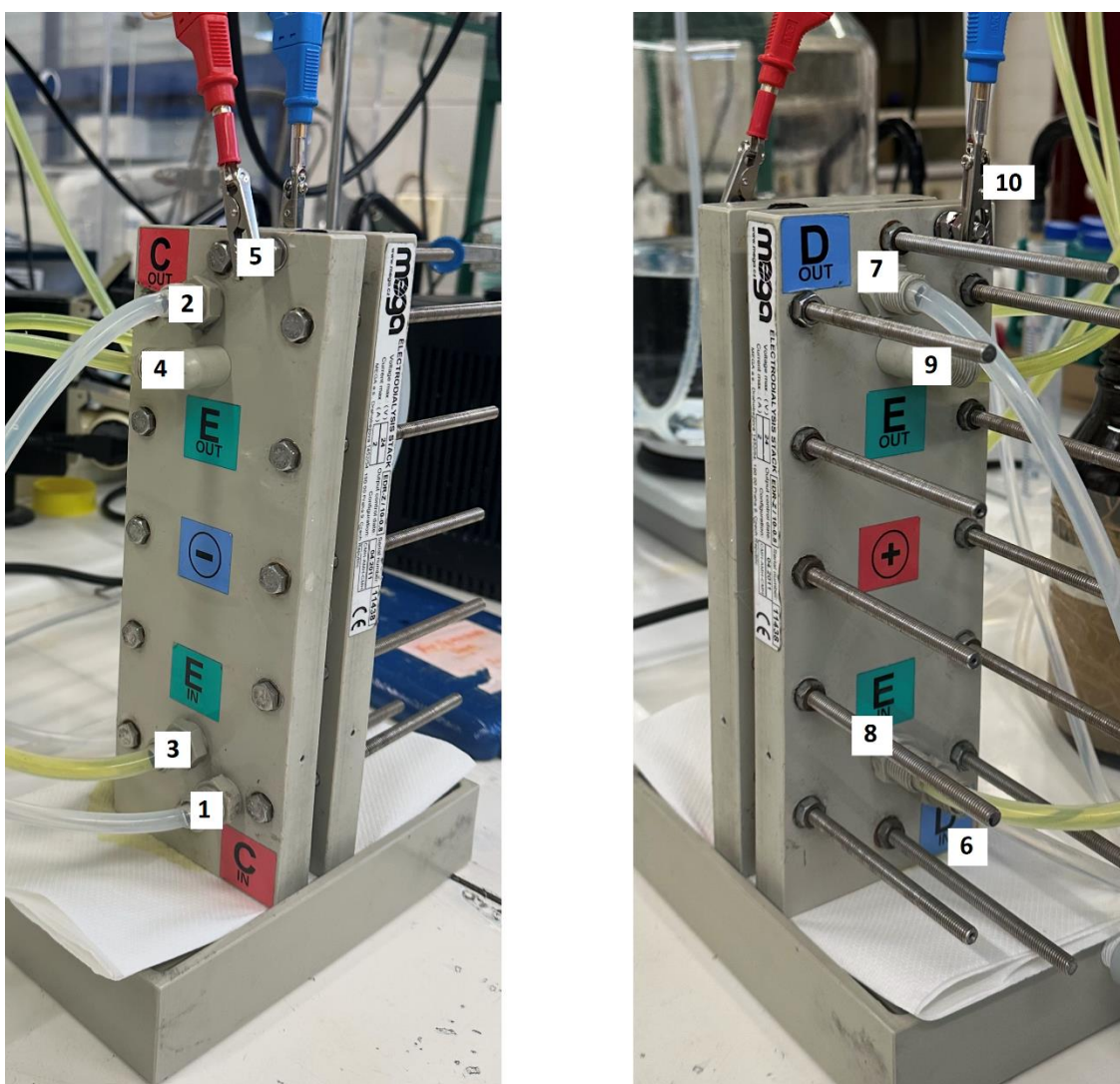


Figura 32 - Ilustração do módulo de RED e respectivos caudais de entrada e saída (na esquerda está o ânodo e na direita o cátodo)

### Legenda:

1) Entrada da solução de concentrado; 2) Saída da solução de concentrado; 3) Entrada da solução de eletrólito; 4) Saída da solução de eletrólito; 5) Eléctrodo de trabalho conectado ao eléctrodo do ânodo; 6) Entrada da solução de diluído; 7) Saída da solução de diluído; 8) Entrada da solução de eletrólito; 9) Saída da solução de eletrólito; 10) Eléctrodo auxiliar conectado ao eléctrodo do cátodo.

## A.3 Outros gráficos dos resultados obtidos

### Tensão de circuito aberto

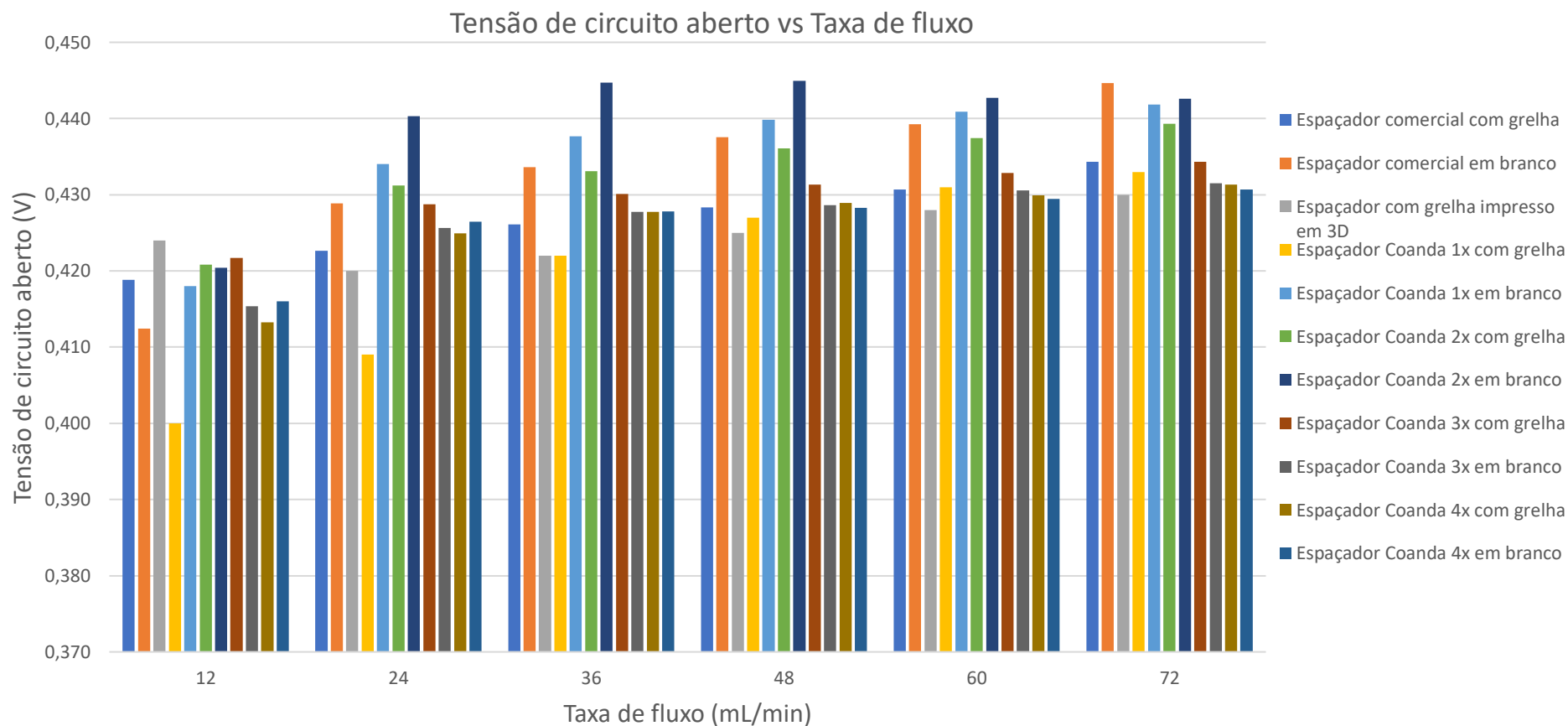


Figura 33 - Gráfico da variação da tensão de circuito aberto em função da taxa de fluxo para os diferentes tipos de espaçadores em estudo

## Resistência elétrica do módulo

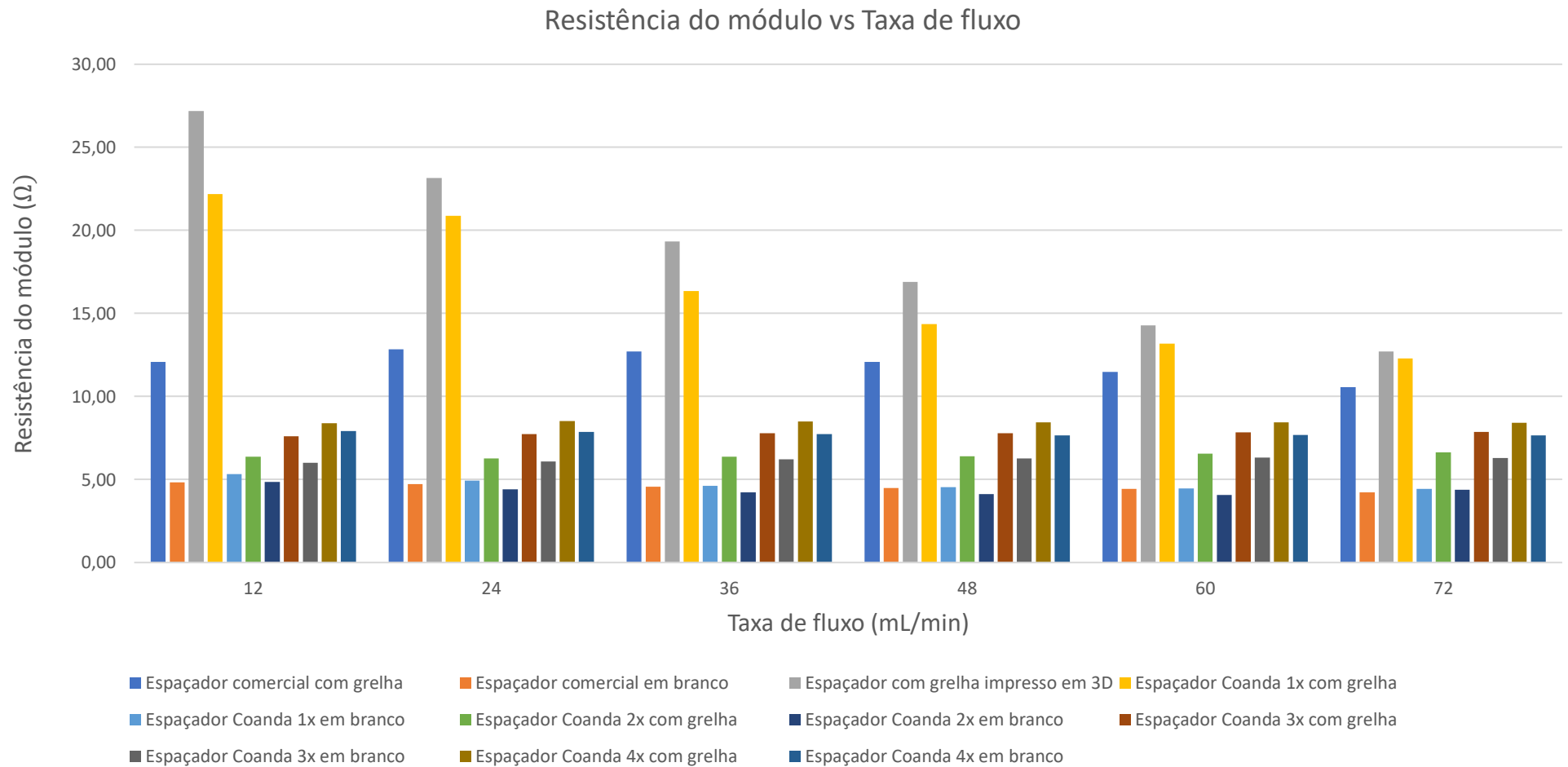


Figura 34 - Gráfico da variação da resistência do módulo em função da taxa de fluxo para os diferentes espaçadores em estudo

## Densidade de potência bruta

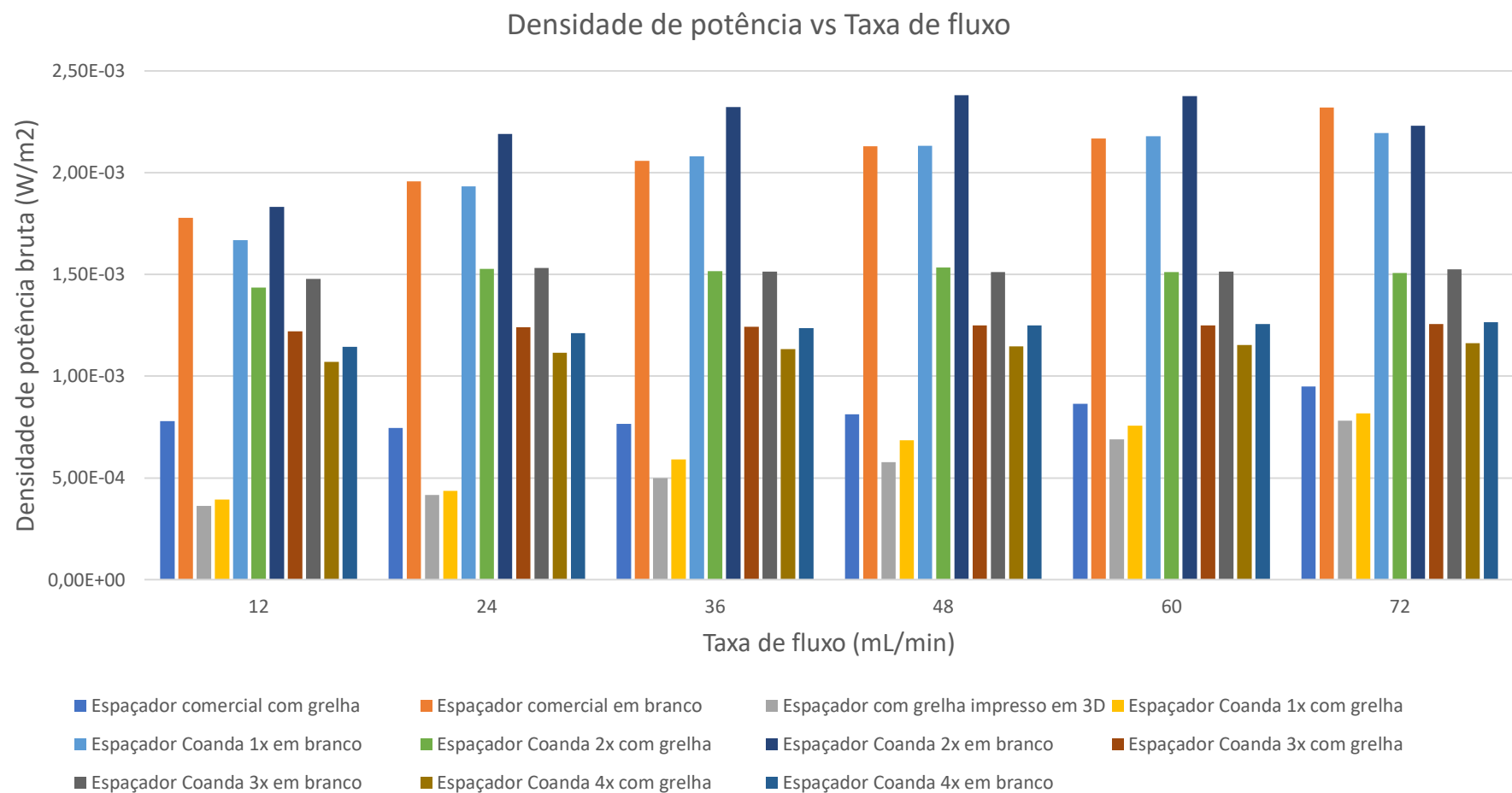


Figura 35 - Gráfico da variação da densidade de potência bruta em função da taxa de fluxo para os diferentes espaçadores em estudo

## A.4 Densidade de potência e membranas da literatura

Tabela 8 - Densidade de potência para diversos espaçadores e membranas retirado da literatura (Adaptado de [28])

Fabricante/Cus- tomizadas	CEM	AEM	Tipo espaçador/Espes- sura	Área útil da mem- brana	Nº de células	Velocidade de fluxo linear	Gradiente de con- centração	Densi- dade de potência bruta (W/m <sup>2</sup> )	Ref.
-	Polietileno misturado com resinas de poli- estireno reticulado		Não condutivo 1000 $\mu\text{m}$	8 cm <sup>2</sup>	47	-	água da torneira/0.5 M NaCl	0.20 (39°C)	[4]
Iônicas	61CZL	103QZL	Promotor de turbulên- cia	232 cm <sup>2</sup>	30	15 cm/s	0.0259/0.57 M NaCl	-	[75]
Rhone-Poulen c	CRP	ARP	Não condutivo 3000 $\mu\text{m}$	40 cm <sup>2</sup>	5	-	0.017/5.03 M NaCl	0.41	[75]
Asahi	CMV	AMV	Não condutivo 3000 $\mu\text{m}$	40 cm <sup>2</sup>	5	-	0.017/5.03 M NaCl	0.4	[75]
MEGA	CMH- PES	AMH- PES	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	5	1.7 cm/s	0.017/0.513 M NaCl	0.6	[36]
MEGA	CMH- PES	AMH- PES	Não condutivo 250 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	5	1.7 cm/s	0.017/0.508 M NaCl	0.065	[46]
Politiken comer- cial modificado	JJC-82	JJA-72	Espaçador de polieti- leno 550 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	30	0.21 cm/s	0.008/0.561 M NaCl	0.41	[42]
Polietileno co- mercial modifi- cado	JJC-82	JJA-72	Espaçador de polieti- leno 550 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	30	0.21 cm/s	0.017/0.556 M NaCl	0.388	[42]
Polietileno co- mercial modifi- cado	JJC-82	JJA-72	Espaçador de polieti- leno 550 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	30	0.21 cm/s	0.55/0.556 M NaCl	0.573	[42]
ACIPLEX	K-502	A-201	Espaçador de 1mm para diluído; espaçador 10mm para concentrado	80 cm <sup>2</sup>	29	1.9 cm/s diluído 0.075 cm/s con- centrado	0.0017/0.598 M NaCl	0.26	[76]

Fumatech	FKS	FAS	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.11	[36]
Fumatech	FKS	FAS	Não condutivo 100 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	4 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	2.2	[49]
Customizado	SPEEK 40	PECH B2	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.18	[36]
Customizado	SPEEK 65	PECH B2	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.28	[36]
Tokuyama/Customizado	CMX	PECH B3	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.07	[36]
Tokuyama/Customizado	SPEEK 40	AMX	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	0.98	[36]
Tokuyama/Customizado	CMX	PECH B2	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.18	[36]
Qianqiu	Qianqiu CEM	Qianqiu AEM	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	0.83	[36]
Customizado/Tokuyama	SPEEK 65	AMX	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.1	[36]
Customizado/Tokuyama	CMX	PECH B1	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.27	[36]
Customizado/Tokuyama	CMX	PECH A	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.08	[36]
Customizado/Tokuyama	CMX	PECH C	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.15	[36]
Asahi Glass	CMV	AMV	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.13	[36]
Tokuyama	CMX	AMX	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.07	[36]
Fumatech	FKD	FAD	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.19	[36]
Fumatech	FKD	FAD	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	5	1.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	1.17	[77]
Fumatech	FKD	FAD	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	25	1.16 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	0.93	[77]
Fumatech	FKD	FAD	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 $\text{cm}^2$	50	6.7 $\text{cm/s}$	0.017/0.513 M NaCl	0.95	[78]

Customizado	CMH-PES Perfilada	AMH-PES Perfilada	IEMs perfiladas como espaçadores 230 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	50	21 cm/s	0.017/0.508 M NaCl	1.0	[46]
Tokuyama/Customizada	CMX	PECH (com pilar)	AEM como espaçador no compartimento de diluído 100 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	2	6.7 cm/s	0.017/0.507 M NaCl	1.3	[79]
Tokuyama/Customizada	CMX	PECH (ondulada)	AEM como espaçador no compartimento de diluído 100 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	2	6.7 cm/s	0.017/0.507 M NaCl	1.3	[79]
Tokuyama/Customizada	CMX	PECH (com relevo)	AEM serve como espaçador no compartimento de diluído 100 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	2	6.7 cm/s	0.017/0.507 M NaCl	1.1	[79]
Tokuyama/Customizada	CMX	PECH (Lisa)	Não condutivo 100 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	2	6.7 cm/s	0.017/0.507 M NaCl	0.9	[79]
Tokuyama	CMX	AMX	Não condutivo 190 $\mu\text{m}$	42 cm <sup>2</sup>	10	0.54 cm/s	0.0096/0.605 M NaCl	0.46	[79]
Tokuyama	CMX	AMX	Condutivo 320 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	3	0.83 cm/s	0.017/0.5 M NaCl	0.8	[56]
Tokuyama	CMX	AMX	Não condutivo 320 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	3	0.83 cm/s	0.017/0.5 M NaCl	0.27	[51]
Neosepta	CMX	AMX	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	25	1.16 cm/s	0.017/0.51 M NaCl	0.65	[77]
Asahi Glass	CMV	AMV	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	25	1.16 cm/s	0.017/0.51 M NaCl	1.18	[77]
Neosepta	CMS	ACS	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	25	1.16 cm/s	0.017/0.51 M NaCl	0.60	[77]
Qianqiu	Qianqiu CEM	Qianqiu AEM	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	75 cm <sup>2</sup>	25	2.7 cm/s	0.017/0.51 M NaCl	0.82	[80]
Qianqiu	Qianqiu CEM	Qianqiu AEM	Não condutivo 200 $\mu\text{m}$	100 cm <sup>2</sup>	25	1.16 cm/s	0.017/0.51 M NaCl	1.05	[77]
Customizada/Selemion	0.7 wt% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> sPPO	ASV	Não condutivo 250 $\mu\text{m}$	36 cm <sup>2</sup>	3	6.7 cm/s	0.017/0.51 M NaCl	1.3	[41]



## A.5 Modelo utilizado no software NOVA Autolab

Para avaliar o desempenho do sistema de eletrodialise inversa utilizou-se o software NOVA Autolab, que permitiu a execução de um protocolo experimental dividido em seis etapas.

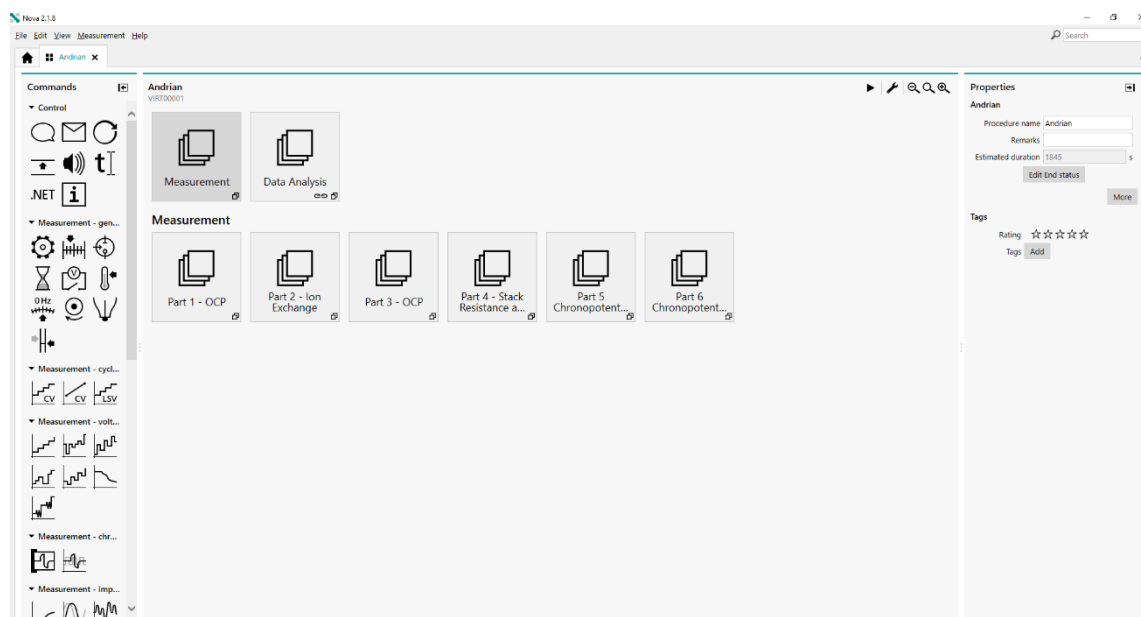


Figura 36 - Interface do software NOVA Autolab utilizada para a avaliação do desempenho do módulo de eletrodialise inversa. A imagem apresenta a estrutura do protocolo experimental dividido em seis partes.

**OCP (Open Circuit Potential) – Parte 1:** Determinação do potencial de circuito aberto do sistema.

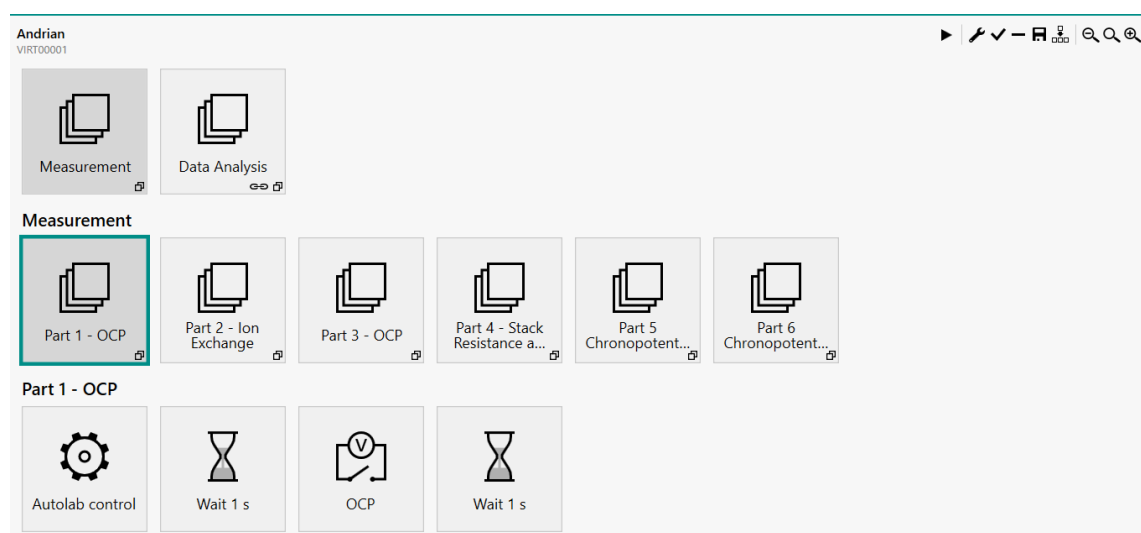


Figura 37 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores de OCV

**Permuta Iónica – Parte 2:** Medição da resposta do sistema à introdução de iões na solução, permitindo avaliar a eficiência da membrana de troca iónica.

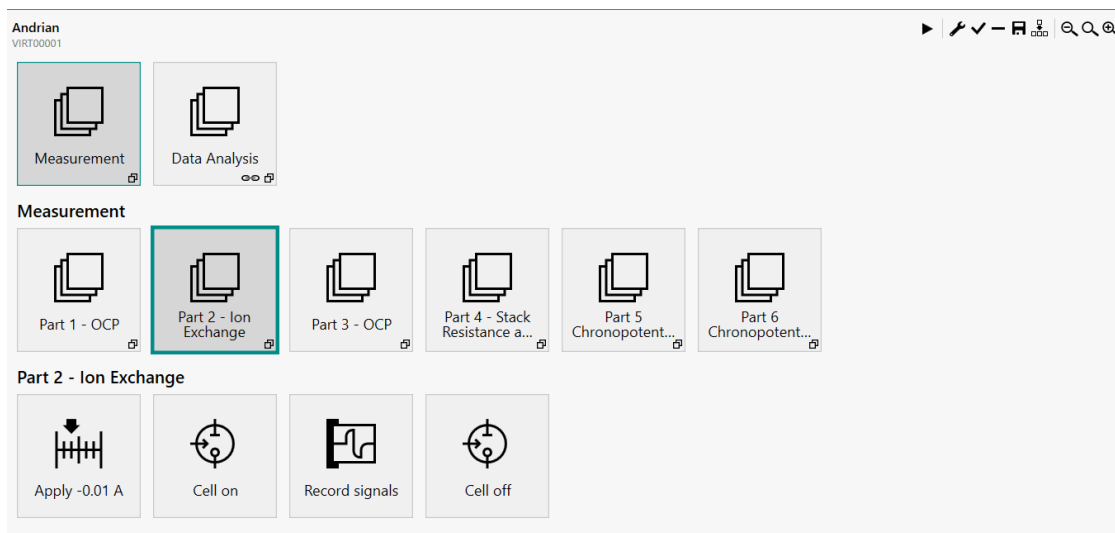


Figura 38 - Especificações e métodos utilizados na determinação da permuta iónica do sistema

**OCP – Parte 3:** Nova medição do potencial de circuito aberto após a etapa de troca iónica, permitindo verificar possíveis alterações no equilíbrio do sistema.

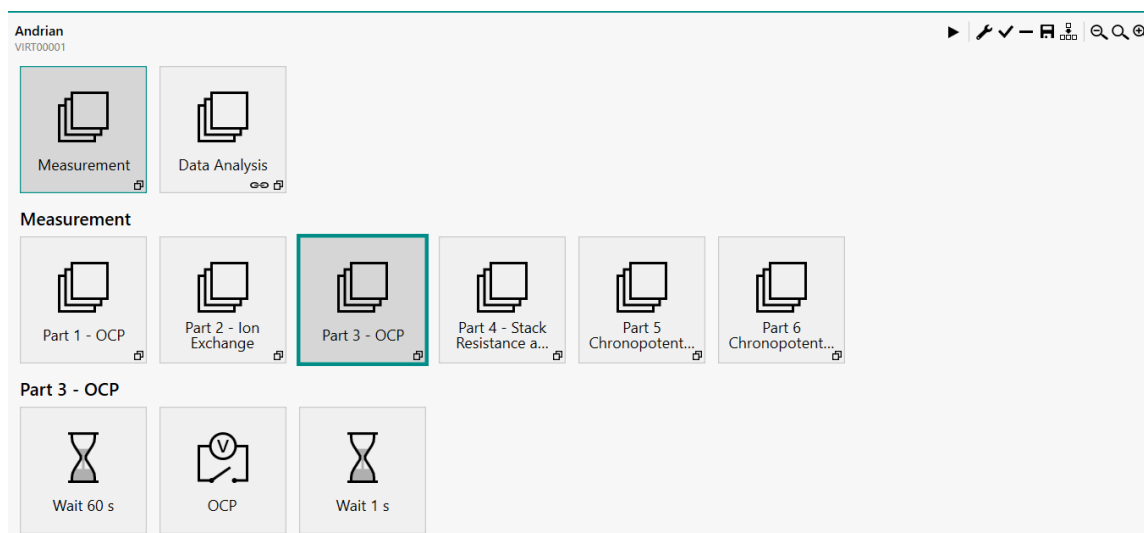


Figura 39 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores de OCV

## Resistência do módulo – Parte 4: Determinação da resistência total do módulo.

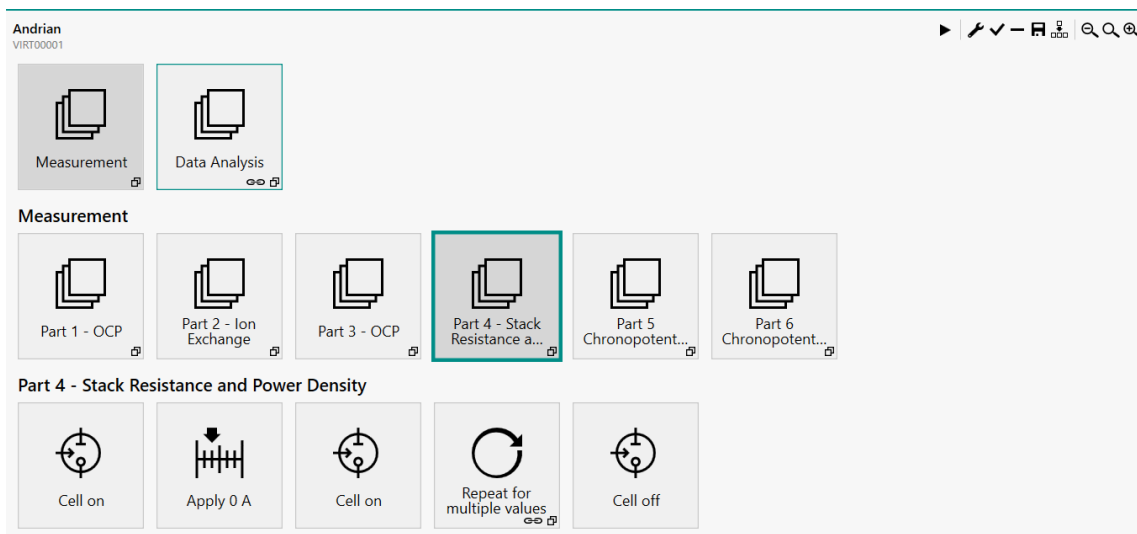


Figura 40 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores da resistência do módulo

**Cronopotenciometria – Parte 5:** Aplicação de uma corrente constante para avaliar a resposta do potencial ao longo do tempo e determinar o valor da resistência ôhmica e não ôhmica com os resultados obtidos.

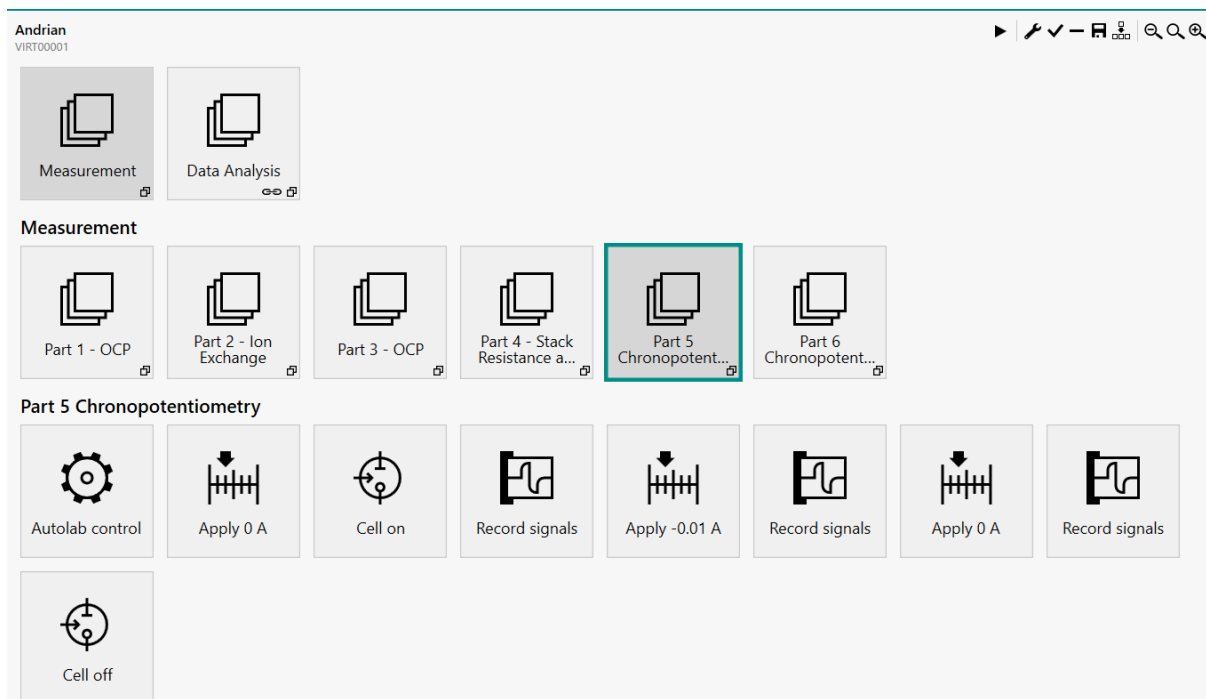


Figura 41 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores da cronopotenciometria

## Cronopotenciometria – Parte 6: Segunda fase da cronopotenciometria

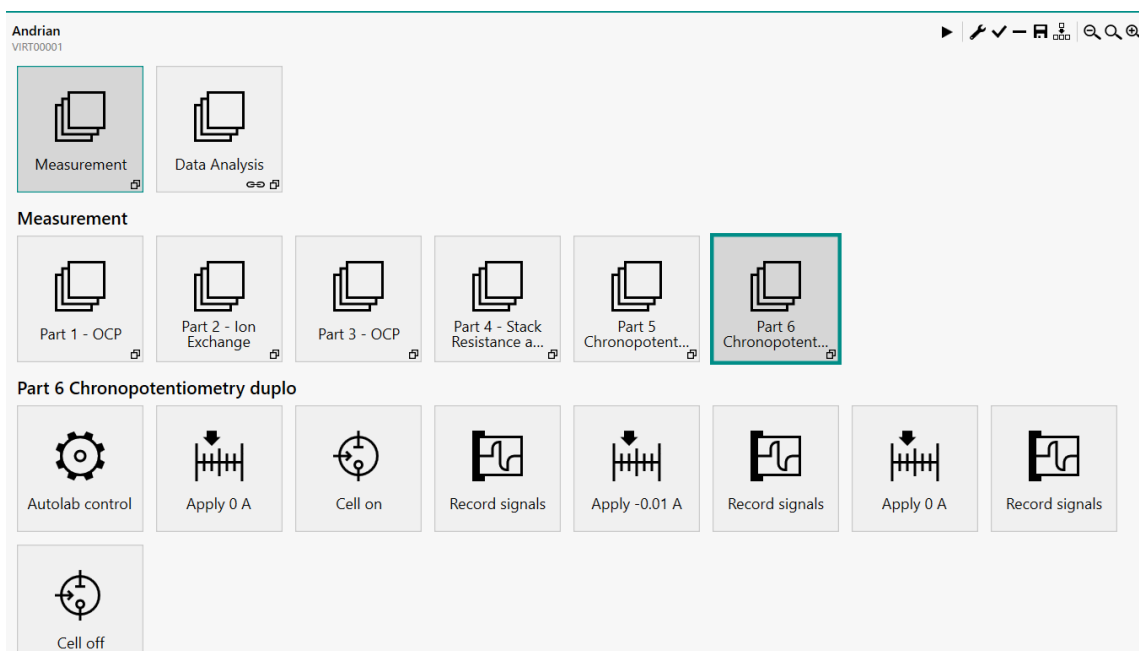


Figura 42 - Especificações e métodos utilizados na determinação dos valores da cronopotenciometria







(2025)

ANDRIAN POTAP

ENHANCING ELECTRICITY GENERATION BY REVERSE ELECTRODIALYSIS