

# PROCESSO DE OSMOSE DIRETA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA POR GRADIENTE DE SALINIDADE / INVESTIGAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE FO/PRO UTILIZANDO MÓDULOS DE FIBRAS OCAS

N. J-D. R. MERMIER<sup>1</sup>, C. PIACSEK BORGES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Engenharia Química/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária, CP 68502, Rio de Janeiro, 21945-970, RJ, Brasil  
E-mail para contato: nicolas@peq.coppe.ufrj.br

**RESUMO** – O fenômeno de osmose é conhecido há mais de 150 anos e envolve o contato de uma membrana semipermeável com meios de diferentes tonicidades. A utilização do fluxo osmótico permeado através da membrana possibilita o acionamento de geradores de energia elétrica que pode ser utilizado como fonte renovável e sem impacto ambiental. Este trabalho consiste na montagem de um protótipo de FO/PRO para a geração de energia por gradiente de salinidade. As membranas produzidas são do tipo fibras ocas de acetato de celulose. O protótipo permite o acoplamento de 3 permeadores conectados em paralelo sendo a área efetiva de membrana por módulo de aproximadamente 2m<sup>2</sup>. O fluxo permeado (3,5L/m<sup>2</sup>·h, MgSO<sub>4</sub> 0,03M,  $\pi$ : 8bar) obtido com as membranas produzidas nesse trabalho é comparável com a das membranas comerciais.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de diminuir a dependência mundial do consumo de combustível fóssil é reconhecida em praticamente todos os seguimentos da sociedade. Fontes de energia menos poluentes e renováveis possibilitam controlar e diminuir a emissão de gases nocivos ao meio ambiente, promovendo maior sustentabilidade. Ainda pouco explorada, a utilização do fluxo osmótico permeado através de uma membrana semipermeável possibilita o acionamento de geradores de energia elétrica que pode ser utilizado como fonte renovável e sem impacto ambiental. Esta fonte possui um grande potencial no Brasil, visto seu extenso litoral que permite o encontro da água doce com a água salgada. Estimativas indicam que no mundo, a energia disponível através de gradientes de salinidade é da ordem de 2.000 TWh por ano (Aaberg, 2003).

Embora este conceito seja bastante antigo, o processo ainda está enfrentando algumas dificuldades para ser amplamente operacionalizado por falta de membranas adequadas que devem tornar o processo economicamente mais competitivo. Atualmente, uma das poucas iniciativas no desenvolvimento de escala piloto e planta de processo de geração de energia elétrica por osmose direta é feita pela empresa norueguesa STATKRAFT. No Brasil, o laboratório de processos de separação com membranas da COPPE/UFRJ vem envolvido-se nas pesquisas de síntese de

membranas e processos de separação durante quase três décadas, sendo uma referência nacional e internacional no campo.

Este trabalho consiste na produção de membranas poliméricas anisotrópicas do tipo fibras ocas integrais de acetato de celulose que permitam ampliar o fluxo permeado, mantendo sua restrição à passagem de sais dissolvidos. Estas fibras são acondicionadas em permeadores que possibilitam a passagem das soluções de diferentes salinidades em lados distintos da membrana. O protótipo permite o acoplamento de 3 módulos conectados em paralelo sendo a área efetiva de membrana por módulo de aproximadamente  $2\text{m}^2$  e de uma densidade de empacotamento de  $2000\text{m}^2/\text{m}^3$ . A construção destes permeadores também é objeto de estudo e inovação, principalmente, através da otimização da transferência de massa decorrente do controle da velocidade de escoamento dos fluidos dentro dos módulos.

## 2. METODOLOGIA

Membranas poliméricas anisotrópicas do tipo fibras ocas foram produzidas por inversão de fase em banho de não solvente. O polímero empregado é o acetato de celulose (AC) de massa molar numérica média de  $50.000\text{ g/mol}$ . Os solventes empregados são a acetona (AO, 99,5%) e o formamida (FO, 99,5%). A composição da solução polimérica empregada é AC/AO/FO (25/45/30 %m/m).

### 2.1 PROCESSO DE FIAÇÃO

A Figura 1 apresenta o equipamento de fiação por extrusão simples. Neste equipamento, a solução polimérica é bombeada em direção a extrusora por pressurização do tanque de alimentação com um gás inerte ( $\text{N}_2$ ). Um controlador de velocidade permite ajustar a vazão do líquido interno por intermédio de uma bomba de engrenagem.

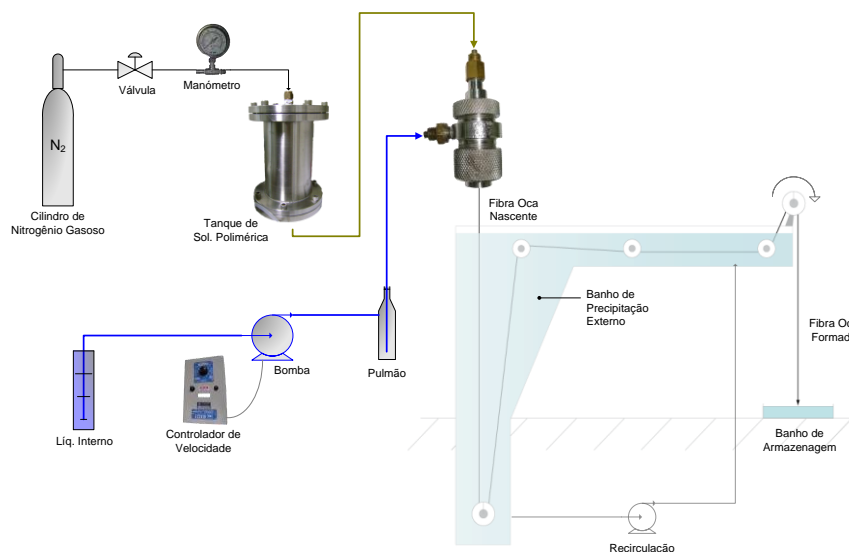


Figura 1 - Processo de fiação, no caso específico da extrusão simples.

As condições experimentais referentes à síntese das membranas do tipo fibras ocas por inversão de fase são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições de fiação.

| Fibras Ocas Ref. | DEB [cm] | Sol. Polimérica Vazão Mássica [g/min] | Líq. Interno Composição [-]  | Líq. Interno Vazão Vol. [ml/min] | Velocidade de Fiação [m/min] | Tempo de Exp. ao Ambiente [s] | Diâmetro Externo da Fibra [μm] | Diâmetro Interno da Fibra [μm] | Largura da Parede da Fibra [μm] |
|------------------|----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| AC_2B            | 3        | 2                                     | H <sub>2</sub> O/NMP (10:90) | 0,7                              | [4 - 5]                      | [0,3 - 0,5]                   | 700                            | 400                            | 150                             |

Caracterização das membranas produzidas: As membranas sintetizadas foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 2 apresenta as fotomicrográficas de uma fibra decorrente da batelada AC\_2B. A membrana apresenta uma estrutura anisotrópica, densa na região próxima à superfície externa, considerada como a camada seletiva, suportada por uma estrutura microporosa com poros interconectados. Observe-se que a morfologia do suporte é isenta de macrovazio, o que lhe confere uma resistência mecânica adaptada a pressão hidrostática de trabalho. A pressão limite superior tolerada pelas membranas produzidas é aproximadamente de 6bar.

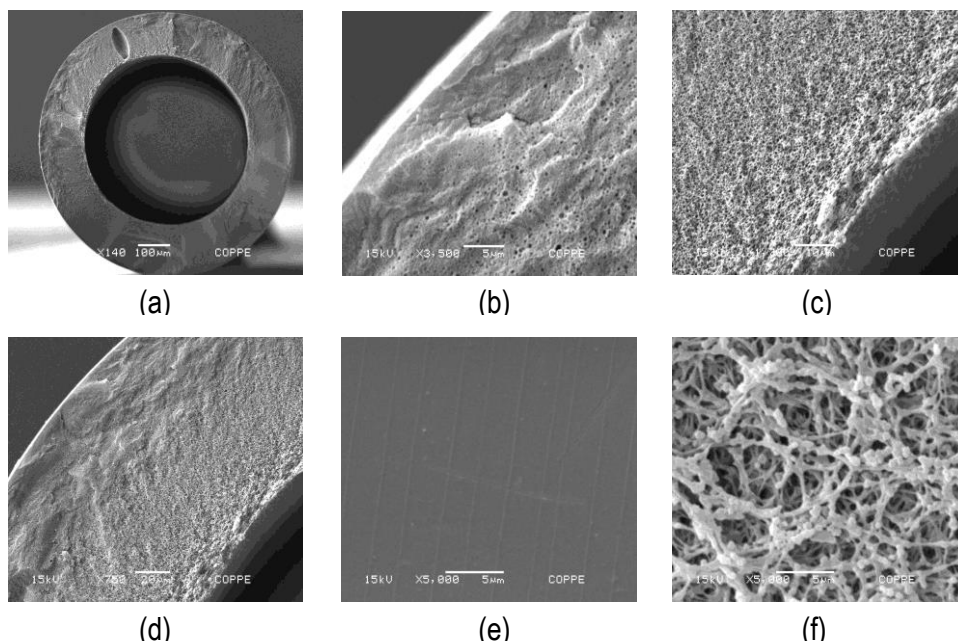


Figura 2 - Fotomicrográficas das diferentes regiões da fibra AC\_2B: (a) a seção transversal; (d) a seção transversal detalhada; (b) a região próxima à superfície externa; (c) a região próxima à superfície interna; (e) a superfície externa; (f) a superfície interna.

### 3. PROTÓTIPO

A Figura 3 representa o fluxograma do protótipo de geração de energia por osmose direta.

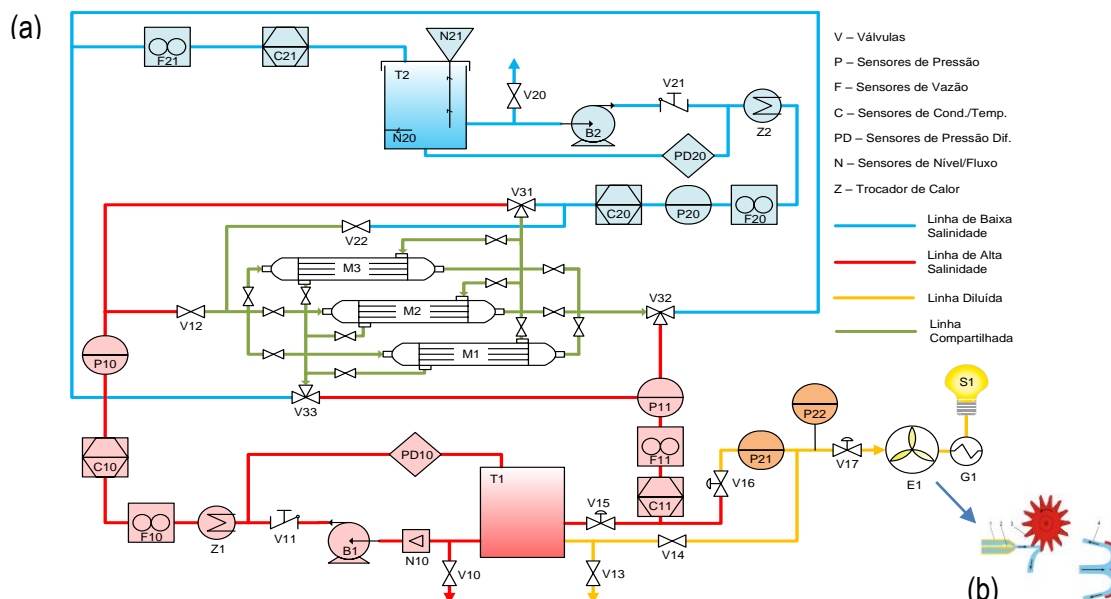


Figura 3 – (a) Fluxograma do protótipo de geração de energia; (b) Representação esquemática do funcionamento da turbina Pelton.

O sistema é baseado em uma corrente de alta salinidade e uma corrente de baixa salinidade circulando pelos permeadores. O fluxo de água permeado por osmose direta aumenta a vazão da corrente de alta salinidade que está em circuito fechado pressurizado. A linha diluída do fluxograma corresponde a corrente originada pelo excesso de água circulando. Essa variação de volume pode ser então reaprovada e direcionada para a turbina Pelton. A figura 4 apresenta uma visão global do protótipo e destaca a turbina que converte a energia hidrostática da água em energia cinética.

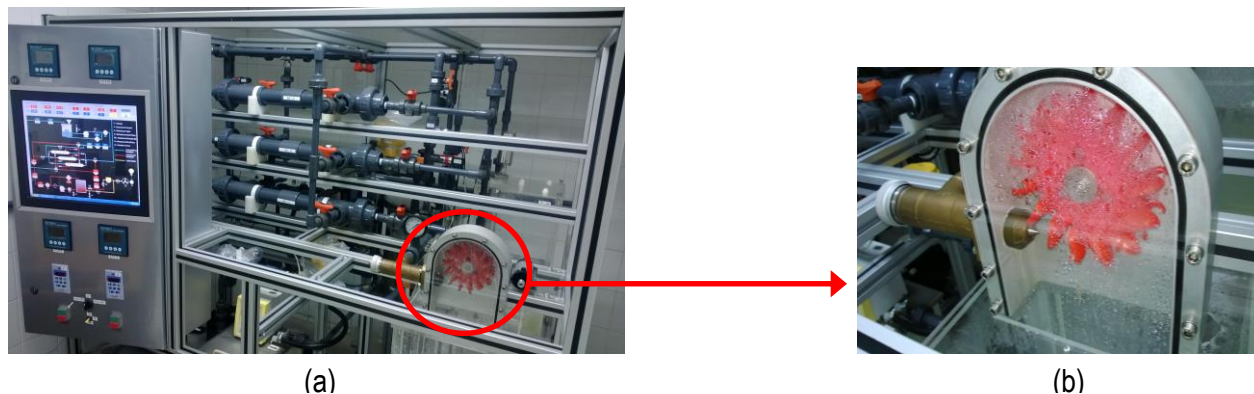


Figura 4 - (a) Protótipo de geração de energia por osmose direta; (b) Turbina Pelton

## 4. PERMEADORES

O protótipo consiste em 3 módulos montados em paralelo. A alimentação ocorre de forma axial, pelo lúmen das fibras, e de forma lateral, na casca das fibras. As duas correntes circulam em contracorrente dentro dos permeadores o que favorece a transferência de massa. A versatilidade do sistema permite inverter as diferentes linhas no caso de membranas apresentando outras morfologias. A figura 5 apresenta a configuração dos permeadores e os diferentes sentidos das correntes ao longo das fibras ocas.

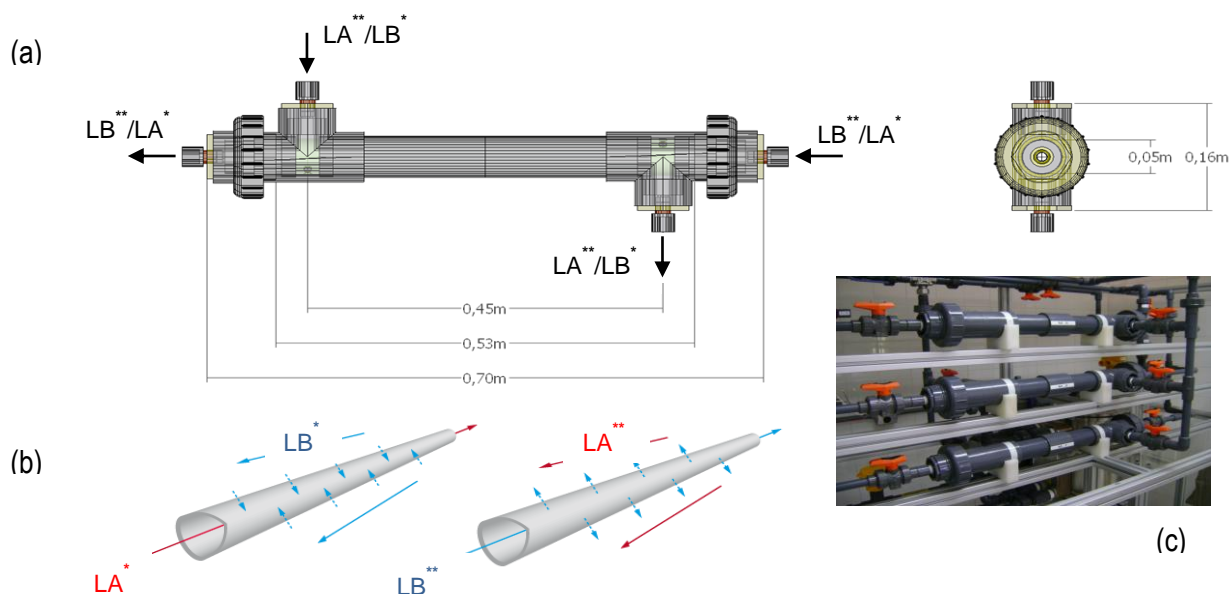


Figura 5 - (a) Representação esquemática e dimensionamento de um permeador; (b) Direções possíveis das correntes de alta salinidade (LA), baixa salinidade (LB) e do fluxo osmótico permeado através das membranas; (c) Módulos de osmose direta montados em paralelo no protótipo.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PERMEADORES / RESULTADOS

Dois permeadores (M1, M2) montados em paralelo apresentando uma área específica total de aproximadamente  $1,5\text{m}^2$  foram caracterizados afim de determinar as propriedades de transporte das membranas e seu desempenho em relação a geração de energia.

Teste de osmose inversa: Nesse teste, os permeadores foram caracterizados quanto à permeabilidade hidráulica e a rejeição ao sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4$  0,05M) através um teste de osmose inversa.

A tabela 2 apresentam os resultados referentes à permeabilidade hidráulica e a rejeição ao sulfato de magnésio (0,05M).

Tabela 2 - Propriedades de transporte dos permeadores

| Permeadores Ref. | n° Fibras úteis [-] | Área útil de permeação [m <sup>2</sup> ] | Resistência hidráulica máxima [bar] | Permeabilidade hidráulica (A) [L/m <sup>2</sup> ·h·bar] | Rejeição [%] (MgSO <sub>4</sub> 0,05M) |
|------------------|---------------------|--|-------------------------------------|---|--|
| M1 + M2          | 1300                | 1,5                                      | 5                                   | 1   | 72                                     |

Teste de osmose direta: O desempenho dos permeadores foi avaliado pelo teste de osmose direta. As condições de operação são resumidas na tabela 3.

Tabela 3 - Condições de operação.

| Correntes        | Composição (M)                    | Condutividade (xS/cm) | P. osmótica (bar) | Pressão hidrostática (bar) | Vazão no Sistema (L/min) / Re (-) | *Módulo   |   |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------|---|---|
|                  |                                   |                       |                   |                            |                                   | *Velocidade no Lúmen das Fibras (cm/s) / Re (-) | *Velocidade no Casco das Fibras (cm/s) / Re (-) |
| Alta Salinidade  | Sol. Aq. MgSO <sub>4</sub> (0,3M) | 22 (milliS/cm)        | 8 (bar)           | 1,5                        | 13 / 20150                        | -   | 15 / 288  |
| Baixa Salinidade | H <sub>2</sub> O micro./dest.     | < 200 (µS/cm)         | < 0,1 (bar)       | 0,5                        | 0,1 / 150                         | 1 / 4   | -   |

\* Considerando os módulos M1 e M2 como se fosse um módulo único de 1300 fibras (1,5m<sup>2</sup>).

Nesse processo, um fluxo osmótico ocorre da corrente de baixa salinidade (LB) em direção a corrente de alta salinidade (LA). Observe-se também um fluxo oposto do soluto por difusão. A figura 6 apresenta a variação da condutividade nas linhas, assim como a variação do nível da água no tanque T2 ao longo do teste de osmose direta.

Como a variação de volume do tanque de baixa salinidade (T2) é diretamente relacionada com o fluxo permeado através das membranas, a derivada  $d(Vol. H_2O)/d(tempo)$  corresponde ao perfil da vazão permeada durante o teste. Por conseguinte, a vazão dividida pela área específica total útil das membranas acondicionadas nos permeadores M1 e M2, corresponde ao fluxo permeado. A figura 7 apresenta o perfil da vazão (Q) e do fluxo permeado (F) ao longo do teste de osmose direta.



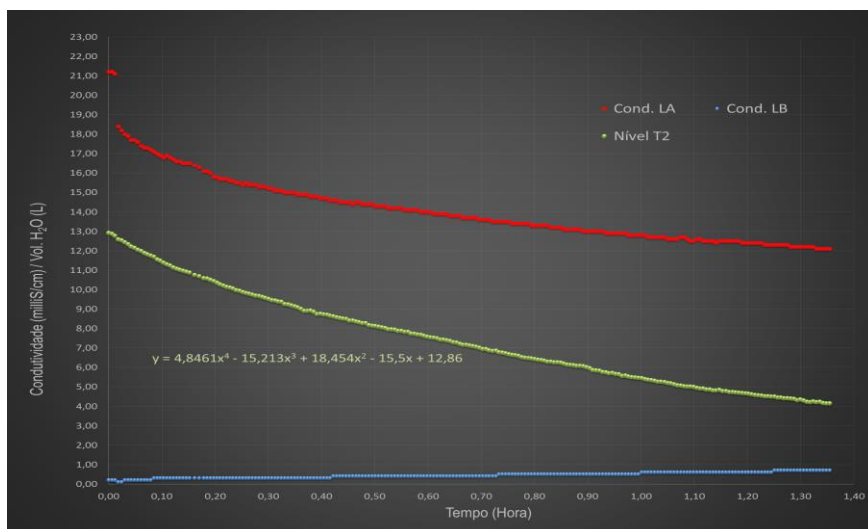


Figura 6 - Variação da condutividade das linhas de alta (LA) e baixa salinidade (LB) ao longo do teste de osmose direta (LA: MgSO<sub>4</sub> 0,03M,  $\pi$ : 8bar; LB: H<sub>2</sub>O micro./dest.  $\leq 200\mu\text{S/cm}$ ,  $\pi$ :  $\leq 0,1\text{bar}$ ). Variação do nível de água no tanque T2 (Nível T2).

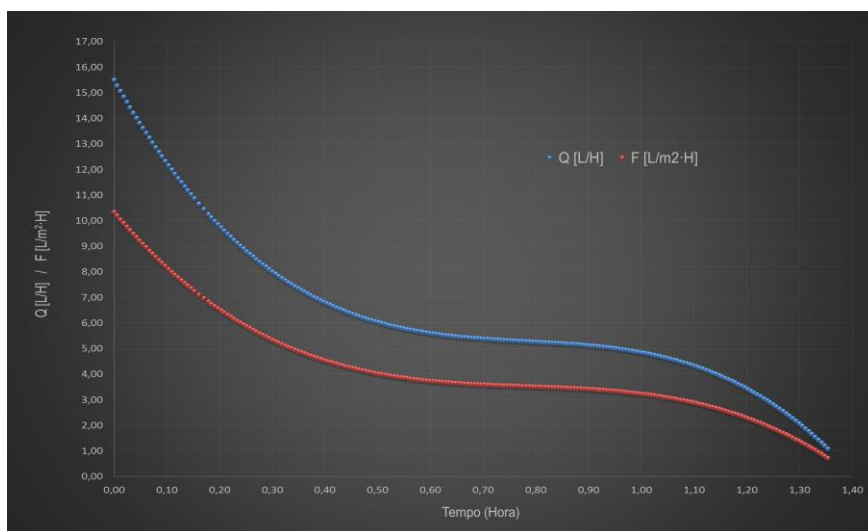


Figura 7 - Perfis da variação da vazão (Q) e do fluxo permeado (F) ao longo do teste de osmose direta (LA: MgSO<sub>4</sub> 0,03M,  $\pi$ : 8bar; LB: H<sub>2</sub>O micro./dest.  $\leq 200\mu\text{S/cm}$ ,  $\pi$ :  $\leq 0,1\text{bar}$ ).

A variação de condutividade provoca uma diminuição do gradiente de salinidade próxima as superfícies da membranas e, por conseguinte, reduz a pressão osmótica responsável pela força motriz do processo.

A permeabilidade (B) do soluto nas membranas e a resistência ao transporte (K) do soluto na região porosa da membrana são calculadas a partir dos resultados dos testes de osmose inversa e osmose direta.

## 5. CONCLUSÕES

O desempenho das membranas do tipo fibras ocas produzidas nesse trabalho pode ser comparado com o da membrana comercial de triacetato de celulose (CTA) da *Hydration Technology Innovations*, considerada como a membrana mais adequada no mercado para o processo de osmose direta (Achilli *et al.*, 2010).

A Tabela 4 apresenta as propriedades de transporte dessas membranas. Observe-se que o desempenho da AC\_2B é próximo ao da CTA, mesmo testada com menor força osmótica. A membrana produzida apresenta uma resistência ao transporte (K) menor em relação a da CTA, o que reduz o efeito da polarização de concentração próxima a camada densa das membranas. Esse fenômeno provoca uma diminuição do gradiente de salinidade e, por conseguinte, uma diminuição da pressão osmótica.

Tabela 4 - Tabela comparativa das propriedades características de transporte da membrana do tipo fibras ocas AC\_2B e da membrana comercial de CTA da *Hydratation Tech. Inn.* testadas com uma solução de sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ).

| Membranas Ref.   | $\Pi$ [bar] | $F_w$ [ $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ] | $F_s$ [ $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ] | B [m/s]             | K [s/m]        |
|------------------|-------------|--|--|---------------------|----------------|
| CTA Hydra. Tech. | 14          | 4,25   | 0,9  | ND                  | $8 \cdot 10^5$ |
| AC_2B            | 8           | 3,50   | 0,7  | $3,2 \cdot 10^{-7}$ | $4 \cdot 10^6$ |

No caso de uma unidade real, o sistema funcionaria sem reciclo das correntes, as quais seriam alimentadas em contínuo pelas fontes naturais, ou seja, pelo mar e por um rio de água doce, por exemplo. Dessa forma, a redução do gradiente de salinidade seria unicamente devido a polarização de concentração. Tal efeito pode ser parcialmente controlado pela intensidade do regime de escoamento das correntes.

## 6. REFERÊNCIAS

AABERG, R.J. Osmotic power: a new and powerful renewable energy source? *Refocus*, v. 4, pp. 48–50, 2003.

ACHILLI, A.; CHILDRESS, A. E. Selection of inorganic-based draw solutions for forward osmosis applications, *Journal of Membrane Science*, v. 364, pp. 233-241, 2010.