

## BLUE ENERGY, NOVO CONCEITO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

### *Blue Energy, new energy production concept*

FALAU, Teófilo<sup>1</sup>

---

#### **Resumo**

A protecção do meio ambiente é uma preocupação de todos nós. As energias renováveis, tem um papel fundamental na redução dos efeitos estufa. Uma das grandes problemáticas encontrada nas energias renováveis além dos custos altos associado é a variabilidade e a intermitência. A intermitência ocorre à medida que uma fonte de energia é interrompida ou não está disponível de forma involuntária, enquanto a variabilidade ocorre à medida que uma fonte de energia pode exibir alterações não desejadas ou descontroladas na saída. A *Blue Energy*, também é uma energia renovável, mas menos discutida, que tem a grande vantagem das demais energias de não ser intermitente e estar disponível em qualquer momento e circunstância, podendo gerar electricidade usando mistura de duas águas diferentes (água doce e salgada). Quando a água do rio e a água do mar unem-se, energia de salinidade pode ser extraída, convertendo esta em electricidade. A quantidade de potencial desta extração da salinidade é de 2,4 a 2,6 TW.

#### **Abstract**

The Protection of the environment is a concern for all of us. The renewable energies have a fundamental paper in reducing the greenhouse emission. One of the major concerns in renewable energy besides the associated high costs is variability and intermittency. The intermittent occurs when the power source is interrupted or unavailable unintentionally, while variability occurs as a power source may exhibit unwanted or uncontrolled changes in the output. The Blue Energy is also a renewable energy, but less discussed, which has the great advantage of other energies of not being intermittent and available at any time and circumstance, can be generate electricity using a mix of two different waters (fresh and salt water). When fresh and salt water are joined, salinity energy can be extracted, converting in electricity. The amount of the potential salinity extraction is 2.4 to 2.6 TW.

**Palavras-chave:** *Energia Renovável; Energia da Salinidade; Sustentabilidade, Membrana.*

**Keyword:** *Renewable energy; Salinity Energy; Sustainability, Membrane.*

**Data da Submissão:** fevereiro de 2019 | **Data de aceitação:** junho de 2019.

---

<sup>1</sup> TEÓFILO FALAU – UNIPIAGET, ANGOLA. E-mail: [teofilo.falau@unipiaget-angola.org](mailto:teofilo.falau@unipiaget-angola.org).

## INTRODUÇÃO

Quando a água do rio flui ao mar, grande quantidade de energia pode ser aproveitada desta mistura. Durante o processo de produção de electricidade, membranas são usados para separar água do mar (salgada) da água do rio (doce), mais uma parte da água do rio passa através das membranas e aumenta a pressão da água do mar. Esta pressão, roda a turbina para produzir energia eléctrica.

A primeira, tecnologia Osmótica foi descrita por Loeb e Normam em 1974-1975. Em 1997 surge a primeira central PRO (Pressure Retarded Osmose), com potência nominal de 10 kW. Apenas em 2009 teve o funcionamento bem-sucedido em Norwegian company Statkraft, com cerca de 2000 m<sup>2</sup> de membrana [1] com objectivo de gerar mais de 5 kW de energia.

Existem diversas tecnologias para produção de *Blue Energy* em escala laboratorial, mais apenas duas são viavelmente comerciais: *Pressure Retarded Osmosis* (PRO) e *Reverse Electro-Dialysis* (RED). O custo de produção das duas técnicas comerciais, é ainda elevado devido ao custo das membranas. O preço estimado de uma central varia de £8,38 à £25,15 por m<sup>2</sup> e preve-se uma redução de até £1,68 a £4,19 por m<sup>2</sup> [1] para que seja competitivo com as demais fontes renováveis. Este alto custo de produção, é superado pela grande vantagem de serem completamente renovável e avaliável em qualquer período e circunstância.

A concentração da água doce e do mar no sal é de aproximadamente 500 ppm à 50000 ppm [2]. Assim sendo, em uma central comercial requer grandes quantidades de membranas (por exemplo, uma central de 2 MW pelo menos são necessários 2 milhões de m<sup>2</sup> de superfície de membrana [3] e precisa ser substituída e mantida em 5 anos).

### **Materiais e Métodos**

È estimado, que o potencial energética resultante da mistura da água doce e salgada possa ser igual à uma cascata ou central hidroeléctrica com 250 m de altura [4]. Teóricamente,  $3,54 \times 10^9$  kWp estão disponíveis a partir do gradiente de salinidade. Com uma demanda de 2000, tem-se aproximadamente  $1,5 \times 10^{10}$  kWp [4].

Assim, o reverso do processo de dessalinização deverá liberar energia, que pode ser estimado em termos do teorema da energia de Gibbs, se a mistura ocorrer a uma pressão e temperatura constante, o trabalho máximo fornecido por qualquer conversor de energia é a mudança, dada por Gibbs [1-5], descrita por:

$$\Delta G_{mix} = G_b - (G_c + G_d) \quad (1.1)$$

Onde:  $G_{mix}$  é a mudança de energia de Gibbs após a mistura da solução;  $G_b$ ,  $G_c$  e  $G_d$  são as energias de Gibbs concentradas nas soluções salgadas, concentradas e diluídas respectivamente.

Assim, podemos escrever:

$$G = \sum_i \mu_i \cdot n_i \quad (1.2)$$

Onde:  $\mu$  é o potencial químico;  $n$  é o número de moles dos componentes;  $i$  é a solução, de modo que a quantidade de energia liberada corresponda à diferença de potencial químico entre a solução salobra e as soluções iniciais diluídas e concentradas.

Para soluções diluídas ideais, sem alteração na entalpia,  $\Delta H_{mix} = 0$ , pode ser calculado em termos da mudança da entropia ( $\Delta S$ ):

$$\frac{\Delta G_{mix}}{n_b} = -T \cdot [\Delta S_b - f \cdot \Delta S_c - (1 - f) \cdot \Delta S_d] \quad (1.3)$$

Com:

$$\Delta S = -R \cdot \sum_i x_i \cdot \ln x_i \quad (1.4)$$

Onde:  $n_b$  é o número de moles da água salobra;  $T$  é a temperatura;  $f$  é a fração da água do mar;  $R$  é a constante universal dos gases (8.314 J/mol.K).

A energia depende da diferença de salinidade entre os dois fluxos iniciais, taxa de fluxo e volume molar:

$$P_{\Delta G_{mix}} = -T \cdot [\Delta S_b - f \cdot \Delta S_c - (1 - f) \cdot \Delta S_d] \cdot \frac{Q_b}{V_{mol b}} \quad (1.5)$$

Onde:  $P_{\Delta G_{mix}}$  é a potência geradora da colheita de energia liberada;  $Q$  é a taxa de fluxo;  $V_{mol}$  é o volume molar.

A energia máxima extraída por unidade de volume de água doce é considerada usando a energia da mistura de Gibbs, o excesso de água do mar extraída é de  $\Delta G \approx - 2500 \text{ J/L}$  da água doce. Uma central de  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  de água doce produz mais de 1 GW [6].

Existem dois tipos principais de *membrana* usada para *RED* e *PRO*: *Flatsheet membranes*, também designada membrana de folha plana (para RED) e *hollow fibre membrane*, também designada membrana de fibra oca (para PRO). A densidade de potência das membranas de folha plana é menor, mas mantêm uma maior pressão e as membranas de fibra oca, podem ser empilhadas em módulo de membrana, aumentando a densidade de potência [3], figura 1. Os testes das membranas apresentaram para as membranas de fibra oca altas densidades de potência de  $4,4 \text{ W/m}^2$  à  $16 \text{ W/m}^2$  [3-4].



**Figura 1:** Membrana: a) Flatsheet membranes empilhada; b) Hollow fibre membranes dentro de um módulo (para purificação de gás). [3]

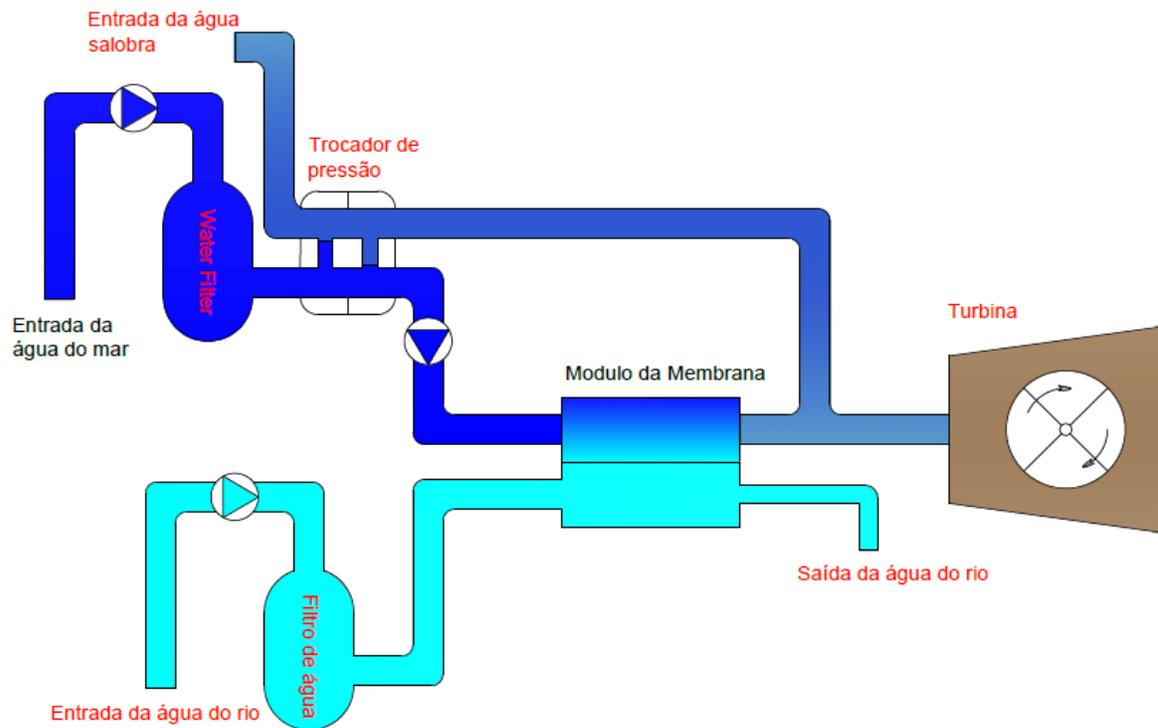
Idealmente, a densidade de potência mínima da água do rio e do mar demonstrada é de  $5 \text{ W/m}^2$  em grandes centrais PRO [7]. Na água do rio contém uma concentração finita de sais dissolvidos que se acumulam no lado da membrana de água doce [4]. A espiral é a melhor configuração a partir da qual a água salobra em algumas concentrações otimizada pode ser removida. As membranas de aço inoxidável dificilmente podem suportar a corrosão e a incrustação biológica dos oceanos.

A maior desvantagem das membranas é o custo. Esse custo afecta directamente a economia dessas técnicas para produzir energia de salinidade. Reduzindo o custo em torno de 100 [3], ajudará á melhorar o desempenho das membranas.

## RESULTADOS

### A. Pressure Retarded Osmosis (PRO)

PRO, converte a energia da salinidade (em grande escala) em eletricidade, usando membranas semi-permeáveis. O módulo da membrana e turbina hidráulica, são componentes principais das centrais de geração osmótica. Essas membranas permitem transportar água da solução em baixa concentração (água do rio) para uma solução de drenagem de alta concentração (água do mar) [6-8]. Na figura 2, temos PRO usando duas águas diferentes: água do mar e do rio. Essas águas são bombeadas para o módulo da membrana, e a água do rio migra para o lado da água do mar pressurizada. A mistura dessas duas águas no módulo da membrana, aumenta a pressão e flui para a turbina hidroelétrica para gerar potência.



**Figura 2:** Princípio de funcionamento da central osmótica. Adaptado de [1]

O fluxo de água da membrana PRO, é representado por: [1-8-9-10]

$$J_w = A_w(\Delta\pi - \Delta P) \quad (1.6)$$

Logo, a densidade da potência é:

$$W = J_w \cdot \Delta P \quad (1.7)$$

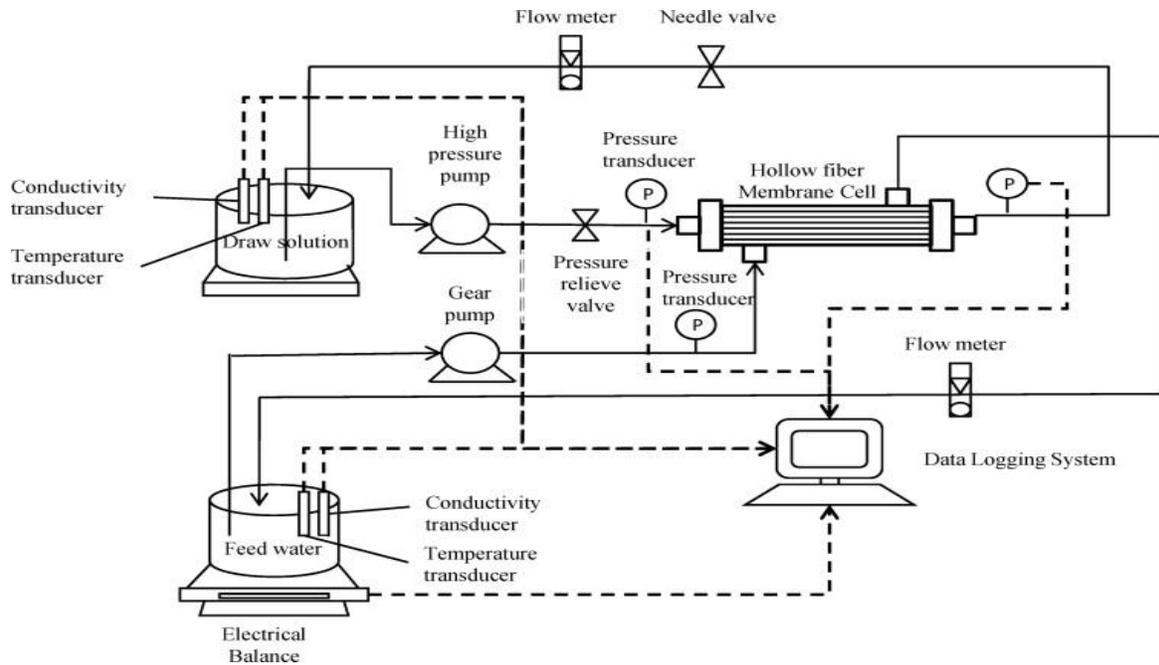
Substituindo a equação 1.6 na equação 1.7, obtem-se:

$$W = A_w(\Delta\pi - \Delta P)\Delta P \quad (1.8)$$

Onde:  $J_w$  é o fluxo de água da membrana ( $L/m^2 H$ );  $A_w$  é o coeficiente de permeabilidade da membrana ( $L/m^2 H \cdot bar$ );  $\Delta P$  é a pressão de alimentação diferencial através da membrana ( $bar$ );  $\Delta\pi$  é a pressão osmótica diferencial através da membrana ( $bar$ );  $W$  é a densidade de potência ( $W/m^2$ ).

### ***Central Piloto PRO***

O esquema na figura 3, foi usado para testar Blue Energy, utilizando *forward osmosis* (FO) e módulos de membranas de fibra oca para PRO. O diagrama de bancada, inicia quando altas pressões são bombeadas para transportar a solução passando pelo módulo da membrana de fibra oca. Cerca de 0,6 L/min á 1,6 L/min de caudal tanto para a solução de drenagem quanto para a água de alimentação são utilizados. Na simulação osmótica, o soluto NaCl de ambas as soluções de estiramento (0,5 M, 0,75 M e 1,0 M) e água de alimentação (10 mM, 40 mM e 80 mM) [1], continha 15 fibras e 28 cm de comprimento de módulo de membrana com uma temperatura na sala de aproximada de 25 °C. Estes fluxos de membranas e volume de água em intervalo de tempo, mediram as mudanças de peso do tanque de alimentação com um balanço de massa digital conectado ao computador [10].



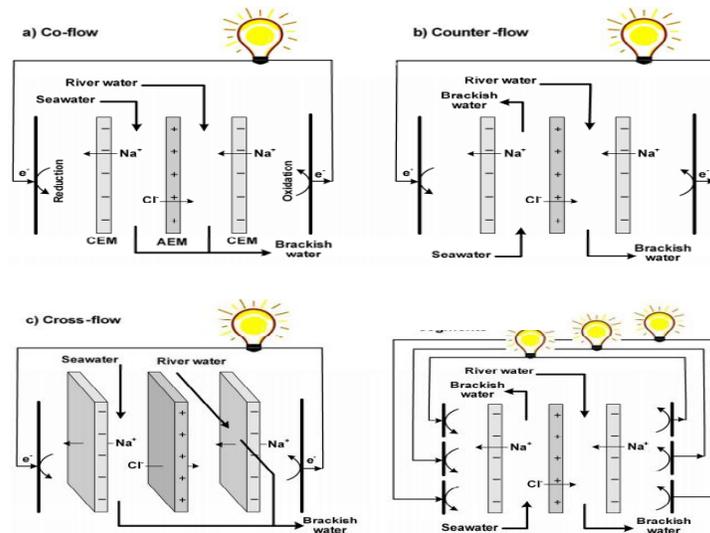
**Figura 3:** Diagrama esquemático do sistema PRO de pressão de bancada. [10]

## B. Reverse Electro-Dialysis (RED)

RED, é a tecnologia que gera energia a partir de pilhas de cátodo e ânodo alternativo, trocando selectivamente membranas permeáveis. A tecnologia consiste em dois tipos de membrana: *Cation Exchange Membranes (CEMs)* e *Anion Exchange Membranes (AEMs)* [1-5].

A água doce e a água do mar são bombadeadas nas pilhas das membranas com alternância de AEM e CEM. A água do mar difundi os íons carregados positivamente para a água do rio através dos CEM em uma direcção e os íons carregados negativamente difundem através de AEMs na outra direcção. Além disso, o  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  redox eletroquímico ligado, que circula nos compartimentos dos eléctrodos é utilizado para executar a corrente no circuito externo [6]. A figura 4, esquematiza um exemplo do RED.





**Figura 5:** Princípio de RED: A) Co-flow; b) Counter-flow; c) Cross-flow; d) Counter-flow com electrodos segmentados. [12]

### Central Piloto RED

Existem duas centrais piloto RED instaladas em escala industrial:

- ✓ *Blue Energy plant* – localizada em Afsluitdijk, Holanda - alimentado com água do mar e doce (iniciada em novembro de 2014);
- ✓ *REAPower plant* – localizada em Marsala, Italia - ópera com salmoura saturada e a água salobre (iniciada em março de 2014).

A central piloto RED da figura 6, produz eletricidade diretamente da água do mar e do rio. A ingestão das duas tem uma capacidade de 200 m<sup>3</sup>/h, assumindo o potencial de 1 MJ/m<sup>3</sup> de água do mar e do rio, esta taxa de fluxo tem um potencial de 50 kW [1].



**Figura 6:** Central piloto RED localizada na Holanda.

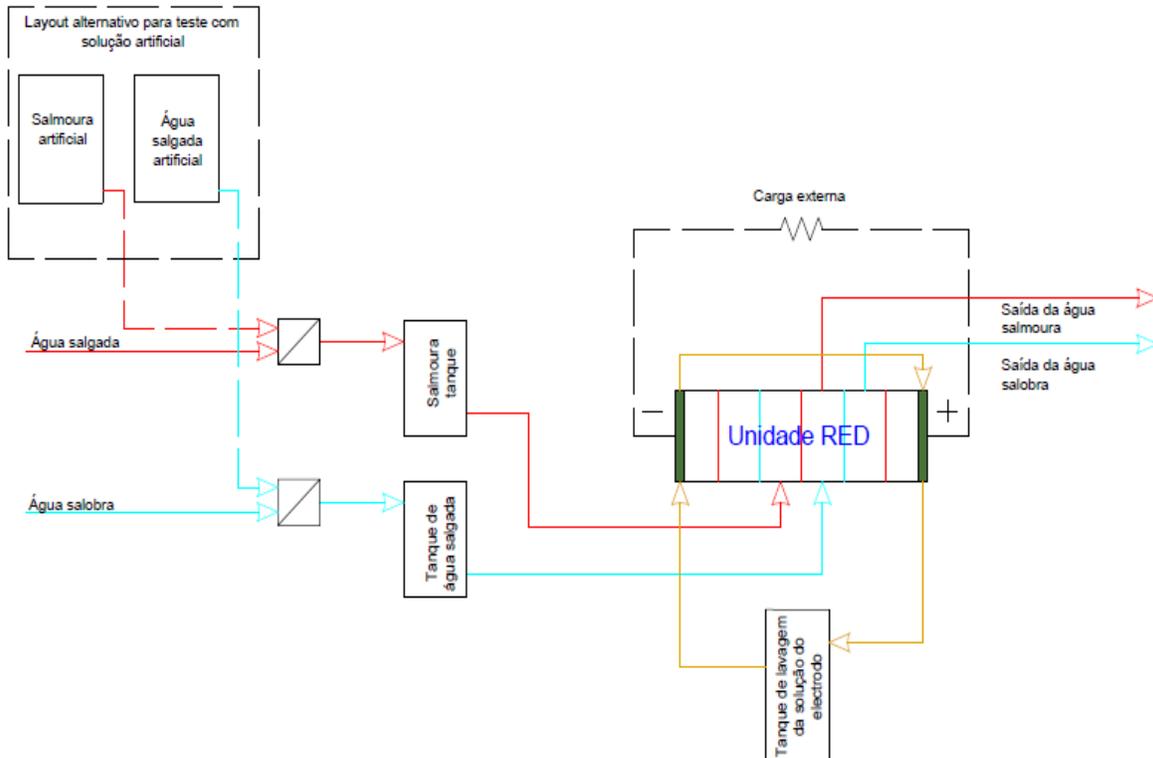
Os pontos de admissão estão equipados com filtros grosso e com a ajuda da bomba centrífuga, a água é transportada para a central piloto RED, figura 6. O tubo preto e o tubo castanho, transportam água do mar e do rio respectivamente. A energia gerada pode ser convertida usando um conversor DC/DC para à rede e converter de DC/AC para o consumidor. Na central instalou-se três módulos RED com células emparelhados numa área de  $44 \times 44 \text{ cm}^2$  e mais de  $400 \text{ m}^2$  [1] de área de membrana.

A salmoura disponível na central tem uma conduta de cerca de 150 e 220 mS/cm de NaCl, equivalente a uma concentração de 4 a 5 M acima [1], dependendo do clima, tabela 1. Portanto, a condutividade da água salobra tem uma taxa estimada de 0,03 M NaCl na solução bastante estável.

**Table 1: Carateristica de alimentação do fluxo na central REAPower. [1]**

Solução	Condutividade mS/cm	T (°C)	Composição típica de iões (g/L)					
			Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Salmora	150-220	27 (18– 31)	64 (48– 94)	11 (7– 14)	0.4 (0– 1.3)	45 (24– 58)	192 (175- 219)	39 (0–75)
Água salobra	3.4	24 (17– 27)	0.41	0.02	0.27	0.08	1.19	0.11

O esquema representativo da central piloto da REAPower é mostrado na figura 7. Os módulos RED são alimentados a partir de duas linhas de admissão, uma para a salmoura concentrada (das bacias de sal) e outra para a água salobra (do poço da costa). Em particular, a concentração salmoura é retirada de quatro bacias dedicadas, contendo salmoura saturada normalmente adoptado para a cristalização de NaCl. Além disso, dois tanques de armazenamento ( $2 \text{ m}^3$  de capacidade cada) foram instalados para testar o sistema com soluções artificiais (NaCl) para fins comparativos. Tanto a água salobra natural como a salmoura são enviadas para uma filtração de fase, depois para um tanque de reserva (com capacidade de 125 L) [14] e, finalmente alimenta as unidades RED, para geração de energia.



**Figura 13:** Esquema da central piloto REAPower. Adaptado de [1]

## DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### A. Problema Técnico

O grande problema notável na central *Blue Energy* é o custo, que em termos técnicos é devido à:

- ✓ Tempo de vida e custo da membrana;
- ✓ Mistura de água salgada e doce nas membranas;
- ✓ Resistência interna na célula, devido a grandes fluxos de água bombeados na tubulação.

## B. Impacte Ambiental

O impacte ambiental da *Blue Energy*, é imaturo descrever, devido a falta de instalações de grande escala, mais é estimado que os impacte ambientais sejam nulos ou muito pouco comparados com outras tecnologias das energias renováveis. A central é silenciosa, devido a ausência de movimento nos seus componentes. Somente as bombas, produzem um nível aceitável de ruído de aproximadamente 100 dB, contando que a energia é gerada sem emissões de gases de efeito estufa.

## C. Desempenho Económico da Tecnologia

Como outras tecnologias dos oceanos, a *Blue Energy*, é difícil de estimar o seu custo, devido à ausência de centrais de grande escala. Porém, esta tecnologia apresenta ser mais atractiva em comparação com outras tecnologias renováveis por causa da *variabilidade e intermitência*. Esta vantagem, faz com que o custo anual seja competitivo com outras energias renováveis a longo prazo.

Para mensurar a produção da eletricidade, o *levelized cost of electricity*, também conhecido por custo nivelado da eletricidade (LCOE) [7] é calculado:

$$LCOE = \frac{\textit{Total costs over lifetime}}{\textit{Total energy produced over lifetime}}$$

Pode se escrever:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{F_t + V_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Onde: LCOE é o custo nivelado da eletricidade; n é o tempo de vida do sistema na geração de energia; r é a taxa de desconto;  $F_t$  são os custos fixos do ano t;  $V_t$  são os custos variáveis (do combustível, operação ou de manutenção) no ano t;  $E_t$  é a energia total produzida no ano t.

Com potência de saída das membranas estimada de  $5 \text{ W/m}^2$  fabricado para baixo custo, a produção osmótica baixará de £0,049 kW/h à £0,099 kW/h até 2030, tornando competitivo a *Blue Energy* [7]. Da mesma forma que a energia eólica e outras energias são subsidiada, espera-se que *Blue Energy* seja incluído nos programas de subsídios e outros incentivos governamentais, e consequentemente o custo baixará para £0,045 kW/h à £0,040 kW/h [7], atraindo investidores.

#### **D. Comparação do PRO e RED**

Até agora, duas tecnologias estão disponíveis para escala comercial *PRO* e *RED*. Os testes laboratoriais da central de Statkraft e REDstack apresentaram resultados que podem ser aprimorados para grandes aplicações.

O *PRO*, usa membrana para separar a concentração da solução de água salgada da doce. A água do rio, flui através de uma membrana semi-permeável para a água do mar, o que aumenta a pressão da água do mar e faz girar a turbina gerando eletricidade. A central é operacional 24 h/dia de fontes constante não avendo intermitências e variações.

O *RED*, transporta íons positivos e negativos através da membrana, usando alternadamente pilha de cátodo e anodo de membrana alternada. A eletricidade é convertida usando a diferença do gradiente de salidade. A vantagem da tecnologia *RED* é a densidade de potência da membrana que gera energia por área de membrana.

Tanto a tecnologia *PRO* como a tecnologia *RED* possuem ótimos desempenhos que podem ser usados na geração de energia em grandes escalas.

## CONCLUSÃO

A *Blue Energy*, é sem dúvida completamente renovável e sustentável, devido a altas concentrações de energia através da membrana. Na membrana, 80 a 90 % da água doce é transferida para a água do mar pressurizada, utilizando o processo de osmose.

Vários estudos são desenvolvidos para garantir que esta energia possa ser usada em grande escala, para se tornar competitiva comparada a outras energias renováveis. O alto custo da central é ainda um grande problema, devidos os custos associados a membrana. Reduzindo o custo da membrana, esta tecnologia pode tornar-se competitiva. Além disso, muitas fontes renováveis como o vento, as ondas, as marés, o sol, são variáveis e intermitentes, mas a *Blue Energy*, está disponível sempre e não necessita de combustível que emitem gases de efeito estufa.

Até agora, *Blue Energy*, não foi utilizado em grande escala. Para implementação em grande escala, as duas tecnologias *PRO* e *RED*, necessitam redução do custo de produção. Como outras energias renováveis, é necessário que às mesmas beneficiem de subsídios e incentivos governamentais para ser mais atraente para os investidores.

Em Angola e varios Países, muitos são os rios que fluem ao mar. Usando a vantagem da quantidade de energia potencial extraída da mistura de água doce e salgada, pode-se produzir grandes quantidades de energia usando a *Blue Energy*, todos nós podemos beneficiar, e também contribuindo na preservação do meio ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cipollina, A., & Micale, G. (2016). *Sustainable Energy from Salinity Gradients*. USA: Woodhead Publishing. doi.org/10.1016/C2014-0-03709-4
- Colin, A. B., & Susanne M. C. (2014). *Water Resources in the Built Environment Management Issues and Solutions*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Kempener, R., & Neumann, F. (2014). *SALINITY GRADIENT ENERGY TECHNOLOGY BRIEF*. IRENA Ocean Energy Technology. Disponível em:  
[https://www.irena.org/documentdownloads/publications/salinity\\_energy\\_v4\\_web.pdf](https://www.irena.org/documentdownloads/publications/salinity_energy_v4_web.pdf)
- Charlier, R. H., & Justus, J. R. (1993). *Ocean Energies Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power Sources*. (Vol.56, 1<sup>st</sup> ed.). Elsevier Science.
- Ribeiro, A. B., Mateus, E. P., & Couto, N. (2016). *Electrokinetics Across Disciplines and Continents, New Strategies for Sustainable Development*. Springer International Publishing Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-20179-5\_14
- Zhijun, J., Baoguo, W., Shiqiang, S., & Yongsheng, F., (2014). Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 91–100. doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.049
- Helfer, F., Lemckert, Ch., & Anissimov, Y. G. (2014). Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – A review. *Journal of Membrane Science*, 453(1), 337–358. doi.org/10.1016/j.memsci.2013.10.053
- Achilli, A., Cath, T. Y., & Childress, A. E. (2009). Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation. *Journal of Membrane Science*, 343 (1-2), 42–52. doi.org/10.1016/j.memsci.2009.07.006
- Altaee, A., & Sharif, A. (2015). Pressure retarded osmosis: advancement in the process applications for power generation and desalination. *Desalination*, 356, 31–46. doi.org/10.1016/j.desal.2014.09.028
- Chou, S., Wang, R., She, Q., Tang, C., & Fane, A. G. (2012). Thin-film composite hollow fiber membranes for pressure retarded osmosis (PRO) process with high power density. *Journal of Membrane Science*, 389, 25–33. doi.org/10.1016/j.memsci.2011.10.002

Logan, B. E., & Elimelech, M. (2012). Membrane-based processes for sustainable power generation using water. *Nature*, 488, 313–319. doi.org/10.1038/nature11477

Vermaas, D. A. (2014). *Energy generation from mixing salt water and fresh water: smart flow strategies for reverse electrodialysis*. Enschede: Universiteit Twente. doi:10.3990/1.9789036535731

Gurreri, L., Tamburini, A., Cipollina, A., Micale, G., & Ciofalo, M. (2014). CFD prediction of concentration polarization phenomena in spacer-filled channels for reverse electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 468, 133-148. doi.org/10.1016/j.memsci.2014.05.058

Tedesco, M., Scalici, C., Vaccari, D., Cipollina, A., Tamburini, A., & Micale, G. (2016). Performance of the first Reverse Electrodialysis pilot plant for power production from saline waters and concentrated brines. *Journal of Membrane Science*, 500, 33–45. doi.org/10.1016/j.memsci.2015.10.057