

SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA OTEC DE CICLO FECHADO OPERANDO NO BRASIL

Marcus Godolphim de Castro Neves – marcus@castroneves.net

Hélio Henrique R. Ferreira Dias – heliohenrique19@gmail.com

Cassio Roberto Macedo Maia – cassio@dem.feis.unesp.br

Ricardo Alan Verdú Ramos – ramos@dem.feis.unesp.br

UNESP / IPBEN – Laboratório Associado de Ilha Solteira

6 – Outras Fontes Renováveis de Energia

Resumo. Atualmente, a busca por novas fontes de energias renováveis tem sido o motivo de pesquisas e investimentos, sendo que a possibilidade de exploração da energia dos oceanos pode ser uma interessante alternativa. Um desses processos é baseado na extração da energia térmica solar acumulada na superfície dos oceanos. Parte dessa energia pode ser transformada em eletricidade e em vários outros subprodutos por meio de um processo conhecido como Conversão da Energia Térmica dos Oceanos (OTEC), que utiliza a diferença de temperatura da água entre a superfície e a profundidade de 1.000 m. As usinas OTEC podem operar em sistemas térmicos aberto, fechado ou híbrido, sendo que, para operar de forma adequada, o local de instalação da usina OTEC deve ter águas com temperatura média da superfície maior que 24°C. O Brasil possui várias regiões que atendem esta condição sendo, portanto, um dos países com boa capacidade de instalação de usina OTEC para ajudar a suprir sua demanda energética. Diante deste contexto, este trabalho apresenta a simulação numérica de uma planta OTEC de ciclo térmico fechado, utilizando parâmetros encontrados na literatura, para estimar a capacidade de geração de energia elétrica de acordo com as condições ambientais em alguns locais da costa brasileira.

Palavras-chave: Energia, Oceano, OTEC.

1. INTRODUÇÃO

Segundo projeções do Plano Nacional de Energia 2030, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia, o Brasil deverá atingir 47% de utilização de fontes renováveis em sua matriz energética. Algumas fontes renováveis alternativas têm começado a se tornarem importantes nos últimos anos, como, por exemplo, geração eólica e a fotovoltaica.

Por outro lado, por ter um vasto litoral, o Brasil também pode aproveitar de forma significativa o potencial energético que os oceanos podem oferecer. Existem várias formas de aproveitamento da energia (cinética, química ou térmica) dos oceanos em eletricidade, podendo ser por meio das marés, das correntes oceânicas, das ondas, do gradiente de salinidade (osmose) e da conversão da energia térmica do oceano (Eletronorte, 2013).

Os oceanos são grandes acumuladores de energia solar em suas superfícies, podendo, em áreas tropicais, atingir o equivalente a 250 milhões de barris de petróleo por dia. Esta energia térmica acumulada pode ser convertida em energia elétrica por meio de um processo denominado Conversão da Energia Térmica do Oceano, comumente conhecida pela sigla OTEC, originada de *Ocean Thermal Energy Conversion* (Etemadi et al., 2011).

As vantagens da geração de eletricidade por este processo é que são que os recursos da OTEC são vastos, naturalmente renováveis e não poluentes. Adicionalmente, essa tecnologia produz diversos subprodutos, como água fresca para consumo e irrigação; alimentos marinhos para indústrias, sal e água gelada; dentre outros (Crews, 1997). Um sistema OTEC de 100 MWe pode reduzir uma quantidade de emissões de CO₂ em 140.000 toneladas por ano, se comparada com uma usina termelétrica de mesma capacidade (Tahara, Horiuchi e Kojima, 1995).

No entanto, existem algumas desvantagens da geração de eletricidade numa planta OTEC, sendo que dentre eles podem ser destacados os seguintes: baixa eficiência na conversão de energia, necessidade de um investimento inicial alto (entre 50 e 100 milhões de dólares para construir uma planta com capacidade de 10 MWe), custos de energia entre US\$0,13/kWh e US\$0,65/kWh (Upshaw, 2012).

De acordo com Etemadi et al. (2011), uma planta OTEC trabalha com a diferença de temperatura entre a água da superfície do oceano e a água localizada em um ponto a 1.000 m de profundidade. Em áreas tropicais, este gradiente de temperatura é em torno de 20 °C. Essa diferença ocorre porque a água do mar se torna fria conforme a profundidade aumenta (Reis e Souza, 2007).

A Figura 1 mostra como um sistema OTEC gera seus subprodutos e a Figura 2 mostra a variação da temperatura da água do oceano de acordo com a profundidade.

Embora as usinas OTEC possam operar em ciclos aberto, fechado ou híbrido, neste trabalho os estudos serão concentrados no ciclo fechado, cujo esquema típico simplificado é mostrado na Figura 3.

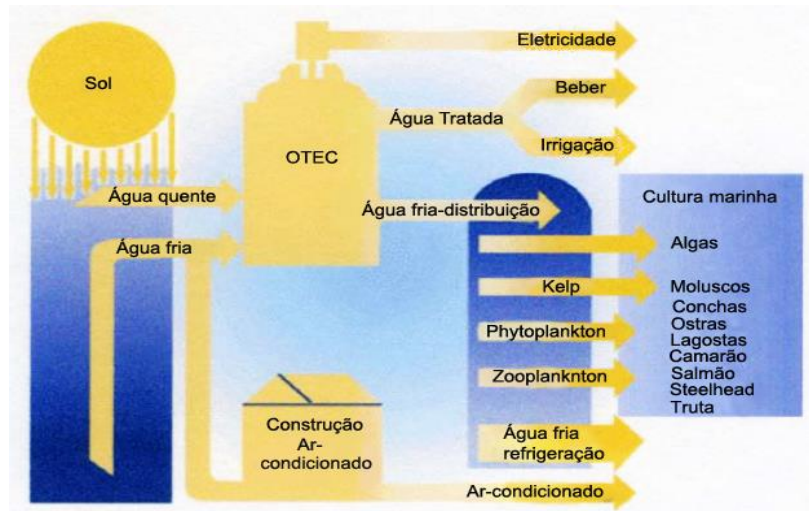


Figura 1 - Como uma usina OTEC gera os subprodutos (Adaptado de <http://www.nrel.gov>).

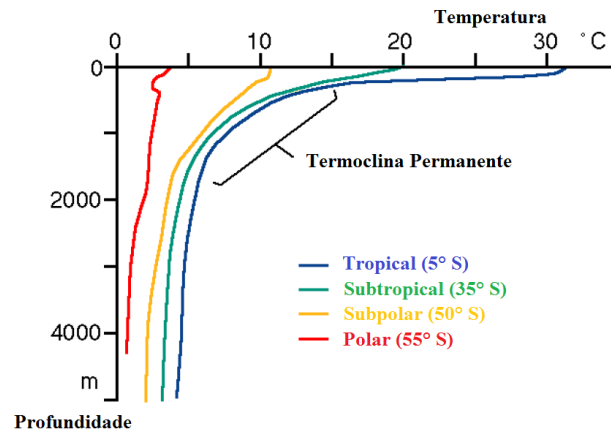


Figura 2 - Estrutura térmica típica das águas dos oceanos (Reis e Souza, 2007).

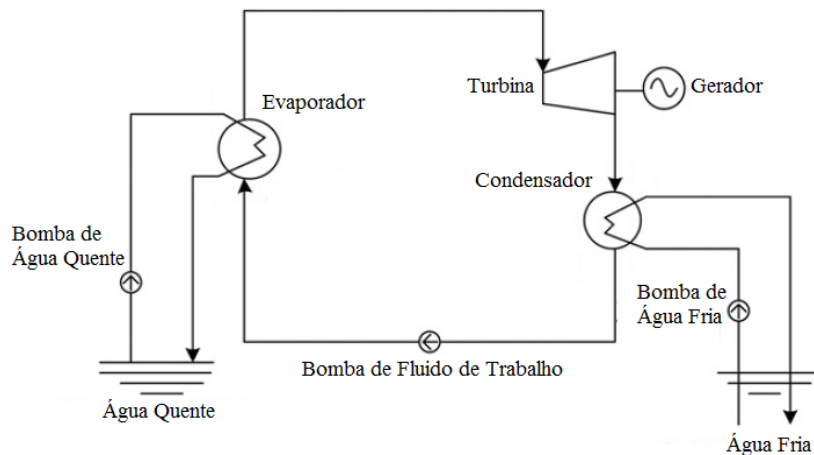


Figura 3 - Ciclo fechado de uma planta OTEC (Faizal e Ahmed, 2013).

O ciclo fechado produz eletricidade por meio do ciclo de Rankine. O fluido de trabalho é um fluido com baixa temperatura de ebulição, sendo que os mais utilizados são a amônia e o freon, sendo que Bharathan (2012) também recomenda estudar a utilização do propileno. O ciclo de Rankine de uma OTEC consiste em dois trocadores de calor, uma turbina a vapor e uma bomba. A água quente obtida na superfície é bombeada para o trocador de calor e, então, o fluido de trabalho aumenta sua temperatura até mudar de estado para o de vapor superaquecido. O vapor produzido aciona uma turbina de baixa pressão (Upshaw, 2012) e, após sair da turbina, como vapor com título, vai para o condensador, onde troca calor com a água fria da profundidade tornando-se líquido, sendo depois bombeado novamente para o evaporador (Faizal e Ahmed, 2013).

Para aumentar a geração de energia elétrica num ciclo fechado pode ser adicionado um outro estágio. Cada estágio é um outro ciclo fechado, onde a saída de água quente do primeiro estágio alimenta o evaporador do segundo estágio e a água gelada entra no condensador do segundo estágio e sua saída alimenta o condensador do primeiro estágio, fazendo o caminho oposto da água quente (Upshaw, 2012).

Na Figura 4 é mostrada a média da temperatura da superfície da água da costa brasileira nos quatro meses do verão de 2013.

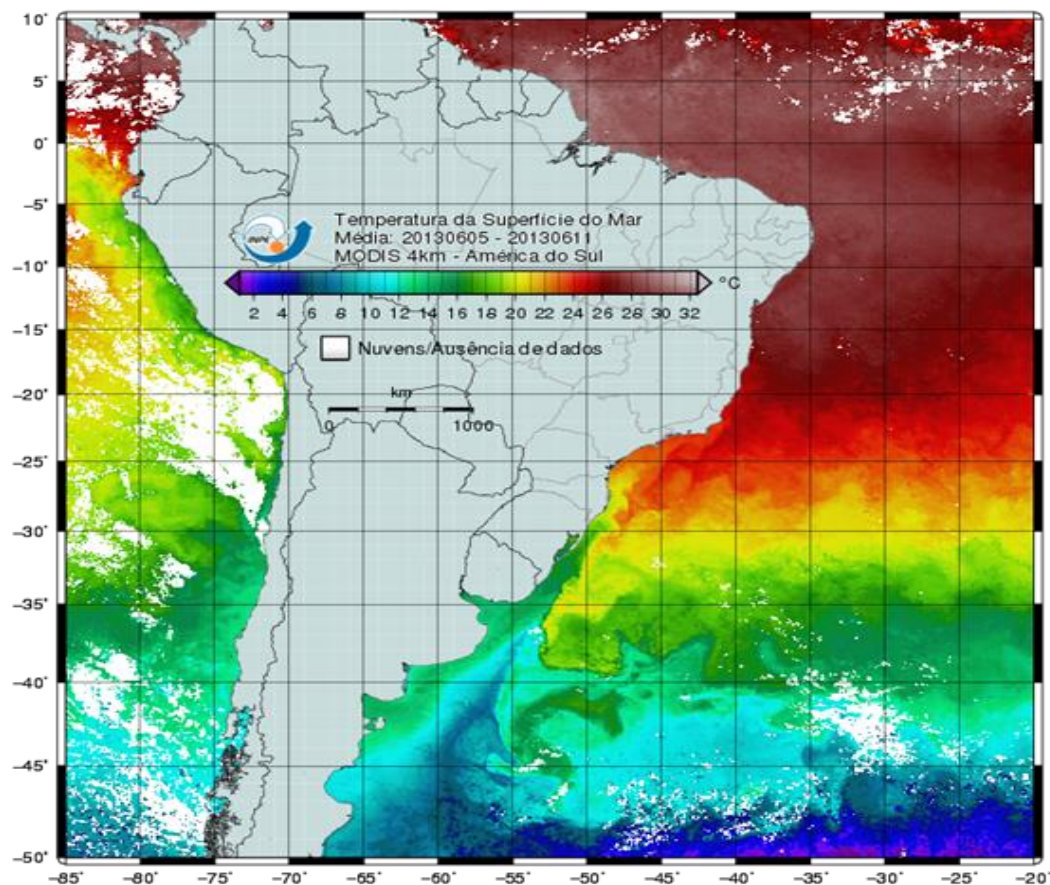


Figura 4 - Temperatura da superfície das águas na costa brasileira no verão (<http://satelite.cptec.inpe.br>).

É possível observar que a temperatura da costa do nordeste brasileiro é em torno de 28 °C, o que sugere que este é um local que possui um bom potencial para instalação de uma usina OTEC, pois, segundo Nihous (2007), a média da temperatura da água da superfície deve ser acima de 24 °C para um bom aproveitamento do gradiente térmico dos oceanos.

2. DESCRIÇÃO DO CASO ESTUDADO

O caso simulado trata-se de uma planta OTEC de ciclo fechado e com um estágio, como pode ser observado na Figura 5. Trata-se de um ciclo Rankine com turbina, bomba, pré-aquecedor, evaporador, superaquecedor, condensador e resfriador, sendo que o fluido de trabalho é a amônia. O trocador de calor possui uma bomba para alimentação de água da superfície e de profundidade. O aquecedor, superaquecedor e resfriador foram adicionados para aumentar a eficiência do condensador e do evaporador, porque a diferença de temperatura entre os dois fluidos (amônia e água) é muito baixo e a quantidade de calor é alta.

Deste modo, foi necessário um trocador de calor maior e mais eficiente. O coeficiente global de troca de calor para o condensador, evaporador e outros trocadores de calor foram adotados de acordo com Upshaw (2012), Uehara et al. (2009) e Avery e Hu (1994), estando entre 3,5 kW/m²K e 4,5 kW/m²K. A eficiência das bombas e turbina foram obtidas com base em dados de Upshaw (2012) e Bharathan (2011).

A simulação foi feita usando o programa EES[®] - *Engineering Equation Solver* (Klein e Alvarado, 1995), definindo as condições da costa brasileira, sendo que os parâmetros usados na simulação são mostrados na Tabela 1.

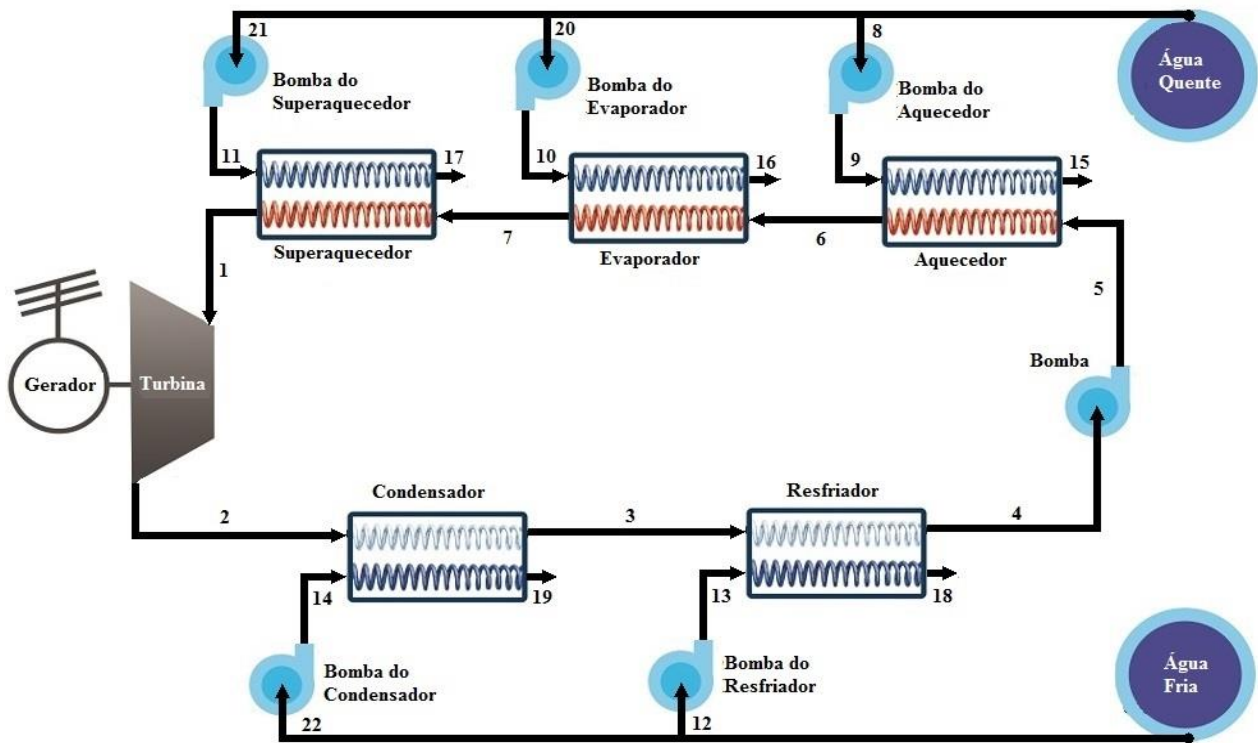


Figura 5 - Planta OTEC simulada.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na simulação da OTEC.

Parâmetro	Valor
Temperatura da água quente (°C)	26
Temperatura da água fria (°C)	4,5
Eficiência da bomba (%)	85
Eficiência da turbina (%)	85
Coefficiente global de transferência de calor (evaporador e condensador) (kW/m²K)	4,25
Coefficiente global de transferência de calor (outros trocadores de calor) (kW/m²K)	3,75
Eficiência do gerador elétrico (%)	98
Perda de carga no aquecedor (bar)	0,048
Perda de carga no evaporador (bar)	0,108
Perda de carga no superaquecedor (bar)	0,162
Perda de carga no condensador (bar)	0,086
Perda de carga no resfriador (bar)	0,119

3. METODOLOGIA

Considerando o processo em regime permanente e assumindo que todas as variações de energias cinética e potencial são desprezíveis, bem como a conservação da massa, a primeira e a segunda lei da termodinâmica para um volume de controle são representadas da seguinte forma simplificada (Van Wylen, Borgnakke e Sonntag, 1994):

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (2)$$

$$\dot{S}_{ger,vc} + \sum \left(\frac{\dot{Q}_{vc,j}}{T_j} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s = 0 \quad (3)$$

A análise energética é capaz de levar em conta a qualidade da energia e as fontes de irreversibilidade no processo, sendo necessária a utilização da análise exérgica. De acordo com Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), a exergia

específica total é composta pela exergia física e química:

$$\bar{e}x_{total} = \bar{e}x_{fis} + \bar{e}x_{quim} \quad (4)$$

Uma vez que o ciclo OTEC não possui combustível e desconsiderando os efeitos das energias cinética e potencial, a exergia física de um escoamento é avaliada baseada em um estado de equilíbrio restrito do sistema em um ambiente padrão (P_0, T_0), por meio de:

$$\bar{e}x_{fis} = (\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0) \quad (5)$$

A eficiência global da planta OTEC baseada na Primeira Lei da Termodinâmica é a razão da energia disponível (seja ela térmica ou elétrica) para exportação e da potência fornecida, de acordo com:

$$\eta_{overall} = \frac{\sum \dot{W}_o - \sum \dot{W}_i}{\sum \dot{Q}_i} \quad (6)$$

A eficiência de Carnot é um bom parâmetro para verificação de como a planta OTEC possui uma eficiência baixa, porém se comparado à eficiência de Carnot com a eficiência global, pode-se observar que a planta OTEC possui uma eficiência global acima de 50% da sua eficiência máxima. A eficiência de Carnot pode ser calculada por:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (7)$$

4. RESULTADOS

A Tabela 2 mostra os dados de pressão, temperatura, fluxo de massa e de algumas propriedades termodinâmicas obtidos através da simulação no EES[®].

Tabela 2 - Resultados termodinâmicos obtidos na simulação no EES[®].

Ponto	<i>P</i> (bar)	<i>T</i> (°C)	<i>h</i> (kJ/kg)	<i>s</i> (kJ/kg K)	<i>m</i> (kg/s)	<i>ex</i> (kJ/kg)
1	8,86	22,0	1.483,88	5,374	300	303,306
2	5,44	6,5	1.432,30	5,407	300	241,887
3	5,44	6,5	230,20	1,109	300	321,236
4	5,44	6,0	227,90	1,100	300	321,619
5	8,86	6,1	228,50	1,101	300	321,921
6	8,86	21,0	298,50	1,345	300	319,173
7	8,86	21,0	1.480,84	5,364	300	303,248
8	1,01	26,0	109,00	0,381	1,751	0,026
9	1,06	26,0	109,03	0,381	1,751	0,056
10	1,12	26,0	109,04	0,381	29,548	0,066
11	1,17	26,0	109,05	0,381	76	0,076
12	1,01	4,5	19,02	0,069	174	3,069
13	1,13	4,5	19,03	0,069	174	3,079
14	1,10	4,5	19,03	0,069	90,157	3,079
15	1,01	231	96,95	0,340	1,751	0,200
16	1,01	23,0	96,47	0,339	29,548	0,018
17	1,01	23,0	96,45	0,339	76	0,088
18	1,01	5,48	23,13	0,083	174	3,005
19	1,01	5,52	23,32	0,084	90,157	2,896
20	1,01	26,0	109,00	0,381	29,548	0,026
21	1,01	26,0	109,00	0,381	76	0,026
22	1,01	4,5	19,02	0,069	90,157	3,069

A eficiência do ciclo foi de 4,06% e a eficiência de Carnot foi de 6,68%. Neste caso, a eficiência global é de 60% da eficiência de Carnot.

A potência produzida pela turbina, consumida pelas bombas e a disponível para exportação são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Potência requerida para cada equipamento.

Equipamento	Potência (kWe)
Turbina	15.472,8
Bomba de fluido de serviço	191,0
Bomba do aquecedor	9,8
Bomba do evaporador	366,0
Bomba do superaquecedor	1,4
Bomba do condensador	893,5
Bomba do resfriador	2,4
Disponibilidade para exportação	14.740,7

5. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nas simulações, é possível perceber que uma planta OTEC de ciclo fechado pode ser usada para gerar energia elétrica no nordeste do Brasil. Mesmo que a planta possua uma baixa eficiência energética, ela pode gerar consideráveis quantidades de energia. Essa quantidade é suficiente para substituir uma planta que funciona com motores estacionários a diesel, por exemplo, os quais possuem um custo de geração de energia comparativamente mais alto do que outras fontes de energia no Brasil.

O próximo passo deste estudo é quanto custará a energia produzida e a sua viabilidade econômica. Com esses resultados, será possível estimar quais fontes de energia poderão ser substituídas ou não, como as altamente poluidoras e caras, como o diesel. Além disso, outros ciclos serão simulados no futuro. A ideia é implementar concentradores solares no ciclo fechado, a fim de se observar o aumento da potência gerada e da eficiência.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq por conceder bolsas de mestradados aos dois primeiros autores.

REFERÊNCIAS

- Avery, W. H., Hu, C., 1994. Renewable Energy from the Ocean: A Guide to OTEC. Oxford University Press
- Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M., 1996. Thermal design & optimization. New York: John Wiley & Sons, 542 p.
- Bharathan, D., 2011. Staging Rankine cycles using ammonia for OTEC power production. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5500-49121, <<http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49121.pdf>>, 18 p.
- Crews, R., 1997. OTEC Sites: http://www.trellis.demon.co.uk/reports/otec_sites.html. Acesso em: 18 Jan. 2013.
- Eletronorte (Brasil). Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas. Introdução às Energias Renováveis. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/64299782/Introducao-as-Energias-Renovaveis-Apostila-Eletronorte>>. Acesso em: 23 Out. 2013.
- Etemadi, A., Emdadi, A., AsefAfshar, O., Emami, Y., 2011. Electricity generation by the ocean thermal energy. Energy Procedia. vol.12, pp. 936-944.
- Faizal, M., Ahmed, M. R., 2013. Experimental studies on a closed cycle demonstration OTEC plant working on small temperature difference. Renewable Energy. vol. 51, pp. 234-240.
- Klein, S. A.; Alvarado, F. L., 1995. EES - Engineering Equation Solver. Middleton: F-Chart Software.
- Nihous, G., 2007. An estimate of atlantic ocean thermal energy conversion (OTEC) resources. Ocean Engineering, vol. 34, n. 17-18, pp. 2210-2221, 2007.
- Reis, R. A. N., Souza, R. B., 2012. Climatologia da estrutura termal do oceano Atlântico sudoeste a partir de dados observacionais de XBTS. Scientific Initiation Final Relatory, CRS/INPE - MCTI, Santa Maria, RS, 7 p.
- Tahara, K., Horiuchi, K., Kojima, T., 1995. Ocean thermal energy conversion (OTEC) system as a countermeasure for CO₂ problem - Energy balance and CO₂ reduction potential. Energy Conversion and Management, vol. 36, n. 6-9, pp. 857-860.
- Uehara, H., Kusuda, H., Monde, M., Nakaoka, T., Sumitomo, H., 2009. Shell-and-plate-type heat exchangers for OTEC plants. Journal of Solar Energy Engineering vol. 106, n. 3, pp. 286-290.
- Upshaw, C. R., 2012. Thermodynamic and economic feasibility analysis of a 20 mw ocean thermal energy conversion (OTEC) power plant. Master Degree Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Van Wylen, G. J., Borgnakke, C., Sonntag, R. E., 2003. Fundamentos da termodinâmica clássica. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 589 p.

SIMULATION OF A CLOSED OTEC POWER PLANT OPERATING IN BRAZIL

Abstract. *The searching for news sources of clean and renewable energy has been the reason of a lot of researches and investments and the seas are a good alternative to explore. The oceans have, at least, four means of energy generation; being one of them is using the solar thermal energy accumulated in their surfaces. Per day, the oceans accumulates thermal energy equivalent to 250 million of oil barrels and this energy can be converted to into electricity and various byproducts by means a process named Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). OTEC plants operate in three distinct thermal cycles: open, closed and hybrid. For operating at adequate form, the local of installation of an OTEC plant must have the sea surface temperature average greater than 24 °C. Brazil have a lot of locals in its offshore line with sea surface temperature average equal or greater than this temperature, being one of the countries with good capacity to install an OTEC plant to attempt electrical and energetic demands. Therefore, this work aims the computational simulation of closed thermal cycles of an OTEC plant, using the parameters found in literature, for estimating the capacity of electrical energy generation with the environment conditions found in some points of Brazilian coast.*

Key words: *Energy, Ocean, OTEC.*