

.....

**GERAÇÃO MAREMOTRIZ**

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO HIPOTÉTICA DE GERADORES MAREMOTRIZES NO ESTREITO ENTRE AS BAÍAS NORTE E SUL DA ILHA DE SANTA CATARINA\***

Alessandro Miguel Domingos<sup>1</sup>

**RESUMO:** Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos através de um estudo de caso visando verificar a possibilidade de viabilizar técnica e economicamente o uso de turbinas maremotrizes para a extração sustentável do potencial energético existente no estreito, que separa as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina, Brasil. Por apresentar características geográficas semelhantes às encontradas na Irlanda do Norte, local onde foi instalado um sistema similar, o canal é, *à priori*, apropriado para tal finalidade. Do ponto de vista de viabilidade técnica, o estudo leva em conta dados reais do canal, como dimensões, vazão e batimetria. Assim, os resultados encontrados servem como bons indicadores do potencial energético da região. Adicionalmente, sob o ponto de vista econômico, parte-se do pressuposto que a energia gerada será destinada à iluminação pública total ou parcial das pontes Hercílio Luz, Colombo Machado Salles e Pedro Ivo Campos, logo, a partir do quadro atual de consumo destas cargas, alguns indicadores, como o *payback*, são também apresentados.

**Palavras-chaves** Geração maremotriz. Fluxo de corrente de maré. Potencial energético. Fonte de energia sustentável. Ilha de Santa Catarina.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento econômico mundial, melhora da qualidade de vida e consequente expansão do setor elétrico, estima-se que a procura por matéria prima para a geração de energia cresça, aproximadamente, 59% até 2020. (INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS, 2012). Este crescimento surge como consequência dos investimen-

---

<sup>1</sup> Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL - egresso do curso de Engenharia Elétrica - [alessandromdomingos@gmail.com](mailto:alessandromdomingos@gmail.com).

\* Trabalho de conclusão de curso orientado pelo professor Roberto Francisco Coelho

.....



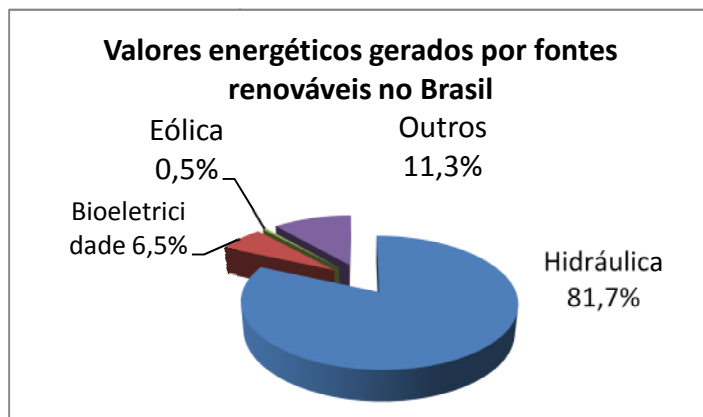
.....  
tos realizados por cada país, de acordo com suas necessidades energéticas, resultando na construção de novas usinas geradoras de energia.

Evidencia-se, porém, o fato de que grande parte da matriz energética mundial, atualmente, não é considerada ambientalmente correta e adequada para geração em grande escala. Isto decorre do fato de que cerca de 81% da energia gerada no mundo é proveniente de fontes não renováveis, ou seja, de usinas que estão em operação devido à queima de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral, urânio, entre outras. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011).

A participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, no ano de 2011, em relação a 2010, teve um acréscimo de 2,5%. (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS, 2012). Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), a contribuição percentual das fontes renováveis exploradas no Brasil referente à produção de energia elétrica no ano de 2011 foi de aproximadamente 88,8% dos potenciais elétricos totais produzidos no país, sendo que a contribuição de cada fonte renovável pode ser observada através do Gráfico 1.



Gráfico 1: Fontes renováveis no Brasil no ano de 2011.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE; Ministério de Minas e Energias - MME, 2012.

A energia proveniente do fluxo de corrente de marés, maremotriz, é uma das fontes alternativas de geração de eletricidade com grande potencial energético, porém, ainda pouco estudada e inexplorada no Brasil. Sistemas maremotrizes usam a energia proveniente das oscilações marítimas para transformar energia cinética e/ou potencial em eletricidade. Tais oscilações podem ser provocadas por influência de fenômenos naturais como fases da lua, movimentação de placas tectônicas e fenômenos climáticos em geral.

No entanto, é importante destacar que não são todas as localidades que disponibilizam condições adequadas para a implantação de usinas maremotrizes. Para que seja construído este tipo de usina, são necessários estudos preliminares das condições físicas e geográficas do local desejado. Estes estudos buscam definir o tipo de usina que será implantado, posição das turbinas, o modo que irá operar o sistema e como serão atendidas as necessidades previstas, além de outros parâmetros a serem compreendidos, de modo a garantir a viabilidade técnico-econômica de implantação da usina maremotriz.

Com base em dados obtidos por meio do Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA-SC), o canal que separa o continente da ilha de Santa Catarina apresenta, *à priori*, características adequadas para que estudos sejam realizados



.....  
no local, com o propósito de verificar se existe a possibilidade de implantar, hipoteticamente, geradores maremotrizes no centro do canal.

Neste trabalho serão apresentados os procedimentos para verificar as viabilidades técnica e econômica de implantação, sendo que para tanto, considerar-se-á que a energia gerada será utilizada para suprir o consumo de iluminação pública das pontes Hercílio Luz, Pedro Ivo Campos, Colombo Machado Salles, total ou parcialmente.

Enfatiza-se que economicamente não existe nenhum outro estudo preliminar que indique uma direção a ser tomada, portanto, as conclusões sobre viabilidade serão obtidas no decorrer do trabalho, à medida que o sistema seja modelado.

Tecnicamente, os estudos realizados em Florianópolis tomarão como referência a usina maremotriz localizado na Irlanda do Norte, que foi projetada e implantada em escala comercial pela empresa *Marine Current Turbines Ltd* (MCT).

De forma geral, o sistema será compreendido por duas turbinas, idênticas, bidirecionais hidrocínéticas e independentes, sustentadas por um braço mecânico fixado em uma pilar vertical.

## **2. Introdução À Geração Maremotriz E Informações Técnicas Do Estreito Entre As Baías Norte E Sul Da Ilha De Santa Catarina**

As variações de marés possibilitam, em algumas localidades, um grande potencial energético, os quais podem ser explorados a partir da energia potencial e/ou cinética contida nestas variações. Uma das formas possíveis de explorar a energia proveniente dos movimentos oceânicos é a extração de energia elétrica a partir, da energia cinética, dos fluxos de correntes de marés. Este tipo de energia é normalmente obtido através do impulso dado às turbinas hidrocínéticas, cujos geradores internos são bidirecionais e pos-



.....

suem hélices com pás reguláveis para que haja um melhor aproveitamento do fluxo das correntes que o atravessam.

Os melhores locais para a exploração deste tipo de energia são em canais que apresentam altos níveis de fluxo de correntes de marés, conforme ilustra a Figura .

Figura 1: Usina maremotriz *SeaGen*.



Fonte: *Marine Current turbine*. Disponível em: <http://www.marineturbines.com>. Acesso em: 01 jul, 2012.

## 2.1 INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO ESTREITO ENTRE AS BAÍAS NORTE E SUL DA ILHA DE SANTA CATARINA

Os dados aqui apresentados foram fornecidos pelo Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA-SC).

As informações referem-se às características do canal que separa a ilha de Santa Catarina do continente, e servirão de base para o estudo de caso que propõe a implantação de uma usina maremotriz abaixo da ponte Hercílio Luz.

Algumas das informações fornecidas pelo DEINFRA-SC foram reanalisadas e recalculadas para adequá-las ao estudo de caso proposto.

.....

*Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013*

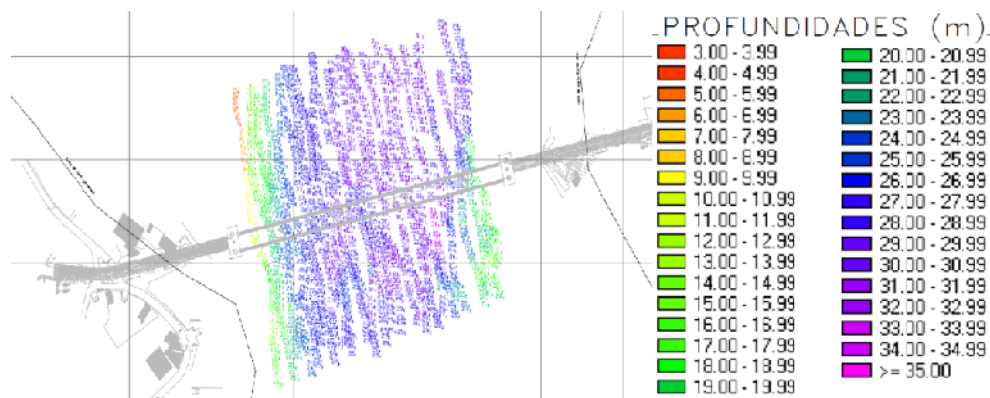


### 2.1.1 Batimetria

Neste caso, a técnica foi utilizada para medir a profundidade do estreitamento entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina, local onde estão localizadas as pontes de acesso à ilha, possibilitando indicar quais os locais apresentam maior e menor profundidade.

O levantamento batimétrico realizado em 26 de março de 2010 apontou que o canal possui profundidade superior a 35 metros, em alguns pontos, conforme ilustrado na Figura . (DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA- SC, 2012). Adicionalmente, a largura entre as margens é de aproximadamente 400 m, como pode ser verificado junto ao DEINFRA de Santa Catarina.

Figura 2: Batimetria do estreitamento entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina e sua respectiva profundidade.



Fonte: Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA-SC), 2012.



---

### 2.1.2 Fluxo de corrente de marés

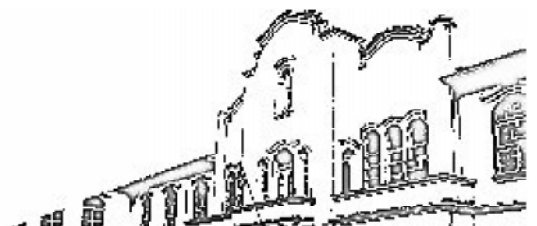
Os fluxos de correntes de marés presentes no estreitamento entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina variam de acordo com os ciclos de marés, alcançando, no local analisado, velocidades na ordem de 1 m/s, a uma profundidade aproximada de 21 metros, a partir do fundo do canal (DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA -SC, 2012).

Os fluxos de corrente de marés no estreitamento entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina Figura 2-3 são bidirecionais e, desta forma, a extração de energia elétrica poderá ser realizada com geradores maremotrizes que possuam características de geração também bidirecionais, para que os potenciais energéticos dos fluxos de correntes da região sejam explorados em ambos os sentidos, sendo, portanto, maximizados.

Figura 3: Estreito entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina.



Fonte: Disponível em [www.google.com.br](http://www.google.com.br). Acesso em: 11 Ago, 2012.



.....

## 2. DADOS DAS PONTES QUE INTERLIGAM A ILHA DE SANTA CATARINA AO CONTINENTE

### 2.1 Informações sobre a ponte Hercílio Luz

A ponte Hercílio Luz possui uma extensão entre suas cabeceiras de 821,005 metros de comprimento e existem, sobre a ponte, 426 pontos de iluminação fixados em sua estrutura. (EDITAL PÚBLICO Nº 007/00, 2000).

Quadro 1: Ponte Hercílio Luz, Quadro de Carga por Tipo e Potência de Lâmpada.

Lâmpada (Tipo/Potência)	Potência Unitária Lâmpada + Reator (*) (W)	Quantidade	Potência Total (KW)
Lâmpada Vapor Mercúrio de 80 W	89	334	29.726
Lâmpada Vapor de Sódio 400 W	440	80	35.200
Lâmpada Vapores Metálicos 400 W	440	12	5.280
Potência Total do Sistema (W)			70.206

(\*) Valores médios de perdas em reatores, de referência, com base em informações de vários fabricantes,

Fonte: PROCEL, 2012.





.....

### 2.1.1 Informações sobre a ponte Pedro Ivo Campos e Colombo Machado Salles

A ponte Pedro Ivo Campos possui uma extensão de 1252 metros, comportando um total de 511 pontos de iluminação conforme resume o quadro 1. Já a ponte Colombo Machado Salles possui uma extensão de 1257 metros, comportando um total de 543 pontos de iluminação, conforme exposto no quadro 2.

Quadro 2: Ponte Pedro Ivo Campos. Quadro de Carga por Tipo e Potência de Lâmpada.

Lâmpada (Tipo/Pot)	Potência Unitária Lâmpada + Reator (*) (W)	Quantidade	Potência Total (KW)
W Lâmpada Vapor de Sódio 70	85	310	26,350
W Lâmpada Vapor de Sódio 250	275	102	28,050
W Lâmpada Vapor Metálico 400	440	99	43,560
Potência Total do Sistema (W)			97,960

(\*) Valores médios de perdas em reatores, de referência, com base em informações de vários fabricantes.

Fonte: Programa Nacional De Conservação De Energia Elétrica - PROCEL, 2012.



.....

Quadro 3: Ponte Colombo Machado Salles, Quadro de Carga por Tipo e Potência de Lâmpada.

Lâmpada (Tipo/Pot)	Potência Unitária Lâmpada + Reator (*) (W)	Quantidade	Potência Total (KW)
Lâmpada Vapor de Sódio 70 W	85	340	28,900
Lâmpada Vapor de Sódio 250 W	275	104	28,600
Lâmpada Vapor Metálico de 400 W	440	99	43,560
Potência Total do Sistema (W)			101,060

(\*) Valores médios de perdas em reatores, de referência, com base em informações de vários fabricantes.

Fonte: Programa Nacional De Conservação De Energia Elétrica - PROCEL, 2012.

### 3. PROPOSTA DE PROJETO

Os dados utilizados na reforma da ponte Hercílio Luz, coletados pelo órgão público DEINFRA-SC, serão reanalisados no estudo de caso proposto neste trabalho, através de novos cálculos que visam verificar se existe a possibilidade, hipotética, da implantação de uma usina maremotriz no canal que separa a ilha de Santa Catarina do continente. Este estudo tem como objetivo verificar a viabilidade técnica e econômica para a, hipotética, implantação de uma usina maremotriz, fixada no centro do canal entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina. Esta usina irá converter o potencial energético cinético proveniente dos fluxos de correntes de marés existentes no local, em energia elétrica. A princípio a energia gerada será destinada para o suprimento hipotético da ponte Hercílio Luz e, havendo geração excedente, também suprirá as pontes Colombo Machado Salles e Pedro Ivo Campos.

.....

*Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013*



---

## 4. GERAÇÃO MAREMOTRIZ

A geração maremotriz consiste da técnica de converter, através de equipamentos adequados, a energia potencial e/ou cinética existente nas oscilações oceânicas, em energia elétrica.

### 4.1 Princípio de operação de um gerador maremotriz

#### 4.1.1 Teorema de Betz e cálculo de potência.

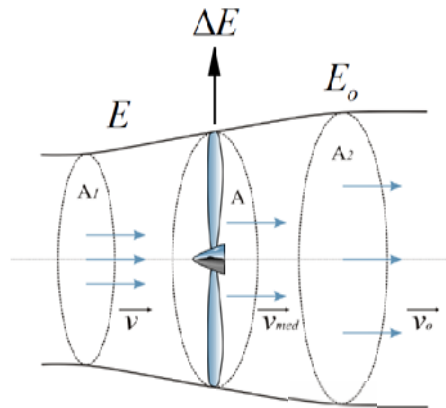
Segundo o teorema de Betz, a energia cinética contida em uma determinada massa ( $m$ ) de ar, propagada no espaço com uma certa velocidade ( $v$ ), faz com que as componentes vetoriais do ar tendam a sofrer alterações ao atravessar um obstáculo, transformando, assim, tal energia cinética em trabalho sob o obstáculo; o restante da energia contida na massa de ar, após ter atravessado o obstáculo, continua sua trajetória normalmente, porém, com velocidade final ( $v_0$ ) diferente da velocidade inicial ( $v$ ), conforme ilustra a Figura (TIBOLA, 2009, p.37).

Embora o teorema de Betz tenha sido criado para estudar sistemas impulsionados por fluxos de massas de ar, o mesmo também pode ser aplicado a sistemas que se encontram imerso em meios líquidos (água).



.....

Figura 4: modelo teórico de Betz transformação de energia.



Fonte: Tibola, 2009: adaptado de Tibola, 2009.

Sendo assim, a energia ( $E$ ) pode ser expressa como  $E = E_0 + \Delta E$  onde,  $E$  é a energia cinética inicial da massa de água em movimento,  $E_0$  corresponde a energia cinética restante após o obstáculo e  $\Delta E$  é a parcela da massa de água que realiza trabalho no obstáculo.

A energia cinética contida em uma massa de água pode ser obtida através da equação  $E = \frac{1}{2} m v^2$ , cuja unidade é expressa em joule [J].

A variação de energia ( $\Delta E$ ) dos fluxos de correntes de marés que atravessam um determinado sistema “pode ser vista como sendo a energia cinética convertida em energia mecânica nas pás da turbina” (TIBOLA, 2009, p.38). Que após manipulação matemática, resulta em  $\Delta E = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2)$  onde  $v$  é a velocidade do fluxo de corrente de maré antes das pás e  $v_0$  é a velocidade do fluxo de corrente de maré após as pás em [m/s].

Para obter a potência em Watts [W] de um determinado sistema, basta aplicar a equação  $P = \frac{1}{2} m \left[ \frac{(v^2 - v_0^2)}{t} \right]$  onde  $t$  é o tempo em segundos.

Sendo a velocidade do fluxo de corrente de marés, diferentes antes e depois do contato com as pás da turbina, por simplificação, considera-se, para os cálculos a velocidade média do fluido, calculado a partir de  $v_{med} = \frac{(v+v_0)}{2}$  (TIBOLA, 2009, p.39).

.....



.....

Sabendo-se que o coeficiente de potência ( $C_p$ ) é definido pela equação  $C_p = \left[ \frac{(1+\frac{v_0}{v}) \cdot (1-(\frac{v_0}{v})^2)}{2} \right]$  que corresponde à fração da potência extraída do fluxo de corrente de marés e convertida em potência mecânica no eixo da turbina através da equação  $P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$ .

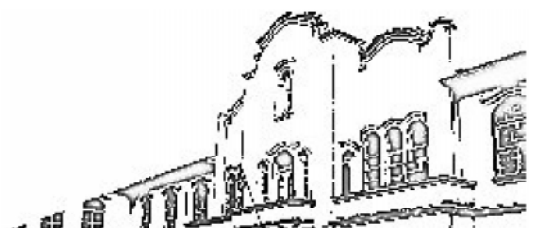
Observando-se a equação descrita acima nota-se que a potência está diretamente relacionada à densidade relativa ( $\rho$ ) do fluido, à área ( $A$ ) varrida pelas pás da turbina de marés, ao coeficiente de potência ( $C_p$ ) e à velocidade do fluido ( $v$ ).

Fazendo uma análise individual do coeficiente de potência ( $C_p$ ), é possível obter seu valor máximo que corresponde a aproximadamente 0,592 conforme o procedimento apresentado em (TIBOLA, 2009).

Depois de Encontrado o  $C_{p_{max}}$ , busca-se obter o valor teórico da máxima potência, cabe lembrar que  $C_{p_{max}}$  é o limite teórico do coeficiente de potência, sendo assim, nenhuma máquina, por mais sofisticada que seja, conseguirá superar este percentual de conversão. (TIBOLA, 2009, p.42). Para as condições reais, os valores práticos de  $C_p$  encontram-se entre 0,35 e 0,5. (BEN ELGHALI; BENBOUZID; CHARPENTIER, 2007).

Substituindo  $C_{p_{max}}$  na equação  $P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$  obtém-se o valor da potência máxima teórica que pode ser gerada por uma máquina maremotriz.

Com as deduções matemáticas descritas acima, tona-se possível calcular a energia consumida pelas pontes em estudo e verificar o montante de energia elétrica que pode ser extraído do fluxo de corrente de marés existente no estreitamento que separa a ilha de Santa Catarina do continente. De antemão, contudo, será abordado um sistema similar, colocado em operação na Irlanda do Norte.



.....

#### 4.1.2. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA *SEAGEN*

A usina maremotriz *SeaGen* é composta por duas unidades geradoras, as quais tem capacidade para gerar até 800 KW cada, o que corresponde a cerca de 1,6 MW de potência instalada combinada. Seus módulos possuem rotores com 16 metros de diâmetro, podendo pesar cerca de 27 toneladas cada e suas pás fazem uma varredura de 201m<sup>2</sup> por turbina, totalizando cerca de 402m<sup>2</sup> de área explorada (varrida) pelos dois rotores. Tais rotores são fixados um em cada ponta de uma viga ortogonal a um pilar de sustentação central, tal configuração compõe uma estrutura única, deixando o sistema mais compacto, com massa total equivalente a 900 toneladas, quando fora d'água.

O sistema *SeaGen* possui geradores com características bidirecionais e pás hidrocínéticas que podem ser ajustadas em ângulos 0° a 180° para otimizar a extração de energia elétrica proveniente dos fluxos de correntes de marés. Como as pás dos rotores possuem características ajustáveis, as turbinas são capazes de operar em qualquer que seja a direção do fluxo de corrente de maré, permitindo que a geração de eletricidade aconteça em um período entre 20 e 24h por dia, dependendo das condições de marés. Assim, enquanto a velocidade do fluido for superior a 0,7m/s, a usina estará produzindo energia elétrica, independente do sentido em que o fluxo de corrente de marés se encontra. Este tipo de sistemas é adequado para ambientes marinhos com até 38 metros de profundidade, sendo sua potência nominal alcançada em fluxos de correntes de marés superiores a 2,5 m/s.

#### 4.1.3. Avaliação Da Instalação Hipotética De Um Sistema Maremotriz No Canal Entre Ilha e Continente

O intuito deste capítulo consiste em verificar se há recurso energético disponível suficiente para a geração de energia elétrica através de um sistema maremotriz no canal

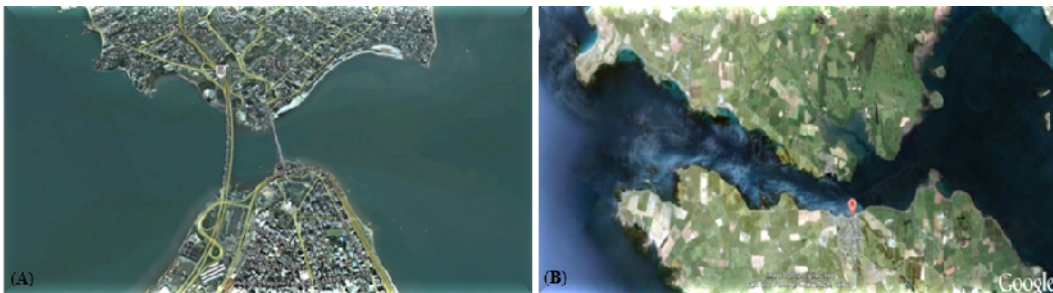
.....



.....

que separa a ilha de Santa Catarina do Continente. Conforme mencionado anteriormente, a proposta de tal análise surgiu devido a semelhança física entre o canal a ser analisado, Figura 5, e o presente na Irlanda do Norte, a qual possui uma baía natural com cerca de 30 Km de extensão e abrange uma área de aproximadamente 150 Km<sup>2</sup>, com, profundidade de até 30m, em alguns pontos, e fluxos de correntes de marés que podem alcançar cerca de 4m/s (RIO+20, 2012).

Figura 5: (A) Estreito entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina. (B) *Strangford Lough* Irlanda do Norte.



Fonte: Disponível em <https://maps.google.com.br/>. Acesso em: 14 out, 2012.

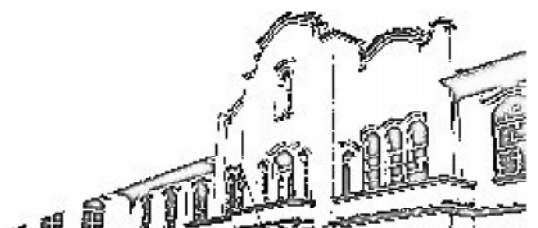
#### 4.1.4 CÁLCULO DO $C_p$ PARA O SISTEMA SEAGEN

Para avaliar a real potência disponível no canal sobre estudo, é necessário encontrar o valor do coeficiente de potência da turbina a ser implantada. Para tanto, isola-se  $C_p$  em  $P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$ .

Sabendo-se que, em condições nominais a turbina opera a 2,5m/s, gerando 800 KW, e que o raio de suas pás é de 8 m, é possível determinar o valor numérico de  $C_p$ . Neste cálculo, a densidade do fluido será adotada como sendo 1025 Kg/m<sup>3</sup>, já que este é o valor da densidade encontrado nas mares de Florianópolis. A partir destas considerações, obtém-se um valor de  $C_p$  igual a 0,497. Uma vez encontrado o valor do coeficiente de potência, cabe agora aplicar estes mesmos cálculos para avaliar qual o comportamento

.....

*Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013*



.....

das turbinas de marés, quando submetidas às condições naturais disponibilizada pelo estreitamento entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina. Substituindo o valor de coeficiente de potência na equação  $P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$ , obtém-se o valor da potência máxima  $P_{max}$ , para cada uma das turbinas nas condições locais. Sabendo-se que o fluxo médio de corrente de marés no canal é de 1m/s tem-se que  $P_{max} = 51,21 \text{ KW}$ .

Vale lembrar que a usina possui duas turbinas de marés em sua estrutura, sendo assim, deve-se multiplicar este resultado por dois, logo a potência máxima total do sistema equivale a 102,42KW.

Tomando como base os cálculos realizados, e a análise efetuada nas tabelas 2-2, 2-3 e 2-4, foi constatado que a potência consumida pelas pontes é aproximadamente duas vezes e meia, maior do que a potência gerada pelas turbinas maremotrizes. Portanto, somente uma das unidades consumidoras poderia, hipoteticamente, ser abastecida pela usina maremotriz *SeaGen*.

## **5. Custo e consumo de energia elétrica nas pontes hercílio luz, pedro ivo campos e colombo machado salles**

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) o relatório homologatório N° 1.183 de 2 de agosto de 2011, a tarifa de energia elétrica para a iluminação pública, na modalidade B4-b (entregue no bulbo da lâmpada), foi estabelecida em 176,75 R\$/MWh.





.....

### 5.1 Custo da energia elétrica consumida pela ponte Hercílio Luz

Sabendo-se que o custo da iluminação pública equivale 176,75 R\$/MWh e que a ponte Hercílio Luz consome cerca de 70,206 KW, durante aproximadamente 12 horas, é possível demonstrar qual o gasto provocado pela iluminação da ponte. Sendo assim, verifica-se que o consumo diário de energia elétrica pode alcançar 0,8425MWh/dia o que equivale a um custo anual de R\$ 53.608,28

Conforme já comentado, a vida útil das turbinas maremotrizes abordadas neste trabalho é de um pouco mais de vinte anos. Logo, o consumo, ou o custo, da ponte é de R\$ 1.072.165,50. O que corresponde a cerca de 3,4% do investimento total de uma usina maremotriz *SeaGen*.

### 5.2 Custo da energia elétrica consumida pelas pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Machado Salles

A mesma análise pode ser abordada para a ponte Pedro Ivo Campos, considerando que esta consome cerca de 97,960 KW de potência e que o consumo diário de energia elétrica é de 1,17MWh/dia, o valor gasto anualmente com o consumo de energia elétrica para suprir a iluminação da ponte é de R\$ 74.797,065/ano, em vinte anos o custo seria de R\$ 1.495.941,30. O que equivale a cerca de 4.7% do investimento total de uma usina maremotriz *SeaGen*.

Fazendo a mesma análise para a ponte Colombo Machado Salles, a qual consome cerca de 101,060 KW de potência, encontram-se um consumo energético por dia de 1,21 MWh/dia e com isto, o custo anual é de R\$ 77.163,75/ano, desta forma, em vinte anos, o custo será de R\$ 1.543.274,95, valor este que corresponde a cerca de 4,9% do investimento total da usina maremotriz em estudo.



.....

Por fim, quando somado os custos do consumo de energia elétrica de cada uma das pontes, dentro de um período de vinte anos, obtém-se o valor total de R\$ 4.111.381,75. O valor encontrado equivale a, aproximadamente, 13,07% do investimento da usina maremotriz proposta.

Portanto, é possível afirmar que para a atualidade a instalação do sistema maremotriz não é economicamente viável, haja vista que o investimento a ser feito na instalação não retorna ao longo da vida útil do sistema. Mesmo que a energia gerada fosse suficiente para manter as três pontes simultaneamente a discrepância entre o montante investido e o retorno, dificilmente seria amenizado, já que apenas 13,07% do capital investido retornaria sob a forma de redução do consumo de energia elétrica. Cabe ressaltar que, nesta abordagem, a inflação sobre o custo do MWh de energia elétrica, ao longo da vida útil da usina maremotriz, não foi considerada.

### 3 SIMULAÇÕES

Através de simulações feitas no programa *MATLAB R2009b*, buscou-se analisar, mediante um perfil senoidal de velocidade de marés, qual seria a potência gerada pelas turbinas *SeaGen*, em um período de duzentas e quarenta horas, quando submetida às condições nominal de velocidade de marés e às condições reais do canal em estudo. Estes dois perfis apresentados serão analisados de forma individual no decorrer das simulações.

A potência extraída da turbina maremotriz está diretamente relacionada com a velocidade de pico de marés ( $V_p$ ). Sabendo-se que instantaneamente, a potência é dada por  $p(v) = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3$  e considerando a velocidade da maré variando senoidalmente, conforme  $v = V_p \text{sen}\theta$ , então é possível, a partir de  $p(v) = \frac{1}{2} \rho A C_p V_p^3 \text{sen}^3\theta$  determinar o valor médio da potência gerada pela turbina, sendo assim temos que,  $P_{med} =$

.....



.....

$\frac{1}{2} \rho A C_p V_p^3 \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta$ . Ressalta-se que pelo fato de a turbina ser bidirecional, a mesma enxerga a velocidade da maré de forma unidirecional.

Isolando-se o valor de pico referente à velocidade da maré, determina-se  $V_p = \sqrt[3]{\frac{2\pi P_{med}}{\rho A C_p \int_0^\pi \sin^3 \theta}}$ , cuja solução resulta em  $V_p = \sqrt[3]{\frac{3\pi P_{med}}{2\rho A C_p}}$ , onde,  $p(v)$  é a potência instantânea e  $V_p$  corresponde a velocidade de pico.

A velocidade de pico  $V_p$  representa o pico de uma função senoidal que resulta no valor médio de potência  $P_{med}$  desejado.

Na condição nominal do sistema, a velocidade de pico de maré é de aproximadamente  $V_p = 3.33 \text{ m/s}$ . Nesta condição a potência média gerada por cada turbina deve ser de 800 KW. Adicionalmente, para a condição real do canal estudado, a velocidade de pico é de aproximadamente  $V_p = 1.33 \text{ m/s}$ , resultando em 51, 21 KW.

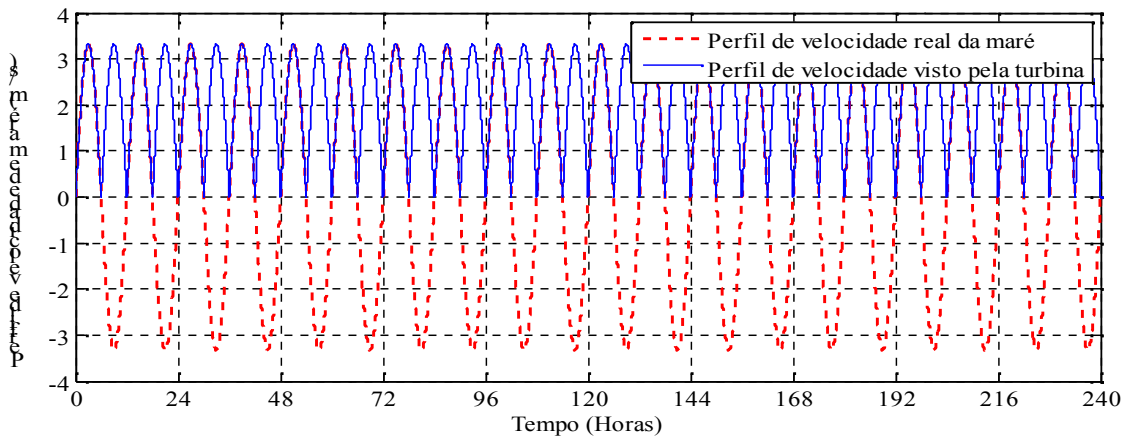
As primeiras simulações foram realizadas adotando o perfil de velocidade nominal da turbina, durante um período de duzentas e quarenta horas.

A partir destas observações nota-se que durante um período de vinte quatro horas, ocorrem quatro ciclos de marés, o que equivale a dois períodos de picos de velocidade máximos e dois de mínimos, as quais são equivalentes a  $V_p = 3,336 \text{ m/s}$ , tal como representado no Gráfico 2.

Cabe frisar que quando analisado o perfil de velocidade de marés do ponto de vista das turbinas, as mesmas, por possuírem características bidirecionais, retificam a velocidade de marés que as atravessam, isto é, as turbinas interpretam os máximos e mínimos de marés como sendo o módulo da velocidade, gerando a máxima potência independentemente do sentido da maré.



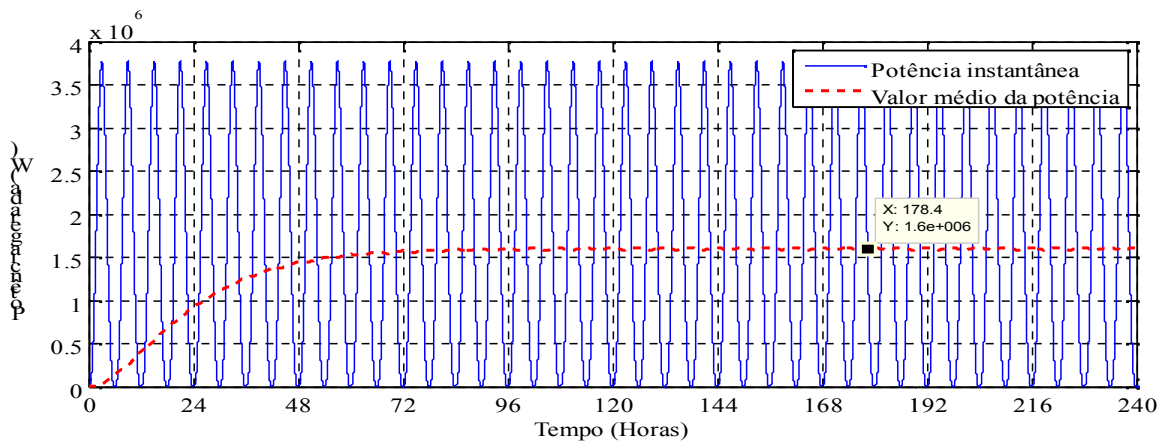
Gráfico 2: Perfil de velocidade de marés para potência nominal.



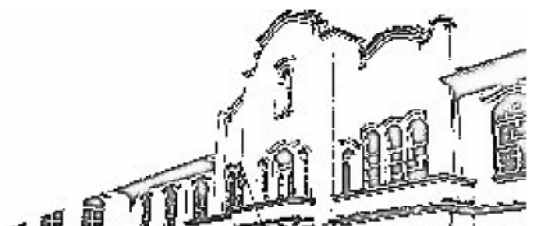
Fonte:Elaboração dos autores, 2012.

No gráfico 3 é possível observar que a potência instantânea gerada pelo perfil de velocidade adotado apresenta oscilações que vão de zero a um valor máximo, dependendo a intensidade instantânea da velocidade da maré, contudo a potência média gerada pelas turbinas durante um período de duzentas e quarenta horas, após o regime transitório, é de 1600 KW.

Gráfico 3: Potência gerada pelo perfil de maré na condição nominal.



Fonte:Elaboração dos autores, 2012.

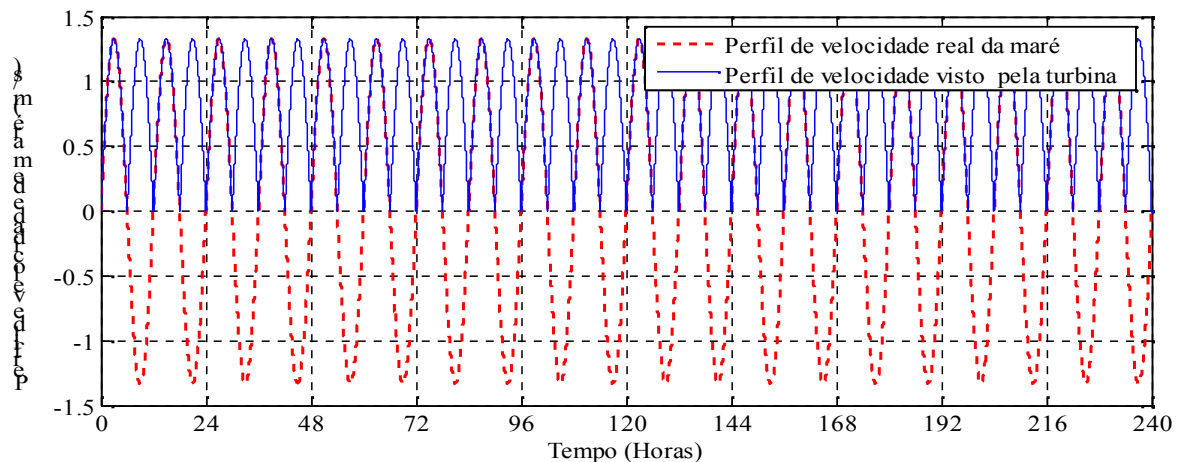


Após analisado o perfil para a condição de operação nominal do sistema, serão abordadas, de forma análoga, as simulações para o perfil de velocidade de marés na condição de operação do canal que separa a ilha de Santa Catarina do continente.

A partir do Gráfico 4 observa-se que no perfil de velocidade real de marés, no canal analisado, durante os ciclos de marés, as velocidades de pico de máximo e mínimo são de aproximadamente  $V_p = 1,331m/s$ . Novamente, os perfis de velocidade de marés do ponto de vista das turbinas são retificados, otimizando o processo de extração de energia elétrica do local.

Através do Gráfico 5 é possível observar que a potência instantânea gerada apresenta oscilações que vão de zero ao valor máximo, porém, nas condições reais do canal analisado, a potência média gerada pelas turbinas de marés durante um período de duzentas e quarenta horas é de, aproximadamente, 102 KW.

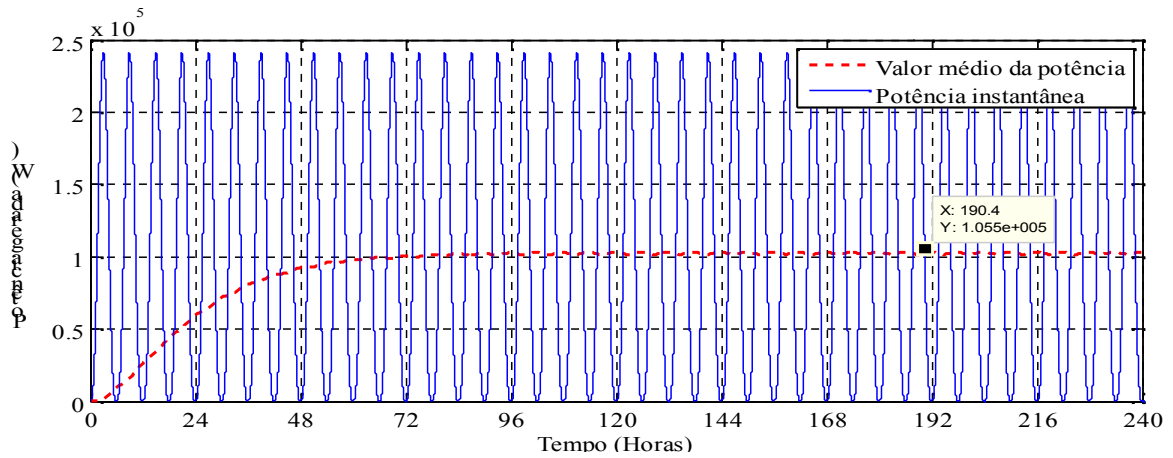
Gráfico 4: Perfil de velocidade de maré para a condição de operação no local estudado.



Fonte: Elaboração dos autores, 2012.



Gráfico 5: Potência gerada pelo perfil de maré na condição do local analisado.



Fonte: Elaboração dos autores, 2012.

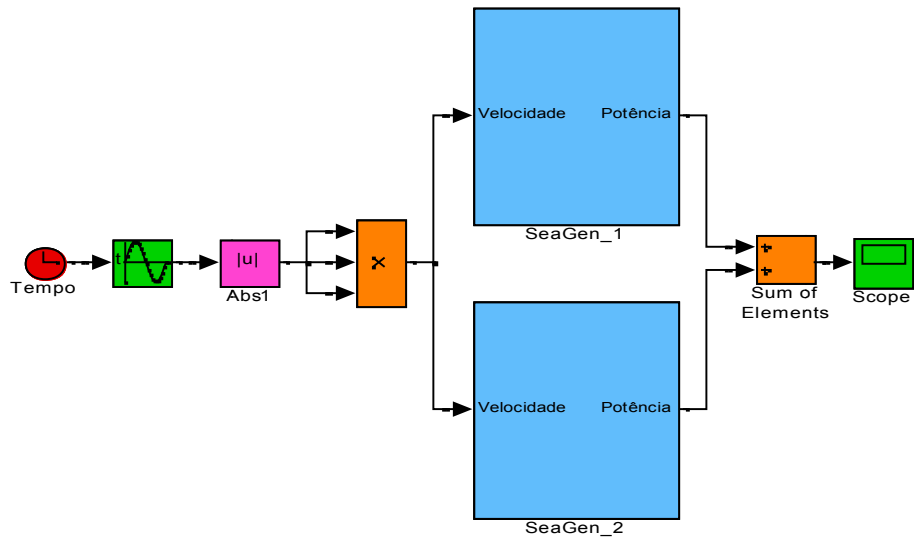
Para realizar as simulações foram criados diagramas de blocos que representam o sistema maremotriz *SeaGen* em operação.

A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos que representa o sistema maremotriz em todo os estágios de operação, desde sua entrada com as velocidades de marés, passando pelas turbinas *SeaGen* até a potência gerada, na saída. Já a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é a versão explodida do blocos que representam as turbinas *SeaGen* 1 e 2. O diagrama ilustra o funcionamento das turbinas para qualquer condição de entrada prevista.



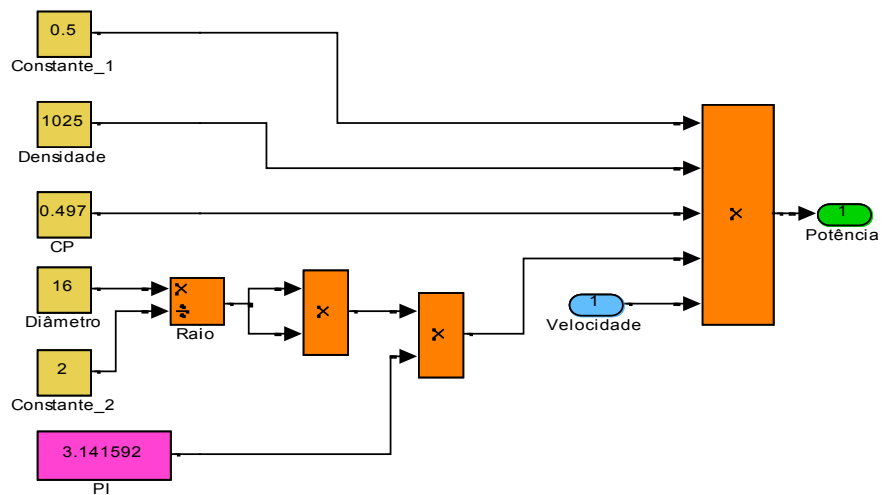
.....

Figura 5: Diagrama de blocos usina maremotriz *SeaGen*.

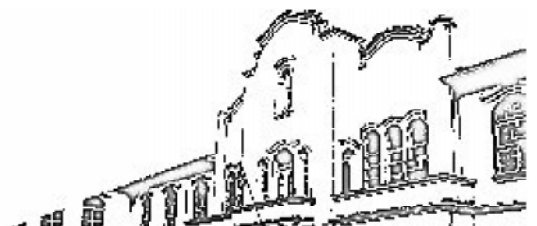


Fonte:Elaboração dos autores, 2012.

Figura 3-2: Diagrama de blocos geradores *SeaGen*.



Fonte:Elaboração dos autores, 2012.



---

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados alguns levantamentos técnicos referentes às condições físicas do estreito entre as baías norte e sul da ilha de Santa Catarina com o intuito de verificar se o local apresenta condições adequadas de suplantar uma usina maremotriz com características ideais, que sustentasse a energia consumida pelas pontes Hercílio Luz, Pedro Ivo Campos e Colombo Machado Salles, no período em que as mesmas estivessem consumindo energia elétrica. Caso o sistema estudado fosse técnica e economicamente viável, o mesmo substituiria o fornecimento de energia convencional das referidas pontes, total ou parcialmente, pelo abastecimento de energia elétrica proveniente do fluxo de correntes de marés existentes no local, extraída através do emprego de turbinas de marés *SeaGen*.

A partir dos cálculos desenvolvidos no decorrer desta pesquisa, foi constatado que o fornecimento de energia elétrica proveniente de um fluxo de corrente de marés a uma velocidade média de 1m/s, velocidade esta existente no local analisado, não é o suficiente para gerar energia elétrica para suprir a demanda energética consumida pelas três pontes simultaneamente. Tal conclusão decorre do fato de que o somatório das potências consumidas é de aproximadamente 269,226 KW e a gerada é de 102,42 KW, ou seja, a potência consumida pelas pontes é cerca de três vezes maior que o montante gerado pelas turbinas, nas condições do local. Contudo, quando analisado o consumo energético individual de cada uma das pontes, torna-se evidente que, a partir da potência média gerada, é possível abastecer uma unidade consumidora completamente e outra parcialmente.

Quando analisado o impacto ambiental provocado por uma usina maremotriz *SeaGen*, constata-se que é extremamente baixo e não possui caráter irreversível, isto porque a área de funcionamento da usina é pequena e não depende de outras estruturas fisi-





.....

cas além de suas próprias hélices, para auxiliar na captação dos fluxos de correntes de marés. Além disso, o fato de que o sistema maremotriz estudado possui turbinas hidrocinéticas, permite que o fluxo de correntes de marés passe pelas hélices dos geradores sem sofrer intervenções que altere seu ciclo natural. À priori, a baixa rotação das turbinas *SeaGen*, com aproximadamente 14 rpm, não oferece perigo aos animais marinhos que habitam as regiões onde estão localizados, haja vista o fato de animais que vivem em locais com alto fluxo de corrente serem extremamente ágeis.

Apesar das vantagens relacionadas à geração de energia elétrica extraída de fontes renováveis, como é o caso das usinas maremotrizes, mesmo com o recente desenvolvimento da tecnologia, conclui-se que no momento a alocação de unidades geradoras no canal entre a ilha de Santa Catarina e o continente é dificultada principalmente pelo elevado custo, diretamente atrelado aos equipamentos que compõem a usina. Porém, espera-se que com o amadurecimento da tecnologia, os custos venham a se reduzir, possibilitando a viabilidade econômica da solução apresentada, uma vez que a viabilidade técnica mostrou-se pertinente. Visto que a ilha de Santa Catarina possui três estreitos, onde um destes foi realizado o presente estudo, fica como sugestão para novos trabalhos, levantar e avaliar as características técnicas destes outros dois locais com o intuito de implantar o sistema maremotriz apresentado.



---

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, **Resolução homologatória N° 1.183 de 2 de agosto 2011**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh20111183.pdf>>. Acesso em: 28 jun, 2012.

\_\_\_\_\_. Algumas informações técnicas contidas neste trabalho foram disponibilizadas pelo DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA - DEINFRA através de entrevistas realizadas junto ao Engenheiro fiscal Wenceslau Jeronimo Diotallevy.

BEN ELGHALI, S. E; BENBOUZID, M. E. H; CHARPENTIER, J. F: **Marine tidal current power generation technology: State of art and current status**. IEEE, Vol. 1, pp. 1407-1412, 2007.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA - DEINFRA-SC. Disponível em:<[http://www.deinfra.sc.gov.br/jsp/informacoes\\_sociedade/ponte\\_HercilioLuz.jsp](http://www.deinfra.sc.gov.br/jsp/informacoes_sociedade/ponte_HercilioLuz.jsp)> Acesso em: 07 jun, 2012.

\_\_\_\_\_. Edital público N° 007/00 licitação. Fornecimento de materiais e mão de obra, para execução do novo sistema de iluminação de realce da ponte Hercílio Luz, no municipal de Florianópolis, 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Aumenta a participação das renováveis na matriz elétrica brasileira. **Informe à imprensa: Resultados preliminares – BEM 2012**, Rio de Janeiro, n.. p.1-4, 11 jun. 2012. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120611\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20120611_1.pdf)>. Acesso em: 09 ago, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Balanço energético anual. **Resultados preliminares, ano base 2011**, Rio de Janeiro, n.. p.8-53, 2012. Disponível em:<[https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados\\_Pre\\_BEN\\_2012.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf)>. Acesso em: 09 ago, 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2011**. France, 2011. Disponível em: <[http://www.iea.org/media/weowebiste/2011/es\\_portuguese.pdf](http://www.iea.org/media/weowebiste/2011/es_portuguese.pdf)>. Acesso em: 08 ago, 2012.

---

*Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013*



.....  
INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS - IEAv. Disponível em: <<http://www.ieav.cta.br/enu/yuji/perspectiva.php>>. Acesso em: 15 jul, 2012.

*MARINE CURRENT TURBINE*. Disponível em: <<http://www.marineturbines.com>> Acesso em: 10 ago, 2012.

MAPS.GOOGLE. Disponível em <<https://maps.google.com.br/>>. Acesso em: 14 julho, 2012.

TIBOLA, G.; **Sistema eólico de pequeno porte para a geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2008. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

.....  
*Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013*

