

# OPERAÇÃO ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA BASEADA EM CORRENTES DE MARÉ CONSIDERANDO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

JEFFERSON D. F. PEREIRA<sup>1</sup>, PEDRO B. L. NETO<sup>1</sup>, OSVALDO R. SAAVEDRA<sup>1</sup>, AUDÁLIO R. TORRES<sup>2</sup>, FRANCISCO J. S. DIAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Energia Elétrica - IEE, <sup>2</sup>Instituto de Ciências do Mar – ICMar – Universidade Federal do Maranhão  
Avenida dos Portugueses, 1966 – São Luís – MA

E-mails: ferreira.diogo@outlook.com, pedroblneto@gmail.com, saavedra@ieee.org, audalio.torres@gmail.com, geofranzedias@gmail.com

**Abstract** - In this paper the case of a large energy consumer with limited capacity of self-production of energy based on tidal currents is addressed. The problem is to minimize the costs of purchasing electricity, identifying the optimal dispatch strategy including storage system. The best strategy of operation is to avoid buying expensive power from the grid by shifting the supply of tidal power using the available storage system. To solve the problem, a new strategy based on evolutionary programming is proposed. The proposal is validated using real data of tidal current measurements obtained from Baía de São Marcos, Maranhão, Brazil.

**Keywords** - Tidal energy, power dispatch, storage systems, renewable energies.

**Resumo** - Neste artigo é abordada a situação de um grande consumidor de energia com capacidade limitada de autoprodução de energia baseada em correntes de maré. O problema consiste em minimizar os custos com compra de energia elétrica, identificando a estratégia ótima de despacho incluindo sistema de armazenamento. A melhor estratégia de operação é evitar comprar energia cara da rede, deslocando a oferta de energia maremotriz usando o sistema de armazenamento disponível. Para resolver o problema, uma nova estratégia baseada na programação evolutiva é proposta. A proposta é validada utilizando dados reais de medições de corrente de maré obtidas na Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil.

**Palavras-chave** - Energias das marés, despacho de potência, sistemas de armazenamento, energias renováveis.

## 1. Introdução

Recentes trabalhos destacam América Latina, e em especial o Brasil, como regiões ricas em variedade de fontes renováveis (Vargas, Saavedra, Samper, Rivera, & Rodriguez, 2016), as quais começam a serem desenvolvidas com impactos crescentes nas respectivas matrizes energéticas. Em um foco regional, as energias de marés apresentam importante potencial energético no Norte do Brasil e no litoral sul da Argentina e Chile. Iniciativas concretas são relatadas na literatura recente, onde pode-se destacar os estudos de levantamento de potencial no sul do Chile (E&A Errazuriz & Associados, 2013), um projeto piloto de energia de ondas em Ceará (Garcia-Rosa, Cunha, Lizarralde, Estefen, Machado, & Watanabe, 2014), um estudo na região de Turiaçu para mapeamento e avaliação de potencial maremotriz para pequenos empreendimentos (Oliveira, Leite Neto, Costa Júnior, Camelo, Saavedra, & Santos, 2009), estudos para implantação de uma usina maremotriz no Maranhão (Bezerra, Saavedra, & Ribeiro, 2017) e a aprovação do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF) pelo CNPq e co-financiadores, em 2016.

Os tipos de energias oceânicas exploráveis têm sido revisados em vários artigos nos últimos anos, existindo projetos em funcionamento na Europa assim como protótipos em escala pré-comercial para o caso

específico de correntes de maré (Bezerra, Saavedra, & Ribeiro, 2017).

A geração de energia através do gradiente de marés é a forma de extração da energia oceânica que apresenta tecnologia mais madura para a sua utilização em escala comercial. Este conceito utiliza tecnologias semelhantes às utilizadas em hidroelétricas convencionais. A usina maremotriz de La Rance (240 MW) e a usina maremotriz de Sihwa – Coreia do Sul são exemplos da utilização comercial em grande escala dessa forma de geração de energia.

As correntes de marés são resultantes da movimentação horizontal das massas de água durante o processo de variação das marés. As tecnologias utilizadas na exploração das correntes de marés ainda se encontram em um estágio tecnológico anterior à geração por gradiente de marés e diferentes conceitos tecnológicos têm sido discutidos (Technical Support Unit Working Group III, 2012). Por outro lado, este conceito de geração tem se demonstrado uma das formas mais promissoras para a exploração das energias oceânicas.

O maior centro de teste de turbinas de correntes de maré é o EMEC, localizado nas Ilhas *Orkney* (Escócia). Os protótipos de maior destaque implementados e testados são *SeaFlow* e *SeaGen*, ambos desenvolvidos pela *Marine Current Turbines Ltd.* (MCT). Considerado o primeiro protótipo de correntes de maré, a turbina *SeaFlow* com capacidade de 300 kW

foi instalada em 2003 na costa de Devon, Inglaterra. Ela era constituída por um rotor de 11 metros de diâmetro e foi instalada a 1,1 km da costa a uma profundidade de 25 metros (FRAENKEL, 2006).

A sucessora da turbina *SeaFlow* foi a *SeaGen*, quatro vezes mais poderosa com um rotor de 16 metros e capacidade de 1,2 MW. O primeiro protótipo foi instalado na costa da Irlanda do Norte em julho de 2008.

Além da possibilidade de exploração das correntes de marés, é possível a obtenção de energia a partir das correntes oceânicas. Ao contrário das correntes de marés, as correntes oceânicas acontecem em mar aberto, são unidirecionais e com variações sazonais. Além disso, as correntes oceânicas tendem a ser mais contínuas, entretanto, a uma velocidade menor (cerca de 2 m/s). Utilizando-se a tecnologia atual para a exploração da energia oceânica, já é possível estimar um potencial técnico para diferentes locais do planeta.

A conversão da energia térmica do oceano (OTEC) é resultante das diferenças de temperatura entre a energia solar armazenada na forma de calor na superfície oceânica e as baixas temperaturas das águas nas regiões mais profundas do oceano (tipicamente, 1000 m de profundidade). Em seu estágio tecnológico atual, é necessária uma diferença de temperatura da ordem de 20 °C para operar uma usina OTEC. Portanto, de acordo com a tecnologia atual, alguns locais tais como a costa da África e da Índia, e as costas tropicais da América possuem condições adequadas para este tipo de geração energética.

O gradiente de salinidade é resultado das diferenças de salinidade entre a água doce e a água do mar, portanto, é possível explorar esta fonte energética na foz de rios, onde a água doce do rio se encontra com a água salgada do mar. Basicamente existem duas formas de tecnologias em desenvolvimento para a exploração desta fonte energética: Osmose Retardada por Pressão e Eletrodialise Reversa. Ambas as tecnologias se encontram em desenvolvimento (Technical Support Unit Working Group III, 2012) (Huckerby, 2011).

Com exceção da geração através de gradiente de marés, que já apresenta uma tecnologia madura, as tecnologias associadas às demais fontes energéticas dos oceanos ainda se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento, desde o estágio conceitual até a criação de protótipos em grande escala. Além disso, para cada uma dessas fontes energéticas existem diversas opções tecnológicas, sendo que ainda não há uma convergência conceitual entre elas.

## 2. Energias Oceânicas no Norte do Brasil

Os primeiros estudos na região norte do Brasil foram encomendados pela ELETROBRÁS na década de 80 (Sondotécnica Engenharia de Solos, 1981), mostrando um potencial maremotriz bastante significativo na costa do Maranhão, Pará e Amapá. Esse potencial energético preliminar estava na ordem de 72 TWh.

Apenas na baía de Turiaçu no Maranhão, a potência extraível é da ordem de 3.402 MW (Sondotécnica

Engenharia de Solos, 1981), ou seja, aproximadamente 40% da potência instalada da UHE de Tucuruí. Entretanto, apesar desse potencial energético, a exploração de toda essa energia enfrenta, na conjuntura atual, obstáculos ambientais, logísticos e econômicos sérios. De fato, a região foi declarada em junho de 1991 Área de Proteção Ambiental (APA) das reentrâncias Maranhenses, abrangendo todo o litoral ocidental do Maranhão, desde a Baía de São Marcos até o rio Gurupi (Bezerra P., Saavedra, Santos, & Ribeiro, 2012).



Figura 1. Canal do Boqueirão na Baía de São Marcos, Estado do Maranhão (foto: Marcio Vaz).

Em (Bezerra P., Saavedra, Santos, & Ribeiro, 2012) os autores concluem que aproveitamentos maremotriz se tornam mais viáveis e possíveis de implementar quando são de pequena escala, facilitando o atendimento de restrições ambientais.

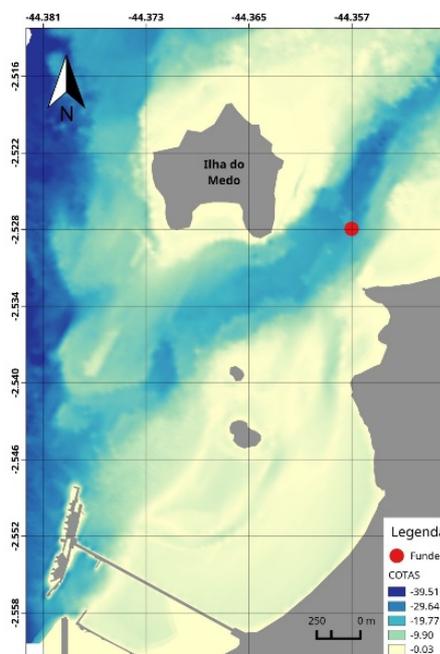


Figura 2. Canal do boqueirão – cotas em metros. (Fonte: ICMar).

Um importante sítio com vasto potencial é a Baía de São Marcos. As Figuras 1 e 2 ilustram o canal do Boqueirão situado na referida Baía, entre a Ilha do Medo e a Ilha de São Luís. A Figura 2, mostra as cotas de profundidade do local, e as Figuras 3 e 4 ilustram

os dados de sentido e intensidade das correntes em períodos de Sизigia e Quadratura respectivamente, obtidas através de campanhas de medição realizadas em dois fundeios.

O primeiro fundeio foi realizado em 14/03/2017 em maré de Sизigia por um período de 13 horas iniciando às 19:09 hora local. O segundo fundeio foi realizado em 04/07/2017 em maré de Quadratura por um período de 26 horas iniciando às 09:01 hora local. A Figura 5 ilustra as atividades de campanha durante os fundeios. A referida área é objeto de pesquisa pelo INEOF, com a realização de campanhas de medição que permitam sua plena caracterização física e energética.

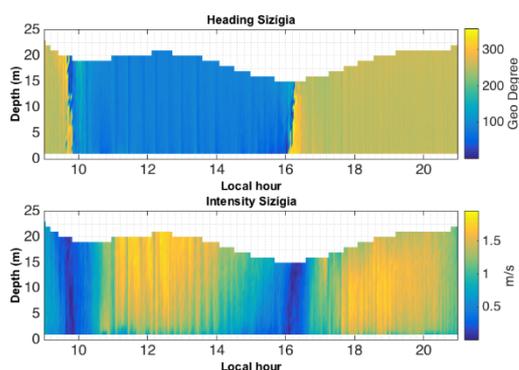


Figura 3. Sentido e intensidade das correntes durante o período de Sизigia.

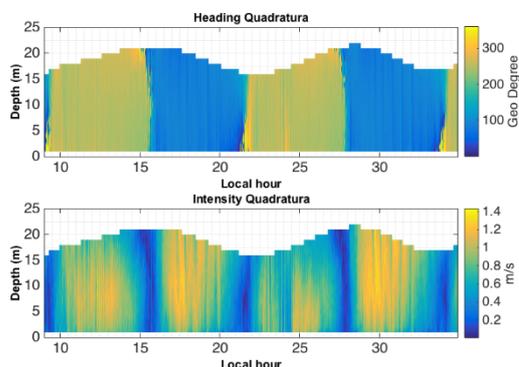


Figura 4. Sentido e intensidade das correntes durante o período de Quadratura.

As Figuras 3 e 4 apresentam algumas características importantes das correntes de marés do local. Nota-se que as velocidades seguem um padrão bastante definido, se comparadas ao perfil de outras fontes renováveis estocásticas; além disso, a mudança da direção das correntes ocorre de forma bastante regular, praticamente invertendo apenas seu sentido. Tais características tornam esta fonte energética muito mais previsível, e portanto melhor gerenciável quando inserida em um sistema elétrico.

As energias oceânicas, em todas suas modalidades, são novidades no Brasil. Além da prospecção, também já há esforços objetivos para o desenvolvimento de turbinas que se adequam às condições no mar brasileiros (Tiago Filho, Barkett Botan, Villa Nova, Mambeli Barros, Braga da Silva, & Saavedra, 2013) (Machado, Saavedra, & Paucar, 2017). Uma

importante peculiaridade a ser levada em conta na exploração de correntes de maré é o alto conteúdo de sedimentos observado no litoral norte, que sofre forte influência da bacia amazônica. Em (Machado, Saavedra, & Paucar, 2017) é apresentado um estudo preliminar da influência do conteúdo de sedimento na operação de turbinas submersas.

Dados estes trabalhos em andamento, é importante estudar, já em um estágio posterior, como essas novas fontes poderão ser aproveitadas para nossa sociedade e quais situações podem se apresentar, onde as vantagens da sua exploração sejam evidenciadas.



Figura 5. Atividades de campanha de medições durante fundeios.

Este artigo analisa um caso onde um autoprodutor usando um gerador baseado em corrente de maré deseja otimizar seus custos de operação tendo como alternativa a este tipo de geração distribuída a rede convencional e um sistema de armazenamento. Este trabalho estende a proposta apresentada em (Pereira, Bezerra, & Saavedra, 2018) tanto em aspectos algoritmos e de formulação, com resultados mais realísticos e práticos.

Por outro lado, a legislação atual do setor elétrico permite a figura de autoprodutores de energia elétrica, usando, por exemplo, sistemas fotovoltaicos e biocombustíveis. Esta oportunidade pode ser estendida para a exploração de pequenos empreendimentos de energia oceânica para pequenas cooperativas localizadas no litoral norte. Entretanto, devido às energias renováveis oceânicas ainda estarem em estágio inicial no Brasil, não existem estudos que ilustrem as oportunidades deste tipo de fonte energética e que venham a fortalecer os investimentos em prospecção e tecnologia para seu desenvolvimento. Este artigo vem contribuir para a identificação dos potenciais usos da energia de correntes e maré, com destaque na sua principal característica: a previsibilidade.

## 2.1. Correntes de maré (CM)

As tecnologias existentes para o aproveitamento das correntes do mar para a geração de eletricidade são similares às do aproveitamento da energia eólica. As turbinas de correntes extraem a energia cinética do movimento das águas, da mesma maneira que as turbinas eólicas se utilizam do movimento do ar. A diferença básica entre os dois tipos está nas condições de operação. Sob as mesmas condições, a água é em média 832 vezes mais densa do que o ar, porém a velocidade do fluxo da água é muito menor do que a do ar. Além disso, as turbinas de corrente devem ser capazes de produzir tanto na enchente quanto na vazante.

Na sua forma mais simples, uma turbina de corrente é composta por uma série de pás montadas sobre um rotor, um conversor e um gerador. As três partes que compõe as turbinas são montadas numa estrutura de suporte, a qual pode ser de três opções: estrutura empilhada, estrutura afixada, estrutura de gravidade e estrutura flutuante, conforme mostradas na Figura 6.

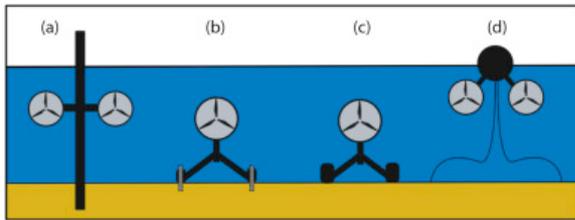


Figura 6. Estruturas de suporte das turbinas de correntes de marés: (a) empilhada, (b) afixada, (c) gravidade e (d) flutuante (Segura, Morales, Somolinos, & López, 2017).

Existem dois métodos principais de extração das energias das correntes de maré, os quais constituem na submersão de dispositivos na desembocadura de estreitamento, são eles: a) turbinas de corrente de maré de eixo horizontal (fluxo axial), as pás da turbina giram em torno de um eixo horizontal que é paralelo a direção do fluxo da água; b) turbinas de correntes de maré de eixo vertical (fluxo cruzado), as pás da turbina giram em torno de um eixo vertical que é perpendicular à direção do fluxo da água. Estas configurações de turbinas são mostradas na Figura 7.



Figura 7. Exemplos de turbinas de eixo horizontal e de eixo vertical (Sleiti, 2017).

## 2.2. Contextualização do problema abordado

Considere um consumidor de grande porte pertencente ao Grupo A, por exemplo uma indústria, campus universitário ou uma cooperativa; ou ainda

um consumidor pertencente ao Grupo B que esteja sujeito ao regime de Tarifa Branca. O consumidor dispõe de uma fonte de CM de geração, porém não autossuficiente. Isto é, a fonte de CM não é capaz de suprir a demanda interna. Nesta situação, a rede principal sempre fornece energia ao consumidor, mas com tarifas diferenciadas ao longo do dia.

O problema a resolver é como despachar a fonte oceânica de forma a minimizar o valor da energia comprada da concessionária. A fonte oceânica conta com um sistema de armazenamento de energia, que permite “deslocar” a oferta de energia para um horário onde a energia da concessionária é cara, permitindo assim a minimizar o valor pago. Em (Pereira, Bezerra, & Saavedra, 2018) é resolvido o problema de despacho ótimo considerando uma pequena unidade maremotriz (barragem). Uma formulação específica é apresentada e o despacho é ilustrado para um período de 1 semana, alcançando significativa economia.

Neste artigo é formulado e resolvido o despacho ótimo de uma usina baseada em correntes de maré considerando sistema de armazenamento de energia para um consumidor não autossuficiente interligado à rede. O problema é formulado como um problema de otimização não linear com variáveis mistas considerando um horizonte de despacho de um ciclo de sizígia/quadratura, isto é, incluindo os efeitos das fases lunares sobre as marés. Assume-se a existência de um modelo que considera três faixas de tarifas de energia ofertada pela rede convencional.

As principais contribuições deste artigo são:

- Formular o problema considerando pequena geração de energia elétrica baseada em correntes de maré, com uso de sistema de armazenamento, mostrando que a operação conjunta potencializa a competitividade deste tipo de fonte;
- Propor um algoritmo baseado em programação evolutiva orientado ao problema.
- Tornar evidente as oportunidades de exploração em pequena escala de fontes oceânicas.

## 3. Formulação do Problema

É clara a tendência em vários países e também no Brasil para a implantação de tarifas diferenciadas ao longo do dia de forma a estimular o consumidor a adotar hábitos que priorizem o uso da energia fora do período de ponta. Considerando que a partir de 1 de janeiro estará disponível a tarifa branca (ANEEL, 2017), neste estudo são considerados três patamares tarifários diários. O problema é formulado como um processo de otimização no tempo, que tem como objetivo a minimização do custo associado à compra de energia da rede, representado por (1). Em cada intervalo de tempo  $i$ , a potência  $P_i$  é considerada constante.

$$\text{Min } f = \sum_{i=1}^n C_i P_i \quad (1)$$

A função  $f$  representa o custo total de energia comprada da rede no período total de programação, e  $C_i$  representa a tarifa da energia proveniente da rede no instante  $i$ , indo até o período total de simulação  $n$ .

O problema está sujeito às restrições apresentadas nas Equações 2, 3 e 4.

$$P_i + X_i^b k_i + X_i^L = L_i \quad (2)$$

$$Soc_i = X_i^b t_i (1 - k_i) + Soc_{i-1} - X_i^b t_i (k_i) \quad (3)$$

$$X_i = (1 - k_i) X_i^b + X_i^L \quad (4)$$

onde  $X_i$  representa a potência maremotriz no instante  $i$ ,  $X_i^b$  a parcela da potência de CM que vai para a bateria,  $X_i^L$  a parcela da potência de CM que atende à carga,  $P_i$  a potência fornecida pela rede no instante  $i$ ;  $k_i$  a chave binária no instante  $i$  e  $Soc_i$  é o estado de carga (*State of Charge*) das baterias no instante  $i$ ;  $i$  é o tempo discretizado em horas ou minutos, dependendo do nível de precisão desejado para a simulação. Devido às restrições operacionais das baterias, é considerado que o SOC mínimo não seja inferior a 50% da capacidade total de armazenamento. Nesta formulação, quando  $k=0$  indica baterias sem carga ou em processo de carga. Quando  $k=1$  indica baterias carregadas ou em processo de descarga (atendendo demanda).

Em cada intervalo  $i$ , o processo de otimização deverá decidir entre usar a potência de CM para atender à carga ou armazená-la para uso em outro período, onde a energia da rede é mais cara. O problema pode ser formulado estaticamente, pois as marés são previsíveis, por seguir o ciclo lunar. Entretanto, as marés se deslocam no tempo, quando monitoradas diariamente, gerando ofertas em horários diferentes.

O sistema de armazenamento introduz uma importante dinâmica no problema, permitindo que a oferta de energia se desloque controladamente para horários que tornem a operação do sistema como um todo mais econômica.

#### 4. Processo de Resolução

Para resolver este problema, foi utilizada uma metaheurística baseada na computação evolutiva, orientada ao problema. Notar que o problema tratado aqui envolve otimização no tempo, dificultando a aplicação direta de algoritmos evolutivo. Logo o processo utilizado é inspirado na evolução (Baeck, Fogel, & Michalewicz, 1997), porém não emula rigorosamente processos evolutivos naturais. O procedimento é iniciado com uma população aleatória mapeada dentro de um espaço amostral de soluções viáveis. Estas soluções são melhoradas pela aplicação do operador mutação, implementação através de uma perturbação gaussiana com média zero e um desvio padrão dado. Assim como na Programação Evolutiva, neste algoritmo não é utilizado o operador cruzamento.

Uma boa prática é reduzir a dependência de variáveis, identificando o número mínimo de variáveis independentes que assumirão o papel de variáveis de

controle na formulação orientada para a metaheurística, que para o problema em questão, é a potência de CM fornecida às baterias no instante  $i$ , ao longo do período de otimização considerado. Cada indivíduo gerado deve atender as restrições definidas na formulação (Baeck, Fogel, & Michalewicz, 1997) e tem dimensões igual ao número de intervalos de simulação. O critério de convergência utilizado foi um número máximo de gerações.

O tamanho de cada geração foi considerado igual a 50 indivíduos, sendo o número máximo de gerações ( $N_{ger}$ ) igual a 100.000, a fim de garantir a convergência da solução. A taxa de mutação considerada é igual a 5%.

O processo de otimização é sumarizado na Figura 8, em que o bloco de execução do algoritmo evolutivo representa é melhor definido através da Figura 9.

#### 4.1. Simulações

A proposta foi testada utilizando um sistema com topologia dada na Figura 10, que considera um gerador acionado por fonte de corrente de marés cuja potência nominal da ordem de 10 kW e um sistema de armazenamento de baterias cuja capacidade máxima de armazenamento é 20 kWh. Os conversores realizam a compatibilização de frequência para se interligarem à carga e rede convencional.

A curva de demanda e de geração maremotriz são apresentadas na Figura 11. Como referência de geração de maré foi considerado o perfil de correntes de marés medidas próximas à Ilha do Medo, em São Luís, conforme mostrado nas Figuras 3 e 4. Para efeitos de simulação, foram considerados 14 dias, com uma discretização de 1 hora. Este período de tempo é suficiente para avaliar os impactos decorrentes da variabilidade das correntes de marés entre os períodos de Sízigia e de Quadratura. As tarifas de energia da rede para três patamares horário são apresentados na Tabela 1. Os horários assim como os valores foram arbitrados próximos dos sugeridos em (ANEEL, 2017).

#### 5. Resultados e Discussão

Na Figura 12 é ilustrado o desempenho do sistema para o período de análise. No primeiro gráfico é apresentada a evolução das potências (fornecida ou absorvida) do banco de baterias, da rede, do gerador de CM e a demanda. O banco permanece carregado até o horário de preço elevado (em torno das 19-20 h), onde fornece energia para a carga reduzindo a energia injetada pela rede. No período de preço baixo, opta-se por comprar energia da rede e carregar com fonte CM o sistema de armazenamento, como é ilustrado no segundo gráfico, através do estado de carga do banco.

Como já era esperado, o deslocamento da oferta de CM para os horários de pico de preços fornece uma significativa economia na operação dos sistemas analisados. Também é possível observar como os períodos de Sízigia e Quadratura tem forte impacto na dinâmica de operação do sistema.

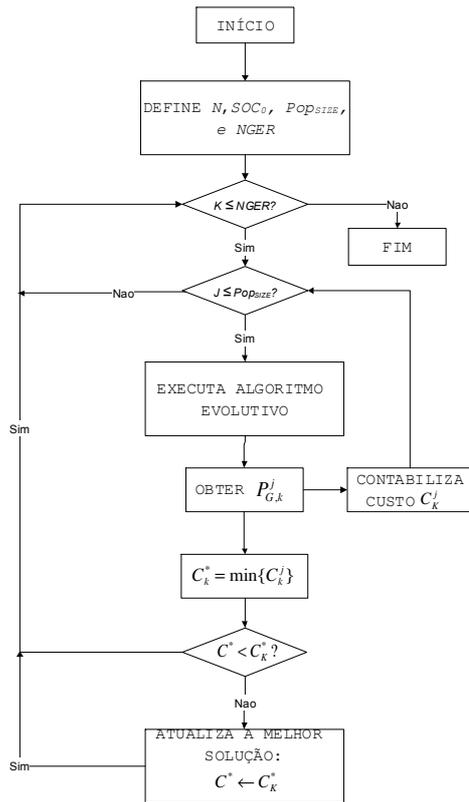


Figura 8. Fluxograma usado no processo de otimização.

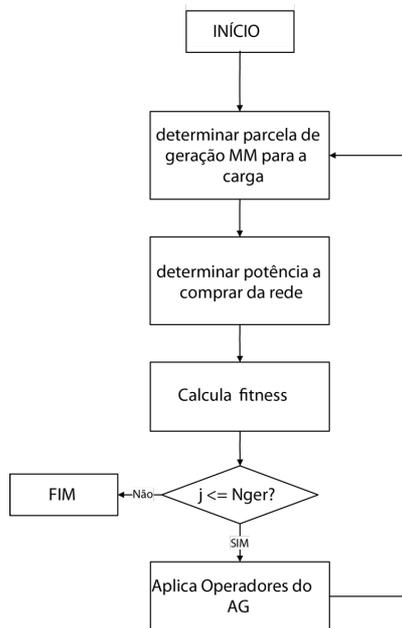


Figura 9. Fluxograma do algoritmo evolutivo.

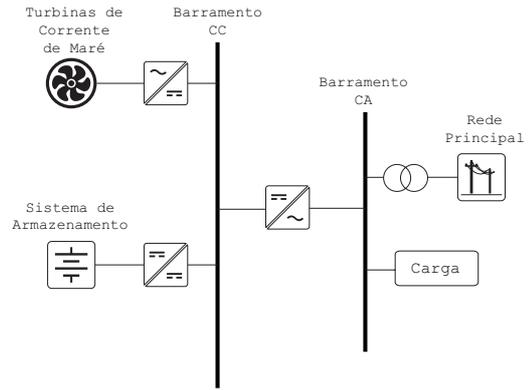


Figura 10. Topologia do Sistema.

Tabela 1. Faixas horárias e tarifas considerados nos estudos.

| Horário         | 16:00 - 17:59 h | 18:00 - 20:59 h | 21:00 - 21:59 h | 22:00 - 15:59 h |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Custo (R\$/kWh) | 1,00            | 1,65            | 1,00            | 0,4             |

Por simplicidade, as perdas dos conversores e em baterias são assumidas como incluídas na carga total.

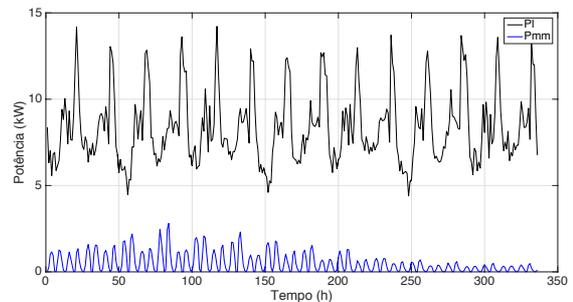


Figura 11. Perfis de demanda e de geração maremotriz.

No período das marés de quadratura, a economia obtida está na ordem de 7%; por outro lado, no entorno da sizígia, está em torno de 10%. Em outras palavras, a quadratura tem uma influência negativa que se reflete em uma queda da economia (queda de oferta de geração de CM) de aproximadamente 30% em relação ao período de sizígia. Nota-se ainda que o perfil de operação das baterias varia significativamente entre os períodos de sizígia e de quadratura. Durante o período de quadratura, a geração não é suficiente para o carregamento completo das baterias.

O tamanho do sistema de armazenamento tem importante impacto na economia obtida. Bancos de baterias maiores proverão uma maior economia, entretanto implicam em um maior investimento.

A Figura 13 ilustra o efeito do tamanho do sistema de armazenamento no custo operacional. Esta economia é dada com referência ao sistema operando sem sistema de armazenamento, isto é, sem a possibilidade de deslocar oferta maremotriz. Neste caso, para as tarifas assumidas aqui, o custo por compra de energia da rede é de R\$1.933,62.

No caso reportado na Figura 12, o banco considerado foi de 20 kWh, permitindo uma redução de custo de 7,65%.

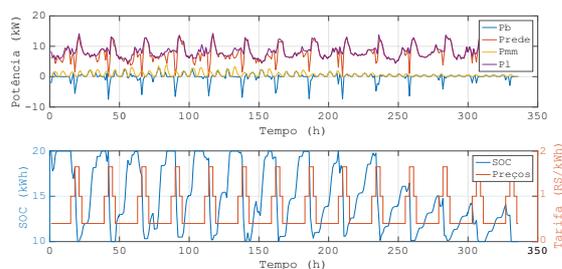


Figura 12. a) Potencias dos bancos de baterias, da rede, do gerador de CM, e carga; b) Estado de carga (SOC) do banco de baterias.

Se o banco tiver capacidade de 30 kWh, a redução será de 10,11 %, como mostrado na Tabela 2. O tamanho do banco não pode ser expandido infinitamente por duas razões: a primeira, é de natureza econômica, dado os elevados custos dos sistemas de armazenamento; a segunda é técnica, pela esperada saturação da economia obtida. O ganho obtido com o aumento do sistema de armazenamento tende à saturação. Logo, para uma dada capacidade maremotriz, tamanhos superiores de armazenamento se tornam parcialmente ociosos, não contribuindo para economia da operação.

Neste trabalho não são abordados os aspectos de viabilidade econômica nem de dimensionamento do sistema, que são importantes assuntos de foco de trabalhos paralelos. Este artigo está concentrado na operação, com claro objetivo de ilustrar a viabilidade do uso conjugado de sistemas de armazenamento de energia com pequenos geradores baseados em energias de maré.

Tabela 2. Impacto da dimensão do sistema de armazenamento na economia da operação.

| Capacidade do Sistema de Armazenamento (kWh) | Redução Percentual (%) | Custo de Compra de Energia da Rede (R\$) (14 dias de operação) |
|--|------------------------|--|
| 15   | 6,12                   | R\$1.815,23  |
| 20   | 7,65                   | R\$1.785,69  |
| 25   | 9,01                   | R\$1.759,58  |
| 30   | 10,11                  | R\$1.738,15  |
| 35   | 10,92                  | R\$1.722,56  |
| 40   | 11,63                  | R\$1.708,74  |

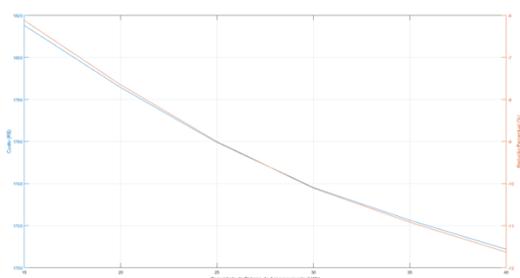


Figura 13. Economia vs Capacidade do Sistema de Armazenamento.

## 6. Conclusão

Neste artigo foi formulado e resolvido o despacho econômico de um gerador distribuído baseado em correntes de maré com sistema de armazenamento de energia para um grande consumidor não autossuficiente. O problema foi formulado como um problema de otimização não linear no tempo, com variáveis mistas, que é resolvido eficientemente através de uma meta-heurística orientada para este problema, inspirada na programação evolutiva. A necessidade desta customização algorítmica decorre na natureza temporal do problema, que dificulta a aplicação de algoritmos evolutivos tradicionais.

As simulações denotam significativa economia (acima de 7%) para o período total de avaliação, refletindo as influências das marés de quadratura e sizígia, esta última provedora de mais energia.

As simulações foram realizadas em uma janela temporal de quatorze dias de forma a incluir os efeitos da quadratura de sizígia. Notar que as correntes de maré são fortemente influenciadas pela variação das marés, logo, é necessário considerar uma janela temporal que compreenda esse efeito. É possível realizar uma simulação que considere um ciclo lunar completo, entretanto, o efeito que se deseja ilustrar não se altera significativamente. Aspectos de custos de investimentos e viabilidade econômica estão fora do escopo do presente artigo e são objeto de outros trabalhos em andamento.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, CAPES e FAPEMA através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia Oceânica e Fluviais - INEOF.

## 8. Referências Bibliográficas

- ANEEL. (2017). *Tarifa Branca*. Acesso em março de 2018, disponível em <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>
- Baek, T., Fogel, D., & Michalewicz, Z. (1997). *Handbook of Evolutionary Computation*. CRC Press.
- Bezerra, P., Saavedra, O. R., & Ribeiro, L. A. (08 de Fevereiro de 2017). Analysis of a tidal power plant in the estuary of Bacanga in Brazil taking into account the current conditions and constraints. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. 1187-1194.
- Bezerra, P., Saavedra, O. R., Santos, M. C., & Ribeiro, L. A. (2012). A anergia maremotriz no maranhão: uma análise crítica. *Plural*, 4, 45-65.
- E&A Errazuriz & Associados. (2013). *Energia Marina en Chile. Avanzando en el Desarrollo Chileno*. British Embassy. Santiago: The University of Endinburgh.

- FRAENKEL, P. L. (2006). Tidal Current Energy Technologies. *Marine Current Turbines Ltd* , pp. 145-151.
- Garcia-Rosa, P. B., Cunha, J. P., Lizarralde, F., Estefen, S. F., Machado, I. R., & Watanabe, E. H. (25 de Julho de 2014). Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , pp. 386-397.
- Huckerby, J. (2011). *An IEA OPEN Energy Technology Bulletin Article*.
- Machado, E., Saavedra, O. R., & Paucar, L. (2017). Análise de Desempenho da Potência Hidráulica de uma Turbina Hidrocinética em Ambientes com Alto Conteúdo de Sedimentos. *The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 1*, pp. 1-7. Mar del Plata.
- Oliveira, D. Q., Leite Neto, P. B., Costa Júnior, A. L., Camelo, N. J., Saavedra, O. R., & Santos, M. C. (2009). *Relatório do Potencial Maremotriz do Estuário e Memória Técnica - Estuário de Turiaçu*. Ministério de Minas e Energia, PLPT. Projeto BRA 99/011/PNUD.
- Pereira, J. D., Bezerra, P., & Saavedra, O. R. (2018). Despacho Ótimo de um Gerador Maremotriz com Sistema de Armazenamento. *VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE* . Sondotécnica Engenharia de Solos . (1981). *Aproveitamentos Maremotrizes na Costa do Maranhão, Pará e Amapá. Inventário Preliminar*. Rio de Janeiro.
- Technical Support Unit Working Group III. (2012). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Cambridge University Press.
- Tiago Filho, G. L., Barkett Botan, A. C., Villa Nova, H. F., Mambeli Barros, R., Braga da Silva, F., & Saavedra, O. R. (2013). CFX Modelling of an Axial Turbine with Symmetrical Blades and Reversible Flow for Tidal Power Plants. *Advanced Materials Research (Online)* , 860-863, pp. 1823-1827.
- Vargas, A., Saavedra, O. R., Samper, M. E., Rivera, S., & Rodriguez, R. (2016). Latin American Energy Markets: Investment Opportunities in Nonconventional Renewables. *IEEE Power and Energy Magazine* , 14 (5), 38-47.