

# **ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DE ENERGIA CINÉTICA DA MARÉ NO LITORAL DO MUNICÍPIO DE CURUÇÁ-PARÁ-BRASIL**

Souza, Marcelo José Raiol; Bacharelado em Matemática no Centro Universitário  
Internacional Uninter

Machado, Fábio Pereira; professor do Bacharelado em Matemática no Centro  
Universitário Internacional Uninter

## **RESUMO**

Este trabalho analisa a potencialidade do aproveitamento da energia cinética presente nas correntes de maré na região litorânea do estado do Pará em um local denominado Ponta do Tijoca, localizado no município de Curuçá-PA. O problema consiste em determinar as velocidades de correntes marítimas a partir do conhecimento de velocidades de referência presentes em cartas náuticas e calcular a geração de energia mecânica a partir do cálculo da energia cinética contida nas correntes de maré. Esta pesquisa se justifica em virtude da busca de geração de energia renovável, diante de um cenário energético e ambiental cada vez mais exigente que prima pelo desuso dos combustíveis fósseis. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo principal analisar o potencial de geração de energia mecânica a partir do aproveitamento da energia cinética da maré. Para isso, foram utilizados modelos matemáticos codificados em linguagem de programação FORTRAN 2003 que calcularam as velocidades das correntes e também a energia gerada e o empuxo na turbina hidrocínética. Esse estudo foi fundamentado mediante uma revisão bibliográfica a respeito do assunto aproveitamento de energia cinética da maré. A análise demonstrou um comportamento periódico da velocidade e do empuxo na turbina de acordo com a variação da altura de maré, e uma geração total de energia para o ano de 2021 de 33279 KWh, que demonstrou a grande potencialidade de aproveitamento de energia na região estudada.

Palavras-Chave: Maré. Energia. Potencialidade.

## 1. Introdução

Diante do final próximo da disponibilidade dos combustíveis fósseis, várias alternativas energéticas, de menor impacto ambiental, vêm ganhando destaque no cenário mundial: energia solar, energia eólica, energia hídrica, energia de biomassa, energia das marés, células combustíveis entre outras (MENDONÇA e DIAS, 2019). Dos muitos recursos energéticos primários disponíveis no estado do Pará, a energia da maré ainda é pouco estudada, entretanto este tipo de energia ganha destaque quando se observa a costa paraense, que fica localizada na foz do tipo complexa (estuário e delta) do rio Amazonas e Tocantins. Isto determina, junto com a influência do fenômeno de maré, uma dinâmica de correntes marinhas que se apresenta como um possível potencial energético, uma vez que, as velocidades observadas da massa de água permitem o acionamento de turbinas hidrocínéticas (ADCOCK *et al.*, 2021). Estas velocidades podem ser calculadas a partir das medidas realizadas, constantemente, nas estações de medições de maré da Marinha do Brasil e disponibilizada no site da mesma (MARINHA DO BRASIL, 1962; MARINHA DO BRASIL, 2021). A análise preliminar de tais medidas permite inferir que grandes quantidades de energia podem ser extraídas e dispostas como energia final para a sociedade paraense (PROGÊNIO *et al.*, 2017).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral, analisar o potencial de geração de energia mecânica a partir do aproveitamento da energia cinética da maré na ponta do Tijoca, localizado na foz do rio Amazonas e Tocantins. Dentro do objetivo geral, há os objetivos específicos que são: Coletar os dados de velocidade de maré disponível nas cartas de corrente de maré da Marinha do Brasil para o local em análise; obter as curvas cíclicas que representam as variações de velocidade da maré utilizando uma interpolação *Spline* cúbica; desenvolver e aplicar um modelo matemático de cálculo de energia mecânica a partir da energia cinética da maré para estimar a energia que será produzida e simular a conversão de energia cinética da maré em energia mecânica usando um código computacional.

O estudo de potencialidade do aproveitamento da energia cinética de maré será conduzido para uma localidade específica na foz do rio Tocantins (também chamado de rio Pará), denominada Ponta do Tijoca, situado na costa Paraense. Os dados da velocidade de corrente marítima do local serão coletados das cartas de corrente e altura de maré para o

ano de 2021 (MARINHA DO BRASIL, 1962; MARINHA DO BRASIL, 2021). Deve-se salientar que será necessário obter um modelo matemático linear que relaciona a velocidade da maré com o tempo para o cálculo da velocidade em qualquer instante. Outro modelo matemático que governa a transformação da energia de maré em energia mecânica será obtido a partir do balanço energético em um volume de controle aplicado em torno da turbina hidrocínética (ADCOCK *et al.*, 2021). Como a quantidade de dados é bastante significativa, será desenvolvido um código em FORTRAN 2003, que através de uma rotina específica para interpolação *Spline* cúbica (IMSL, 1989), disponível na plataforma citada, se calculará a energia gerada por uma turbina hidrocínética no referido local.

O aproveitamento da energia cinética de massas de água, por se tratar de um tipo de conversão energética ainda considerado muito recente, permite que os pesquisadores desenvolvam muitas ideias interessante a respeito do assunto. No caso do aproveitamento das correntes marítimas os trabalhos de Kirinus *et al.* (2012); Zheng *et al.* (2015); Orhan e Mayerle (2017) exploram, principalmente, a conversão da energia cinética da maré em energia útil, utilizando turbinas hidrocínéticas. Há também lugares propícios para este tipo de aproveitamento, neste aspecto os trabalhos de Penesis *et al.* (2020); Villalba *et al.* (2021) analisam a potencialidade desta energia se tornar energia útil para a sociedade local. Estes autores usam softwares especializados para determinar o campo de velocidade, e, portanto, otimizar os locais ideais para a instalação das turbinas hidrocínéticas.

O presente trabalho está dividido em uma Introdução, onde se destaca toda a problemática do assunto, bem como o método a ser usado e as principais referências pesquisadas; metodologia, onde será pormenorizada as várias ferramentas matemáticas usadas no problema; revisão bibliográfica, onde se procura apresentar as principais ideias sobre o aproveitamento das energias da maré apresentadas por outros autores e as considerações finais, onde se busca responder os objetivos do trabalho, bem como apresentar sugestões de trabalhos futuros.

## **2. Metodologia**

A forma de abordagem da presente pesquisa é classificada como quantitativa (KAUARK *et al.*, 2010), uma vez que, será utilizada dados primários disponíveis em documentos especializado no assunto para o cálculo energético. A técnica de obtenção das informações será documental (KAUARK *et al.*, 2010), uma vez que, já existem dados

registrados de alturas e velocidades de marés, para várias localidades brasileiras, em diversos sites de domínio público que pesquisam/trabalham com oceanografia e navegação marítima, como a Marinha do Brasil (MARINHA DO BRASIL, 1962; MARINHA DO BRASIL, 2021), que documentam e disponibilizam tais dados a quem estiver interessado.

O estudo de potencialidade do aproveitamento da energia cinética de maré foi conduzido para uma localidade específica na foz do rio Tocantins, nas proximidades da ilha dos Guarás, denominada Ponta do Tijoca, situado na costa paraense no município de Curuçá-PA. Os dados da velocidade de corrente marítima do local foram coletados nas cartas de corrente de maré do rio Pará (MARINHA DO BRASIL, 1962) e os dados referente à altura de preamar e baixamar foram coletados das tábuas de maré do ano de 2021 no marégrafo localizado na ilha dos Guarás, com coordenadas geográficas:  $00^{\circ} 35'.9$  S de latitude e  $047^{\circ} 54'.9$  de longitude (MARINHA DO BRASIL, 2021). A Figura 1 mostra o litoral da Ilha dos Guarás, onde se encontra o local de estudo. Cabe ressaltar que as velocidades que constam nas cartas de corrente marítima da Ponta do Tijoca foram medidas em uma profundidade de 5 m abaixo da lâmina d'água (MARINHA DO BRASIL, 1962). Além disso, salienta-se que estas velocidades não refletem realidades extraordinárias de eventos que possam aumentar as correntes de maré no local como: enchente e vazante do rio em condições extremas, altas cargas de vento devido condições meteorológicas adversas (MARINHA DO BRASIL, 1962; PROGÊNIO *et al.*, 2017)

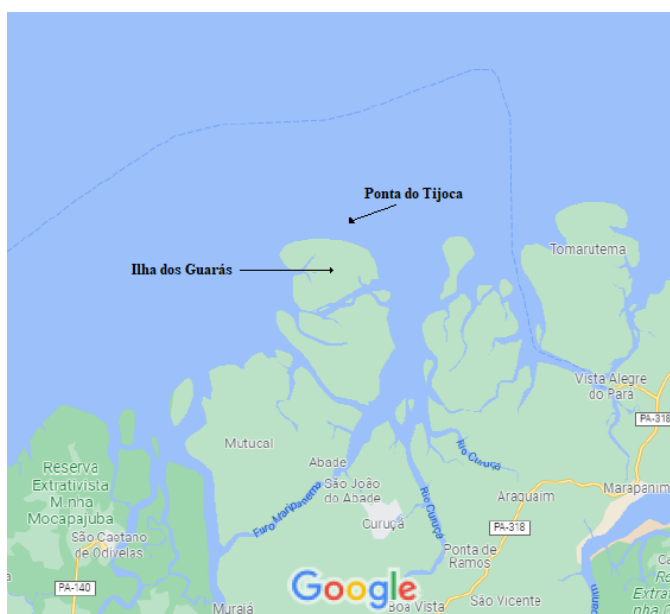


Figura 1 – Mapa de localização das Ilha dos Guarás e Ponta do Tijoca. (Fonte: Google maps, 2021; adaptado)

Para calcular a potencialidade energética disponível nas correntes marítimas do local em estudo é necessário, primeiramente, conhecer a velocidade da corrente em qualquer instante. Entretanto, as velocidades disponíveis nas cartas de corrente marítima da Marinha do Brasil são estipuladas para um determinado intervalo de tempo fixo, antes da preamar e após a ocorrência da mesma no local de referência (MARINHA DO BRASIL, 1962). Devido a interação gravitacional da terra com os astros, principalmente lua e sol, os horários da preamar e baixamar, embora cíclicos, variam no decorrer do tempo, requerendo que o cálculo da velocidade de corrente seja corrigido para horários diferentes dos previstos nas cartas de corrente de maré. Nos documentos que contêm as cartas de maré para o rio Pará (MARINHA DO BRASIL, 1962) é apresentada uma demonstração de como é realizado este cálculo, que se inicia com o cálculo da amplitude média da maré em qualquer horário, conforme mostra a equação (1).

$$A_m = \frac{(h_{pm1} - h_{bm1}) + (h_{pm1} - h_{bm2}) + (h_{pm2} - h_{bm2})}{3} \quad (1)$$

Onde:

$A_m$  = Amplitude média da maré;

$h_{pm1}$  = Altura da primeira ocorrência de preamar no dia;

$h_{pm2}$  = Altura da segunda ocorrência de preamar no dia;

$h_{bm1}$  = Altura da primeira ocorrência de baixamar no dia;

$h_{bm2}$  = Altura da segunda ocorrência de baixamar no dia.

Cabe ressaltar que a equação (1) é uma generalização do cálculo da amplitude de maré. Outras situações de ocorrência de maré derivam diretamente do raciocínio apresentado na referida equação.

Como nem sempre, o horário que se pretende conhecer a velocidade de corrente coincide com a apresentada nas cartas após a preamar, é necessário realizar uma correção no cálculo da velocidade através da introdução de um fator corretor dependente da amplitude média de maré ( $A_m$ ), conforme os ábacos de função linear apresentados nas cartas de corrente para o rio Pará (MARINHA DO BRASIL, 1962). No presente trabalho este fator foi calculado através de um modelo matemático obtido por regressão linear

utilizando o software EXCEL 2019. Antes da aplicação da técnica de regressão, pontos referentes as cartas de corrente foram digitalizadas e organizadas através do uso do *trial* do software *GetData Graph Digitizer version 2.26.0.20*. A equação que rege o modelo matemático após o uso da regressão é apresentada a seguir.

$$FC=2,0657.10^{-3}Am+5,1088.10^{-3} \quad (2)$$

onde FC é o fator de correção.

Com isso o cálculo da velocidade de corrente da maré em qualquer horário fica:

$$V=FC.V_{ref} \quad (3)$$

Onde:

V = Velocidade da corrente de maré;

$V_{ref}$  = Velocidade de referência da corrente de maré no rio Pará (MARINHA DO BRASIL, 1962).

Embora se consiga calcular a velocidade da corrente em qualquer horário, a partir do conhecimento da velocidade de referência e alturas de preamar e baixamar; tais valores são sempre calculados em intervalos de uma hora, o que não permite o cálculo da energia disponível satisfatoriamente, pois é necessário se conhecer a velocidade em qualquer instante. Logo, foi necessário interpolar os valores horários conhecidos utilizando a interpolação cúbica *spline*. Devido a grande quantidade de variáveis de entrada no problema, ou seja, os horários de preamar e baixamar para o ano de 2021, que totalizam 1410 medidas, a subrotina DCSRIZ da biblioteca IMSL (1989) foi usada. Esta rotina determina a curva interpoladora cúbica *spline* para um conjunto de pontos dados. Como resultado a rotina entrega ao usuário um vetor contendo todos os pontos calculados de velocidade e também os pontos usados na interpolação.

Uma vez conhecido a velocidade da corrente de maré, o cálculo da estimativa de energia mecânica gerada é determinado usando um modelo matemático obtido a partir da

análise das equações da conservação da massa, quantidade de movimento e conservação da energia (1º lei da termodinâmica) para um volume de controle que circula um disco de hélice de uma turbina hidrocínética axial idealizada imerso em água, juntamente com os campos de velocidade a montante e jusante da turbina, formando um tubo de corrente de maré. Tal esquema físico é baseado no modelo de Rankine de escoamento unidimensional e uniforme (FOX et al., 2010), conforme mostra a Figura 2.

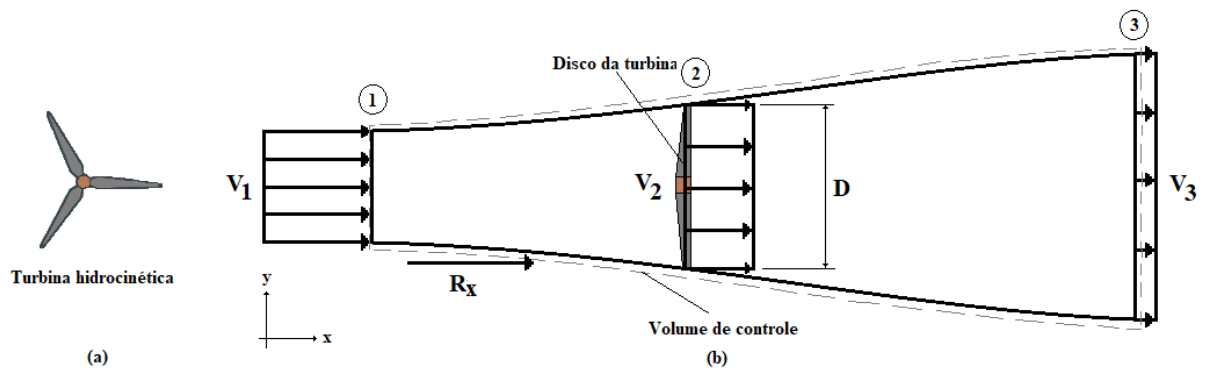


Figura 2 – a) Vista frontal da turbina hidrocínética axial; b) Volume de controle na análise do escoamento de fluido que atravessa a turbina.

A equação da conservação da massa na sua forma integral é (FOX et al., 2010; ÇENGEL e BOLES, 2013):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (4)$$

Sendo  $t$  o tempo,  $VC$  o volume de controle,  $\rho$  a massa específica do fluido,  $V$  o volume,  $SC$  a superfície de controle,  $V$  a velocidade e  $A$  representa a área da seção transversal. É razoável, para efeitos de análise, considerar o escoamento da fluido permanente, logo a equação da conservação da massa fica:

$$\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (5)$$

Ao aplicar a equação (5) nas seções transversais 1, 2 e 3 da Figura 2, constata-se a continuidade do escoamento do fluido no interior do volume de controle, ou seja,

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = V_3 A_3 \quad (6)$$

A equação da quantidade de movimento na sua forma integral é (FOX et al., 2010; ÇENGEL e BOLES, 2013):

$$F_{Sx} + F_{Bx} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{SC} u \rho dV + \int_{SC} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (7)$$

Sendo  $F_{Sx}$  as forças de superfície atuando na direção  $x$ ,  $F_{Bx}$  as forças de campo atuando na direção  $x$  e  $u$  a componente de velocidade da direção  $x$ . Aplicando a equação (7) nas seções transversais 1 e 3 da Figura 2, e observando que a única força de superfície atuante no volume de controle, na direção  $x$ , é a força externa de reação  $R_x$ , obtêm-se:

$$R_x = u_1 (-\rho V_1 A_1) + u_3 (+\rho V_3 A_3) \quad (8)$$

Utilizando a equação (6) e observando que  $u_1 = V_1$  e  $u_3 = V_3$ ; a equação (8) fica:

$$R_x = (V_3 - V_1) \rho V_2 A_2 \quad (9)$$

Pelo princípio da ação e reação de Newton, a força de empuxo exercida pelo volume de controle sobre o meio externo, devido ao funcionamento da turbina hidrocínética é:

$$K_x = -R_x = (V_1 - V_3) \rho V_2 A_2 \quad (10)$$

Rankine demonstrou que (FOX et al., 2010):

$$V_1 - V_2 = V_2 - V_3 = \frac{1}{2} (V_1 - V_3) \quad (11)$$



Além disso,  $V_1 = V$ ,  $V_2 = (1 - a)V$ ,  $V_3 = (1 - 2a)V$ ; onde  $a$  é o fator de interferência (ADCOCK et al., 2021),  $V$  a velocidade da maré a montante da turbina hidrocínética e  $R$  o raio da turbina. Portanto, a equação (10) que calcula o empuxo produzido pela turbina fica:

$$K_x = \rho V^2 \pi R^2 2a(1 - a) \quad (12)$$

O empuxo máximo ocorre quando  $dK_x/da = 0$ . Logo  $a = 1/2$  para uma situação da turbina hidrocínética operar em empuxo máximo.

A equação da conservação da energia na forma integral é (FOX et al., 2010; ÇENGEL e BOLES, 2013):

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho dV + \int_{SC} \left( e + \frac{p}{\rho} \right) \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (13)$$

Sendo  $\dot{Q}$  a taxa de transferência de calor,  $\dot{W}_s$  a taxa de realização de trabalho, “ $e$ ” a energia total e “ $p$ ” a pressão. Para o problema em análise não se observa uma troca de calor significativa entre o meio externo e o volume de controle e vice versa. Logo  $\dot{Q} = 0$ , desta maneira a equação (13) fica:

$$-\dot{W}_s = \int_{SC} \left( e + \frac{p}{\rho} \right) \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (14)$$

Aplicando a equação (14) nas seções 1 e 3, encontra-se:

$$-\dot{W}_s = \frac{V_1^2}{2} (-\rho V_1 A_1) + \frac{V_3^2}{2} (+\rho V_3 A_3) = \rho V_2 \pi R^2 \frac{1}{2} (V_3^2 - V_1^2) \quad (15)$$

A potência ideal produzida  $P = \dot{W}_s$ , em termos do fator de interferência fica:

$$P = \rho V (1 - a) \pi R^2 \left[ \frac{V^2}{2} - \frac{V^2}{2} (1 - 2a)^2 \right] = \rho V^3 (1 - a) \frac{\pi R^2}{2} [1 - (1 - 2a)^2] \quad (16)$$

Após simplificações algébricas, a equação (16) fica:

$$P = 2\rho V^3 \pi R^2 a (1 - a)^2 \quad (17)$$

Por outro lado, a potência disponível no fluido, escoando em um tubo de corrente não perturbado, de área igual ao do disco da turbina, conforme mostra a Figura 2, é:

$$P_f = \rho V \pi R^2 \frac{V^2}{2} = \frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2 \quad (18)$$

De posse da potência ideal e a da potência disponível no fluido, o cálculo do rendimento ideal da turbina fica:

$$\eta = \frac{P}{P_f} = \frac{2\rho V^3 \pi R^2 a (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2} = 4a(1 - a)^2 \quad (19)$$

A condição de máxima eficiência é encontrada fazendo  $d\eta/da$  igual a zero na equação (19). Após a solução da equação do 2º grau, obtida do processo de derivação da equação (19), encontra-se  $a = 1/3$ . Substituindo o valor de  $a = 1/3$  na equação (19), o valor do rendimento fica  $\eta = 0,593$ . Este rendimento representa o máximo valor que uma turbina hidrocínética pode alcançar, ou seja, da energia cinética disponível nas correntes de maré, apenas 59,3 %, no máximo, poderão ser convertidos em energia mecânica de rotação. Entretanto, isto nunca será alcançado devido as perdas como atrito entre as partes móveis da máquina, ineficiência hidrodinâmica, ineficiência na conversão de energia mecânica em energia elétrica etc. Na prática este rendimento, também chamado de coeficiente de pressão da máquina, é de difícil obtenção, o que nos leva para efeitos de estudo de potencialidade a assumir que o rendimento usado no cálculo da potência gerada pela turbina hidrocínética no presente trabalho será  $\eta = 0,593$ . Portanto, o cálculo da potência mecânica gerada pela turbina é calculado por:

$$P_{mec} = \eta \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (20)$$

Como já mencionado, a quantidade de dados disponíveis das alturas de preamar e baixamar para o local em análise é bastante considerável, e aumentado quando se faz a interpolação dos dados minuto a minuto. Logo, se fez necessário criar um código em linguagem FORTRAN 2003 para realizar os cálculos a contento com a utilização da subrotina interna DCSRIZ da linguagem de programação citada. O algoritmo usado como base para a criação do código computacional é apresentado em forma de um pseudocódigo como mostrado na Figura 3.

*Algoritmo Maré*

*Var*  $h_{pm1}, h_{pm2}, h_{bm1}, h_{bm2}, FC, V, V_{ref}, V_{calculado}, K_x, P_{mec}, a, R, \rho, \pi, \eta$ : Real

*Início*

*Leia*  $h_{pm1}, h_{pm2}, h_{bm1}, h_{bm2}, V_{ref}$

$$A_m \leftarrow \frac{(h_{pm1} - h_{bm1}) + (h_{pm2} - h_{bm2})}{3}$$

$$FC \leftarrow 2,0657 \cdot 10^{-3} A_m + 5,1088 \cdot 10^{-3}$$

$$V \leftarrow FC \cdot V_{ref}$$

*Se* ( $V$  é calculada nos horários entre preamar e baixamar) *então*

*Chamar a subrotina DCSRIZ*

$V \leftarrow V_{calculado}$  *calculado pela interpolação cúbica Spline*

*Fim do se*

$$K_x \leftarrow \rho V^2 \pi R^2 2a(1-a)$$

$$P_{mec} \leftarrow \eta \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3$$

*Fim*

Figura 3 - Algoritmo usado para desenvolver o código.

### 3. Revisão bibliográfica/ Estado da arte

#### 3.1. Referências consultadas sobre o assunto

As energias disponíveis devido ao fenômeno de maré podem se apresentar de três formas: energia potencial, devido a elevação e abaixamento natural das massas de água oceânicas; energia cinética devido as correntes marítimas que se formam no processo de elevação e abaixamento da maré e energia das ondas, que associada as marés meteorológicas, produzem ondas mecânicas que com seus picos, vales e velocidade são passíveis de aproveitamento da energia mecânica contida na mesma (PROGÊNIO *et al.*, 2017). No caso da energia cinética, presente nas correntes de maré, existem vários estudos, que têm como objetivo analisar a potencialidade de transformação desta energia em energia eletromecânica útil. Segundo SHAPIRO (2011) existe a possibilidade de extração de potência da corrente de maré em mar aberto com pouca profundidade, o que corrobora com a presente pesquisa, já que a ponta do Tijoca se encontra na foz de um rio que deságua no oceano atlântico. A principal tecnologia usada para a conversão da energia cinética contida nas correntes marinhas em energia útil são as turbinas hidrocinéticas, no presente trabalho se utilizou uma turbina do tipo axial, que são as mais usadas em protótipos em uso e em desenvolvimento no mundo (BRASIL JUNIOR *et al.*, 2016; IRENA, 2021). Existem outros tipos de turbina como Gorlov, Darrieus, Savonius etc. que permitem que novas configurações de aproveitamento sejam utilizadas (ZHENG *et al.*, 2015; IRENA, 2021). É fato que analisar a geração e interação da turbina com as correntes oceânicas não é tarefa simples, na maioria das vezes são utilizadas simulações utilizando plataformas de dinâmica de fluido computacional (CFD) ou a solução das equações da Navier-Stokes em duas e três dimensões usando técnicas numéricas especiais tais como, métodos de elementos finitos e volumes finitos, isto requer computadores de grande capacidade de cálculo para resolver as equações (KIRINUS *et al.*, 2012; ORHAN e MAYERLE, 2017; VILLALBA *et al.*, 2021). No presente trabalho, o modelo adotado foi unidimensional, o que de certa forma traz menos dificuldade, pois as variáveis do problema são calculadas em uma dimensão. Além disso, o objetivo principal é o estudo da estimativa da potencialidade da corrente de maré local e não de toda a foz do rio. Os modelos unidimensionais são bastante usados nas análises da potencialidade das correntes de rios (FIGUEIREDO *et al.*, 2013; CRUZ *et al.*, 2020), uma vez que, é razoável assumir as velocidades de corrente variando apenas em uma direção.

No Brasil, os estudos envolvendo o aproveitamento da energia cinética das massas de água estão concentrados em fluxos fluviais, pois devido a extensa e volumosa bacia hidrográfica do país, vazões com magnitudes consideráveis permitem este tipo de aproveitamento energético (BARBOSA *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2020), ou seja, os pesquisadores utilizam também turbinas hidrocínéticas de vários modelos, bem como simulação do campo de velocidade na seção dos rios para também otimizar a posição ideal da instalação do equipamento de conversão energética (BARBOSA *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2020)

### **3.2. Resultados obtidos**

Em um estudo de potencialidade de aproveitamento da energia cinética presente em correntes marítimas e de rios, a principal variável a ser determinada é a velocidade. Tais velocidades podem ser obtidas através de solução de modelos numéricos e dispositivos de medição. No presente trabalho, o método utilizado foi uma interpolação cúbica *Spline* a partir do conhecimento das velocidades de corrente de maré de referência, disponíveis nas cartas de corrente de maré da Marinha do Brasil. Após, a aplicação do código desenvolvido em linguagem FORTRAN 2003, tendo como referência o pseudocódigo apresentado na Figura 3, os resultados para a velocidade no mês de janeiro são apresentados na Figura 4. Salienta-se que, o comportamento periódico apresentado para o mês de janeiro é também verificado nos outros meses do ano de 2021. Porém, por motivos de espaço limitado, não foram apresentados aqui. Os resultados foram obtidos para uma massa específica da água de  $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$  e um raio do rotor da turbina hidrocínética de  $R = 1,004 \text{ m}$ . Tais parâmetros, juntamente com as velocidades de referências foram utilizados como dados de entrada no código desenvolvido.

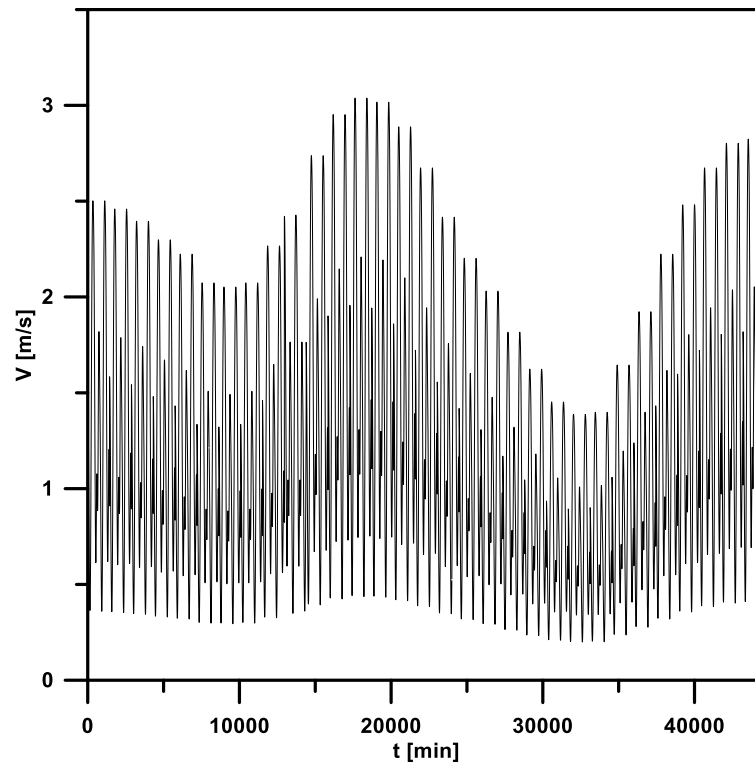


Figura 4 – Espectro da velocidade de maré para a Ponta do Tijoca no mês de janeiro.

A análise da Figura 4 mostra que as velocidades obtidas para o local em estudo experimentam pontos de máximos e mínimos que determinam um comportamento físico cíclico, ou seja, as velocidades da maré são dependentes dos ciclos de preamar e baixamar que ocorrem na Ponta do Tijoca. Além disso, este comportamento físico está em perfeito acordo com o trabalho de Penesis et al. (2020), que realizando simulações de velocidades de correntes marinhas na costa da Austrália encontrou espectro de velocidade de maré que apresentam comportamento cíclico semelhante ao obtido no presente trabalho.

Uma vez conhecido o espectro de velocidade mensal do local em estudo, a potência estimada é apresentada na Figura 5.

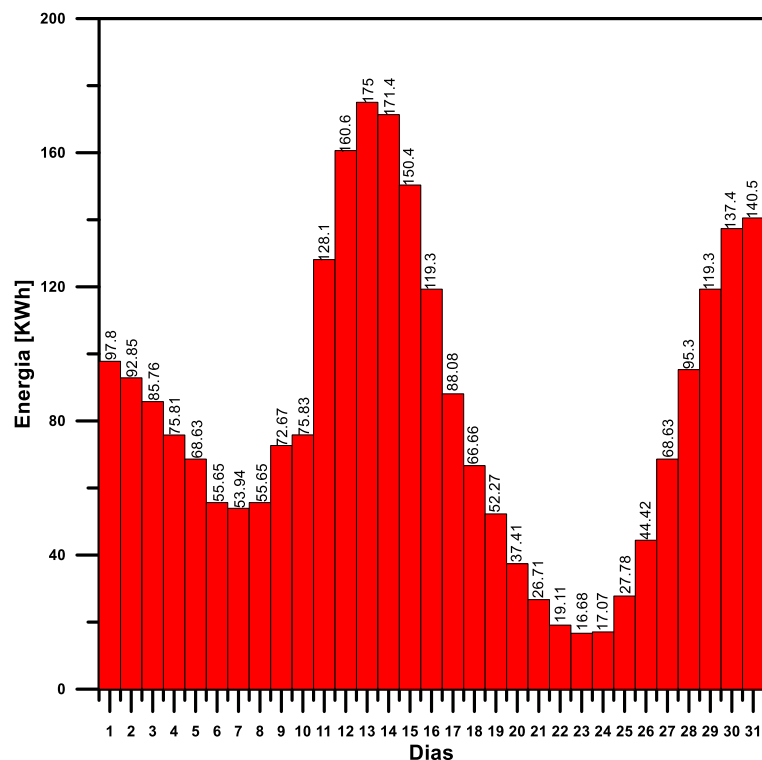


Figura 5 – Energia mecânica gerada pela turbina para o mês de janeiro.

Observa-se na Figura 5 que devido a natureza cíclica das alturas de maré, a energia gerada não possui uma característica constante, e sim intermitente, variando no decorrer do mês, o que de certa forma traz uma desvantagem em relação as energias consideradas firmes como a hidroeletricidade e a termoeletricidade (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008). Por outro lado, é uma energia renovável que traz ganhos ambientais, pois, depende somente das variações rítmicas da maré. Embora a energia gerada pela hidrocínética não seja constante, pode-se destacar ainda na Figura 5 que no dia 23 de janeiro obteve-se uma geração mínima do mês, estimada em 16,68 KWh, o que é uma quantidade de energia significativa, tendo em vista que, ao se usar um gerador de energia elétrica acoplado a turbina hidrocínética e desconsiderando as perdas pelas irreversibilidades, daria para fornecer energia elétrica para 23 lâmpadas, com potência de 30 W, durante 24 horas. Ao considerar a geração máxima do mês de janeiro, ou seja, 175 KWh, daria para energizar 126 lâmpadas, com potência de 30 W, durante 24 h. Isto mostra a grande potencialidade do uso deste tipo de aproveitamento energético na Ponta do Tijoca, considerando que os cálculos foram realizados somente para o funcionamento de uma turbina hidrocínética.

Na Figura 6 é mostrado a estimativa da quantidade de energia total gerada nos meses do ano de 2021.

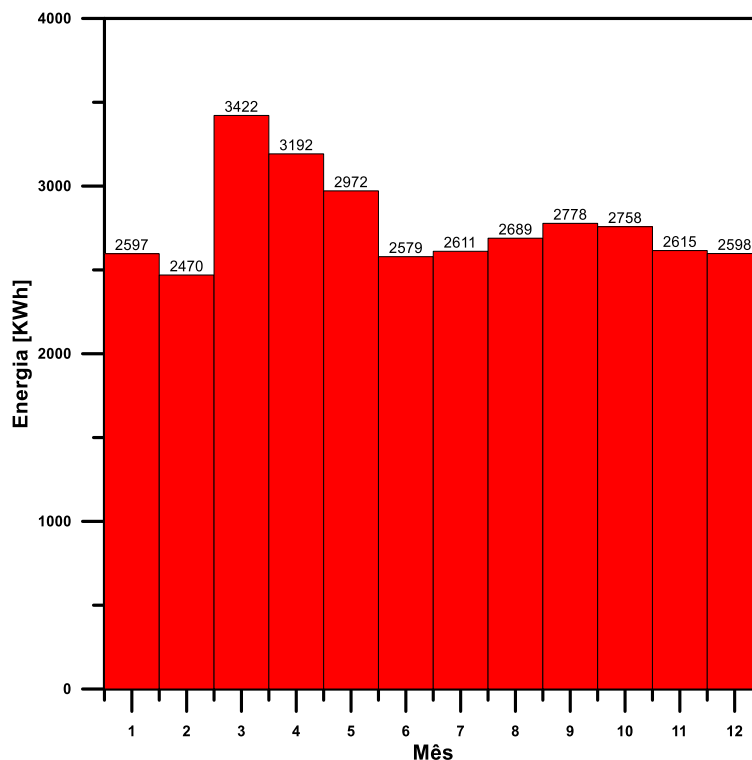


Figura 6 – Energia mecânica gerada pela turbina para o ano de 2021.

Diferentemente da flutuação da geração de energia observada na Figura 5 para o mês de janeiro, a Figura 6 mostra um comportamento em termos de geração de energia mais constante para ano de 2021. Isso mostra que a geração mensal não sofreu uma significativa influência do comportamento cíclico da maré, a não ser pelo pico verificado para o mês 3 (março) que apresentou uma geração de 3422 KWh, seguido de um segundo valor significativo, referente ao mês 4 (abril) que apresentou uma energia gerada de 3192 KWh. Este comportamento mensal mais constante é muito importante para o gerenciamento do consumo desta energia, tanto em sistemas isolados quanto em sistema interligados a rede de distribuição de energia. Além disso, destaque para o a geração total de energia para o ano de 2021, apresentando um valor estimado em 33279 KWh, mais uma vez, mostrando a potencialidade deste tipo de aproveitamento energético renovável.

Por fim, é apresentado na Figura 7 o empuxo mensal produzido pelo funcionamento da turbina.



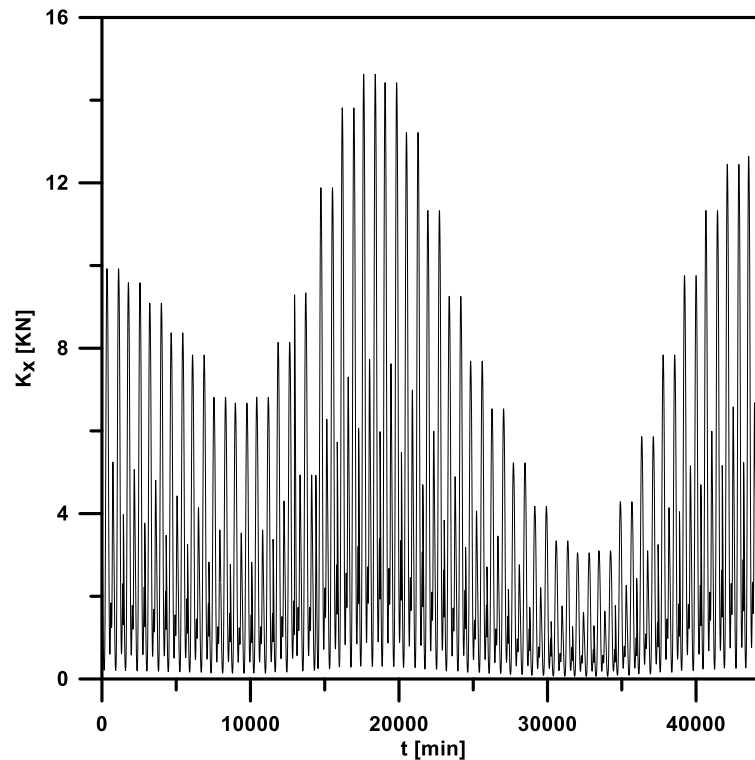


Figura 7 – Espectro do empuxo da turbina hidrocínética no mês de janeiro.

A análise da Figura 7 mostra um comportamento cíclico do empuxo devido a variação de velocidade das correntes de maré no local estudado. Isto demonstra que uma turbina hidrocínética, caso seja instalada na ponta do Tijoca, estará submetida a forças dinâmicas que precisam ser consideradas no projeto da máquina. Além disso, estes resultados implicam também na necessidade de realizar estudos de impactos ambientais (MENDONÇA e DIAS, 2019) em aproveitamentos energéticos utilizando energia cinética da maré, pois as forças de empuxo podem causar acidentes com a fauna marinha local.

#### 4. Considerações finais

A aplicação do método de interpolação cúbica *spline*, implementado em um código computacional desenvolvido em linguagem FORTRAN 2003, se mostrou adequado na obtenção das velocidades das correntes de maré e, empuxo e energia gerada pela turbina hidrocínética na Ponta do Tijoca. Os resultados obtidos para as velocidades permitiram o cálculo das energias geradas mensalmente e anualmente, mostrando que existe potencialidade de aproveitamento da energia cinética da maré na foz do rio Pará. Os

resultados das forças de empuxo produzido pelo funcionamento da turbina, mostrou que estudos de impacto ambiental são necessários neste tipo de aproveitamento energético. O cálculo da energia gerada foi realizado para apenas um tipo de turbina hidrocínética e se mostrou bastante satisfatório em termos quantitativos. Em vista disso, sugere-se a continuação da pesquisa utilizando uma quantidade maior de turbinas, análise da potencialidade com a variação no diâmetro da turbina, utilização de outros tipos de turbinas, impacto nas velocidades de corrente local devido a extração de energia e estudo do aproveitamento em outros pontos do rio.

### Referências

- ADCOCK, T. A. A.; DRAPER, S.; WILLDEN, R. H. J.; VOGEL, C. R. The fluid mechanics of tidal stream energy conversion. **Annual review of fluid mechanics**, v. 257, p. 287-310, 2021
- BARBOSA, P. A. V.; BLANCO, C. J. C.; MESQUITA, A. L. A.; SECRETAN, Y. A simplified methodology for the analysis of the establishment of hydrokinetic parks downstream from hydroelectric plants. **Ambiente & Água**, v. 13, n. 3, p. 1-9, 2018
- BRASIL JUNIOR, A. C. P.; MENDES, R. C. F.; OLIVEIRA, T. F.; ANDRIAMPARANY, T.; KOUIDRI, M.; MESQUITA, A. L. A. On the Hydrodynamics of a row arrangement of Hydrokinetic propeller turbines. **American Journal Hydropower, water and environment systems**, p. 19-24, 2016
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7<sup>o</sup> edição. McGraw Hill. 2013
- CRUZ, J. da S.; BLANCO, C. J. C.; and BRASIL JUNIOR, A. C. P. Flow-velocity model for hydrokinetic energy availability assessment in the Amazon. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 42, p. 1-15, 2020
- FIGUEIREDO, S. W. O.; DA SILVA, T. R. M.; PINHEIRO, J. R.; BLANCO, C. J. C.; DO RIO VAZ, D. A. T. D. Protótipo Hidrocínético para Geração de Energia Elétrica aplicado à Educação em Engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 32, n. 1, p. 19-30, 2013
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7<sup>o</sup> edição. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GOOGLE MAPS. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-0.5633821,-47.8841549,11z>. Acesso em: 29 de novembro de 2021.
- IMSL LIBRARY, MATH/LIB., HOUSTON, 1989

- IRENA. **Tidal Energy-Technology Brief**, June 2014. Disponível em: [www.irena.org](http://www.irena.org). Acesso em: 16 de junho de 2021
- KIRINUS, E. de P.; STRINGARI, C. E.; MARQUES, W. C. Viabilidade de conversão da energia de correntes marinhas na plataforma continental sul do Brasil. **Vetor**, Rio Grande, v. 22, n. 2, p. 83-104, 2012
- KAUARK, F.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: guia prático**. Itabuna: Via Litterarum, 2010.
- MARINHA DO BRASIL-DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Cartas de corrente de maré – Rio Pará**. 1º edição, 1962
- MARINHA DO BRASIL-TÁBUA DE MARE-ILHA DOS GUARÁS. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/dados\\_de\\_mar\\_e/ilha\\_dos\\_guaras.pdf](https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/dados_de_mar_e/ilha_dos_guaras.pdf). Acesso em: 14 de abril de 2021
- MENDONÇA, F. de A.; DIAS, M. A. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. 1º edição. Curitiba: Intersaberes, 2019
- ORHAN, K.; MAYERLE, R. Assessment of the tidal stream power potential and impacts of tidal current turbines in the strait of Larantuka, Indonesia. **Energy procedia**, v. 125, p. 230-239, 2017
- PENESIS, I. et al. **Tidal Energy in Australia: Assessing Resource and Feasibility in Australia's Future Energy Mix**. Australian Maritime College, University of Tasmania, 2020
- VILLALBA, I. B. O.; CLEOFFE, E. J. V.; BAUTISTA, D. M. Numerical simulation of tides for the assessment of tidal instream energy in selected sites in the Philippines. **Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 673, p. 1-6, 2021
- PROGÊNIO, M. F.; BARBOSA JUNIOR, R. N. da S.; SOUZA, M. J. R. A Energia maremotriz e sua perspectiva de oportunidade no estado do Pará. **Revista Brasileira de energias renováveis**, v. 6, n. 2, p. 245-259, 2017
- RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M. **Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. 1º edição. Brasília: Ministério de Minas e Energia. 2008
- SHAPIRO, G. I. Effect of tidal stream power generation on the region-ride circulation in a shallow sea. **Ocean Science**, v. 7, p. 165-174, 2011.
- ZHENG, J.; DAIB, P.; ZHANG, J. Tidal stream energy in China. **Procedia Engineering**, v. 116, p. 880-887, 2015