

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

ABDALA RAÚL MUARIGUE, ANTÓNIO GONÇALVES FORTES

Universidade Rovuma - UniRovuma
<abdalaraulmuarigue@gmail.com> <antoniogoncalves.fortes@yahoo.com>
10.21439/conexoes.v16i0.2178

Resumo. As turbinas hidráulicas são uma das principais componentes na geração da energia hidrelétrica, porém, o alto valor de aquisição e manutenção desses dispositivos constitui a maior limitação para uso nos países em via de desenvolvimento. É neste contexto que se realizou uma pesquisa experimental com objetivo de construir uma turbina hidráulica do tipo Francis, utilizando materiais alternativos, capaz de gerar energia elétrica para uso residencial. A turbina foi testada no laboratório de Física da Universidade Rovuma – Nampula e instalada num trecho do rio Muatala, na cidade de Nampula, gerando a potência hídrica de 147W e potência do eixo da turbina de 132W, que conectado a um gerador elétrico, registou-se uma tensão de 133V e corrente elétrica de 34mA. Os parâmetros elétricos obtidos podem ser usados no acionamento de eletrodomésticos de baixa potência. Conclui-se que a turbina hidráulica do tipo Francis construída a partir de materiais alternativos apresenta sustentabilidade social, ambiental e econômica para geração de eletricidade para uso residencial.

Palavras-chaves: Energia hidrelétrica. Turbina Francis. Materiais alternativos. Sustentabilidade.

HYDROELECTRIC GENERATION THROUGH A FRANCIS TURBINE FOR RESIDENTIAL USE

Abstract. Hydraulic turbines are one of the main components in the generation of hydroelectric energy, but the high acquisition and maintenance cost of these devices is a major limitation for use in developing countries. It is in this context that experimental research was carried out with the objective of building a Francis-type hydraulic turbine, using alternative materials, capable of generating electricity for residential use. The turbine was tested in the Physics Laboratory of the Rovuma University – Nampula and installed in a stretch of the Muatala river, in the city of Nampula, generating 147 W of hydropower and 132W of turbine shaft power, which connected to an electric generator, a voltage of 133V and an electric current of 34 mA were recorded. The electrical parameters obtained can be used to drive low-power home appliances. It is concluded that the Francis-type hydraulic turbine built from alternative materials presents social, environmental and economic sustainability for electricity generation for residential use.

Keywords: Hydroelectricity. Francis Turbine. Alternative materials. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A energia hidrelétrica é a fonte de energia moderna mais abrangente e fiável em Moçambique. O uso da energia hidráulica das águas do rio para gerar energia, começou com as rodas de água, através da ação direta de uma queda de água sobre a seção da roda, gerando a energia mecânica. Todavia, apenas com o surgimento do motor elétrico, a turbina hidráulica, dínamo e lâmpada, no século XVIII, foi possível converter a energia

mecânica da água do rio, em energia elétrica (JOÃO et al., 2021; QUEIROZ et al., 2013).

A água como recurso energético destaca-se pelo fato de estar disponível em quantidade explorável em diversas regiões do globo terrestre, contribuindo de forma significativa na geração de “eletricidade verde”, devido aos baixíssimos níveis de poluição ambiental durante o processo de geração, transporte, distribuição e utilização, para além de ser uma fonte renovável e limpa com

maior proeminênciana matriz energética mundial.

Em contrapartida, o custo de aquisição e manutenção de sistemas hidrelétrico são bastante elevados, o que limita o seu uso nos países em via de desenvolvimento (FORTES; MUTENDA; RAIMUNDO, 2020). Assim sendo, em Moçambique, diversos empreendimentos emergentes, nas áreas agrícolas, comerciais, industriais ou públicas, não se concretizam pela falta de acesso a uma fonte energética confiável e de utilidade diversa, embora o País apresente um enorme potencial de energias renováveis, de mais de 23 terawatt (TW), sendo 1.400 projetos, correspondente a 18,6 gigawatt (GW) de potencial elétrico, dos quais 351 projetos apresentam pré-viabilidade técnica e econômica (EDM, 2018; FUNAE, 2020).

Nesta ótica, Nhamire e Mosca (2014), consideram que Moçambique é um dos Países com os níveis mais baixos de consumo de energia elétrica na região austral de África, sendo a maior parte do consumo energético no país baseado em biomassa tradicional. Por outro lado, verifica-se que uma parte do território nacional (zonas rurais, periurbanas e isoladas), encontrase desprovidas da energia da rede elétrica nacional (REN), o que influencia na qualidade de vida da sociedade, visto que a energia elétrica é um recurso vital para a integração da educação, saúde, saneamento, abastecimento de água, melhoria nos processos produtivos de subsistência, a estabilidade local, universalização da informação e consequentemente, no desenvolvimento socioeconômico (FORTES; MUTENDA; RAIMUNDO, 2020).

Por isso, tem se desenvolvido diversos estudos de aproveitamento de recursos energéticos locais e para fabricação de dispositivos para aproveitamento do potencial solar e hídrico disponível. É neste contexto que se realizou a presente pesquisa com objetivo de avaliar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de uma turbina hidráulica do tipo Francis, usando materiais alternativos, para aproveitamento do potencial hídrico de rios de baixo declive para geração de energia elétrica para uso residencial.

A pesquisa é relevante, visto que, pode contribuir na redução da pobreza energética que assola Moçambique, para além da satisfação das necessidades energéticas domésticas e auxiliar na diversificação da oferta de serviços energéticos, fornecidos por energias limpas e renováveis, para as comunidades sem acesso a REN em Moçambique. Por outro lado, a geração da energia descentralizada, através de micro e pequenas centrais hidroelétrica é alternativa sustentável, onde se usa recursos energéticos renováveis capazes de diminuir a emissão de poluentes atmosféricos e os custos nas linhas de transmissão e distribuição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energia hidrelétrica é aquela que provém da condensação, precipitação e evaporação das águas, fatores estes causados pela irradiação solar e a atração orbital (FORTES; MUTENDA; RAIMUNDO, 2020). Esta energia pode ser convertida em eletricidade, esse processo ocorre nas usinas hidrelétricas através da utilização de geradores elétricos.

A geração de eletricidade em Moçambique é dominada por 5 centrais hidrelétricas (Tabela 1), com destaque para a hidrelétrica de Cahora Bassa. Todavia, a maior parte da energia gerada é exportada, para África do Sul, Zimbabué e o reino de Essuatíni, não sendo incluída, deste modo, nas estatísticas da concessionária Eletricidade de Moçambique (EDM), onde, da cifra global 2075 MW, apenas 500 MW são para EDM, sendo 300 MW de potência firme e 200 MW de potência não firme (ALER, 2017). Nos últimos dez anos, esta percentagem tende a diminuir devido à participação de produtores independentes.

A geração de energia elétrica proveniente das hidrelétricas é imprescindível, pois a previsibilidade de geração é muito maior em comparação com as outras fontes renováveis, como exemplo, a geração eólica depende da ocorrência dos ventos, já a solar ocorre durante o período diurno (OLIVEIRA et al., 2019; SCHWANKE et al., 2020). Apesar desta e outras vantagens, também oferece algumas desvantagens listadas na Tabela 2.

Uma central hidrelétrica pode ser dimensionada de diferentes formas, de acordo com o relevo, ambiente, vazão do rio, entre outros elementos, por isso, é possível criar uma pequena central hidrelétrica (PCH) que realizam as mesmas funções de uma grande central, em menor escala. As PCH surgiram como forma de garantir um abastecimento mais eficiente da REN, estabelecendo o conceito de produção energética descentralizada (ALER, 2017; JOÃO et al., 2021).

A energia hidrelétrica é gerada através de um sistema complexo constituído pelo sistema de captação e adoção de água, pela barragem e pela casa de força e vertedor. A função da barragem é interromper o curso normal da água, criando um reservatório que permite que a vazão dos rios seja adequada, nos períodos chuvosos, como de estiagem.

Neste processo as turbinas hidráulicas desempenham um papel de suma importância, ao receberem em sua porta de entrada energia mecânico-hidráulica de um fluido, convertem essa energia em energia mecânicomotriz. As turbinas hidráulicas são divididas em dois grandes tipos:

- As de ação são as mais adequadas para locais ca-

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tabela 1: Centrais hidrelétricas de Moçambique

Barragem	Bacia	Característica			
		Queda (m)	Volume (10m³)	Vazão (m²/s)	Potência (MW)
Cahora Bassa	Zambeze	103.5	65000	2150	2.075
Chicamba	Róvuè	8.5	1.2	1400	46
Mavuzi		75	1820	680	36
Corrumana	Sabié	45	1230	630	15
Massingir	Elefante	48	2256	1800	45

Fonte: adaptado de Aler (2017), Fortes, Mutenda e Raimundo (2020).

racterizados por quedas relativamente elevadas e caudais baixos;

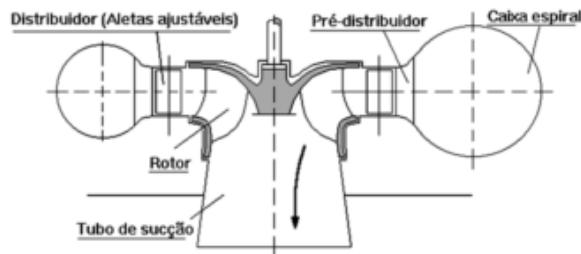
- As de reação são apontadas para utilização de locais com quedas baixas e caudais elevados (JOÃO et al., 2021). A escolha da turbina é feita em função da altura de queda útil e do caudal médio anual, por isso, a turbina Francis apresenta maior rendimento em faixa de operação mais ampla.

A turbina Francis é um tipo de turbina hidráulica com fluxo radial de fora para dentro. Este tipo de turbina foi concebida por volta de 1820 pelo engenheiro francês Jean-Victor Poncelet (1788-1867) e desenvolvida em 1838 por Samuel Dowd (1804-1847), mas apenas em 1847 foi aperfeiçoada pelo engenheiro hidráulico britânico-americano James Bicheno Francis (1815-1892), fazendo uma combinação das turbinas de fluxo radial e axial que era usado para instalações de baixa pressão (BRAGA et al., 2015; SCHWANKE et al., 2020).

Neste tipo de turbina, a água sob pressão entra por um ducto circular de seção decrescente, onde é desviada por um conjunto de pás estáticas para um rotor central, atravessa a parede lateral do rotor empurrando outro conjunto de pás, sai pela base do rotor com pressão e velocidade muito reduzidas (Fig. 1). Estas turbinas caracterizadas por possuírem uma roda formada por uma coroa de aletas, capazes de constituir uma série de canais hidráulicos que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direção axial (BRAGA et al., 2015; CAMPOS, 2015). Ademais, apresentam uma aplicabilidade bastante otimizada em diferentes quedas e caudais, possuem rendimentos máximos mais elevados, maiores velocidades e dimensões, porém elas também apresentam algumas desvantagens, como o caso da cavitação que proporciona o desgaste das pás.

Para Campos (2015), estas máquinas têm seu funcionamento definido através de três grandezas básicas distintas:

Figura 1: Arranjo típico de turbina hidráulica tipo Francis.



Fonte: (CAMPOS, 2015, p. 25).

- Vazão (Q) representa o fluxo de material líquido ou gasoso através da máquina;
- Altura de queda (H) na turbina;
- Diferença de pressão (Δh) nos ventiladores representa a variação de energia específica do fluido através da máquina e;
- Rotação da máquina (n) representa a característica cinemática da máquina.

A vazão (Q) pode ser definida como o volume de fluido (V) que passa através de uma seção transversal(A), na unidade de tempo (Δt) de escoamento.

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (1)$$

O volume (V) e a velocidade de escoamento (v) determinam-se pelas relações,

$$V = A \times L \Leftrightarrow v = \frac{L}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde, L o comprimento percorrido. Substituindo as expressões 2 na 1, temos:

$$Q = A \times v \quad (3)$$

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tabela 2: Vantagens e desvantagens na geração da energia hídrica

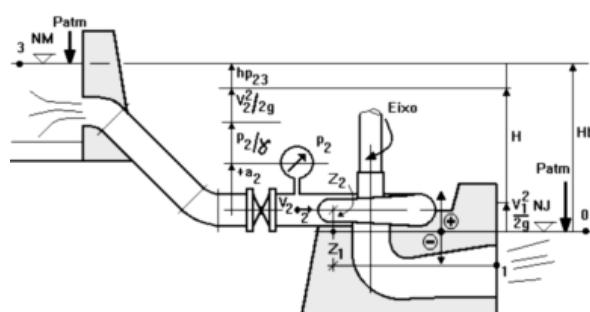
Vantagens	Desvantagens
O fato de ser uma energia renovável torna-se uma fonte contínua e confiável de geração elétrica;	A central hidrelétrica tem um grande custo de implantação e desativação, fazendo deles objetos de muitos estudos prévios para diminuir os erros;
Baixo custo de operação;	Remoção de pessoas nativas;
Plantas com longa durabilidade;	Perturbações biológicas, físicas e químicas;
Geração de inúmeros empregos durante a construção;	Mudança nas chuvas tem impacto direto na geração de eletricidade;
Elevada eficiência;	Este tipo de empreendimento causa impactos graves ao ambiente, podendo infligir danos para a fauna e flora de uma região, causando algumas vezes ainda a alteração de ecossistemas inteiros;
Elevado tempo de vida;	
As plantas que apresentam falhas não causam explosões ou incêndios;	
Não emite gases de efeito estufa (GEE) na geração de energia;	
O reservatório gerado pela implantação de uma central gera um impacto positivo, possibilitando ser utilizado para abastecimento local, o que aliado aos baixos custos de produção de energia elétrica torna viável a sua utilização.	Um problema encontrado na implantação de uma central deste tipo é encontrar um ponto onde as características geográficas permitam um grande potencial energético para o curso hídrico, e uma menor área impactada, o que raramente é possível de se encontrar, já que o potencial está relacionado à altura da coluna de água no reservatório.

Fonte: adaptado de Fortes, Mutenda e Raimundo (2020), FUNAE (2020).

Quanto a vazão e energia gerada, as turbinas do tipo Francis podem ser usadas em centrais hidrelétricas de médio ou grande porte (Tabela 3).

A altura de queda de um aproveitamento hidrelétrico composto de uma turbina do tipo Francis de eixo vertical e dos equipamentos complementares é feita através do balanço de energia entre as seções de entrada e saída da máquina (Fig. 2).

Figura 2: Aproveitamento hidrelétrico com uma turbina Francis de eixo vertical.



Fonte: (CAMPOS, 2015, p. 9).

A turbina hidráulica de tipo Francis é projetada para com rendimento máximo em determinadas va-

zões (Q), altura de queda (H) e velocidade de rotação nominais (N). A altura de queda (H) é definida como a diferença de alturas, entre as seções de entrada Z_2 da máquina e de saída Z_1 , convenientemente escolhidas. Aplicando a equação de Bernoulli e adotando como referência para as alturas de posições o nível de jusante, então obtém-se:

$$H_2 = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{P_{atm}}{\gamma} \right) \pm a_2 + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 \quad (4)$$

Onde, $\frac{P_2}{\gamma}$ é a altura de pressão obtida no manômetro, na seção 2 (relativa); $\frac{P_1}{\gamma}$ é a altura de pressão na seção 1 (absoluta); $\frac{P_{atm}}{\gamma}$ é a altura de pressão equivalente a pressão atmosférica (absoluta); $\frac{v_2^2}{2g}$ é a altura equivalente a energia cinética na seção 2; $\frac{v_1^2}{2g}$ é a altura equivalente a energia cinética na seção 1; \pm é a correção da leitura do manômetro relativa à altura da referência ao centro da seção 2. O sinal da correção depende da posição do manômetro.

Na seção 1 a pressão absoluta é a pressão atmosférica mais a coluna de água (em termos absolutos) Z_1 ao

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tabela 3: Centrais hidrelétricas com turbina do tipo Francis

Local	Vazão Q (m ³ /s)	Geração (MW)
Cahora Bassa - rio Zambeze – Moçambique	2150	2075
Paulo Afonso III R. S. Francisco – Brasil	283	220.000
Estreito Rio Grande – Brasil	320	182.000
Rio Sungari – China	147	86.000
Saucelle Rio Douro – Portugal/Espanha	117	63.500
Ixtapantongo Rio Tilostoc – México	20,35	55.800
Usina Suiça ES – Brasil	8	16.760
Usina Graminha Rio Pardo - SP – Brasil	49	41.900
Macagua I Rio Caroni – Venezuela	190	65.000

Fonte: adaptado de Braga et al. (2015), Campos (2015).

desprezarmos as perdas no escoamento da seção 1 até o nível de jusante - ponto 0, podemos então escrever de acordo com as convenções adotadas:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{P_{atm}}{\gamma}$$

Sendo ($Z_1 < 0$) então

$$H = \frac{P_{atm}}{\gamma} \quad (5)$$

Essa equação permite a obtenção da altura de queda de instalações em funcionamento.

A componente rotação acoplada a alternadores (geradores de corrente alternada) deve trabalhar com rotações síncronas constantes. Nas PCH trabalha-se normalmente com 1800 ou 1200 rpm utilizando alternadores de 2 ou 3 pares de polos, que são mais baratos (CAMPOS, 2015). Neste caso, para adequar a rotação da turbina ao gerador, utiliza-se sistemas de transmissão com correia ouengrenagens (maior eficiência).

A potência hidráulica (P_h) é a grandeza mais importante em termos de custos envolvidos em uma usina, visto que, define a quantidade de energia gerada na turbina em função do desnível (H) e a vazão (Q), sendo constante a densidade da água ($\rho_{água} = 1000 \text{ kg/m}^3$) e a aceleração de gravidade local ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).

$$P_h = Q \times H \times g \times \rho_{água} \quad (6)$$

A potência de eixo (P_e) é definida como sendo a potência entregue pela turbina ao gerador, em função da força da pressão exercida sobre as pás (F) e a velocidade do rotor (C).

$$P_e = F \times C \quad (7)$$

A força pode ser determinada através da equação fundamental da hidrostática, ou seja, o produto da pressão hidráulica (P) e da área da seção (A) [m²].

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = P \times A \quad (8)$$

Substituindo a expressão 8 na expressão 7, obtém-se:

$$P_e = P \times A \times C \quad (9)$$

A potência de eixo (P_e) relaciona-se com a potência hidráulica (P_h) através do rendimento total da instalação (η). Para Campos (2015), pode ser determinada com base na seguinte expressão.

$$P_e = \eta t \times \rho g \times QH \quad (10)$$

Substituindo a equação 6 na 9, obtém-se a expressão do rendimento total (ηt):

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_h} \quad (11)$$

A energia elétrica gerada pelo gerador corresponde a potência gerada pelo gerador (P_G) e pode ser determinada pelo produto da tensão gerada (U) e a intensidade da corrente (I).

$$P_G = U \times I \quad (12)$$

O rendimento é um parâmetro bastante importante nos sistemas hidrelétricos, visto que, está associado a eficiência e as perdas durante o funcionamento de diferentes partes. Para este caso, calculou-se o rendimento da turbina usando a seguinte expressão:

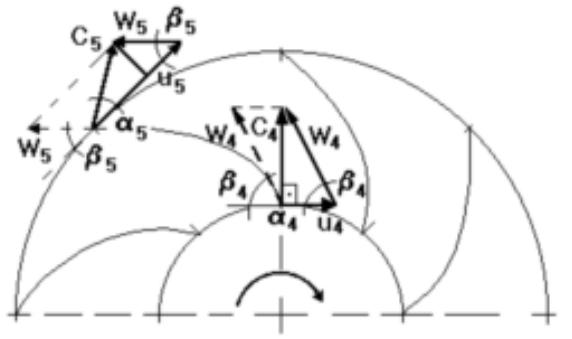
$$\eta_t = \frac{P_G}{P_h} \quad (13)$$

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

A velocidade é um fator importante na análise do desempenho da máquina. Na Tabela 4 apresenta-se a classificação da turbina Francis em função da velocidade.

Considerando um número infinito de pás e muito finas entre as seções, o fluxo deverá produzir o mínimo de perdas com a adoção de formatos de pás adequados (Fig.3).

Figura 3: Representação das componentes da velocidade em uma turbina radial.



Fonte: (CAMPOS, 2015, p. 26).

C_m e C_u são as componentes meridional e tangencial da velocidade absoluta; α e β são os ângulos do escoamento absoluto e relativo, formado pelas velocidades absoluta de escoamento (C) ou relativa de escoamento (W) e tangencial do motor (u), que deve ser congruente ao ângulo construtivo das pás na entrada para evitar choques no escoamento.

As componentes tangenciais u_4 e u_5 são calculadas conhecendo-se a rotação do rotor através das equações (ω = rotação em [rd/s]), no caso de máquinas radiais:

$$\begin{aligned} u_4 &= \omega \times r_4 \\ u_5 &= \omega \times r_5 \end{aligned} \quad (14)$$

Entretanto a velocidade periférica (do rotor) é obtida com base na expressão:

$$u = \pi \times Dm \times \frac{n}{60} \quad (15)$$

Onde Dm é o diâmetro médio que pode ser obtido da expressão

$$Dm = (De + Di)/2 \quad (16)$$

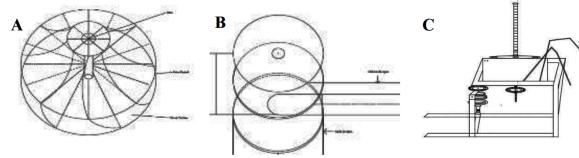
Caso a rotação do rotor seja dada em rpm deve-se realizar a transformação de unidades:

$$\omega = \pi \times \frac{n}{30} \quad (17)$$

Para determinar a equação fundamental das máquinas hidráulicas, partimos da lei da conservação da quantidade de movimento angular em regime permanente e escoamento uniforme, cujas velocidades na saída e na entrada são mostradas na Figura 4 e obtemos:

$$\begin{aligned} \vec{T} &= \left(\frac{d(m\vec{H})}{dt} \right) \rightarrow \vec{T}_{eixo} = \int (\vec{r} \times \vec{c}) \rho \vec{c} d\vec{A} \rightarrow \\ \vec{T}_{eixo} &= \rho Q (r_4 c u_4 - r_5 c u_5) \end{aligned} \quad (18)$$

Figura 4: A – Rotor da turbina; B – Caixa espiral e; C – Multiplicador de velocidade.



O torque de eixo aplicado do meio externo no rotor representa um torque inverso ao sentido da rotação, $\omega \vec{z}$, e corresponde ao torque aplicado pelo gerador no eixo da turbina. A potência mecânica gerada nas pás e transferida para o eixo e será igual a potência hidráulica fornecida pelo fluido (condição ideal de número infinito de pás).

Tendo a energia absorvida por unidade de massa igual a diferença de energia na entrada e na saída, pode-se dizer que a componente Dm varia em função da espessura na entrada e na saída da turbina logo, o comprimento entre dois pontos equivalentes de duas pás será, para a entrada e saída, respectivamente.

$$\begin{aligned} t_4 &= \frac{\pi D_4}{z} \\ t_5 &= \frac{\pi D_5}{z} \end{aligned} \quad (19)$$

3 METODOLOGIA

Para a realização do trabalho, primeiramente recorreu-se a pesquisa bibliográfica que consistiu na aquisição de informações existentes, em diversas obras literárias, artigos científicos, dissertações e teses, que abordam, de forma direta e explícita, sobre a energia hidrelétrica, turbina Francis e impactos ambientais no uso da energia hidrelétrica.

O trabalho amparou-se na pesquisa aplicada, através do qual projetou-se, no laboratório de Física da Universidade Rovuma - Nampula e testou-se, num trecho

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tabela 4: Características da turbina Francis

Turbina	Escoamento	Queda(m)	Velocidade (rpm)	Potência (MW)	Rendimento (%)
Francis	Axial, radial e misto (diagonal)	600-200	Muito lenta: (55-70)	10 - 750	>85
		200-100	Lenta: (71-120)		
		100-70	Normal (121-200)		
		70-25	Rápida: (201-300)		
		25-15	Extrarrápido (301-450)		

Fonte: (CAMPOS, 2015).

do rio Muatala, cita do bairro de Matadouro, cidade de Nampula, uma turbina Francis construída a partir de materiais alternativos, disponíveis localmente e de baixo custo.

Antes do teste, observou-se as condições do local e definiu-se os pontos com melhores condições (queda, superfície de sustentação, fluxo, solo e espessura do rio), onde o sistema podia proporcionar melhor rendimento durante a sua operação. O troço identificado para implantação do sistema, apresenta uma bacia de 11 m de largura e 22 m de comprimento, dispõe de uma profundidade de aproximadamente 1,5 m (Fig. 5A). O curso de água do rio Muatala é do tipo permanente não navegável, a água corre no sentido Oeste a Leste e desagua no rio Muepelune.

Figura 5: Características do local de estudo e do sistema construído: A –Local escolhido para implantar o sistema; B – Rotor concluído; C – Os autores canalizando o ducto; C – Aplicação do gerador e o multiplicador de velocidade no local de estudo.



O rotor Francis foi projetado para aproveitar potenciais hídricos com baixas quedas (<9 m), de modo a responder com maior eficiência os potenciais hídricos presentes (Fig. 4A). A coroa foi projetada com 50cm de diâmetro, de modo a proporcionar uma ótima área de succão, o que corresponde ao diâmetro inferior da caixa espiral (Fig. 4B). O sistema dispõe de um multiplicador de velocidade constituído por 3 engrenagens (figura 4C), onde uma volta completa do rotor corres-

ponde a 12 voltas do gerador.

No rotor, a aresta superior tem 5 cm de diâmetro, de modo a proporcionar uma ótima velocidade de entrada. As pás foram projetadas com uma altura de 30 cm, e divididas segundo a expressão 19, em 25 cm na parte superior e 5 cm na inferior (Fig. 5B).

$$t_4 = \frac{3,14 \times 5}{8} \Leftrightarrow t_4 = 2\text{cm}$$

$$t_5 = \frac{3,14 \times 25}{8} \Leftrightarrow t_5 = 10\text{cm}$$

A priori, fez-se a limpeza do local e procedeu-se com a montagem e a canalização da represa (Fig. 5C), seguido da montagem do grupo gerador e dos anexos “multiplicador de velocidade e gerador” (Fig. 5D), por fim, montou-se a turbina no rio, permanecendo em funcionamento com uma vazão de $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma altura de queda de 1 m.

A projeção do sistema baseou-se nas características apresentadas na Tabela 5. Quanto a caixa expediu o ângulo axial de 25° , para facilita a recepção e o escoamento do fluido.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

O sistema apresentou um ótimo desempenho relativamente a velocidade de rotação, as velocidades de entrada u_5 e de saída u_4 , obtidas com base nas equações 16 e 17.

$$u_5 = \frac{58,5 \times 3,14 \times 25}{30} \Leftrightarrow u_5 = 153,075 \text{ rpm}$$

$$u_4 = \frac{58,5 \times 3,14 \times 5}{30} \Leftrightarrow u_4 = 30,615 \text{ rpm}$$

Quanto a velocidade periférica, foi obtida com recurso a equação 15:

$$U = \frac{\pi D_m \times n}{60} \Leftrightarrow U = \frac{3,14 \times 35 \times 100}{60}$$

$$U = 214,305 \text{ rpm}$$

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tabela 5: Características da turbina do tipo Francis construída para o estudo.

Designação		Valor numérico	Descrição
Rotor	Número de pás	8	Pás fixas
	Altura	25 mm	
	Tamanho das pás	25 cm x 5 cm	Superior e inferior
	Peso do rotor	8 kg	
	Diâmetro da coroa	55cm	
	Número de discos	15	
	Ângulo	25º	Axial
Eixo	Comprimento x diâmetro	50cm x 1 cm	
Multiplicador	Número de engrenagens	4	12 períodos do rotor
Caixa espiral	Diâmetro exterior	200mm	
	Capacidade, Vazão (Q)	20l/s	
Canal de sucção	Diâmetro interior	500mm	

Como referenciado anteriormente (Tabela 5), a velocidade periférica determina a classe da turbina, assim sendo, a turbina construída tendo atingido uma velocidade de 214,3 rpm a uma altura de 1 m e uma vazão de 0,015 m³/s classificada como uma extra veloz.

Para determinar o torque do eixo, recorreu-se a equação 10 e 18.

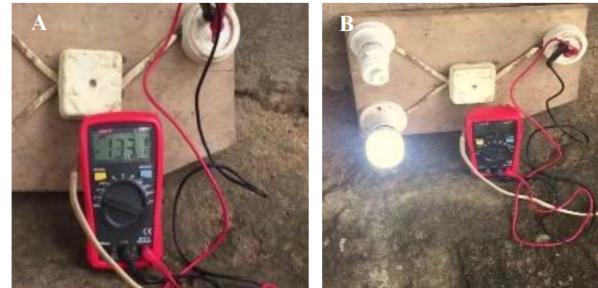
$$\begin{aligned}
 \vec{T}_{eixo} &= \rho Q(r_4 c u_4 - r_5 c u_5) \\
 \vec{T}_{eixo} &= 1000 \times 0,015(0,025 \times 0,007 \times 0,08 \\
 &\quad - 0,05 \times 0,076 \times 2,003) \\
 \vec{T}_{eixo} &= 1000 \times 0,015(0,0001531526 - 0,00765477) \\
 \vec{T}_{eixo} &= -0,113 Nm
 \end{aligned}$$

Em seguida, adicionou-se o multiplicador de velocidade (detalhes na Tabela 5) e o gerador elétrico (Fig. 5D), registrando-se uma subida nos parâmetros elétricos (Tabela 6).

A tensão elétrica máxima aumentou para 133,1 V e corrente elétrica de 34 mA (Fig. 6A), onde conectou-se ao sistema duas lâmpadas fluorescentes de 20W, alcançando um ótimo grau de luminosidade (Fig. 6B).

O sistema operou durante duas semanas. Neste período fez-se estudo aprofundado sobre o desempenho e a eficiência da turbina. A análise técnica foi feita com base na participação direta, com ajuda do multímetro, câmera fotográfica, fita métrica e duas lâmpadas fluorescentes de 20 W. Entretanto, para determinar a potência e o rendimento da turbina construída foi necessária a aplicação das expressões usuais de modo a verificar a sua funcionalidade, de acordo com o princípio básico das turbinas convencionais. Considerando os dados da Tabela 6, com recurso à equação 1, determinou-se a vazão:

Figura 6: Resultado experimental: A – Registo da tensão; B – Funcionamento das lâmpadas.



$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{V}{\Delta t} \Leftrightarrow Q = \frac{15l}{1s} \Leftrightarrow Q = \frac{0,015m^3}{1s} \\
 Q &= 0,015m^3/s
 \end{aligned}$$

Após a aquisição da vazão, substitui-se na equação 8 e obteve-se:

$$P_h = 1000 \times 0,015 \times 9,8 \times 1 \Leftrightarrow P_h = 147W$$

A potência a ser entregue a turbina é de 147 W. Portanto, a turbina acionada resulta na potência do eixo, que será, por sua vez, a potência entregue ao gerador de corrente elétrica. Foi possível determinar a potência do eixo através da equação 09. De primeira obteve-se a área da seção da porta de admissão que foi de 0,03 m² e a velocidade de 0,43 m/s:

$$P_e = 1000 \times 9,8 \times 0,03 \times 0,43 \Leftrightarrow P_e = 132W$$

A potência do eixo ou a potência entregue ao gerador de corrente elétrica foi de 132 W. Determinada com

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tabela 6: Produção da turbina e seu enquadramento

Grandeza	Valor numérico	Enquadramento
Velocidade periférica	214,31 rpm	Extra rápido
Vazão (Q)	0,02 m ³ /s	
Queda (H)	1 m	Baixo declive
Tensão	133,1 V	
Corrente	34 mA	
Velocidade de entrada	153,08 rpm	No ponto
Velocidade de saída	30,62 rpm	No ponto
Velocidade absoluta	0,01 m/s	No ponto
Torque	-0,113	Inverso

base na equação 13, com os dados da Tabela 6, a potência do gerador foi:

$$P_G = 133,1V \times 29mA \rightarrow P_G = 3859,9mW$$

$$P_G = 3,9W$$

Para verificar a eficiência da turbina usou-se a equação 12, e obteve-se:

$$n_t = \frac{P_e}{P_h} \Leftrightarrow n_t = \frac{131,95649}{147}$$

$$n_t = 0,8976632 \Leftrightarrow n_t \approx 90\%$$

Isso significa que a turbina sob uma vazão média de 0,015 m³/s em uma queda abaixo de 5 m, teve um rendimento satisfatório de cerca de 90%, valor dentro do rendimento esperado para uma turbina Francis convencional de grande porte (>85%), de acordo com Schwanke et al. (2020). Porém o rendimento da turbina em estudo poderá apresentar pequenas variações devido ao efeito da variação sazonal da vazão do rio, dos atritos entre as peças constituintes e de possíveis escoamentos turbulentos da água na turbina. Portanto, o rendimento do sistema completo foi obtido com base na equação 14.

$$n_t = \frac{3,9}{147} \Leftrightarrow n_t = 0,0265 \Leftrightarrow n_t = 2,65\%$$

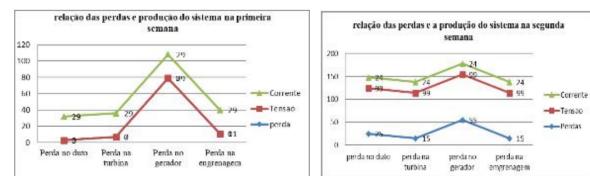
Ao levar-se em consideração as perdas por fricção, volumétricas, mecânicas e hidráulicas do reservatório a turbina, as perdas por transmissão e outros eventuais fatores, pode se afirmar que o sistema extraiu cerca 2,65% (Tabela 7).

O rendimento total de uma turbina hidrelétrica envolve o seu funcionamento em diferentes situações. De acordo com Campos (2015) Campos (2015), este rendimento é o somatório dos rendimentos úteis e as perdas. Sendo assim, na primeira semana observou-se um

ótimo desempenho do sistema, traduzidos em 34mA de corrente e uma tensão de 133,1 V. Essa energia gerada foi acompanhada por perdas: 79% de perdas no gerador, 11% nas engrenagens, 7% na turbina e 3% no ducto (Fig. 7A).

Na semana seguinte, houve uma variação na produção do sistema, tendo se registado um aumento nas perdas: 55% no gerador, 25% no ducto, 15% na turbina e 15% nas engrenagens. O aumento nas perdas culminou com a redução na produção do sistema, tendo se registrado uma tensão de 99 V e uma corrente de 24 mA (Fig. 7B).

Figura 7: Relação das perdas e a produção do sistema: a) na primeira semana; b) na segunda semana.



A perda no gerador foi mais notável, de acordo com João et al. (2021), podem ser explicadas pelas perdas por histerese magnética, perdas por corrente de *Foucault*, perdas por efeito Joule no estator e no rotor e as perdas por atrito nos rolamentos, que converte parte de energia mecânica em calor. Porém, na segunda semana foi marcada pelo aumento das perdas devido a rotura na tubulação que culminou com o aumento das perdas volumétrica e a cavitação, que de acordo com Campos (2015, p. 66), esse fenômeno ocorre sempre no interior dos sistemas hidrelétricos devido à pressão de saturação de vapor, podendo resultar numa erosão a redor da turbina, devido à pressão e o peso do dispositivo.

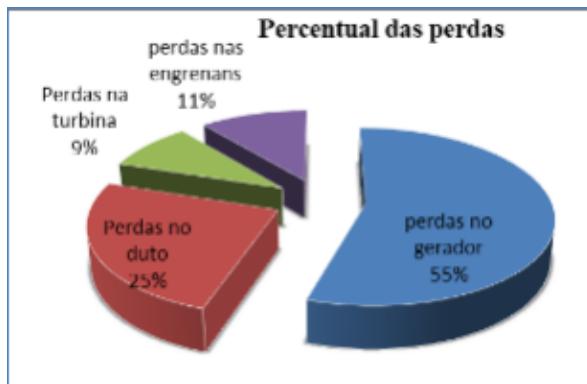
Embora as perdas volumétricas tenham aumentado na última semana, essas podem ser retificadas através da troca da tubulação. O balanço das perdas no funcionamento do sistema (Fig. 8) é mais abrangente, as per-

Tabela 7: Resumo do desempenho técnico

Designação	Grandezas				
	Potência (W)	Rendimento (%)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Velocidade (rpm)
Rio	147	100			
Turbina	132,0	90,0			100
Sistema	3,9	2,67	133,1	34	1200

das no gerador (55%), com a rotura da tubulação houve uma perda volumétrica (22%), nas engrenagens (11%), devido ao atrito e ao tamanho e as perdas na turbina (11%), devido ao atrito no rolamento e a cavitação.

Figura 8: Resumo percentual das perdas no sistema.



Os resultados obtidos (Tabela 7) foram animadores, considerando que economicamente, a construção e a montagem do sistema não apresentaram custos elevados, visto que a maioria dos materiais foram alternativos, reutilizados e de baixo custo (Tabela 8).

Analizando a tabela 7 e figura 9 verifica-se que o sistema é viável sob o ponto de vista econômico em comparação a um sistema convencional, sabendo que o valor de aquisição e manutenção de uma turbina tipo Francis é bastante elevado, variando de 20.000,00 a 40.000,00 MTn no mercado moçambicano, em função da marca e das potências geradas.

Para se saber sobre o montante economizado na geração de energia através desse sistema, multiplica-se a quantidade de energia gerada (2 kW/h por mês) pela tarifa de energia praticada em Moçambique (12,35 MT/kWh) (EDM, 2018). Assim sendo, na prática teremos uma economia de 6,16 MT/mês ou 74,10 MT/ano. Considerando que o valor total de produtos e serviços, teremos o retorno do valor em cerca de 25 anos, porém, durante o funcionamento, “*quanto maior for a demanda mensal de energia, menor será o tempo de retorno, sendo assim, mais satisfatório*” (OLIVEIRA et al., 2019, p. 451).

Quanto a viabilidade técnica e socioambiental, o sistema é viável relativamente a outros sistemas domésticos rurais usados na comunidade local, caso das velas, lenha, carvão vegetal, petróleo e seus derivados e uso de pilhas alcalinas e baterias de chumbo ácido. Ademais, as pilhas e baterias quando descartadas irregularmente podem provocar danos severos ao meio ambiente (solo, ar e águas subterrâneas e superficiais), enquanto, a vela, lenha, carvão e petróleo poluem o ambiente onde estão a ser usados e são uma das causas mais frequentes de incêndios domésticos na região.

Outros aspectos econômicos bastante importantes que podem ser levados em conta são a reprodução do protótipo, otimização de alguns componentes e a comercialização no mercado doméstico, para além da atuação como gestores e supervisores das aplicações.

Em termos técnicos, o funcionamento da turbina construída é similar ao de uma turbina Francis convencional, por isso, pode ser usada para aproveitamentos hidrelétricos, sobretudo para auxiliar nas atividades domésticas, agrícolas e comerciais, como bombeamento de água, irrigação e piscicultura. Numa outra abordagem, na área pedagógica, pode ser usada em uma aula demonstrativa sobre turbina Francis e processos de geração e transformação de energia em diversos contextos de ensino.

Quanto aos possíveis impactos ambientais, Queiroz et al. (2013, p. 2782), considera “Impacto ambiental num sistema hidroelétrico resume-se em toda mudança das características físicas, biológicas ou químicas do meio ambiente, gerada pelo sistema que cause danos à sociedade e ao meio ambiente”. Nesta ótica, durante a implantação e o funcionamento do sistema foram observados alguns impactos ambientais, tais como: ruídos, mudança da paisagem e pode ter ocorrido certa perda da vida aquática. Porém, não se verificou migração da comunidade local para dar espaço a montagem do sistema e a área implantada o sistema pode ser usado para prática de agricultura ou outras práticas que eram realizadas anteriormente. Para a comunidade, tem uma importância em melhorar o acesso aos serviços energéticos que possibilitarão melhorar as condições de vida.

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tabela 8: Gastos realizados na realização do trabalho

Material	Valor gasto	Serviços		Valor gasto (MTn¹)	Total (MTn)
Chapa metálica	Reutilizado	Serralheiro	Soldar as pás no rotor	300,00	1.850,00
Chapa de zinco			Soldar a base do rotor	300,00	
Tubo cilíndrico		Latoeiro	Base do multiplicador	250,00	
Carretos demotorizada			Montar a caixa espiral	300,00	
Varão roscado	500,00	Latoeiro	Tubulação	250,00	
Parafusos	150,00		Mobilidade	0,00	
Rolamento	300,00	Voluntários	Limpeza no local	0,00	
Cabos de baixada	210,00		Guarda	Controlar o sistema	500,00
Bobina induzida	500,00	Reutilizado			
Imã					
Lâmpadas	Reutilizado				
Sacos					
Tintas	300,00				

¹ Metical (MTn) é a moeda oficial de Moçambique. Sendo 1 dólar estadunidense equivalente a 74,6 MTn.

Fonte: <[http://www.bancomoc.mz/fm\\$_\\$mercadosmmi.aspx?id=10](http://www.bancomoc.mz/fm$_$mercadosmmi.aspx?id=10)>, acesso em 10/09/2021

5 CONCLUSÃO

O sistema construído apresentou um desempenho satisfatório, por funcionar e permitir o alcance dos objetivos da pesquisa. No quadro do desenvolvimento socioeconômico, a turbina Francis construída a partir de materiais alternativos, permite a geração de energia elétrica para uso doméstico através de pequenos potenciais hídricos, tendo convertido a potência hídrica disponível de 147 W do rio Muatala a uma potência mecânica de 133 W, que quando conectando a um gerador elétrico alcançou uma tensão de 131,95 V e 34 mA de corrente elétrica, suficiente para residências de baixa demanda energética.

No âmbito das condicionantes de gestão ambiental e conservação da Natureza, o sistema construído apresenta baixos impactos socioambientais negativos e devido ao seu tamanho, pode ser implantado próximo às comunidades sem necessidade de instalação dos sistemas complexos de distribuição, para além de não haver deslocamento da população para dar lugar a usina, porém, impulsiona a atração turística local.

Conclui-se que o sistema construído é sustentável sob o ponto de vista social, econômico e ambiental, podendo ser usado ainda para gerar energia em pequena escala nas zonas periurbanas, rurais e com acesso a REN na província e distrito de Nampula.

REFERÊNCIAS

ALER. Energias renováveis em Moçambique: Relatório Nacional do ponto de situação. 2.

ed. Maputo: Associação Lusófona de Energias Renováveis, 2017.

BRAGA, D. D. S.; COELHO, D. F.; SOEIRO, N. S.; MELO, G. S. V.; SANZ, J. P. M. Construção de modelo numérico de uma turbina francis utilizando mvf em regime permanente com validação a partir de dados operacionais. In: **VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: CITENEL, 2015.

CAMPOS, M. C. **Máquinas Hidráulicas**. 1. ed. Curitiba: UFPR, 2015.

EDM. **Estratégias da EDM 2018-2028**. 1. ed. Maputo: Electricidade de Moçambique E.P, 2018.

FORTES, A. G.; MUTENDA, F. M.; RAIMUNDO, B. Energias renováveis em moçambique: disponibilidade, geração, uso e tendências futuras. **Revista Brasileira Multidisciplinar (ReBram)**, Universidade de Araraquara (Uniara), v. 23, n. 1, p. 7–28, 2020.

FUNAE. Potencial solar e hídrica em moçambique. In: **Atlas: Energias renováveis em Moçambique**. Maputo: FUNAE Fundo de Energia, 2020. p. 34–45.

JOÃO, A. A.; FORTES, A. G.; CHAU, M. J.; RICHADE, C. P.; ALFACE, P. B.; FERNANDO, E. T. Sustentabilidade socioambiental e impactos na geração elétrica nos pequenos potenciais hídricos do rio muatala, nampula – moçambique. In: SILVEIRA, J. H. P. (Ed.). **Meio Ambiente, Sustentabilidade e**

GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA TURBINA FRANCIS PARA O USO RESIDENCIAL

Tecnologia. 1. ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2021. v. 7, p. 110–126.

NHAMIRE, B.; MOSCA, J. **Electricidade de Moçambique: mau serviço, não transparente e politizada.** 1. ed. Maputo: Centro de Integridade Pública de Moçambique, 2014.

OLIVEIRA, C. A.; SILVA, T. A.; MARTELLI, A.; SAMUDIO, E. M. M.; MARCHEZAN, A. R. P. Energia sustentável para consumo residencial: eólica versus fotovoltaica. **Revista Faculdades do Saber**, v. 4, n. 7, p. 441–454, 2019.

QUEIROZ, R.; GRASSI, P.; LAZZARE, K.; KOPPE, E.; TARTAS, B. R.; KEMERICH, P. D. da C. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental**, v. 13, n. 13, p. 2774–2784, 2013.

SCHWANKE, C. M.; SILVA, I. A. C.; GOULART, V. S.; MENESSES, S. M.; IMTHON, N. D.; BAESSO, M. H.; CRUZ, J. A. S.; PEREZ, E. R.; SANTOS, M. F. P. Hidroenergia: Análise do comportamento de uma turbina francis para aproveitamento hidrelétrico em pchs. In: TULLIO, F. B. M. (Ed.). **Pesquisas Científicas e Inovação Tecnológica nas Engenharias**. 2. ed. Ponta Grossa: Editora Atena, 2020. p. 20–33.