







Pequena turbina a vapor operando em baixa pressão para geração de energia elétrica na Amazônia

Pequena turbina a vapor operando em baixa pressão para geração de energia elétrica na Amazônia

Davi Cavalcante de Oliveira1 , Jerson Rogério Pinheiro Vaz1 , Marcelo de Oliveira e Silva1 ,
Edson Bruno Soares de Abreu1 , Marcos André Barros Galhardo2 , Para Leon Ferreira de Araújo2 

1 Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Belém, PA, Brasil.

2 Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas. Belém, PA, Brasil.

e-mail: davi.cavalcante@ufpa.br, jerson@ufpa.br

RESUMO

Na Amazônia, a produção local de energia elétrica é muito importante devido ao grande número de comunidades isoladas, geralmente distantes da rede convencional. Nesse contexto, as turbinas a vapor são tecnologias relevantes a serem utilizadas na região, uma vez que a biomassa está amplamente disponível em diversas comunidades, inclusive, onde ocorrem atividades agrícolas sustentáveis como a utilização do caroço do açaí, bagaço de cana, entre outros. Atualmente, não existem muitos estudos relevantes na literatura para pequenas turbinas a vapor operando em baixa pressão, condicionadas à realidade da região amazônica. Assim, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um estudo experimental de uma pequena turbina a vapor operando em baixa pressão, a fim de aplicá-la a pequenas demandas de energia, tipicamente encontradas na região. Desenvolvemos medições do comportamento das potências mecânica e elétrica em relação à velocidade de rotação do eixo da pequena turbina a vapor, levando em consideração as pressões de 0,1, 0,2 e 0,3 MPa. Concluímos que o levantamento experimental preliminar, feito neste trabalho, demonstra um bom comportamento mecânico da pequena turbina e pode ser uma alternativa para o sistema de geração de energia elétrica suprir pequenas demandas em comunidades isoladas na Amazônia, aproveitando a biomassa oriunda de atividades agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: Turbina a vapor; caldeira; combustor ciclônico; gerador magnético permanente.

ABSTRATO

Na Amazônia, a produção local de energia elétrica é muito importante devido ao grande número de comunidades isoladas, geralmente distantes da rede convencional. Nesse contexto, as turbinas a vapor são tecnologias relevantes a serem utilizadas na região, uma vez que a biomassa residual está amplamente disponível em diversas comunidades, além disso, onde ocorrem atividades agrícolas sustentáveis, como o aproveitamento do caroço do açaí, bagaço da cana, entre outras. Atualmente, não existem muitos estudos relevantes na literatura para pequenas turbinas a vapor operando em baixa pressão, condicionadas à realidade da região amazônica. Assim, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um estudo experimental de uma pequena turbina a vapor operando em baixa pressão, a fim de aplicá-la a pequenas demandas de energia, tipicamente encontradas na Amazônia. Desenvolvemos medições do comportamento das potências mecânica e elétrica em relação à velocidade de rotação do eixo da pequena turbina a vapor, levando em consideração as pressões de 0,1, 0,2 e 0,3 MPa. Concluímos que o levantamento experimental preliminar, feito neste trabalho, demonstra um bom comportamento mecânico da pequena turbina e pode ser uma alternativa para o sistema de geração de energia elétrica suprir pequenas demandas em comunidades isoladas na Amazônia, aproveitando a biomassa proveniente de atividades agrícolas sustentáveis.

Palavras-chave: Turbina a vapor; Caldeira; Combustor ciclônico; Gerador de ímã permanente.



1. INTRODUÇÃO

A Amazônia possui um enorme potencial de biomassa, representando uma importante fonte a ser utilizada em sistemas térmicos para geração de energia elétrica. Por exemplo, o fruto do açaí, que após ser consumido pela população, muitas toneladas de caroço de açaí são descartadas de forma inadequada todos os dias na natureza. Além disso, partes consideráveis da região amazônica ainda carecem de acesso a serviços de eletricidade, em grande parte devido às longas distâncias a serem percorridas, bem como à topografia desafiadora [1–3].

Assim, os sistemas combinados de calor e energia, que são chamados de sistemas de cogeração de energia, são equipamentos muito eficazes, que geram tanto energia elétrica quanto energia térmica [4]. Além disso, tecnologias que incluem pequenos sistemas térmicos baseados em biomassa são soluções interessantes para melhorar a eletrificação brasileira em áreas remotas [5]. Simultaneamente, podem minimizar os impactos ambientais negativos decorrentes dos resíduos das atividades agrícolas. Segundo SLOUGH *et al.* [6], este tipo de sistema contribui para a eletrificação rural e serviria ao objetivo do desenvolvimento socioeconômico. O acesso melhorado à eletricidade pode alimentar as indústrias rurais, aumentar a produtividade agrícola e proporcionar às famílias um tempo mais produtivo para estudar e trabalhar à noite.

Especificamente, uma turbina a vapor é um dispositivo mecânico que converte energia térmica em vapor pressurizado em trabalho mecânico útil, e são os dispositivos mais populares para geração de eletricidade devido à maior eficiência térmica e relação peso-potência em vários tipos de energia convencionais, nucleares ou outros. plantas [7, 8]. Cada seção da turbina consiste em um conjunto de pás móveis conectadas ao rotor e um conjunto de palhetas estacionárias nas quais o vapor é acelerado a alta velocidade [9]. Essas turbinas têm velocidade de rotação adequada para conectar geradores elétricos.

As turbinas a vapor usadas como acionadores de processo geralmente precisam operar em uma faixa de velocidades, em contraste com uma turbina usada para acionar um gerador elétrico, que funciona a uma velocidade quase constante [10, 11]. Eles também são usados como parte constituinte de usinas de ciclo combinado, em várias aplicações marítimas ou offshore, bem como para acionar vários consumidores de energia mecânica que não são geradores elétricos [12].

Normalmente, a turbina a vapor consiste em três tipos, alta, média e baixa pressão e pode gerar de 750 W em pequenas unidades, até 1.900 MW em grandes usinas [7, 13]. Além disso, tais turbinas utilizam fontes renováveis, contribuindo para a não dependência da energia fóssil utilizada na maior parte da região amazônica, aumentando a oferta no país [14, 15].

Várias comunidades na Amazônia têm baixa demanda de energia elétrica, tornando importante a utilização de pequenas turbinas a vapor [3], pois operam em baixa pressão. Alguns estudos foram desenvolvidos por SÁNCHEZ *et al.* [1], VAN ELS *et al.* [5], PLOVNIK [16] e PINHEIRO *et al.* [17] sobre eletrificação na Amazônia. Mas, apenas a pesquisa de MACÊDO *et al.* [3] apresenta dados experimentais de uma microturbina a vapor combinada a uma caldeira vertical com capacidade de vapor de 150 kg por hora e pressão máxima de 0,98 MPa, utilizando um gerador de corrente contínua de 12 V e 500 W. Em seus estudos, os testes são realizados em dois dias diferentes, obtendo resultados médios de 565 Wh para consumo de energia, 207 W para energia elétrica e 0,34 MPa para pressão de caldeira. Além disso, o estudo mostrou um alto consumo específico de biomassa, atingindo um valor médio de 706 kg de vapor por kWh.

Segundo MEDICA-VIOLA *et al.* [12], poucos trabalhos estão disponíveis na literatura sobre turbinas a vapor, incluindo seus componentes ou outros dispositivos, que garantem uma operação estável, confiável e eficiente de toda a usina. Alguns desses estudos são análises energéticas, exergéticas, econômicas ou ambientais, mas nenhum trata de pequenas demandas aplicadas à agricultura sustentável na Amazônia, principalmente usando biomassa regional.

Nesse contexto, são necessários mais estudos que investiguem o desempenho da microturbina a vapor para geração de energia elétrica, a fim de atender a demanda real de comunidades isoladas, bem como contribuir para a sustentabilidade da Amazônia. A eficiência de pequenos sistemas de turbinas a vapor deve ser melhorada. O principal desafio na região é que a maioria dos sistemas térmicos utilizados ainda são termogeradores a diesel, cujo combustível é extremamente poluente [18]. Portanto, é necessário avaliar pequenos sistemas térmicos utilizando biomassa, operando em condições de baixa pressão e baixa rotação, permitindo unidades geradoras mais baratas, compactas e seguras.

Então, a investigação experimental realizada neste trabalho é importante para o estado da arte atual, pois atende às necessidades de regiões isoladas como na Amazônia. Os resultados aqui obtidos são relevantes para avaliar o desempenho de pequenas turbinas a vapor de baixa pressão para geração de energia elétrica na região, principalmente em comunidades rurais isoladas. Esses tipos de turbinas a vapor podem contribuir significativamente para o reaproveitamento da biomassa residual gerada na região, minimizando os impactos ambientais principalmente das pequenas atividades agrícolas.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um estudo experimental do desempenho de uma pequena turbina a vapor a baixa pressão, acoplada a uma caldeira com combustor ciclônico utilizando biomassa regional. É empregado um gerador magnético permanente de 1 kW aplicado a pequenas demandas, o que é uma boa contribuição para esta pesquisa, pois trabalha em baixa rotação e alto torque. Adicionalmente, o trabalho avalia o comportamento das potências mecânica e elétrica em relação à velocidade de rotação do eixo da turbina a vapor para pressões de 0,1,

0,2 e 0,3 MPa. Neste caso, um banco de carga com resistência equivalente de 2,4 Ω é utilizado para simular a carga elétrica. Como resultado, para uma pressão de trabalho de 0,3 MPa, a turbina apresentou boa estabilidade, podendo gerar energia de forma confiável. Além de caracterizar o calor específico e umidade superiores da biomassa utilizada neste estudo, também, investiga a eficiência do gerador elétrico em condições de teste.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar o desempenho da pequena turbina a vapor operando em baixa pressão, detalhes de suas características são descritos nesta seção, bem como o aparato experimental utilizado na montagem da bancada. A caracterização da biomassa com base no European Committee for Standardization Solid Biofuels – ECS/SB: CEN/TS 14774-1:2004 também é detalhado [19].

2.1. Características operacionais da turbina a vapor

A análise experimental é realizada na Turbina comercial a vapor COPPUS, Tipo RLA [20], modelo RL12L, que é fabricada para sistemas de pequeno porte. É constituído por um único estágio e caracterizado como uma turbina de fluxo horizontal, cuja condição nominal de operação é de 50 kW de potência, velocidade angular de 3000 rpm, pressão máxima de vapor de 0,965 MPa a uma temperatura de 511 K. A Figura 1 ilustra a turbina a vapor de acordo com seu manual de instruções, apontando o flange de exaustão na carcaça, flange de entrada e quatro válvulas manuais na tampa, permitindo uma operação flexível e controlada [21, 22].

Esta turbina a vapor é escolhida porque é comumente usada em sistemas de vapor para geração de eletricidade. Porém, o maior problema na utilização desse tipo de turbina é a necessidade de uma caldeira grande para atingir altas pressões de vapor, o que costuma ser complexo. Neste trabalho, a principal contribuição é a adaptação desta turbina a vapor a uma pequena e simples caldeira de combustão ciclônica conforme descrito a seguir.

O princípio básico de operação da turbina vem da força de impulso dos jatos de vapor de alta pressão que entram pelo flange e passam por quatro pequenos bicos dentro da tampa, cada um com cerca de 0,01 m conforme mostrado na Figura 1. Em seguida, o fluido atinge o primeiro série de pás do rotor passando pelo estator, invertendo a direção do fluxo para o segundo conjunto de pás móveis, girando assim o eixo da turbina e saindo do flange de exaustão.

Na frente do rotor estão 78 pás com altura de 0,01 m e na traseira 98 pás com 0,016 m de altura, ambas confeccionadas em formato côncavo e aço inox [21].

2.2. Configuração de bancada de teste experimental e análise de sistema

A bancada está instalada no Laboratório de Energia e Meio Ambiente, no Departamento de Engenharia Mecânica (LABEM) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A Figura 2 ilustra uma pequena turbina a vapor conectada a uma caldeira combustor ciclônica (Figura 2A) com um gerador elétrico de ímã permanente de 1 kW fabricado

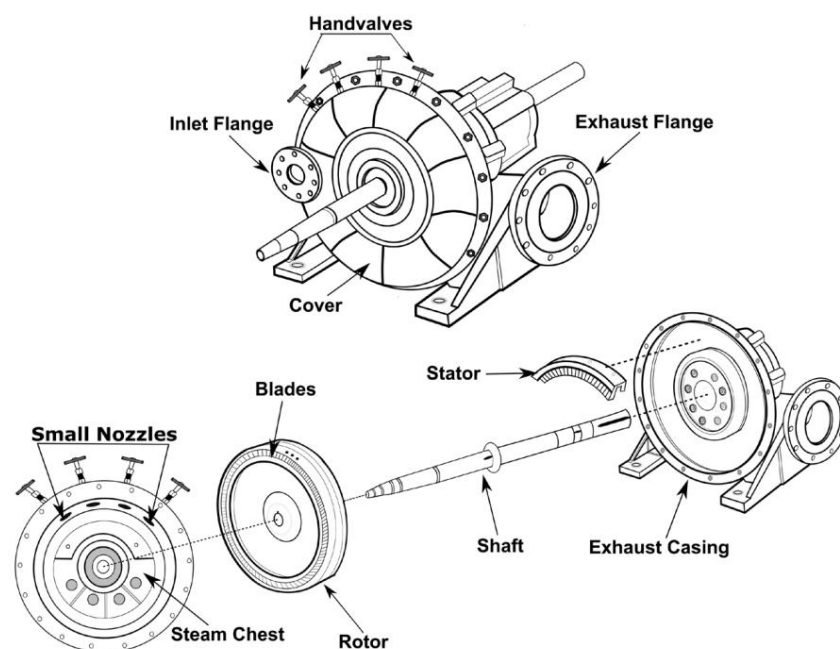


Figura 1: Ilustração da turbina a vapor adaptada do RLA Turbine Instruction Manual [21].



Figura 2: A bancada experimental utilizada no estudo, caldeira de combustão ciclônica e turbina a vapor (A), gerador elétrico de ímã permanente e turbina a vapor (B) e banco de cargas resistivas (C).

pela Indústria ENERSUD (Figura 2B) e um banco de carga (Figura 2C). Este sistema funciona em ciclo aberto sem a utilização de condensador. O vapor úmido é eliminado através do flange de exaustão da turbina direto para o meio ambiente, não havendo impacto ambiental.

A caldeira é integrada com o conceito de combustor ciclônico, escalonado juntamente com uma mistura mais eficiente com oxidante [23]. Um combustor ciclônico consiste em um fluxo rotacional dentro de uma câmara cilíndrica, onde o combustível sólido particulado em combustão segue um movimento ciclônico causado pela injeção tangencial de ar de fora do ambiente para dentro do combustor através de um ventilador. ZARZYCKI *et al.* [24] e CAR NEIRO *et al.* [25] descrevem a estrutura dessa tecnologia estudada com mais detalhes. A principal diferença entre a caldeira utilizada neste trabalho e a comercial, é a “parede de água”. Significa que o combustível queima enquanto realiza movimento tangencial em relação ao eixo-linha do combustor, trocando o calor com a água que escoar para fora da parede do reator. Esta tecnologia permite uma chama estável ao longo da zona de combustão com uma mistura mais eficiente do combustível com o oxidante, atingindo altos valores de eficiência de combustão em torno de 98,4% a 99,6% [25].

O gerador elétrico é responsável por produzir a eletricidade a partir da energia mecânica, ele funciona por indução eletromagnética [26]. Como o presente trabalho tem como objetivo avaliar um pequeno sistema de vapor a baixa pressão, é necessário utilizar um gerador de ímãs permanentes, pois os geradores elétricos mais comuns requerem altas rotações para produzir energia [27]. Segundo FARIAS *et al.* [28] e MOREIRA *et al.* [29] os geradores síncronos de ímãs permanentes têm suas vantagens em relação às bobinas de campo (geradores convencionais), pois simplificam a tecnologia, além de possuírem menor volume, menor rotação e maior eficiência operacional. O gerador utilizado neste estudo é um alternador trifásico desenvolvido e patenteado pela empresa ENERSUD, que permite o aproveitamento de energia em condições desfavoráveis aos alternadores disponíveis no mercado, uma vez que os geradores de ímãs permanentes trabalham em baixa rotação e alto torque [29]. Neste trabalho, o modelo de alternador EN2 da ENERSUD é usado. Este alternador pode gerar potência de até 1 kW para uma tensão de saída nominal de 48 V.

A especificação básica do gerador de ímã permanente utilizado consiste em bobinas de fio enrolado com estator torcido, fluxo axial bidirecional e excitação fornecida por ímãs permanentes dispostos em estruturas de disco giratório. Cada conjunto é distribuído em dois discos metálicos, que constituem o rotor do gerador. As principais características deste alternador são: baixa resistência de partida, alto rendimento, robustez mecânica, resistência à corrosão, baixo peso e alto torque em baixas rotações. O gerador é empregado em conjunto com um retificador e um banco de carga resistiva, que é ajustado para 2,4 Ω para simulação de carga elétrica. O gerador é testado em bancada desenvolvida no laboratório do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da UFPA [30]. A metodologia utilizada para obtenção da curva de eficiência do gerador é a mesma descrita no estudo de FARIAS *et al.* [28] devido à falta de dados experimentais sobre a eficiência do gerador por parte do fabricante. O sistema consiste basicamente de um motor de indução trifásico para simular a rotação do rotor da turbina, que é acoplado mecanicamente ao gerador elétrico de ímã permanente de 1 kW.

O inversor de frequência (variador de velocidade) controla a variação da velocidade angular do motor elétrico. Transdutores de tensão e corrente são conectados ao retificador na saída do gerador; um codificador magnético para medição de velocidade; um computador para monitorar as medições e controlar o inversor de frequência; uma placa de aquisição de dados, que vem das medições feitas pelos transdutores; e um banco de cargas resistivas com ligação a um disjuntor. O controle do inversor de frequência é feito através de uma ferramenta computacional desenvolvida em ambiente LabVIEW. Para este trabalho, um analisador de energia Fluke 434/série II é utilizado para inferir o torque mecânico aplicado ao eixo do gerador, bem como sua eficiência, conforme ilustrado na Figura 3. Assim, os resultados de eficiência do gerador, potência elétrica e a potência mecânica são calculadas e tratadas usando o software MATLAB.

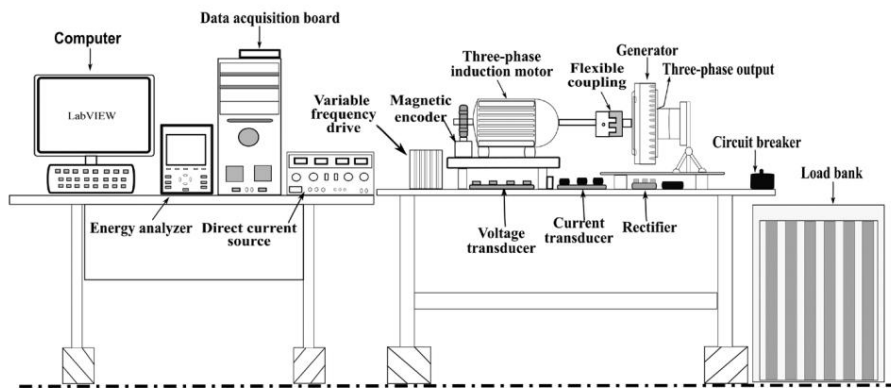


Figura 3: Ilustração da montagem experimental para testar a eficiência do gerador.

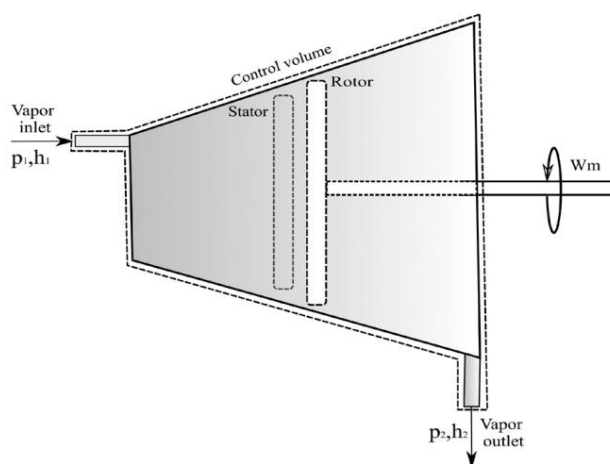


Figura 4: Ilustração do volume de controle da turbina a vapor.

Todos os testes de eficiência do gerador são desenvolvidos para carga elétrica de 2,4 \dot{y} e rotações do eixo ($\dot{y} = \dot{y}n/30$), onde n está na faixa de 90 a 600 rpm. Os mesmos valores correspondem aos estudos experimentais da turbina a vapor em operação.

As medições experimentais são realizadas utilizando os seguintes instrumentos: uma foto digital e tacômetro de contato: modelo MDT-2238A marca Minipa, para medir a velocidade de rotação do eixo da turbina (\dot{y}). Neste trabalho é proposta a Equação 1 para estimar o rendimento do gerador, visto que o fabricante não forneceu o rendimento do gerador. Esta equação permite um bom ajuste com os dados experimentais, conforme mostrado a seguir, onde k_1 e k_2 são parâmetros determinados por análise de regressão, em que $k_2 < 2\dot{y}1,2$.

$$g = k_1 1n \cdot 12 \frac{k_2}{2} \quad (1)$$

Um osciloscópio digital portátil de 4 canais: marca Fluke 190-204 para medição de corrente elétrica, tensão e potência elétrica. Além disso, um manômetro Bourdon é usado para medir a pressão de saída da caldeira. Assim, a potência mecânica da turbina (W_m) é calculada pela Equação 2, onde W_e é a potência elétrica e $\dot{y}g$ é a eficiência do gerador.

$$EM_m = \frac{EM_o}{g} \quad (2)$$

Considerando o volume de controle da turbina a vapor mostrada na Figura 4, a eficiência isentrópica pode ser calculado. Para isso, adotamos as seguintes hipóteses:

- (1) O estado do fluido sendo admitido nesta turbina e a pressão de saída são fixados para cada condição operacional condição;
- (2) A transferência de calor entre a turbina e a vizinhança, efeitos de energia cinética e potencial são desprezados;
- (3) Regime de estado estacionário.

Assim, segundo DIXON e HALL [31] os balanços de massa e energia são reduzidos de forma a dar o trabalho produzido por unidade de massa que passa pela turbina. Como a diferença entre a entrada e a saída de energias cinéticas são pequenas, a saída de trabalho máxima ideal é expressa pela Equação 3.

$$\frac{EM_h}{\dot{m}} = h_1 - h_{2s} \quad (3)$$

A expansão através da turbina leva a $h_2 > h_{2s}$, portanto menos trabalho que o máximo é produzido, conforme descrito no diagrama hs da Figura 5. Desta forma, a Equação 4 define a eficiência isentrópica da turbina a vapor (η_t).

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (4)$$

A questão principal para calcular a eficiência isentrópica é a determinação de h_{2s} . No presente trabalho, é utilizada a expressão proposta por DIXON e HALL [31] para uma variação finita de entalpia em um processo a pressão constante, que é dada pela Equação 5.

$$h_2 - T_{2s} = (h_1 - T_{2s}) \exp\left(\frac{s_2 - s_1}{T_{2s}}\right) \quad (5)$$

Neste caso, de acordo com a Figura 5, $s_{2s} = s_1$, assim a Equação 5 se reduz à Equação 6.

$$h_{2s} - T_{2s} = (h_1 - T_{2s}) \exp\left(\frac{s_1 - s_2}{T_{2s}}\right) \quad (6)$$

2.3. caracterização da biomassa

O processo de caracterização consiste em analisar a biomassa para descobrir sua composição química e a energia contida em sua matéria. Esta informação é usada para comparar qualitativa e quantitativamente biomassas de diferentes tipos e condições, além de fornecer informações necessárias para realizar o dimensionamento do reator [19, 32]. Esse processo também é realizado no LABEM da UFPA, onde, primeiramente, a biomassa é colocada em um moedor de lâmina Ika werke A11 basic para reduzir o tamanho do material a ser analisado, transformando-o em pó, pois deve ser de baixo grão tamanho.

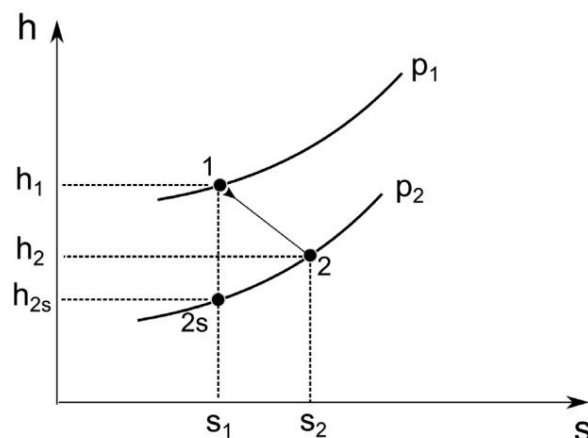


Figura 5: Ilustração do diagrama hs da turbina a vapor.

O equipamento utilizado na análise necessita apenas de uma pequena quantidade de amostra. A biomassa é levada a uma estufa de secagem (Odontobrás, modelo EL 1.4) para retirar toda a umidade superficial da biomassa. É comum, neste tipo de análise, a utilização de materiais secos (base seca). A análise do teor de umidade em porcentagem (U%) é dada pela diferença de massa entre a biomassa fresca (antes da estufa de secagem) e a biomassa seca (após a estufa de secagem). Este método consiste em colocar 0,001 kg de amostra de biomassa úmida em um cadinho calcinado, medir sua massa em uma balança e, em seguida, colocá-la na estufa de secagem a 378,15 K. Em seguida, é necessário pesá-la durante 2, 3 e 4 horas. A taxa de umidade em percentual U(%) é obtida através da Equação 7 (baseada no Comitê Europeu de Padronização de Biocombustíveis Sólidos – ECS/SB: CEN/TS 14774-1:2004 [19]).

$$EM(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \left(\frac{m_3}{m_1} \right) \quad (7)$$

onde m_1 é a massa do cadinho vazio; m_2 é a massa da amostra úmida; m_3 é a massa do cadinho vazio mais a amostra após a estufa de secagem e U(%) é a taxa de umidade da amostra original [19, 32].

Assim, parte da amostra é colocada em uma bomba calorimétrica, equipamento utilizado para obtenção do Poder Calorífico Superior (PCS) da biomassa. Nos experimentos realizados neste trabalho, é utilizada a bomba calorímetro modelo C2000 do fabricante Ika Werke. O SCP é uma propriedade intrínseca do material que informa a quantidade de energia contida na amostra, geralmente expressa em kJ.kg⁻¹. Neste processo de caracterização é efetuado um conjunto de análises para obtenção quantitativa de valores de humidade, com base na ECS – BS EN 14918:2009. Para o cálculo do SCP da biomassa, medições triplas são realizadas inserindo quantidades de cerca de 5,217 × 10⁻⁴ kg, 5,531 × 10⁻⁴ kg e 5,319 × 10⁻⁴ kg de amostra seca em um cadinho de metal.

Este invólucro de metal foi colocado em um recipiente de água com temperatura monitorada. O material é ativado por um sistema de eletrodos com um pavio ligado à biomassa dentro do cadinho. Depois disso, o material pegou fogo e o ambiente rico em oxigênio faz com que o material queime completamente. O calor liberado durante a combustão do material é transferido para o banho, sendo quantificado pela diferença de temperatura da água, então, o equipamento calcula automaticamente o SCP médio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Eficiência do gerador

Para a carga elétrica (2,4 ħ) utilizada durante os testes de bancada, nota-se que o rendimento máximo (42%) do gerador ocorre para uma rotação do eixo (ŷ) próxima a 600 rpm, conforme resultados obtidos no estudo experimental do gerador de ímãs permanentes com potência nominal de 1 kW apresentado na Tabela 1. São medidos e calculados os valores de potência elétrica ativa e potência mecânica estimada do motor trifásico. Dessa forma, os resultados da eficiência do gerador são obtidos pelo quociente dessas duas grandezas, respectivamente.

A velocidade rotacional máxima possível durante as medições é de 600 rpm, devido ao alto torque aplicado ao eixo do motor para vencer a carga elétrica resistiva. Como consequência, o conversor de frequência para o motor como proteção. Tal proteção ocorre sempre que o motor opera sob corrente de sobrecarga. Por este motivo, o sistema não consegue obter resultados para rotações de eixo superiores a 600 rpm. Assim, a eficiência do gerador elétrico é adotada entre 16 e 42%, levando em consideração os valores estimados apresentados na Figura 6 para calcular as potências elétrica e mecânica da turbina a vapor. Como dito anteriormente, a turbina a vapor opera com uma caldeira de combustão ciclônica de 44% de eficiência térmica [25], permitindo que ela opere em baixas pressões.

Tabela 1: Medições do gerador de ímãs permanentes para 2,4 ħ.

POTÊNCIA MECÂNICA ESTIMADA (EM)	ENERGIA ELÉTRICA ATIVA (EM)	EFICIÊNCIA DO GERADOR (%)
79,3	12,7	16
119,9	34,6	29
179,0	60,2	33
247,6	92,4	37
915,5	370,3	40
1.352,5	567,4	42*

(*) Eficiência máxima do gerador para condições de teste.

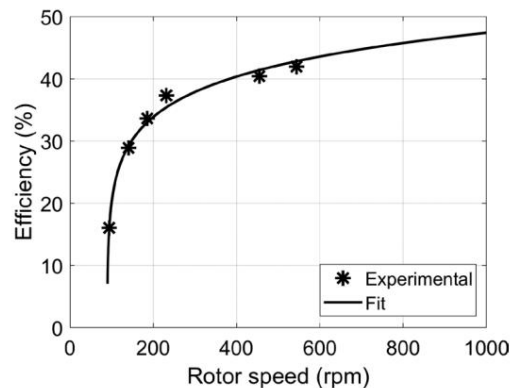


Figura 6: Curva de eficiência do gerador para uma carga elétrica de 2,4 Ω .

3.2. O teste experimental da turbina

Para avaliar o comportamento da pequena turbina a vapor sem carga elétrica, primeiro uma pressão constante de 0,2 MPa é ajustada no sistema de vapor. Neste caso, a turbina começa a girar a 160 rpm para 12 V (tensão de saída do retificador) com a válvula de entrada ligeiramente aberta. Quando a válvula está totalmente aberta, a rotação da turbina atinge 1200 rpm e 100 V, utilizando 250 kg de biomassa.

A segunda medição é feita considerando o gerador de ímãs permanentes de 1 kW com uma carga elétrica resistiva de 2,4 Ω . O funcionamento da turbina é acionado pela caldeira de combustão ciclônica utilizando a biomassa popularmente chamada de *Andira-uxi*, que é cientificamente chamada de *Andira inermis* da família *das fabaceae* – *W. Wirght DC*. Esta biomassa tem domínios fitogeográficos na Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica do Brasil [33-35]. É coletado no campus da UFPA e 216 kg de toras pequenas com 33,56% de umidade e SCP médio de 17404 kJ.kg⁻¹ são colocados no forno da caldeira.

A caldeira gastou 3 horas de queima de biomassa para obter a pressão nominal de operação para realizar as medições, utilizando o insuflador (ventilador da caldeira) em velocidades angulares de 600 a 1200 rpm. Após este período, o sistema foi trabalhado por 2,5 horas em condições nominais. A válvula é aberta gradativamente para aumentar a vazão de vapor para cada pressão estudada em intervalos de 30 s, nos quais é marcada a velocidade de rotação da turbina para a respectiva tensão, corrente e potência elétrica.

Conforme mostrado na Tabela 2, três testes são realizados para estudar a turbina a vapor sob carga elétrica. Na primeira, a caldeira opera a uma pressão de 0,1 MPa, onde a rotação inicial da turbina a vapor é de 82 rpm, atingindo rotação máxima de 290 rpm com a válvula de controle totalmente aberta. O gerador atingiu potências elétricas de 6,70 W (mínima) e 119,00 W (máxima), correspondendo às potências mecânicas de 39,05 W e 288,00 W, respectivamente.

Depois disso, o sistema funcionou a uma pressão de 0,2 MPa. A turbina começou a girar quando a válvula da caldeira é aberta. A velocidade rotacional inicial é de 63 rpm, que é aumentada gradativamente até 368 rpm (válvula totalmente aberta), gerando potência mecânica de 36,50 a 443,24 W. As potências elétricas geradas para esta condição são de 3,30 a 197,072 W.

Finalmente, a turbina é testada para uma pressão de 0,3 MPa, onde a velocidade de rotação inicial está na faixa de 110 rpm (mínimo) a 586 rpm (máximo). As respectivas potências mecânicas estão na faixa de 67,82 a 1396,80 W, gerando potências elétricas entre 14,75 e 504,60 W.

Para mostrar a eficiência isentrópica da turbina a vapor, a Equação 4 é aplicada apenas para os valores máximos da potência mecânica descritos na Tabela 2. Todos os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 3. A eficiência isentrópica para cada valor máximo da potência mecânica é: 25,7, 25,9 e 26,2%, respectivamente. Este resultado demonstra que a eficiência da turbina a vapor é pequena quando operando em baixa pressão. Assim, presume-se que esta turbina pode atingir maior eficiência para alta pressão. Além disso, a otimização das pás das turbinas a vapor é interessante porque o rotor da turbina pode ser adaptado para condições reais de baixa pressão, sem aumentar o número de estágios, pois pode tornar a turbina complexa e cara.

A Figura 7 mostra as curvas de tendência de potência elétrica (A) e mecânica (B) para uma pressão de 0,1 MPa plotadas para uma velocidade rotacional variando de 80 a 300 rpm, conforme dados da Tabela 2. Na faixa de 80 a 200 rpm, percebe-se uma pequena vibração no eixo da turbina, que promoveu uma leve instabilidade na rotação da turbina quando submetida à carga elétrica, mesmo para a vazão máxima de vapor da caldeira. Após 200 rpm, o sistema apresenta um comportamento estável, oferecendo um bom desempenho termodinâmico da turbina a vapor, suficiente

**Tabela 2:** Resultados experimentais para a turbina a vapor e o gerador de imã permanente para 0,1 MPa, 0,2 MPa e 0,3 MPa.

VELOCIDADE DO ROTOR (rpm)	ENERGIA ELÉTRICA (W)	POTÊNCIA MECÂNICA (W)
PRESSÃO = 0,1 MPa		
82	6,7	39,0
206	56,7	165,2
238	81,3	217,2
244	80,9	213,1
267	104,7	263,2
287	116,9	284,2
290	119,0	288,0
PRESSÃO = 0,2 MPa		
63	3,3	36,5
128	21,0	85,8
270	107,0	267,5
357	184,8	417,9
368	197,1	443,2
PRESSÃO = 0,3 MPa		
110	14,7	67,8
170	40,0	132,5
216	69,0	195,2
286	118,6	288,7
364	197,1	444,2
451	299,0	675,6
515	399,90	961,1
570	464,8	1236,4
586	504,6	1396,8

Tabela 3: Parâmetros usados para calcular a eficiência isentrópica da turbina a vapor para potência mecânica 288 W, 443,2 W e 1396,8 W.

PARÂMETRO	ENTRADA	TOMADA
POTÊNCIA MECÂNICA = 288 W		
Temperatura (K)	372,7	368,7
Pressão (MPa)	0,1	0,086
Entalpia (kJ/kg)	2675,5	2669,2
Entropia (kJ/kgK)	7.3594	7.4084
POTÊNCIA MECÂNICA = 443,2 W		
Temperatura (K)	393,3	386,7
Pressão (MPa)	0,2	0,163
Entalpia (kJ/kg)	2706,7	2697,0
Entropia (kJ/kgK)	7.1271	7.1982
POTÊNCIA MECÂNICA = 1396,8 W		
Temperatura (K)	406,7	385,4
Pressão (MPa)	0,3	0,155
Entalpia (kJ/kg)	2725,3	2694,9
Entropia (kJ/kgK)	6.9919	7.2137

para gerar eletricidade para demanda de energia realmente pequena em 0,1 MPa. Neste caso, a potência elétrica máxima alcançada (Figura 7A) não ultrapassou 119 W para válvula totalmente aberta.

A Figura 7B mostra a curva estimada com boa convergência aos dados experimentais. A instabilidade observada deve-se principalmente à baixíssima pressão de trabalho imposta ao rotor da turbina (0,1 MPa), que é

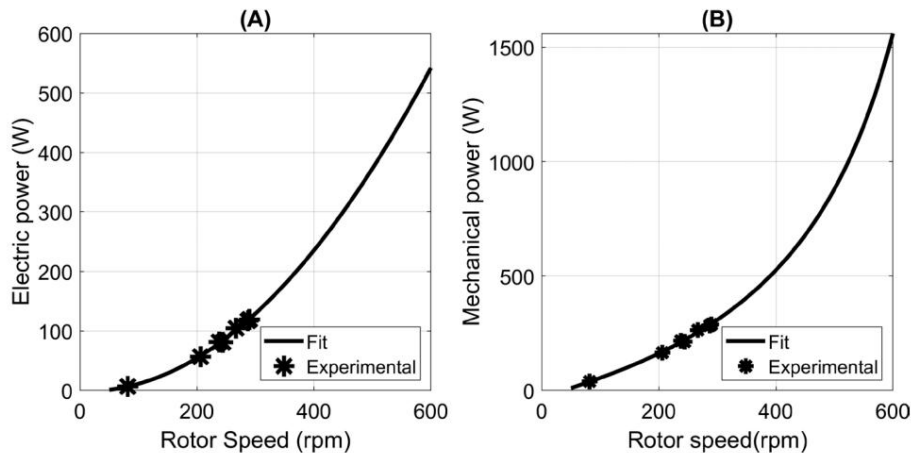


Figura 7: Potências elétrica (A) e mecânica medidas (B) em relação à velocidade de rotação (rpm) a 0,1 MPa.

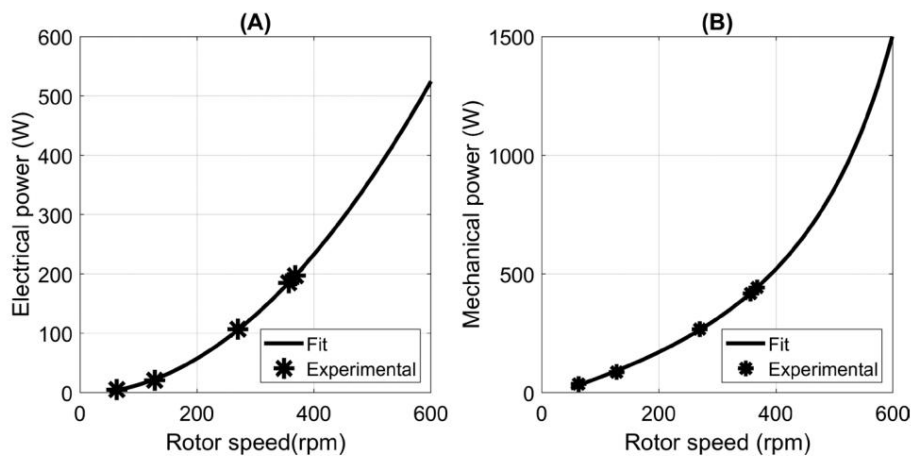


Figura 8: Potências elétrica (A) e mecânica medidas (B) em relação à velocidade de rotação (rpm) a 0,2 MPa.

insuficiente para manter as forças hidrodinâmicas nas pás do rotor. Assim, para que a turbina opere com eficiência, é necessário aumentar a pressão de trabalho.

A Figura 8 mostra o comportamento das potências elétrica (A) e mecânica (B) em relação à velocidade de rotação a uma pressão de vapor de 0,2 MPa. Neste caso, a potência elétrica não ultrapassou 200 W (Figura 8A), mesmo com a válvula de controle totalmente aberta. Isso ocorre porque a pressão de 0,2 MPa permanece baixa e a rotação da turbina é novamente instável. Os resultados da velocidade de rotação, corrente e tensão variam muito de tal forma que o osciloscópio digital portátil não conseguiu estabelecer um valor constante por um longo tempo. Portanto, esta condição de operação aponta para um desempenho desfavorável para geração confiável de energia elétrica.

Na Figura 8B, observa-se um bom desempenho da potência mecânica da turbina a vapor. A potência máxima de saída teve o valor de 443,24 W, o que representa um bom valor de energia mecânica para partida em baixa pressão de trabalho. No entanto, em termos de energia elétrica, é necessário um gerador de alta eficiência para essas condições de operação, a fim de obter um sistema adequado para baixas demandas de energia com bom desempenho termodinâmico para gerar energia de forma confiável.

A Figura 9 mostra o comportamento das potências elétrica (A) e mecânica (B) em função da velocidade de rotação a uma pressão de vapor de 0,3 MPa. Neste caso, os dados experimentais são medidos para rotações na faixa de 100 a 600 rpm (Tabela 2). O sistema opera com bom desempenho e de forma estável mesmo com a válvula do sistema totalmente aberta. Essa estabilidade se deve ao fato de que para uma pressão de 0,3 MPa, a vazão de vapor é suficiente para manter a estabilidade das forças hidrodinâmicas nas pás do rotor, levando a uma operação com bom comportamento do torque gerado no eixo do rotor. Portanto, a pressão de trabalho de 0,3 MPa é a pressão inicial em termos de geração elétrica confiável da turbina objeto desta investigação experimental, mostrando que para pequenas demandas de energia, corresponde a uma tecnologia relevante, principalmente para uso em pequena escala.

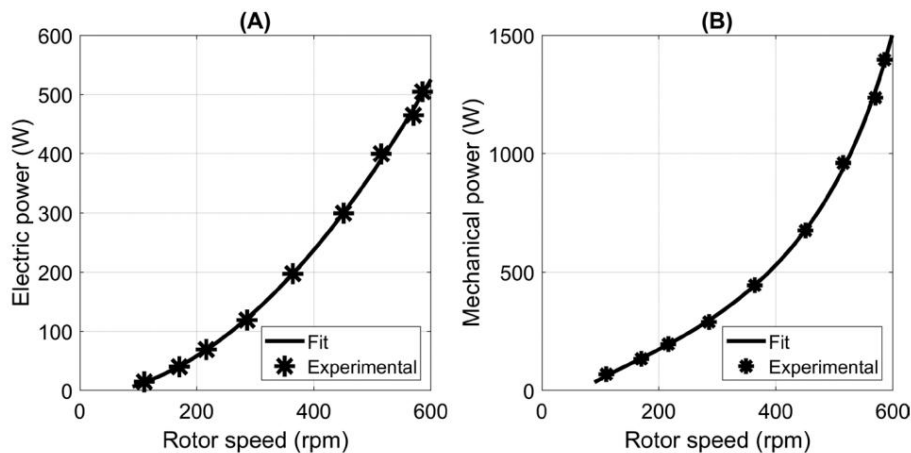


Figura 9: Potências elétrica (A) e mecânica medidas (B) em relação à velocidade de rotação (rpm) a 0,3 MPa.

Para as Figuras 7, 8 e 9, uma análise de regressão é feita usando uma função polinomial de segundo grau. Este tipo de função polinomial é comumente usado em turbomáquinas para calcular a potência hidráulica, concordando bem com os dados experimentais, conforme descrito em [36]. Assim, a função polinomial de segundo grau é uma boa escolha para estimar as potências elétrica e mecânica de uma turbina a vapor. Para este caso de análise de regressão, os coeficientes de determinação R^2 para 0,1, 0,2 e 0,3 MPa são 0,9969, 0,9998 e 0,9992, respectivamente. Esses valores para os coeficientes de determinação são bons porque demonstram que as potências elétricas e mecânicas podem ser previstas a partir da variável velocidade de rotação do eixo. Dessa forma, esse resultado representa um bom desempenho, demonstrando que tal tecnologia pode ser utilizada em comunidades isoladas ou pequenas atividades agrícolas sustentáveis na região amazônica.

A hipótese do estudo, seria atingir uma potência elétrica máxima de até 500 W, porém, o sistema superou essa expectativa, mantendo uma velocidade de rotação e potência elétrica confiável para gerar eletricidade em valores superiores aos alcançados.

Com relação à potência mecânica da turbina a vapor em 0,3 MPa, observa-se, in loco, que o sistema operou com maior confiança para leitura dos resultados a partir de 100 rpm. Como o fluxo de vapor é liberado pela válvula, a velocidade de rotação permaneceu constante por muito tempo quando comparada às pressões de 0,1 e 0,2 MPa. Na Figura 9B, é mostrado que a escala do sistema testado para a curva de potência mecânica, estabelece uma boa tendência polinomial, comportamento semelhante para todas as pressões avaliadas nos ensaios experimentais.

Porém, somente a 0,3 MPa a turbina apresenta boa estabilidade de sua rotação na faixa de 100 a 600 rpm, podendo atingir valores ainda maiores de potência mecânica. Portanto, é relevante que a presente turbina tenha um bom comportamento mecânico a 0,3 MPa com um bom desempenho termodinâmico, mesmo a turbina operando em sistema aberto, o que está fortemente ligado à redução da irreversibilidade. Tal irreversibilidade está relacionada à perda de energia do sistema em detrimento de um vapor de menor qualidade (vapor superaquecido).

4. CONCLUSÕES

A investigação experimental realizada neste trabalho é importante para a região amazônica. Os resultados são relevantes para avaliar o desempenho de pequenas turbinas a vapor de baixa pressão para geração de energia elétrica na região, principalmente em comunidades rurais isoladas. Esses tipos de turbinas a vapor podem contribuir significativamente para o reaproveitamento da biomassa residual gerada na região, minimizando os impactos ambientais principalmente de pequenas atividades agrícolas. Assim, as conclusões deste trabalho são:

- As medições revelam que a turbina tem um comportamento instável nas pressões de 0,1 e 0,2 MPa. O problema de instabilidade pode ser causado pelo desempenho hidrodinâmico do rotor, que precisa ser melhor investigado em baixas velocidades, pois nessas condições o rotor geralmente opera em baixos números de Reynolds (baixas vazões). Outra possibilidade deste comportamento é o trem de força da turbina, que é fortemente influenciado pelo momento de inércia do sistema, sendo necessário ser melhor investigado;
- Para pressões de 0,1 e 0,2 MPa, a turbina atingiu pequena potência elétrica, principalmente devido ao uso de um gerador elétrico de baixa eficiência quando operando em baixas rotações;
- Para uma pressão de trabalho de 0,3 MPa, a turbina apresentou boa estabilidade, podendo gerar energia de forma confiável, mesmo com uma eficiência isentrópica de 26,2%, considerada baixa para uma turbina a vapor. Os resultados do mais estável



operação nesta pressão tornaram-se um ponto muito positivo deste estudo experimental que merece ser destacado.

Além disso, pesquisas detalhadas sobre a qualidade da geração de eletricidade de baixa pressão ainda são necessárias. Algumas limitações do sistema são:

- Operação em ciclo aberto sem uso de condensador e com vapor saturado;
- Não há regulador de contrapressão na entrada da turbina, podendo ser um limitador para manter a pressão e a velocidade de rotação do eixo constantes em 0,1 e 0,2 MPa, de forma a estabelecer a semelhança com uma carga residencial;
- O sistema não possuía medidor de pressão e vazão, nem sensores de temperatura no rotor de vapor;

Para trabalhos futuros, sugere-se mais pesquisas sobre este sistema de vapor, como:

- Realização de estudos termodinâmicos e computacionais para comparação com estes ensaios experimentais;
- São necessários outros testes para realizar novas medições em pressões superiores a 0,3 MPa (pressão máxima alcançada pelo sistema), para verificar se o comportamento da turbina a vapor permanece estável em pressões mais altas.

5. AGRADECIMENTOS

The authors would like to thank the CNPq, GEDAE/UFPA, LABEM/UFPA, ReTEC/UFPA, EBMA/UFPA, GETSOLDA/UFPA, PPGEM/UFPA, PDPG-CAPES (Agreement: 88881.707312/2022-01) and PROPESP/UFPA por todo apoio.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] SÁNCHEZ, AS, TORRES, EA, KALID, RA, "Geração de energia renovável para a eletrificação rural de comunidades isoladas na região amazônica", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 49, pp. . 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.075>
- [2] NERINI, FF, HOWELLS, M., BAZILIAN, M., et al., "Opções de eletrificação rural na Amazônia brasileira Uma análise multicritério", *Energia para o Desenvolvimento Sustentável*, v. 20, pp. 36–48 , junho de 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.02.005>
- [3] MACÊDO, WN, MONTEIRO, LG, CORGOZINHO, IM, et al., "Sistema de microturbina baseado em biomassa para geração de eletricidade para comunidades isoladas na região amazônica", *Energia Renovável*, v. 91, pp. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.063>
- [4] GÜRTÜRK, M., OZTOP, H., "Análise exergética de uma usina de cogeração com caldeira de leito fluidizado circulante", *Conversão e gerenciamento de energia*, v. 120, pp. 346–357, julho de 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.006>
- [5] VAN ELS, RH, VIANNA, JNS, BRASIL JUNIOR, ACP, et al., "A experiência brasileira de eletrificação rural na Amazônia com geração descentralizada - A necessidade de mudar o paradigma da eletrificação para o desenvolvimento", *Renováveis & Avaliações de Energia Sustentável*, v. 16, n. 3, pp. 1450–1461, abril de 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.031>
- [6] SLOUGH, T., URPELAINEN, J., YANG, J., "Luz para todos? Avaliando o progresso da eletrificação rural no Brasil, 2000–2010", *Política Energética*, v. 86, pp. 315–327, novembro de 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.001>
- [7] REDDY, AS, AHMED, MDI, KUMAR, TS, et al., "Análise de turbinas a vapor", *Revista Internacional de Engenharia e Ciência*, v. 3, n. 2, pp. 32–48, fevereiro de 2014.
- [8] CELIS, C., PINTO, GRS, TEIXEIRA, T., et al., "Um modelo dinâmico de turbina a vapor para simuladores de usinas de energia de escopo completo", *Engenharia Térmica Aplicada*, v. 120, pp. 593–602, junho . 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.131>
- [9] DULAU, M., BICA, D., "Modelagem matemática e simulação do comportamento da turbina a vapor", *Procedia Technology*, v. 12, pp. 723–729, janeiro de 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.555>
- [10] CARCASI, C., COSI, L., FERRARO, R., et al., "Efeito de uma turbina a vapor real na análise termoeconômica de usinas de ciclo combinado", *Energia*, v. 138, pp. 32–47 , julho de 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energia.2017.07.048>



- [11] KLONOWICZ, P., WITANOWSKI, ħ., JÿDRZEJEWSKI, ħ., et al., "Um sistema micro ORC doméstico baseado em turbina", *Energy Procedia*, v. 129, pp. 923–930, set. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.112>
- [12] MEDICA-VIOLA, V., BARESSI ŒEGOTA, S., MRZLJAK, V., et al., "Comparao de análises de energia convencionais e de balanço térmico baseadas em turbinas a vapor", *Pomorstvo*, v. 34, n. 1, pp. 74–85, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.31217/p.34.1.9>
- [13] TANUMA, T., *Avanços em turbinas a vapor para usinas modernas*, 1 ed., Cambridge, Elsevier, 2017.
- [14] GMEZ, MF, SILVEIRA, S., "A última milha na Amazônia brasileira: um caminho potencial para o acesso universal  eletricidade", *Política Energética*, v. 82, pp. 23–37, jul. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.018>
- [15] BACELLAR, AA, ROCHA, BRP, "Biomassa lenhosa do rio Madeira: uma opo sustentável para produo de eletricidade na região amazônica", *Política Energética*, v. 38, n. 9, pp. 5004–5012, set. 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.023>
- [16] PLOVNICK, A., "Energia renovável na Amazônia Rural: um estudo de caso de suas vantagens e limitaes em Santo Antnio", *Coleo Projeto de Estudo Independente (ISP)*, n. 932, 2010. https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/932, acessado em maio de 2023.
- [17] PINHEIRO, G.F., RENDEIRO, G., PINHO, J.T., et al., "Eletrificao rural de consumidores isolados – Um modelo de gestão sustentável baseado em biomassa de resíduos", In: *IV Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, pp. 78–85, São Paulo, Dez. 2012.
- [18] ARAUJO, P.D., BERGAMINI, C.P., ESTEVES, G.R.T., et al., "Análise comparativa entre dois sistemas de gerao de energia elétrica para a comunidade isolada do interior do Estado do Amazonas: célula A com bustivel com reformador para gás natural x gerador diesel". In: *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas, 2004. http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022004000100010&lng=en&nrm=is, acessado em maio de 2023.
- [19] RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M.F.M., BRASIL, A.C.M., et al., *Combustão e gasificao de biomassa sólida: Solues energéticas para a Amazônia*, 22 ed., Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2008.
- [20] VENKATESH, K., VEERA, R., KUMAR, JT, et al., "Avaliao da vida residual do rotor de turbina a vapor de 60 MW", *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 2, n. 8, pp. 451–461, agosto de 2012.
- [21] DRESSER-RAND, *RLA Turbine Instruction Manual*, Massachusetts, COPPUS Turbine Division, 2007.
- [22] DRESSER-RAND, *COPPUS Steam Turbine: Product Guide*, Massachusetts, Dresser-Rand Company, 2002.
- [23] LIMA, RCR, NOGUEIRA, MFM, GUERRA, DRS, et al., "Modelagem CFD de uma câmara de combustor ciclônica de pequena escala usando p de biomassa", *Política Energética*, v. 120, pp. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.208>
- [24] ZARZYCKI, R., BIS, Z., KOBYLECKI, R., "O conceito de queima de carvão em um forno de ciclone", *Procedia Engineering*, v. 157, pp. 472–479, agosto de 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.391>
- [25] CARNEIRO, A., OLIVEIRA, D., ROCHA, M., et al., "Quantificao do desempenho de uma caldeira ciclônica usando serragem de biomassa", *Energy Procedia*, v. 120, pp. .doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.185>
- [26] AKHMATOV, V., NIELSON, AH, PEDERSEN, JK, et al., "Turbinas eólicas de velocidade variável com geradores de ímãs permanentes síncronos multipolares e conversores de frequência, Parte I: modelagem em ferramentas de simulao dinâmica", *Wind Engineering*, v. 27, n. 6, pp. 531–548, 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.1260/030952403773617490>
- [27] NEUMANN, VA, HOMRICH, RP "Comparao entre radiais e axiais geradores de ímãs permanentes para aplicaes de baixa velocidade", In: *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Montevideo, p. 251–256, julho de 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860746>
- [28] FARIAS, GM, GALHARDO, MAB, VAZ, JRP, et al., "Um modelo baseado em estado estacionário aplicado a pequenas turbinas eólicas", *Revista da Sociedade Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica*, v. 41, n. 209, pp. 209, abr. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-019-1704-0>
- [29] MOREIRA, JLR, MESQUITA, ALA, ARAUJO, LF, et al., "Investigao experimental da resistência do sistema de transmissão aplicada a pequenas turbinas eólicas", *Energia Renovável*, v. 153, pp. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.014>



- [30] AZEVEDO, T.P.S., PINHO, J.T., GALHARDO, M.A.B., et al., "Bancada experimental para ensaios em geradores elétricos utilizados em aerogeradores de pequeno porte", In: *9th Congress Latin America on Electricity Generation and Transmission*, Mar del Plata, Nov. 2011.
- [31] DIXON, SL, HALL, C., *Mecânica dos fluidos e termodinâmica de turbomáquinas*, 7 ed., Oxford Butterworth Heinemann, 2013.
- [32] SILVEIRA, L.H.C., REZENDE, A.V., VALE, A.T., "Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas", *Acta Amazonica*, v. 43, n. 2, pp. 179–184, Jun. 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672013000200007>
- [33] PENNINGTON, RT, LIMA, HC, "Duas Novas Espécies de *Andira* (Leguminosae) do Brasil e a influência da dispersão na determinação de suas distribuições", *JSTOR*, v. 50, n. 3, pp. 557–566, janeiro de 1995. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/4110326>
- [34] LEÃO, J.R.A., PAIVA, A.V., "Utilização de resíduos agroflorestais como substrato no desenvolvimento de mudas de *Andira inermis* (W.Wright) DC. subsp. *Inermis*", In: *2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente*, pp. 1–8, Bento Gonçalves, Abr. 2010.
- [35] FERREIRA, G.C., HOPKINS, M.J.G., SECCO, R.S., "Contribuição ao conhecimento morfológico das espécies de leguminosae comercializadas no estado do Pará, como *Angelim*", *Acta Amazonica*, v. 34, n. 2, pp. 219–232, Sep. 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672004000200010>
- [36] LEWIS, RI, *Turbomachinery performance analysis*, 1 ed., Londres, Elsevier Science, 1996.