



GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

CABEÇA DE SÉRIE DE CONVERSOR HIDROcinÉTICO BANKI ACOPLADO A GERADOR DE FLUXO AXIAL DESENVOLVIDO NO PROJETO DE PD-00678-0517/2017

**JULIO SANCHO LINHARES TEIXEIRA MILITAO(1);PIERRE TEIXEIRA RODRIGUES(2);VIVIANE BARROZO
DA SILVA(1);ANTONIO CARLOS DUARTE RICCIOTTI(1);HEBERT SANCHO GARCEZ MILITÃO;AFRANIO
DE CASTRO ANTONIO JR
UNIR(1);JORDÃO ENERGIA(2)**

RESUMO

Desenvolvimento de Cabeça de Série de um Gerador de Fluxo Axial Conjugado a um Conversor Hidrocinético de Fluxo Cruzado, tipo Michelle-Banki, para geração de energia elétrica a partir do aproveitamento de fluxos hídricos com variados regimes de vazão.

PALAVRAS-CHAVE: *Baixas velocidades, Conversor, Fluxo Axial, Gerador*

1. Introdução

Turbinas hidráulicas são conversores de fluxos hídricos em energia mecânica rotacional. Seus diversos tipos podem ser utilizados em pequenas, mini e microcentrais hidroelétricas. Dentre suas variações de, as do tipo Pelton, Francis e Kaplan se destacam, porém, utilizam modelos que há tempos não envolvem inovações que possibilitem o aumento de seu rendimento e facilidade de uso. A turbina de fluxo cruzado, também conhecida pelos nomes de Michell-Banki, Banki e Michell-Ossberger é definida como uma turbina de ação que pode ser instalada com quedas de até 200 m e vazões na faixa de 0,025 a 20 m³/s. Diferentemente das turbinas de fluxo cruzado utilizadas para geração de energia disponíveis para aquisição, o modelo de Turbina Hidráulica Tipo Banki apresentado no presente trabalho, acopla uma máquina elétrica de fluxo axial ao conversor hidrocinético em um único equipamento, o que combina, além do menor espaço, a facilidade de instalação com a possibilidade de uso em flutuantes ou submersos. O mercado disponibiliza conversores hidrocinéticos e geradores independentes, acoplados por meio de eixos rígidos, correias ou correntes, onde seu peso e tamanho são maiores que as máquinas de fluxo axial.

Apresenta-se, aqui, o desenvolvimento, construção e testes de um equipamento flutuante contendo uma “roda d’água” para ancoragem em fluxos hídricos, capaz de gerar de 1 a 10 kW de energia elétrica. Os testes do equipamento foram realizados no rio Madeira (Porto Velho, Rondônia) e demonstraram sua aplicabilidade para geração isolada em pequenas comunidades ribeirinhas.

2. Estado da arte

A turbina Banki é uma roda de fluxo radial atmosférico que deriva sua potência da energia cinética dos jatos de água. Do ponto de vista da velocidade essa turbina pode ser colocada entre a chamada turbina de água tangencial Pelton e a roda de fluxo misto Francis. A turbina Banki apresenta características únicas pois necessitam de pequenas diferenças entre a jusante e a montante, e podem ser de interesse para a maioria dos engenheiros, especialmente os dos estados montanhosos¹.

¹ MOCKMORE, C. A.; MERRYFLIED, F. **The Banki Water Turbine**. BULLETIN SERIES. Oregon State College, n25, p1-16, 1949.

A turbina Banki é formada por duas partes o bico do jato de água e o rotor da turbina. Esse rotor é formado por dois discos interligados, em sua borda, por várias lâminas curvas. O fluido é injetado em um ângulo de dezesseis graus tangenciando a roda de água. A Figura 1 exibe o desenho desenvolvido por Banki.

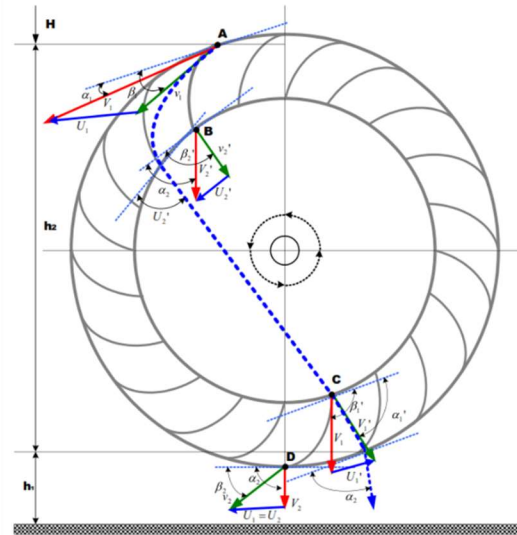


Figura 1 - Caminho da água através da turbina^{19, 20}.

Assumindo que os jatos de entrada na turbina entram pelo ponto A e o ângulo de incidência é α , a velocidade absoluta (V) do fluido é expressa por:

$$V = C\sqrt{2gH}$$

onde C é o coeficiente relativo ao jato, na faixa de 0,98, g é a constante gravitacional e H é a altura da entrada do jato.

Observando a Figura 1, uma vez conhecida a velocidade periférica em um ponto da roda é possível determinar a velocidade relativa (v_1). Por outro lado, o ângulo das pás deve ser igual β_1 para se obter a máxima eficiência da turbina. Conforme Donat Banki a eficiência da turbina pode ser calculada como se segue:

$$e_{max} = \sqrt{C^2(1 + \psi) \cos^2 \alpha_1}$$

Fazendo o ângulo de entrada do jato de água em relação as pás, igual a 16° , obtém-se a máxima eficiência, com $\cos \alpha_1$ igual a 0,96, $\cos^2 \alpha_1$ igual a 0,98, C é igual a 0,98 e ψ é igual a 0,98, essa eficiência atinge 87,8 %. No entanto, estudos² revelam que o ponto de maior eficiência se encontra a 15° .

No que tange à máquina elétrica, o princípio da conversão bidirecional da energia elétrica em magnética é expresso pela lei de Faraday – Lenz, ou pela sua integração no tempo, equação (1).

$$\phi(t) = -\frac{1}{N} \int v(t) dt \quad (1)$$

Onde:

- $\phi(t)$ Fluxo magnético [Wb ou V.s];
- N Número de espiras;
- T_0 Início do período de integração [s];
- T Término do período de integração [s];
- $v(t)$ Tensão elétrica induzida [v].

² JASA L. *et al.* Investigate Curvature Angle of the Blade of Banki's Water Turbine Model for Improving Efficiency by Means Particle Swarm Optimization INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, Vol.7, No.1, 2017.

No material magnético, a razão entre o fluxo magnético e a secção transversal efetiva é denominado de indução magnética, sendo necessário ao projeto físico do pacote magnético e do número de espiras pertinentes, equação (2).

$$B(t) = \frac{\Phi(t)}{S \cos \theta} = \frac{\Phi(t)}{S} \quad (2)$$

Onde:

- $B(t)$ Indução Magnética [T ou G];
 $\Phi(t)$ Fluxo magnético [Wb ou V.s];
 S Máxima janela para a passagem do fluxo magnético – secção transversal da perna central do núcleo tipo E adotado [m^2];
 $\cos \theta$ Fator proporcional a janela de passagem efetiva do fluxo magnético.

3. Originalidade do produto

Nos conversores hidrocínéticos, o nível de potência de saída está diretamente relacionado à velocidade de vazão e às diversas tecnologias desenvolvidas para pequenos fluxos, incluindo, principalmente, turbinas em suas diversas configurações. Turbinas de fluxo cruzado, tipo Michelle-Banki, utilizam rotor tipo tambor dotado de pás estampadas em forma de lâminas. Nestas, o fluxo de água é direcionado por perfil hidráulico e encontra as pás do rotor, impulsionando-o. Esse tipo de turbina é utilizado em aproveitamentos hidráulicos com menores quedas e maiores volume de água, situação que geralmente ocorre em regiões mais planas. Os diversos tipos de acoplamentos utilizados entre o conversor e o gerador, resultam em problemas que vão desde a dificuldade de balanceamento em eixos, exposição das peças às intempéries, maior espaço utilizado e até na manutenção.

A construção do gerador elétrico de fluxo axial com ímãs permanentes no centro interior da roda d'água é capaz de gerar energia elétrica a partir do aproveitamento de vazões de água, mesmo reduzidas. A originalidade está, justamente, na construção do gerador elétrico dentro do eixo da turbina tipo Michell-Banki em um sistema de flutuação, utilizando um difusor para aumento da velocidade de fluxo nas pás do rotor da turbina, tornando-a uma turbina de ação que, ao contrário das demais do gênero, é submersa e encontra a roda móvel (rotor da turbina) em uma região de estrangulamento, onde um jato d'água acelerado pela diminuição da área é direcionado às pás. A Figura 2 exibe um corte o conjunto hidrogerador.

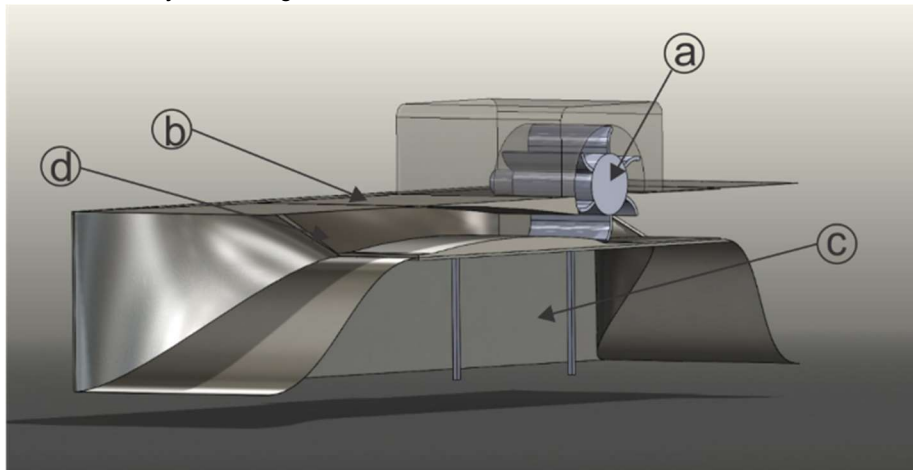


Figura 2 - Modelo do conversor hidrocínético. a) gerador AFPM conjugado com a turbina de fluxo axial; b) Caixa do flutuante do conjunto do hidrogerador; c) Compartimento do flutuante; d) Entrada de fluxo.

O sistema flutuante de geração de energia elétrica consiste em três partes:

- Caixa flutuante, cuja função, além de suporte à turbina geradora, além de diminuir os vórtices, é multiplicar a velocidade do fluxo hídrico.

- Turbina geradora, que consiste no gerador elétrico axial construído a partir do centro de rotação de uma turbina, contendo um sistema de engrenagens capaz de aumentar a velocidade de rotação do rotor da máquina elétrica.

A arquitetura da Caixa Flutuante possui uma abertura em sua parte frontal e um túnel que direciona o fluxo até uma janela com um sistema de asas horizontais, inferior e superior, que propiciam a formação de jatos laminares na parte superior e inferior de uma janela de acesso direto às pás da turbina geradora, um dos grandes atributos da inovação.



Figura 3 mostra o protótipo do rotor turbina/máquina elétrica criado para prova de conceito, apresentado no relatório final do projeto P&D anterior (DE) e o mesmo rotor, apresentado no protótipo Cabeça de Série. Na parte metálica do primeiro protótipo, discos contendo ímãs permanentes giram, através de rolamentos fixados no eixo central tubular, enquanto outros discos, contendo bobinas estatoras, são fixados no próprio eixo tubular, demonstrando claramente a evolução do projeto.



Figura 3: rotor da turbina Michele-Banki com máquina elétrica em seu interior

Da mesma forma que os testes de funcionalidade efetuados nos protótipos de prova de conceito, no protótipo cabeça de série, foi possível averiguar seu funcionamento em escala e ambiente real. O rotor, pesando mais de 3 toneladas, foi acoplado a um caixa



flutuante projetada para desviar parte do fluxo do rio para o encontro com as pás (



Figura 4).



Figura 4: carregamento da máquina elétrica no flutuante

Uma vez concluída a montagem, o equipamento foi preparado para condução (





Figura 5) até um porto, onde foi devidamente descarregado na água (



Figura 6).



Figura 5: equipamento montado pronto para condução



Figura 6: equipamento sendo colocado na água (operação de lastreamento)

Nos primeiros testes de estabilidade do equipamento observou-se, ao carregamento do lastro de água utilizando-se motobombas, que havia uma tendência a adernar, porém, após as devidas precauções com a colocação de amarras e de um guincho hidráulico montado em caminhão, o equipamento se estabilizou.



Figura 7: Adernação do equipamento quando na colocação do lastro de água



Figura 8: equipamento com flutuação estabilizada

A partir daí, verificou-se a viabilidade de condução com um rebocador independente, com o uso de amarras. Para evitar possíveis acidentes, procedeu-se o deslocamento com o equipamento amarrado a uma balsa flutuante, contendo o caminhão com o guincho, até o local selecionado. Nesse mesmo ponto, sem prejuízos ao experimento, realizou-se os testes. Importante salientar que esses foram efetuados na estação seca, momento em que o Rio Madeira se encontra em seu mais baixo nível anual. Previsões dos órgãos federais é de que se caminha para mais uma seca histórica³. As velocidades de fluxo no local de instalação do equipamento podem variar entre 0,8 m/s e 1,8 m/s. No momento dos testes, seu valor foi calculado em 0,6 m/s, valor abaixo dos mínimos registrados na literatura. A possibilidade de que este fluxo fosse insuficiente para vencer a inercia do rotor se confirmou, porém, após alguns minutos, este começou a girar lentamente, se estabilizando no valor de 3,87 RPM. O sistema de engrenagens

³ <https://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2021/08/03/se-estacao-chuvosa-atrasar-seca-no-rio-madeira-em-2021-pode-ser-uma-das-maiores-diz-cprm.ghtml>

instalado impõe um aumento de velocidade em torno de 3,9 vezes ao rotor da máquina elétrica, ou seja, a 15,11 RPM. Com essa rotação, a potência disponível determinada foi de 0,95 kW. Este valor ficou na faixa prevista (1 a 10 kW).

A metodologia de validação para as características da geração elétrica da máquina de fluxo magnético axial, instalado em um flutuante foi elaborada para verificar a capacidade de geração de potência elétrica e o rendimento total do processo de conversão da potência hidráulica em potência elétrica.

A vazão constante de água passando pelo hélice permite a conversão de potência hidráulica em potência elétrica, podendo ser expressa pela equação:

$$A_s \cdot v^3 = \eta \cdot P_e$$

onde A_s é a área da secção transversal da passagem de uma lâmina d'água sob velocidade v . A potência elétrica na saída dos terminais do gerador é representada por P_e , e η é uma variável adimensional representante do rendimento a respeito da conversão de energia. O η contempla todas as possíveis perdas energéticas envolvidas no processo, por exemplo, as perdas mecânicas, elétricas e magnéticas.

Considerando que a conversão de energia hidráulica em elétrica, η foi obtido pela razão entre a expressão relacionada a potência hidráulica e a potência elétrica como o produto da tensão u , e da corrente i :

$$\eta = \frac{A_j \cdot v^3}{u \cdot i}$$

Assim, valores para η foram adquiridos devido a imposição experimental de diferentes cargas elétricas nos terminais do gerador, como segue na primeira coluna da Tabela 1. Para a elaboração desta tabela foram impostas as cargas e aguardado que a velocidade da lâmina d'água se mantivesse estabilizada.

Tabela 1 - Ensaio de avaliação da capacidade do gerador com fluxo magnético axial.

Carga conectada nos terminais do gerador	Tensão elétrica nos terminais do gerador	Corrente elétrica nos terminais do gerador	Potência elétrica – P_e	Rendimento total obtido – η
144,0 Ω	411 V	3,1 A	1274,1 W	37 %
115,2 Ω	408 V	3,6 A	1468,8 W	38 %
86,4 Ω	391 V	5,3 A	2072,3 W	40 %
57,6 Ω	377 V	8,1 A	3053,7 W	40 %
28,8 Ω	349 V	16,8 A	5880,6 W	35 %

No experimento realizado com o equipamento instalado, os dados da Tabela 1 são apresentados pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as curvas das grandezas representativas da tensão gerada, corrente e potência deliberadas, e o rendimento total da estrutura.

É possível concluir que na faixa de melhores rendimentos, é viável obter a potência nominal em tensão contínua ao redor dos 385 V. Isto corrobora com o uso de conversores estáticos para a conversão da tensão, na máxima transferência de potência, no uso direto em equipamentos normalmente alimentados pela rede elétrica de abastecimento, bem como para sistemas de armazenamento de energia em baterias.

5. Conclusão

Um equipamento flutuante capaz de gerar energia elétrica em fluxos de baixa velocidade e vazão foi construído e testado no rio Madeira (Porto Velho/RO). Capaz de gerar entre potências elétricas entre 1 e 10 kW, o equipamento se mostrou satisfatório e estável frente às variações de corrente do rio.

Sua aplicabilidade está direcionada principalmente para geração isolada, onde tenha disponibilidade de fluxos hídricos adequados ao equipamento. Outros segmentos industriais, além do elétrico, podem utilizar o conceito aqui desenvolvido e ser utilizada como tecnologia aplicada à geração distribuída, sendo capaz de atender demandas, por exemplo, de serviços auxiliares de empresas. A instalação de diversas unidades, em série e em diversos pontos de um fluxo hídrico, pode servir de alternativa, em relação às soluções maiores, para geração de energia elétrica com impactos ambientais muito menores.

Dada sua versatilidade, é possível seu emprego em atividades econômicas que disponham de canais, ou pequenos cursos d'água naturais, com baixa velocidade de fluxo. Um ponto relevante é o baixo custo de fabricação e instalação, não havendo a necessidade de barragens, além do baixo impacto ambiental. Esta solução proporciona a geração de

energia em pequena e média escala, podendo ser aplicada a conversão hidrocínética em marés, correntes oceânicas, pequenos rios, canais entre outras.

Por fim, importante observar, que o sistema, por ter uma característica modular, pode ser construído em diversas faixas de potência, dependendo apenas dos locais de instalação e do fluxo de água disponível no local.

O presente trabalho é fruto do projeto “Cabeça de Série de Conversor Hidrocínético Banki Acoplado a Gerador de Fluxo Axial desenvolvido no projeto de PD-00678-0517/2017” com recursos do programa de P&D/ANEEL da empresa Usina Termelétrica Norte Fluminense S.A., CÓDIGO ANEEL P&D - PD-00678-0319/2019, os quais os autores gostariam de agradecer a confiança e parceria.

DADOS BIOGRÁFICOS



Bacharel Em Química pela Universidade de Fortaleza (1981), mestrado em Química pela Universidade Federal do Ceará (1988) e doutorado em Química pela Universidade Federal do Ceará (1995), com pós doutoramento na Université de Nice - França. Professor Titular da Universidade Federal de Rondônia. Docente e Orientador no Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Amazônia Legal - PPG-Bionorte. Coordenador do Grupo de Pesquisa em Tecnologia e Inovação, que atua no desenvolvimento de projetos de P&D em parceria com concessionárias de energia elétrica, nas áreas de biocombustíveis, inversores e turbinas hidráulicas, além da síntese de materiais com propriedades magnéticas.

(2) PIERRE TEIXEIRA RODRIGUES

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense e Mestrando em Administração pelo IBMEC-RJ, na área de Estratégia Empresarial e Desenvolvimento de Negócios. Vinte e cinco anos de experiência desenvolvendo projetos em eficiência energética, autor de publicações no tema eficiência energética, gerenciamento e desenvolvimento de mais de 250 projetos de pesquisa e desenvolvimento no Programa da ANEEL, gerenciamento e execução de projetos sobre fontes renováveis de energia elétrica e coordenação de ações relacionadas a inserção no mercado de produtos desenvolvidos em projetos de pesquisa. Espírito empreendedor, dinamismo, histórico de sucesso no desenvolvimento e gestão de projetos ligados ao setor.

(3) VIVIANE BARROZO DA SILVA

Engenheira Eletricista e atualmente é professora da Universidade Federal de Rondônia. Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, com ênfase em Máquinas Elétricas, Diagnóstico de Falhas, atuando principalmente nos seguintes temas: fluxo de carga, curto-circuito, proteção de sistemas elétricos, estabilidade, inteligência artificial aplicada em sistemas de potência. Faz Doutorado pela Universidade Federal de Santa Maria.

(4) HEBERT SANCHO GARCEZ MILITÃO

Engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal de Santa Catarina, com mais de 10 anos de experiência no comissionamento de unidades geradoras de energia. Atualmente é pesquisador do GPTI.

(5) AFRANIO DE CASTRO ANTONIO JR

Afrânio de Castro Antonio Jr, Doutorando IEB-UFSC, mestre pelo Grucad-UFSC em parceria com a Eletrosul e especialista em Gestão Empresarial pela FGV.

(6) ANTONIO CARLOS DUARTE RICCIOTTI

Doutor em Engenharia Elétrica (UFSC), Mestre em engenharia biomédica e automática(UFU), pós-graduado em engenharia da computação(UFU), pós-graduado em gestão de negócios e tecnologia da informação(FGV) e engenharia elétrica com ênfase em eletrônica de computadores(FEI). Profissional com mais de 28 anos de experiência na área de gestão de projetos em Telecomunicação, Conversores e Ensino a distância(EAD). Principais projetos: Pesquisador na área energia renovável baseada em óleo vegetal. Gerência, modelagem, análise e desenvolvimento de ERP (Sistema Integrado de Gestão de Fábrica - aplicação servidor-cliente orientada a objetos), utilizando técnica de programação ágil, (“Extreme Programming”).