

Análise de viabilidade da utilização de bomba funcionando como turbina operando à frequência variável como alternativa de geração de energia comparado com eletrificação rural no estado de Minas Gerais

Economic viability analysis of the use of a pump operating as a turbine operating at variable frequency as an alternative to generate electricity compared to rural electrification in the state of Minas Gerais

Letícia Moreira Custódio

Universidade Federal de Itajubá

E-mail: leticiamcustodio@gmail.com

Rafael Emílio Lopes

Universidade Federal de Itajubá

E-mail: lopes.unifei@gmail.com

Recebido: 18/12/2017 – Aceito: 26/12/2017

Resumo

A geração distribuída, que é a geração de energia próxima à carga consumidora, tem a grande vantagem de reduzir perdas na distribuição de energia, independente da potência, aproveitando o potencial energético local. Dentro desse contexto, o estudo aborda a utilização de bomba funcionando como turbina – BFT para geração de energia e esta se faz com o aproveitamento de recursos hídricos de forma barata, acessível e de simples configuração. Na metodologia o trabalho evidencia a viabilidade de seu funcionamento como gerador de energia operando à frequência variável através de ensaios, traçando sua melhor faixa de operação. Os resultados evidenciam rendimentos satisfatórios, com aproveitamento do potencial energético local, promovendo eficiência energética, democratização da energia devido à sua configuração e custo, acessível para comunidades isoladas e carentes. Além disso, é realizada a comparação de custo dessa tecnologia com a eletrificação rural.

Palavras-chave: bomba funcionando como turbina; geração distribuída; energia renovável..

Abstract

The distributed generation is the generation close to the consuming load, has the advantage to reduce losses in power distribution, independent of the power, taking advantage of the local energy potential. In this context, the study addresses the use of pump and turbine - PAT for

power generation and this is done with the use of water resources, by cheap, accessible and easy configuration. In the methodology the paper shows the viability like power generator working in variable frequency, tracing its best range of operation. The results show satisfactory yields, utilizing the local energy potential, promoting energy efficiency, democratization of energy due to its configuration and cost, accessible to isolated and poor communities. In addition, a comparison of cost technology with rural electrification is carried out.

Keywords: pump as turbine; distributed generation; renewable energy.

1. Introdução

A geração distribuída é a geração de energia próxima à carga, que auxilia na redução de perdas na distribuição e transmissão, além de entregar ao consumidor uma energia de qualidade. Como definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL (2015), a geração distribuída pode ser feita a por meio da utilização de energias renováveis ou por meio de cogeração qualificada e o excedente de produção pode ser devolvido à rede de distribuição. A geração distribuída deve promover também a eficiência energética, mitigação de recursos e consciência socioambiental.

A utilização de bomba funcionando como turbina (BFT) para geração de energia aproveita o potencial hidráulico de um local e converte a energia potencial da queda d'água em energia cinética na rotação da bomba operando como turbina, do mesmo modo da geração em usinas hidrelétricas. Esse tipo de geração distribuída traz consigo a característica de fácil instalação e simples configuração e baixo custo.

As vantagens desse tipo de geração são: o aproveitamento de potencial hidráulico local; custos menores – se comparados ao sistema que utilizam turbinas; facilidade de manutenção- bombas são produzidas em série, daí a facilidade de reposição de peças e manutenção; universalização da produção de energia – dada a facilidade de instalação e operação, torna-se uma alternativa para comunidades com baixo conhecimento técnico.

Apesar de suas vantagens, a BFT possui restrições em seu funcionamento à frequência constante. Por não possuir um regulador de velocidade, a mesma não consegue sozinha manter a frequência. Para correção dessa configuração, é proposta a utilização de um sistema similar aos aproveitamentos eólicos, que é a utilização da BFT acoplada a um gerador síncrono a ímãs permanentes ou então a um gerador de indução. Em seguida, o gerador seria acoplado a um conversor back-to-back conforme a Figura 1.

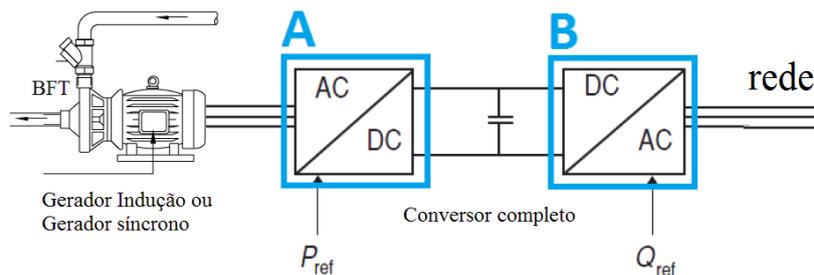


Figura 1- Configuração do Sistema de geração utilizando BFT operando a frequência variável.
Própria

Onde P_{ref} é a potência ativa de referência e Q_{ref} é a potência reativa de referência.

A necessidade da utilização de conversores nessa configuração deve-se ao fato de que o sistema para ser ligado à rede deve apresentar a mesma frequência da rede e a mesma sequência de fase para que ocorra o acoplamento. O conversor, no caso, faz todo o manejo necessário para que isso ocorra. Além disso, assim como nas configurações eólicas, o conversor faz com que sejam aproveitadas melhor essas forças envolvidas, e faz o controle efetivo de potência injetada na rede, ou seja, o conversor faz o melhor aproveitamento de potência.

O sistema de geração de energia por meio da BFT pode operar também de modo isolado da rede, por meio de controle de tensão e frequência entregues à carga isolada na própria propriedade. Pode utilizar de conversores e outros tipos de controle, como carga lastro e outros.

Neste estudo será abordado o funcionamento, desempenho e metodologia sobre a BFT, exemplificando um estudo realizado que verifica sua viabilidade e, além disso, será feita a comparação de custo da tecnologia BFT versus custo da eletrificação rural no estado de Minas Gerais.

2. Metodologia

Foram necessárias para esse trabalho, as realizações de ensaios de uma bomba centrífuga de pequeno porte, de um motor de indução também de pequeno porte, assim como o levantamento de valores e consultas de preços e estudo de referenciais teóricos. Os dados coletados proporcionaram a análise de viabilidade técnica econômica do sistema completo de geração comparado com a eletrificação rural. O referencial teórico serviu de base para a forma de trabalho abordada.

2.1 Materiais Utilizados

Foi construída uma bancada de testes montada no Centro de Pesquisas Hidráulicas – CPH, localizado na Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. A bancada montada é a apresentada conforme a Figura 2.

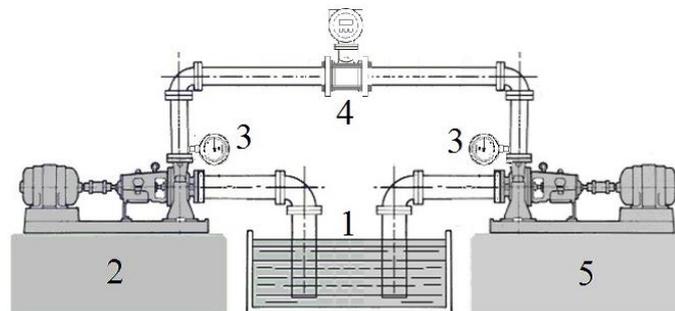


Figura 2- Bancada de testes montada para realização dos ensaios e obtenção de dados. Própria Onde:

Item 1 – Reservatório de água

Item 2- Bomba funcionando como bomba (BFB) de modelo EHF 32-20 de rotação nominal especificada pelo fabricante de 3500 [rpm], esta bomba compõe a estação de bombeamento.

Item 3 – Manômetros;

Item 4- Medidor de vazão digital;

Item 5- Bomba funcionando como turbina (BFT) de modelo EHF 32-16 de rotação nominal de 1750 [rpm], onde a mesma foi utilizada como turbina de ensaio.

A bancada utilizada serviu para todo o desenvolvimento da pesquisa e seu funcionamento é apresentado no próximo tópico.

2.2 Funcionamento da Bancada de Testes

A bancada de testes funciona de maneira que a Bomba Funcionando como Bomba - BFB é acionada por um inversor de frequência, para que a vazão e a pressão entregues sejam controladas. A BFB succiona água do reservatório à vazão controlada e entrega à BFT e depois a água retorna ao reservatório, finalizando um ciclo. Os parâmetros medidos por meio de instrumentação da bancada são:

Vazão em metros cúbicos por segundo [m^3/s]

Altura (manométrica) em metros [m]

Potência da BFT em Watts [W]

Rendimento em porcentagem [%]

2.3 Realização dos Ensaio

Os ensaios foram realizados segundo a metodologia de Sharma (1985) e Willians (1995) e seguindo também a curva da bomba utilizada, fornecida pelo fabricante.

As equações de Sharma são as que fazem o equivalente do funcionamento da bomba operando como bomba e convertem para o seu funcionamento como turbina. As equações são indicadas por 1 e 2, para vazão e altura, respectivamente.

$$Q_{bft} = \frac{Q_{bep}}{(\eta_{max})^{0,8}} \quad (1)$$

$$H_{bft} = \frac{H_{bep}}{(\eta_{max})^{1,2}} \quad (2)$$

Onde:

Q_{bft} - Melhor vazão da bomba operando como turbina

Q_{bep} -Vazão da bomba operando como bomba

η_{max} -Rendimento máximo da bomba

H_{bft} - Melhor Altura da bomba funcionando como Turbina

H_{bep} - Altura da bomba operando como bomba

O ensaio foi realizado na bancada de testes na Figura 02 variando a altura de 24 a 28 metros. Durante o ensaio, manteve-se a altura fixa e variou-se a vazão para obtenção dos parâmetros potência $P[W]$, rendimento $\eta[\%]$ e rotação $\omega[rpm]$.

Os dados obtidos com o ensaio estão representados pela Tabela 01.

Tabela 1- Dados Ensaiaados da BFT. Própria.

H [mca]	24		25		26		27		28	
$\omega[rpm]$	P[W]	$\eta[\%]$								
700	662,71	58,80	693,47	57,38	721,68	55,66	755,70	53,24	782,47	51,82
900	780,27	63,71	826,18	62,64	870,19	61,69	924,98	59,54	969,34	60,62
1200	784,19	68,06	838,58	68,02	886,13	67,71	945,11	66,57	979,39	64,67
1400	712,94	63,36	768,53	67,09	819,60	66,76	889,11	67,59	930,39	65,42
1500	673,10	61,65	734,78	63,28	792,49	65,26	868,48	68,04	908,85	66,49
1600	648,32	61,02	720,30	62,89	787,07	64,98	869,68	63,14	907,25	68,89
1700	626,35	59,37	708,58	62,24	783,89	61,24	873,25	64,86	910,17	68,00
1800	537,25	50,61	619,15	53,85	697,67	57,50	794,22	65,12	836,87	62,12
1900	378,45	42,66	462,07	48,22	532,01	49,09	576,49	57,38	691,94	52,77

Pela Tabela 1, é possível verificar que dentre a faixa de alturas ensaiadas, a que teve a maior transferência de potência foi a altura de 28[mca], sendo o maior valor de potência transferida de 979,39[W]. Sabendo disso, essa altura foi escolhida como melhor altura de operação da BFT.

Conforme a metodologia de Chapallaz (1990) é possível escolher o motor de indução que irá funcionar como gerador acoplado à turbina. O motor de indução operando como gerador é escolhido pra esse sistema devido à característica de ser uma geração a baixo custo, sendo um motor de indução mais barato que um gerador síncrono.

Pelas características do sistema ensaiado, foi escolhido um motor de indução com os dados descritos pela Tabela 2.

Tabela 1- Dados de placa do motor utilizado. Própria

Dados de placa do Motor	
Potencia mecânica [CV]	1,5
Potencia elétrica [kW]	1,1
Rotação nominal [RPM]	1700
Fator de potência a plena carga	0,82
Tensão nominal [V]	220
Corrente nominal [A]	4,32
Rendimento [%]	81,5

Após a escolha do motor de indução escolhido, o mesmo foi ensaiado como gerador operando à frequência variável pela metodologia segundo (CHAPALLAZ et al,1990), (REZEK e RESENDE, 1994), (S. Mahley 2001), para verificação do seu comportamento operando como tal. Os dados obtidos com esse ensaio estão representados pela Tabela 3.

Tabela 2- Dados do resultado do ensaio do motor de indução operando como gerador à frequência variável. Própria.

ω [rpm]	F_g [Hz]	η_g [%]	P_g [W]	η_{total} [%]
1200	40,0	68,72	673,04	44,44
1400	46,7	69,83	649,69	45,69
1500	50,0	71,21	647,19	47,34
1600	53,3	72,45	657,30	49,91
1700	56,7	72,67	661,42	49,41
1800	60,0	72,89	610,00	45,28
1900	63,3	71,56	495,15	37,76

Onde:

ω velocidade do gerador em rpm

F_g frequência do gerador em Hz

η_g rendimento do gerador em %

P_g potência do gerador em W

η_{total} rendimento do sistema bft-gerador em %

O sistema gerador- BFT foi ensaiado acoplado e o resultado é apresentado pela curva rendimento do sistema versus velocidade, exibida pela Figura 3, além das curvas representadas pelas Figuras 4 e 5 que são respectivamente a comparação entre as potências mecânicas e elétricas e comparação entre os rendimentos.

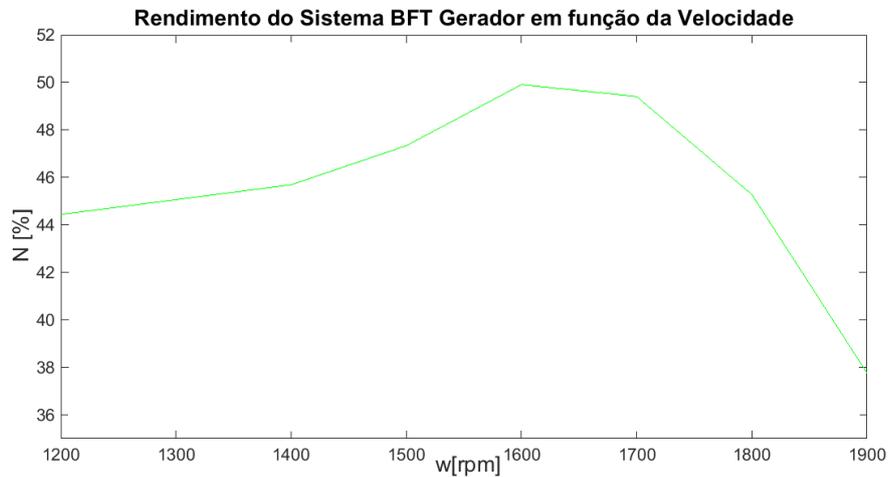


Figura 2- Rendimento do Sistema BFT Gerador em função da Velocidade. Própria
Pode-se verificar que o sistema apresentou um rendimento máximo de 49%.

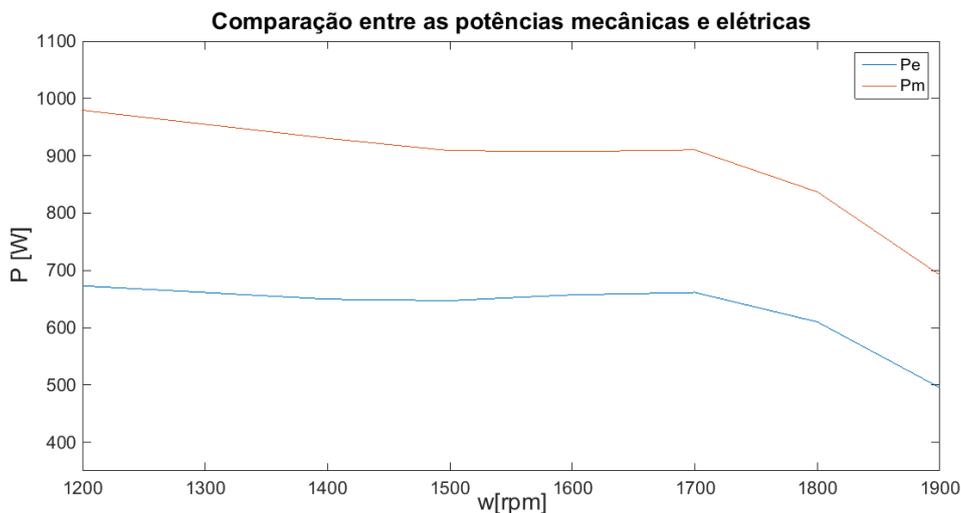


Figura 3- Comparação entre as potências mecânicas e Elétricas
A conversão energética realizada pela BFT é evidenciada.

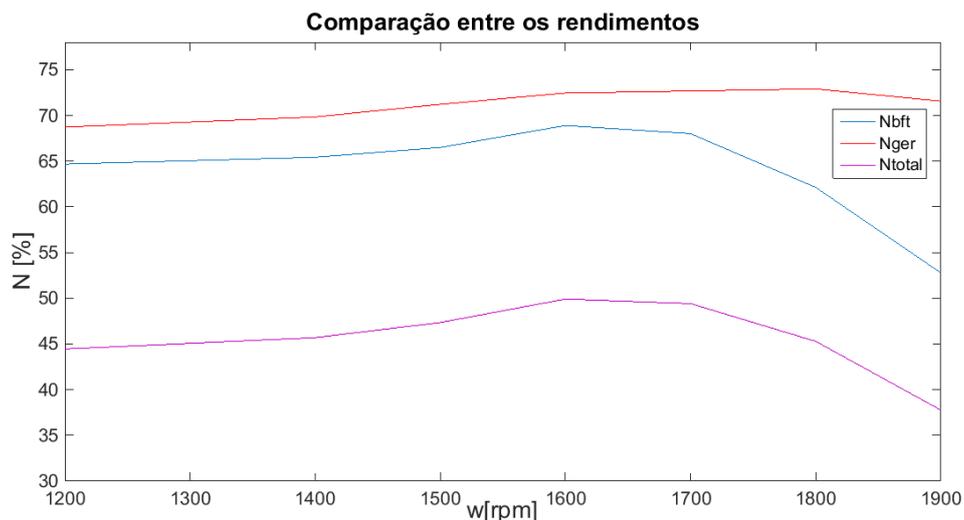


Figura 4- Comparação entre os rendimentos

Na Figura 5, o Rendimento Total é obtido pela composição pelo rendimento da BFT e rendimento do Gerador.

As figuras apresentadas evidenciam o comportamento do sistema bft-gerador como potencial fonte geradora de energia, pois foi provada sua viabilidade como tal.

3. Resultados e Discussões

O sistema BFT – gerador – conversor apresentou um rendimento máximo de 49,91%. O nível de potência do experimento também contribuiu para esse resultado visto que nessa faixa, os rendimentos não são elevados. Entretanto, é verificada a viabilidade do sistema como sistema gerador de energia. A facilidade e acessibilidade à essa tecnologia são evidenciadas pela utilização de componentes encontrados em prateleira e fabricação em série, que facilita também sua reposição e manutenção em caso de falha e emprego da tecnologia. Além disso, a água é um bem gratuito e corrente, sendo esta uma vantagem em relação a outras fontes geradoras.

O principal questionamento do trabalho é – “o sistema BFT realmente compensa economicamente em relação à eletrificação rural no estado de Minas Gerais?”. A análise de viabilidade envolve os materiais envolvidos sendo: o custo do motor, o custo do gerador, o custo do conversor e a comparação se dá com o custo da eletrificação rural e o custo de sua instalação.

Em uma pesquisa realizada no dia 30/03/2017 junto ao setor de subtransmissão da Companhia Energética de Minas Gerais- CEMIG, a eletrificação rural apresentava o custo de instalação no valor de R\$26000,00/km (vinte e seis mil reais por quilômetro). Além disso, o custo da energia no setor rural (acesso em 15/04/2017) pela CEMIG é apresentado pela

Tabela 4. Considerando o pior caso de instalação e funcionamento, o custo escolhido para análise de viabilidade é da categoria Rural- Normal na bandeira vermelha no Patamar 2 (Consumo R\$/kWh= 0,40365).

Tabela 3- Custo da energia fornecida pela CEMIG no setor rural. Site CEMIG.

B2 - RURAL	 Consumo R\$/kWh	 Consumo R\$/kWh	 PATAMAR 1 Consumo R\$/kWh	 PATAMAR 2 Consumo R\$/kWh
Rural - Normal (Consumo R\$/kWh)	0,35865	0,37365	0,38865	0,40365
Rural - Vale Jequitinhonha - (Irrigação noturna) - 73% de desconto (Consumo R\$/kWh)	0,09684	0,10089	0,10494	0,10899
Rural - Demais Regiões - (Irrigação noturna) - 67% de desconto (Consumo R\$/kWh)	0,11835	0,12330	0,12825	0,13320

O levantamento de custos para um sistema BFT e a eletrificação rural é apresentado pela tabela 5.

Tabela 4- Custos eletrificação rural X sistema BFT. Própria.

Eletrificação Rural		Sistema Gerador BFT	
Equipamento	Custo [R\$]	Equipamento	Custo [R\$]
Instalação	26000,00	Bomba centrífuga	1064,64
Consumo Energético	0,40 kWh	Motor de indução trifásico 1700rpm 1,5CV	450,00
		Inversor de Frequência WEG CFW-08 7A Trifásico 220V - 2,00 CV	1115,00
		Custo total:	4144,280

Pela tabela 5 é possível comparar os valores das duas tecnologias em questão como alternativa de instalação.

3.1 Valor da Eletrificação Rural

Considerando que seja consumido por mês 610W, pelo valor consumo rural, o consumidor deveria pagar nessa categoria $0,610(\text{kW}) \cdot 0,40365(\text{taxa}) \cdot 24 (\text{h}) \cdot 30(\text{dias}) = \text{R}\$177,28308$ por mês.

O valor de 610[W] foi escolhido arbitrariamente e coincide com o valor da Potência do Gerador operando numa velocidade de 1800[rpm].

3.2 Cálculo do tempo de recuperação de capital utilizando sistema Price para aquisição do sistema BFT

Supondo que para adquirir um sistema BFT, um consumidor tenha pegado um empréstimo a ser pago conforme a tabela Price de acordo com o valor a ser economizado com a conta mensalmente, no caso, o valor de R\$177,2803. Considera-se a taxa Selic anual 11,25%. Pelo cálculo conforme a Price, pagando o valor fixo de 177,2803, consegue pagar o valor do empréstimo em 24 meses. Ou seja, em 24 meses, sem pagar o valor da conta de energia para a concessionária, esse valor que deveria ser pago é totalmente revertido em aquisição dos materiais necessários para a construção da geração por BFT e os juros.

A distribuição Price foi escolhida nesse contexto visto que oferece a valores fixos o pagamento de uma situação de empréstimo com taxa de juros, necessário neste estudo para comparação das duas formas de entrega de energia.

4. Conclusão

Os resultados mostraram que em 24 meses é possível pagar o empréstimo utilizado para aquisição do sistema BFT consumindo toda a energia produzida, com base de cálculo da maior tarifa para zona rural e considerando que não houve sobra de energia. Além disso, foi considerado em cálculo apenas o valor da tarifa de energia, não foi incluído o valor da instalação da eletrificação rural na base de cálculo, de R\$26000,00 por quilômetro, que em outros estados esse valor pode chegar a R\$60000,00. Deve-se salientar que também não foram incluídos na base de cálculo os valores da instalação, mão-de-obra e outros componentes necessários para o funcionamento pleno da tecnologia BFT. Entretanto, os valores acrescidos à esse valor final ainda não superam o valor a ser pago em relação à opção em se utilizar a eletrificação rural. Ainda assim, pode-se afirmar que o sistema BFT é bem mais econômico que aquele.

Além disso, ocorre a entrega de uma energia de qualidade e junto à carga consumidora e esta não passa por perdas de distribuição e oscilações ao longo do dia, como a eletrificação rural, por se tratar de uma geração próxima à carga. As vantagens do sistema gerador também são relevantes, visto que os componentes utilizados no sistema BFT são abundantes no mercado, de simples manutenção e reposição.

O nível de potência do experimento é relevante na análise, pois o baixo nível de potência trouxe baixos rendimentos devido aos componentes utilizados. Estima-se que a níveis maiores de potência, o rendimento do sistema aumente devido à estrutura dos motores e bombas a maiores potências apresentarem melhores rendimentos se comparadas às de menores potências, entretanto, estudos devem ser feitos. Apesar de parecer pequeno, o custo da matéria prima, no caso a água, é zero, e a mesma é corrente. Se comparado com sistemas

solares que tem 15% de aproveitamento de geração e o período de geração é apenas diurno e vespertino, o sistema de geração utilizando BFT é muito mais rentável.

Portanto, a proposta de um sistema de geração distribuída a baixo custo é efetivamente verificado neste trabalho e sua implementação é verificada, além de verificar sua democratização de modelo de geração energia elétrica devido à sua configuração, já que é possível gerar energia de forma a aproveitar recursos locais, com baixo custo, de modo simples, capaz de ser utilizado em comunidades isoladas e carentes que possuem potencial hidráulico local.

Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015 (2015). **Lex:** Resolução Normativa ANEEL, Brasília- DF, nov. 2015.

CARVALHO, Fran William Santana. **Transformador de frequência variável aplicado à geração hidrelétrica com rotação variável.** Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, ago. 2001.

CHAPALLAZ J. M.; GHALI, J. D.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, g. **Manual on Motors Used as Generators.** MHPG Series, Vol. 10, Friedr. Vieweg & SohnVerlagsgesellschaft mbH, Alemanha, 1990.

Companhia Energética de Minas Gerais- CEMIG. **Valores de Tarifas e Serviços.** Disponível em:

< http://www.cemig.com.br/pt-Br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx >. Acesso em: 20 abr. 2017.

CUSTÓDIO, L. M.; FREIRE, Lais A. G.; LOPES, Rafael E.; SILVA, Waner W. A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica do Uso de Bombas Funcionando Como Turbinas como Alternativa de Baixo Custo para Construção de CGHS Operando a Frequência Variável.** In: XCBPE - X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2016.

R.C. Bansal. **Three-phase self-excited induction generators:** An overview. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, pp. 292- 299, Jun. 2005.

RESENDE, J. T. **Operação Isolada e Interligada do Gerador de Indução**. Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá- EFEI, Itajubá, Junho, 1994.

SHARMA, K. R. **Small hydroelectric projects- Use of centrifugal pumps as turbines**. Kirloskar Electric Co., Bangalore, India 1985.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho; REZEK, Angelo José Junqueira; MEDEIROS, Daniel de Macedo. **A utilização de motores de indução acionados por BFT's na geração de energia elétrica**. Agrener GD, 2004.

WAGNER, C. F. **Self excitation of Induction Motors**. AIEE Transactions on Electrical Engineering, Vol. 58, pp 47-51, fev. 1939.

WILLIAMS, A. A. **The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods**. Proc. ImechE, Vol.208, Pt A, pp 59-66, 1994.