

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

UTILIZAÇÃO DE BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA OPERANDO À FREQUÊNCIA VARIÁVEL COMO ALTERNATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA¹

LETÍCIA MOREIRA CUSTÓDIO¹, LAÍS AVELAR², VINICIUS VALAMIEL³,
RAFAEL BALBINO CARDOSO⁴, RAFAEL EMÍLIO LOPES⁵

¹ Apresentado no XII Seminário de Meio Ambiente e Energias Renováveis.

² Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, Itabira, Minas Gerais, Brasil;

E-mail: leticiamcustodio@gmail.com

² Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, Itabira, Minas Gerais, Brasil;

E-mail: lais.avelar.freire@gmail.com

³ Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, Itabira, Minas Gerais, Brasil;

E-mail: vvalamiel@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, Itabira, Minas Gerais, Brasil;

E-mail: cardosorb@unifei.edu.br

⁵ Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, Itabira, Minas Gerais, Brasil;

E-mail: lopes.unifei@gmail.com

RESUMO

O sistema de geração e transmissão do Brasil é interligado sendo capaz de gerar energia em locais isolados e entregar aos centros de carga. Entretanto, gastos com transmissão e perdas de energia envolvidos no processo são relevantes. Assim a geração distribuída se mostra uma alternativa de geração próxima ao centro consumidor, independente da potência, aproveitando potencial local, reduzindo portanto, perdas energéticas e custos com a transmissão. O estudo evidencia a Bomba funcionando como turbina (BFT) como alternativa de geração distribuída

com custos de instalação, operação e manutenção altamente competitivos quando comparado a outras fontes de energia. Neste trabalho uma bomba é ensaiada na bancada de testes em diferentes rotações. Traçado o comportamento da mesma operando com velocidade variável, é possível apreender a melhor faixa de operação da bomba, com os melhores índices obtidos. Os resultados evidenciam que é possível o aproveitamento desse tipo de geração distribuída estável, com rendimentos satisfatórios, como alternativa de geração e aproveitamento do potencial energético local, entregando uma energia de qualidade, auxiliando comunidades isoladas, utilizando de forma racional os recursos energéticos.

Palavras-chave: Geração distribuída, Bomba funcionando como turbina, Conversores.

USING A PUMP OPERATING AS A TURBINE OPERATING AT THE VARIABLE FREQUENCY AS AN ENERGY GENERATION ALTERNATIVE

Abstract

The generation and transmission system of Brazil is interconnected being able to generate energy in isolated locations and to deliver to the load centers. However, transmission costs and energy losses involved in the process are relevant. Thus the distributed generation is an alternative of generation near the consumer center, independent of the power, taking advantage of local potential, reducing, therefore, energy losses and costs with the transmission. The study evidences the Pump as Turbine (PAT) as an alternative to distributed generation with installation, operation and maintenance costs highly competitive when compared to other energy sources. In this work a pump is tested in the bench of tests in different rotations. By tracing the behavior of the same operand with variable speed, it is possible to perceive the best range of operation of the pump, with the best indices obtained. The results show that it is possible to use this type of stable distributed generation, with satisfactory yields, as an alternative to generate and take advantage of the local energy potential, delivering quality energy, helping isolated communities, using energy resources in a rational way.

Keyword: Distributed Generation, Pump As Turbine, Converters.

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 (2012), 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. Além disso, esse tipo de geração alia a economia financeira, autossustentabilidade e consciência ambiental.

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 é de fácil implementação e simples configuração.

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. Como não possui 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 01.

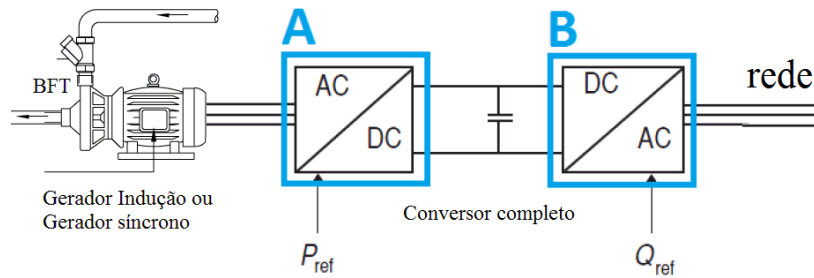


Figura 1- Configuração do Sistema de geração utilizando BFT operando a frequência variável.
Própria

A 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. Para isso, o sistema deve apresentar a tensão e a frequência em fase para que haja 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 seja aproveitado melhor essas forças envolvidas, e faz o controle efetivo de potência injetada na rede.

Neste estudo será abordada a configuração da BFT em toda a sua operação, desde a geração até o seu acoplamento à rede, englobando todos os seus custos e esse valor comparado com a eletrificação rural, por meio de análise de viabilidade econômica.

MATERIAIS E MÉTODOS

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 Hidráulica – CPH, localizado na Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. A bancada montada é a apresentada conforme a Figura 2.

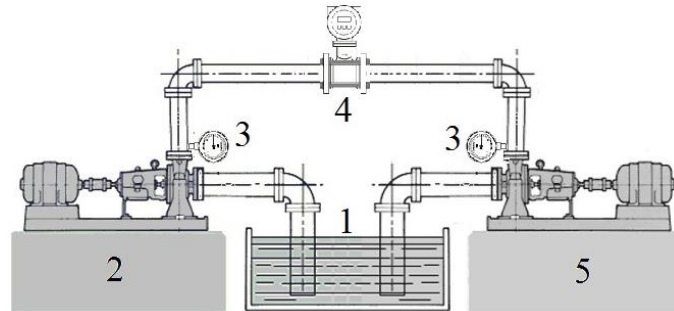


Figura 2- Bancada de testes montada para realização dos ensaios e obtenção de dados. Própria

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 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 [m³/s]
- Altura (manométrica) em metros [m]
- Potência da BFT em Watts [W]
- Rendimento em porcentagem [%]

2.3 Realização dos Ensaios

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 η [%] e rotação ω [rpm].

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

Tabela 1- Dados Ensaiaados da BFT.

H [mca]	24		25		26		27		28	
ω [rpm]	P[W]	η [%]	P[W]	η [%]	P[W]	η [%]	P[W]	η [%]	P[W]	η [%]
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

Fonte: Autoria própria

Pela Tabela 1, é possível verificar que dentre a faixa de alturas ensaiada, a que teve a maior transferência de potência foi a altura de 28[m], sendo o maior valor de potência transferida de 979,39[W]. Sabendo disso, essa altura foi a 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 foi o escolhido para essa configuração por apresentar a vantagem de ser um motor com um custo menor, se comparado ao motor síncrono, e também pela facilidade em encontrar esse motor comercialmente.

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

Tabela 2- 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

Fonte: Autoria própria

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 3- Dados do resultado do ensaio do motor de indução operando como gerador à frequência variável.

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

Fonte: Autoria própria

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 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.

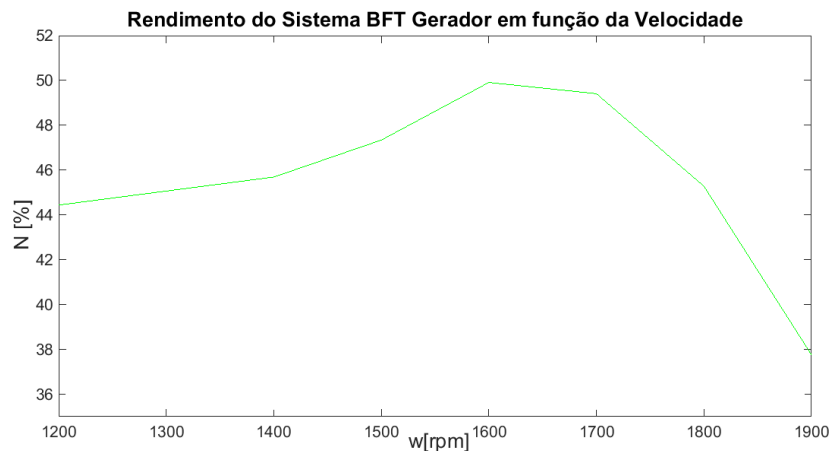


Figura 3- Rendimento do Sistema BFT Gerador em função da Velocidade.

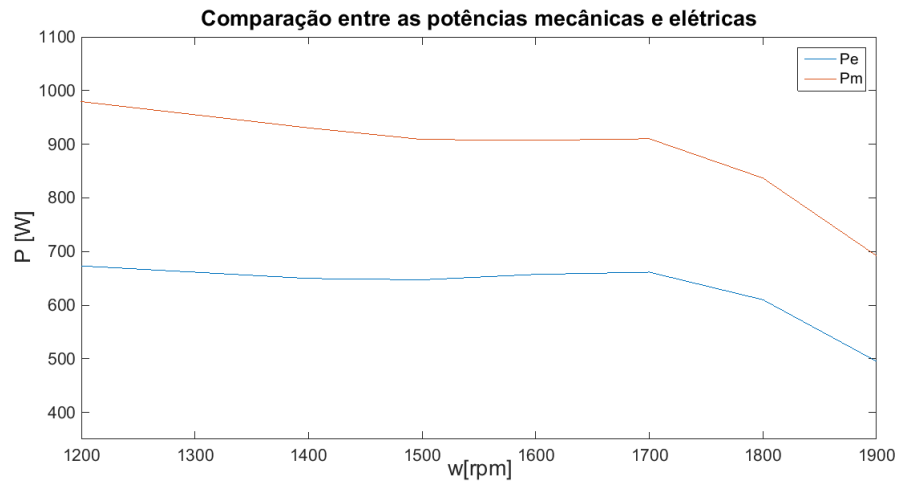


Figura 4- Comparação entre as potências mecânicas e Elétricas

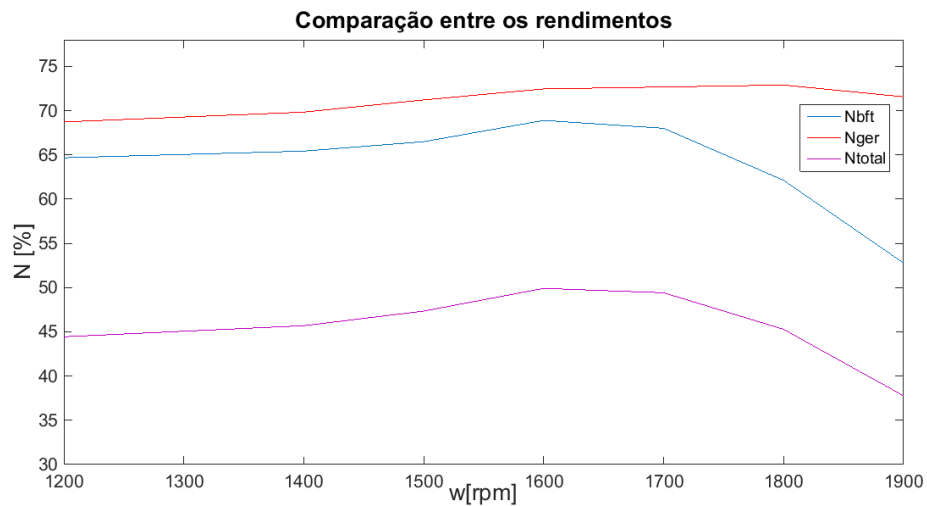


Figura 5- Comparação entre os rendimentos

As figuras apresentadas evidenciam o comportamento do sistema bft-gerador como potencial fonte geradora de energia.





RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema BFT – gerador – conversor apresentou um rendimento máximo de 49,91%, visto que a bomba e o gerador apresentam um baixo rendimento. O nível de potência do experimento também contribuiu para esse resultado visto que a essa 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.

A questão crucial para o desenvolvimento deste trabalho é o levantamento da questão – “o sistema BFT realmente compensa economicamente em relação à eletrificação rural no estado de Minas Gerais?”. A análise de viabilidade envolve o custo do motor, o custo do gerador, o custo do conversor e a comparação se da com o custo da eletrificação rural e o custo de sua instalação. Em uma pesquisa realizada no dia 30/03/2017 com o setor de subtransmissão da Companhia Energética de Minas Gerais- CEMIG, a eletrificação rural apresentava o custo de instalação no valor de R\$26 000,00/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 4- Custo da energia fornecida pela CEMIG no setor rural.

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

Fonte: CEMIG.

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

Tabela 5- Custos eletrificação rural X sistema BFT.

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

Fonte: Autoria própria

3.1- Valor da eletrificação Rural

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

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.

CONCLUSÕES

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.

Pode-se afirmar que o sistema BFT apresenta uma economia de energia muito grande se comparada à eletrificação rural. 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. 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. Outro fator importante é o nível de potência do experimento. 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. A proposta de um sistema de geração distribuída a baixo custo é efetivamente verificado neste trabalho e sua implementação é verificada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Carlos Barreira Martinez, à UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá, à FAPEMIG- Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais e todos do CPH- Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos pela contribuição nesse artigo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012 (2012). **Lex:** Resolução Normativa ANEEL, Brasília, DF, abr. 2012.

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

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

CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. Manual on Pumps Used as Turbines. MHPG Series, Vol. 11; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Alemanha; 1992.

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.

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, jun. 1994.

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.