

Estudo de geradores de indução na geração de energia elétrica em microcentrais hidrelétricas

INDUCTION GENERATORS STUDY ON MICRO HYDRO PLANTS GENERATION

Daniel de Macedo Medeiros
Augusto Nelson Carvalho Viana
Instituto de Recursos Naturais - Universidade Federal de Itajubá
Ângelo José Junqueira Rezek
Instituto de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Itajubá

RESUMO

O gerador de indução (que na verdade é um motor de indução operando como gerador) é uma alternativa viável para geração de energia elétrica em microprovetamentos hidroenergéticos, principalmente devido ao seu baixo custo, tanto de aquisição como de manutenção, sua simplicidade construtiva e robustez, quando comparado ao gerador síncrono. Estudos mostram que seu custo é aproximadamente 40% inferior em relação ao gerador síncrono. No entanto, no Brasil, a utilização de geradores de indução acoplados a turbinas hidráulicas ainda está no escopo de experimentos de laboratórios. Este artigo, baseado em resultados experimentais realizados no Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas, da Universidade Federal de Itajubá - LHPCH-UNIFEI, propõe a utilização de geradores assíncronos acoplados a microturbinas hidráulicas. Neste trabalho são apresentados alguns fundamentos teóricos que descrevem as principais características operacionais do gerador de indução (GI), as técnicas para controle da tensão e da frequência e os resultados dos experimentos realizados no LHPCH-UNIFEI, onde se ensaiou um gerador de indução (GI) acoplado a uma bomba operando como turbina (BFT). Apresenta também um estudo de caso, onde são comparados os custos relativos entre um grupo-gerador utilizando uma BFT e um GI e outro utilizando uma turbina Michell-Banki e um gerador síncrono.

PALAVRAS CHAVE

Geradores de indução. Bombas operando como turbinas. Microcentrais hidrelétricas.

ABSTRACT

Induction generator (in the truth, nothing more than an induction motor working as a generator) is a feasible option for generating electricity in micro hydro plants, mainly by its low costs, such as on purchasing and on maintenance, its construction simplicity and strongness when compared with a synchronous generator. Studies show that the costs of an induction generator is up to 40% lower than a synchronous one. However, in Brazil, the use of induction generators connected to hydro turbines is on a laboratory level yet. This article, based on experimental results developed in Itajubá's Federal University's Small Hydro Plants Hydromechanical Laboratory - LHPCH-UNIFEI - proposes the use of asynchronous generators connected to micro hydro turbines. Some theoretical basis that describes the main operational characteristics of induction generator (IG) are presented in this work, the voltage and frequency control techniques and the results of the tests accomplished in LHPCH-UNIFEI, where an induction generator connected to a pump working as turbine (PAT) was tested. A case study is also presented, comparing the costs of a PAT/IG and a Michell-Banki/synchronous generator group.

KEYWORDS

Induction generators. Pump working as turbine. Micro hydro plants.

BOMBA OPERANDO COMO TURBINA (BFT)

Para que a bomba opere como turbina é necessário que se faça a inversão do fluxo de água, que tem como consequência a inversão do sentido de rotação do rotor. As figuras 1a e 1b, a seguir, ilustram, respectivamente, os sentidos do fluxo de água quando do bombeamento de água e quando da geração de energia mecânica.

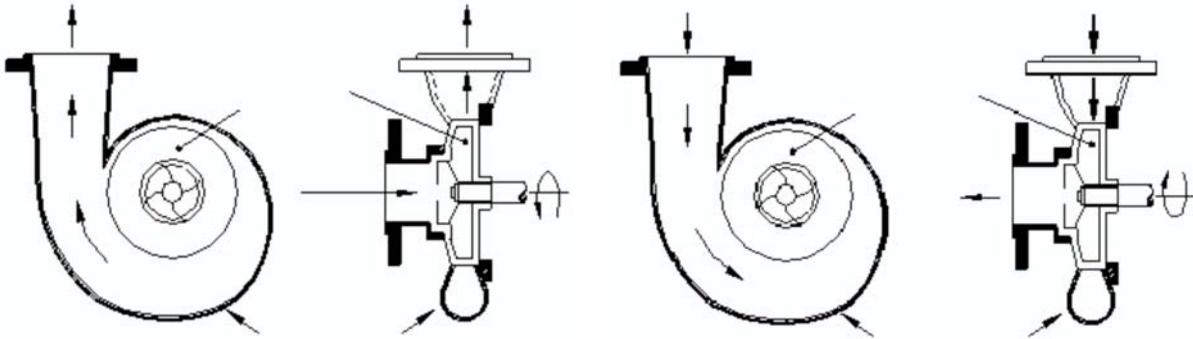


Figura 1 – Fluxo de água na bomba quando da operação de bombeamento (a) e da geração de energia mecânica (b) (VIANA, 1987)

No entanto, para que a bomba opere como turbina não basta a inversão do fluxo, mas também o aumento da altura e da vazão com relação aos dados nominais fornecidos pelo fabricante. Estudos realizados no Brasil por Viana (1987) no LHPCH-UNIFEI, tornaram possível o levantamento de coeficientes experimentais, baseados em ensaios de bombas bombeando água e operando como turbina, que permitem a determinação da altura e da vazão nominal para uma determinada bomba operar como turbina. Tal técnica é conhecida como Método de Viana para seleção de BFT's. A elevação destes parâmetros torna-se necessário a fim de que o rendimento da BFT mantenha-se igual ao da bomba. No trabalho desenvolvido por Medeiros (2004) no LHPCH-IRN-UNIFEI são realizados ensaios onde se conseguiu um rendimento superior para a BFT se comparado com a bomba. Um estudo muito interessante também foi realizado por Chapallaz et al. (1992) na Europa onde foram levantados coeficientes experimentais para a determinação da altura e da vazão da bomba que irá operar como turbina.

O GERADOR DE INDUÇÃO (GI)

Estudos sobre o gerador de indução iniciaram-se na década de 30 como pode ser visto nos trabalhos de Basset et. Al (1935) e Wagner (1939). O gerador de indução não é propriamente um gerador, mas um motor de indução utilizado para gerar energia. Basicamente

existem dois motores de indução que pode ser utilizados como gerador. O primeiro possui um rotor bobinado e anéis coletores que interligam o circuito do rotor a um circuito qualquer localizado no exterior da máquina. Já o segundo, mais indicado para operar como gerador, principalmente devido à sua simplicidade e baixo custo, possui um rotor denominado rotor em gaiola de esquilo, que é mostrada na figura 2 na

página a seguir.

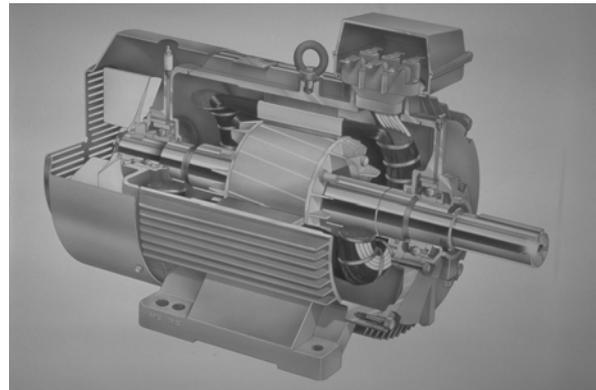


Figura 2 – gerador de indução como rotor em gaiola de esquilo (fonte: www.ieee-kc.org)

Com relação ao gerador síncrono, utilizado em centrais hidrelétricas, o gerador de indução possui várias vantagens, tais como:

- custo – de acordo com o trabalho de Chapallaz et al (1990) o GI pode ser uma opção viável técnico e economicamente para potência até 100kVA. Como será mostrado no estudo de caso adiante, pode-se conseguir uma economia de 40% na aquisição de um GI de 30kW, se comparado ao gerador síncrono de mesmo porte;
- robustez – possui uma estrutura mais simples e ausência de pólos salientes. Isto significa que a veloci-

dade de disparo do gerador de indução não é um grande inconveniente, tal como acontece nos geradores síncronos. Para máquinas de quatro pólos, os fabricantes garantem que a velocidade de disparo atinja o dobro da velocidade síncrona da máquina Chapallaz et al. (1990);

- simplicidade – a ausência de bobinas, anéis coletores no rotor e escovas, torna o gerador de indução uma máquina praticamente isenta de manutenção se comparada ao gerador síncrono. Isto é uma grande vantagem quando se trata de microcentrais hidrelétricas operando em áreas isoladas de difícil acesso para equipes de manutenção;

- sincronismo – o gerador de indução dispensa a utilização de colunas de sincronismo, o que repercute num menor custo de aquisição, quando comparado ao gerador síncrono. Outra vantagem que pode ser citada é com relação ao disjuntor, pois, para microcentrais é mais viável utilizar disjuntores termomagnéticos. No entanto, quando há duas ou mais máquinas em paralelo, é interessante a utilização de disjuntores termomagnéticos motorizados para facilitar a operação de sincronismo entre as máquinas. Como o gerador de indução não necessita de sincronização, o custo pode ser ainda mais reduzido, visto que o sistema de motorização do disjuntor é caro;

- sistema de excitação – geradores síncronos utilizam um banco de capacitores para excitação. Possui a vantagem de ser um sistema estático, ou seja, não possui componentes rotativos, se comparado ao gerador síncrono, que normalmente utiliza sistemas rotativos para excitação (tipo “brushless”). Estes também podem operar com excitatrizes estáticas, mas o número de máquinas síncronas que utilizam este sistema é reduzido devido ao seu alto custo.

TÉCNICAS PARA O CONTROLE DA TENSÃO E DA FREQUÊNCIA GERADA

Como será observado na próxima seção, tal como acontece com o gerador síncrono, a tensão gerada pelo GI sofre um decréscimo conforme a carga aumenta caso não haja algum sistema para o controle da tensão, caso a máquina esteja operando num sistema isolado. Esta queda pode ser explicada pelo fato do aumento da corrente da carga causar um aumento na queda de tensão dos circuitos internos da máquina.

Várias técnicas para controle da tensão foram estudadas e desenvolvidas ao longo dos anos que podem ser vistas nos trabalhos de Basset et. Al (1935), Brennen

et. Al (1977), Caldas (1980) e Chapallaz et al (1990). Resumindo tem-se:

- método do capacitor série;
- método dos capacitores chaveados;
- método do controlador de carga;
- método do reator saturado;
- método do indutor controlado por tiristores.

A utilização de cada técnica depende da natureza da carga a ser alimentada, ou seja, se é ativa ou reativa, e também da precisão que se necessita no controle da tensão.

O controle da frequência pode ser feito mantendo-se a velocidade do GI constante, tal como ocorre no gerador síncrono, porém é necessário ressaltar que para que uma máquina de indução de quatro pólos, por exemplo, gere energia com a frequência de 60Hz a plena carga, é necessário que ela opere a uma velocidade bem acima de 1800rpm.

Estas vantagens podem ser maiores se for considerada a operação do GI em paralelo com uma rede, visto que, neste caso não é necessária a utilização de sistemas de controle de tensão e frequência que são definidos pela rede interligada.

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

No trabalho de Medeiros (2004), ensaios experimentais foram realizados no LHPCH-IRN-UNIFEI a fim de avaliar o comportamento operacional de um GI acoplado a uma BFT operando num sistema isolado. Nas figuras 3 e 4, a seguir, podem se visualizados o GI acoplado à BFT e a bancada de ensaios contendo o banco de capacitores utilizado na excitação do GI e os instrumentos para medição das grandezas elétricas.

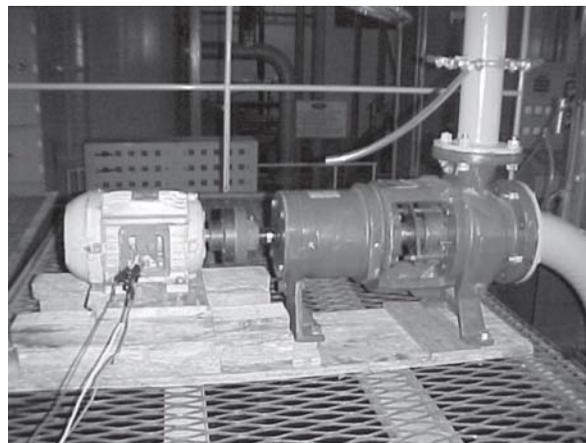


Figura 3 – GI acoplado à BFT (MEDEIROS, 2004)

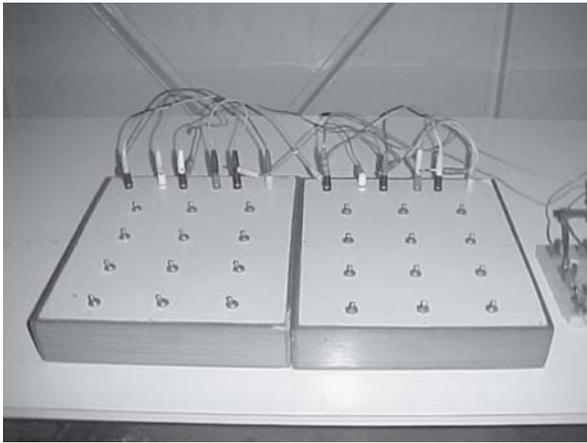


Figura 4 – Banco de capacitores para excitação do GI e instrumentação, (MEDEIROS, 2004)

O banco de capacitores foi especificado utilizando o método proposto no trabalho de Chapallaz et al (1990). Resumindo, o método consiste em determinar a relação $\frac{\text{sen}(\phi_g)}{\text{sen}(\phi_m)}$, obtida experimentalmente para máquinas de 50Hz, para depois, determinar a capacitância necessária à excitação do GI para aquela frequência. Após este feito é necessário realizar um pequeno ajuste no cálculo da capacitância a fim de determinar seu valor para a frequência de 60Hz.

Os resultados dos ensaios realizados no LHPCH-IRN-UNIFEI são mostrados nas Figuras de 5 a 11 a seguir.

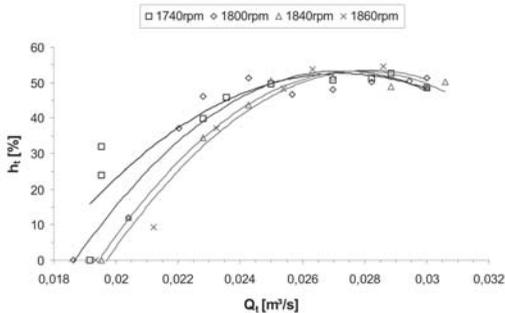


Figura 5 – Rendimento do grupo gerador em função da vazão, (MEDEIROS, 2004)

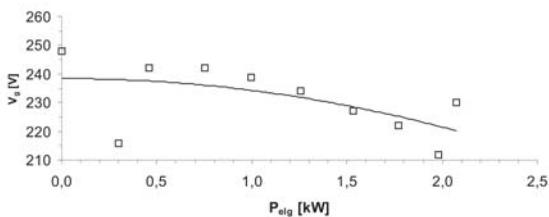


Figura 6 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1740\text{rpm}$, (MEDEIROS, 2004)

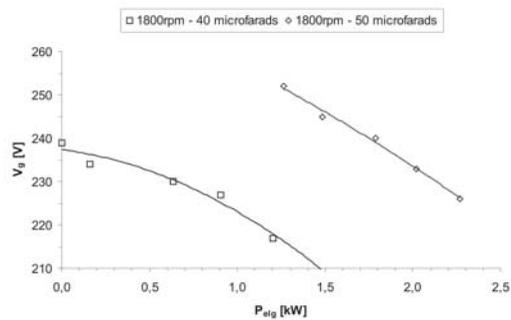


Figura 7 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1800\text{rpm}$, (MEDEIROS, 2004)

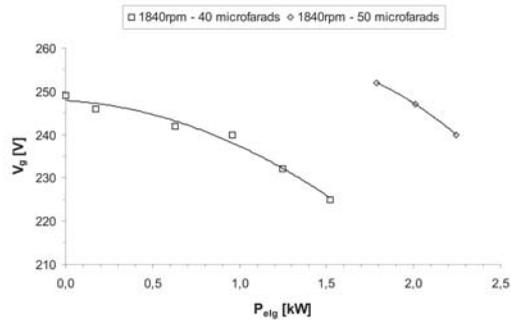


Figura 8 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1840\text{rpm}$, (MEDEIROS, 2004)

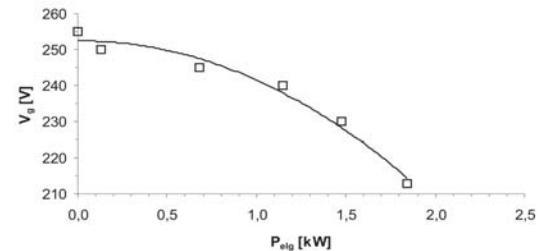


Figura 9 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1860\text{rpm}$, (MEDEIROS, 2004)

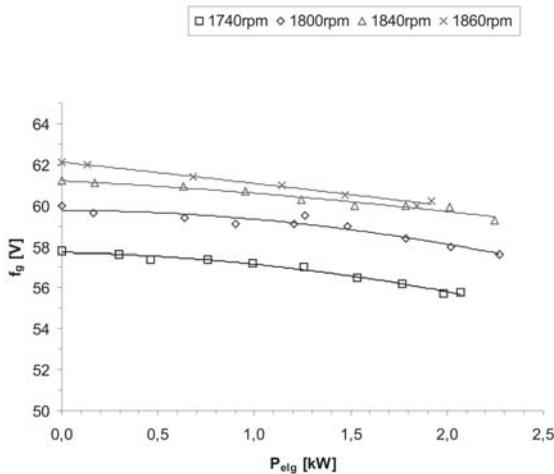


Figura 10 – Frequência do gerador em função da potência elétrica gerada (MEDEIROS, 2004)

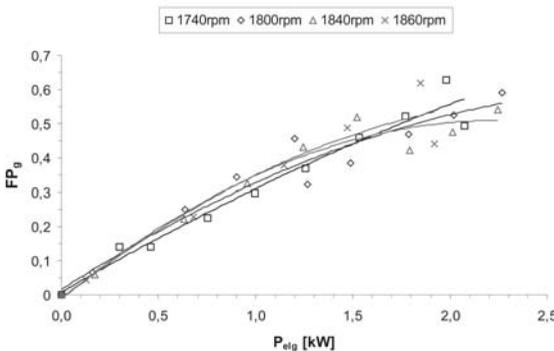


Figura 11 – Fator de potência em função da potência elétrica gerada (MEDEIROS, 2004)

É importante ressaltar que o rendimento do GI é menor se comparado com o motor de indução. No trabalho de Medeiros (2004) foi utilizado um motor com rendimento de 77%, mas como gerador sua eficiência caiu para 71%. Isto pode ser explicado pelo fato do GI necessitar de mais energia reativa para sua excitação do que o motor. Ora, como o circuito de potência e de excitação são os mesmos, há necessidade de se reduzir a “parcela” de potência ativa gerada para ceder espaço para circulação de energia reativa. A observância deste detalhe é importante, pois a capacidade de condução dos enrolamentos é função da potência aparente da máquina de indução, dada pela Equação (1) a seguir:

$$S = \sqrt{P+Q} \quad (1)$$

onde:

S potência aparente [VA];

P potência ativa [W];

Q potência reativa [VAr].

O desrespeito a esta condição pode ocasionar sobre aquecimento do GI, e, conseqüentemente, sua queima.

Analisando as Figuras 6, 7, 8 e 9 verifica-se que a tensão do GI decresce conforme a carga aumenta. Este efeito já era esperado visto que o aumento da corrente ocasiona maiores quedas de tensão no circuito interno do GI. Portanto, há necessidade de se compensar estas quedas aumentando-se a excitação da máquina através da inserção de mais capacitância no GI. Comparando-se as Figuras 6, 7, 8 e 9, constata-se também que a tensão gerada é maior, quanto maior for a rotação da máquina, para uma mesma capacitância e uma mesma carga.

Observando-se a Figura 10, observa-se que a frequência do GI também decresce com o aumento da carga, mesmo mantendo a velocidade constante. Isto é razoável, visto que a máquina de indução operando como motor sofre queda na velocidade devido ao aumento da carga mecânica acoplada a seu eixo, considerando que a frequência do sistema mantenha-se constante. No gerador de indução ocorre exatamente o contrário, ou seja, um aumento na carga elétrica ocasiona uma queda na frequência gerada, mesmo mantendo-se a velocidade constante.

Finalmente, a Figura 11 a curva característica que relaciona o fator de potência com a carga elétrica alimentada pelo GI. Observando a citada figura, constata-se que é semelhante àquela que caracteriza a máquina de indução operando como motor. Da mesma forma que o motor, o fator de potência melhora quando a carga aumenta e vice-versa.

ESTUDO DE CASO

Para mostra a viabilidade econômica do GI quando comparado ao gerador síncrono, foi realizado um estudo de caso onde se estudou a possibilidade de se repotenciar uma microcentral hidrelétrica situada na Fazenda Boa Esperança, Município de Delfim Moreira, Sul do Estado de Minas Gerais. No citado local existe um turbina Michell-Banki acoplada a um gerador síncrono operando isoladamente do sistema.

Para o levantamento de custos dos equipamentos considerou-se, sendo novo, o grupo gerador com turbina Michell-Banki e o mesmo para a BFT e o gerador assíncrono. Na Tabela 1 a seguir, são encontrados os equipamentos necessários ao funcionamento dos gru-

pos geradores bem como seus respectivos custos.

Tabela 1 – Comparação entre os custos dos equipamentos (MEDEIROS, 2004)

GRUPO GERADOR SÍNCRONO		GRUPO GERADOR ASSÍNCRONO	
Equipamento	Custo [RS]	Equipamento	Custo [RS]
Turbina Michell-Banki	12.030,00	Bomba centrífuga e acessórios (luva e protetor de acoplamento)	2.930,00
Gerador trifásico, tipo "brushless", eletrônico, sem escovas, 220V, 1800rpm, 60Hz, 30kW	5.250,00	Motor trifásico, 220V, 1800rpm, 60Hz, 30kW, adaptado com banco de capacitores para excitação	3.220,00
Painel de controle com instrumentos, controlador eletrônico de carga	2.620,00	Painel de controle com instrumentos, controlador eletrônico de carga	2.620,00
Válvula borboleta (ø300mm)	950,00	Válvula borboleta (ø300mm)	700,00
Custo total (RS)	20.600,00	Custo total (RS)	9.470,00
Custo total (US\$)	6.800,00	Custo total (US\$)	3.125,00

A Tabela 1, portanto, demonstra que o painel de controle, o regulador eletrônico de carga, a válvula borboleta são necessários aos dois empreendimentos e possuem custos iguais. O que mais chama a atenção é o custo da turbina Michell-Banki, que está em torno de quatro vezes maior que o da bomba. No caso da comparação do motor assíncrono e do gerador síncrono, mesmo com a adaptação do banco de capacitores para a excitação da máquina, o custo do motor assíncrono é 1,6 vezes menor do que o gerador síncrono. No total, o custo do grupo gerador assíncrono é 2,2 vezes menor que o grupo gerador síncrono.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização do motor assíncrono como gerador se mostra interessante em sistemas isolados, principalmente, devido ao baixo custo se comparado ao gerador síncrono. Também tem a vantagem de ser uma máquina mais robusta e praticamente isenta de manutenção, devido à ausência de escovas.

Para sistemas operando em paralelo entre 100 e 1000kVA, recomenda-se que se estude a possibilidade de se utilizar o GI em substituição aos geradores síncronos, visto que estes necessitam de equipamentos de sincronismo, que possuem alto custo.

REFERÊNCIAS

BASSET, E. D., POTTER, F. M. Capacitive excitation of induction generators. *Transactions AIEE*, v. 54, p. 540 – 545, 1935.

CHAPALLAZ, J. M., EICHENBERGER, P., FISCHER, G. *Manual on pumps used as turbines*. MHPG Series, v. 11, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mb, Germany, 1992.

CHAPALLAZ J. M., GHALI, J. D., EICHENBERGER, P., FISCHER, G. *Manual on motors used as generators*. MHPG Series, v. 10, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Germany, 1990.

MACEDO, D. M. *A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica*. 2004. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.

VIANA, A. N. C. Bombas de fluxo operando como turbinas. Por que usá-las? *PCH Notícias & SHP News*, a. 4, n. 12, CERPCH, Itajubá, nov./ dez. / jan. 2002.

VIANA, A. N. C. *Comportamento de bombas centrífugas funcionando como turbinas hidráulicas*. 1987. Dissertação (Mestrado), Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1987.

VIANA, A. N. C., NOGUEIRA, F. J. H. *Bombas centrífugas funcionando como turbinas*. Trabalho de Pesquisa, Departamento de Mecânica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1990.