VIABILIDADE DE CONJUNTO MOTOR DE INDUÇÃO E BOMBA CENTRÍFUGA OPERANDO COMO TURBINA E GERADOR PARA PEQUENOS APROVEITAMENTOS DE POTENCIAL HÍDRICO

REGINALDO BARBOSA FERNANDES

2006

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

REGINALDO BARBOSA FERNANDES

VIABILIDADE DE CONJUNTO MOTOR DE INDUÇÃO E BOMBA CENTRÍFUGA OPERANDO COMO TURBINA E GERADOR PARA PEQUENOS APROVEITAMENTOS DE POTENCIAL HÍDRICO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Júnior

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

2006

REGINALDO BARBOSA FERNANDES

VIABILIDADE DE CONJUNTO MOTOR DE INDUÇÃO E BOMBA CENTRÍFUGA OPERANDO COMO TURBINA E GERADOR PARA PEQUENOS APROVEITAMENTOS DE POTENCIAL HÍDRICO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em terça-feira, 7 de novembro de 2006

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez	UFMG
Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo	UFLA
Prof. Dr. Alberto Colombo	UFLA

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Júnior
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

Ofereço a Deus e à Nossa Senhora Aparecida,

por permitirem que tudo em minha vida aconteça, como, neste momento, a realização deste sonho.

Dedico esta vitória aos meus pais, Sãozinha e Tião Salgado; aos meus irmãos Ronaldo e Jaqueline; à minha avó Mariquinha e ao meu avô Tião Barbosa que lá dos céus me dá forças;

Dedico, finalmente, à minha namorada, Tayse, pela paciência, carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus e à Nossa Senhora Aparecida, pela presença em todos os momentos de minha vida: sucessos, vitórias, derrotas, oportunidades... Muito obrigado por mais essa conquista.

Aos meus pais, Sãozinha e Tião Salgado, pelo amor, educação, bons conselhos, apoio incondicional e por sempre confiarem em mim. Valeu mesmo, Mãe e Pai.

A “vó” Mariquinha, que também sempre me quer o bem e ao meu “vô” Tião Barbosa que, mesmo não estando presente no meio de nós, está sempre torcendo por mim. Tenho certeza disso.

A você, Roberto, pela brilhante orientação acadêmica e profissional. Obrigado por confiar em meu trabalho, pela paciência, amizade, compreensão, pelo incentivo e força naqueles momentos em que nada dava certo.

Aos meus co-orientadores, Alberto Colombo e Giovanni Rabello, pela dedicação paciência e amizade. Em especial ao Giovanni, pelas orientações no primeiro contato com a UFLA.

Ao professor Jacinto, pela disposição e ajuda na parte hidráulica.

Ao professor Martinez, da UFMG, pelo apoio e confiança em ceder o laboratório do Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da UFMG para a realização dos primeiros ensaios.

Ao Engenheiro Eletricista Rafael Emílio (Torinha), doutorando no CPH da UFMG.

Ao Nenê, técnico do Laboratório de Hidráulica da UFLA.

Ao doutorando Giuliane do Prado

A Daniela, secretária da pós-graduação em engenharia agrícola, pela atenção e paciência. “Daniela, me empresta a chave?”

Aos amigos que fiz durante este tempo.

Aos amigos e colegas de graduação na Universidade Federal de São João Del Rei, Edson e Edgar, pelo apoio em Belo Horizonte, também atleticanos sempre.

Ao Departamento de Engenharia da UFLA, pela oportunidade.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Finalmente, à minha namorada, Tayse e seus pais, Zé Maria e Lurdes, pela atenção, amor e carinho.

Muito obrigado a todos!

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS i
RESUMO iii
ABSTRACT iv
1 Introdução 1
2 Objetivos 3
3 Referencial teórico 4
3.1 Funcionamento e partes principais da máquina de indução 4
3.2 Gerador de indução 7
3.2.1 Vantagens: 7
3.2.2 Desvantagens 7
3.2.3 Características de funcionamento 8
3.2.4 Operação isolada do gerador de indução 9
3.2.5 O processo de partida do gerador de indução auto-excitado 11
3.2.6 Método para cálculo dos capacitores de excitação 14
3.3 Bomba Funcionando Como Turbina (BFT) 17
3.3.1 Vantagens 18
3.3.2 Desvantagens 18
3.3.3 Métodos e Equações para Seleção da BFT 21
4 Material e métodos 26
4.1 Seleção do conjunto BFT-GI 26
4.2 Teste dos parâmetros elétricos 27
4.2.1 Conjunto BFT-GI - Gerador de 3 CV 30
4.2.1.1 Alimentando cargas resistivas 31
4.2.1.2 Alimentando cargas indutivas 35
4.2.1.3 Alimentando carga mista 35
4.2.2 Conjunto BFT-GI - Gerador de 7,5 CV 35

4.3 Desempenho dos conjuntos BFT-GI 36
5 Resultados e discussão 39
5.1 Seleção do Conjunto BFT-GI 39
5.2 Comportamento dos parâmetros elétricos 41
5.2.1 Conjunto BFT-GI – Gerador de 3 CV 41
5.2.1.1 Alimentando cargas resistivas 41
5.2.1.2 Alimentando cargas indutivas 44
5.2.1.3 Alimentando carga mista (indutiva e resistiva) 45
5.2.2 Conjunto BFT-GI – Gerador de 7,5 CV 46
5.3 Desempenho do conjunto BFT-GI 47
5.3.1 Gerador de 3 CV 47
5.3.2 Gerador de 7,5 CV 48
6 Conclusões 51
7 Referências Bibliográficas 52

LISTA DE SÍMBOLOS

BFT	Bomba funcionando como turbina
GI	Gerador de indução
f.m.m	Força magneto motriz
kVA	Quilo volt ampère
C_Δ	Capacitância em triângulo
C_s	Capacitância em estrela
Q	Vazão
H	Altura manométrica
CV	Unidade potência
3ϕ	Trifásico
S	Potência elétrica aparente
P	Potência elétrica ativa
Q	Potência elétrica reativa
W	Watt, unidade de potência elétrica ativa
VA	Volt ampère, unidade de potência elétrica aparente
γ	Peso específico da água
P_H	Potência hidráulica
P_{ele}	Potência elétrica
$\cos\phi$	Fator de potência
V_L	Tensão de linha

I_L	Corrente de linha
A	Ampère – unidade de corrente elétrica
Q_f	Potência reativa por fase
VAr	Volt ampère reativo – Unidade de potência reativa
I_f	Corrente elétrica por fase
V_f	Tensão elétrica por fase
µF	Micro Faraday – unidade de capacitância
N	Rotação em rpm
X_c	Reatância capacitiva
X_L	Reatância indutiva
L	Indutância
F ou f	Freqüência

RESUMO

BARBOSA FERNANDES, Reginaldo. **Viabilidade de conjunto motor de indução e bomba centrífuga operando como turbina e gerador para pequenos aproveitamentos de potencial hídrico.** 2006. 53 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas e Automação Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

A demanda por energia elétrica no Brasil vem crescendo a cada dia nos últimos anos. Diante dessa situação, a geração de energia de forma descentralizada vem obtendo incentivos dos órgãos do governo federal. A geração de energia elétrica a partir de pequenos aproveitamentos de potencial hídrico, disponíveis em propriedades rurais no Brasil, apresenta-se como opção para a ampliação da matriz energética nacional. Porém, um dos fatores que podem até mesmo inibir a instalação de uma microcentral hidrelétrica é o custo de instalação, principalmente do grupo turbina-gerador. Este trabalho buscou avaliar uma unidade geradora alternativa para microcentrais hidrelétricas, utilizando bomba centrífuga funcionando como turbina e motor de indução operando como gerador. Os primeiros ensaios em bomba funcionando como turbina (BFT) acionando gerador de indução (GI) foram realizados no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Belo Horizonte, MG. Para este trabalho, os ensaios do conjunto BFT-GI foram realizados nos Laboratórios de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras (UFLA) em Lavras, MG. Foram utilizados dois conjuntos motobomba, um funcionando como turbina-gerador e o outro funcionando como bomba ligada a um inversor de freqüência, a fim de simular diferentes condições de altura e vazão. Utilizaram-se como cargas elétricas, cargas resistivas e indutivas. Os resultados obtidos apresentaram rendimentos superiores a 60%, em diversas simulações de carregamento do gerador.

---

* Comitê orientador: Roberto Alves Braga Júnior (orientador), Giovanni Francisco Rabelo e Alberto Colombo.

ABSTRACT

BARBOSA FERNANDES, Reginaldo. **Viability of induction motor and centrifugal pump group operating as a turbine and generator for small hydric potencials.** LAVRAS: UFLA, 2006. 53p. (Dissertation - Master in Agricultural Engineering)*

The demand for electric power in Brazil has been constantly growing in recent years. Due to this situation, the generation of energy in a decentralized way is receiving incentives through federal organs. The electric power generation starting from uses of small hydric potential, available in rural properties in Brazil, presents itself as an option for the amplification of the national energy matrix. However, one of the factors that is able to inhibit the installation of a micro-central hydroelectric plant is the installation cost, mainly of the turbine-generator group. This work looked to evaluate an alternative generating unit for micro-central hydroelectric plants, using a centrifugal pump working as a turbine and an induction motor operating as a generator. The first rehearsals with pump working as turbine (PT) actioning an induction generator (IG) were accomplished in CHR – Center for Hydraulic Research e Hydric Resources of UFMG, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. For this work, the rehearsals of the PT-IG group were accomplished in the Hydraulics Laboratory of the Federal University of Lavras (UFLA) in Lavras, MG. Two motor-pump groups were used, one working as turbine-generator and the other working as a pump linked to a frequency invertor in order to simulate height and outflow. Inductive and resistive charges were used as electric charges. The obtained results presented yields superior to 60% in several simulations of generator load.

* Guidance committee: Roberto Alves Braga Júnior (Advisor), Giovanni Francisco Rabelo, Alberto Colombo.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de energia elétrica no Brasil na última década não tem acompanhado o crescimento da demanda, o que tem criado uma situação crítica, levando ao risco de interrupções no fornecimento.

A falta de uma política de investimento do Estado em novas fontes geradoras de energia tem obrigado o governo federal a adotar uma política que visa incentivar a transferência dos novos investimentos para a iniciativa privada. Além desta política, o governo tem trabalhado no incentivo à expansão da matriz energética por meio de fontes alternativas, dentre elas os pequenos aproveitamentos. Uma dessas linhas adotadas pelo Estado tem o objetivo principal de ampliar a geração de energia elétrica de forma descentralizada. Neste caso, as principais fontes geradoras são: a energia obtida por meio da biomassa, a energia eólica e a implantação de pequenas centrais hidrelétricas.

Em 2002, por meio do Ministério das Minas e Energia, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA, destinado a oferecer incentivos à implantação de centrais geradoras de energia em pequena escala e de forma regional.

Apesar do esforço desenvolvido, ainda existe um forte obstáculo econômico, representado pelo elevado custo de implantação dessas alternativas de geração. No caso da implantação de uma microcentral hidrelétrica, o grande custo está relacionado com as unidades geradoras, representadas pelo conjunto turbina gerador.

Visando reduzir estes custos, foram desenvolvidos estudos e pesquisas propondo a utilização de conjuntos turbinas geradores alternativos, os quais podem ser equipados com microturbinas do tipo Michel Banki, Pelton ou até mesmo com bombas funcionando como turbina.

A utilização de bomba centrífuga funcionando como turbina (BFT) e motor de indução operando como gerador (GI), vem sendo proposta como uma unidade geradora alternativa para instalação em microaproveitamentos hidrelétricos em pequenas propriedades rurais. Isso se deve, principalmente, ao baixo custo de investimento, à simplicidade, à robustez e à baixa manutenção. Uma grande vantagem do gerador de indução, comparado com o gerador síncrono, é a simplicidade na manutenção, podendo ser reparado em pequenas oficinas, até mesmo em comunidades rurais isoladas.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o uso de bomba centrífuga, funcionando como turbina acoplada a um motor de indução trifásico, funcionando como gerador, como uma alternativa de baixo custo para a geração de energia elétrica por meio de microaproveitamentos hidrelétricos. Foi realizado um estudo de caso, no qual procurou-se identificar o melhor arranjo bomba centrífuga/gerador de indução para uma situação específica apresentada de vazão e queda. Assim, avaliou-se a operação do conjunto gerador quanto aos parâmetros de eficiência e qualidade da energia proveniente da conexão BFT-GI. Em seguida, identificaram-se as condições de funcionamento do conjunto gerador e carga elétrica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o uso de bomba centrífuga funcionando como turbina (BFT) acoplada a um motor de indução trifásico funcionando como gerador em laboratório.

2.2 Objetivos específicos

- Especificar o melhor conjunto de bomba e motor para o funcionamento como turbina-gerador.
- Avaliar os parâmetros elétricos provenientes da conexão BFT-GI.
- Avaliar o desempenho e propor as melhores configurações para o conjunto gerador e carga elétrica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A máquina elétrica de indução ou máquina assíncrona é freqüentemente utilizada na indústria e na agropecuária operando como motor. Este amplo emprego é justificado pela sua robustez, baixo custo, baixa necessidade de manutenção e possibilidade de emprego em ambientes agressivos, como locais úmidos, explosivos, com poeira, etc. Devido a isso, este equipamento é muito conhecido, havendo grande rede de pequenas oficinas de manutenção. Assim, o custo de manutenção também é bastante baixo e de fácil acesso, mesmo em localidades rurais.

3.1 Funcionamento e partes principais da máquina de indução

As partes principais que compõem a máquina assíncrona são a carcaça, o estator e o rotor.

A carcaça é a estrutura que dá sustentação às demais partes. Geralmente, é feita de ferro fundido e possui aletas para melhorar a capacidade de dissipação de calor.

O estator é formado de um núcleo de chapas magnéticas que possuem ranhuras axiais para alojar seu enrolamento. Nele são alojadas as bobinas e pode ser trifásico ou monofásico.

O rotor também é composto de um núcleo de chapas magnéticas, também dotadas de ranhuras axiais, onde são alojados os enrolamentos do rotor. Os enrolamentos do rotor podem ser dos tipos curto-circuito ou bobinado. Os motores do tipo rotor gaiola ou de curto-circuito são mais utilizados, pois não necessitam de manutenções freqüentes, devido à ausência de anéis coletores e escovas. Os circuitos do estator e rotor são independentes fisicamente. Os rotores do tipo bobinado possuem a vantagem de permitir um controle de

conjugado e velocidade, por meio da inserção de resistências externas, porém, em contrapartida, são mais caros e menos robustos (Lopes, 2003).

O modelo de circuito por fase da máquina de indução, com todos os parâmetros refletidos ao lado do estator, pode ser derivado a partir das equações das tensões da máquina em regime permanente, resolvendo-as em relação à corrente. O circuito é constituído, basicamente, pelas resistências e reatâncias de dispersão dos enrolamentos do estator e do rotor (R_s, X_s) e ($R'r$, X'_r), respectivamente. X_m é a reatância de magnetização do entreferro e R_m representa a resistência para as perdas de excitação (ou no núcleo). V_s é a tensão terminal por fase no estator e E_s é tensão de entreferro por fase. O escorregamento s é a velocidade de escorregamento da *f.m.m* do rotor por unidade da velocidade angular elétrica da onda de *f.m.m* do estator (ω_s), o que pode ser expresso por:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \qquad (1)$$

em que:

s – escorregamento;

ω_r – velocidade angular elétrica do rotor;

ω_s – freqüência da rede, em rad/s.

De acordo com Pereira (2003), a curva conjugado–velocidade pode ser mostrada em função do escorregamento (Figura 1). O sentido da velocidade síncrona (ω_s) é convencionado como positivo.

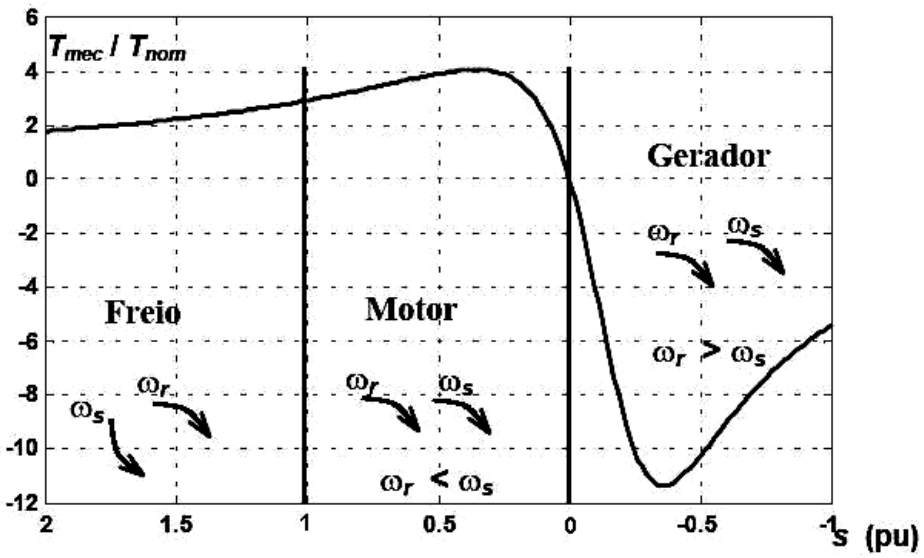


FIGURA 1 Característica do conjugado (T_{mec}/T_{nom}), em função do escorregamento de um motor de indução, mostrando as diversas regiões de operação.
Fonte: Pereira (2003).

Na Figura 1 é mostrado o comportamento do campo girante do rotor e do estator na máquina de indução operando nas três condições possíveis de funcionamento: motor, gerador ou freio. Nestas condições, têm-se que:

. operação como motor (0<s<1): o sentido de rotação do rotor (ω_r) é o mesmo do campo girante (ω_s). O conjugado (T_{mec}) é positivo. A máquina recebe potência da rede elétrica;

. operação como gerador (s<0): o rotor e o campo girante movem-se no mesmo sentido, mas a velocidade do rotor (ω_r) é maior do que a velocidade síncrona, ocasionando um escorregamento negativo. O conjugado (T_{mec}) é negativo. A máquina recebe potência mecânica e entrega potência elétrica para o sistema ao qual o estator está conectado;

. operação como freio (1<s<2): o campo girante gira em sentido oposto ao rotor, levando a um escorregamento maior do que 1. Isso pode ocorrer

quando se faz a inversão na conexão de 2 fases do estator, provocando a súbita mudança no sentido de rotação do campo. O conjugado desenvolvido (T_{mec}) é positivo. A máquina recebe potência elétrica e desenvolve conjugado no sentido contrário ao de rotação, atuando como freio.

3.2 Gerador de indução

A opção de utilização de gerador de indução acoplado a turbinas deve ser baseada em uma análise criteriosa entre as vantagens e desvantagens, segundo Lopes (2003). As vantagens e desvantagens em relação ao uso de motores de indução trifásico como geradores são descritas a seguir.

3.2.1 Vantagens

- É viável para pequenas potências, menores que 100 kVA;
- Disponibilidade em larga faixa de potência, pois é muito utilizado na indústria e agricultura.
- Robusto e simples, além de manutenção baixa.

3.2.2 Desvantagens

- Necessidade de potência de magnetização (reativo), fornecida pela rede ou por um banco de capacitores.
- Quando comparado ao gerador síncrono, tem menor eficiência; quanto menor a máquina, menor será sua eficiência.
- Variação de freqüência e tensão, comparado aos geradores síncronos dotados de equipamentos de controle.

3.2.3 Características de funcionamento

A máquina de indução, operando como gerador, recebe, em seu eixo, potência mecânica por meio de uma máquina primária. As mesmas perdas que ocorrem na motorização (como as no cobre do estator e rotor, no ferro do estator e aquelas por atrito e ventilação) ocorrem na geração, porém, devem ser subtraídas da potência mecânica de entrada.

O fluxo de potência da máquina de indução operando como gerador está ilustrado na Figura 2.

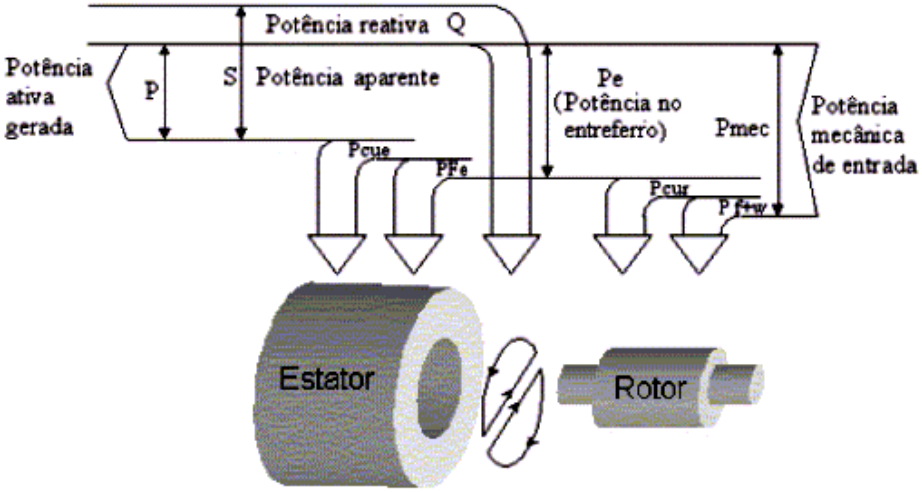


FIGURA 2 Fluxo de potência da máquina de indução operando como gerador.
Fonte: Chapallaz et al.(1990), citados por Braga (2002).

Segundo Braga (2002), o fluxo de potência reativa não é invertido quando a máquina de indução opera como gerador (Figura 2). A potência reativa necessária para produzir o campo magnético não pode ser fornecida pela máquina primária, nem pelo rotor em gaiola de esquilo. Assim, a máquina de

indução somente opera fornecendo potência ativa se conectada a uma fonte externa de potência reativa.

Na operação isolada, um banco de capacitores pode ser conectado em paralelo aos terminais do estator para fornecer a potência reativa requerida pelo gerador de indução. Uma máquina de indução de uma determinada capacidade não pode desenvolver a mesma potência elétrica no modo gerador igual à que ele absorve de uma rede de energia elétrica na operação motor, pois as perdas (cobre, ferro, atrito e ventilação) reduzem a potência elétrica de saída. Teoricamente, a potência mecânica de entrada poderia ser aumentada para compensar as perdas e chegar a uma maior potência elétrica de saída. Contudo, isso é limitado pelo fato de que uma potência de entrada muito grande vai rapidamente sobrecarregar a máquina, isto é, sobreaquecê-la e, finalmente, queimar os enrolamentos do estator. Dessa forma, as condições de operação como gerador são determinadas pela corrente do estator, que não deve exceder a corrente de placa do motor para a qual os enrolamentos do estator foram projetados.

3.2.4 Operação isolada do gerador de indução

Pereira (2003) afirma que é possível que a máquina de indução funcione como gerador isolado de qualquer rede elétrica, desde que exista algum dispositivo conectado aos seus terminais para fornecer a potência reativa Q, solicitada pelo gerador e por qualquer carga conectada. Se a velocidade da máquina é mantida constante, a magnitude da tensão terminal depende do valor da capacitância e da carga conectada em seus terminais. Entretanto, se a capacitância é mantida fixa, a tensão decresce com o aumento da carga. Por outro lado, a freqüência síncrona (de saída) varia não somente com a velocidade da máquina, mas também com a carga e a própria capacitância de excitação.

Uma montagem em que tal energia é fornecida por um banco de capacitores está ilustrada na Figura 3.

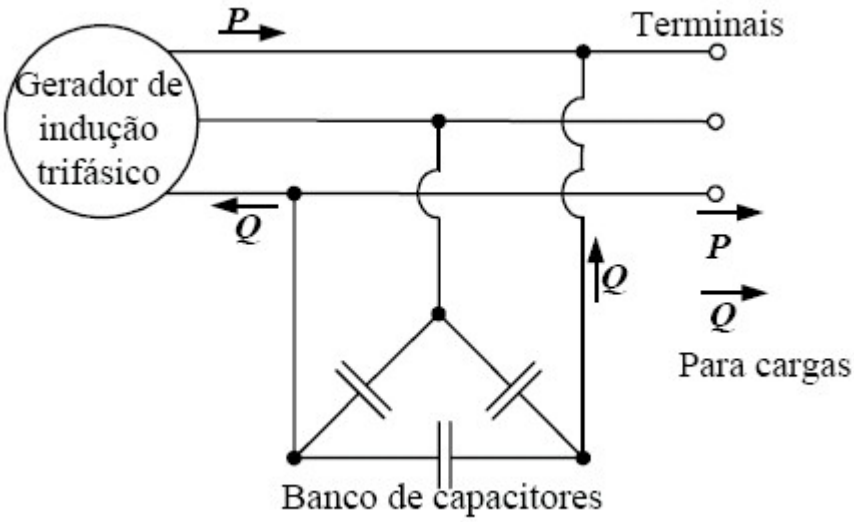


FIGURA 3 Gerador de indução operando isoladamente com um banco de capacitores para suprir a potência reativa Q.
Fonte: Pereira (2003).

De acordo com Lopes (2003), na operação do gerador de indução isolado de uma rede elétrica, devem ser feitas algumas considerações a respeito do tipo de carga a ser alimentada. São elas:

- resistiva, indutiva ou mista;
- variável ou constante;
- trifásica ou monofásica.

1. Para cargas resistivas, basta calcular a excitação referente à potência a ser consumida e dimensionar o banco de capacitores.

2. Para cargas indutivas, deve-se calcular a excitação referente à potência a ser consumida e corrigir o fator de potência da carga.
3. Para cargas mistas, deve-se calcular a excitação referente à potência a ser consumida e corrigir individualmente o fator de potência da parte indutiva da carga.
4. Para cargas constantes, basta calcular a excitação da carga total e colocar o sistema em operação.
5. Para cargas variáveis, o ideal é corrigir a excitação necessária ao fornecimento de potência, diretamente na carga.
6. Para sistemas trifásicos, deve-se determinar a excitação por fase, respeitando o fato de a ligação ser delta ou estrela.

Neste trabalho, optou-se pela geração isolada, alimentando carga resistiva e mista, constante e trifásica.

3.2.5 O processo de partida do gerador de indução auto-excitado

De acordo com Chapallaz et al. (1990), citados por Braga (2002), quando se dá a partida no grupo turbina-gerador não há nenhuma corrente disponível nos enrolamentos do estator para produzir um campo magnético, pois os capacitores estão descarregados. O fato de os núcleos de ferro do estator e rotor terem sido magnetizados durante prévia operação faz com que eles mantenham uma pequena quantidade de magnetismo residual. Este magnetismo residual pelo “offset” da curva de magnetização está representado na Figura 4.

Acionado pela turbina, o rotor da máquina de indução começa a girar e as linhas de fluxo deste magnetismo residual cortam o enrolamento do estator, no qual é induzida uma tensão U_1.

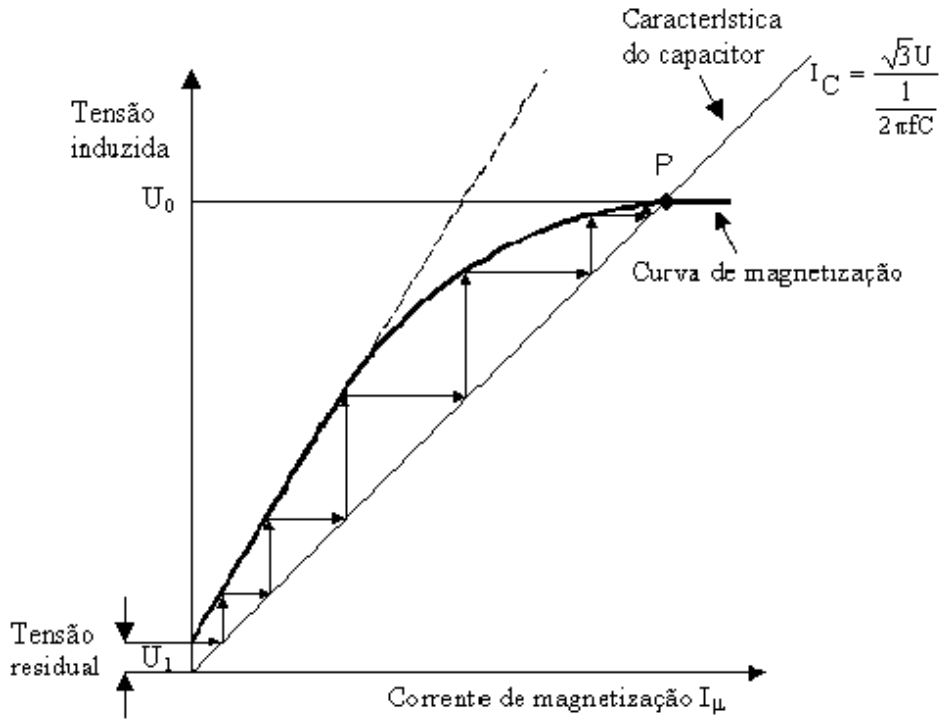


FIGURA 4 Auto-excitação do gerador de indução.

Fonte: Chapallaz et al. (1990), citados por Braga (2002).

A tensão U_1, agora, carrega o capacitor, o qual, por sua vez, irá alimentar o enrolamento do estator com uma corrente de magnetização I_1. Por sua vez, I_1 aumenta a magnetização da máquina e a tensão correspondente U_2 é produzida. Este processo é repetido até que a corrente induzida I_i (produzida pela tensão U_i)

e a corrente do capacitor I_c estejam em equilíbrio. Este será o caso da interseção das duas curvas no ponto P da Figura 4. Esse processo acontece na condição sem carga. Selecionando-se um capacitor C adequado, a tensão a vazio U_o pode ser estabelecida conforme o desejado.

Resende (1994) afirma que uma das dificuldades encontradas na operação isolada de um gerador de indução é garantir que a máquina tenha magnetismo residual no rotor, quando ligada. Para manter esse magnetismo residual é necessário que todos os capacitores e toda a carga sejam desconectados, até que a máquina atinja a velocidade nominal e que a mesma não opere com velocidades muito baixas. Depois que a máquina torna-se auto-exitada, o magnetismo residual pode ser perdido, diante das seguintes situações:

- aumento da carga com os capacitores fixos;
- retirada de capacitores com a carga ligada;
- curto-circuito temporário nos terminais da máquina;
- velocidades excessivamente baixas.

Em caso de perda do magnetismo residual, por algum dos motivos mencionados acima, o mesmo pode ser recuperado por um dos seguintes métodos:

- ligando a máquina como motor à rede durante alguns segundos;
- descarregando-se um capacitor carregado através de dois terminais do estator enquanto a máquina estiver funcionando;
- ligando-se uma bateria, temporariamente, através de dois terminais do estator, com a máquina parada.

Neste trabalho adotou-se o método que utiliza uma bateria.

3.2.6 Método para cálculo dos capacitores de excitação

Conforme Smith (2001), deve-se considerar, primeiramente, o tipo de conexão com que a máquina irá trabalhar. Assim têm-se: estrela ou delta, trifásico ou monofásico. Na Figura 5 estão ilustrados os tipos de conexão trifásica em estrela e delta.

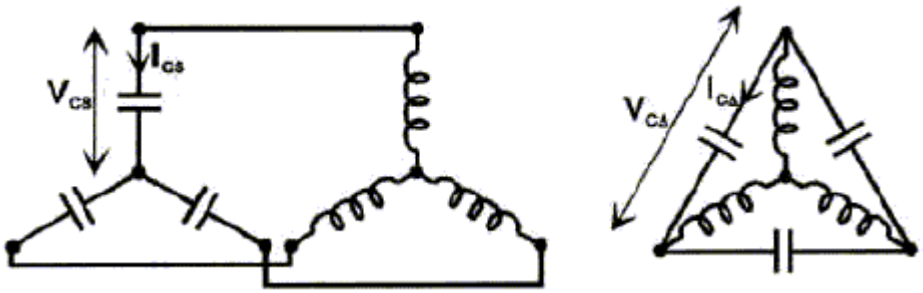


FIGURA 5 Configuração em estrela e delta, respectivamente à esquerda e à direita, dos capacitores de excitação numa máquina trifásica.
Fonte: Niguel Smith (2001).

Uma máquina trifásica também pode operar como gerador, fornecendo potência monofásica. Neste caso, correntes e tensões não estão distribuídas uniformemente nos enrolamentos das três fases da máquina e a fase conectada em paralelo com carga estará sobrecarregada. O gerador de indução não pode fornecer a mesma potência a uma carga monofásica, comparado a uma carga trifásica balanceada de mesma potência somente ligando esta a uma das fases. Esse problema pode ser solucionado por meio da conexão dos capacitores para excitação no esquema C-2C. Esse tipo de conexão pode ser visto na Figura 6.

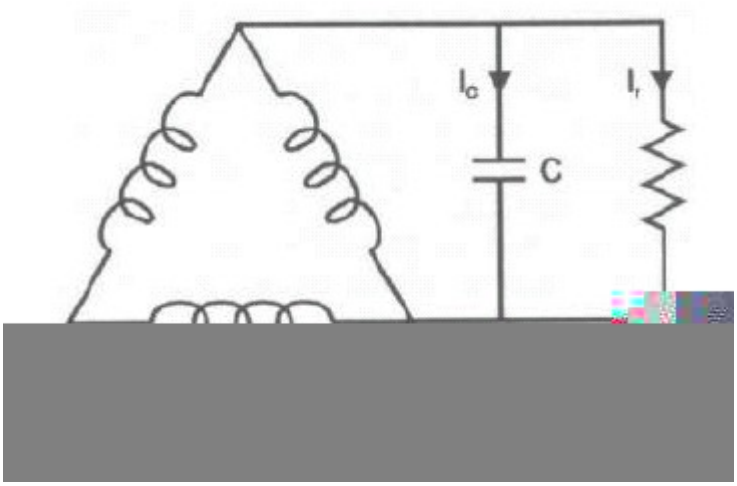


FIGURA 6 Diagrama de ligação da capacitância C-2C.

Fonte: Nigel Smith (2001)

Nessa configuração, a capacitância C é conectada em paralelo com a carga e na fase seguinte, de acordo com o sentido de rotação, é conectado o dobro da capacitância, enquanto a outra fase fica desprovida de capacitância. A capacitância 2C provoca um defasamento necessário para que a carga monofásica seja vista pelo gerador como uma carga trifásica balanceada.

Na Tabela 1 é apresentada a relação clássica entre tensões e correntes de linha com tensões e correntes de fase, que são base para o cálculo da reatância capacitiva. Em um banco ligado em delta, o valor do capacitor pode ser três vezes menor que na ligação em estrela.

TABELA 1 - Relação de tensão e corrente em circuitos trifásicos conectados em estrela e delta

Grandeza	Estrela	Delta
Tensão	$V_{linha} = \sqrt{3} * V_{fase}$	$V_{linha} = V_{fase}$
Corrente	$I_{linha} = I_{fase}$	$I_{linha} = \sqrt{3} * I_{fase}$

Considerando tensões e correntes de fase, tem-se:

$$Vc_{\Delta} = \sqrt{3} * Vc_s \tag{2}$$

$$Ic_{\Delta} = {Ic_s}/{\sqrt{3}} \tag{3}$$

$$Xc_{\Delta} = {Vc_{\Delta}}/{Ic_{\Delta}} = \frac{\sqrt{3} * Vc_s}{Ic_s/\sqrt{3}} = \frac{3 * Vc_s}{Ic_s} = 3 * Xc_s \tag{4}$$

Sendo:

$$C = {1}/{\omega * Xc} \quad , \tag{5}$$

Então:

$$C_{\Delta} = {C_s}/{3} \tag{6}$$

Em que os subscritos indicam:

- S, Estrela;
- Δ, Delta.

Lopes (2003) afirma que, para dimensionar o banco de capacitores para o funcionamento da máquina de indução como gerador auto-excitado, o ideal é conhecer a curva de magnetização do motor e, então, determinar a reatância capacitiva necessária à auto-excitação do gerador. Isso pode ser fornecido pelo fabricante ou levantado em laboratório. Porém, na falta da curva de magnetização, o banco de capacitores para o funcionamento do motor de indução como gerador pode ser determinado pela potência aparente, sem carga, da máquina operando como motor. O banco calculado por meio dessa segunda maneira tem valor muito próximo ao calculado pela curva de magnetização e viabiliza o uso de máquinas onde a curva de magnetização não é conhecida. Logo:

$$\sum S_{sem-carga} = \sqrt{3} * V_{linha} * I_{linha} \quad (7)$$

$$\sum Q = \sum S_{sem-carga} \quad (8)$$

$$Q_{fase} = Q/3 \quad (9)$$

$$V_{fase} = V_{linha}/\sqrt{3} \quad (10)$$

$$I_{fase} = Q_{fase}/V_{fase} \quad (11)$$

$$Xc_{fase} = V_{fase}/I_{fase} = 1/2 * \pi * f * C \quad (12)$$

Assim, o valor da capacitância por fase será de:

$$C = \frac{I_{fase}}{2 * \pi * f * V_{fase}} \quad (13)$$

Em que:

$S_{sem-carga}$ = é a potência aparente trifásica com o motor sem carga;

Q_{fase} = é a potência reativa por fase.

Obtém-se, dessa forma, o cálculo da capacitância para excitação a vazio.

3.3 Bomba funcionando como turbina (BFT)

Estudos realizados por Lopes (2003) demonstraram que o aproveitamento dos potenciais hidráulicos residuais no Brasil, por meio da implantação de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), se constitui em uma importante oportunidade de expansão da base de geração alternativa. Sabe-se que as PCHs possuem características singulares que as distinguem das usinas hidrelétricas de médio e grande portes. Em face do montante envolvido em sua construção, as PCHs são alternativas factíveis para a autogeração e a produção independente por parte dos grupo empresariais de pequeno e médio porte. A

partir do lançamento do PROINFA, programa da Eletrobrás destinado ao incentivo de geração a partir de fontes alternativas, vislumbra-se um nicho de mercado que pode ser ocupado, em parte, por micro e minicentrais hidrelétricas. Entretanto, apesar deste esforço, o efeito de escala penaliza pesadamente este tipo de empreendimento.

A alternativa de uso da BFT privilegia a utilização de equipamentos fabricados em série, ou seja, equipamentos facilmente encontrados no comércio, que possuem um baixo custo devido à produção em larga escala e por tratarem-se de equipamentos mais simples que as turbinas convencionais. No entanto, como toda alternativa tecnológica, possui vantagens e desvantagens quando comparada com turbinas na mesma faixa de potência.

3.3.1 Vantagens

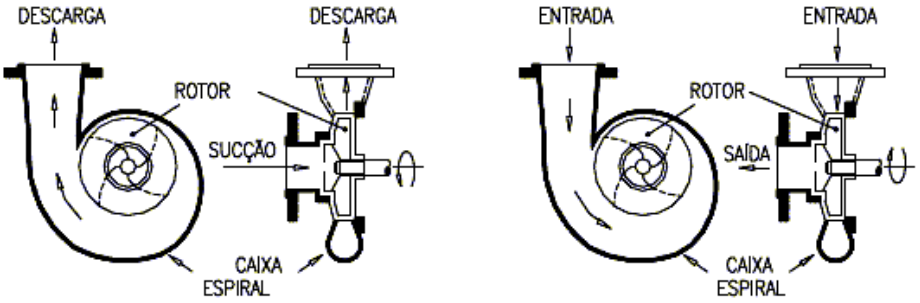
- As bombas são fabricadas em série, isso diminui tanto o custo de fabricação quanto o de manutenção.
- Não demandam mão-de-obra especializada para a sua manutenção.
- Esquema de instalação simples, facilidade de implantação no caso de pequenas potências.
- É um equipamento robusto e suas peças podem ser encontradas com facilidade.

3.3.2 Desvantagens

- Possui rendimento um pouco inferior se comparado às turbinas convencionais.
- Não possui um dispositivo de controle hidráulico incorporado (distribuidor).

- Não permite variações de carga como uma turbina convencional.

Balarim et al. (2004) demonstraram que, para uma bomba centrífuga funcionar como turbina, o sentido do fluxo de escoamento da água se inverterá e, conseqüentemente, haverá a inversão no sentido de rotação. O funcionamento de uma bomba centrífuga como bomba e como turbina é mostrado na Figura 7. No funcionamento como bomba (Figura 7a), o líquido entra na sucção (região de baixa pressão) e transforma energia de velocidade em energia potencial através do rotor, saindo pela descarga. No funcionamento como turbina (Figura 7b), o líquido entra com energia de potencial, aciona o rotor em sentido inverso ao da bomba e sai com baixa energia potencial.



(a) (b)

FIGURA 7 Bomba centrífuga funcionando como bomba e como turbina.
Fonte: Viana (1987).

Pesquisas realizadas por Willians (1995), citado por Lopes (2003), apresentaram alguns detalhes importantes para a instalação de BFT. Neste caso, é necessário o uso de uma válvula no final da tubulação de adução e antes da BFT. Para o bom funcionamento da instalação é aconselhável o uso de uma válvula que não interrompa o fluxo de água rapidamente, por isso o modelo mais indicado é o registro de gaveta. Isso é necessário para evitar golpes de aríete na

tubulação de adução. O custo com a válvula pode ser reduzido se a mesma for instalada imediatamente antes da BFT, logo após a redução, pois, para o diâmetro menor, o custo da válvula é mais baixo. Na saída da BFT é recomendada a utilização de um tubo de sucção de diâmetro maior para desenvolver o fluxo de água à pressão próxima da atmosférica. Isso evita problemas como erosão do solo na restituição e, ainda, a recuperação da energia residual na BFT (Figuras 8 e 9).

FIGURA 8 Válvula instalada na entrada da BFT. Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006.

FIGURA 9 Tubo cônico utilizado para a restituição de água na saída da BFT, Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006.

3.3.3 Métodos e equações para a seleção da BFT

Lopes (2003), de acordo com Viana (1987), afirma que a bomba operando como turbina no seu ponto ótimo, com rotação n, recalca a vazão Q com altura manométrica H. Funcionando como turbina, no seu ponto ótimo, exige vazão Q_t maior que sua vazão como bomba e altura de queda H_t maior que sua altura manométrica H, para funcionar mantendo a mesma rotação.

Pesquisas realizadas por Viana (1987) apresentaram uma metodologia para a escolha da bomba funcionando como turbina baseada em resultados teóricos e experimentais, em que foram levantados coeficientes experimentais de altura e vazão da BFT em função da rotação específica, baseados em resultados experimentais e de ensaios de laboratório.

$$H = K_{at} * H_T \quad (14)$$

$$Q = K_{qt} * Q_T \quad (15)$$

$K_{at} < 1$ $K_{qt} < 1$

Em que:

H = altura manométrica da bomba (m);

Q = vazão de recalque da bomba (m^3/s);

H_T = queda da BFT (m);

Q_T= vazão da BFT (m^3/s);

K_{at} , K_{qt} são coeficientes teóricos de altura e vazão, respectivamente, levantados por Viana (1987), em função da rotação específica.

Essas relações variam de bomba para bomba e são função da rotação específica. Com as informações de Shafer (1981), equacionaram-se os parâmetros geométricos do rotor da bomba com a rotação específica, podendo a rotação específica no sistema internacional ser calculada pela equação:

$$n_{qa} = 10^3 * \frac{n * Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (16)$$

Em que:

n = rotação (rpm);

H = altura disponível (m);

Q = vazão (m^3/s);

n_{qa} = rotação específica no sistema internacional.

Com este valor, podem-se obter os valores dos coeficientes teóricos, por meio do ábaco da Figura 10.

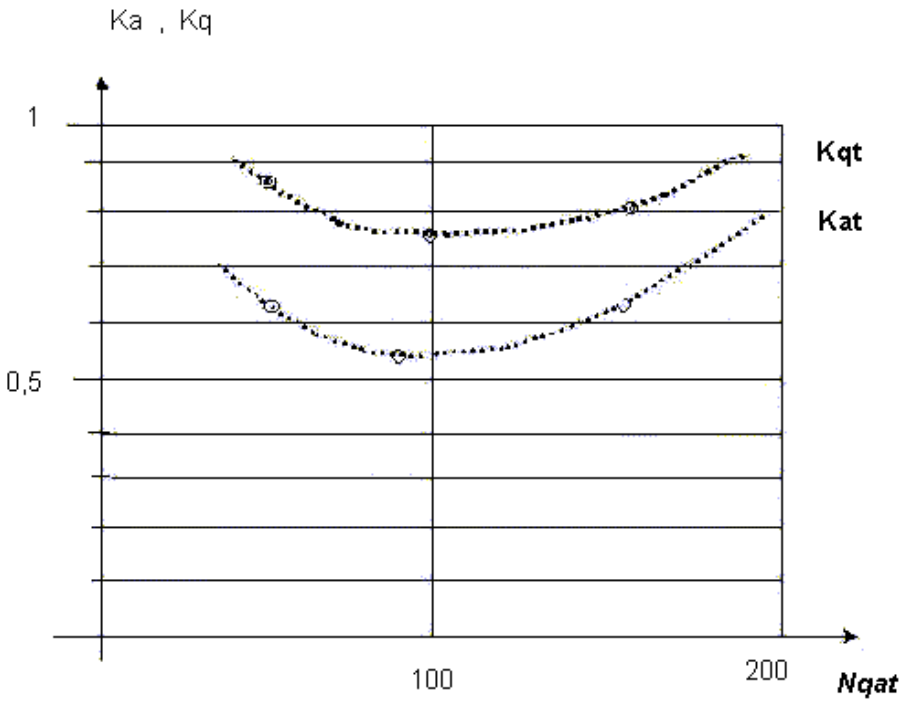


FIGURA 10 Ábaco de Shafer (1981).

Fonte: Lopes (2003)

Holder (2005) afirma que os métodos para a seleção de BFT que apresentam melhores resultados para bombas fabricadas no Brasil são aqueles desenvolvidos por Sharma (1985) e Willians (1995). As equações 17 e 18 apresentam o modelo de Sharma (1985).

$$Q_{BFT} = \frac{Q_{Bomba}}{\eta_{máx}^{0,8}} \tag{17}$$

$$H_{BFT} = \frac{H_{Bomba}}{\eta_{máx}^{1,2}} \tag{18}$$

Em que:

Q_{BFT} = vazão disponível;

Q_{Bomba} = vazão como bomba;

$\eta_{máx}$ = máximo rendimento como bomba;

H_{BFT} = altura disponível;

H_{bomba} = altura como bomba.

O modelo de Sharma (1985) sofreu modificações, feitas por Willians (1995), que introduziu os fatores de correção de altura e vazão. As equações 19 e 20 apresentam os fatores de correção de vazão e altura, respectivamente.

$$f_{cQ} = \frac{\omega_{BFT}}{\omega_{Bomba}} \tag{19}$$

$$f_{cH} = \frac{\omega_{BFT}}{\omega_{Bomba}}^{2} \tag{20}$$

Em que:

f_{cQ} = fator de correção de vazão;

f_{ch} = fator de correção de altura;

ω_{BFT} = rotação de operação no modo turbina em rpm;

ω_{Bomba} = rotação no modo bomba em rpm.

Willians (1995) relata que é possível determinar valores mais precisos em relação à característica H x Q da BFT, tomando a proporcionalidade Q e H em relação à rotação. Considerando:

- Q (vazão) proporcional a ω (rotação);
- H (altura) proporcional a ω^2 (rotação).

Conseqüentemente, tem-se:

$$Q_{BFT} = \frac{Q_{BEP}}{(\eta_{máx})^{0,8}} * \frac{\omega_{BFT}}{\omega_{Bomba}} \tag{21}$$

$$H_{BFT} = \frac{H_{BEP}}{(\eta_{máx})^{1,2}} * \frac{\omega_{BFT}}{\omega_{Bomba}}^{2} \tag{22}$$

Em que o subscrito *BEP* vem do inglês *best efficiency point*, ou seja, ponto de melhor eficiência. Esse ponto pode ser obtido por meio de simulações, utilizando um aplicativo computacional, ou, simplesmente, por meio da curva característica da bomba.

Utilizando-se as equações acima é possível determinar altura e vazão da BFT para velocidades diferentes da nominal da bomba, no ponto de melhor rendimento para esta nova velocidade.

Esse método facilita a seleção da BFT para operação em conjunto com gerador de indução, pois considera os fatores de correção para altura e vazão no ponto de melhor eficiência.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os primeiros ensaios experimentais foram realizados no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em Belo Horizonte, MG. Esses ensaios foram o ponto de partida para a realização deste trabalho. Com base nos ensaios realizados em Belo Horizonte e de acordo com a disponibilidade de equipamentos, foi montada, no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), a configuração experimental utilizada neste trabalho, a ser detalhada neste capítulo.

Os trabalhos foram divididos em três etapas:

- especificação do melhor conjunto BFT-GI;
- testes dos parâmetros elétricos do conjunto BFT-GI em distintas configurações;
- avaliação do desempenho e propostas das melhores configurações para o conjunto BFT-GI e suas cargas.

4.1 Seleção do conjunto BFT-GI

O método para a seleção de bomba funcionando como turbina acionando gerador de indução utilizado neste trabalho foi o proposto por Sharma (1985). Para o acionamento de geradores de indução, ou seja, velocidades superiores às nominais da bomba, foram utilizadas as equações de Willians (1995). Este conjunto foi selecionado para o aproveitamento existente na Pousada Sete Quedas, localizada no município de Carrancas, Minas Gerais.

4.2 Teste dos parâmetros elétricos

Os testes dos parâmetros elétricos foram realizados utilizando-se dois conjuntos BFT-GI:

- BFT – marca KSB ETA 80-20; 1750 rpm; Q=60 m^3/h e H=15 mca;

  GI – marca Eberle; 3ϕ; 3 CV; 220/380 V; 9,0/5,2 A; Cosϕ=0,78; η=81,7%.
- BFT – marca KSB ETA 80-20; 1750 rpm; Q=60 m^3/h e H=15 mca;

  GI – marca Arno; 7,5 CV; 3ϕ; 220/380/440 V; 21,0/12,1/10,5 A; 1710 rpm.

Estes são os dados de placa dos equipamentos fornecidos pelo fabricante. A curva da BFT funcionando como bomba é mostrada na Figura 11.

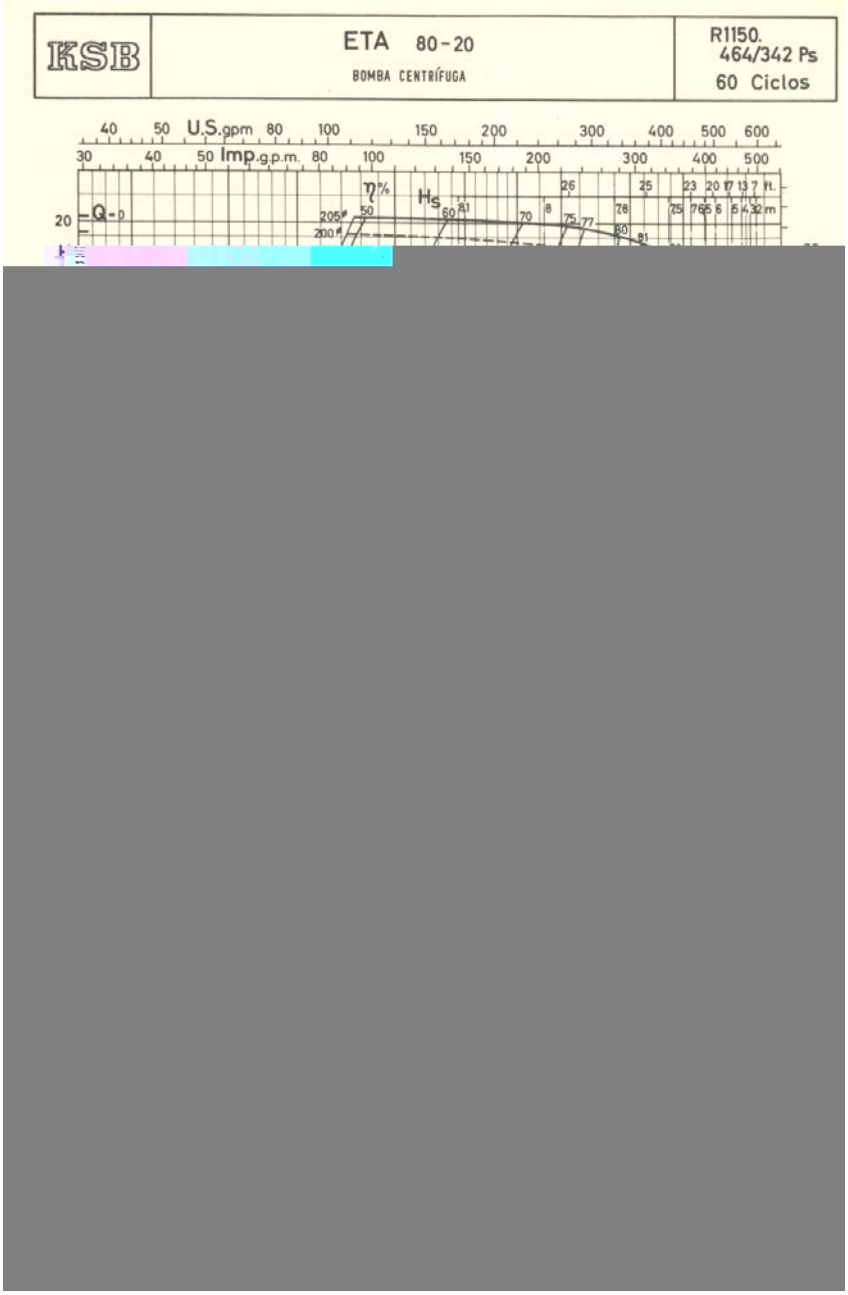


FIGURA 11 Curva característica da BFT funcionando como bomba.

Fonte: Catálogos do Fabricante.

Foi utilizada a mesma BFT acoplada em dois geradores de indução diferentes; na primeira etapa, um de 3 cv e, posteriormente, outro de 7,5 cv para efeito de comparação. Esta BFT acoplada ao gerador de 7,5 cv funciona como conjunto motobomba utilizado em aulas práticas nos Laboratórios de Hidráulica da UFLA.

A configuração experimental utilizada pode ser vista na Figura 12.

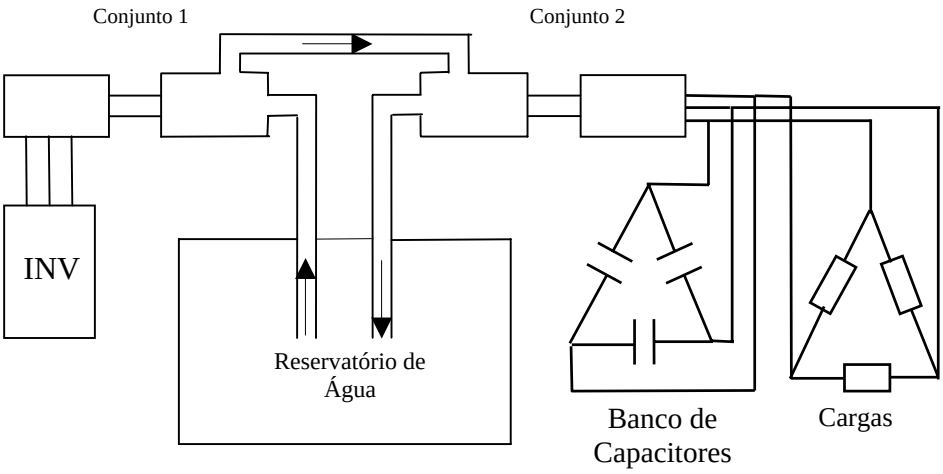


FIGURA 12 Configuração experimental de ensaio dos grupos BFT-GI.
Fonte: elaborada pelo autor

INV = Inversor de freqüência;

Conjunto 1 = Conjunto motobomba ligado ao inversor de freqüência utilizado para simular condições diferentes de altura manométrica e vazão;

Conjunto 2 = Conjunto bomba funcionando como turbina e gerador de indução;

O acompanhamento dos parâmetros tensão, freqüência e rendimento foi realizado a partir da excursão da carga e do tipo de carga (resistiva e ou indutiva).

A excursão da carga foi representada por correntes de 0,5 a 8,0 A. Esta configuração foi realizada para os dois geradores, tanto o de 3 cv quanto o de 7,5 cv, acionando cargas resistiva.

Foram avaliados dois níveis de carga puramente indutiva e uma carga mista (resistiva e indutiva), utilizando o gerador de 3 cv.

Todos os ensaios foram realizados com os geradores operando isolado de uma rede elétrica, acionando carga constante com fator de potência unitário ou corrigido para 1.

4.2.1 Conjunto BFT-GI - Gerador de 3 cv

Foi acoplado à BFT o gerador de indução trifásico de 3 cv, cujos dados de placa fornecidos pelo fabricante foram descritos no item 4.2.

Os ensaios realizados utilizando os dois geradores citados anteriormente seguiram a mesma metodologia. Foram utilizados os seguintes equipamentos: os 2 geradores de indução trifásico e a BFT citados no item 4.2; inversor de freqüência Weg; conjunto motobomba de 100 cv funcionando como bomba (motor – 100 cv, 220/380/440/760 V, 243/141/122 A, 3540 rpm, 3ϕ, 60 Hz. Bomba – KSB 100-20, Q=160 m^3/h, H=80 mca, 3530 rpm - dados de placa fornecidos pelo fabricante) ligada ao inversor de freqüência; medidor de vazão digital, manômetro analógico, multímetro digital, tacômetro digital, voltímetro analógico, medidor de freqüência analógico, painel de cargas resistivas, painel de cargas indutivas, painel de lâmpadas, banco de capacitores, cabos e conexões elétricas e o sistema hidráulico instalado para alimentação da BFT utilizando tubos PVC e aço. Estes equipamentos pertencem ao Laboratório de Hidráulica e de Eletricidade da UFLA.

4.2.1.1 Alimentando cargas resistivas

O gerador de indução foi acoplado a BFT por meio de duas polias, uma afixada no eixo da BFT e outra no eixo do gerador, interligadas por uma borracha. Na Figura 13 é mostrado este acoplamento.

FIGURA 13 Acoplamento BFT-GI. Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006

Os terminais elétricos do gerador foram conectados em delta, 220 V. Utilizou-se, neste experimento, um painel de cargas resistivas, indutivas e capacitivas. Estas cargas foram chaveadas de acordo com a necessidade durante o experimento. As cargas capacitivas foram utilizadas para a magnetização do gerador de indução. As cargas resistivas foram conectadas aos terminais do gerador e chaveadas de acordo com o andamento do experimento. Foram utilizados também, como cargas resistivas, dois painéis de lâmpadas. Nas Figuras 14 e 15 são mostrados os painéis de cargas.

FIGURA 14 Painel de cargas resistivas, indutivas e capacitivas.
Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006

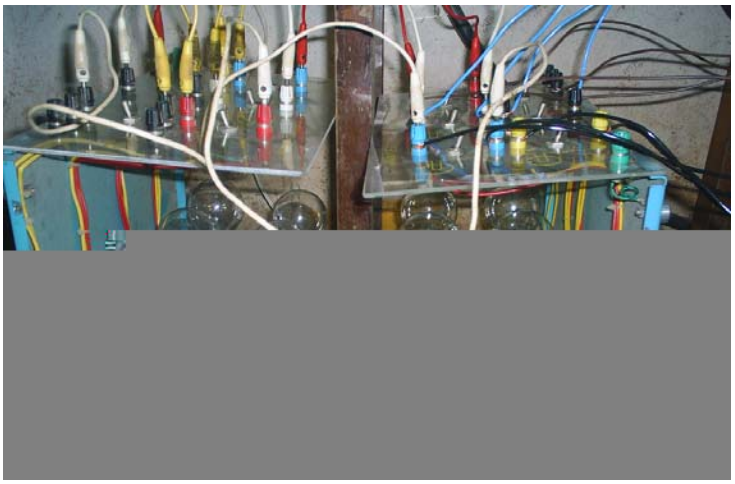


FIGURA 15 Painel de lâmpadas utilizado como carga resistiva.
Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006

O conjunto motobomba de 100 cv, ligado ao inversor de freqüência, foi utilizado para simular vazão e altura de queda disponível, de acordo com a necessidade das cargas.

Inicialmente, ajustaram-se a vazão e a pressão e calculou-se a capacitância para que se obtivesse, nos terminais do gerador, uma tensão de linha de 220V à freqüência de 60Hz a vazio, ou seja, todas as cargas desligadas. Nessa etapa, foram coletados os seguintes dados: capacitância necessária para a magnetização do gerador a vazio, tensão de linha, vazão, pressão, rotação, freqüência elétrica e corrente de linha solicitada pelas cargas (nesta condição igual a zero). Posteriormente, por meio do painel de cargas, inseriram-se nos terminais do gerador cargas resistivas. Como era esperado, o nível de tensão e a freqüência caíram devido à frenagem provocada pela inércia das cargas, conseqüentemente resultando na redução da velocidade do gerador.

Por meio do inversor de freqüência ligado ao conjunto motobomba utilizado para o acionamento da BFT, ajustou-se um novo par vazão x pressão para se elevar a velocidade da BFT até que o gerador de indução fornecesse 220 V, a 60 Hz, às cargas. Nessa condição, foram coletados os novos valores de capacitância, tensão de linha, vazão, pressão, rotação, freqüência e correntes de linha drenadas pela carga. Em seguida, foram inseridas novas cargas, repetindo-se o processo, até atingir 8 A de corrente fornecida pelo gerador de indução.

As cargas e a capacitância para magnetização foram inseridas de acordo com a disponibilidade do painel. A velocidade foi medida utilizando-se um tacômetro digital. Media-se a velocidade quando o voltímetro indicava uma tensão de linha de 220 V, a uma freqüência mais próxima possível de 60 Hz.

As capacitâncias foram inseridas por meio do chaveamento dos capacitores diretamente no painel. O banco de capacitores está ilustrado na Figura 16.

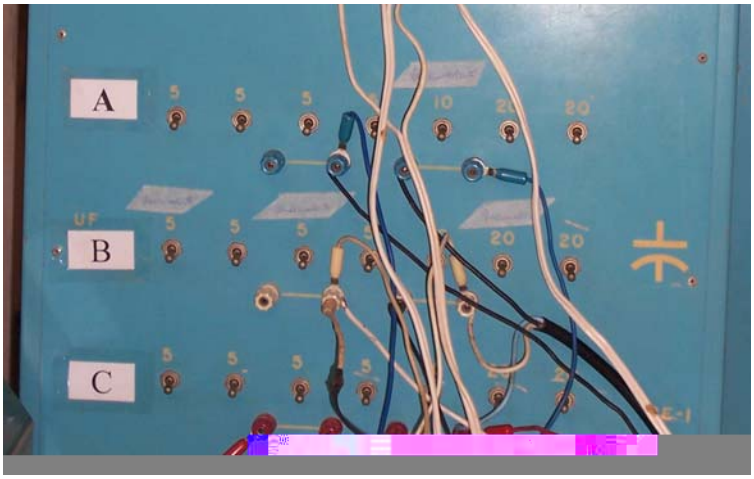


FIGURA 16 Banco de capacitores chaveados. Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006

As correntes para as cargas foram medidas utilizando-se um alicate amperímetro, mostrado na Figura 17.

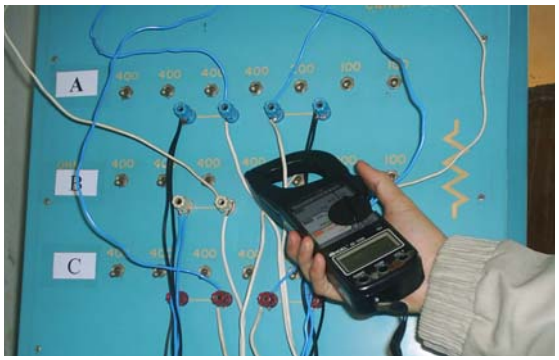


FIGURA 17 Medição das correntes solicitadas pelas cargas. Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006.

4.2.1.2 Alimentando cargas indutivas

O procedimento experimental foi análogo ao descrito no item 4.2.1.1. Nessa etapa, foram inseridos, nos terminais do gerador, dois níveis de carga puramente indutiva, de acordo com a disponibilidade do painel. Para o gerador operando isolado de qualquer rede elétrica foi necessária a correção do fator de potência para 1.

4.2.1.3 Alimentando carga mista

Mantendo o procedimento experimental, foi avaliado o comportamento dos parâmetros elétricos do gerador de indução acionando carga mista (indutiva e resistiva). Nesta etapa foi inserido um nível de carga, de acordo com a disponibilidade do painel.

4.2.2 Conjunto BFT-GI - Gerador de 7,5 cv

Esse ensaio foi realizado por meio da conexão de cargas resistivas nos terminais do gerador. Foram utilizados o painel de cargas resistivas e o painel de lâmpadas. O procedimento experimental foi análogo ao realizado com o gerador de 3 cv. Uma vista geral da montagem do conjunto BFT-GI de 7,5 cv é mostrada na Figura 18.

FIGURA 18 Montagem experimental para ensaio do gerador de 7,5 cv alimentando carga resistiva. Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006.

4.3 Desempenho dos conjuntos BFT-GI

Foram avaliadas as possibilidades de aplicação de BFTs acionando GIs de acordo com a altura de queda e a vazão disponíveis num aproveitamento. Em função do rendimento (potência hidráulica de entrada na BFT x potência elétrica na saída do gerador), foram especificados pares vazão x altura de queda que apresentaram melhores rendimentos.

Calculou-se este rendimento em função da potência elétrica obtida nos terminais do gerador e da potência hidráulica de entrada. Para a obtenção da potência elétrica, foram utilizadas as seguintes equações.

$$S_{ele} = 3 * V_f * I_f \text{ (VA)} \tag{23}$$

Como o fator de potência da carga é igual a 1, pode-se afirmar que:

$$S_{ele} = P_{ele} = 3 * V_f * I_f * \cos\phi \text{ (W)} \tag{24}$$

Em que:

S = potência aparente;

V = tensão;

I = corrente elétrica;

P = potência ativa;

Cosϕ = fator de potência.

os subscritos *ele* e *f* significam, respectivamente, elétrica e valores por fase.

A potência hidráulica foi calculada por meio da equação abaixo.

$$P_H = Q * \gamma * H \qquad (25)$$

Em que:

P_H = potência hidráulica, em W;

Q = vazão, em m^3/s;

H = altura, em m;

γ = peso específico da água (9806), em N/m^3.

A altura de queda disponível H foi medida utilizando-se um manômetro conectado no flange de descarga da BFT. Essa instalação pode ser vista na Figura 19.

FIGURA 19 Manômetro instalado na entrada de água da BFT.

Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006.

A vazão Q foi medida utilizando-se um medidor eletrônico digital, instalado na tubulação de entrada de água na BFT. A fotografia da Figura 20 mostra o medidor instalado.

FIGURA 20 Medidor de vazão instalado na tubulação de adução.
Laboratório de Hidráulica da UFLA, Lavras, MG, 2006.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Seleção do Conjunto BFT-GI

Considerando um aproveitamento disponível na Pousada Sete Quedas, localizada no município de Carrancas, Minas Gerais, especificou-se o conjunto motobomba.

Vazão e altura disponíveis:

Q = 25 l/s = 0,025 m^3/s = 90 m^3/h

H = 10,5 m

Da equação (16):

$$Q_{Bomba} = Q_{BFT} * \eta_{máx}^{0,8}$$

Considerando o rendimento máximo da bomba igual a 75%.

$$Q_{Bomba} = 0,025 * 0,75^{0,8} = 0,019 \, {m^3}/{s} = 68,4 \, {m^3}/{h}$$

$$H_{Bomba} = H_{BFT} * \eta_{máx}^{1,2} = 10,5 * 0,75^{1,2} = 7,4m$$

A bomba funcionando como turbina para este aproveitamento deverá ser capaz de recalcar 68,4 m^3/h, a uma altura de 7,4 m. A bomba selecionada foi a EHF 80-16, rotor 150 mm, 1.750 rpm, fabricante EH Bombas. Foi escolhido um rotor acima do ponto de operação calculado. Assim, tem-se a possibilidade de realizar uma raspagem no rotor, definindo o mesmo para este ponto de operação.

Acionando o gerador de indução, a BFT deverá operar a uma velocidade superior à velocidade síncrona do gerador, conseqüentemente em um novo par vazão x pressão. O gerador de indução de 3 cv a plena carga opera à velocidade em torno de 1.830 rpm. Esse foi o valor obtido no ensaio do conjunto BFT acoplado ao gerador de 3 cv, a plena carga. Esses valores estão mostrados mais adiante neste capítulo. Por meio da curva da bomba, apresentada na Figura 21, determinou-se um ponto ótimo para calcular o novo par vazão x pressão, ou seja,

o ponto de operação para velocidade acima da nominal. O ponto escolhido para esse cálculo está destacado e refere-se a Q = 65 m^3/h e H = 6,3 m.

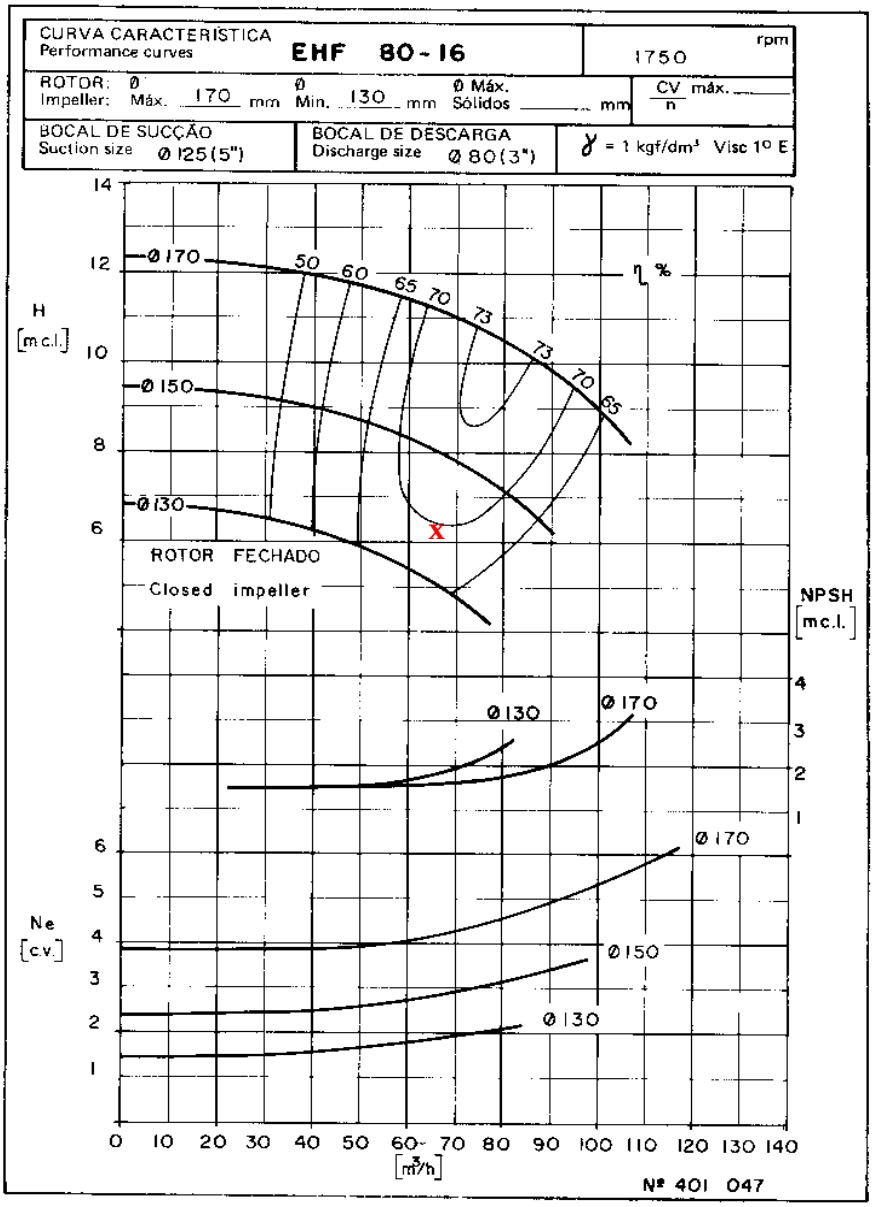


FIGURA 21 Curva característica da bomba selecionada.

Fonte: fornecida pelo fabricante.

Para que a bomba opere acionando gerador de indução, é necessário que se faça a correção do par vazão x pressão. Assim, para essa nova condição de operação, tem-se:

$$Q_{BFT} = \frac{Q_{BEP}}{(\eta_{máx})^{0,8}} * \frac{W_{BFT}}{W_{Bomba}} = \frac{65}{0,7^{0,8}} * \frac{1830}{1750} = 86,46 * 1,04 = 89,9\, m^3/h$$

$$H_{BFT} = \frac{H_{BEP}}{(\eta_{máx})^{1,2}} * \frac{W_{BFT}}{W_{Bomba}}^{2} = \frac{6,3}{0,7^{1,2}} * \frac{1830}{1750} = 9,66 * (1,04)^2 = 10,4m$$

Observa-se que o novo par vazão x pressão permanece em torno do potencial existente no aproveitamento e da faixa de operação da bomba selecionada.

Considerando Q = 89,9 e H = 10,4, na curva apresentada na Figura 21, encontra-se a potência do acionamento, que será adotada como a potência do gerador, nesse caso o gerador de 3 cv.

5.2 Comportamento dos parâmetros elétricos

5.2.1 Conjunto BFT-GI – Gerador de 3 CV

5.2.1.1 Alimentando cargas resistivas

Para cálculo da capacitância necessária para a excitação do gerador a vazio, foi utilizado o método proposto por Lopes (2003).

Dados de placa do motor: 3 cv; 2200 W; 220/380 V; 9,0/5,2 A; η=81,7%; Cós ϕ=0,78.

$$S = \sqrt{3} * V_L * I_L = \sqrt{3} * 220 * 9 = 3425 \text{ [VA]}$$

$$P = S * \cos\phi = 3425 * 0,78 = 2671 \text{ [W]}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{3425^2 * 2671^2} = 2144 \text{ [Var]}$$

Por fase, tem-se que a potência reativa será:

$$Q_f = \frac{2144}{3} = 715 \quad \text{[Var]}$$

Para ligação em delta, tem-se:

$$V_f = V_L$$

$$I_f = \frac{Q_f}{V_f} = \frac{715}{220} = 3{,}25 \quad \text{[A]}$$

Pode-se definir, então, a capacitância por fase:

$$C = \frac{I_f}{2 * \pi * f * V_f} = \frac{3{,}25}{2 * 3{,}14 * 60 * 220} = 39 \quad [\mu F]$$

Os parâmetros elétricos obtidos no ensaio do gerador de indução alimentando carga resistiva constante, operando isoladamente da rede elétrica, encontram-se na Tabela 2. As grandezas elétricas tensão e corrente são valores de linha.

TABELA 2 – Parâmetros elétricos obtidos no gerador de indução operando isolado da rede elétrica, para carga resistiva.

Tensão de linha [Volts]	Corrente de linha [Ampères]	Capacitância [Micro Faraday]	Freqüência [Herz]	Rotação [rpm]
220	0,00	35	58	1735
220	0,95	35	58,5	1756
220	1,95	35	59	1792
219	2,87	40	57	1732
219	3,89	40	58	1773
220	5,80	45	57,5	1779
220	7,61	50	58	1801
220	8,81	55	57	1792
220	9,57	55	58	1828
220	10,81	60	59	1870
219	12,35	65	58,5	1890
220	13,68	70	59,5	1945

Observa-se, na Tabela 2, que a regulação de tensão do conjunto operando com carga se manteve, quando comparado com o funcionamento a vazio (valores descritos na primeira linha da mesma Tabela).

A capacitância calculada anteriormente, necessária para a magnetização do gerador sem carga, foi de 39 μF. Nota-se, na Tabela 2, que, experimentalmente, foi necessário utilizar um banco de 35 μF por fase. O banco de capacitores que foi utilizado no experimento possuía opção de variar a capacitância somente de 5 em 5 μF. No entanto, quando inseriu-se um valor de 40 μF por fase, mantendo-se a velocidade constante, a tensão terminal elevou-se acima de 220 V, o que não era desejado para a alimentação das cargas. Por isso, foi inserida uma capacitância de 35 μF por fase e ajustada a velocidade do conjunto até obter-se a tensão terminal de 220 V por fase, a uma freqüência próxima de 60 Hz. Outro ponto relevante é que os valores dos capacitores informados pelo fabricante apresentaram variação de + ou – 10% em torno do valor nominal. E, conforme a literatura, o ideal para determinar-se a capacitância para excitação é por meio da curva de magnetização da máquina de indução.

Observou-se também que, com o aumento da carga, para manter a tensão terminal de 220 V e freqüência próxima de 60 Hz, foi necessário aumentar a capacitância e também o par vazão x pressão, que será demonstrado mais adiante neste capítulo. Ainda por meio dos dados da Tabela 2 pode ser observado o comportamento da rotação do conjunto em função do aumento da carga. Observa-se que a freqüência depende diretamente da rotação. Tomando-se como base as 3 primeiras linhas da tabela, nota-se que o aumento da carga não justificou um aumento da capacitância para manter a tensão nos terminais do gerador; em contrapartida foi necessário aumentar a velocidade para manter a reatância capacitiva.

5.2.1.2 Alimentando cargas indutivas

Conforme Lopes (2003), quando o gerador de indução alimenta cargas indutivas, deve-se corrigir o fator de potência das cargas individualmente. Isso se faz necessário, pois, para um fator de potência indutivo, a tensão tende a cair. Observa-se, pelos dados da Tabela 3, que para, aproximadamente, o mesmo valor de corrente (0,95 A – carga resistiva, mostrado na Tabela 2), comparado com 0,88 A na Tabela 3, houve um acréscimo na capacitância de 5 μF por fase. Este acréscimo é para corrigir o fator de potência das cargas e manter a tensão em 220 V. O cálculo da correção é feito de acordo como:

L = 1240 (mH)

$$X_L = 2 * \pi * f * L = 2 * 3{,}14 * 60 * 1{,}24 = 467{,}23$$

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C}$$

Portanto, a capacitância necessária para corrigir o fator de potência da carga indutiva de 1.240 mH será:

$$467{,}23 = \frac{1}{2 * 3{,}14 * 60 * C}$$

$$C \cong 5{,}7 \ \ (\mu F)$$

Nessa etapa foram conectados dois níveis de carga puramente indutiva nos terminais do gerador. Neste ensaio, conectou-se, primeiramente, uma carga de 1.204 mH e, posteriormente, mais uma de 1.240 mH. Esses eram os valores disponíveis no painel de cargas. Os dados da Tabela 3 representam o comportamento dos parâmetros elétricos em função do aumento da carga. As tensões e correntes apresentadas são valores de linha.

TABELA 3 – Tensão, corrente, capacitância e freqüência nos terminais do gerador para carga indutiva.

Carga [mH]	Capacitância [μF]	Tensão [V]	Corrente [A]	Freqüência [Hz]	Rotação [rpm]
1240	40	221	0,88	59	1763
2480	45	220	1,66	59,5	1786

Como se observa, o gerador de indução teve regulação de tensão próxima à dos valores obtidos quando alimentando os mesmos níveis de cargas puramente resistivas e que, neste caso, a freqüência também depende da rotação conjunto. Com isso é possível afirmar que o gerador de indução pode alimentar cargas indutivas.

5.2.1.3 Alimentando carga mista (indutiva e resistiva)

Nessa etapa, corrigiu-se o fator de potência da carga mista para 1; conseqüentemente, o fator de potência da carga total (resistiva + indutiva) elevou-se para 1. A carga indutiva conectada também foi de 1.240 mH. O comportamento dos parâmetros elétricos da máquina nessa condição de carga encontra-se na Tabela 4. A tensão e a corrente elétrica são valores de linha.

TABELA 4 – Parâmetros elétricos obtidos no ensaio do conjunto alimentando carga mista (indutiva e resistiva).

Tensão [V]	Corrente [A]	Capacitância [μF]	Freqüência [Hz]	Rotação [rpm]
220	2,54	50	58	1754

Observa-se, na Tabela 4, que os parâmetros elétricos obtidos quando o gerador de indução alimenta carga mista é equivalente aos obtidos quando alimenta carga resistiva.

5.2.2 Conjunto BFT-GI – Gerador de 7,5 cv

Uma nova condição de acionamento foi ensaiada. A bomba que foi utilizada no experimento anterior, com gerador de 3 cv, foi acoplada a outro gerador de 7,5 cv, para as mesmas condições de carga.

Os dados relativos ao comportamento das grandezas elétricas obtidas no ensaio do conjunto BFT acoplada ao gerador de 7,5 cv operando isoladamente da rede elétrica, alimentando cargas resistivas e constantes, encontram-se na Tabela 5.

TABELA 5 – Comportamento do gerador de 7,5 cv, em função do aumento da carga

Tensão [V]	Corrente [A]	Capacitância [μF]	Freqüência [Hz]	Rotação [rpm]
219	0,00	50	59,5	1785
220	0,92	50	60	1798
218	1,90	50	60	1882
221	2,84	55	59	1772
219	3,82	55	59	1780
219	5,74	60	58,5	1768
221	7,37	65	58	1766
220	8,65	65	58,5	1788
221	9,90	70	58,5	1780
218	10,86	70	59	1807
218	12,42	75	59	1806
220	14,10	80	59	1820

Observa-se, pelos dados da Tabela 5, a excursão de carga submetida ao gerador. A primeira linha da Tabela mostra os parâmetros elétricos do gerador operando a vazio.

Conforme a literatura pesquisada, quando ocorre o aumento da carga nos terminais do gerador, é necessário o aumento da capacitância por fase para manter o nível de tensão nominal nas cargas. Porém, em alguns casos, o aumento da carga não justificou a conexão de mais capacitores para manter a tensão. Tomando como base a capacitância de 50μF, para manter a tensão

próxima à nominal, foi necessário aumentar a velocidade do conjunto e, conseqüentemente, manter a freqüência em nível satisfatório.

5.3 Desempenho do conjunto BFT-GI

5.3.1 Gerador de 3 cv

Para o cálculo do rendimento do sistema BFT-GI, foram utilizados valores de vazão e altura e as grandezas elétricas tensão e corrente.

Os dados das Tabelas 6, 7 e 8 mostram os rendimentos do conjunto alimentando diversos tipos de carga e os respectivos pares vazão x pressão, nos quais ocorreram os melhores rendimentos. O rendimento foi calculado de acordo com a potência hidráulica de entrada e a potência elétrica entregue pelo gerador.

TABELA 6 - Rendimento do conjunto utilizando gerador de 3 cv, em função da potência hidráulica de entrada e da potência elétrica de saída alimentando carga resistiva.

Vazão [m^3/h]	Altura [m]	Potência hidráulica [w]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência elétrica [w]	η
41,44	9,5	1072	220	0,00	0,00	0,00
49,79	10,5	1424	220	0,95	362	0,25
57,46	12	1878	220	1,95	742	0,40
64,71	12,5	2203	219	2,87	1087	0,49
70,7	13,5	2600	219	3,89	1474	0,57
82,24	15,5	3472	220	5,80	2207	0,64
92,35	18	4528	220	7,61	2896	0,64
97,59	19,5	5184	220	8,81	3353	0,65
100,6	20	5480	220	9,57	3642	0,66
106,9	23	6697	220	10,81	4114	0,61
113	25	7695	219	12,35	4679	0,61
119,37	27	8779	220	13,68	5207	0,59

Observa-se, pelos dados da Tabela 6, que quando o gerador estiver operando com carga entre 50% e 100% de sua capacidade nominal, tem-se um rendimento acima de 60% (rendimento de um grupo gerador convencional

encontrado na prática (Martinez,1987). Foi provocada uma sobrecarga no gerador, para fins de efeitos experimentais e demonstrar o decréscimo do rendimento. Nesse caso, a sobrecarga implica em redução do rendimento, mostrando, assim, os pontos de melhor eficiência do conjunto. Esses pontos de melhor eficiência como gerador coincidem com os valores nominais de tensão e corrente do gerador operando como motor.

Nas Tabelas 7 e 8 apresenta-se o rendimento do conjunto alimentando carga indutiva e mista, respectivamente. Pode ser observado também que estes valores então próximos daqueles obtidos quando alimentando cargas puramente resistivas.

TABELA 7 - Rendimento do grupo gerador de 3 cv alimentando cargas

Tabela 9 são apresentados os valores dos parâmetros elétricos medidos nessa condição.

TABELA 9 - Rendimento do conjunto BFT-GI em função da potência hidráulica de entrada e da potência elétrica de saída alimentando carga resitiva.

Vazão [m^3/h]	Altura [m]	Potência hidráulica [w]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência elétrica [w]	η
43,8	11	1312	219	0,00	0,00	0,00
51,4	11,5	1610	220	0,92	350	0,22
57,82	12	1890	218	1,90	717	0,38
66,1	12,5	2251	221	2,84	1086	0,48
70,72	13,5	2601	219	3,82	1447	0,56
81,25	15	3320	219	5,74	2175	0,66
91,8	17,3	4326	221	7,37	2818	0,65
95	18,6	4813	220	8,65	3292	0,68
100,8	20,2	5546	221	9,90	3785	0,68
102,39	21	5857	218	10,86	4096	0,70
107,3	22,5	6576	218	12,42	4684	0,71
113,86	24,5	7598	220	14,10	5366	0,71

Pode-se observar, pela Tabela 9, que o conjunto atingiu rendimento superior a 60% para o gerador operando com carga acima de 25% de sua capacidade nominal. Para a operação do gerador acima de 50% de sua capacidade nominal, obteve-se até 71% de rendimento do conjunto. Comparando-se com o gerador de 3 cv, observa-se que para aproximadamente a mesma carga, o gerador de 7,5 cv apresentou rendimento superior. Um dos fatores que justificam esse melhor rendimento é o próprio tamanho da máquina, conforme a literatura pesquisada. Na Figura 22 é mostrado um gráfico comparando o rendimento do conjunto acoplado ao gerador de 3 cv x 7,5 cv.

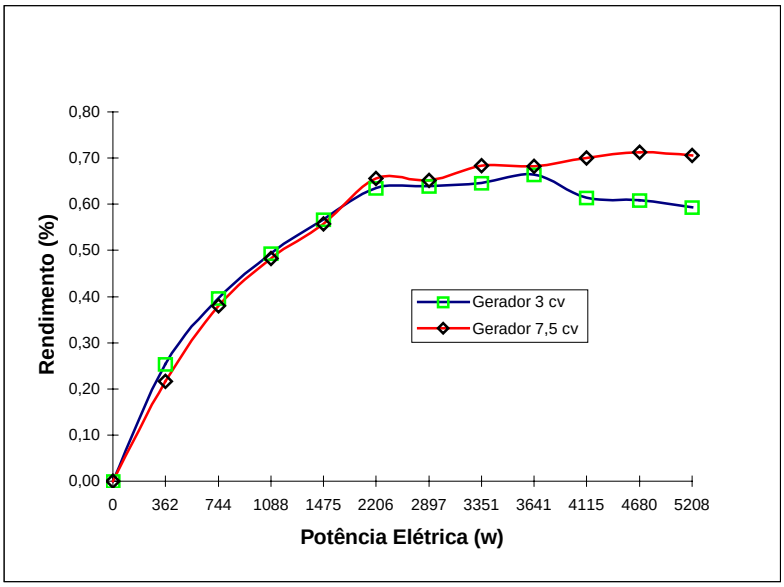


FIGURA 22 Rendimento do conjunto BFT acoplada ao gerador de 3 x 7,5 cv.

Fonte: Elaborada pelo autor

6 CONCLUSÕES

Por meio do equacionamento estudado, é possível selecionar um conjunto BFT acionando GI para pequenos aproveitamentos, utilizando bombas e motores comerciais (conjuntos de prateleira).

Os parâmetros elétricos, tensão, corrente e freqüência, mostraram-se equivalentes quando o gerador alimentou diferentes tipos de cargas.

O rendimento dos conjuntos BFT-GIs testados representou uma alternativa tecnicamente viável para instalação em pequenos aproveitamentos de potencial hídrico, quando comparado com turbinas e geradores convencionais. Os ensaios realizados no conjunto acoplado ao gerador de 7,5 cv mostraram que um conjunto adquirido, a princípio, para funcionar tradicionalmente como motobomba, pode operar como BFT-GI.

Foram verificados no mercado os custos de uma instalação utilizando gerador e turbina convencional e BFT-GI para o caso específico estudado. Comparados aos custos do fabricante Alterima Geradores e EH Bombas, economicamente a alternativa BFT-GI foi 60% menor, comparada com equipamentos convencionais (janeiro/2006).

Sugestões para novos trabalhos:

- avaliar outros tipos, potências e características de bombas hidráulicas;
- diante de um potencial hídrico, selecionar o grupo BFT-GI e efetivar a instalação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALARIM, C. R.; TARGA, L. A.; VIRGENS FILHO, J. S.; ANDRADE FILHO, A.G.; WIECHETECK, G.K. Custo de bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas em Micro Centrais Hidrelétricas. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 219-225, jan./abr. 2004.

BRAGA, A.V. **Modelagem, Ajuste e Implementação de um Sistema de Controle de Tensão para o Gerador de Indução.** 2002. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

EH BOMBAS HIDRÁULICAS LTDA. **Catálogo Técnico.** 2006.

ELETROBRÁS & DNAEE. **Manual de Micro Centrais Hidrelétricas,** 1985.

ELETROBRÁS & DNAEE. **Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 1982.

HOLDER, R. P. **Grupos geradores utilizando bombas funcionando como turbinas: um estudo de viabilidade técnica e econômica.** 2005.122 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KSB BOMBAS HIDRÁULICAS. **Catálogo Técnico.** 2000.

LOPES, R. E.; HOLDER, R. P.; MARTINEZ, C. B. O Uso de Bombas Funcionando como Turbinas Acionando Geradores de Indução. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA – Citenel, 2., 2004, Salvador BA. **Anais...** Salvador, 2004. p. 271-275.

LOPES, R. E. **Grupos geradores de baixa potência acionados por bombas funcionando como turbina.** 2003. 131p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MARRA, E. G.; POMÍLIO, J. A. Sistemas de geração baseados em gerador de indução operando com tensão regulada e freqüência constante. **Controle & Automação,** São José dos Campos, v. 11, n. 1, p. 29- 36, 2000.

MARTINEZ, C. B. **Micro Centrais Hidrelétricas para o Meio Rural.** 1987

PEREIRA, V. M. **Estudo e modelagem dinâmica de gerador de indução acionado por máquina de combustão interna com controle de tensão e de freqüência por meio de inversor PWM**. 2003. 158 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RESENDE, J. T. **Operação isolada e interligada do gerador de indução.** 1994. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.

SIMONE, G. A. **Máquinas de indução trifásicas:** teoria e exercícios. São Paulo: Érica, 2000. 328 p.

SMITH, N. **Motors as generator for micro-power.** London, 2001.

VIANA, A. N. C. **Comportamento de bomba centrífugas funcionando como turbinas hidráulicas.** 1987. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, MG.

WILLIANS, A. **Pumps as turbines:** a user's guide, London, 1995.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo