
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

**Contribuições Para o Estudo e a Aplicação de Bombas
Funcionando Como Turbinas na Geração Descentralizada**

Danilo Derick Silva Alves

Orientadores: Carlos Barreira Martinez
Selênio Rocha Silva

Setembro/10

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO E A APLICAÇÃO DE BOMBAS
FUNCIONANDO COMO TURBINAS NA GERAÇÃO DESCENTRALIZADA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Danilo Derick Silva Alves

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2010

“À minha família e aos meus amigos”

“O senhor... Mire veja: o mais importante e bonito, do mundo, é isto: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas – mas que elas vão sempre mudando. Afinam ou desafinam. Verdade maior. É o que a vida me ensinou. Isso que me alegra, montão.(...)”

João Guimarães Rosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente

a meus pais e meus irmãos, por todo o esforço, incentivo e confiança desde o início desta caminhada;

ao Martinez, pelo apoio incondicional e ao Selênio, pelas contribuições precisas e objetivas, desde a graduação;

ao Marcos Vinícius Bortolus, por ter contribuído significativamente para minha formação humana e minha visão de mundo;

ao Marcelo Vasconcellos, pelos sonhos compartilhados, que acrescentaram uma importante “pitada” de romantismo à minha profissão;

a todos os colegas do CPH, de ontem e de hoje, pela amizade, diversão e aprendizado de todo esse tempo;

a todos os meus amigos que, com suas peculiaridades, ajudam a enriquecer a minha vida.

SUMÁRIO:

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIACÕES

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 Motivação	22
1.2 Metodologia e objetivos	23
1.3 Organização do texto	24
2. REVISÃO E ASPECTOS GERAIS	26
2.1 Bombas funcionando como turbinas	26
2.1.1 Histórico	26
2.1.2 Metodologias e aplicações	27
2.1.3 Alguns sistemas implementados pelo mundo	31
2.1.4 Considerações	38
2.2 Geradores de energia elétrica	40
2.2.1 Máquinas de indução	40
2.2.2 Máquinas síncronas	45
2.2.3 Considerações	49
2.3 Sistemas conectados à rede	51

2.3.1	O velho conceito novo	51
2.3.2	Os anseios da geração distribuída	52
2.3.3	Os desafios da geração distribuída.	52
2.4	Sistemas isolados	54
2.4.1	O cenário	54
2.4.2	As particularidades da aplicação	54
2.4.3	Considerações	55
3.	AS PERDAS NA MÁQUINA SÍNCRONA	56
3.1	Eficiência do gerador	57
3.1.1.	Perdas mecânicas	58
3.1.2.	Perdas magnéticas	58
3.1.3.	Perdas no cobre	62
3.1.4.	Perdas suplementares	63
4.	CARACTERIZAÇÃO DA BFT EM VELOCIDADE VARIÁVEL	66
4.1	A bomba em estudo	66
4.2.	O dimensionamento da BFT	68
4.3.	Características em modo turbina	69
4.3.1.	Ponto de máxima eficiência	69
4.3.2.	Ponto de máxima potência	69
4.3.3.	Característica $H \times Q$	70
4.4.	A BFT em velocidade variável	72
4.4.1.	Rendimento x vazão	72
4.4.2.	Potência x vazão	73
4.4.3.	Característica de rendimento na operação em velocidade variável	74
4.4.4.	Potência de saída para operação em velocidade variável	75

4.4.5.	Velocidade x vazão para maximização de potência	76
4.5.	Comparação da operação da BFT: velocidade constante e velocidade variável	77
4.5.1.	Comparação dos sistemas	77
4.5.2.	Produção anual de energia	79
5.	PROPOSTA DO SISTEMA ISOLADO	82
5.1	Descrição do sistema	82
5.2.	Testes de variação de carga	83
6.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	90
6.1	Conclusões	90
6.2	Propostas de continuidade	91
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS		99
A	Ensaio característicos e metodologia de cálculo da eficiência da máquina síncrona.	99
A.1	Características de saturação em circuito-aberto	99
A.2	Características de saturação em curto-circuito	100
A.3	Característica de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo	102
A.4	Ensaio para determinação da reatância x_q	110
A.5	Transitório de curto-circuito.	111
B	A bancada de testes e os ensaios da BFT.	113
B.1	A Bancada de testes	113
B.2	Ensaio em velocidade constante	114
B.3	Ensaio com pressão constante	117

RESUMO

Micro Centrais Hidroelétricas são importantes alternativas que devem ser consideradas no planejamento energético nacional. Nos últimos anos, a categoria vem ganhando cada vez mais expressão, paralelamente ao desenvolvimento de novas soluções tecnológicas neste âmbito. A geração distribuída traz uma expectativa de cenário fértil para um crescimento ainda mais acentuado desses aproveitamentos. No abastecimento de energia elétrica no meio rural, encontra-se um grande potencial de aplicação desses sistemas, tendo em vista o potencial hidráulico brasileiro.

A utilização de BFTs - Bombas Funcionando como Turbinas - substituindo as tradicionais turbinas hidráulicas tem chamado atenção devido às vantagens que apresentam. Trata-se de um assunto que vem sendo explorado há alguns anos, no entanto, ainda levanta questionamentos a respeito de seu desempenho e viabilidade. Isto se torna um obstáculo para a maior disseminação de BFTs na geração de energia elétrica.

Neste trabalho serão levantadas algumas respostas sobre o comportamento da BFT em velocidade variável, sob o ponto de vista da eficiência da máquina, com o objetivo de oferecer uma sinalização para a operação de BFTs em velocidade variável na geração de energia elétrica. Além disso, será apresentada uma proposta para regulação de tensão e frequência de um grupo gerador para operação isolada. Esta proposta tem como orientação a grande disponibilidade de bombas no mercado, o que favorece o acesso à mão-de-obra para manutenção, característica fundamental para aplicação em regiões distantes dos grandes centros. Portanto, procurou-se trabalhar com componentes que propaguem esta característica para o sistema como um todo.

O trabalho contempla a construção de uma bancada de testes e a investigação tem como foco a experimentação.

ABSTRACT

Micro hydro systems are important alternatives to be considered in the national energy plan. In the last years, with the development of new technological solutions, the field has been increasingly gaining more importance. Distributed generation provides expectations of a fertile setting for an even more pronounced growth of the micro hydro sector. Given the great hydroelectric potential of Brazil, there is a vast application for such systems on the supply of electricity in rural areas.

The use of PATs - Pumps as Turbines - replacing the conventional hydraulic turbines has drawn attention because of the advantages they present. Although this is a subject which has been explored for some years, doubts are still raised about its performance and viability. This becomes an obstacle for the dissemination of PATs in electricity generation applications.

This work will present some answers about the behavior of the PAT working in variable speed. The analysis will be directed to the efficiency characteristics of the machine. The goal is to provide information to subsidize decisions of application of variable speed PAT in electricity generating. Furthermore, it presents a proposal for regulating voltage and frequency of a generator to be applied in isolated systems. This proposal is supported by large availability of pumps in the market, which helps the access of maintenance, a key feature for application in regions far from major centers. For that reason, focus has been placed on components which propagate this feature for the system as a whole.

The work includes construction of a bench test and the research focuses the experimentation.

LISTA DE TABELAS

TABELA I - Métodos para caracterização de BFTs.

TABELA II - Dados de placa do gerador.

LISTA DE FIGURAS

1. Grupo gerador de Mae Wei
2. Casa de máquinas do sistema de Mae Wei
3. Controle de carga e banco de resistências
4. Construção da casa de máquinas.
5. Montagem do sistema de adução.
6. Esquema de ligação C – 2C.
7. Gerador de indução diretamente conectado.
8. Esquema de configuração do DFIG
9. Gerador de indução conectado à rede através de um conversor de energia
10. Gerador síncrono diretamente conectado à rede
11. Gerador síncrono conectado à rede através de um conversor de energia
12. Sistema de geração com transmissão continuamente variável
13. Montagem utilizada para realização dos ensaios característicos da máquina síncrona
14. Perdas mecânicas causadas por atrito e ventilação, em função da velocidade
15. Perdas no ferro em função da velocidade e da tensão de estator
16. Perdas no ferro em função da tensão de estator
17. Perdas no ferro em função da velocidade
18. Perdas no cobre em função da corrente de armadura
19. Perdas suplementares em função da velocidade e da corrente de armadura
20. Efeito da corrente de carga nas perdas suplementares para diferentes velocidades
21. Efeito da velocidade nas perdas suplementares para diferentes níveis de corrente
22. A bomba em estudo
23. Características da bomba
24. Característica de rendimento \times vazão em modo turbina

25. Característica de potência x vazão em modo turbina
26. Característica de pressão x vazão em modo turbina
27. Característica de rendimento x vazão em modo turbina, para diferentes velocidades
28. Característica de potência x vazão em modo turbina, para diferentes velocidades
29. Característica de rendimento x vazão em modo turbina, em velocidade variável
30. Característica de potência x vazão em modo turbina, em velocidade variável
31. Velocidade x vazão para maximização de potência
32. Comparação de rendimentos: velocidade constante x velocidade variável
33. Comparação de potências: velocidade constante x velocidade variável
34. Perfil típico de variação de vazão
35. Operação da BFT para o regime de vazões – Comparação de rendimentos
36. Operação da BFT para o regime de vazões – Comparação das potências anuais
37. Sistema proposto para geração isolada.
38. Esquema do sistema de controle de carga.
39. Variação da tensão em função da carga do gerador.
40. Variação da frequência em função da carga do gerador.
41. Variação da tensão devido à entrada e saída de 40% da carga do sistema.
42. Variação da frequência devido à entrada e saída de 40% da carga do sistema.
43. Variação da tensão devido à entrada e saída de 65% da carga do sistema.
44. Variação da frequência devido à entrada e saída de 65% da carga do sistema.
45. Variação da tensão devido à entrada e saída de 100% da carga do sistema.
46. Variação da frequência devido à entrada e saída de 100% da carga do sistema.
- A.1. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo
- A.2. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1300 rpm
- A.3. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1400 rpm

- A.4. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1500 rpm
- A.5. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1600 rpm
- A.6. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1700 rpm
- A.7. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1800 rpm
- A.8. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1900 rpm
- A.9. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2000 rpm
- A.10. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2100 rpm
- A.11. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2200 rpm
- A.12. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2300 rpm
- A.13. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2400 rpm
- A.14. Variação da indutância da máquina com a frequência
- A.15. Corrente de armadura no momento em que o transitório foi aplicado
- A.16. Corrente de armadura sem a componente de regime permanente
- B.1. Bancada de testes do grupo gerador
- B.2. Carga \times pressão para diferentes velocidades
- B.3. Carga \times vazão para diferentes velocidades
- B.4. Rendimento \times carga para diferentes velocidades
- B.5. Rendimento \times pressão para diferentes velocidades
- B.6. Perdas a vazio \times velocidade
- B.7. Rendimento \times vazão para diferentes pressões
- B.8. Rendimento \times carga para diferentes pressões
- B.9. Rendimento \times velocidade para diferentes pressões
- B.10. Velocidade \times vazão para diferentes pressões
- B.11. Velocidade \times carga para diferentes pressões
- B.12. Carga \times vazão para diferentes pressões

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_t	Vazão em modo turbina no ponto de máxima eficiência (l/s)
Q_b	Vazão em modo bomba (l/s)
H_b	Pressão em modo bomba (mca)
H_t	Pressão em modo turbina no ponto de máxima eficiência (mca)
η_b	Rendimento como bomba (%)
η_t	Rendimento como turbina (%)
f_{cQ}	Fator de correção de vazão
f_{cH}	Fator de correção de pressão
ω_t	Velocidade em modo turbina (rpm)
ω_b	Velocidade em modo bomba (rpm)
k_q	Coefficiente de correção de vazão
k_a	Coefficiente de correção de altura
N_{qt}	Velocidade específica em modo turbina (rpm)
u_1	Velocidade periférica (m/s)
p	Número de potência, $P/\rho N^3 D^5$, (P em watts, N em 'rps', D em metros, ρ em Kg/m^3)

g	Aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m}^2/\text{s}$)
X_q	Reatância síncrona segundo eixo em quadratura (ohm)
p_M	Perdas mecânicas do gerador (W)
p_F	Perdas magnéticas do gerador (W)
p_C	Perdas no cobre do gerador (W)
p_S	Perdas suplementares do gerador (W)
η_G	Rendimento do gerador (%)
$P_{G_saída}$	Potência de saída do gerador (W)
P_{G_perdas}	Perdas totais do gerador (W)
p_h	Perdas por histerese (W)
K_h	Coefficiente de perdas por histerese
V	Volume total de núcleos ou peças de material ferromagnético (m^3)
f	Frequência das variações das induções magnéticas (Hz)
B_m	Valor máximo das induções magnéticas variáveis (T)
p_f	Perdas por correntes parasitas (Foucault), (W)
K_f	Coefficiente de perdas por correntes parasitas (Foucault)
e	Espessura das chapas laminadas (m)

C_m	Constante da máquina síncrona
E	Tensão rms do entreferro (V)
ω	Velocidade (rpm)
I_a	Corrente de Armadura (A)
Q_{bep}	Vazão da bomba no ponto de máxima eficiência (l/s)
H_{bep}	Pressão da bomba no ponto de máxima eficiência (mca)
$\eta_{m\acute{a}x}$	Máximo rendimento como bomba (%)
H	Pressão (mca)
Q	Vazão (l/s)
P	Potência (W)
η	Rendimento da BFT (%)
P_{max}	Potência máxima de saída da BFT (W)
ω_o	Velocidade associada ao ponto de máximo rendimento (rpm)
$P_{entrada}$	Potência de entrada do gerador (W)
T_e	Torque eletromagnético (Nm)
p_{Mmotor}	Perdas mecânicas do motor (W)

R	Resistência do enrolamento de estator, por fase, para a temperatura T (ohm)
R'	Resistência do enrolamento de estator, por fase, para a temperatura T' (ohm)
T	Temperatura média dos enrolamentos de estator no momento da medição de sua resistência ($^{\circ}$ C)
T'	Temperatura média dos enrolamentos de estator em cada ponto medido nos ensaios ($^{\circ}$ C)
E_f	Tensão induzida (V)
U	Tensão terminal (V)
F_m	Força magnetomotriz resultante (A)
F_{mf}	Força magnetomotriz de excitação de campo (A)
F_{ma}	Força magnetomotriz de reação de armadura (A)
I_{\max}	Máxima corrente eficaz (A)
x_d''	Reatância subtransitória (ohm)
I_{rp}	Valor de pico da corrente de regime permanente (A)
x_d'	Reatância transitória (ohm)
I_s'	Valor de pico da corrente de curto circuito do período transitório (A)
x_d	Reatância síncrona (ohm)

T_d'' Constante de tempo subtransitória (s)

T_d' Constante de tempo transitória (s)

LISTA DE ABREVIACOES

SIN	Sistema Interligado Nacional
BFT	Bomba Funcionando como Turbina
CERPCH	Centro Nacional de Referencia em Pequenas Centrais Hidrelétricas
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG
BGET	Border Green Energy Team
IWK	Instituto de Gestão de Recursos Hídricos, Hidráulica e Engenharia Rural da Universidade de Karlsruhe, Alemanha
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DFIG	Double Fed Induction Generator
CVT	Continuously Variable Transmission
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

1. INTRODUÇÃO

Muitos esforços vêm sendo feitos, por parte de agentes do setor elétrico, com o intuito de promover o abastecimento de energia elétrica em todo o território nacional, além de ampliar e diversificar a matriz energética brasileira.

Alguns desses esforços se traduzem na edição de programas, governamentais ou não, que de alguma forma procuram incentivar a disseminação de sistemas de energia renovável. O Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – “Luz para Todos” tem atuado nesse sentido. Brasil (2003).

No caso das comunidades rurais isoladas do Brasil as dificuldades de abastecimento de energia elétrica estão intimamente relacionadas às grandes distâncias entre a geração e o ponto de consumo, além da baixa demanda de energia. Isto implica em custos proibitivos para o abastecimento através da extensão do SIN - Sistema Interligado Nacional. Assim, uma importante alternativa é promover tal abastecimento a partir de fontes renováveis e locais, com base em sistemas isolados da rede elétrica convencional.

Apesar dos esforços empreendidos, o que se verifica é que tais sistemas têm encontrado dificuldades de penetração na matriz energética nacional. Dentre os principais entraves se destacam os fatores econômicos, além da impropriedade dos modelos de planejamento e gestão, que muitas vezes é confundida com inviabilidade técnica.

De maneira geral, com base na experiência brasileira no abastecimento de comunidades rurais através de sistemas baseados em fontes não convencionais, como mostrado por Rosa (2007), tecnologias mais robustas, que apresentam custos reduzidos, de manutenção e reposição de peças mais acessível tendem a ser mais apropriadas para tais aplicações. Desta forma, é desejável aumentar e aprimorar o leque de tecnologias disponíveis para serem utilizadas neste âmbito.

Por outro lado, vivemos um momento de crescimento da utilização dos sistemas de Geração Distribuída. Espera-se que avanços na estrutura do mercado e em questões

regulamentares propiciem maior disseminação de sistemas classificados como de pequeno e micro porte no SIN. Assim, as contribuições científicas se orientam na busca por soluções cada vez mais eficientes e econômicas.

É dentro deste contexto que este trabalho avalia o desempenho de um sistema hidroelétrico de geração de energia, de pequeno porte, abaixo de 20 kW, que opere de forma isolada e que seja adequado à aplicação em regiões rurais como comunidades isoladas, cooperativas de produção, agrovilas, propriedades de produção rural e etc. O sistema é baseado em uma Bomba Funcionando como Turbina (BFT) acoplada a um gerador síncrono. Além disso, faz uma avaliação acerca da operação da BFT em velocidade variável, com o propósito de levantar informações que possam contribuir para sua aplicação em sistemas conectados à rede.

1.1 MOTIVAÇÃO

As turbinas convencionais, normalmente utilizadas em micro sistemas de geração hidroelétrica, são fabricadas de maneira específica de acordo com cada projeto. Isto faz com que apresentem um custo elevado diante do custo total do sistema, principalmente no caso de micro sistemas, abaixo de 20 kW de capacidade instalada. Singh (2005).

As BFTs representam uma solução alternativa neste nicho de aplicação. São tecnologias popularizadas e largamente disponíveis em todo o mundo, em diversos tipos, tamanhos e capacidades. Além disso, apresentam aspectos operacionais e de manutenção relativamente simples.

Num horizonte onde possa haver a conexão de micro sistemas de geração à rede, com a devida regulamentação e demais condições necessárias para a comercialização da energia gerada e obtenção de ganhos econômicos, é bem possível que as turbinas convencionais predominem em relação às BFTs. Isto ocorre devido às possibilidades de recuperação do capital de investimento, inerentes ao contexto da geração distribuída. Desta forma, este contexto favorece a utilização de tecnologias mais eficientes e, conseqüentemente, de custos mais elevados.

No entanto, enquanto este cenário não for real e aspectos econômicos continuem sendo fatores críticos, como é o caso principalmente das aplicações rurais, em sistemas isolados ao redor do mundo, as BFTs continuam sendo a alternativa mais adequada.

1.2 METODOLOGIA E OBJETIVOS

Este trabalho possui dois objetivos principais. O primeiro deles é a caracterização da BFT para a operação a velocidade variável. Esta caracterização consiste no levantamento das curvas Rendimento x Vazão e Potência x Vazão para diferentes velocidades e, a partir disso, obter as características de Rendimento x Vazão, Potência x Vazão e Velocidade x Vazão para a BFT operando com rendimento máximo.

O segundo principal objetivo do trabalho é a definição e avaliação experimental de um sistema hidroelétrico para operação isolada. A definição desta topologia vai de encontro às características deste tipo de aplicação. Desta forma, pretende-se trabalhar com tecnologias de baixo custo e fácil aquisição, de forma que os serviços de manutenção e reposição de peças sejam acessíveis em locais distantes dos grandes centros.

Para alcançar os objetivos, é empregada a seguinte metodologia:

1. Montagem da bancada para testes do grupo gerador, composto de uma BFT acoplada a um gerador síncrono. O grupo gerador é alimentado por dois conjuntos moto-bomba e supervisionado por um sistema para medição de variáveis hidráulicas e elétricas, além da velocidade do conjunto;
2. Mapeamento das componentes de perdas da máquina síncrona;
3. Medição da eficiência da BFT, em diferentes velocidades, de 1300 rpm até 2400 rpm, e levantamento das curvas para operação em velocidade variável;

4. Projeto, implementação e avaliação experimental do sistema de controle de velocidade para operação em velocidade constante. Este sistema de controle compõe a topologia proposta para operação isolada;

Com esta metodologia pretende-se obter os seguintes resultados:

1. A característica de potência de saída da BFT operando nas condições de máximo rendimento;
2. Uma comparação entre a operação em velocidade variável e velocidade constante, de forma a evidenciar os ganhos energéticos obtidos com a operação em velocidade variável;
3. A topologia de um sistema hidroelétrico adequado às aplicações em regiões rurais.

O presente trabalho tem cunho experimental e propõe-se a fornecer informações úteis à disseminação da utilização de BFTs em micro sistemas de geração de energia elétrica.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto da dissertação está dividido em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo é feita uma breve discussão sobre os esforços empreendidos na promoção da universalização do abastecimento de energia elétrica e as dificuldades de se promover este abastecimento com base em sistemas de energia renovável e local. Além disso, apresenta as motivações do trabalho, a metodologia empregada, os objetivos e a organização do texto.

O segundo capítulo apresenta um histórico da utilização de Bombas Funcionando como Turbinas, o estado da arte das principais metodologias de seleção e um relato sobre alguns dos principais projetos implementados pelo mundo. É feita uma revisão crítica de diversas topologias de sistemas de geração de energia elétrica e são abordados aspectos da Geração Distribuída e das aplicações em sistemas isolados.

No terceiro capítulo, é apresentado o estudo das perdas na máquina síncrona. O capítulo é finalizado com a apresentação do modelo para o cálculo de sua eficiência para diversas condições de operação.

O capítulo 4 apresenta a caracterização da Bomba Funcionando como Turbina para a operação em velocidade variável. É feito o levantamento das curvas características em modo bomba para 1800 rpm, além do levantamento das características de rendimento e potências em diversas velocidades. O capítulo ainda faz uma comparação entre as operações em velocidade variável e velocidade constante, sob o ponto de vista dos ganhos energéticos.

O capítulo 5 descreve a topologia proposta para aplicações rurais isoladas. É descrita a configuração do sistema, a filosofia de controle de velocidade e são apresentados os resultados dos testes de rejeição de carga.

No capítulo 6 são feitas as conclusões e as sugestões para continuidade do trabalho.

2. REVISÃO E ASPECTOS GERAIS

2.1 BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS

2.1.1 Histórico

A utilização de bombas funcionando como turbinas tem sido alvo de pesquisas ao longo dos últimos 70 anos. Esta jornada teve início quando engenheiros alemães acidentalmente descobriram que bombas operavam eficientemente como turbinas, num momento em que tentavam levantar as características de operação das bombas.

Nos anos 50 e 60, começou a desenvolver-se o conceito de usinas reversíveis, principalmente nos países desenvolvidos. Neste nicho, as BFTs encontraram uma de suas importantes aplicações e isto sustentou as pesquisas durante certo tempo. Entretanto, as capacidades das poucas unidades eram da ordem de 50 MW a 100 MW.

Nos anos seguintes a indústria química se tornou outra área de aplicação de BFTs. Em alguns processos químicos era necessário dissipar energia de fluidos de alta pressão. Ao invés de simplesmente reduzir a pressão, BFTs eram instaladas para recuperar alguma energia durante o processo. Em redes de distribuição de água aplicações semelhantes foram encontradas para esta tecnologia.

A partir disso, alguns dos fabricantes de bombas passaram a se interessar na sua aplicação como turbinas. Como seria trabalhoso e de certa forma caro testar todas as bombas na sua operação como turbina, fabricantes e pesquisadores trabalharam na tentativa de caracterizar o comportamento da BFT baseando em suas características quando funcionando como bomba. Muitas dessas técnicas foram publicadas.

Entre os primeiros que contribuíram estão Stepanoff (1957) e Kittredge (1961). Mais tarde, outras técnicas surgiram com Gopalakrishnan (1986), Sharma (1985), Schmiendl (1988), Grover (1984), e mais recentemente Williams (1992) e Alatorre-Frenk (1994).

Existe um alto grau de incerteza associado às metodologias de caracterização do comportamento da BFT, apesar disso, elas serviram de ponto de partida no processo de disseminação da tecnologia.

Mais recentemente, pequenas e micro-centrais hidroelétricas se tornaram uma atrativa área de aplicação das BFTs, neste nicho, elas substituem as turbinas, que apresentam custos elevados. Normalmente tratam-se de sistemas de energia elétrica descentralizados, isolados da rede elétrica convencional, e com capacidades inferiores a 100 kW.

Devido ao enorme mercado de bombas de uma vasta faixa de potência elas se apresentam como uma alternativa facilmente encontrada, barata e confiável, principalmente, em se tratando de manutenção, onde apresentam muitas vantagens quando comparadas às turbinas, que são fabricadas sob encomenda.

Alguns estudos realizados, como Balarim (2004) e Lopes (2003), mostram que a bomba hidráulica funcionando como turbina é economicamente viável para aplicações em sistemas de pequeno porte, limitados a um patamar em torno de 150 kW de potência. Trata-se de uma tecnologia já utilizada em alguns lugares do mundo e que apresenta características que justificam essa utilização.

2.1.2 Metodologias e aplicações

Um dos mais sérios problemas que dificulta a aplicação de BFTs é a imprecisão associada às metodologias de seleção desenvolvidas até agora. Desta forma, os trabalhos de pesquisa relacionados ao estudo de BFTs se direcionaram predominantemente para o desenvolvimento e aprimoramento das metodologias de seleção.

Existem vários métodos para caracterização de BFTs. Essencialmente, esses métodos se baseiam na combinação de variáveis como a velocidade específica e parâmetros da bomba no ponto de máxima eficiência. Alguns deles utilizam também a eficiência esperada em modo turbina.

A Tabela 1 a seguir apresenta uma síntese dos principais métodos existentes:

TABELA I
Métodos para caracterização de BFTs.

Método	Qt/Qb	Ht/Hb
Sharma (1985)	$\frac{1}{\eta_b^{0.8}}$	$\frac{1}{\eta_b^{1.2}}$
Williams (1992) *	$*f_{cQ} = \frac{\omega_t}{\omega_b}$	$*f_{cH} = \left(\frac{\omega_t}{\omega_b}\right)^2$
Viana (1987)**	$** \frac{1}{k_q}$	$** \frac{1}{k_a}$
Stepanoff (1957)	$\frac{1}{\eta_b}$	$\frac{1}{\eta_t \times \eta_b}$
Childs (1963), citado por Singh (2005), p. 286	$\frac{1}{\eta_b^2}$	$\frac{1}{\eta_b^2}$
Alatorre-Frenk (1994)	$\frac{0.85 \times \eta_b^5 + 0.385}{2 \times \eta_b^{9.5} + 0.205}$	$\frac{1}{0.85 \times \eta_b^5 + 0.385}$
Schmiedl (1988)	$1.4 - \frac{2.5}{(\eta_b^{0.5} \times \eta_t^{0.5})^{0.5}}$	$1.5 - \frac{2.4}{\eta_b^{0.5} \times \eta_t^{0.5}}$
Grover (1984)	$2.379 - 0.0264 \times N_{qt}$	$2.693 - 0.0229 \times N_{qt}$
Hergt (1984), citado por Singh (2005), p. 286	$1.3 - \frac{1.6}{N_{qt} - 5}$	$1.3 - \frac{6}{N_{qt} - 3}$
Gopalakrishnan (1986)	$\frac{1}{\eta_b}$	$\frac{1}{\eta_b^2}$
Cohrs (1997), citado por Singh (2005), p. 286	$1 + \frac{1}{\left(\frac{\eta_b \times u_1^2}{H_b \times p \times g}\right) - 1}$	$1 + \frac{1}{\frac{\left(\frac{\eta_b \times u_1^2}{H_b \times p \times g}\right) - 1}{\eta_t \times \eta_b}}$

Fonte: Adaptado de Singh (2005).

* O modelo de Williams é semelhante ao modelo de Sharma, porém, para diferentes velocidades operacionais aplicam-se os fatores de correção f_{cQ} e f_{cH} para a vazão e altura, respectivamente.

** k_q e k_a dependem da rotação específica da BFT e são obtidos através da curva levantada experimentalmente. O método também prevê a correção de altura e vazão em função da velocidade de operação.

A primeira metodologia para obtenção das características da BFT foi desenvolvida por Kittredge (1961). Seu trabalho foi baseado na avaliação de quatro bombas, tanto em modo motriz (turbina) como em modo operatriz (bomba), assumindo que duas bombas de características adimensionais idênticas (como bomba) teriam comportamentos similares como turbina. O próprio Kittredge, no entanto, afirma que não há uma expectativa muito grande com relação à precisão de seu método.

Acre American Inc. (1980, citado por SINGH, 2005, p. 95) desenvolveu um programa computacional baseado no método de Kittredge. O programa carrega uma base de dados com as características da bomba como bomba e como turbina, para um determinado número de bombas. Com isso, compara as características de uma bomba conhecida com aquelas da bomba proposta e estima seu comportamento como turbina.

Williams (1992) fez uma revisão detalhada dos métodos de Kittredge e da Acre American Inc., apontando erros em fatores de escala no método da Acre American Inc. e sugerindo mudanças no método de Kittredge, no sentido de se incorporar as diferenças entre a eficiência da bomba do modelo e a eficiência da bomba em avaliação.

Em sua avaliação, Williams (1992) afirma que o método de Kittredge apresenta uma maior confiabilidade após as correções sugeridas. No entanto, não se convenceu da metodologia da Acre American Inc., afirmando que leva a resultados muito distantes dos aceitáveis. Williams (1992) conclui que, apesar da complexidade deste método, dificilmente levará a resultados muito melhores do que os obtidos simplesmente avaliando o “ponto de máxima eficiência”.

Williams desenvolveu um novo método baseado num conceito que chamou de “Area Ratio”. Neste método ele relaciona a performance em modo bomba e em modo turbina, baseando-se em relações geométricas da máquina e em características da área de escoamento. Além disso, mostrou que “Area Ratio” é o mais apropriado dos métodos publicados na literatura. Entretanto, este conceito não foi validado posteriormente por outros pesquisadores, se tornando ponto de controvérsias entre os projetistas de bombas e a academia.

Cohrs (1997, citado por SINGH, 2005, p. 96), a partir de um abrangente conjunto de equações desenvolvidas para pressão em modo turbina, potência e eficiência, encontrou uma grande proximidade entre os valores dos pontos medidos e os calculados. Porém, seu modelo requer um grande volume de dados geométricos e outras constantes. Seu modelo ainda avalia as condições limites de operação, como a vazão e com rotor bloqueado, além das características de torque de partida. Seu trabalho abriu caminho para o desenvolvimento de outro programa computacional em colaboração com a University of Hamburg-Harburg and Tyssen, apenas aplicável para bombas de fluxo radial e com velocidades específicas na faixa de 10 rpm a 100 rpm.

No Brasil, o estudo de Bombas Funcionando como Turbinas é uma das linhas de pesquisa do Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas - CERPCH, vinculado à Universidade Federal de Itajubá, e do Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos – CPH, da Universidade Federal de Minas Gerais. Os trabalhos desenvolvidos nestes laboratórios contemplam o processo de seleção da BFT, avaliações experimentais de desempenho e propostas de micro sistemas de geração de energia elétrica.

No trabalho realizado por Viana (1987), é apresentada uma metodologia para a escolha da bomba funcionando como turbina baseada em resultados teóricos e experimentais, onde são levantados coeficientes experimentais de altura e de vazão da bomba, em função de sua rotação específica. Baseia-se em resultados experimentais de Kittredge (1961) e Buse (1981) e em ensaios de laboratório. O método é aplicável para uma determinada faixa de rotações específicas.

Lopes (2003) e Holder (2005) chegaram a uma metodologia de seleção de BFTs para a utilização em conjunto com um gerador assíncrono. A metodologia, que se baseia no modelo de Sharma (1985) e nas equações de Williams (1995), leva em consideração o tipo de sistema (isolado ou conectado à rede) e o escorregamento nominal do gerador assíncrono.

Singh (2005) avalia nove dos modelos para síntese das características da BFT e os compara com resultados experimentais que obteve a partir do ensaio de onze bombas em laboratório.

A avaliação feita por Singh (2005) mostra que o desempenho de cada metodologia depende da faixa de velocidade específica da bomba. Segundo o autor, os métodos são incoerentes e apresentam uma conformidade “medíocre”.

Além disso, o trabalho de Singh (2005) apresenta um estudo da otimização do projeto da BFT e do sistema como um todo, baseado em uma análise teórica detalhada. Uma das importantes contribuições do seu trabalho foram as pequenas modificações estruturais propostas e avaliadas experimentalmente, com o objetivo de reduzir as perdas hidráulicas internas da BFT. O autor ainda introduz uma metodologia alternativa para o estudo do fenômeno da cavitação em BFTs. Seus resultados apontam para um leve incremento da eficiência global da máquina.

Vilanova (2007) avalia o comportamento de um grupo moto-bomba operando como grupo gerador de energia elétrica, a partir de resultados experimentais. Além disso, quantifica as vantagens econômicas em relação a grupos convencionais baseados em turbinas Michell-Banki e Pelton.

2.1.3 Alguns sistemas implementados pelo mundo

Não existe um número muito grande de sistemas implementados no mundo. Normalmente, os que existem são sistemas domésticos, que abastecem pequenas demandas em regiões de zona rural. Um dos principais idealizadores e executores de alguns desses projetos é o grupo Border Green Energy Team¹ (BGET). A seguir, são apresentados alguns dos projetos implementados pelo mundo.

¹ Organização de voluntários que fornece treinamento e apoio financeiro às comunidades de minorias étnicas nos dois lados da fronteira entre Tailândia e Birmânia, na área de energias renováveis.

2.1.3.1 Comunidade de Mae Wei, Tailândia, 2008.

A comunidade de Mae Wei está localizada no distrito de Tha Song Yang, província de Tak, no norte da Tailândia. Sua população está em torno de 300 pessoas. O projeto foi realizado em fevereiro de 2008.

O sistema comunitário de Mae Wei foi destinado ao abastecimento de uma escola primária da comunidade, que possuía iluminação, um micro computador e um DVD player.

O sistema consiste em um motor de indução trifásico de 4 kW funcionando como gerador e uma bomba funcionando como turbina, como mostra a Figura 1. A magnetização da máquina elétrica é fornecida por três capacitores de 70 μF , conectados na configuração $C - 2C^2$.



Fig 1. Grupo gerador de Mae Wei. Fonte: BGET (2008).

As cargas são alimentadas por um sistema de distribuição monofásico. A potência máxima do sistema é de 3,1 kW e a demanda é em torno de 600 W. Trata-se

² A configuração C-2C é apresentada no item 2.2.1 Máquinas de indução.

de um sistema de velocidade constante. O excesso de energia é dissipado em uma carga resistiva, acionada por um controlador. A Figura 2 mostra a construção da casa de máquinas que abriga os equipamentos.



Fig 2. Casa de máquinas do sistema de Mae Wei. Fonte: BGET (2008).

O projeto foi executado no âmbito de trabalho do grupo Border Green Energy Team. Com a eletrificação da escola, os estudantes aproveitam melhor o tempo de estudo, devido à iluminação, assistem a vídeos educativos e ainda, dados administrativos são armazenados em um micro computador. Atualmente, o sistema se encontra em operação normal.

2.1.3.2 Comunidade de Huai Kra Thing, Tailândia, 2006.

A comunidade de Huai Kra Thing está localizada no distrito de Mae Ramat, província de Tak, no nordeste da Tailândia. A região pertence a um parque nacional e, por isso, não há a possibilidade de ser eletrificada através da extensão da rede elétrica convencional.

A população é formada de refugiados da Birmânia, uma minoria de oprimidos de longa data. São 46 casas num total de aproximadamente 200 pessoas, uma escola de

pequeno porte com dois professores, duas igrejas, uma clínica médica e um centro comunitário. O projeto teve início em fevereiro de 2006.

O sistema consiste basicamente em um motor de indução de 4 *KW* funcionando como gerador, acoplado a uma bomba centrífuga funcionando como turbina. A magnetização do gerador de indução é fornecida por dois capacitores (50 μF e 25 μF) conectados na configuração *C – 2C*. A potência nominal do sistema é de 1,6 *KW* e a potência máxima 3 *KW*. O excesso de energia é dissipado em uma carga resistiva, acionada por um controlador. A Figura 3 mostra o controlador de carga do sistema.



Fig 3. Controle de carga e banco de resistências. Fonte: BGET (2006).

Um sistema de distribuição monofásico abastece uma escola, o centro comunitário, duas igrejas e a casa do líder da comunidade. O projeto foi executado no âmbito do trabalho do grupo Border Green Energy Team. Atualmente, o sistema se encontra desativado para realização de reparos e manutenções.

2.1.3.3 Comunidade de Kre-ki, Tailândia, 2009.

A comunidade de Kre-ki está localizada no distrito de Tha Song Yan, província de Tak, na Tailândia. A região é próxima da área do Parque Nacional Moei Mae. Esta área é privilegiada com grande biodiversidade e vistas deslumbrantes.

A comunidade consiste em aproximadamente 49 casas com população formada predominantemente por budistas Karen ³. A maioria dos moradores são agricultores de subsistência e cultivam arroz, pimenta, pimentão, tabaco e outras culturas diversas. São costumes da aldeia a coleta de alimentos, ervas da floresta e a fabricação de roupas da tradição Karen.

A comunidade possui uma escola, um templo budista e uma clínica. Muitas casas e instalações são alimentadas por pequenos sistemas de energia solar fotovoltaica, instalados pelo governo tailandês, há cerca de três a cinco anos antes do início deste projeto. Embora muitos dos sistemas solares estejam funcionando bem, alguns já apresentam problemas devido à falta de manutenção e orientação indevida dos painéis.

O sistema, implementado em fevereiro de 2009, consiste em um motor de indução trifásico de 2,2 KW e uma bomba centrífuga funcionando como turbina. A magnetização do gerador é fornecida por capacitores de 40 μF conectados na configuração $C - 2C$. O conjunto moto-bomba funcionando como grupo gerador disponibiliza uma potência elétrica de aproximadamente 1 KW. As Figuras 4 e 5 mostram etapas da construção do sistema.

³ Grupo étnico minoritário que vive na região montanhosa entre o leste da Birmânia e o noroeste da Tailândia. Atualmente, existem mais de seis milhões de Karen na Birmânia e mais de 400.000 na Tailândia. Nessa inóspita região, perante a agressão birmanesa, o povo Karen luta incansavelmente pela sua própria sobrevivência. <http://pt.novopress.info/1482/a-luta-do-povo-karen/>. Acesso em: junho 2010.



Fig 4. Construção da casa de máquinas.

Fonte: BGET (2009).



Fig 5. Montagem do sistema de adução.

Fonte: BGET (2009).

Um sistema de distribuição monofásico alimenta pontos de iluminação e tomadas de força da escola, do templo e da clínica. O excesso de energia é consumido em uma carga resistiva. O projeto foi executado no âmbito do trabalho do grupo Border Green Energy Team. Atualmente, o sistema se encontra desativado para realização de reparos e manutenções.

Segundo representantes do BGET, a substituição dos capacitores (duas a três vezes ao ano), e o desgaste de mancais e outros elementos da BFT devido ao acúmulo de sedimentos, são os principais pontos responsáveis pelas manutenções demandadas pelo sistema.

2.1.3.4 *Micro central hidroelétrica de Ambootia, Índia, 2004.*

Este projeto é parte dos trabalhos realizados por Singh (2005) em seu doutorado. As informações foram retiradas do estudo de caso realizado pelo autor.

O projeto foi inicialmente assumido pela Sahyadri Energy Systems Pvt. Ltd, uma empresa de energia renovável da Índia. O autor é co-fundador da empresa. Posteriormente, o Instituto de Gestão de Recursos Hídricos, Hidráulica e Engenharia Rural (IWK), da Universidade de Karlsruhe, da Alemanha, ingressou oficialmente no projeto.

O ambiente rural é um jardim de chá nas colinas de Darjeeling, situado na parte nordeste do subcontinente indiano⁴. O jardim é conhecido como Ambootia Tea Estate, que está produzindo chá desde o ano de 1869. Darjeeling possui uma histórica micro central hidrelétrica construída em 1900 com uma turbina Pelton clássica, que não estava mais em operação há muitos anos. O novo sistema teve seu comissionamento em agosto de 2004.

A demanda de carga da fábrica de chá é definida da seguinte forma:

1. Potência elétrica de pico: 100 KW (duas horas de duração).
2. Carga intermediária de 70 a 75 KW.
3. Carga base 50 KW continuamente.
4. Uma garantia de 20 KW durante os períodos de vazões mínimas.

Para o atendimento à demanda foi projetado um sistema de múltiplas BFTs. Neste sistema, três BFTs são conectadas através de correias a um único gerador de eixo prolongado, sendo que duas delas fornecem 50 KW, cada uma, e a outra fornece 20 KW. São possíveis as seguintes combinações:

1. BFT1 e BFT2, produzindo 100 KW.
2. BFT1 e BFT3, produzindo de 70 a 75 KW.
3. BFT2 e BFT3, também produzindo de 70 to 75 KW.

Desta forma, as BFTs sempre operam em condições próximas às nominais, o que ilustra um aprimoramento do projeto. Segundo o autor, atualmente, o sistema se encontra em operação normal, bem como outros projetos dos quais participou na Índia.

⁴ A Índia, Paquistão e o Bangladesh, e por vezes também o Nepal e o Butão, são ditos formar o subcontinente indiano (a cordilheira de separação é o Himalaia). http://pt.wikipedia.org/wiki/Subcontinente_indiano. Acesso em março 2010.

2.1.3.5 Serra da Mantiqueira, Brasil, 2005.

Este projeto foi realizado a partir de um Convênio de Cooperação Técnica – Financeira, firmado em 2005 entre a Universidade Federal de Itajubá e o Ministério das Minas e Energia. É parte dos trabalhos realizados por Vilanova (2007), em sua dissertação de mestrado. Trata-se, portanto, de um projeto de pesquisa.

O projeto consiste na reforma da micro central localizada no município de Delfim Moreira – MG, na Serra da Mantiqueira. Após a reforma, a micro central recebeu um conjunto moto-bomba operando como grupo gerador de energia elétrica.

O sistema apresenta uma demanda máxima de 38 KW, identificada a partir de um levantamento dos equipamentos existentes e simulação da condição mais crítica (todos os equipamentos sendo utilizados simultaneamente). As principais atividades desenvolvidas no local são o turismo e a piscicultura.

Um motor de indução trifásico de 45 KW funcionando como gerador e uma bomba funcionando como turbina foram utilizados na composição da micro central. O sistema possui uma capacidade nominal de 43 KW.

2.1.4 Considerações

Ao longo das últimas décadas, os trabalhos e as pesquisas envolvendo bombas funcionando como turbinas vêm caminhando a passos modestos. A disseminação desta tecnologia, ainda hoje, esbarra na dificuldade de se dimensionar a bomba mais adequada para cada aproveitamento e nas baixas eficiências tipicamente apresentadas por essas máquinas.

O maior incentivo à utilização de BFTs é a sua atratividade econômica. Isto é consequência da amplitude do mercado de bombas hidráulicas. No entanto, o maior interesse nessa aplicação ainda está concentrado em instituições como a academia e organizações sem fins lucrativos. A consolidação desta tecnologia, de acordo com os fins para os quais sempre foi idealizada, será impossível sem uma cooperação mais intensa entre a academia e os fabricantes de bombas.

É notório que o mercado de BFTs ainda é pequeno para justificar um grande esforço por parte dos fabricantes no sentido de disponibilizar as informações necessárias. Desta forma, mecanismos devem ser encontrados para incentivar essa aproximação e, conseqüentemente, disponibilizar, sejam produtos com informações técnicas mais precisas ou modelos mais eficientes para a seleção e síntese de características das bombas funcionando como turbinas.

2.2 GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA

No conjunto das máquinas elétricas, as duas principais alternativas para geração de energia elétrica são as máquinas síncronas e os geradores de indução. Eventualmente, em aplicações específicas, geradores de corrente contínua podem se apresentar como alternativa interessante.

Cada uma dessas máquinas de corrente alternada tem comportamentos e requisitos de operação diferentes. Essas características serão definidas de acordo com a aplicação do sistema, ou seja, se operam em velocidade constante ou velocidade variável, se o sistema é isolado ou conectado à rede e, no caso de sistemas isolados, se a demanda de carga é constante ou variável.

2.2.1 Máquinas de indução

2.2.1.1 Características gerais

A aplicação do motor de indução como gerador tem se tornado cada vez mais comum nos sistemas de energia renovável de pequeno porte. O consumo de potência reativa e a deficiente regulação de tensão sob certas condições representam os principais inconvenientes da tecnologia, Bansal (2005).

A escala de produção de máquinas de indução faz com que elas apresentem grandes atrativos econômicos. Sua robustez faz com que demande pouca manutenção, além de haver boa disponibilidade de mão-de-obra no mercado.

Existe uma série de configurações de sistemas de geração baseados na máquina de indução. Um fator crítico a ser considerado na aplicação de geradores de indução é que tais máquinas não são capazes de gerar a potência reativa necessária para sua excitação. Desta forma, esses sistemas demandam uma fonte externa de potência reativa. Normalmente, essa fonte é a própria rede elétrica, nos sistemas conectados, e configurações baseadas no emprego de bancos de capacitores, nos sistemas isolados.

Geradores de indução em sistemas isolados

Na aplicação de geradores de indução em sistemas isolados a tecnologia dominante é o gerador de indução com rotor em gaiola excitado através de bancos de capacitores conectados aos seus terminais. Essa configuração é comumente chamada de gerador de indução auto-excitado e consiste na alternativa de menor custo. No entanto, é necessário atenção em algumas características de seu comportamento.

Nestas condições, a potência ativa consumida pela carga influencia consideravelmente a amplitude e a frequência da tensão terminal do gerador. Isto ocorre mesmo que a velocidade do rotor seja mantida constante pela ação de algum tipo de controle de velocidade.

É importante ressaltar que, apesar das quedas de tensão nas resistências e indutâncias de dispersão do estator e do rotor do gerador de indução em operação isolada, a causa principal de sua regulação de tensão insatisfatória é a influência da frequência síncrona na característica de magnetização do gerador e a dependência desta frequência com a potência ativa da carga.

A elevação da potência reativa da carga, bem como a queda de velocidade do rotor com o aumento do conjugado, podem ser fatores adicionais de deterioração da regulação de tensão do gerador. Desta forma, conclui-se que a auto-excitação é pobre em regulação de tensão e frequência.

Como alternativa para solução deste problema, pode-se utilizar um conversor CA-CC-CA entre a carga e a máquina. Assim, pode-se ter a máquina trabalhando em frequência variável e, no caso de aumento excessivo da carga, o conversor poderá suprir o excesso extraindo potência do barramento CC. Dentre as topologias utilizadas, citam-se as compensações paralelo e série-paralelo, Holder (2005).

Esforços consideráveis têm sido empreendidos por longo tempo, como em Lyra (1994) e Neto (1996), com o objetivo de superar a regulação de tensão insatisfatória dos geradores de indução em operação isolada da rede elétrica. As investigações realizadas

neste campo concentram-se em diferentes alternativas de regulação de tensão, baseadas nas seguintes estratégias de compensação de reativos, conforme cita Pomílio (2000):

- Bancos de capacitores compostos série-shunt;
- Retificadores;
- Reatores chaveados por tiristores;
- Chaveamento de bancos discretos de capacitores;

Conexão C-2C

Em sistemas de “micro porte” é bastante vantajoso trabalhar com sistema monofásico ao invés do sistema trifásico. Desta forma, uma prática bastante comum na aplicação de máquinas de indução em sistemas micro geradores isolados é a conversão de um sistema trifásico em monofásico, através da configuração $C - 2C$.

Nesta configuração, a máquina de indução trifásica é conectada em delta. Uma capacitância de valor C é conectada a uma das fases enquanto que numa segunda fase conecta-se um valor $2 \times C$. A carga deve ser conectada em paralelo com a capacitância C . A Figura 6 a seguir mostra este esquema de ligação.

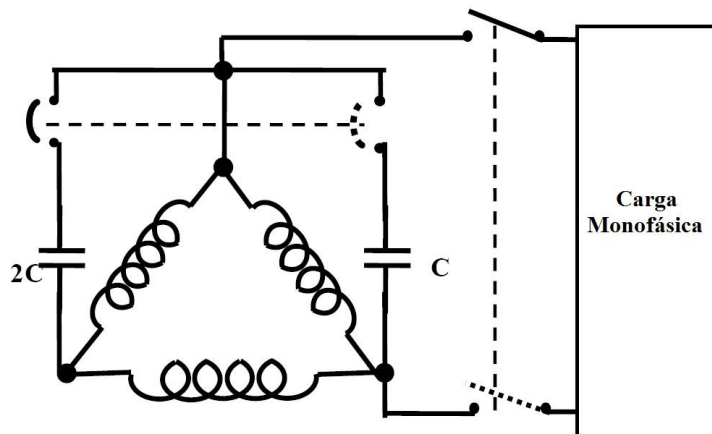


Fig 6. Esquema de ligação $C - 2C$.

Este arranjo contribui para a compensação do desbalanceamento de carga no gerador. No entanto, conforme Smith (2001), a utilização do gerador fica limitada a 80% de sua capacidade nominal como motor.

2.2.1.3 Geradores de indução em sistemas conectados à rede

Sistema de velocidade constante diretamente conectado

Neste tipo de sistema, o gerador de indução com rotor em gaiola é diretamente conectado à rede. Desta forma, a frequência e tensão da rede impõem a velocidade e tensão terminal de operação da máquina. O sistema é projetado tal que o gerador opere em uma faixa de velocidades ligeiramente acima da velocidade síncrona (velocidade supersíncrona). A energia reativa de magnetização do gerador é fornecida pela rede. É comum a utilização de bancos de capacitores em paralelo com o estator da máquina para reduzir o consumo de reativo da rede.

A principal vantagem dessa tecnologia é a simplicidade do sistema, uma vez que dispensa a utilização de eletrônica de potência, além do menor custo inicial de implantação. A Figura 7 mostra o esquema da configuração do sistema.

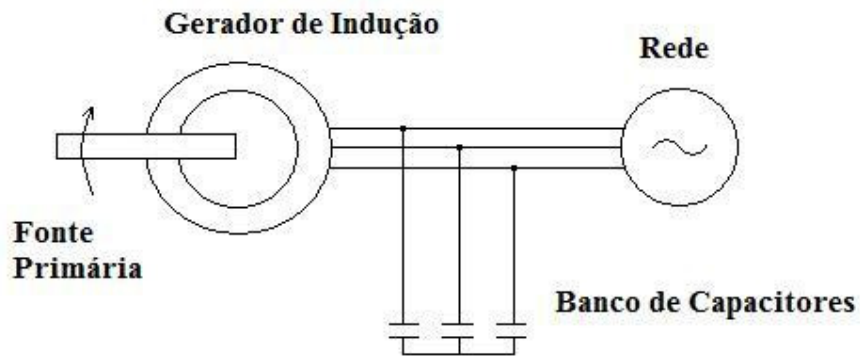


Fig 7. Gerador de indução diretamente conectado.

Nos sistemas eólicos, essa tecnologia vem sendo substituída pelos sistemas de velocidade variável. Isto se justifica pela característica de variabilidade do vento. Neste caso, o sistema de velocidade variável permite um maior aproveitamento da energia disponível aumentando sua relação custo-benefício.

No caso de micro centrais hidroelétricas, é possível que o sistema com gerador de indução com rotor em gaiola diretamente conectado a rede seja bastante interessante e, até mesmo, mais vantajoso do que um sistema a velocidade variável. Neste caso, o

fator determinante será a característica de variabilidade de vazão disponível para o aproveitamento.

Gerador de indução duplamente excitado

O sistema DFIG - Doubly-Fed Induction Generator - é composto por uma máquina de indução com rotor bobinado e dois conversores de potência. A tecnologia tem sido uma das mais utilizadas nos sistemas eólicos e cada vez mais se apresenta como bastante promissora.

Neste sistema, conforme a Figura 8, o estator da máquina é diretamente conectado à rede e o rotor é ligado ao sistema elétrico através de dois conversores de potência ligados por um barramento de corrente contínua. Esta estrutura permite um fluxo bidirecional de potência. O conversor de rotor injeta ou consome potência ativa no rotor controlando, desta forma, a potência ativa gerada e fornecendo a excitação necessária. O sistema permite uma variação de velocidade de aproximadamente $\pm 30\%$ da velocidade síncrona do gerador.

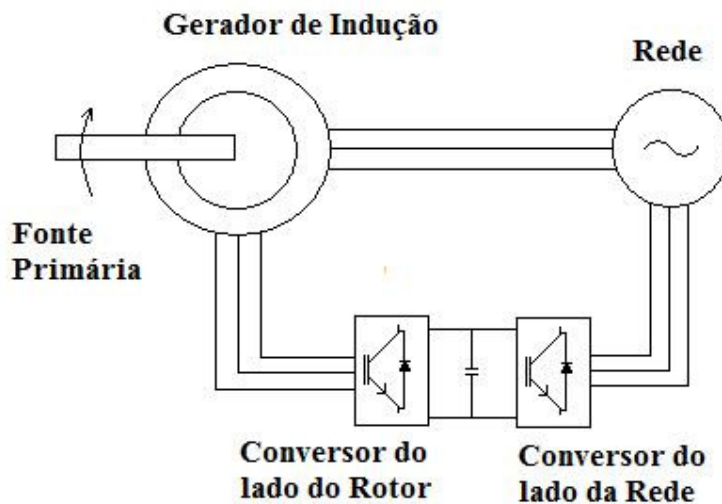


Fig 8. Esquema de configuração do DFIG.

O sistema é empregado na geração em velocidade variável e tem como principal vantagem o fato de que os conversores devem ser projetados apenas para uma fração da potência do gerador, o que diminui além do custo do equipamento, o peso, o volume, as perdas, etc, Mendes (2009).

Sistema com conversor pleno

Outra alternativa para a aplicação de sistemas de geração em velocidade variável é a utilização de geradores de indução com rotor em gaiola conectados à rede através de um conversor de potência, conforme mostra a Figura 9.

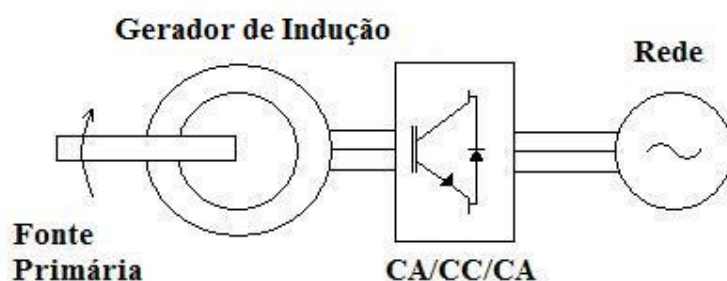


Fig 9. Gerador de indução conectado à rede através de um conversor de energia.

Diferentemente do DFIG, o conversor desta topologia deve ser projetado para a potência nominal do sistema. Este sistema opera em uma faixa de velocidades mais ampla e apresenta menor susceptibilidade a distúrbios do sistema elétrico, como afirma Pinheiro (2004).

2.2.2 Máquinas síncronas

2.2.2.1 Características gerais

Geradores síncronos são amplamente utilizados em sistemas de geração de energia. Em sistemas de grande porte predominam absolutamente. Nos sistemas baseados em fontes de energia renovável, de pequeno porte, apresentam uma série de vantagens técnicas em relação aos geradores de indução. No entanto, os custos são mais elevados.

As principais vantagens dizem respeito à eficiência, principalmente quando operam em condições diferentes das nominais, e às questões de regulação de tensão e frequência. Nessas máquinas, tensão e frequência são estritamente atreladas à velocidade de rotação do rotor.

Ao contrário dos geradores de indução, os geradores síncronos têm a capacidade de fornecer sua própria excitação. Para isso, a magnetização da máquina pode ser fornecida por ímãs dispostos na estrutura do rotor ou pelo próprio circuito de estator, passando por um estágio de retificação. No primeiro caso a máquina é chamada de gerador síncrono a ímã permanente e no segundo, gerador síncrono auto-excitado.

Geradores síncronos a ímã permanente dispensam a necessidade de anéis e escovas de contato, o que lhes confere maior robustez, uma vez que não necessitam de manutenção constante. Isto tornou sua utilização difundida em sistemas de conversão de energia eólica. Normalmente, apresentam maior eficiência em relação aos geradores síncronos auto-excitados. Entretanto, o material magnético para níveis mais elevados de excitação é mais caro, tornando esse tipo de gerador menos competitivo em relação ao gerador auto-excitado, Grauers (1994).

2.2.2.2. Máquinas síncronas em sistemas isolados

Em aplicações isoladas da rede, o gerador síncrono apresenta alto desempenho. A estrutura mais simples para sistemas isolados é composta pela fonte de potência mecânica acoplada ao gerador síncrono a ímã permanente ou auto-excitado. Esses sistemas são utilizados em aplicações onde a carga e a potência mecânica de alimentação do gerador são constantes, e o sistema opera em velocidade constante.

Se a demanda de carga é variável, a velocidade do sistema variará acarretando variações de tensão e frequência. Uma alternativa para contornar este problema é a utilização de um sistema de cargas “auxiliares”, que são inseridas no sistema na medida adequada para recompor o balanço de potência. São comumente chamadas de cargas de “lastro” e consistem de elementos resistivos para dissipação de energia na forma de calor. Vale ressaltar o caráter deslegante e ineficiente dessa solução, uma vez que é desperdiçada uma parcela considerável de energia. Contudo, é uma alternativa de baixo custo.

Este sistema pode ser aprimorado, se essas cargas auxiliares forem associadas a algum processo, de forma a promover um aproveitamento útil dessa energia. No Capítulo 4 é proposto um sistema com essas características.

Outra alternativa é a utilização de um conversor de potência CA-CC-CA para corrigir as variações de tensão e frequência do gerador. Trata-se de uma alternativa mais eficiente, no entanto, apresenta custos mais elevados.

2.2.2.3 *Máquinas síncronas em sistemas conectados*

Assim como nas aplicações isoladas, a operação do gerador síncrono em velocidade constante é a topologia mais simples para ser conectada à rede. Neste caso, o gerador síncrono é diretamente conectado à rede, porém, necessita de um dispositivo de sincronização. A Figura 10 mostra um esquema desse tipo de sistema.

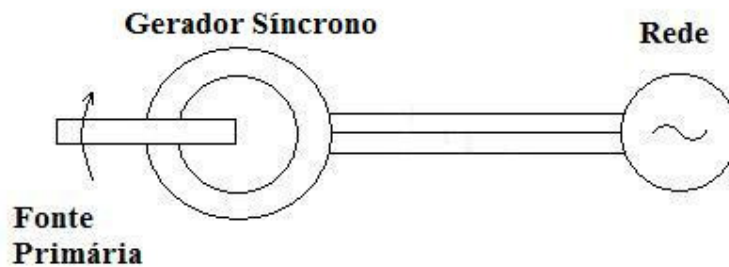


Fig 10. Gerador síncrono diretamente conectado à rede.

Com relação aos sistemas de velocidade variável, a topologia que se destaca é composta pela máquina síncrona conectada à rede através de um conversor CA-CC-CA. O conversor corrige as variações de tensão e frequência decorrentes da variação de velocidade do sistema. Desta forma, deve ser projetado para suportar toda a potência do sistema. A Figura 11 mostra o esquema dessa topologia.

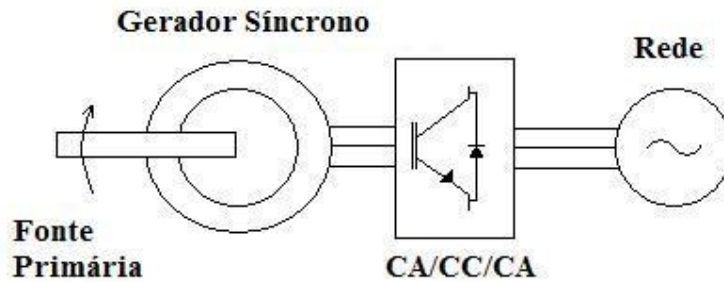


Fig 11. Gerador síncrono conectado à rede através de um conversor de energia.

2.2.2.4 Transmissão continuamente variável

Idealizado por Leonardo da Vinci, há mais de 500 anos atrás, o antigo conceito de transmissão continuamente variável (CVT) tem sido largamente aplicado na concepção de sistemas da indústria automobilística e, mais recentemente, começou a ser utilizado como solução para sistemas eólicos de geração em velocidade variável, Harris (2005).

Diferentemente dos tradicionais sistemas de transmissões automáticas, as transmissões continuamente variáveis não possuem uma caixa com um determinado conjunto de engrenagens. Na realidade, são baseadas em sistemas que permitem uma “infinita” variabilidade entre a maior e a menor das relações de transformação, sem a presença de degraus discretos, Harris (2005).

Atualmente, várias tecnologias estão em algum estágio de desenvolvimento. Normalmente, baseiam-se em sistemas hidro-mecânicos, polias (com correias ou correntes) e sistemas toroidais, que substituem polias e correias por discos e roletes. Cotrell (2009) apresenta maiores detalhes desses sistemas.

A Figura 12 mostra um esquema básico de um sistema com CVT. O sistema gira em velocidade variável no lado da fonte de energia e em velocidade aproximadamente constante do lado do gerador. Isto resulta em um ganho de eficiência do gerador.

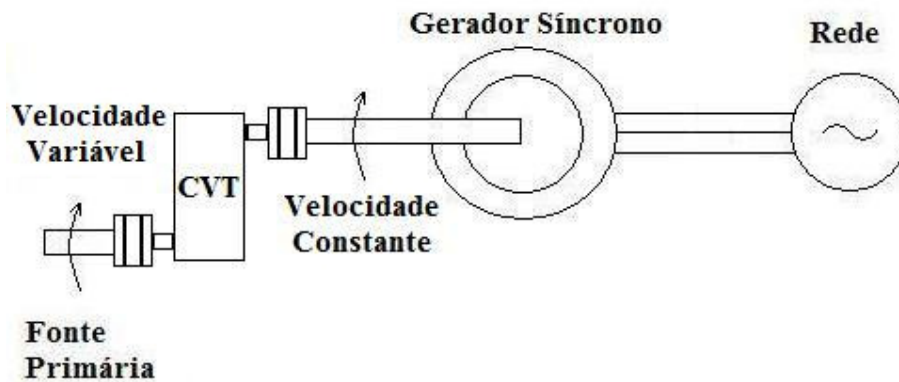


Fig 12. Sistema de geração com transmissão continuamente variável.

A multinacional de origem alemã Voith Turbo está em fase bastante adiantada de avaliação do protótipo de um sistema de geração de energia eólica que utiliza uma transmissão continuamente variável. A potência do sistema é de 2 MW, utiliza um gerador síncrono e o sistema de transmissão é hidro-mecânico.

Trata-se de uma alternativa promissora, já que o custo de um conversor de potência é alto comparado ao CVT. Além disso, pode apresentar eficiências acima de 95%. Martens (2003) e Voith Turbo (2009).

A tecnologia CVT pode ser vantajosa quando aplicada em micro centrais hidroelétricas. Nesses sistemas, o perfil de variação de vazão é mais uniforme e não existem rajadas ou variações bruscas, como no caso dos ventos.

2.2.3 Considerações

Existe um leque de topologias para geração de energia elétrica em pequeno porte. Cada uma delas com vantagens ou desvantagens de acordo com a aplicação. Em aplicações rurais isoladas questões econômicas são preponderantes, porém, deve-se atentar para requisitos técnicos mínimos para se garantir o sucesso do projeto.

Em aplicações conectadas, o contexto é propício para que as questões econômicas sejam mais facilmente superadas, abrindo espaço para sistemas um pouco mais complexos, mas que também sejam mais eficientes e apresentem melhores desempenhos, fazendo com que estes sistemas atinjam os requisitos de conexão com a rede e desempenhem papéis como a prestação de serviços ancilares, regulação de tensão e redução de perdas, no sistema interligado.

2.3 SISTEMAS CONECTADOS À REDE

2.3.1 *O velho conceito novo*

A conexão de sistemas de geração de pequeno porte à rede elétrica remete inevitavelmente ao contexto da Geração Distribuída. Deve basear-se na busca de um objetivo global voltado ao melhor desempenho conjunto, à eficiência energética e às inserções ambientais e sociais mais adequadas, Reis (2003).

O assunto é bastante atual, porém não se trata de um conceito novo. Na realidade, vem tomando uma forma própria e ganhando expressão nos últimos anos. Isto se deve às recentes mudanças na estrutura do setor elétrico, às pressões da opinião pública sobre os impactos negativos relacionados aos sistemas tradicionais de geração de energia elétrica, à crescente demanda por energia elétrica e aos avanços em diversas tecnologias de geração de energia elétrica renovável, entre outros.

Existem várias definições para o termo Geração Distribuída. Algumas delas inclusive abrangem os sistemas isolados, focando na idéia da descentralização da geração. Na literatura técnica, o termo normalmente está associado aos sistemas de geração de pequeno porte, a partir de fontes renováveis, conectados à rede de distribuição.

No Brasil, a geração distribuída tornou-se tema registrado na legislação com o Decreto n.º 5.163/2004, da seguinte forma:

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8.º da Lei n.º 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I – hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II – termelétrico, inclusive de co-geração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso I do caput. Brasil (2004b).

2.3.2 Os anseios da geração distribuída

Muito se tem falado sobre os impactos da geração distribuída. No entanto, ainda não há um consenso sobre a dimensão exata dos possíveis impactos causados por estes novos sistemas em aspectos como a regulação de tensão e frequência, níveis de curto circuito, qualidade de energia, despacho de geração, coordenação de proteções, entre outros. Conceição (2003).

A análise envolve um grande número de variáveis, como o ponto de conexão do sistema, a tecnologia de geração empregada e o grau de penetração da geração distribuída no sistema elétrico.

Há uma grande expectativa de benefícios técnicos, tais como a redução de perdas na transmissão, o adiamento de investimentos em subestações e capacidade de transmissão, redução do carregamento das redes e aumento da flexibilidade de operação. Além disso, outros benefícios são esperados, como o incentivo à utilização de fontes renováveis, diversificação da matriz energética, menores impactos ambientais e o aumento da competição, seja do ponto de vista mercadológico ou tecnológico, o que pode desencadear a ampliação do leque de tecnologias disponíveis e a redução dos custos associados às tarifas.

2.3.3 Os desafios da geração distribuída.

Geralmente, a Geração Distribuída não consegue competir em igualdade de condições com sistemas elétricos convencionais, de geração centralizada, que operem eficientemente. Mas, em um número significativo de nichos de mercado, a Geração Distribuída oferece confiabilidade e economia que não poderiam ser alcançadas pelos sistemas elétricos tradicionais. Wilis e Scot (2000, citado por Severino (2008), p. 25).

Há ainda a dificuldade de mudança de paradigma, uma vez que o sistema centralizado constitui uma filosofia consolidada. Somam-se a isso outras barreiras de

natureza não tecnológica, uma vez que, muitas vezes, as soluções tecnológicas são definidas mais por motivações políticas e/ou econômicas que por mérito técnico.

Como destacado por Severino (2008), a Geração Distribuída tem sido mal representada por entusiasmados defensores, que simplificam demasiadamente o seu uso e exageram demais na defesa de suas capacidades, e por implacáveis oponentes, que subvalorizam injustamente os seus benefícios e sobrevalorizam muito seus aspectos negativos.

2.4 SISTEMAS ISOLADOS

2.4.1 O cenário

Segundo dados do IBGE, do ano 2000⁵, cerca de 97% da energia elétrica produzida no país têm ocorrido no SIN – Sistema Interligado Nacional. A taxa média de eletrificação do Brasil está em torno de 93%. No caso da zona rural, essa taxa é de 70,6%, contra 97,4% na zona urbana.

A taxa média e a taxa da zona urbana são consideradas boas comparadas aos padrões mundiais. Porém, a realidade é que em 2000, haviam mais de três milhões de lares sem energia elétrica, totalizando cerca de 13,6 milhões de “excluídos elétricos”.

O esforço para o atendimento da população “eletricamente excluída” tem se fortalecido principalmente a partir de 2002, quando o governo brasileiro editou um programa para promover a universalização do serviço de energia elétrica em todo o território nacional até 2015. Em decorrência disso, o governo instituiu em 2003, o programa Luz para Todos, no sentido de antecipar até 2008 o atendimento à população rural brasileira.

De acordo com as pretensões do programa, o atendimento deveria ser realizado através de fontes renováveis e locais. No entanto, verifica-se que se tem preferido o atendimento através da expansão do Sistema Interligado Nacional.

2.4.2 As particularidades da aplicação

Em regiões rurais ou comunidades isoladas, onde há a presença de comunidades dispersas umas das outras, o abastecimento energético através da rede convencional de energia elétrica apresenta certas restrições. Tais obstáculos se devem tanto a aspectos econômicos e geográficos como também devido às mesmas, em alguns casos, se localizarem em áreas de preservação ambiental. Diante disso, os sistemas isolados se apresentam como principal alternativa para o abastecimento energético dessas regiões.

⁵ O conjunto de indicadores sociais mínimos utilizados é disponibilizado pelo IBGE, datado de 2000 e utilizou como base a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios de 1999, (IBGE, 2000).

Na maioria dos casos, por não apresentarem grandes atratividades econômicas essas aplicações se possibilitam apenas através de políticas públicas na forma de programas energéticos governamentais ou não. Ou seja, a difusão das tecnologias associadas não segue uma tendência padrão natural de mercado e acaba por ser forçada por essas políticas públicas. Assim, se torna difícil classificar os usuários como consumidores e conferir-lhes seus direitos e deveres como tal, (Alves 2006).

Um impacto direto dessa lógica é a falta de sustentabilidade frequentemente verificada nos sistemas de energia implementados através dos programas governamentais. Além deste impacto, a falta de sustentabilidade desses sistemas é consequência também da maneira de condução do projeto e dos desdobramentos culturais diante da inserção das tecnologias.

Serpa (2001) afirma que nas primeiras avaliações dos projetos existentes imperam os impactos positivos da inovação, pois esse é o momento da plenitude da novidade, que dura até as primeiras falhas do sistema. A partir daí, inicia o processo de abandono e o descrédito dos usuários para com a tecnologia.

2.4.3 Considerações

A eletrificação rural em comunidades isoladas é uma questão essencialmente social, economicamente não rentável, não fundamentada em esquemas de produção e distribuição de produtos agropecuários de larga escala. Sendo uma necessidade não internalizada na cultura do cotidiano das famílias, a energia serve como referência de conforto e progresso nem sempre ao alcance de todos. Vista como um bem raro e caro até duas décadas atrás, hoje surge como um desejo coletivo de integração na sociedade nacional, Serpa (2001).

Levar a energia às áreas isoladas e rurais surge como um desafio, uma conquista de cidadania, dentro de uma sociedade com desigualdades sociais e econômicas. Esse princípio deve nortear hoje os programas oficiais de eletrificação de comunidades isoladas no Brasil.

3. AS PERDAS NA MÁQUINA SÍNCRONA

A máquina em estudo é um gerador síncrono trifásico, de pólos salientes, auto excitado e auto regulado por compensação através de enrolamento de excitação, transformador de corrente e ponte retificadora. Os dados de placa são apresentados na Tabela II.

TABELA II: Dados de placa do gerador.

Potência Nominal	3 KVA
Tensão	220/127 V
Corrente	7,8/13,6 A
fp	0,8 ind
Nº de Pólos	04
Frequência Nominal	60 Hz

As perdas na máquina síncrona foram identificadas com base nos ensaios característicos realizados para diferentes velocidades, de acordo com a metodologia disponível no padrão IEEE (1983).

Nestes ensaios, utilizou-se uma montagem na qual a máquina síncrona foi acionada por um motor de indução, previamente ensaiado e alimentado por um inversor de frequência, como mostrado pela Figura 13.

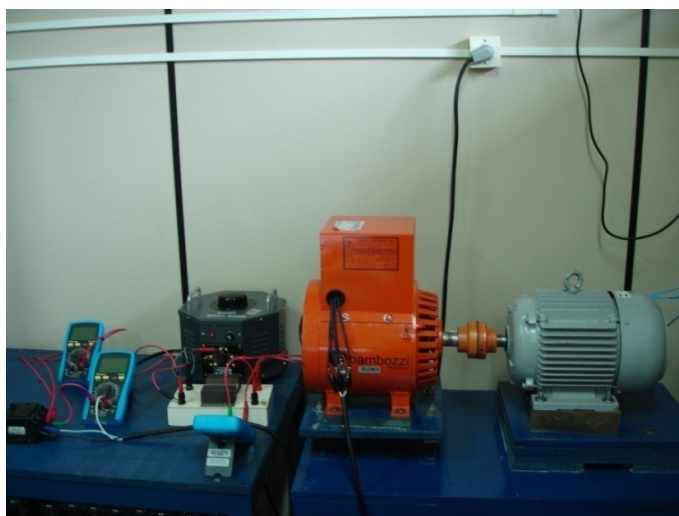


Fig. 13. Montagem utilizada para realização dos ensaios característicos da máquina síncrona.

A partir desta montagem foram obtidas as curvas de saturação em vazio, saturação em curto-circuito, saturação sob fator de potência indutivo nulo, a reatância X_q e as constantes de tempo da máquina. Uma descrição detalhada destes ensaios e da metodologia de cálculo das perdas é apresentada no Anexo A.

3.1 EFICIÊNCIA DO GERADOR

A eficiência do gerador é a razão entre a sua potência de saída e a potência de entrada. Estas variáveis podem ser medidas diretamente, principalmente em máquinas pequenas. Outro método para o cálculo da eficiência de máquinas, convencionalmente utilizado, baseia-se na segregação das perdas. Este método foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho, pois permite o levantamento de uma maior quantidade e diversidade de informações da máquina.

As perdas totais em uma máquina síncrona podem ser divididas da seguinte forma:

- Perdas a vazio:
 - Perdas Mecânicas (p_M);
 - Perdas Magnéticas (p_F);
- Perdas em curto-circuito:
 - Perdas no Cobre (p_C);
 - Perdas Suplementares (p_S);

O rendimento do gerador é dado por:

$$\eta_G = \frac{P_{G_saida}}{P_{G_saida} + P_{G_perdas}}; \quad (1)$$

Onde,

$\eta_G =$ Rendimento do gerador;

$P_{G_saida} =$ Potência de saída do gerador;

$P_{G_perdas} = p_M + p_F + p_C + p_S =$ Perdas totais do gerador;

A partir da modelagem das parcelas de perdas da máquina, as perdas totais podem ser calculadas, para qualquer condição de operação, com base nas informações de velocidade, tensão terminal e corrente de carga.

3.1.1. Perdas mecânicas

As perdas mecânicas são aquelas ocasionadas por atrito nos contatos deslizantes e por ventilação. A Figura 14 apresenta as perdas mecânicas em função da velocidade de rotação do eixo da máquina.

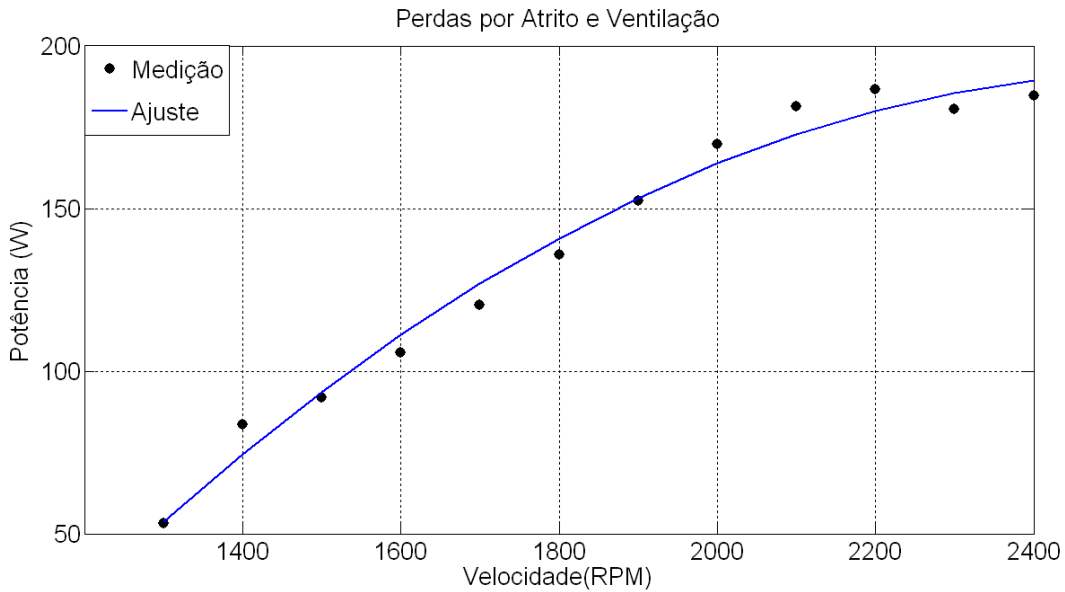


Fig. 14. Perdas mecânicas causadas por atrito e ventilação, em função da velocidade.

A curva em linha contínua da Figura 14 representa o ajuste do polinômio de segundo grau correspondente aos pontos medidos.

3.1.2. Perdas magnéticas

As perdas magnéticas, comumente chamadas de perdas no ferro, são subdivididas em duas parcelas, as perdas por histerese e por correntes parasitas Foucault.

As perdas por histerese decorrem da propriedade dos materiais ferromagnéticos de apresentarem um “atraso” entre a variação da densidade de fluxo e o campo

magnético. São diretamente proporcionais à frequência da tensão do estator, conforme a Equação 2.

As perdas por correntes parasitas são ocasionadas pela circulação de correntes induzidas no material magnético da máquina e variam proporcionalmente ao quadrado da frequência da tensão do estator, conforme a Equação 3.

Perdas por histerese:

$$p_h = K_h V f B_m^x \quad (2)$$

Perdas por correntes parasitas (Foucault):

$$p_f = K_f V (f B_m e)^2 \quad (3)$$

Onde:

K_h, K_f = Coeficientes que dependem das propriedades dos materiais;

V = Volume total de núcleos ou peças de material ferromagnético;

f = Frequência das variações das induções magnéticas;

B_m = Valor máximo das induções magnéticas variáveis;

x = Expoente que depende das propriedades dos materiais e do próprio valor de B_m .

Normalmente, varia entre 1,5 e 2,5. Para materiais ferromagnéticos de uso corrente, submetidos a induções máximas compreendidas entre 0,15 e 1,2 T recomenda-se

$x = 1,6$, Jordão (1980);

e = Espessura das chapas laminadas.

Em certos casos, admite-se x da ordem de 2. Nessas condições, as perdas no ferro podem ser traduzidas, aproximadamente por:

$$p_F = p_f + p_h = V(K_f f e^2 + K_h) f B_m^2 \quad (4)$$

Essas expressões são úteis para análise do comportamento das perdas no ferro das máquinas, entretanto o cálculo numérico dessas perdas tem aplicação restrita, Jordão (1980)

A Figura 15 apresenta o resultado encontrado para as perdas magnéticas em função da velocidade e da tensão nos terminais da máquina. Os dados da figura foram calculados de acordo com a metodologia do Anexo A.

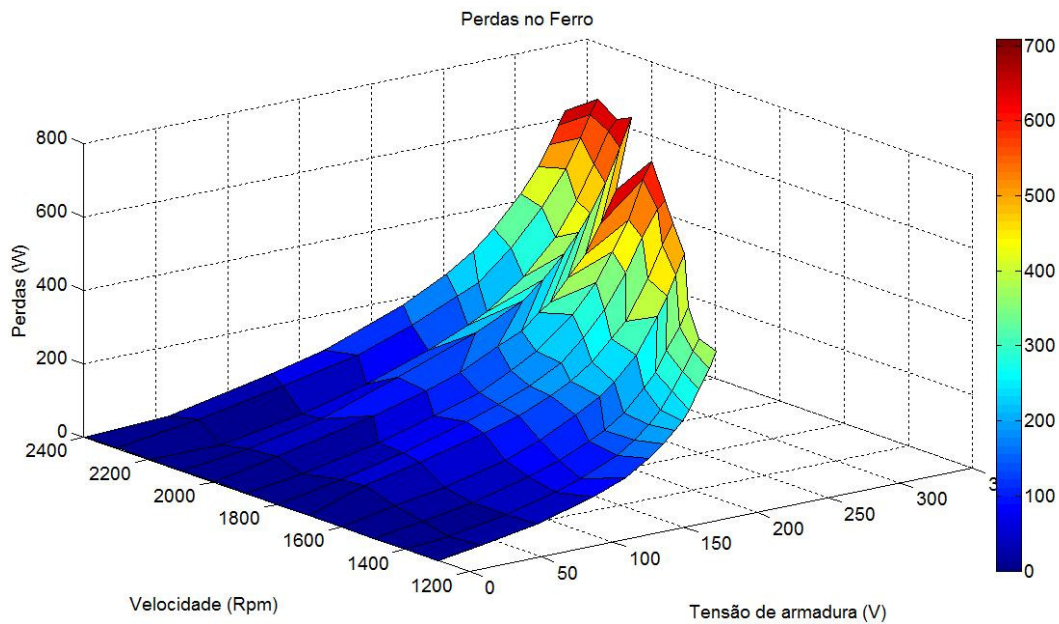


Fig. 15. Perdas no ferro em função da velocidade e da tensão de estator.

Considerando-se B_m uniforme ao longo da seção transversal do núcleo, admite-se a seguinte relação:

$$B_m = \frac{C_m E}{f}, \quad (5)$$

Onde:

C_m = Constante da máquina;

E = Tensão rms do entreferro;

f = Frequência da tensão;

Desta forma, as perdas magnéticas totais são dadas da seguinte forma:

$$p_F = K_1 E^2 + K_2 \frac{E^2}{f}; \quad (6)$$

Onde,

$$K_1 = VK_f e^2 C_m^2; \quad (7)$$

e,

$$K_2 = VK_h C_m^2; \quad (8)$$

A Equação 6 mostra a relação entre as perdas magnéticas totais, a tensão do entreferro e a frequência. A partir das Figuras 16 e 17 a seguir, é possível visualizar isoladamente o efeito da frequência e da tensão nas perdas magnéticas totais.

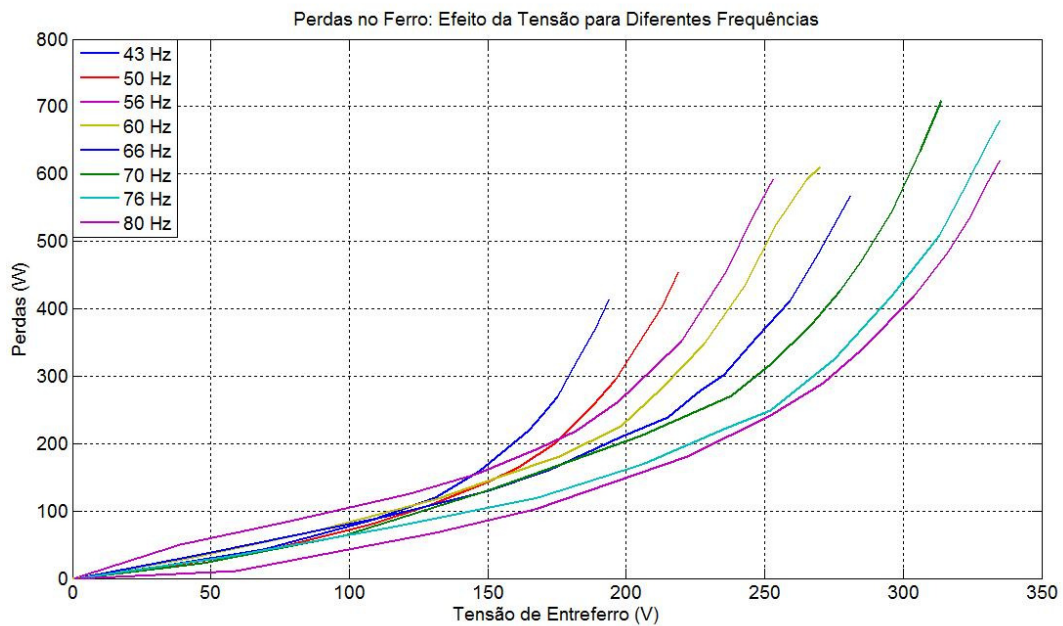


Fig. 16. Perdas no ferro em função da tensão de estator.

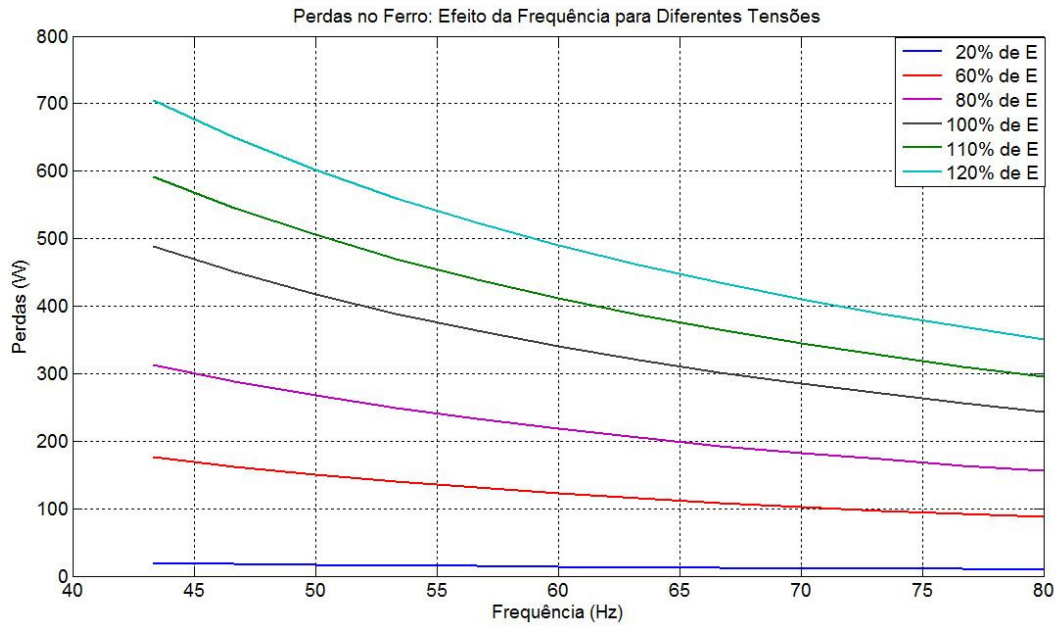


Fig. 17. Perdas no ferro em função da velocidade.

Para uma determinada velocidade constante, as perdas magnéticas totais aumentam exponencialmente com a tensão. Para uma determinada tensão, as perdas magnéticas totais diminuem com o aumento da frequência.

Para a máquina em estudo, as constantes K_1 e K_2 são respectivamente $-0,001$ e $0,4791$. A Equação 6 é, então, escrita da seguinte forma:

$$p_F = -0,001E^2 + 0,4791 \frac{E^2}{f}; \quad (9)$$

3.1.3. Perdas no cobre

As perdas no cobre decorrem da passagem de corrente pelos condutores da máquina. Também conhecidas por perdas Joule, são proporcionais ao quadrado das correntes dos enrolamentos da máquina.

Neste estudo, a excitação da máquina foi fornecida por uma fonte externa, logo, as perdas Joule devido à corrente de excitação não foram consideradas no cálculo de sua eficiência. A Figura 18 apresenta as perdas no cobre em função da corrente de carga.

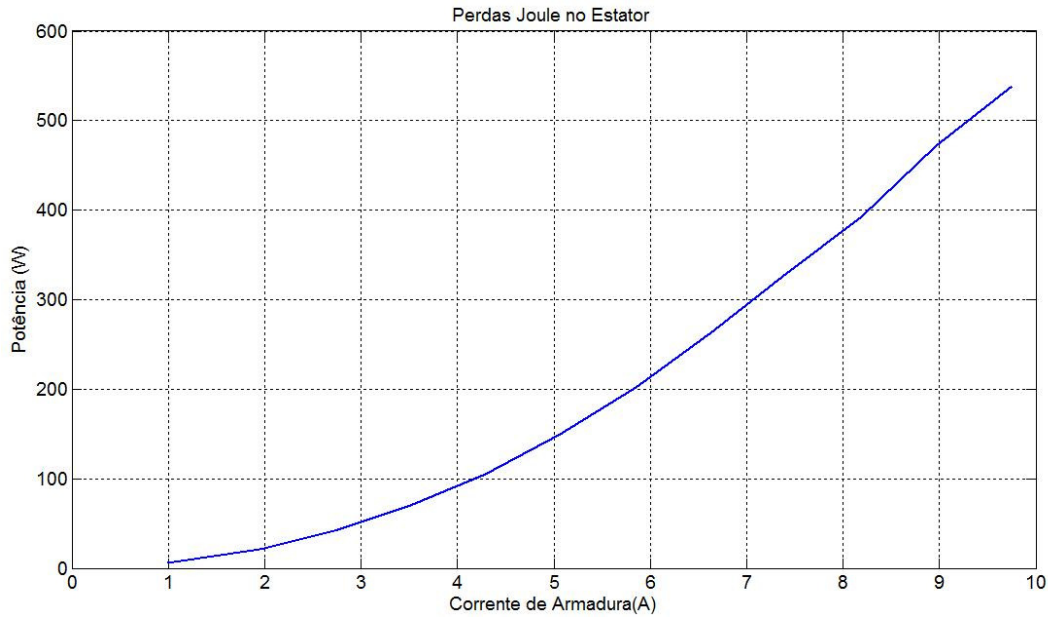


Fig 18. Perdas no cobre em função da corrente de armadura.

3.1.4. Perdas suplementares

O método de identificação das perdas no cobre não leva em consideração determinados aspectos como o efeito pelicular, presente nos condutores, e correntes parasitas que, assim como no material magnético, estão também presentes no cobre. Dessa forma, as perdas reais são superiores àquelas definidas convencionalmente como perdas no cobre. Algo semelhante ocorre também para as parcelas de perdas no ferro e perdas mecânicas.

A parcela de perdas não computada é incorporada no que se define como perdas suplementares. A Figura 19 apresenta as perdas suplementares em função da velocidade e da corrente de carga do gerador.

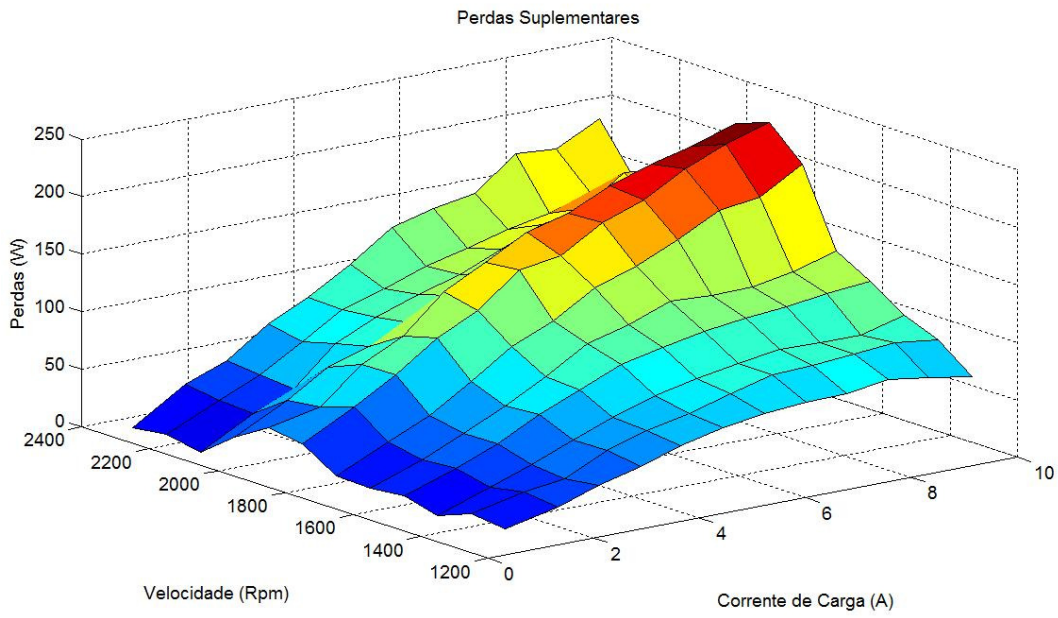


Fig 19. Perdas suplementares em função da velocidade e da corrente de armadura.

Para uma determinada velocidade constante, as perdas suplementares aumentam com o aumento da corrente, como pode ser observado pela Figura 20. Para uma determinada corrente, a curva de perdas suplementares apresenta um pico em uma faixa de velocidades logo acima da velocidade nominal, como mostra a Figura 21.

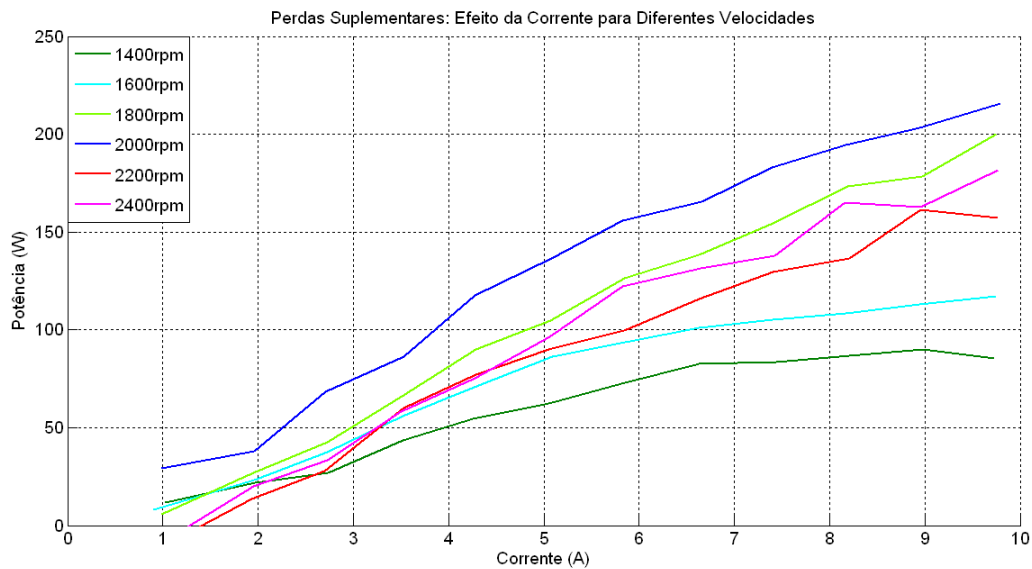


Fig 20. Efeito da corrente de carga nas perdas suplementares para diferentes velocidades.

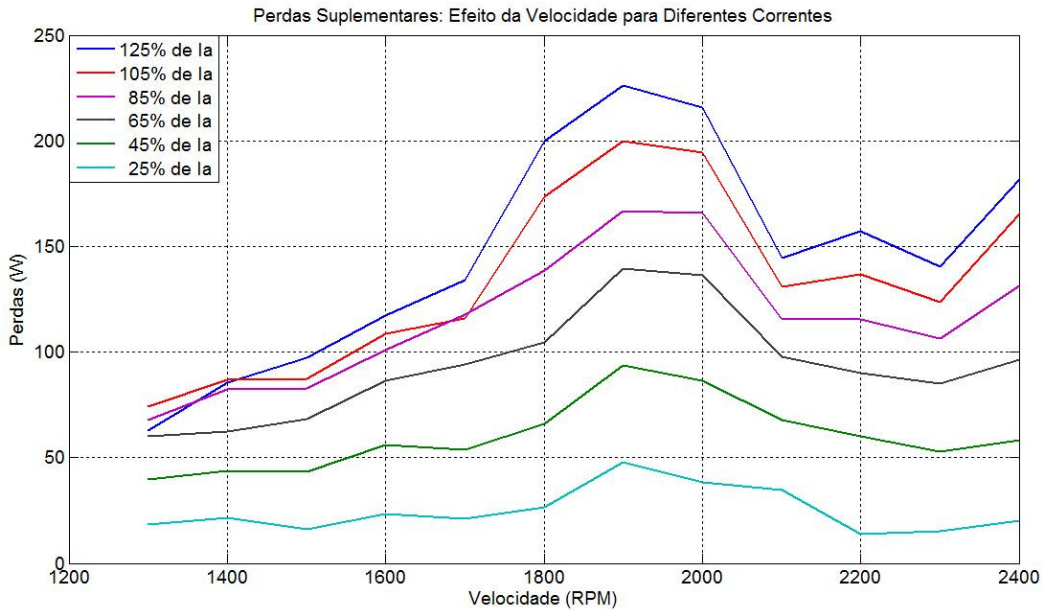


Fig 21. Efeito da velocidade nas perdas suplementares para diferentes níveis de corrente de carga.

A partir dos resultados descritos é possível identificar as perdas totais no gerador para qualquer condição de operação, conforme descrito na relação abaixo.

$$P_{G_perdas} = p_M[f(\omega)] + p_F[f(f, E)] + p_C[f(Ia)] + p_S[f(Ia, \omega)]; \quad (10)$$

As perdas totais são o resultado do somatório das perdas mecânicas, que é função da velocidade; das perdas no ferro, função da frequência e da tensão de entreferro; das perdas no cobre, que dependem da corrente de carga (Ia); e das perdas suplementares, que dependem, sobretudo, da corrente de carga e da velocidade.

4. CARACTERIZAÇÃO DA BFT EM VELOCIDADE VARIÁVEL

4.1 A BOMBA EM ESTUDO

A Figura 22, a seguir, apresenta a bomba em estudo. Trata-se de uma bomba centrífuga fabricada pela EH Bombas, de modelo *EHF 50.16S*, com diâmetro de rotor de 165 mm . A pressão, vazão e velocidade nominais como bomba é de 11 mca , $30\text{ m}^3/\text{h}$ e 1750 rpm , respectivamente.



Fig 22. A bomba em estudo.

A Figura 23 apresenta as informações de catálogo da bomba *EHF 50.16S*. No caso da bomba utilizada, sua curva característica está localizada entre as curvas para os rotores de 150 mm e 170 mm . Nas condições nominais, apresenta rendimento próximo de 68%.

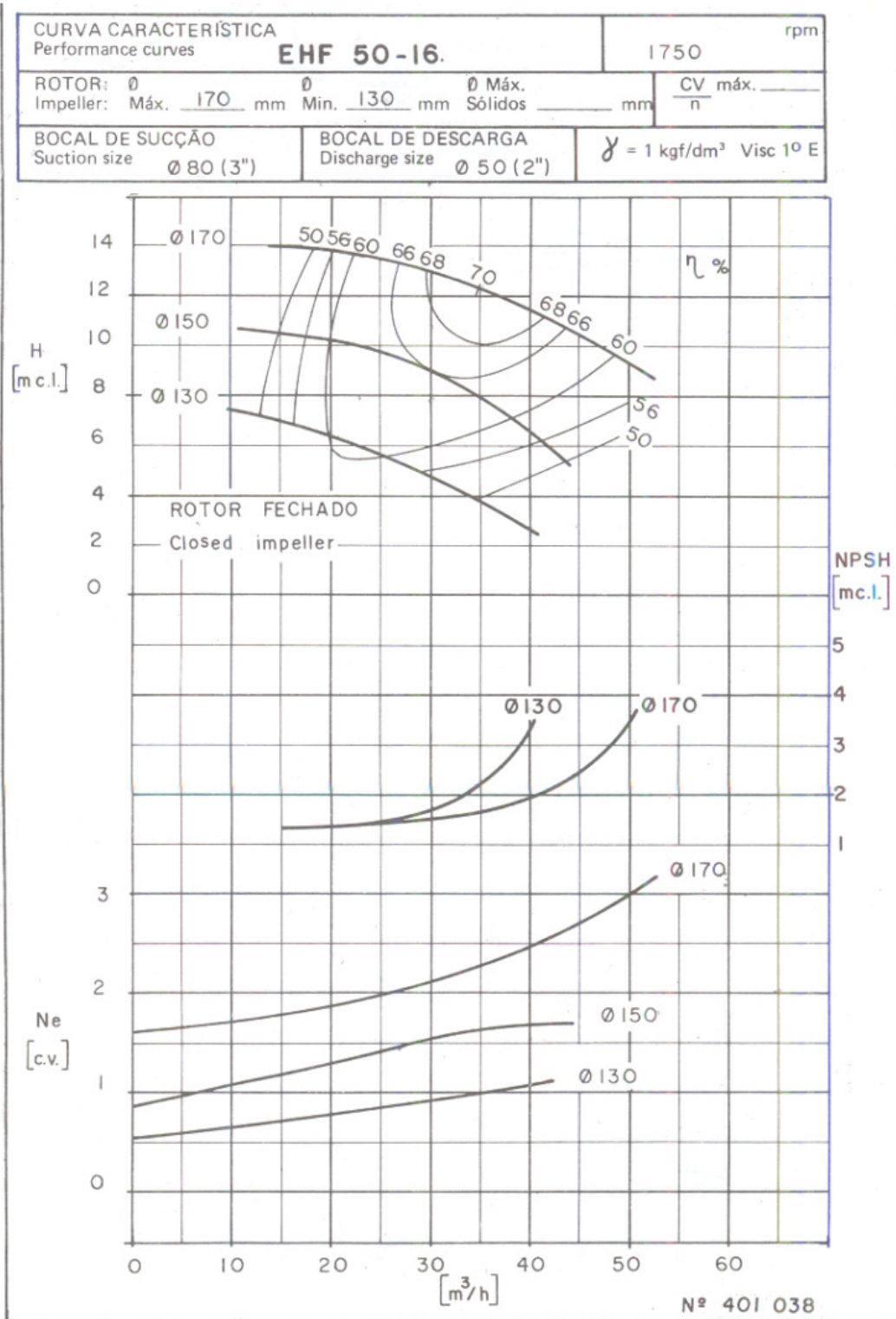


Fig 23. Características da bomba.

4.2. O DIMENSIONAMENTO DA BFT

Para o dimensionamento da BFT foi utilizado o método de Sharma (1985) e os fatores de correção de velocidade de Williams (1992), apresentados na Tabela 1. De acordo com a metodologia de Sharma (1985), a vazão, pressão e rendimento no ponto de máxima eficiência são dados por:

$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{\eta_{m\acute{a}x}^{0,8}}; \quad (10)$$

$$H_t = \frac{H_{bep}}{\eta_{m\acute{a}x}^{1,2}}; \quad (11)$$

$$\eta_t = \eta_{m\acute{a}x}; \quad (12)$$

Onde,

Q_{bep} = vazão da bomba no ponto de máxima eficiência;

H_{bep} = pressão da bomba no ponto de máxima eficiência;

$\eta_{m\acute{a}x}$ = máximo rendimento como bomba;

Q_t = vazão em modo turbina no ponto de máxima eficiência;

H_t = pressão em modo turbina no ponto de máxima eficiência;

η_t = máximo rendimento como turbina;

De acordo com as curvas da Figura 23, percebe-se que no ponto de máximo rendimento da bomba a vazão Q_{bep} é de aproximadamente $35 \text{ m}^3/\text{h}$, a pressão H_{bep} é de aproximadamente 11 mca e o rendimento máximo é de aproximadamente 68% . Aplicando-se esses valores nas equações 10, 11 e 12 acima, encontram-se os valores de vazão e pressão em modo turbina e o ponto de máxima eficiência, $47,65 \text{ m}^3/\text{h}$ ou $13,24 \text{ l/s}$, $17,47 \text{ mca}$ e 68% , respectivamente, para a velocidade de 1750 rpm .

$$Q_t = \frac{35}{0,68^{0,8}} = 47,65 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 13,24 \text{ l/s};$$

$$H_t = \frac{11}{0,68^{1,2}} = 17,47 \text{ mca};$$

$$\eta_t = 68\%;$$

Aplicando-se os fatores de correção de velocidade de Williams (1992), encontram-se os parâmetros da BFT operando na velocidade de 1800 rpm.

$$Q_t = 13,62 \text{ l/s};$$

$$H_t = 18,48 \text{ mca};$$

$$\eta_t = 68\%;$$

4.3. CARACTERÍSTICAS EM MODO TURBINA

Os ensaios realizados para obtenção dos resultados apresentados a seguir são descritos detalhadamente no Anexo B.

4.3.1. Ponto de máxima eficiência

A Figura 24, a seguir, apresenta a curva de rendimento \times vazão para 1800 rpm. Como pode ser observado, a vazão Q_t encontrada experimentalmente é de aproximadamente 14 l/s. O rendimento máximo η_t , em 1800 rpm, é de 60,41%.

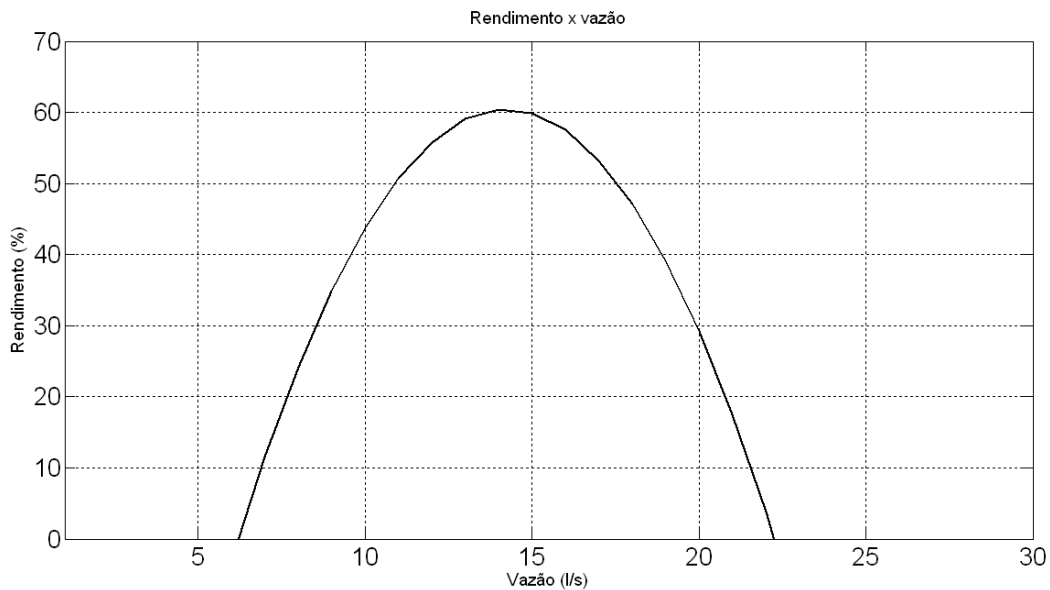


Fig 24. Característica de rendimento \times vazão em modo turbina.

4.3.2. Ponto de máxima potência

A Figura 25, a seguir, apresenta a curva de potência \times vazão para 1800 rpm. Como pode ser observado, o ponto de máxima potência ocorre em uma vazão diferente da vazão Q_t . Neste caso, a vazão de máxima potência é de aproximadamente 16 l/s. A

BFT trabalha com rendimento de aproximadamente 57,5% e a potência máxima, neste caso, é de 1625 W, avaliado para um $H = 18 \text{ mca}$.

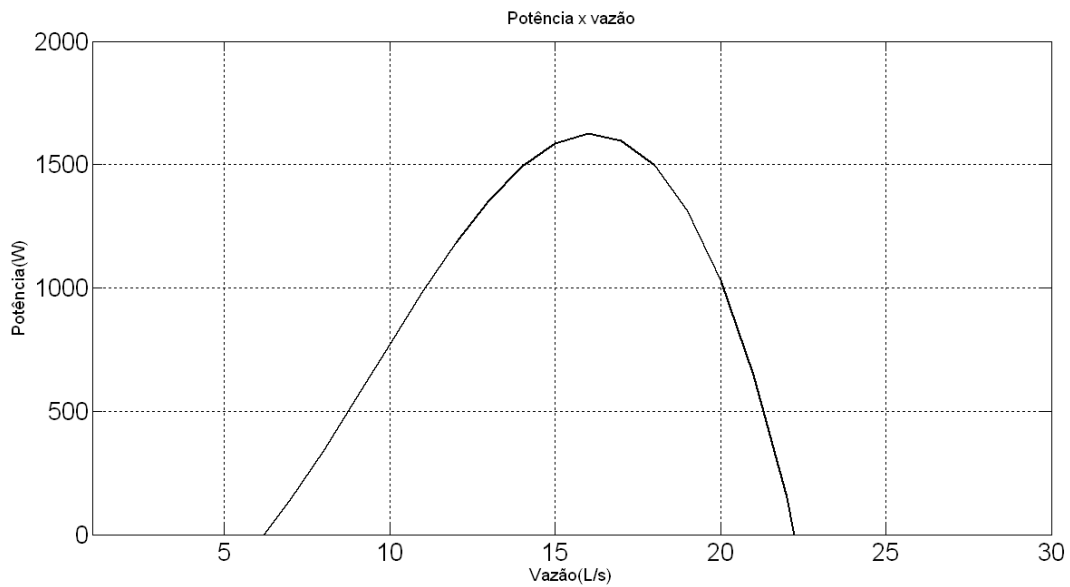


Fig 25. Característica de potência \times vazão em modo turbina.

4.3.3. Característica $H \times Q$

A Figura 26, a seguir, apresenta a curva característica $H \times Q$, levantada para 1800 rpm. Essa curva mostra o ponto (H, Q) exato de funcionamento da BFT, para esta velocidade.

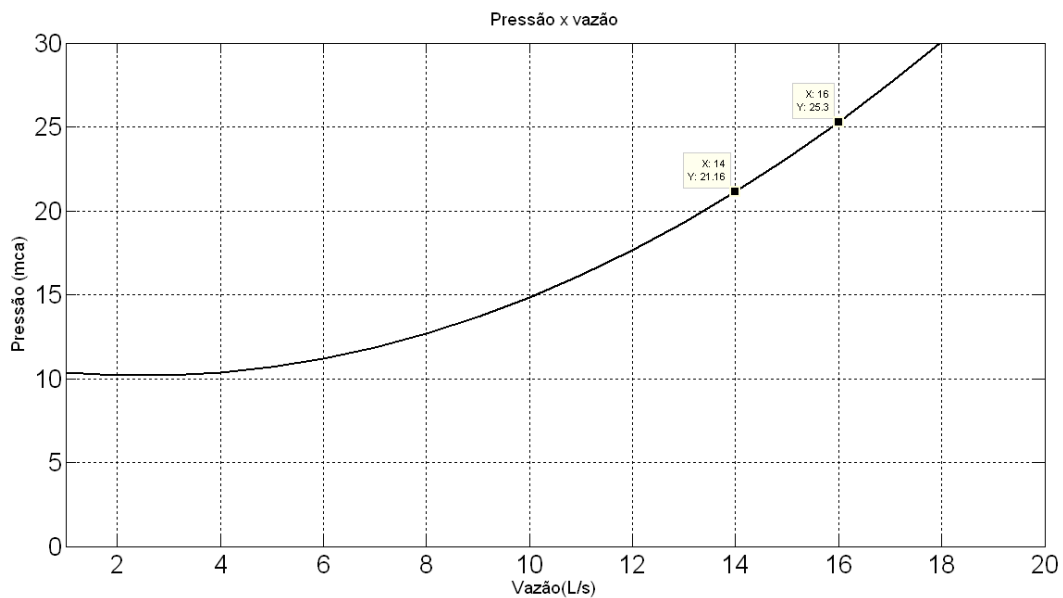


Fig 26. Característica de pressão \times vazão em modo turbina.

Observa-se na curva da Figura 26 que, na vazão de máxima eficiência, $Q_t = 14 \text{ l/s}$, a pressão de trabalho (H_t) é de $21,16 \text{ mca}$. O par H_t e Q_t caracterizam o ponto de máxima eficiência da bomba operando como turbina.

Com relação ao ponto de máxima potência, a pressão de trabalho é de aproximadamente $25,3 \text{ mca}$. Este valor de pressão, juntamente com a vazão $Q = 16 \text{ l/s}$, caracterizam o ponto de máxima potência para a referida velocidade.

4.3.4. Análise dos resultados

A metodologia de dimensionamento da BFT parte do pressuposto de que os rendimentos máximos como bomba e como turbina são iguais, ou seja, $\eta_{m\acute{a}x} = \eta_t$. O rendimento máximo como bomba, de acordo com as informações do fabricante, vide Figura 23, é de aproximadamente 68%. Este é, portanto, o rendimento teórico esperado da BFT em estudo operando em 1750 rpm . Os resultados mostraram que o rendimento η_t , para 1750 rpm é de $60,93\%$ ⁶, o que significa um erro de $10,4\%$ para menos, com relação ao valor esperado.

O ponto de máxima eficiência ocorre para uma vazão de 14 l/s , o que está relativamente próximo do valor esperado de $13,62 \text{ l/s}$. Neste caso, o erro entre o valor esperado e o valor medido é de $2,7\%$.

A pressão no ponto de máxima eficiência é de $21,16 \text{ mca}$. Este resultado significa um erro de $14,5\%$, com relação ao valor teórico esperado, que é $18,48 \text{ mca}$.

Estes resultados apenas confirmam o que já foi exposto no Capítulo 2. A metodologia ainda apresenta certa deficiência na síntese das características operacionais da BFT, não podendo ser diretamente utilizada na caracterização da máquina. No entanto, vale considerá-la como referência para o processo de dimensionamento.

⁶ Este valor foi obtido através da interpolação dos valores das eficiências medidas para as velocidades de 1700 rpm e 1800 rpm .

4.4. A BFT EM VELOCIDADE VARIÁVEL

Neste item é feito a identificação das características de rendimento e potência de saída da BFT, quando operada em velocidade variável.

4.4.1. Rendimento \times vazão

Inicialmente, as curvas de rendimento \times vazão foram obtidas experimentalmente a partir do ensaio em velocidade constante, descrito no Anexo B. A Figura 27 apresenta os resultados encontrados.

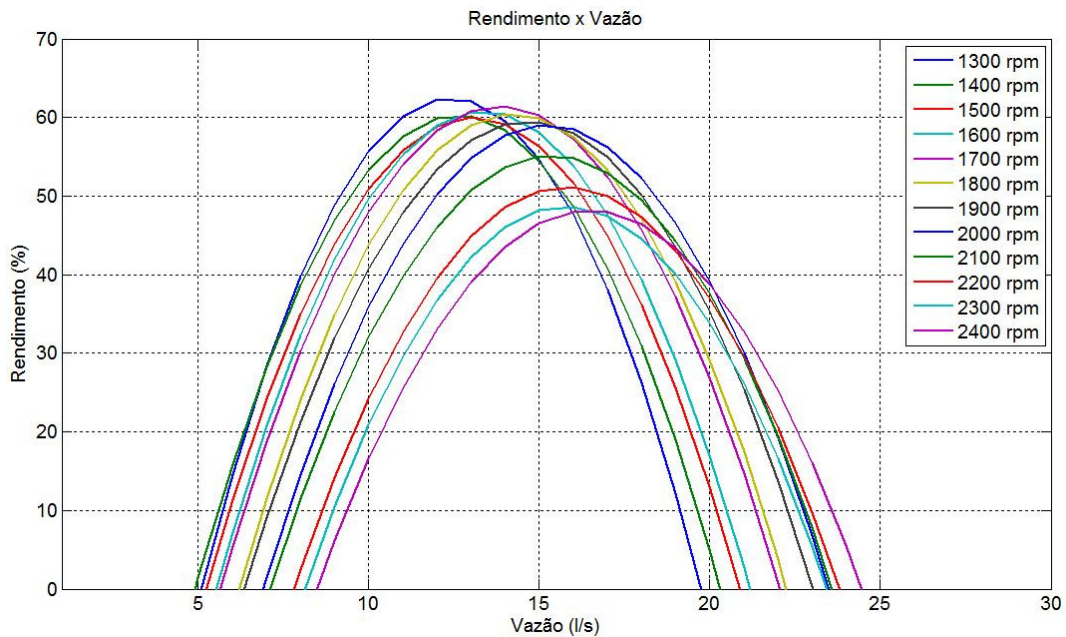


Fig 27. Característica de rendimento \times vazão em modo turbina, para diferentes velocidades.

A partir das curvas da Figura 27 é possível ver que existem vantagens ao se trabalhar em velocidades menores do que a nominal, para vazões reduzidas, e com velocidades maiores do que a nominal, para vazões acima da vazão nominal.

4.4.2. Potência x vazão

A potência de saída da BFT em Watts é dada pela Equação 13:

$$P = 9,81HQ \frac{\eta}{100}; \quad (13)$$

Onde,

P = potência de saída (W);

H = pressão manométrica de entrada (mca);

Q = vazão (l/s);

η = rendimento da BFT (%);

A Figura 28 a seguir apresenta as curvas de potência x vazão para diferentes velocidades. As curvas foram obtidas para $H = 18$ mca e os rendimentos dados pelas curvas da Figura 27.

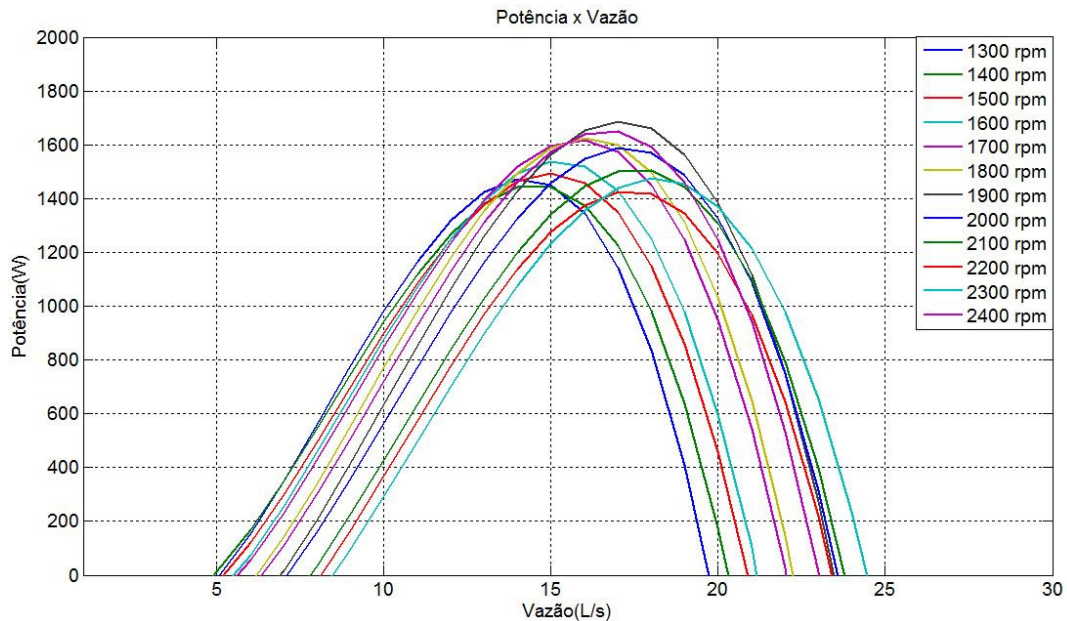


Fig 28. Característica de potência x vazão em modo turbina, para diferentes velocidades.

4.4.3. Característica de rendimento na operação em velocidade variável

A filosofia da operação em velocidade variável consiste em fazer com que o sistema opere na velocidade adequada, de forma que, para uma dada vazão, o rendimento seja maximizado.

A curva de rendimento máximo foi obtida a partir das curvas de rendimento \times vazão da Figura 27, e é apresentada na Figura 29 a seguir.

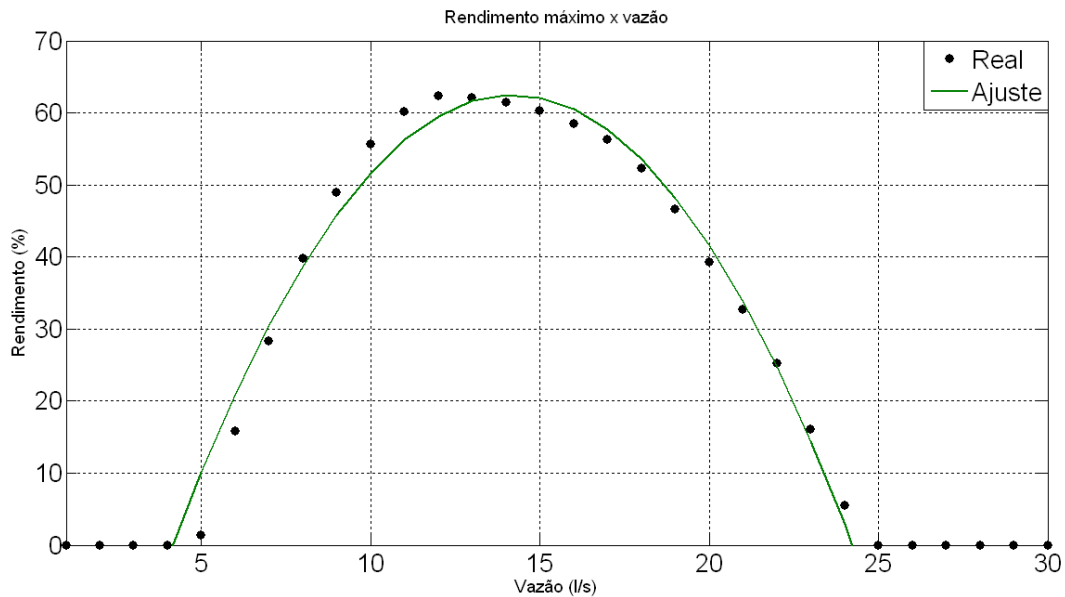


Fig 29. Característica de rendimento \times vazão em modo turbina, para a operação em velocidade variável.

A curva de rendimento máximo pode ser representada de forma aproximada pelo polinômio:

$$\eta_{max} = -0,6201Q^2 + 17,5986Q - 62,3408; \quad (14)$$

Onde Q é a vazão em l/s e η_{max} é o rendimento máximo.

Vale ressaltar que, para a curva da Figura 29, a operação da BFT está limitada entre 1300 rpm e 2400 rpm. Espera-se, uma vez considerada a possibilidade de

operação em uma faixa mais ampla de velocidades, que a característica da curva de rendimentos máximos resultante apresente uma abertura um pouco maior.

4.4.4. Potência de saída para operação em velocidade variável

Substituindo a Equação 14 na Equação 13 obtém-se a curva de potência máxima, representada pela Equação 15 a seguir.

$$P_{max} = \frac{9,81H}{100} (-0,6201Q^3 + 17,5986Q^2 - 62,3408Q); \quad (15)$$

Onde,

P_{max} = potência máxima de saída da BFT (W);

H = pressão manométrica de entrada (mca);

Q = vazão (l/s);

A potência máxima de saída da BFT em função da vazão é apresentada na Figura 30 a seguir. Neste caso a equação foi avaliada utilizando-se um $H = 18$ mca.

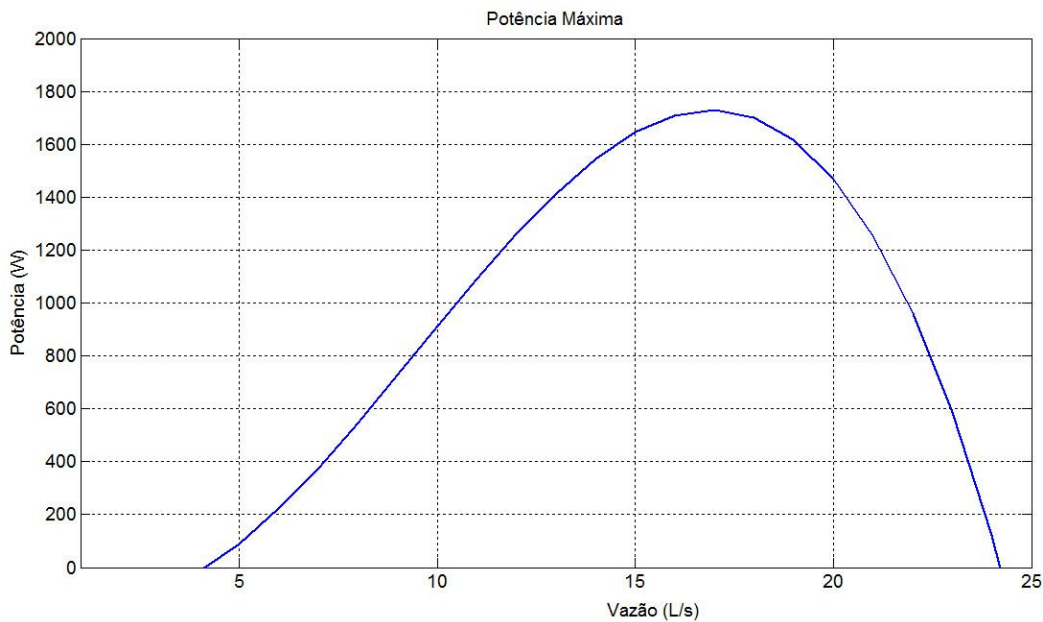


Fig 30. Característica de potência x vazão em modo turbina, para a operação em velocidade variável.

4.4.5. Velocidade x vazão para maximização de potência

Para a operação em velocidade variável, é necessário o emprego de um sistema de controle. Neste caso, é indispensável a informação da velocidade adequada de operação para cada vazão, ou seja, a velocidade que maximiza a potência de saída para uma dada vazão. Esta característica é apresentada na Figura 31 a seguir.

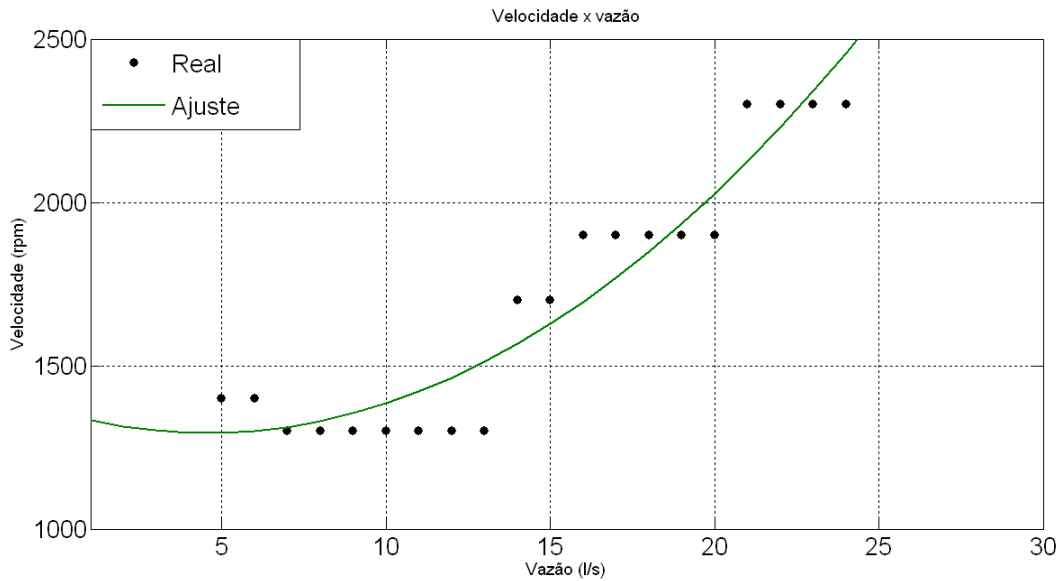


Fig 31. Velocidade x vazão para maximização de potência.

A Equação 16 descreve o comportamento da curva da Figura 31.

$$\omega_o = 3,3Q^2 - 26,2Q + 1329; \quad (16)$$

Onde,

ω_o = velocidade associada ao ponto de máximo rendimento (rpm);

Q = vazão (l/s);

4.5. COMPARAÇÃO DA OPERAÇÃO DA BFT: VELOCIDADE CONSTANTE E VELOCIDADE VARIÁVEL

A utilização de BFTs em sistemas a velocidade constante consiste basicamente em acoplá-las a geradores síncronos ou assíncronos com seus estatores diretamente conectados à rede elétrica. Em aplicações onde não existe a possibilidade de conexão à rede, estratégias alternativas devem ser buscadas para se manter a velocidade constante, através de um controle de carga ou vazão, por exemplo.

A operação em velocidade variável é prevista principalmente em aplicações onde as condições de vazão variam. O sistema pode ser implementado utilizando conversores eletrônicos acoplados a geradores síncronos a ímã permanente ou com bobina de campo, geradores assíncronos em gaiola ou duplamente excitados.

No entanto, a eletrônica de potência necessária para tal significa um aumento substancial no custo total do sistema. Para uma avaliação definitiva sobre a viabilidade de operação da BFT em velocidade variável e constante é necessário confrontar o incremento na potência de saída com o aumento do custo do sistema devido à eletrônica de potência adicional.

4.5.1. Comparação dos sistemas

A Figura 32, a seguir, apresenta a comparação dos rendimentos decorrentes das operações em velocidade variável e velocidade constante.

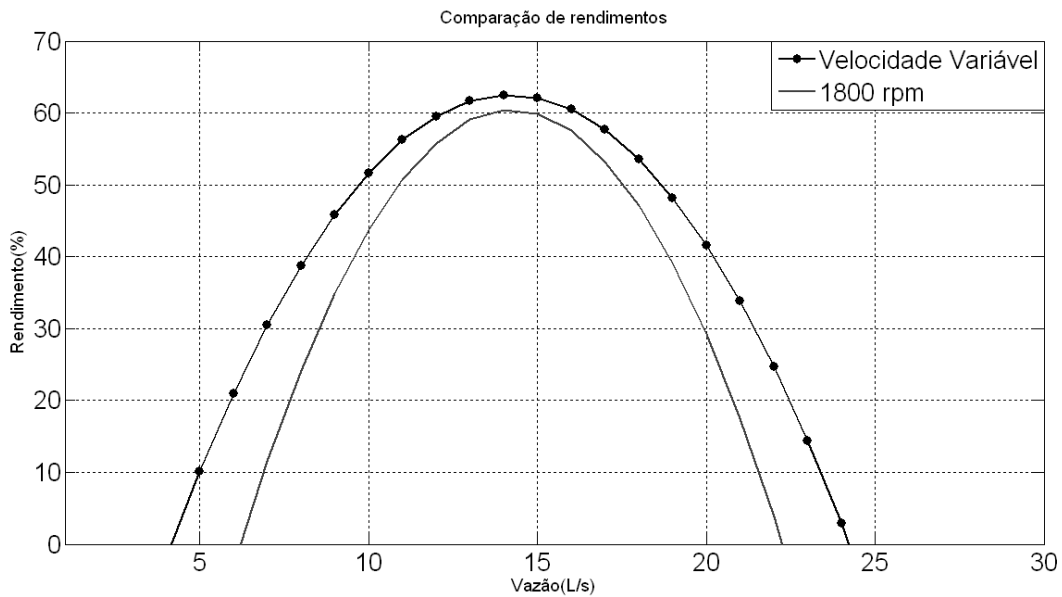


Fig 32. Comparação de rendimentos: velocidade constante x velocidade variável.

Um ganho considerável de rendimento é obtido com a operação em velocidade variável. Este ganho é maior para vazões diferentes da vazão de máximo rendimento em velocidade constante.

A Figura 33 apresenta a comparação das potências decorrentes das operações em velocidade variável e velocidade constante.

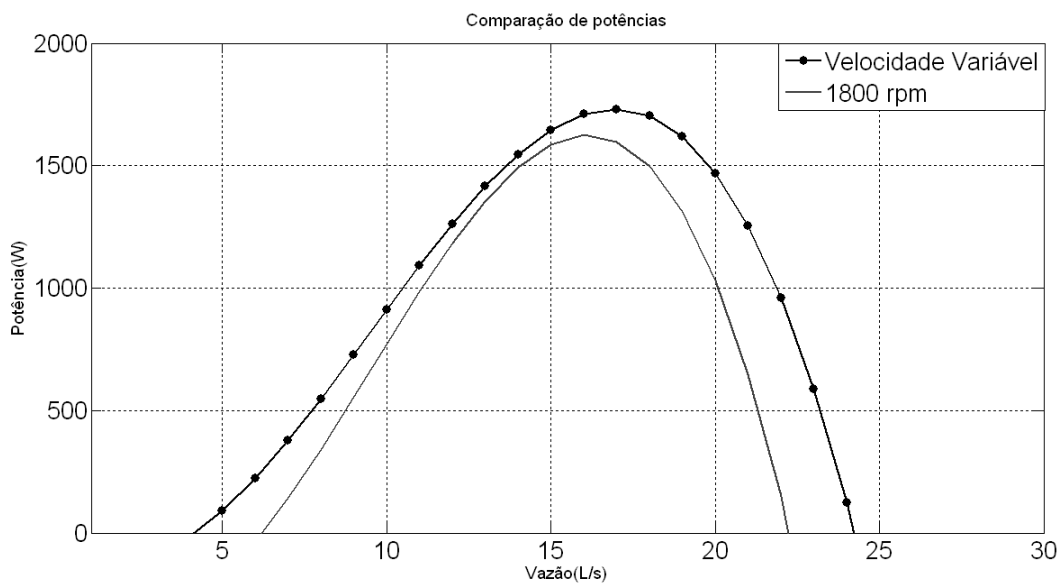


Fig 33. Comparação de potências: velocidade constante x velocidade variável.

Na operação em velocidade variável, a potência da BFT é incrementada, significativamente, na medida em que a vazão se afasta da vazão de máxima potência em velocidade constante.

4.5.2. *Produção anual de energia*

4.5.2.1. *Característica de variação de vazão*

A Figura 34 apresenta um perfil de variação anual de vazão. Os dados da Figura 34 representam vazões médias mensais. Trata-se de uma característica típica de cursos d'água da região da Bacia do Entorno da Represa de Três Marias.

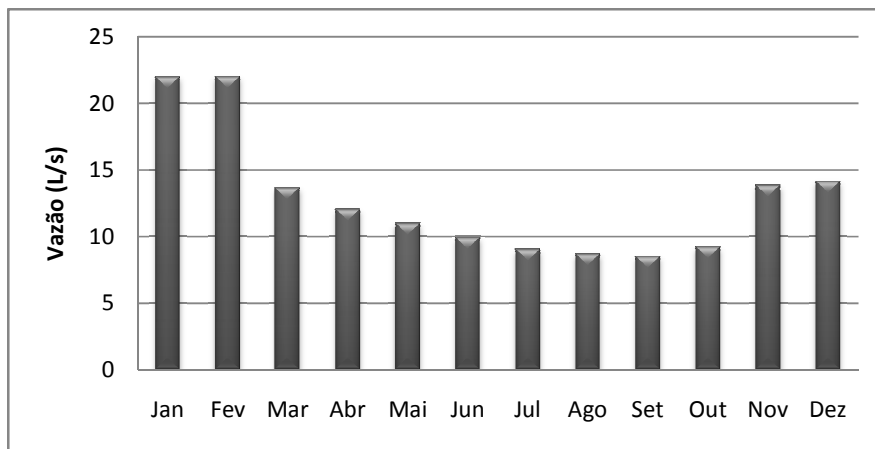


Fig 34. Perfil típico de variação de vazão.

Existe a ocorrência de vazões mais elevadas no período do verão e vazões moderadas no período do inverno, em decorrência dos respectivos índices pluviométricos nesses períodos. Este perfil de variação de vazão foi utilizado para a avaliação que se segue.

4.5.2.2. Característica de operação do sistema

Nas condições apresentadas na Figura 34, a BFT irá operar com rendimentos de acordo com a Figura 35.

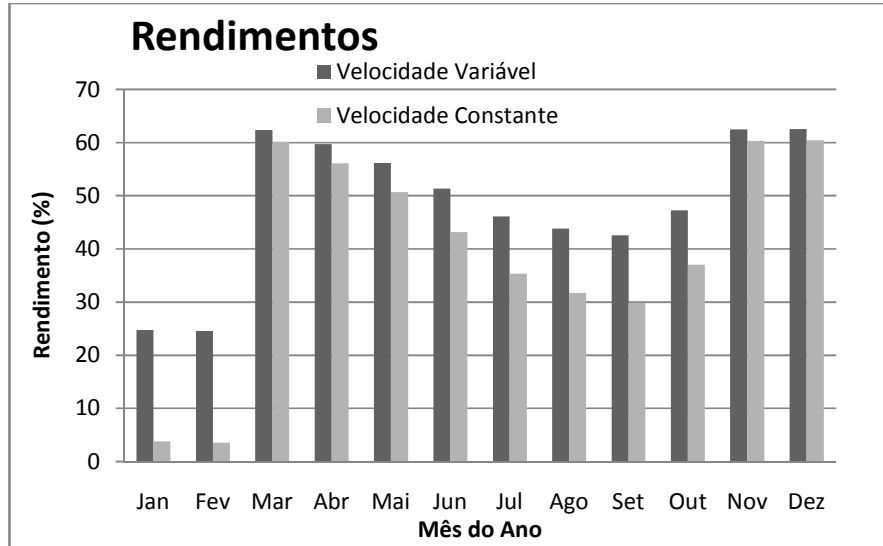


Fig 35. Operação da BFT para o regime de vazões – Comparação de rendimentos.

E a potência anual disponibilizada pelo sistema é apresentada na Figura 36:

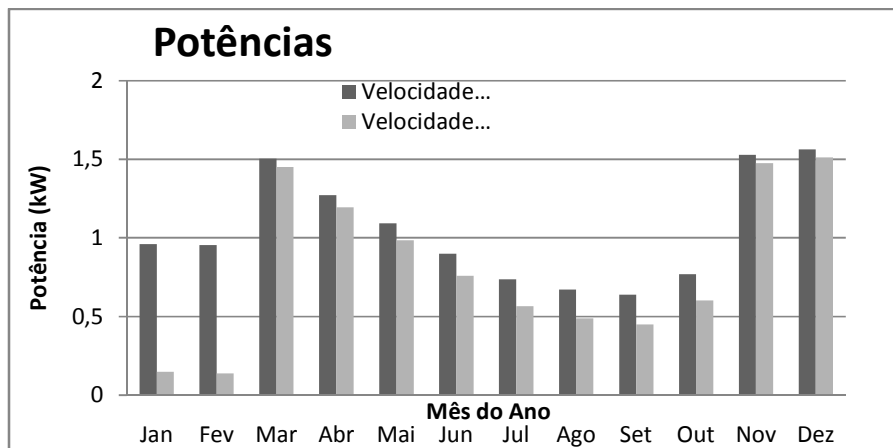


Fig 36. Operação da BFT para o regime de vazões – Comparação das potências anuais.

Nota-se que existe um incremento considerável na potência disponível da BFT operando em velocidade variável, em relação à operação em velocidade constante.

Nestas condições, a energia anual gerada será 7,16 MWh para o sistema de velocidade constante e 9,20 MWh para o sistema de velocidade variável. A opção pelo sistema de velocidade variável resulta em um ganho de 2,04 MWh na produção anual de energia, ou seja, um acréscimo de 28,5%.

É importante destacar que o ganho na produção de energia dependerá substancialmente da característica de variação anual de vazão. De maneira geral, em locais onde o histograma de vazões apresenta elevadas frequências de ocorrência de vazões diferentes da vazão nominal, o ganho obtido com a operação em velocidade variável será maior.

5. PROPOSTA DO SISTEMA ISOLADO

Neste capítulo é apresentada a proposta de um micro gerador hidroelétrico para operar de forma isolada, fornecendo energia elétrica a uma tensão e frequência regulada.

5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema é composto pela BFT acoplada a um gerador síncrono auto-excitado. As cargas são conectadas diretamente aos terminais do gerador. O sistema opera em velocidade aproximadamente constante. A tensão e a frequência são reguladas através do controle de cargas auxiliares que entram ou saem para fechar o balanço de potência do sistema, diante das variações de demanda. A Figura 37 apresenta um esquema geral do sistema proposto.

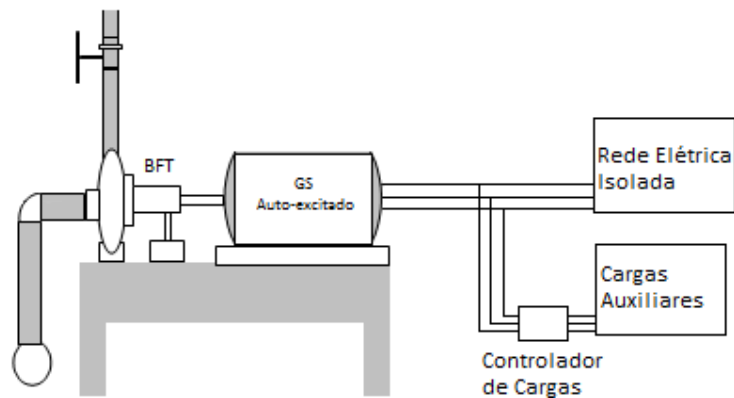


Fig 37. Sistema proposto para geração isolada.

As chamadas cargas auxiliares estão associadas ao consumo de potência em processos e sistemas como: aquecimento de água para diversos fins; calefação e geração de frio a partir de calor; cozimento de alimentos e sistemas de secagem de grãos. Outras aplicações podem ser encontradas, dependendo das características do local de aplicação do micro gerador, bem como de possíveis atividades econômicas de produção ou subsistência desenvolvidas no local.

O sistema é projetado para trabalhar com o par $H \times Q$ nominal e fornecer potência ativa com velocidade, tensão e frequência nominal. Logo, há uma elevação de velocidade, tensão e frequência com a redução da demanda de potência. O controle de velocidade é feito através do chaveamento de cargas elétricas adicionais numa medida

adequada para manter estes parâmetros dentro de limites aceitáveis, previamente definidos. Cada carga possui cerca de 10% da potência nominal do sistema.

A lógica de funcionamento do sistema de controle foi implementada em um microcontrolador PIC18F4550. Foi utilizada uma entrada analógica, uma estrutura de comparação e dez saídas digitais. A Figura 38 mostra o esquema do sistema de controle montado.

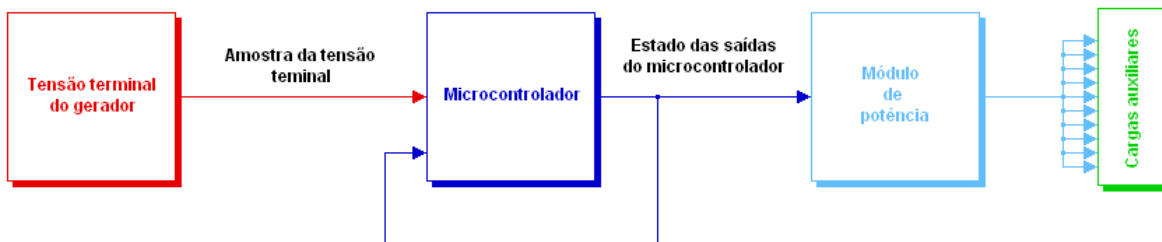


Fig 38. Esquema do sistema de controle de carga.

A entrada analógica recebe a leitura da tensão terminal do gerador. Esta tensão é comparada com os limites inferior (-10%) e superior (+10%). De acordo com o resultado dessa comparação e com o estado de cada uma das dez saídas, um novo estado para as saídas do microcontrolador é definido, de acordo com a necessidade de aumento ou redução da carga do grupo gerador. O módulo de potência consiste em um estágio de amplificação de tensão e corrente, além do conjunto de relés para chaveamento das cargas auxiliares. Desta forma, as cargas são ligadas ou desligadas, na medida adequada, de forma a manter a tensão terminal dentro dos limites estabelecidos

5.2. TESTES DE VARIAÇÃO DE CARGA

A seguir, são apresentados os resultados dos testes para verificação do desempenho do sistema, diante de variações de carga.

Na realização dos testes foram utilizadas dez lâmpadas de 100 W simulando as cargas auxiliares. A extração de potência do gerador foi feita utilizando-se um banco de resistências alimentado por um transformador variável.

A Figura 39 apresenta a variação de tensão devido à variação da carga do gerador, quando submetido a uma variação de carga partindo da condição de baixa demanda até a condição de plena carga. Nesta situação a tensão terminal se manteve entre +10% e -10% da tensão nominal.

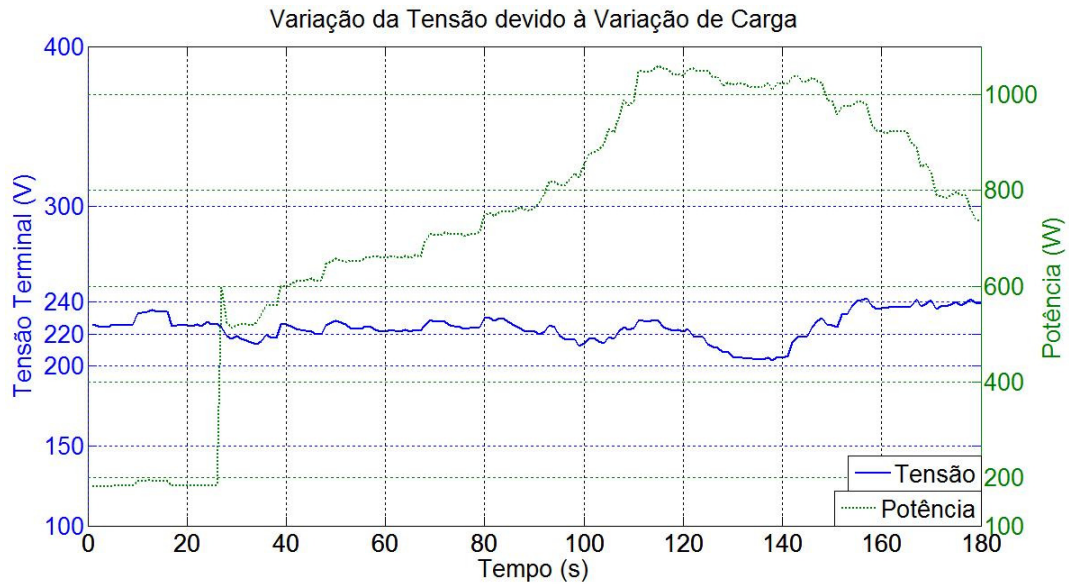


Fig 39. Variação da tensão em função da carga do gerador.

A Figura 40 apresenta a variação de frequência devido à variação da carga do gerador, nas mesmas condições da Figura 39. A frequência se manteve entre +8% e -8% da frequência nominal.

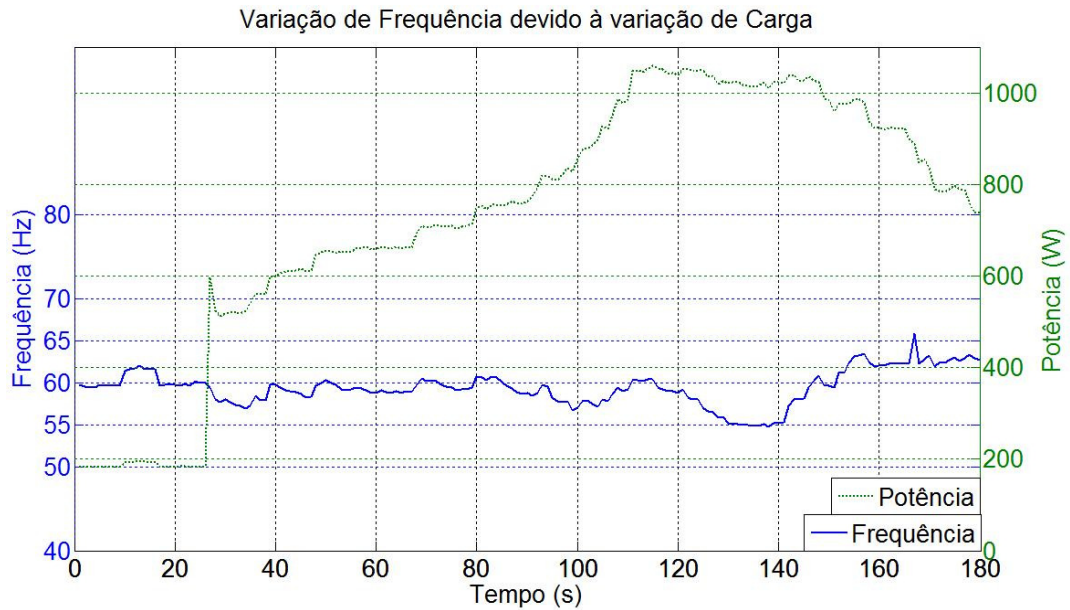


Fig 40. Variação da frequência em função da carga do gerador.

Nas Figuras 41 a 46 a seguir, tensão e frequência foram monitoradas para variações discretas da demanda de potência.

A Figura 41 apresenta a variação de tensão devido à entrada e saída de 40% da carga total. O sistema leva 3 segundos para restabelecer a tensão, dentro dos limites definidos.

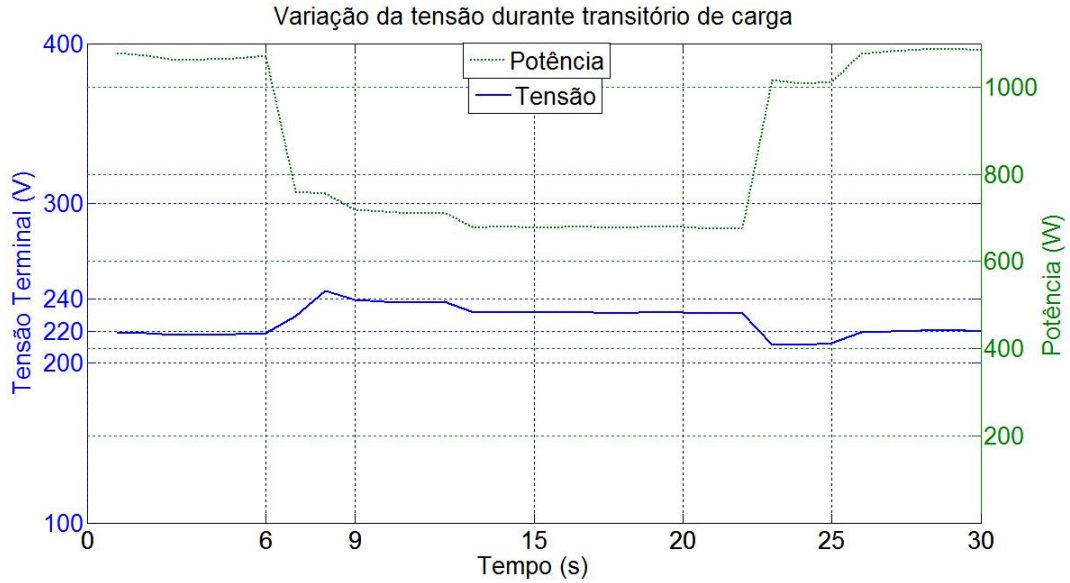


Fig 41. Variação da tensão devido à entrada e saída de 40% da carga do sistema.

A Figura 42 apresenta a variação de frequência nas mesmas condições da Figura 41. Em 3 segundos a frequência é restabelecida entre +5% e -5% da frequência nominal.

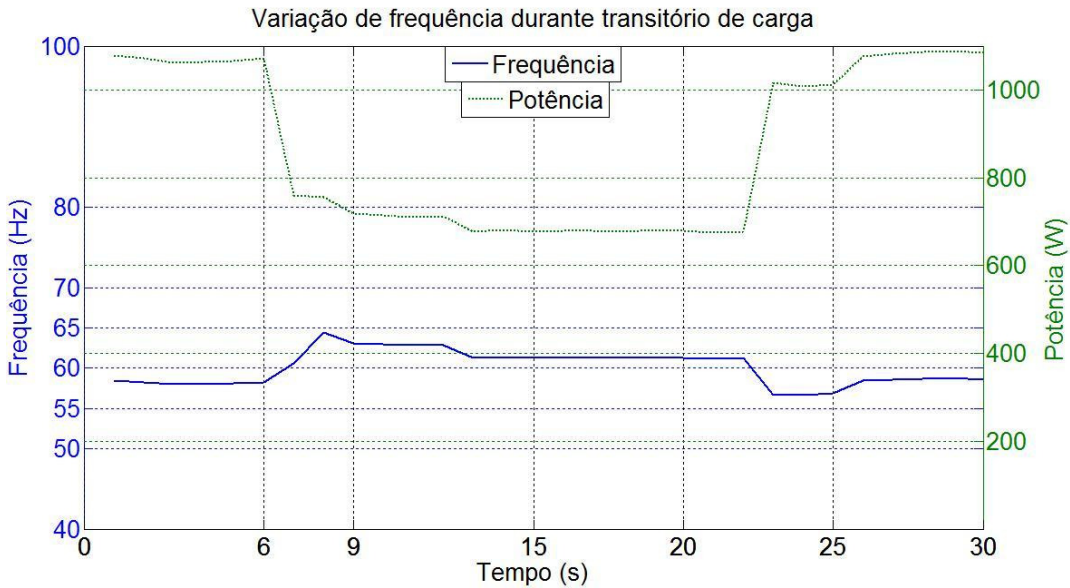


Fig 42. Variação da frequência devido à entrada e saída de 40% da carga do sistema.

Para entradas e saídas de cargas inferiores a 40% da carga total do sistema, a tensão terminal do grupo gerador não ultrapassa o limite de 10% da tensão nominal.

A Figura 43 apresenta a variação de tensão devido à entrada e saída de 65% da carga total. Nestas condições, o sistema leva cerca de 7 segundos para o restabelecimento da tensão, dentro dos limites definidos.

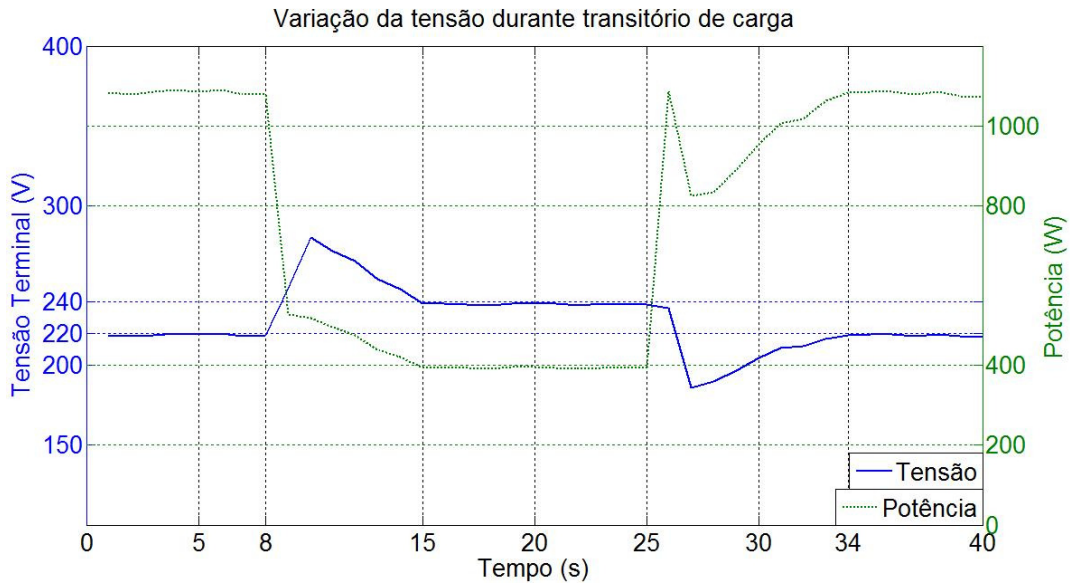


Fig 43. Variação da tensão devido à entrada e saída de 65% da carga do sistema.

A Figura 44 apresenta a variação de frequência referente à situação apresentada na Figura 43. Em cerca de 7 segundos a frequência é restabelecida entre +5% e -3% da frequência nominal.

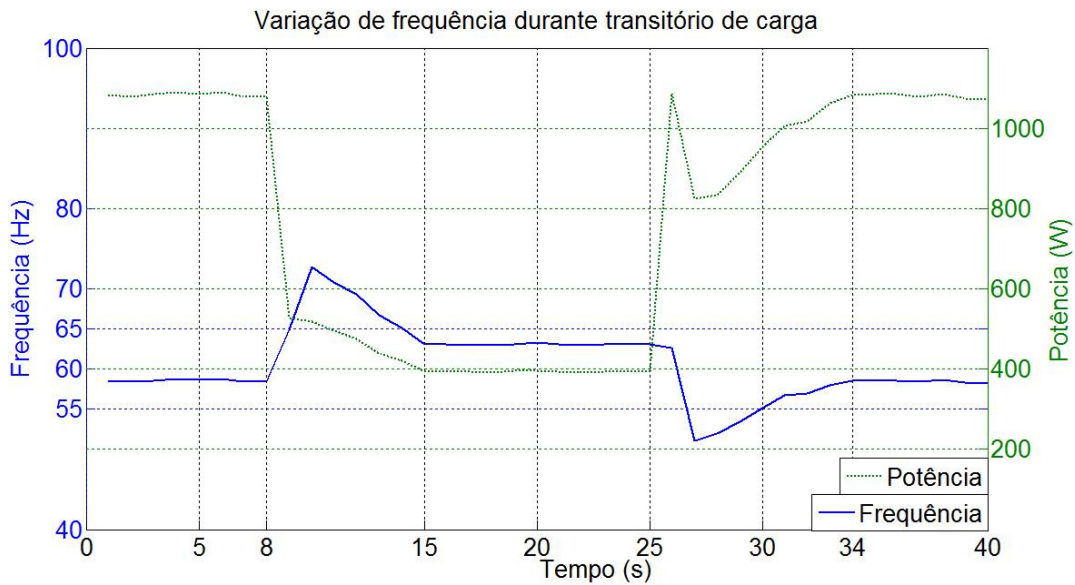


Fig 44. Variação da frequência devido à entrada e saída de 65% da carga do sistema.

A Figura 45 apresenta a variação de tensão devido à entrada e saída de 100% da carga total. Nestas condições, o sistema leva 10 segundos para o restabelecimento da tensão, dentro dos limites definidos.

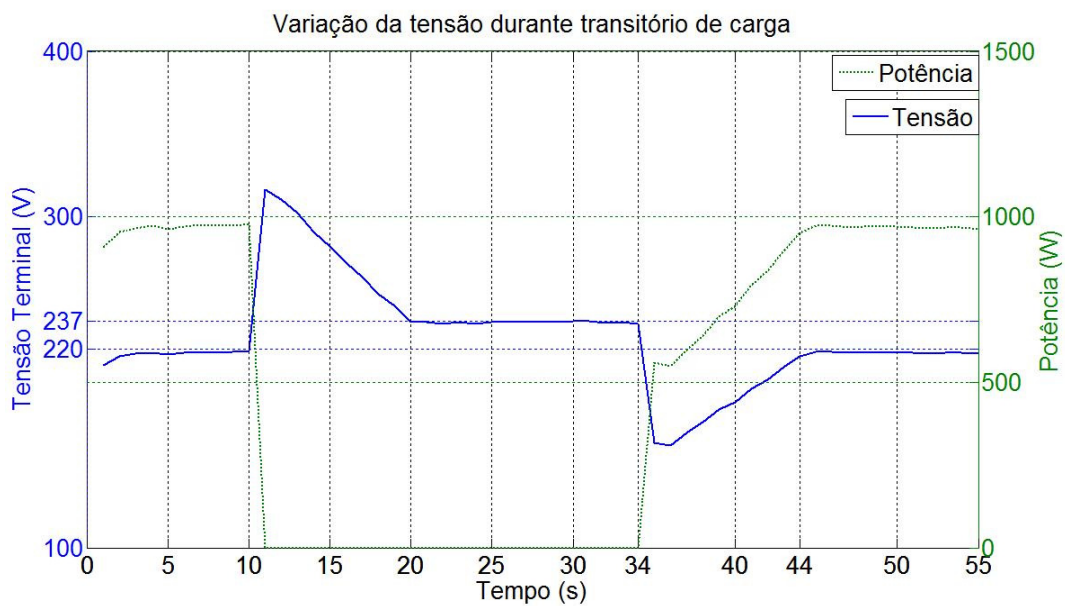


Fig 45. Variação da tensão devido à entrada e saída de 100% da carga do sistema.

A Figura 46 apresenta a variação de frequência devido à entrada e saída de 100% da carga total. Nestas condições, em cerca de 10 segundos a frequência é restabelecida entre +3% e -3% da frequência nominal.

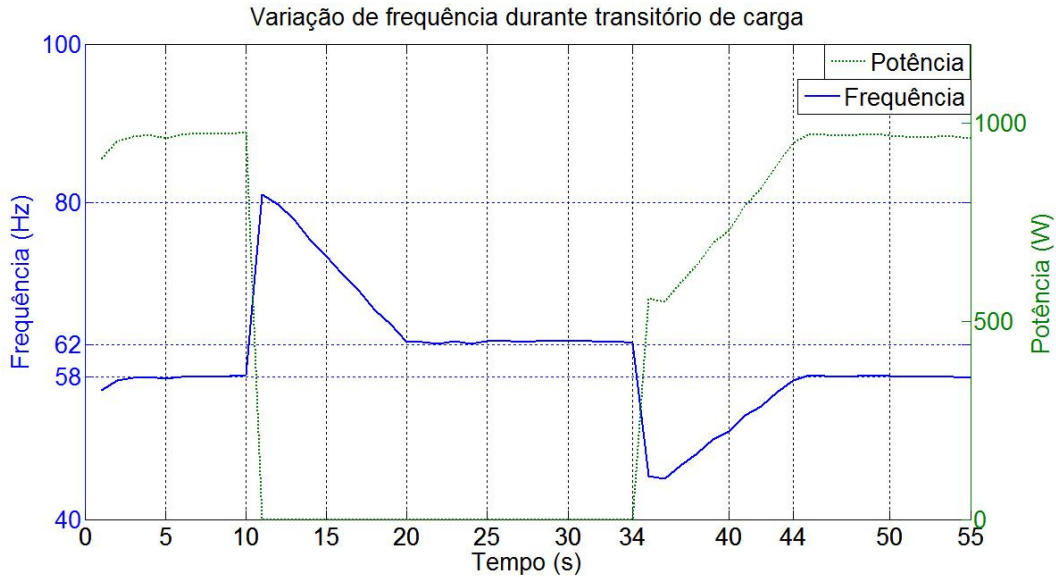


Fig 46. Variação da frequência devido à entrada e saída de 100% da carga do sistema.

Os resultados mostram que na pior condição, entrada ou saída de 100% da carga do grupo gerador, as variações de tensão e frequência se estabilizam em até 10 segundos. Dependendo da variação de carga imposta, os níveis de tensão e frequência podem chegar a valores relativamente elevados durante alguns instantes. Isto, indiscutivelmente, deve ser considerado no momento da especificação de equipamentos a serem alimentados por este sistema.

A topologia sugerida neste capítulo se apresenta como uma alternativa economicamente viável e relativamente robusta, o que a torna adequada a aplicações isoladas em regiões rurais. O sistema é composto por tecnologias largamente disponíveis no mercado, amenizando consideravelmente as dificuldades de aquisição e manutenção.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma contribuição para o estudo e a aplicação de BFTs em sistemas descentralizados de geração de energia elétrica. O trabalho contemplou a construção de bancadas experimentais para realização de ensaios e testes na máquina elétrica e na BFT.

Inicialmente, reuniu as principais metodologias de seleção desenvolvidas até hoje e apresentou um relato sobre os principais projetos de aplicação realizados no mundo.

Uma análise dos geradores síncronos e de indução foi feita, com uma abordagem direcionada à aplicação em sistemas de pequeno porte, de velocidade constante e velocidade variável.

Foram abordados aspectos da geração distribuída, seus obstáculos e benefícios, bem como as particularidades inerentes ao abastecimento de energia elétrica em comunidades rurais isoladas.

As investigações experimentais realizadas na máquina síncrona permitiram o mapeamento de suas perdas, possibilitando quantificá-las para qualquer condição de operação.

Um dos principais pilares deste trabalho foi a avaliação das características da BFT operando em velocidades entre 1300 rpm e 2400 rpm. Os resultados encontrados nesta avaliação foram úteis para a análise de viabilidade de sua operação em velocidade variável. Esta análise foi realizada para um caso particular e mostrou que, para este caso, existe um ganho da ordem de 28,5% na energia anual gerada quando se opta pelo sistema de velocidade variável.

A bancada ainda permitiu a verificação do método escolhido, modelo de Sharma (1985), para seleção da BFT. Os resultados mostraram que, apesar de servir como

referência para o dimensionamento da BFT, não pode ser diretamente utilizado para o processo de seleção, pois ainda apresenta algumas deficiências.

Outro importante pilar do trabalho foi a configuração proposta para operação isolada. O sistema foi concebido tendo como premissas a simplicidade, robustez, custos e o atendimento aos requisitos técnicos. Tais premissas são cruciais para que o sistema possa ser apropriado por comunidades rurais isoladas. Os resultados mostraram que o sistema proposto é capaz de fornecer energia elétrica com tensão e frequência regulada, dentro de limites estabelecidos.

6.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

As contribuições apresentadas a respeito da operação da BFT em velocidade variável servem de subsídio para trabalhos futuros, sinalizando positivamente para o estudo e desenvolvimento de sistemas de velocidade variável que utilizem a BFT.

O sistema proposto para operação isolada se encontra em um estágio bastante avançado, podendo ser implementado para a verificação de seu desempenho em campo.

Desta forma, para dar continuidade às contribuições pretendidas por este trabalho, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Implementação em campo do sistema proposto para operação isolada;
- Estudo de topologias para operação em velocidade variável, uma vez que a bancada experimental pode receber as adaptações necessárias;
- Aprimoramento do modelo para a eficiência da BFT em velocidade variável, considerando máquinas de potências maiores e o devido tratamento hidráulico das equações encontradas;
- Adaptação da bancada experimental para que tenha a flexibilidade de receber BFTs diversas, com sistema de supervisão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACRE AMERICAN INC. 1980. **Small Hydro Plant Development Program**; Vols. I, II and III, subcontract No. K-1574, U.S. Department of Energy, Idaho National Engineering Laboratory, Available from National Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, VA 22161.
2. ALATORRE-FRENK, C. **Cost Minimization in Micro-Hydro Systems using Pumps-As-Turbines**, PhD Thesis, University of Warwick, pp 85-89, pp 142-150, 1994.
3. ALVES, D. D. S., BORTOLUS, M. V., PAREDES-CASTRO, V. **Reflexões Sobre Transdisciplinaridade e suas Implicações no Desenvolvimento de Fontes Alternativas de Energia**. Belo Horizonte 2006 (Trabalho de Conclusão de Curso).
4. ALVES, D. D. S., MARTINEZ, C. B., SILVA, S. R. **Micro Central Hidrelétrica com BFT: Energia Renovável para o Abastecimento Rural**. In: VIII Congresso Latino - Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2009, Ubatuba - SP. Book of Abstract and Proceeding of the 8th Latin - American Congress: Electricity Generation and Transmission. Guaratinguetá - SP, 2009.
5. BALARIM, C. R., TARGA, L. A., FILHO, J. S. V., FILHO, A. G. A., WIECHETECK, G. K. **Custo de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas em Microcentrais Hidrelétricas**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal/SP - Brasil, v. v.24, p. 219-225, 2004.
6. BANSAL, R. C. **Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview**. *IEEE Trans. Energy Conversion.*, vol. 20, N° 2, Jun. 2005.

7. BORDER GREEN ENERGY TEAM. **Mae Wei Micro Hydro Project Report**. 13 de Março de 2008. Disponível em <http://www.bget.org>. Acesso em Agosto de 2009.
8. BRASIL. Decreto nº 4.873, de 11 de novembro de 2003. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica “Luz para Todos” e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 12 nov. 2003.
9. _____. Decreto nº 5.025, de 30 de março de 2004. Regulamenta o inciso I e os §§ 1º, 2º, 3º, 4º e 5º do art. 3º da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, no que dispõem sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), primeira etapa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 31 mar. 2004a.
10. _____. Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 31 jul. 2004b.
11. CONCEIÇÃO, C. L. Da. **Impactos da Geração Distribuída no Sistema de Potência**. 2003. Trabalho Individual, apresentado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2003.
12. COTRELL, J. **Motion Technologies CRADA CRD-03-130: Assessing the Potential of a Mechanical Continuously Variable Transmission**. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report. NREL/TP-500-36371. Disponível em <http://www.fallbrooktech.com/36371.pdf>. Acesso em 15 de outubro de 2009.

13. GERUDE, B. G., CAMELO, N. J., ALVES, C. C. G., SAAVEDRA, O. R. **Revisão Crítica de Sistemas Conversores de Energia para Sistemas Fotovoltaicos e Eólicos de Baixa Potência.** NEA Núcleo de Energias Alternativas, DEE-UFMA, 2005.
14. GONÇALVES, L. F. **Contribuições Para o Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída.** 2004. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
15. GOPALAKRISHNAN, S. **Power Recovery Turbines for the Process Industry.** In: Proc. of the 3rd Int. Pump Symposium, Turbomachinery Labs. Texas A and M University, College Station, Houston, USA, 1986.
16. GRAUERS, A. **Synchronous Generator and Frequency Converter in Wind Turbine Applications: System Design and Efficiency.** Technical report No. 175 L, Submitted to the School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree of Licentiate of Engineering. Göteborg, Sweden. May 1994.
17. GROVER, K.M. **Conversion of Pumps to Turbines.** GSA Inter. Corp., Katonah, New York, USA, 1984.
18. HARRIS, W. **How CVTs Work.** 27 de Abril 2005. How Stuff Works. Disponível em <http://auto.howstuffworks.com/cvt.htm>. Acesso em 16 de Março de 2010.
19. HOLDER, R. P. **Avaliação da Viabilidade de Utilização de Grupos Geradores Acionados Por Bombas Funcionando Como Turbinas no Sistema Elétrico Interligado.** 2005. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais.

20. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. População. **Censo Demográfico – 2000 – Tabulação Avançada**. Disponível em: <http://www2.ibge.gov.br/pub/Censos/Censo_Demografico_2000/Tabulacao_Avancada>. Acesso em: maio 2008.
21. IEEE Guide: **Test Procedures for Synchronous Machines**. IEEE Standard 115-1983, Setembro. 1983.
22. JORDÃO, R.G. **Máquinas Síncronas**. Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, ISBN 85-216-0013-5, 1980.
23. KITTREDGE, C. P. **Centrifugal pumps used as hydraulic turbines**. Trans. ASME, J. Eng. Power, Ser. A, pp 74-77, Janeiro 1961.
24. LOPES, R. E. **Grupos Geradores de Baixa Potência Acionados Por Bombas Funcionando Como Turbina**. 2003. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil.
25. LYRA, R. O. C. **Sistema de Excitação de Alto Desempenho Para Gerador de Indução Isolado**. 1994. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil.
26. MARTENS, A. H. J. A., ALBERS, P. H. W. M. **Investigation into CVT Application in Wind Turbines**. Technical Report. DCT 2003.90. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Outubro 2003.
27. _____. **Huai Kra Thing Micro Hydro Project Report**. 19 de Fevereiro de 2006. Disponível em <http://www.bget.org>. Acesso em Agosto de 2009.
28. _____. **Kre-Ki Micro Hydro Project Report**. Fevereiro de 2009. Disponível em <http://www.bget.org>. Acesso em Agosto de 2009.

29. MENDES, V. F. **Avaliação do Comportamento de um Sistema de Conversão de Energia Eólica Utilizando Gerador de Indução Duplamente Excitado Durante Afundamentos de Tensão Equilibrados e Desequilibrados.** 2009. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil.
30. NETO, P. B. SILVA, S. R., GARCIA, P. F. D. **Uma Implementação de Um Sistema Eólico de Geração Isolada para Fornecimento de Eletricidade em Corrente Contínua.** 1996. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil.
31. OLIVEIRA, D. M. N., MARTINEZ, C. B., GONZALEZ, M. L. Y. ALVES, D. D. S. **Alternativas Energéticas para o Acionamento de Instalações de Bombeamento.** In: VIII Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem - SEREA, 2008, Lisboa. Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem. Lisboa, 2008. p. 19-31.
32. PINHEIRO, E. L. R. **Análise do Comportamento Dinâmico de Usinas Eólicas a Velocidade Variável Utilizando ATPDraw.** 2004. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil.
33. POMÍLIO, J. A., MARRA, E. G. **Sistemas de Geração Baseados em Gerador de Indução Operando com Tensão Regulada e Frequência Constante.** SBA Controle e Automação, v.11. Abril 2000.
34. REIS, L. B., SILVEIRA, S. **Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável: introdução de uma visão multidisciplinar.** 2 ed. São Paulo: 2001. 288p.

35. ROSA, V. H. S. **Energia elétrica renovável em pequenas comunidades no Brasil: em busca de um modelo sustentável.** 440p. Tese (Doutorado) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
36. SCHMIEDL, E. **Serial centrifugal pumps operating as turbines; Section A-6 ‘Pumps used as Turbines’**, Pump Congress, Karlsruhe, Germany, 1988.
37. SERPA, P. M. N. **Eletrificação fotovoltaica em comunidades caiçaras e seus impactos socioculturais.** 252p. Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
38. SEVERINO, M. M. **Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia.** 335p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
39. SHARMA, K. R. **Small hydroelectric projects – Use of centrifugal pumps as turbines**, Kirloskar Electric Co., Bangalore, India, 1985.
40. SINGH, P. **Optimization of Internal Hydraulics and of System Design for PUMPS AS TURBINES with Field Implementation and Evaluation.** 345p. Tese (Doutorado) – University of Karlsruhe, Germany, 2005.
41. SMITH, N. **Motors as Generators For Micro-Hydro Power.** 1.ed. Londres: Intermediate Technology Development Group Publications Ltd, 2001.
42. STEPANOFF, A. J. **Special Operating Conditions of centrifugal Pumps** – Chapter 13; In: Centrifugal and Axial Flow Pumps, John Wiley & Sons, Inc., pp 269-292, 1957.
43. VIANA, A. N. C., **Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. Brasil. Dezembro, 1987.

44. VILANOVA, M. R. N., **Estudo de Grupos Moto-Bomba Operando como Grupos Geradores em Microcentrais Hidrelétricas**. 2007 Dissertação – Universidade Federal de Itajubá. Brasil.
45. VOITH TURBO, “**WinDrive**”. Documentos diversos disponíveis em http://www.voithturbo.com/wind-technology_product.htm. Acesso em 15 Outubro de 2009.
46. WILLIAMS, A. A, ‘**Pumps as turbines: a user’s guide**’, IT Publications, London, ISBN 1-85339-285-5, 1995.

ANEXOS

A ENSAIOS CARACTERÍSTICOS E METODOLOGIA DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DA MÁQUINA SÍNCRONA.

A.1 *Características de saturação em circuito-aberto*

Para a obtenção da curva de saturação em circuito aberto a máquina foi acionada, através do motor de indução (Figura 13), até a velocidade nominal. Foram tomados os valores de tensão terminal de armadura e corrente de excitação. As medições foram distribuídas aproximadamente de acordo com os seguintes pontos:

- 4 pontos abaixo de 60% da tensão nominal, um deles com excitação nula;
- 2 pontos entre 60% e 90% da tensão nominal;
- 4 pontos entre 90% e 110% da tensão nominal;
- 2 pontos acima de 110% da tensão nominal;

Nos ensaios realizados em velocidades diferentes da velocidade nominal, as medições foram limitadas pela máxima corrente de excitação, para velocidades inferiores à velocidade nominal, e pela máxima tensão terminal, para velocidades superiores à velocidade nominal.

A característica de entreferro é obtida através da extensão do trecho retilíneo da curva de saturação em circuito aberto.

Além das medições de tensão de armadura e corrente de excitação, foram tomadas as medições de torque do motor e velocidade do conjunto, para cada ponto do teste. Com essas medições foi possível o cálculo da potência de entrada do gerador, dada da seguinte forma:

$$P_{entrada} = (T_e \omega) - p_{Mmotor}; \quad (A.1)$$

Onde,

$P_{entrada}$ = Potência de entrada do gerador;

T_e = Torque eletromagnético do motor;

ω = Velocidade do conjunto;

p_{Mmotor} = Perdas mecânicas do motor;

Perdas mecânicas por atrito e ventilação e perdas magnéticas

A parcela de potência referente às perdas mecânicas por atrito e ventilação corresponde à potência de entrada do gerador, Equação A.1, com excitação igual a zero, durante o ensaio a vazio. As perdas magnéticas são obtidas subtraindo as perdas mecânicas da potência de entrada do gerador, conforme a Equação A.2.

$$p_F = P_{entrada} - p_M; \quad (A.2)$$

Onde,

$P_{entrada}$ = Potência de entrada do gerador no ensaio a vazio;

p_F = Perdas magnéticas do gerador;

p_M = Perdas mecânicas do gerador;

A.2 Características de saturação em curto-circuito

Utilizando-se a mesma estrutura do ensaio a vazio, porém com os terminais do circuito de armadura em curto-circuito, obteve-se a curva de saturação em curto circuito. Neste caso, foram tomadas as medições das correntes de campo e de armadura, em torno de 125%, 100%, 75%, 50% e 25% da corrente nominal.

Além das medições das correntes de campo e armadura, foram tomadas as medições de torque do motor, velocidade do conjunto e temperatura do enrolamento de armadura, para cada ponto do teste. Com essas medições foi possível o cálculo da potência de entrada do gerador.

Perdas no cobre

As perdas no cobre são dadas pela Equação A.3, a seguir:

$$p_C = 3RI^2 ; \quad (A.3)$$

Onde,

p_C = Perdas no cobre;

R = Resistência do enrolamento de estator, por fase, devidamente corrigida para a temperatura adequada;

I = Corrente de armadura medida, por fase;

Usualmente a perda no cobre de um enrolamento é especificada para uma temperatura fixada em 75° C. Devido à variação da resistividade dos materiais condutores com a temperatura deve-se corrigir o valor da resistência do enrolamento para o cálculo das perdas. A relação para correção da resistência, para o caso do cobre, é mostrada na Equação A.4.

$$\frac{R'}{R} = \frac{T'+234,5}{T+234,5} \quad (A.4)$$

A expressão acima relaciona a resistência R de um enrolamento à temperatura T , com a resistência R' do mesmo enrolamento à temperatura T' . O número 234,5 é o inverso do coeficiente de temperatura do cobre a 0 °C. Jordão (1980).

Perdas suplementares

As perdas suplementares foram obtidas através da Equação A.5 a seguir:

$$p_s = P_{entrada} - p_M - p_C; \quad (A.5)$$

Onde,

$p_s =$ Perdas suplementares;

$P_{entrada} =$ Potência de entrada do gerador no ensaio em curto – circuito;

$p_M =$ Perdas mecânicas;

$p_C =$ Perdas no cobre;

A.3 Característica de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo

A curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo é definida por $V = f(\text{excitação})$, para máquina sob rotação síncrona constante e fornecendo corrente, também constante, para um receptor puramente indutivo. Jordão (1980).

A Figura A.1 apresenta o traçado da característica de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo.

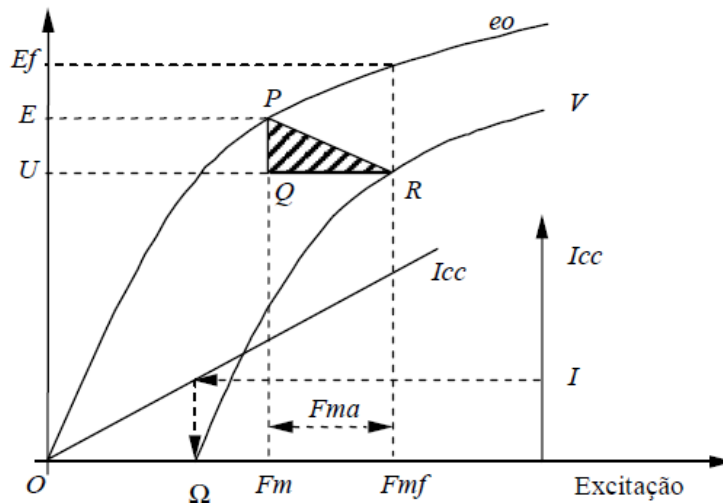


Fig. A.1. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo. Fonte: Adaptado de Jordão (1980).

Na Figura A.1 tem-se:

Oe_0 = Curva de saturação em vazio;

ΩV = Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo;

OI_{cc} = Curva de saturação em curto circuito;

A reatância de Potier é o quociente entre o cateto PQ e a corrente correspondente à curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo. Esta reatância, apesar de ser um pouco maior do que a reatância de dispersão da máquina é frequentemente utilizada nos cálculos referentes às máquinas síncronas. Isto ocorre devido às dificuldades de determinação experimental da reatância de dispersão e pelos erros relativamente pequenos que resultam de sua substituição pela reatância de Potier.

Os resultados da máquina em estudo

As Figuras A.2 a A.13 apresentam as características de saturação do gerador síncrono em estudo para velocidades variando de 1300 rpm a 2400 rpm.

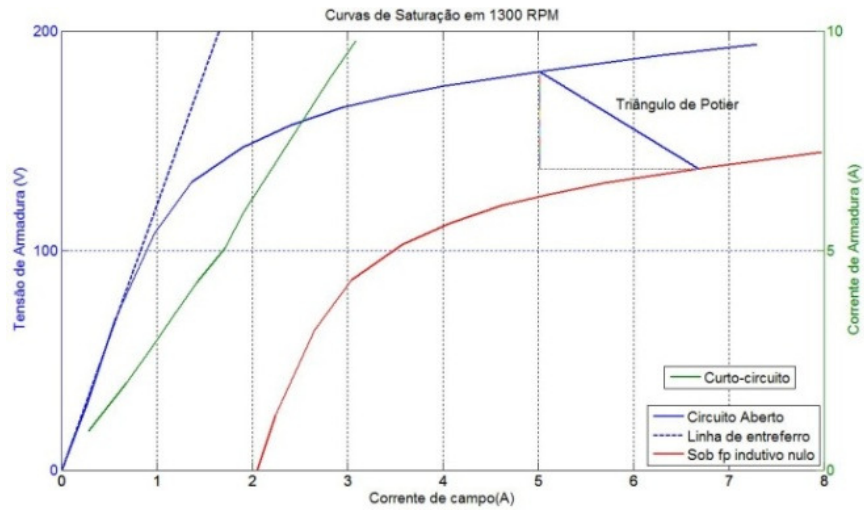


Fig A.2. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1300 rpm.

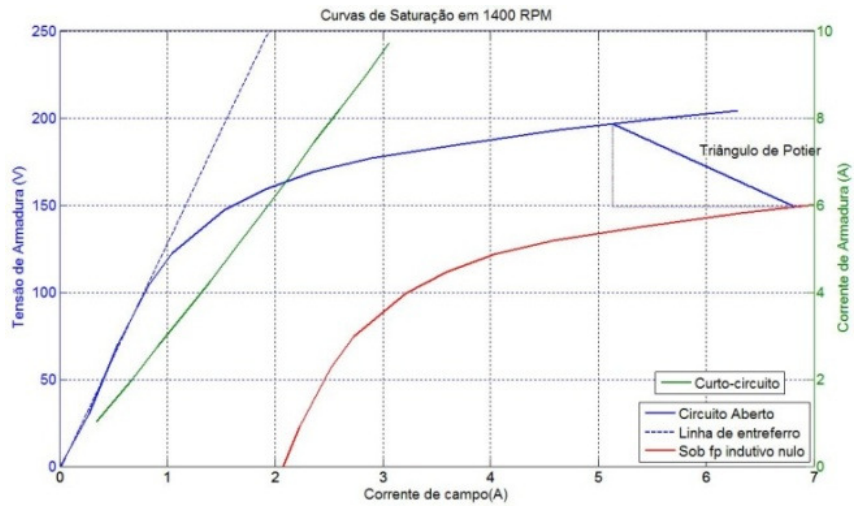


Fig A.3. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1400 rpm.

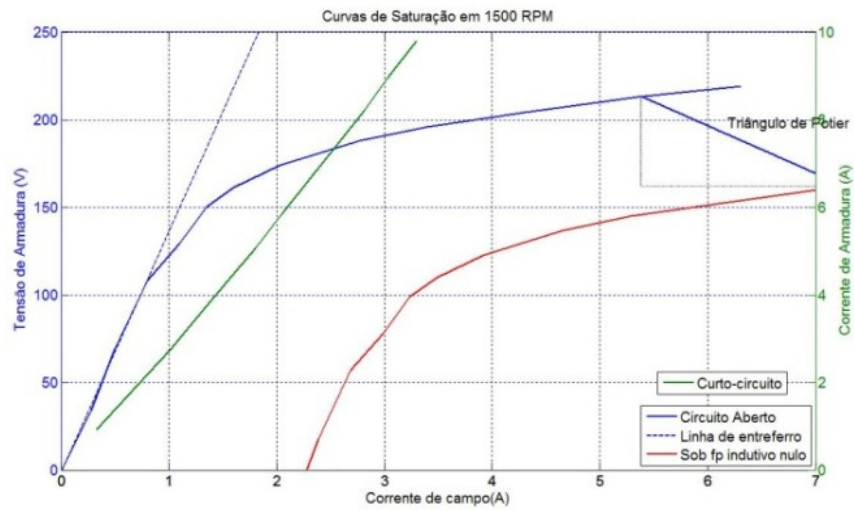


Fig A.4. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1500 rpm.

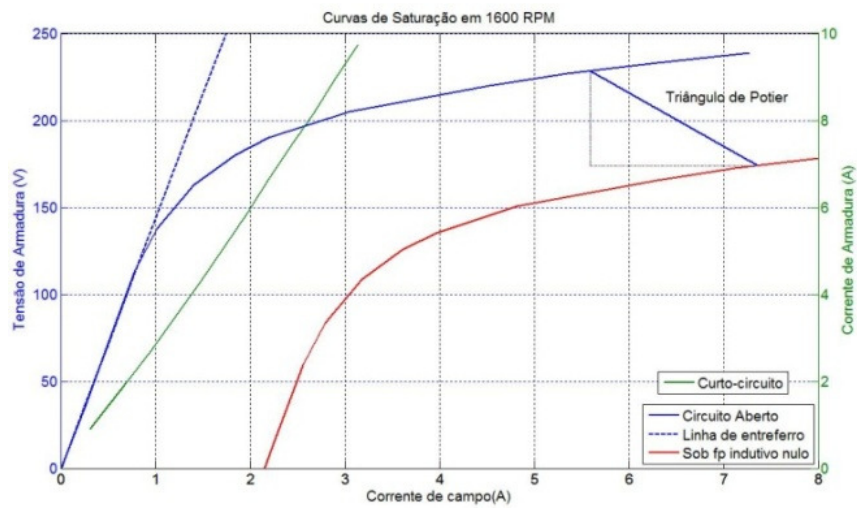


Fig A.5. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1600 rpm.

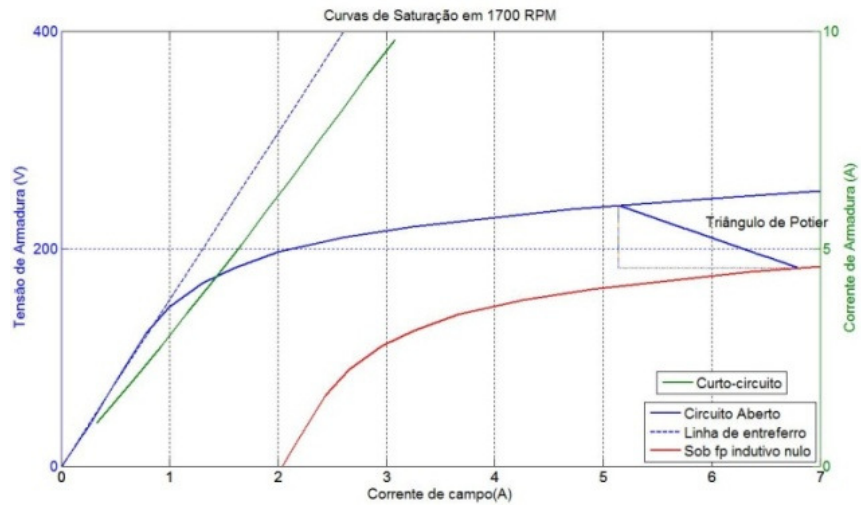


Fig A.6. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1700 rpm.

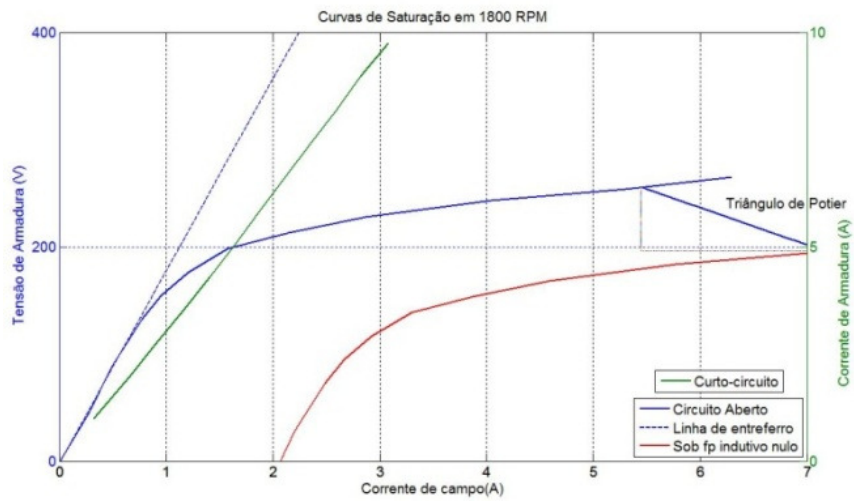


Fig A.7. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1800 rpm.

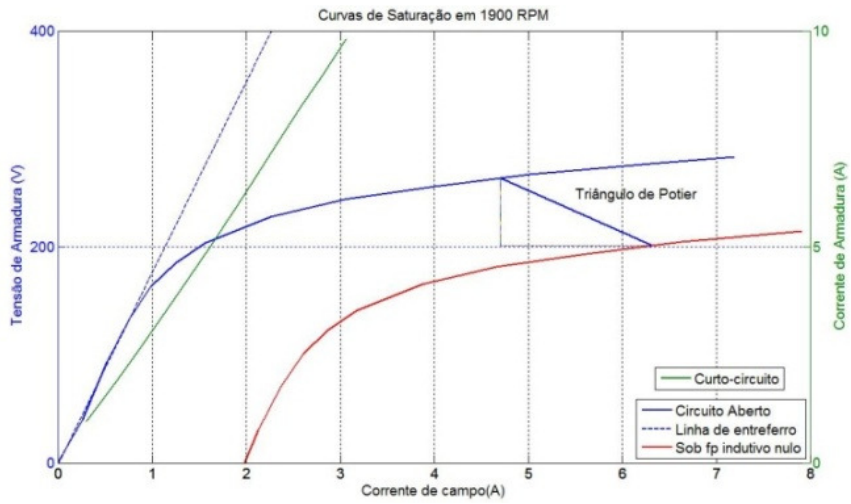


Fig A.8. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 1900 rpm.

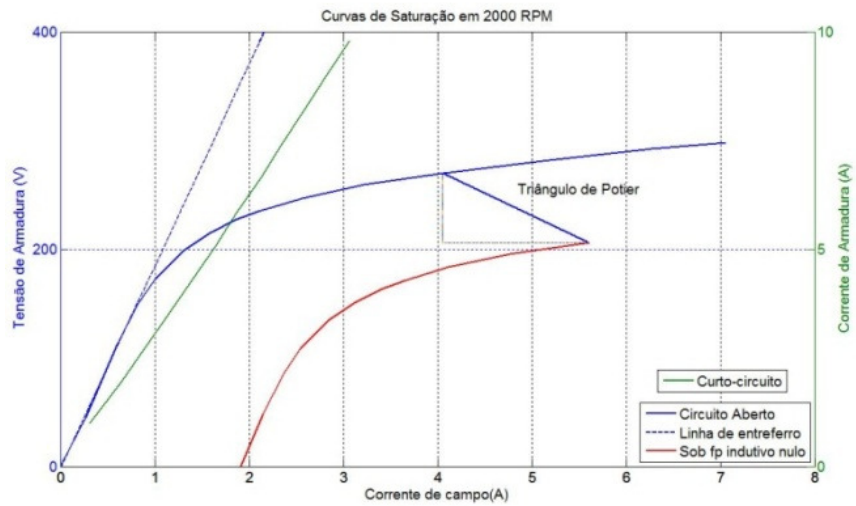


Fig A.9. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2000 rpm.

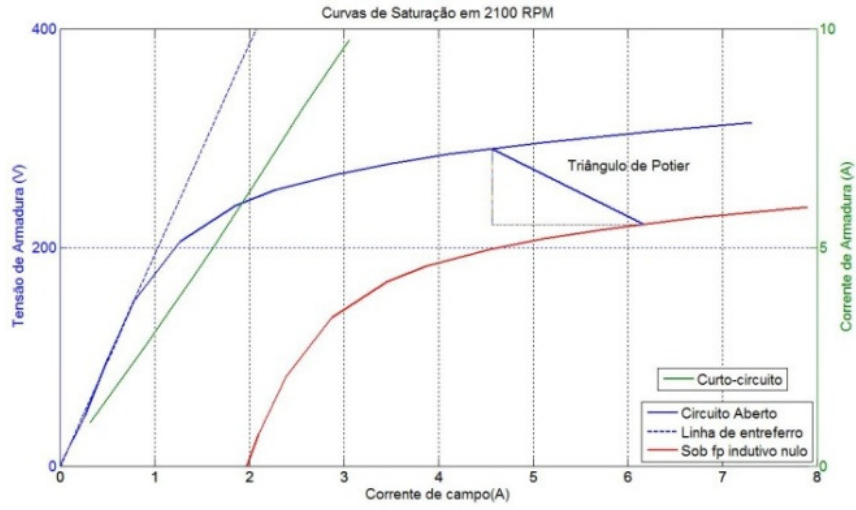


Fig A.10. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2100 rpm.

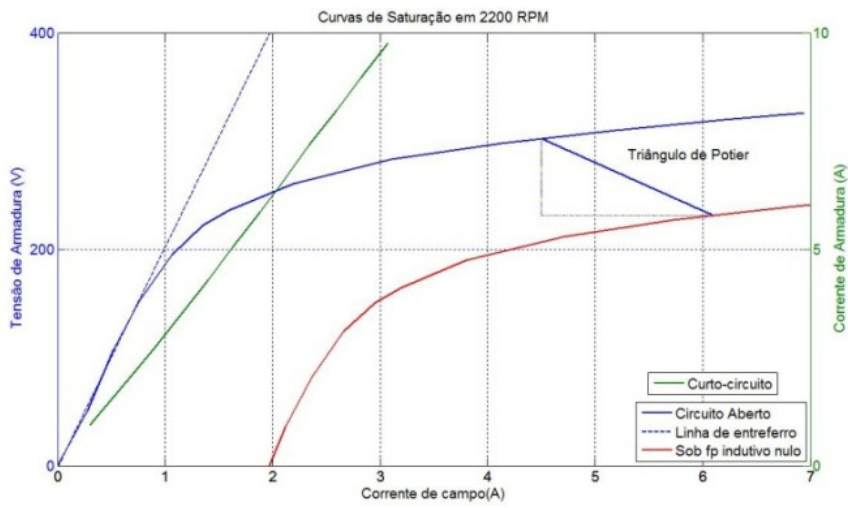


Fig A.11. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2200 rpm.

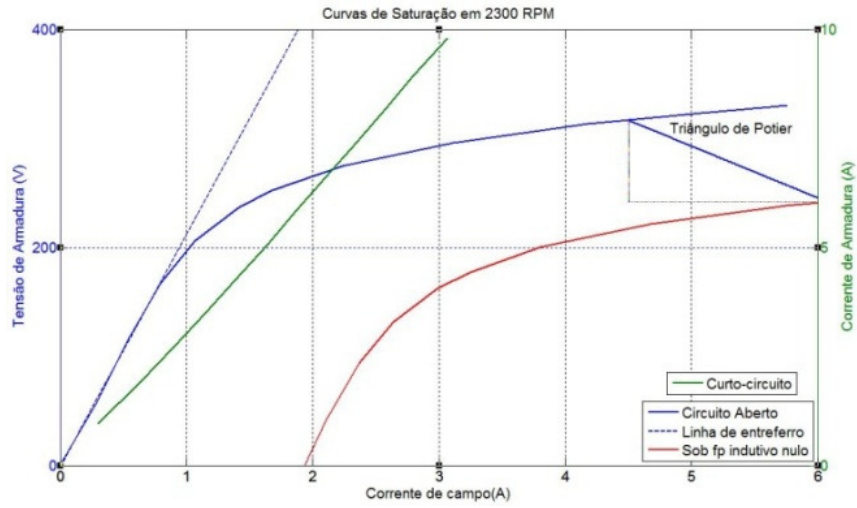


Fig A.12. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2300 rpm.

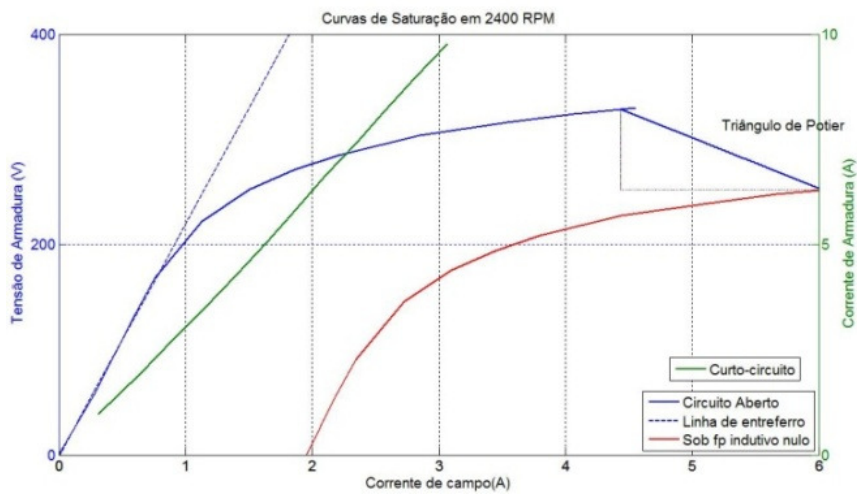


Fig A.13. Curva de saturação em carga sob fator de potência indutivo nulo, 2400 rpm.

A Figura A.14 mostra a variação da indutância da máquina em função da frequência.

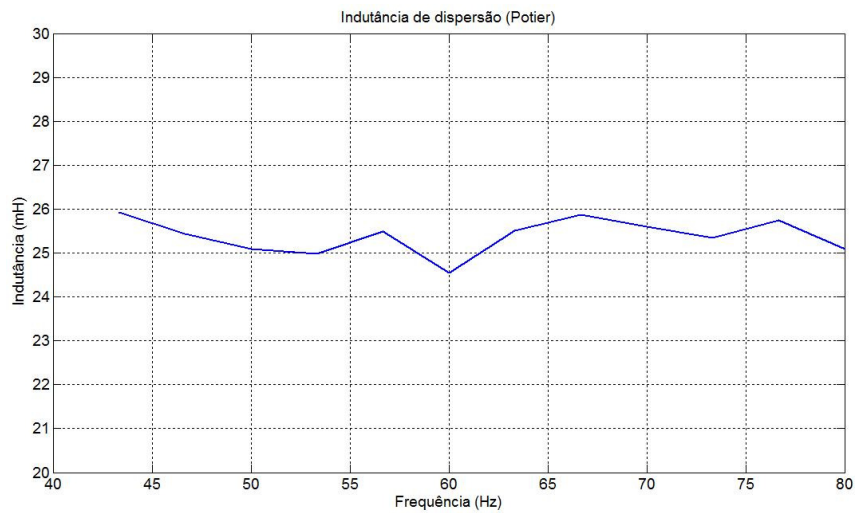


Fig A.14. Variação da indutância da máquina com a frequência.

Pelo gráfico da Figura A.14 percebe-se que a indutância da máquina apresenta uma variação máxima em torno de 5% de seu valor para a frequência de 60 Hz.

A.4 Ensaio para determinação da reatância x_q

Método utilizado: **Máxima corrente indutiva**

- 1- A máquina foi operada como motor síncrono, em vazio;
- 2- A excitação foi reduzida gradativamente até ser completamente anulada;
- 3- Com a polaridade invertida, a excitação foi aumentada até o momento do reajuste de posição do rotor da máquina;
- 4- Durante este processo a máxima corrente de armadura foi observada, o que ocorreu no início do processo de reajuste de posição do rotor;

Este procedimento foi repetido quatro vezes e as medições observadas foram:

$$\begin{aligned} V &= 220 \text{ V}; & I &= 11,10 \text{ A}; \\ & & I &= 11,30 \text{ A}; \\ & & I &= 11,15 \text{ A}; \\ & & I &= 11,69 \text{ A}; \end{aligned}$$

O valor de $I = 11,31 A$ (média das quatro medições) foi adotado, e a reatância síncrona segundo eixo em quadratura (x_q) é:

$$x_q = \frac{V}{I_{\max}} = \frac{220}{11,31} = 19,45\Omega ; \quad (\text{A.6})$$

A.5 Transitório de curto-circuito.

Determinação das reatâncias subtransitórias, transitórias e em regime permanente.

A Figura A.15 mostra a corrente de armadura no momento em que o curto-circuito foi aplicado:

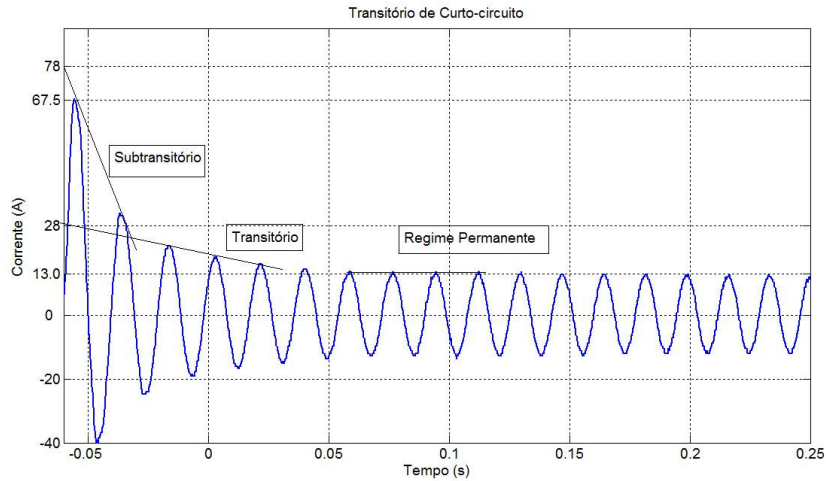


Fig A.15. Corrente de armadura no momento em que o transitório foi aplicado.

No momento do curto-circuito a máquina girava em 1800 rpm e a tensão de armadura era de 220 V. Desta forma, as reatâncias são definidas da seguinte forma:

$$x_d'' = \frac{E_f}{I_{rp}} = \frac{220\sqrt{2}}{78} = 3,98\Omega ; \quad (\text{A.7})$$

$$x_d' = \frac{E_f}{I_s'} = \frac{220\sqrt{2}}{28,8} = 10,80\Omega ; \quad (\text{A.8})$$

$$x_d = \frac{E_f}{I_{rp}} = \frac{220\sqrt{2}}{13,6} = 22,87\Omega ; \quad (\text{A.9})$$

Determinação das constantes de tempo

A Figura A.16 mostra a corrente de armadura no momento do curto-circuito sem a componente de regime permanente:

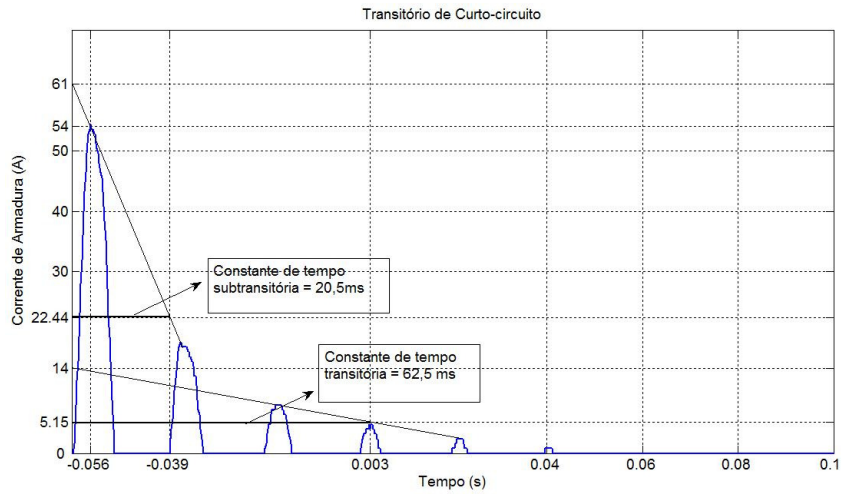


Fig A.16. Corrente de armadura sem a componente de regime permanente.

As constantes de tempo são definidas como o tempo, em segundos, necessário para que cada componente da corrente de curto-circuito reduza para $0,368 pu$ de seu valor inicial. Como pode ser observado pela Fig. A.16, as constantes de tempo subtransitória e transitória valem respectivamente:

$$T_d'' = 20,5ms ; \quad (\text{Constante de tempo Subtransitória})$$

$$T_d' = 62,5ms ; \quad (\text{Constante de tempo Transitória})$$

B. A BANCADA DE TESTES E OS ENSAIOS DA BFT.

B.1 A Bancada de testes

A Figura B.1 apresenta a bancada utilizada para realização dos testes da BFT. A bancada consiste em um sistema hidráulico de alimentação, sistema de medição, o grupo gerador e a carga elétrica.



Fig. B.1. Bancada de testes do grupo gerador.

O sistema hidráulico de alimentação é composto por dois conjuntos moto-bomba acionados, cada um deles, por um inversor de frequência. Os conjuntos moto-bomba podem ser associados na configuração série e paralelo, permitindo maior flexibilidade em termos de pressão e vazão.

O sistema de medição é composto por um medidor de vazão Endress + Hauser instalado na linha de adução do sistema, um medidor de pressão Warme instalado na entrada da BFT (recalque da bomba) e um medidor de variáveis elétricas (Homis 808).

Para a extração de potência da BFT foi utilizado um banco de resistências conectado nos terminais do gerador. A variação de carga foi realizada através da variação da excitação da máquina síncrona. Nos testes, o sistema de auto-excitação do gerador foi desligado e a excitação fornecida por uma fonte externa.

B.2 Ensaio em velocidade constante

Nos testes em velocidade constante foi utilizada a seguinte metodologia: primeiramente fixou-se uma velocidade através do ajuste do sistema de alimentação. Para cada variação de carga imposta, a vazão de alimentação foi corrigida, de modo a manter a velocidade estabelecida constante. Para cada nível de extração de potência, mantida a velocidade constante, foram tomadas as medições de pressão, vazão, corrente de campo, corrente e tensão em cada fase do gerador, potência ativa trifásica e temperatura dos enrolamentos de estator.

Além dos resultados apresentados no Capítulo 3, foram levantadas as seguintes curvas:

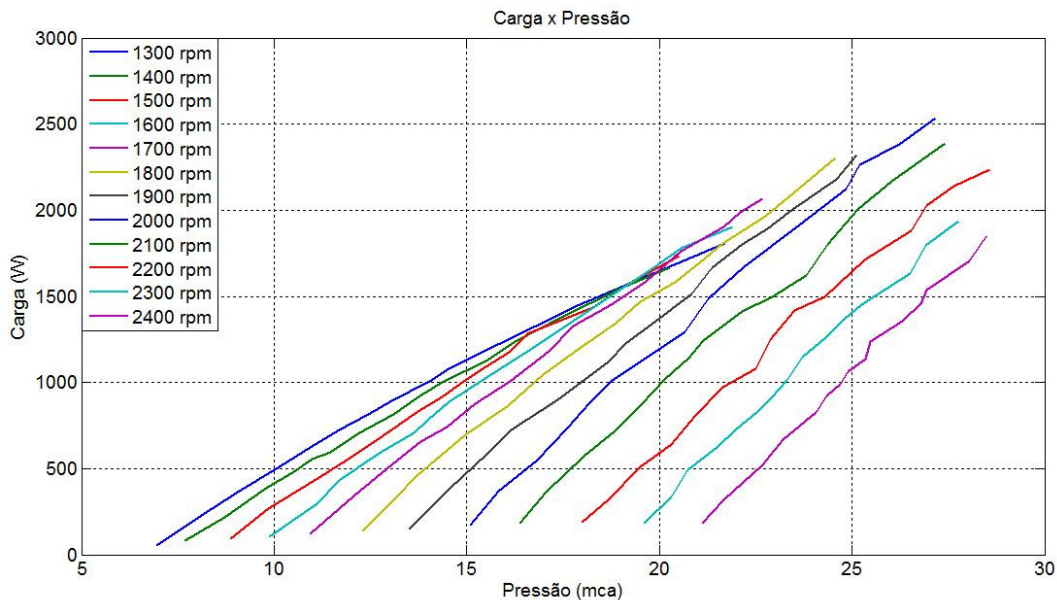


Fig. B.2. Carga x pressão para diferentes velocidades.

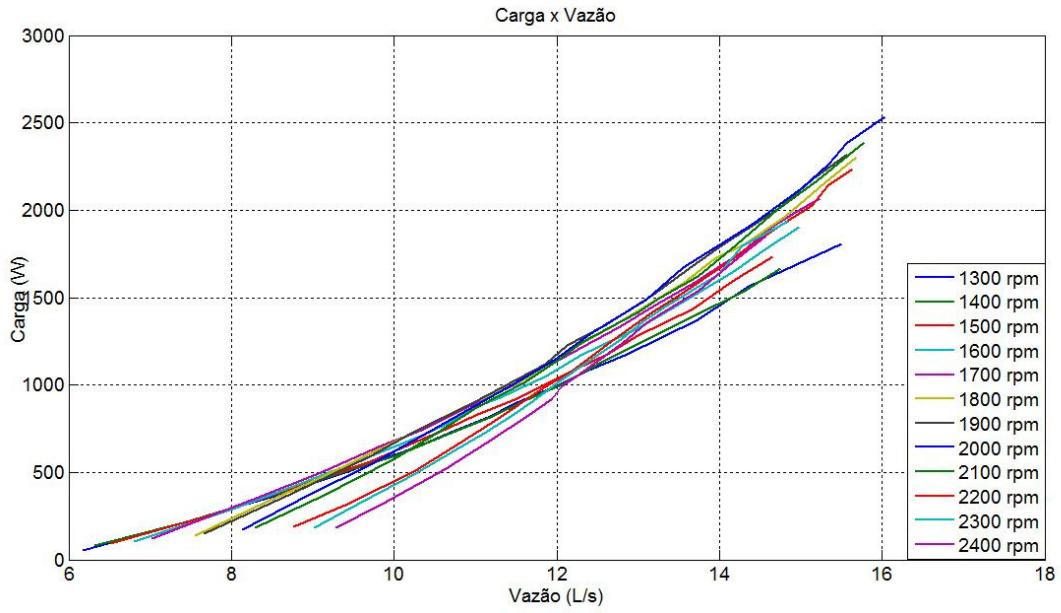


Fig. B.3. Carga \times vazão para diferentes velocidades.

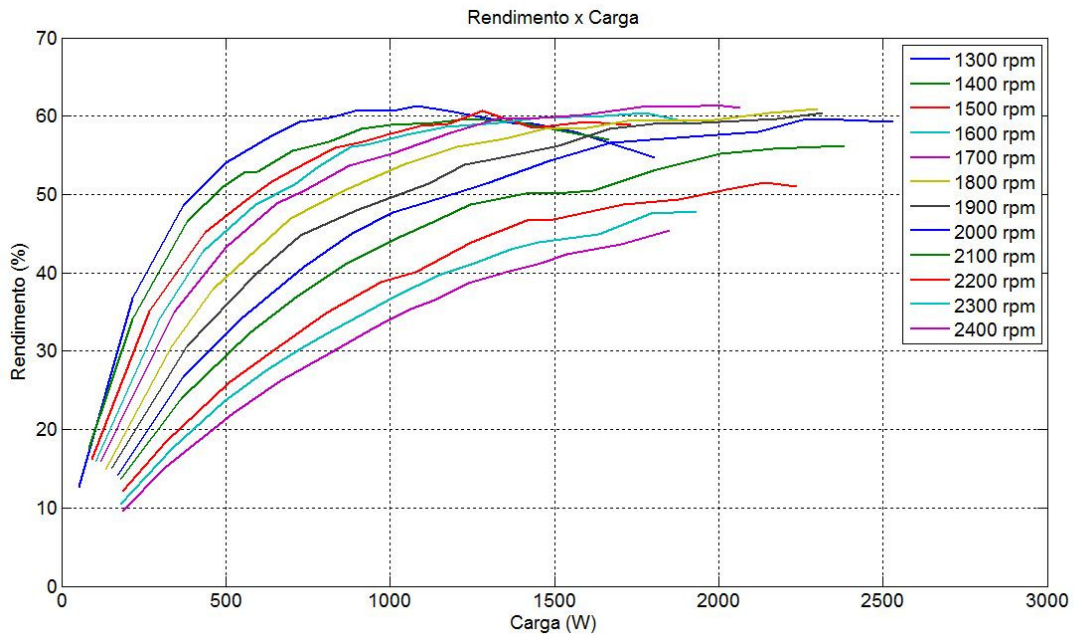


Fig. B.4. Rendimento \times carga para diferentes velocidades.

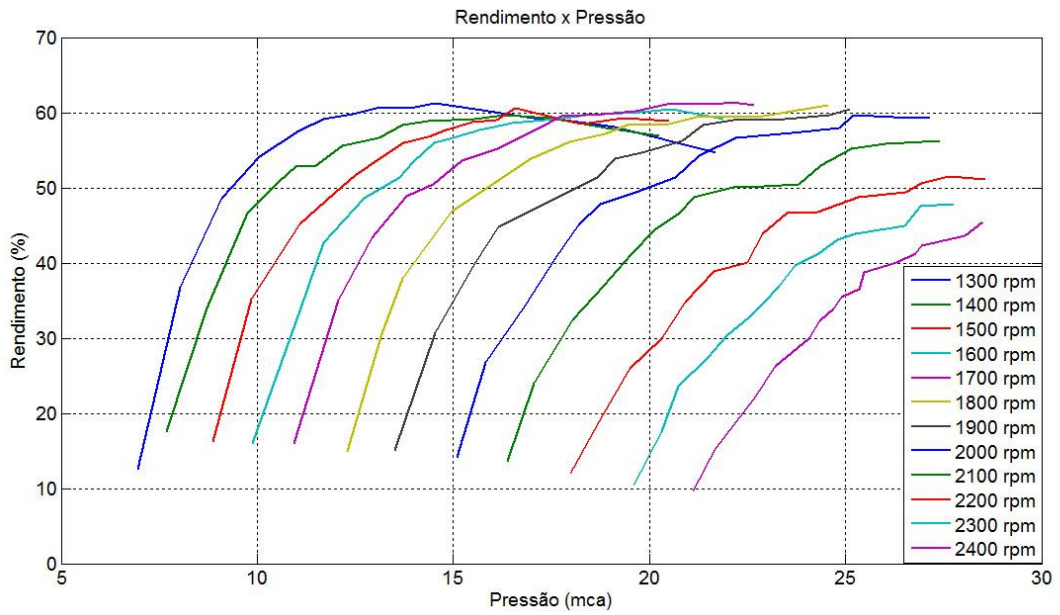


Fig. B.5. Rendimento x pressão para diferentes velocidades.

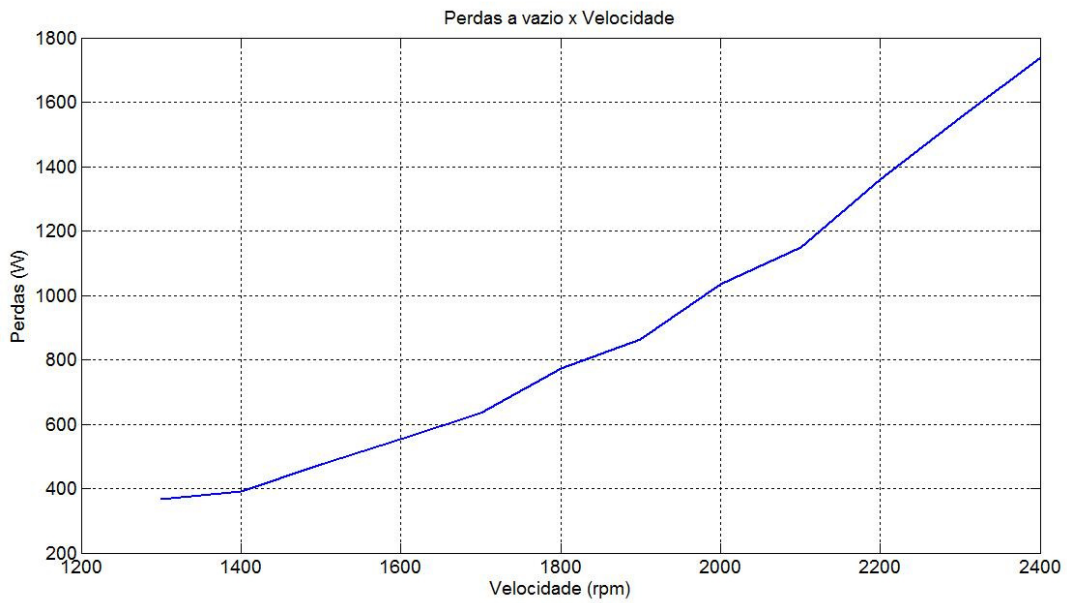


Fig. B.6. Perdas a vazio x velocidade.

B.3 Ensaio com pressão constante

Nos testes com pressão constante foi utilizada a seguinte metodologia: primeiramente fixou-se uma pressão na entrada da BFT, através do ajuste do sistema de alimentação. Para cada variação de carga imposta, o acionamento do sistema hidráulico de alimentação foi reajustado, de modo a manter a pressão estabelecida constante. Para cada nível de extração de potência, mantida a pressão constante, foram tomadas as medições de velocidade, vazão, corrente de campo, corrente e tensão em cada fase do gerador, potência ativa trifásica e temperatura dos enrolamentos de estator.

A seguir são apresentadas as curvas levantadas neste ensaio. Para as curvas a seguir, a pressão base é de $18mca$.

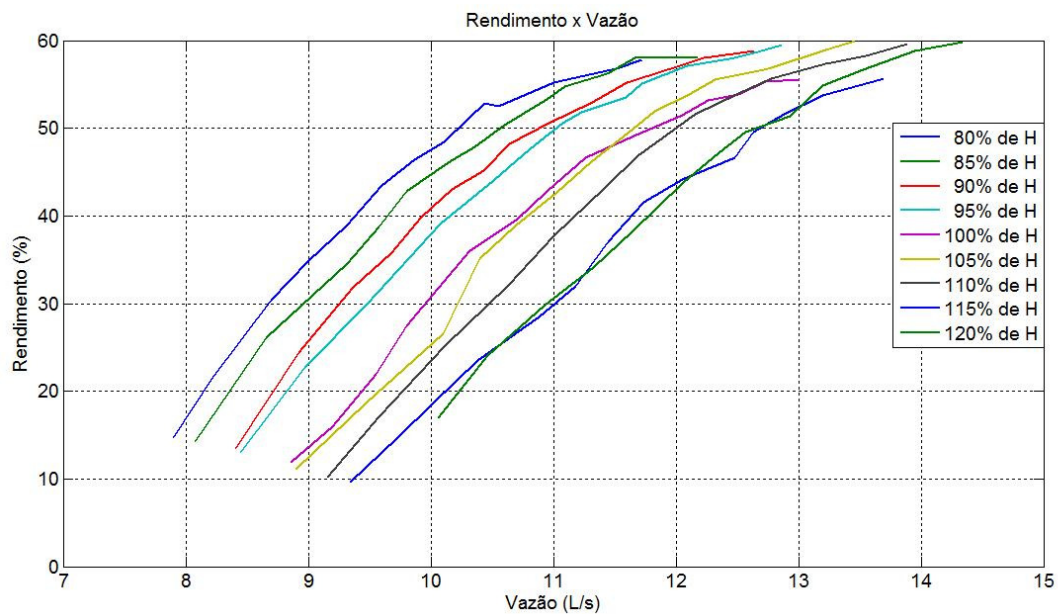


Fig. B.7. Rendimento x vazão para diferentes pressões.

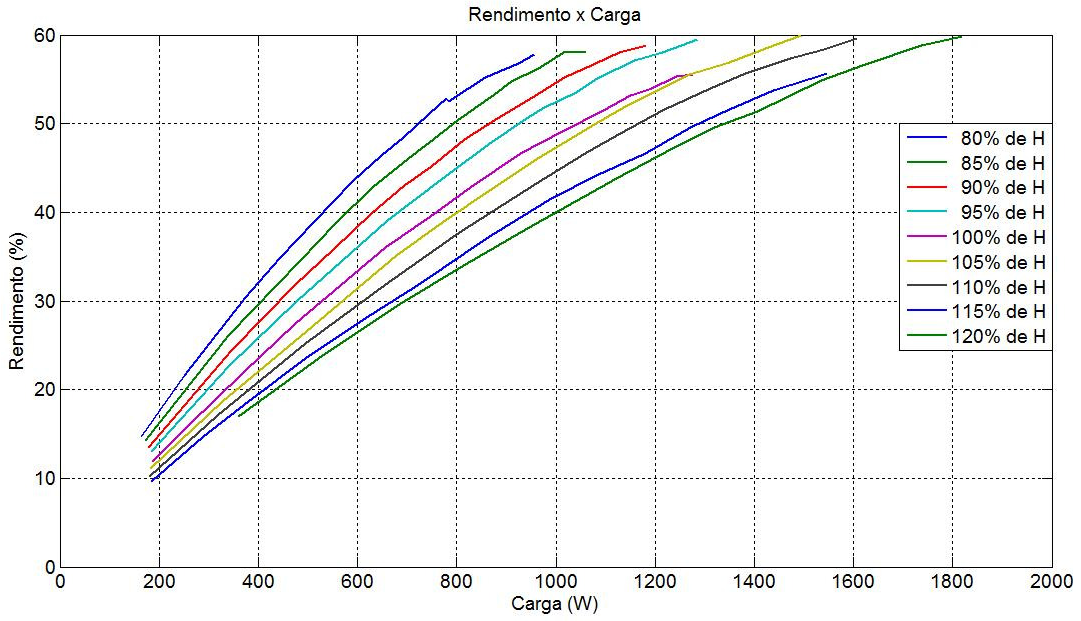


Fig. B.8. Rendimento x carga para diferentes pressões.

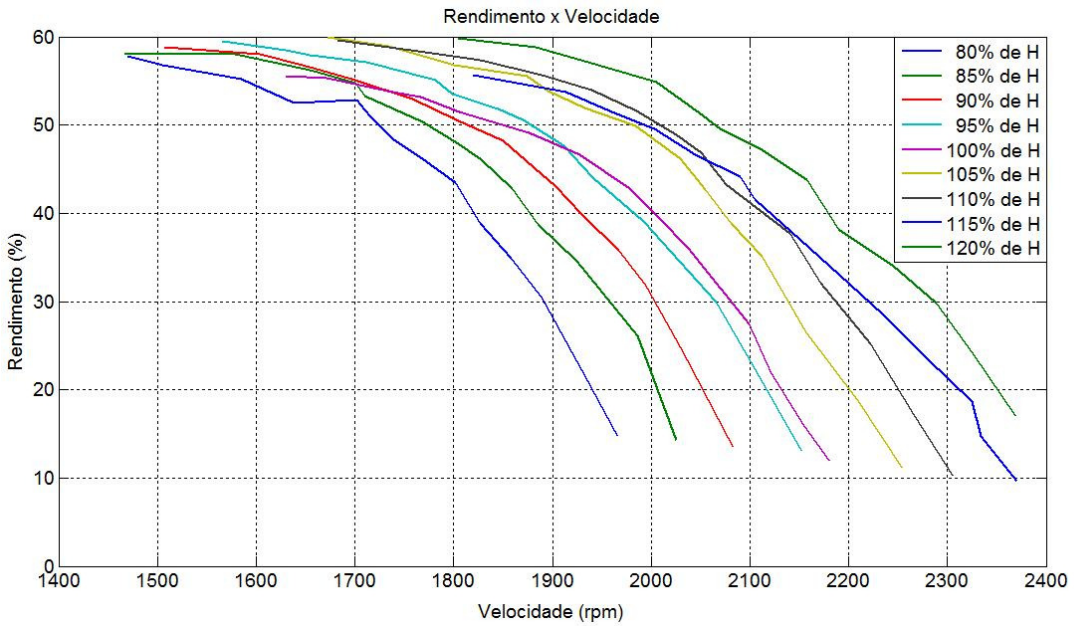


Fig. B.9. Rendimento x velocidade para diferentes pressões.

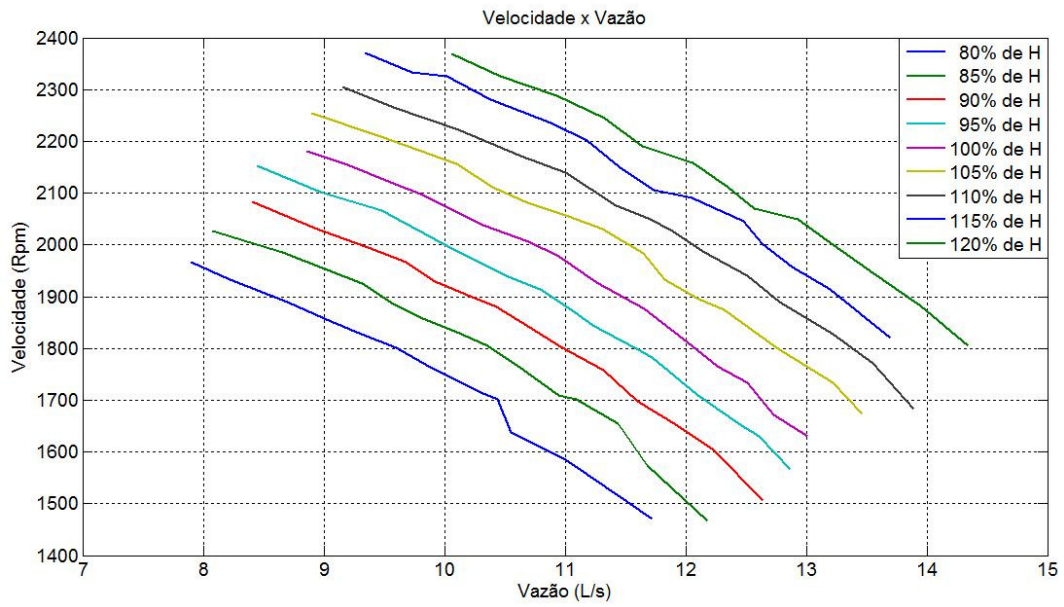


Fig. B.10. Velocidade x vazão para diferentes pressões.

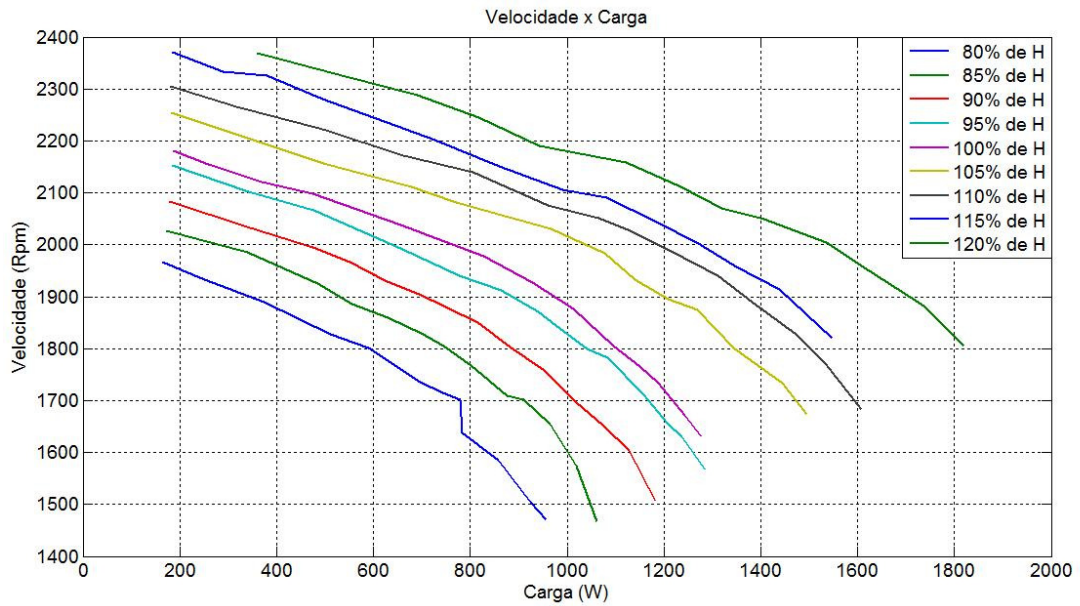


Fig. B.11. Velocidade x carga para diferentes pressões.

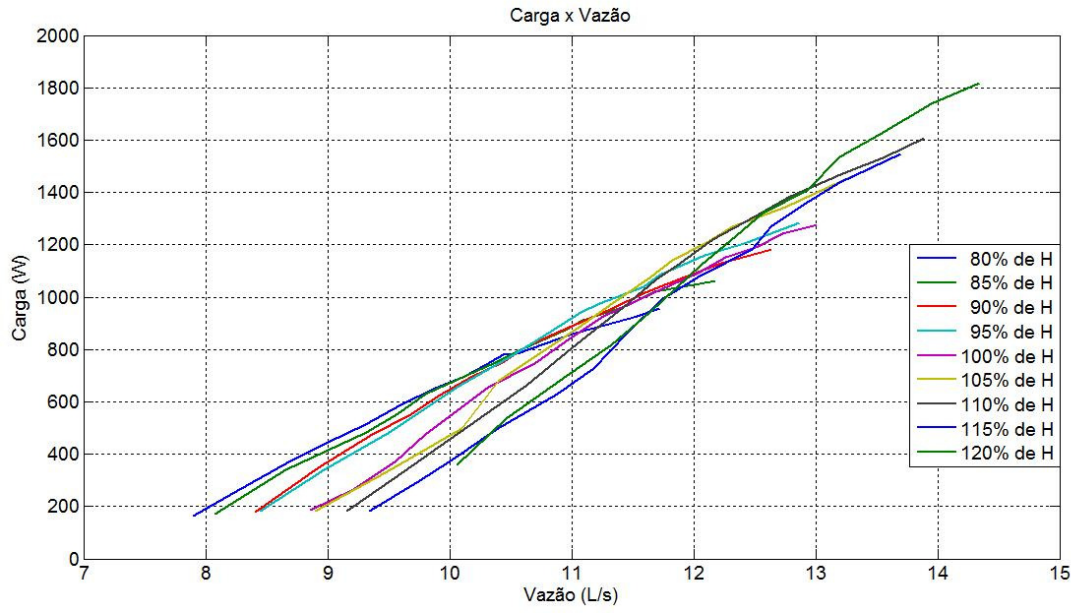


Fig. B.12. Carga x vazão para diferentes pressões.