

SÉRGIO ROBERTO DOS SANTOS

**PROPOSTA PARA IMPLANTAÇÃO DE MICROCENTRAIS
HIDRELÉTRICAS AUTOMATIZADAS COM O EMPREGO
DE GERADORES ASSÍNCRONOS**

Porto Alegre

2003

SÉRGIO ROBERTO DOS SANTOS

**PROPOSTA PARA IMPLANTAÇÃO DE MICROCENTRAIS
HIDRELÉTRICAS AUTOMATIZADAS COM O EMPREGO
DE GERADORES ASSÍNCRONOS**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-eletrônica

Porto Alegre

2003

SÉRGIO ROBERTO DOS SANTOS

**PROPOSTA PARA IMPLANTAÇÃO DE MICROCENTRAIS
HIDRELÉTRICAS AUTOMATIZADAS COM O EMPREGO
DE GERADORES ASSÍNCRONOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela Cardiff School of Engineering, University of Wales, Cardiff, País de Gales,
Reino Unido - 1996

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato Machado de Brito

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS - 1994

Prof. Dr. Roberto Homrich

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP - 2001

Prof. Dr. Anildo Bristoti

Doutor pela University of Califórnia, UC, Berkeley, Estados Unidos - 1970

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre, abril de 2003.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

O projeto PCE é o resultado da contribuição de várias pessoas que durante um certo período de tempo contribuíram para a sua realização. Neste momento oportuno gostaria de fazer-lhes uma referência como forma de expressar de forma mais eloqüente o meu agradecimento. Inicialmente quero agradecer aos meus colegas do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamento e Energia que de uma forma ou outra contribuíram para pudesse concluir este trabalho. Quero fazê-lo de um modo muito especial aos professores Ály Ferreira Flores Filho, Roberto Homrich, Luís Tiarajú dos Reis Loureiro e Gladis Bordin Schuch. Ao primeiro pela sua paciência e dedicação na orientação deste trabalho, não medindo esforços para colocar a disposição deste mestrando todos os recursos necessários, materiais e de pessoal para a implementação de uma microunidade modelo, automatizada e para a realização dos respectivos testes e ensaios; aos outros três professores pela colaboração que deram quando solicitados, pelas sugestões, pelo incentivo, enfim pelas contribuições valiosas. Não posso também deixar de citar o trabalho dedicado dos alunos bolsistas e do pessoal da oficina do LMEAE que com competência e aplicação, montaram a microcentral e ajudaram na realização dos testes; a eles, Juarez Silva dos Santos, Jefferson Lisboa Fernandes, Eduardo Hanssen Androvandi, Tiago Piazza e aos técnicos da oficina Eli Antônio da Costa e Paulo Mirapalheta, o meu agradecimento.

No âmbito da Escola de Engenharia quero agradecer ao professor Renato Machado de Brito no apoio ao projeto no que diz respeito à instrumentação e a automação; ao professor Wilson Ferreira pelo projeto da parte hidráulica da planta piloto; ao professor Fernando Schnaid pelo apoio e ao professor Anildo Bristoti pela inspiração ao projeto.

Agradeço ao grupo Eberle Mundial pela cedência dos motores elétricos utilizados no projeto e pelo apoio dos técnicos desta empresa na realização dos testes na fábrica. Um agradecimento também à Eletromotores WEG S.A., pelo prêmio outorgado a este projeto em no ano de 2001.

Outro agradecimento muito especial é direcionado ao Engenheiro Luís Carlos Lisboa Santos, pioneiro no programa de automatização de pequenas centrais hidrelétricas no âmbito da Companhia Estadual de Energia Elétrica, de cuja equipe participei na condição de projetista da parte elétrica, da parte de instrumentação e da parte relativa ao controle das unidades; isto ocorreu em quatro empreendimentos, que consistiram na reforma e na automatização de PCH's equipadas com geradores síncronos.

A implantação deste projeto contou com o apoio financeiro da FAPERGS, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul; aos dirigentes desta instituição os nossos agradecimentos.

Por fim, um agradecimento especialíssimo aos meus familiares: aos pais pelo incansável incentivo e à minha família mais próxima, filhos e esposa pelo apoio e compreensão recebidos.

SUMÁRIO

LISTA DAS ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DAS TABELAS.....	11
LISTA DOS SÍMBOLOS.....	12
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	15
1.0 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 GENERALIDADES E DEFINIÇÕES DO SETOR ENERGÉTICO RELATIVOS A PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	18
1.2 ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO RIO GRANDE DO SUL.....	20
2.0 O PROJETO PCE.....	23
2.1 DESCRIÇÃO DA PARTE HIDRÁULICA DA PLANTA PILOTO.....	25
2.2 DESCRIÇÃO DA PARTE ELÉTRICA DA PLANTA PILOTO.....	26
2.3 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA PLANTA PILOTO.....	26
2.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS MICROUSINAS SEGUNDO O PROJETO PCE.....	28
3.0 A MÁQUINA ASSÍNCRONA.....	35
3.1 A MÁQUINA ASSÍNCRONA NA OPERAÇÃO COMO MOTOR.....	36
3.2 A MÁQUINA ASSÍNCRONA NA OPERAÇÃO COMO GERADOR.....	38
3.3 DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA POTÊNCIA E DO CONJUGADO A PARTIR DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	39
4.0 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DO PROJETO PCE.....	42
4.1 DETERMINAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	43
4.1.1 MEDIDA DA RESISTÊNCIA DO ESTATOR.....	45
4.1.2 ENSAIO A VAZIO.....	47
4.1.3 ENSAIO COM O ROTOR BLOQUEADO.....	48
4.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS A PARTIR DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	50
5.0 ENSAIOS DE CAMPO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DO PROJETO PCE.....	59
5.1 ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS ELETROMECAÑICOS.....	61

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS E GRÁFICOS COMPARATIVOS DO DESEMPENHO	71
6.0 DEFINIÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL ATIVA DE UMA PCH IMPLEMENTADA COM GERADOR ASSÍNCRONO	74
6.1 POTÊNCIA DO GERADOR ASSÍNCRONO: CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS, LEGAIS E TÉCNICAS.....	74
6.2 POTÊNCIA DO GERADOR ASSÍNCRONO EM FUNÇÃO DA HIDRAULICIDADE	75
6.3 POTÊNCIA DO GERADOR ASSÍNCRONO EM FUNÇÃO DOS SEUS DADOS NOMINAIS.....	76
6.4 POTÊNCIA APROXIMADA DO GERADOR ASSÍNCRONO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL MECÂNICA DO MOTOR.....	85
7.0 PROPOSTA PARA AUTOMATIZAÇÃO DE UMA PCH IMPLEMENTADA COM GERADOR ASSÍNCRONO	87
7.1 O PROCESSO DE AUTOMATIZAÇÃO	88
7.2 PROPOSTA PARA INSTRUMENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS CONSTITUINTES DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DE ATÉ 1MW IMPLEMENTADA COM GERADOR ASSÍNCRONO.....	89
7.2.1 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS ELETRO-ELETRÔNICOS	90
7.2.2 SISTEMA DE CONTROLE	94
7.2.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	94
7.2.4 SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES	95
7.3 PROPOSTA PARA O PROGRAMA DE CONTROLE.....	96
7.3.1 LÓGICA DE PARTIDA DA UNIDADE	96
7.3.2 LÓGICA DE PARADA DA UNIDADE	97
7.4 BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE A AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS NOVAS.....	105
7.5 FATOS RELACIONADOS COM A AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS NO BRASIL	106
7.5.1 AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS ANTIGAS NO RIO GRANDE DO SUL.....	107
7.5.2 AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS ANTIGAS NO ESTADO DO PARANÁ.....	108
8.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	109
REFERÊNCIAS	112

LISTA DAS ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Vista geral das instalações da planta piloto do projeto PCE	24
Figura 2	Circuito hidráulico e equipamentos principais do Projeto PCE	25
Figura 3	Diagrama elétrico e de instrumentação do projeto PCE.....	27
Figura 4	Comparação entre o custo dos motores e geradores elétricos	31
Figura 5	Corte transversal de uma máquina assíncrona [9].....	36
Figura 6	Circuito equivalente da máquina assíncrona por fase [2][5]	38
Figura 7	Circuito equivalente da máquina assíncrona com o resistor, no circuito do rotor, equivalente à potência mecânica no eixo	40
Figura 8	Vista de uma máquina assíncrona sendo testada na estrutura do projeto PCE	43
Figura 9	Ligação interna do motor para determinação da temperatura do estator através da variação da resistência ôhmica	46
Figura 10	Circuito equivalente do gerador da planta piloto do projeto PCE.....	50
Figura 11	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Conjugado e potência mecânica para escorregamento no intervalo $[1,-1]$	54
Figura 12	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Corrente eficaz e fator de potência para escorregamento no intervalo $[1,-1]$	54
Figura 13	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Potência ativa elétrica e potência reativa para escorregamento no intervalo $[1,-1]$	55
Figura 14	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Rendimento e potência ativa elétrica para escorregamento no intervalo $[1,-1]$	55
Figura 15	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Conjugado e potência mecânica na região operacional.....	57
Figura 16	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Corrente e fator de potência na região operacional.....	57
Figura 17	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Potência ativa e potência reativa na região operacional.....	58
Figura 18	Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Rendimento e potência ativa na região operacional.....	58
Figura 19	Topologia do sistema de medição do projeto PCE.....	61
Figura 20	Vista superior da Turbina Francis	62
Figura 21	Arranjo para aferição da mesa de conjugado.....	64

Figura 22	Curva de calibração da mesa de conjugado.....	64
Figura 23	Tela de comando e supervisão do Projeto PCE.....	68
Figura 24	Tela de registro das variáveis desenvolvida para o projeto PCE.....	69
Figura 25	Versão atual da tela de registro das variáveis desenvolvida para o projeto PCE.....	70
Figura 26	Potência ativa calculada e medida em relação à velocidade	72
Figura 27	Fator de potência calculado e medido em relação à velocidade.....	72
Figura 28	Rendimento calculado e medido em relação à velocidade.....	73
Figura 29	Potência reativa calculada e medida em relação à velocidade	73
Figura 30	Corrente e potência reativa teórica em função da velocidade do gerador assíncrono de 2CV, 8 pólos montado na estrutura do Projeto PCE	77
Figura 31	Corrente e potência reativa em função da velocidade do gerador assíncrono obtida por medições realizadas em uma máquina de 2CV, 8 pólos montado na estrutura do Projeto PCE	77
Figura 32	Fluxo principal de corrente na máquina assíncrona na operação como gerador.....	78
Figura 33	Diagramas fasoriais da máquina assíncrona na operação como motor (a) e gerador (b) [1]; em (c) visualização da variação da tensão interna E_l	79
Figura 34	Circuito equivalente da máquina assíncrona simplificado em função do funcionamento no entorno negativo da velocidade síncrona.....	81
Figura 35	Triângulo das potências para a máquina assíncrona no entorno negativo do escorregamento.....	82
Figura 36	Relação entre corrente e potência ativa em função da velocidade	85
Figura 37	Interconexão entre os elementos principais de uma PCH	90
Figura 38	Diagrama de blocos da lógica de pré-condições e condições de partida.....	99
Figura 39	Diagrama de blocos da lógica de fechamento do disjuntor	100
Figura 40	Diagrama de blocos da lógica de tomada de carga.....	101
Figura 41	Diagrama de blocos da lógica de parada	102
Figura 42	Diagrama de blocos da lógica de alarmes mecânicos.....	103
Figura 43	Diagrama de blocos da lógica de alarmes elétricos.....	104

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1	Classificação das PCHs quanto à potência e quanto à queda de projeto [10]	19
Tabela 2	Energia Elétrica no Brasil [29]	20
Tabela 3	Potência das usinas, hidrelétricas e termelétricas instaladas no Estado do Rio Grande do Sul [10][24][30].	21
Tabela 4	Potência nominal de motores elétricos assíncronos e de geradores síncronos encontrados no mercado. Fonte: Eletromotores WEG S.A.	29
Tabela 5	Custo e equivalência dos motores e geradores elétricos. Fonte: Eletromotores WEG S.A. – fev/03.....	31
Tabela 6	Características Técnicas da máquina assíncrona instalada na estrutura do projeto PCE [31]	42
Tabela 7	Características operacionais da máquina do projeto PCE [31].....	42
Tabela 8	Relação dos instrumentos de laboratório utilizados nos ensaios a vazio e rotor bloqueado.....	44
Tabela 9	Medida da resistência do estator, por fase.....	45
Tabela 10	Variação da resistência do estator em função da temperatura.....	46
Tabela 11	Resultado do ensaio a vazio.....	47
Tabela 12	Resultado do ensaio com o rotor travado	48
Tabela 13	Resultado da simulação executada sobre o circuito equivalente do gerador do Projeto PCE. A linha em destaque representa a situação de corrente nominal	52
Tabela 14	Resultado da simulação executada sobre o circuito equivalente do gerador do Projeto PCE, considerando velocidades operacionais. A linha em destaque representa as condições nominais.....	56
Tabela 15	Características técnicas do CLP utilizado no projeto PCE [34]	59
Tabela 16	Características técnicas do módulo de E/S [34]	60
Tabela 17	Resultado da calibração da mesa de conjugado.....	63
Tabela 18	Resultados obtidos com o gerador instalado na planta piloto do Projeto PCE	71
Tabela 19	Dados para a avaliação da potência nominal de um gerador assíncrono.....	83
Tabela 20	Relação entre a potência ativa do gerador x potência mecânica do motor, para motores de várias potências nominais [1].....	86
Tabela 21	Custos de implantação de microcentrais hidroelétricas [25].....	105

LISTA DOS SÍMBOLOS

N_s	velocidade angular síncrona em rpm
N	velocidade angular do rotor em rpm
p	número de pólos do motor
f	freqüência da tensão aplicada ao estator em hertz (Hz)
s	escorregamento
x_m	reatância de magnetização do motor em ohms (Ω)
r_m	resistência representativa das perdas no núcleo em ohms (Ω)
V_1	tensão eficaz aplicada ao estator em volts (V)
\mathbf{V}_1	fasor da tensão aplicada ao estator em volts (V)
E_1	tensão eficaz induzida no estator pelo fluxo magnético do rotor em volts (V)
\mathbf{E}_1	fasor da tensão induzida no estator pelo fluxo magnético do rotor em volts (V)
sE_2	tensão eficaz induzida no rotor pelo fluxo do estator em volts (V)
T	conjugado em Newton-metro (Nm)
P_{mec}	potência mecânica (no eixo) em watts (W)
r_1	resistência do enrolamento do estator por fase em ohms (Ω)
x_1	reatância de dispersão do estator por fase em ohms (Ω)
r_2	resistência representativa das perdas por efeito Joule no rotor em ohms (Ω)
x_2	reatância de dispersão do rotor em ohms (Ω)
ω	velocidade angular em radianos por segundo (rad/s)
ω_s	velocidade angular síncrona em radianos por segundo (rad/s)
r_2/s	resistência representativa da potência ativa no circuito do rotor em ohms (Ω)
R_{t0}	resistência de um condutor em uma temperatura considerada inicial em um processo em ohms (Ω)
R_t	resistência de um condutor em uma temperatura considerada final em um processo em ohms (Ω)
t_0	temperatura considerada inicial em um processo em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
t	temperatura considerada final em um processo em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
P_1	potência ativa dissipada no enrolamento do estator, por fase em watts (W)
I_1	corrente eficaz de linha no circuito equivalente monofásico em ampères (A)
I_m	corrente eficaz média de linha em ampères (A)
I_0	corrente eficaz de excitação do motor em ampères (A)

I_2	corrente eficaz no circuito do rotor em ampères (A)
\mathbf{I}_2	fasor da corrente no circuito do rotor em ampères (A)
I_P	corrente de partida em ampères (A)
I_N	corrente eficaz nominal em ampères (A)
I_R, I_S, I_T	correntes eficazes de linha trifásicas em ampères (A)
E_{RS}, E_{RT}, E_{ST}	tensões eficazes de linha trifásicas em volts (V)
Z_{vazio}	impedância do circuito equivalente no ensaio a vazio em ohms (Ω)
P_{rot}	perdas rotacionais em watts (W)
P_F	perdas por fase em watts (W)
Z_2	módulo da impedância equivalente do circuito do rotor em watts (W)
\mathbf{Z}_2	fasor da impedância equivalente do circuito do rotor em watts (W)
\mathbf{Z}_m	fasor correspondente à reatância de magnetização da máquina assíncrona em ohms (Ω)
Z_{TH}	módulo da impedância Thevenin em ohms (Ω)
\mathbf{Z}_{TH}	fasor da impedância Thevenin em ohms (Ω)
R_{TH}	módulo da componente resistiva da impedância Thevenin em ohms (Ω)
\mathbf{R}_{TH}	fasor da componente resistiva da impedância Thevenin em ohms (Ω)
$Z_{travado}$	módulo da impedância do circuito equivalente no ensaio com o rotor travado em ohms (Ω)
$R_{travado}$	módulo da componente resistiva de $Z_{travado}$ em ohms (Ω)
$X_{travado}$	módulo da componente reativa indutiva de $Z_{travado}$ em ohms (Ω)
P_h	potência mecânica entregue na entrada da turbina hidráulica em watts (W)
Q_v	vazão de água turbinada em metros cúbicos por hora (m^3/h)
H_l	altura de queda líquida em metros (m)
Q	potência reativa capacitiva em um instante qualquer em volt-ampères reativos (VAr)
Q_0	potência reativa capacitiva quando $s \cong 0$ em volt-ampères reativos (VAr)
Q_T	potência reativa capacitiva considerando as três fases em volt-ampères reativos (VAr)
S_T	potência aparente considerando as três fases em volt-ampères (VA)

RESUMO

Este trabalho insere em seu conteúdo dois propósitos: o primeiro é o de apresentar uma microusina experimental, uma planta piloto de uma microcentral hidrelétrica automatizada, que foi montada para ser utilizada como laboratório de pesquisas do desempenho de máquinas assíncronas de até 5CV operando como geradores de energia elétrica. Para isso, apresentamos todos os equipamentos com as suas respectivas especificações, a descrição do funcionamento e documentos gerais do projeto. O segundo é fazer uma revisão do uso da máquina assíncrona, funcionando como gerador de energia elétrica ligada à rede de distribuição local. Estudamos e apresentamos algumas conclusões sobre o comportamento deste tipo de gerador, no contexto de uma microcentral hidrelétrica automatizada, em situações operacionais onde se pode contemplar máxima potência ou máximo fator de potência ou, então, máximo rendimento. Realizamos análises teóricas considerando o circuito equivalente do gerador instalado na microcentral; foram geradas curvas das grandezas envolvidas no processo de geração de energia elétrica, e estes resultados foram comparados com as medidas fornecidas pelas leituras dos instrumentos, enquanto a máquina no ambiente da microusina experimental, era submetida à situação de carga zero até a máxima.

Com os resultados colhidos procuramos estabelecer uma relação entre a potência mecânica nominal de motores assíncronos com a potência ativa nominal deste tipo de máquina operando como gerador.

Palavras-chave: Gerador assíncrono, geração alternativa de energia elétrica, automatização de pequenas usinas.

ABSTRACT

This work offers in its content two purposes: the first is the presentation of an experimental micro powerplant, a pilot plant of an automated hydroelectric micro powerplant that was conceived to be used as laboratory of research on the use of asynchronous generators of up to 5CV. It will be presented the equipments with their respective specifications, the description of the operation and the main document of the project. The second purpose is the study and a revision of the use of the asynchronous motor as generator of electric energy connected to the power grid. We studied and will present some conclusions about the behavior of this type of generator, under the context of an automated hydroelectric micro power plant in operational situations that show maximum electric power, or maximum power factor or then maximum generator efficiency. Theoretical analyses were carried out considering the equivalent circuit of the asynchronous generator; they were based upon simulation, which produced curves of the quantities involved in the process, and these results were compared to the measured ones when the machine was submitted from zero to full load.

With the results we establish a relationship between the nominal mechanical power of an asynchronous motors and the nominal active power of the same machine when operating as generator.

Keywords: Asynchronous generator, alternative generation of electric energy, automatization of small electric power plants.

1.0 INTRODUÇÃO

O emprego da máquina de indução como gerador de energia elétrica assíncrono não é um fato novo. A bibliografia clássica apresenta o assunto de uma forma em geral muito vaga, ressaltando, entretanto, a maior característica destas máquinas que é a possibilidade da geração de energia elétrica com velocidade variável. A aplicação destas máquinas em conjunto com turbinas eólicas é um exemplo típico desta possibilidade.

Nas últimas décadas muitos trabalhos foram realizados abordando diversos aspectos relativos a esta forma de gerar energia elétrica. Por exemplo, a viabilidade de redução dos custos de implantação de uma microcentral [12], estudos envolvendo o funcionamento da máquina em operação isolada [13] são os resultados de trabalhos de pesquisas desenvolvidos nesta universidade. Ainda dentro do território brasileiro, outras universidades têm se destacado em pesquisas neste assunto. Citamos a Universidade Federal de Santa Maria, a Universidade de São Paulo e o CERPCH, Centro Nacional de Referência em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos. O CERPCH tem o objetivo de promover o uso dos pequenos potenciais hidráulicos, como fonte de energia, para geração de eletricidade e outros usos; a sua administração funciona na EFEI – Escola Federal de Engenharia, na cidade de Itajubá, MG. No âmbito internacional a IEE em “Proceedings Generation, Transmission and Distribution” e a “IEEE Transactions of Energy Conversion”, apresentam trabalhos relacionados com o gerador assíncrono; pode-se, então, concluir que o tema é relevante e como consequência, ele agrega a propriedade de provocar o interesse no desenvolvimento de novas pesquisas.

No estágio tecnológico atual, o processo de geração de energia elétrica é constituído fundamentalmente por máquinas síncronas conectadas em paralelo em um barramento comum, que constitui o sistema interligado, cuja missão é o atendimento de determinadas regiões. No Brasil, por exemplo, o sistema interligado nacional é formado pelas empresas da região Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, o que equivale a 96,6% da produção brasileira de energia elétrica [29].

Em se tratando de investimento em produção de energia elétrica, a adição de geradores assíncronos de potências relativamente baixas à rede de distribuição tem vantagens

e desvantagens em relação aos geradores síncronos também de baixas potências; preliminarmente citamos como vantagens o menor custo na implantação e operação da usina e a robustez da máquina; como desvantagens, o baixo fator de potência [10]; estas questões serão mais detalhadas no próximo capítulo.

O objetivo desta dissertação é o de fazer uma revisão sobre o comportamento da máquina assíncrona operando como gerador; apresentaremos condições que teoricamente otimizam a potência da máquina sob o ponto de vista de vários parâmetros e compararemos os resultados teóricos com os experimentais obtidos em laboratório; pretendemos fundamentalmente relacionar as grandezas nominais e teóricas da máquina assíncrona na função de motor com as medidas obtidas em laboratório sobre a mesma na função de gerador, com a finalidade de definir o gerador que pode ser especificado a partir de determinado motor de indução.

Uma questão interessante é instalar o gerador assíncrono no ambiente de uma pequena central hidrelétrica automatizada. Como resultado também do projeto de pesquisa apresentamos uma proposta que descreve um sistema constituído por equipamentos eletromecânicos e um software que permite a instalação de um gerador assíncrono, em uma microcentral hidrelétrica automatizada e desassistida, interligada à rede de distribuição local.

Para a realização deste trabalho foi montada nas instalações do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia, (LMEAE), da UFRGS, uma planta piloto de microcentral hidroelétrica automatizada, que foi inserida dentro de um programa o qual chamamos de Projeto PCE e que faz parte do trabalho de pesquisa desta dissertação.

Visando atingir os objetivos propostos, este trabalho está dividido em oito capítulos, a saber:

Capítulo 1 - apresenta motivação e os objetivos deste trabalho;

Capítulo 2 - visão geral do Projeto PCE;

Capítulo 3 – aborda assuntos relacionados com a máquina assíncrona, na função motor e na função gerador; partindo do circuito elétrico equivalente, apresentaremos as equações dele derivadas;

Capítulo 4 - apresenta os resultados das simulações realizadas, considerando o circuito equivalente do gerador assíncrono do projeto PCE. São apresentadas as curvas referentes à potência ativa, torque, corrente, rendimento e fator de potência;

Capítulo 5 - contém os resultados dos experimentos e testes realizados, estando a máquina instalada na planta piloto (Projeto PCE); as grandezas medidas são potências ativa e

reativa, tensão, corrente, conjugado, rotação e vazão, com as quais calculamos fator de potência e rendimento;

Capítulo 6 - este capítulo envolve um dos objetivos desta dissertação que é o de apresentar os fatores de ordem regulatória e técnica que permitam determinar a potência nominal que pode ser atribuída a um gerador assíncrono;

Capítulo 7 - apresenta uma visão geral de aspectos relacionados com uma microcentral hidrelétrica e também insere uma proposta para automatização de microusinas hidrelétricas implementadas com geradores assíncronos que é o outro objetivo deste trabalho;

Capítulo 8 - é a síntese dos objetivos do trabalho que serão plenamente alcançados se os resultados e as conclusões a que chegamos, mesmo que parcialmente, possam ser utilizados de uma forma mais ampla pela sociedade como uma contribuição para a definição da potência de máquinas assíncronas, que irão operar como geradores de energia elétrica em usinas automatizadas e desassistidas.

Na próxima seção apresentamos alguns tópicos a respeito de pequenas centrais hidroelétricas e definições relacionadas com as instituições geradoras de energia.

1.1 GENERALIDADES E DEFINIÇÕES DO SETOR ENERGÉTICO RELATIVO A PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

A Constituição da República Federativa do Brasil, promulgada em 5 de outubro de 1988, em seu artigo 20, inciso VIII estabelece como bem da União, os potenciais de energia hidráulica. O artigo 21, inciso XII, define como sendo de competência da União: Explorar, diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão:.....b) os serviços e instalações de energia elétrica e o aproveitamento energético dos cursos de água, em articulação com os Estados onde se situam os potenciais hidroenergéticos;

Em 26 de dezembro de 1996, através da lei nº. 9.427 é criada a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. É uma autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica em todo o território nacional.

A Lei nº 9.648, de 27/05/98, autoriza a dispensa de licitações para empreendimentos hidrelétricos de até 30 MW de potência instalada, para *autoprodutor*, isto é, pessoa física ou empresas reunidas em um consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo e *Produtor Independente*, que significa pessoa física ou empresas reunidas em um consórcio que receba concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia

produzida, por sua conta e risco. A concessão será outorgada mediante autorização, até esse limite de potência, desde que os empreendimentos mantenham as características de Pequena Central Hidrelétrica.

A Resolução da ANEEL 394, de 04/12/98, estabelece que hoje, os aproveitamentos com características de PCH são aqueles que têm potência entre 1 e 30 MW e área inundada até 3,0 km², para a cheia centenária.

Uma definição mais acurada envolvendo pequenas, mini e microcentrais hidrelétricas é definida pela Eletrobrás [10] segundo a tabela 1.

Uma usina hidrelétrica é dita de acumulação quando possui um reservatório de tamanho suficiente para acumular água na época das cheias para uso na época da estiagem, dispondo assim de uma vazão definida, maior que a vazão mínima natural [28]; desta forma, uma capacidade mínima de geração de energia elétrica em determinados períodos pode ser garantida; é a *energia firme*. Se a usina não tiver esta propriedade ela poderá ser uma *usina a fio d'água* [26][28], que são aproveitamentos energéticos que, em geral, possuem uma capacidade de armazenamento muito pequena e somente podem utilizar a água à medida que esta chega até ela.

Tabela 1 - Classificação das PCHs quanto à potência e quanto à queda de projeto [10]

Classificação das Centrais	Potência P (kW)	Queda de Projeto - H _d (m)		
		Baixa	Média	Alta
<i>Micro</i>	P < 100	H _d < 15	15 < H _d < 50	H _d > 50
<i>Mini</i>	100 < P < 1.000	H _d < 20	20 < H _d < 100	H _d > 100
<i>Pequenas</i>	1.000 < P < 30.000	H _d < 25	25 < H _d < 130	H _d > 130

1.2 ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO RIO GRANDE DO SUL

Nas últimas décadas, o setor de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil constituía-se em um monopólio estatal. O modelo estava centrado em grandes empresas regionais as quais interessava, em termos de geração de energia elétrica, o aproveitamento dos grandes potenciais hidrelétricos, termelétricos e termonucleares; isto devido às dimensões do mercado e ao crescimento da demanda que estas empresas deveriam atender. No final de 2002, por exemplo, o Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro [29] informou que a capacidade geradora instalada era de 72.843 MW, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Energia Elétrica no Brasil [29]

Tipo de Usina	Potência Instalada (MW)
<i>Hidrelétricas</i>	63.834
<i>Térmicas convencionais</i>	7.002
<i>Nuclear</i>	2007
TOTAL	72.843

No Rio Grande do Sul, o desenvolvimento da política sócio-econômica do governo estadual no setor de energia elétrica trouxe como consequência a criação em 1963 da Companhia Estadual de Energia Elétrica (Lei estadual nº. 4136 de 13/09/1961). A execução da política energética através desta empresa resultou na construção de grandes usinas hidrelétricas e termelétricas, na interligação de todas as usinas e na expansão do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica em grande parte do território do Rio Grande do Sul.

A integração do sistema gaúcho com o sistema da Eletrobrás permite uma transferência de potência na ordem de 3.900 MW ao Rio Grande do Sul [24], que atende a carência de geração própria do nosso Estado e representa até 60% da nossa demanda de energia elétrica. Uma idéia bem clara da potência disponível para atender a demanda do Rio Grande do Sul nos dias de hoje pode ser extraída da afirmação feita pelo presidente da CEEE e publicada pelo jornal Folha de São Paulo em 4 de fevereiro de 2003, segundo a qual, a demanda máxima de potência despachada por esta empresa até aquele momento havia sido de

4.098 MW com uma reserva na faixa de 15 a 20%. A tabela 3 mostra a capacidade do parque gerador instalado em solo gaúcho.

Com o passar do tempo, a exemplo do que ocorre hoje em muitos países europeus [38], o interesse de investidores privados na geração de energia elétrica em nosso país será grande [10]. Estão ocorrendo mudanças institucionais como a privatização das empresas do Setor Elétrico, o investimento das empresas privadas em co-geração e, sobretudo, com as mudanças na legislação no que diz respeito à produção e comercialização de energia elétrica.

Tabela 3 - Potência das usinas, hidrelétricas e termelétricas instaladas no Estado do Rio Grande do Sul [10][24][30]

Empresa	Nº. de usinas	Potência Instalada (MW)
<i>C.E.E.E.</i>	19	894,15
<i>C.G.TE.</i>	3	490
<i>COOPERATIVAS</i>	5	5,25
<i>ELETROSUL</i>	1	226
<i>RGE</i>	4	3,3

As novas regras, que deverão entrar em vigor a partir de 2005, prevêem a possibilidade de qualquer consumidor, independente do seu nível de demanda ou tensão, escolher a sua empresa fornecedora de energia elétrica [28]. Resta às PCHs, micros, mini e pequenas reunirem-se na forma de cooperativas de geração de energia elétrica para então, com uma parcela adequada de *energia firme*, atrair consumidores e desta forma participar da fatia do mercado de energia ativa. Outra possibilidade é, graças ao relativo e inerente baixo fator de potência dos geradores assíncronos, participar do mercado de energia elétrica como *serviço anciliar*, isto é, disponibilizando ao Operador Nacional do Sistema, suporte de potência reativa para compensar o caráter capacitivo das linhas de transmissão.

Dentro do espírito de facilitar a implantação de pequenos aproveitamentos, a ELETROBRÁS instituiu, em 1996, o Programa Nacional de Pequenas Centrais Elétricas – PNCE [10], com o objetivo de viabilizar a implantação de usinas de geração elétrica, de pequeno porte, de forma a suprir carências de energia em todo o território nacional, com eficiência, relação custo/benefício otimizada e com tecnologia que permita o estudo, o

projeto, a construção, a instalação, a operação e a manutenção dessas centrais de forma segura e acessível. O Programa possui uma Política Operacional para Financiamento de Projetos que define questões tais como a origem e destinação dos recursos, seleção e prioridade dos projetos, habilitação de empresas, condições financeiras e de liberação de recursos [10].

Afirma-se muitas vezes que o investimento em pequenas usinas representa também a redução do impacto ambiental causado principalmente pela vasta inundação de terras ocasionada pela implantação das grandes usinas hidrelétricas que podem comprometer a flora e a fauna de uma região, além de indisponibilizar o solo para outras atividades econômicas como a agricultura e a pecuária. Deve-se, entretanto, considerar que a criação de lagos artificiais não significa necessariamente alto impacto ambiental e diminuição das oportunidades de trabalho, pois permite o desenvolvimento de outras atividades econômicas como a piscicultura, a pesca e atividades recreativas relacionadas com a náutica que enriquecem a diversidade econômica e podem representar um importante fator de fomento de outros segmentos de interesse social como, por exemplo, o do turismo. Do exposto pode-se concluir que, se investimentos em novos empreendimentos hidrelétricos fizerem parte de um planejamento amplo e integrado com os vários setores da sociedade, o resultado será o desenvolvimento de outras atividades econômicas além dos benefícios à sociedade em função da maior disponibilidade de energia elétrica.

2.0 O PROJETO PCE

Em setembro de 1996, a UFRGS, através do Departamento de Engenharia Elétrica, com o apoio da FAPERGS, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, iniciou estudos visando determinar a viabilidade técnica e econômica para implementação de um modelo para microcentrais hidroelétricas automatizadas, considerando os custos de implantação, operação e manutenção. Originava-se o Projeto PCE.

O primeiro resultado do projeto PCE foi a montagem de uma planta piloto de microcentral hidrelétrica constituída dos seguintes equipamentos eletromecânicos: uma turbina Francis de eixo horizontal, um gerador assíncrono trifásico, equipamentos de medição, controle, proteção e manobra associados, adequados a uma pequena central hidrelétrica. Para este sistema foi desenvolvido um software de controle portátil adaptável em CLP's comerciais e um software de supervisão e telecomando que funciona em ambiente Windows; a comunicação que foi implementada no projeto entre o CLP e o microcomputador é realizada através da interface serial e linha física do tipo par trançado. A implementação do Projeto PCE representa estrutura completa para a análise do desempenho de geradores assíncronos de até 5CV. O ambiente criado reproduz as mesmas condições encontradas em uma planta real acrescida de um conjunto de instrumentos de processo com transmissão das medidas que, considerando as constantes de tempo envolvidas no processo de geração hidrelétrica, permite medições simultâneas de todas as variáveis e o respectivo registro com vistas a análises dinâmica ou em regime permanente; o circuito hidráulico permite um fluxo de água à turbina com vazões variáveis emulando várias situações operacionais, figura 1.

Os benefícios esperados em função da implantação de microcentrais hidroelétricas segundo o modelo desenvolvido no Projeto PCE são os seguintes:

- a) Alimentação com potência ativa da carga local, reduzindo ou mesmo eliminando a parcela correspondente na conta mensal de energia elétrica, emitida pela concessionária;
- b) Melhoria e estabilidade do valor da tensão, em função da menor queda de tensão na rede de distribuição local, visto que o fluxo de corrente correspondente à potência ativa é menor.



Figura 1 - Vista geral das instalações da planta piloto do projeto PCE

2.1 DESCRIÇÃO DA PARTE HIDRÁULICA DA PLANTA PILOTO

O sistema hidráulico funciona em circuito fechado e é constituído pelos seguintes equipamentos: reservatório de água, conjunto motobomba, tubulação, instrumentação e turbina, figura 2. O distribuidor, dispositivo montado no conjunto da turbina, é uma espécie de válvula que controla a admissão do fluxo de água para a turbina e conseqüentemente a potência mecânica disponível em seu eixo; o acionamento do distribuidor pode ser manual através de um volante que também integra o conjunto da turbina ou remoto através de um motor elétrico e mecanismos associados que foram adaptados ao conjunto da turbina.

Na operação normal da planta piloto, a energia potencial de uma queda d'água é emulada pela ação da bomba cujo motor, alimentado pelo conversor de frequência, entrega à turbina uma vazão de água de intensidade controlável. Neste caso o mecanismo de acionamento do distribuidor da turbina permanece fixo na posição de abertura máxima. No circuito estão instalados um medidor de vazão, um manômetro a montante da turbina e outro à jusante da mesma, todos equipados com dispositivos para a transmissão do sinal.

A tubulação tem o diâmetro nominal de 6 polegadas e é de PVC do tipo padrão para instalações de água sob pressão e o reservatório de fibrocimento.

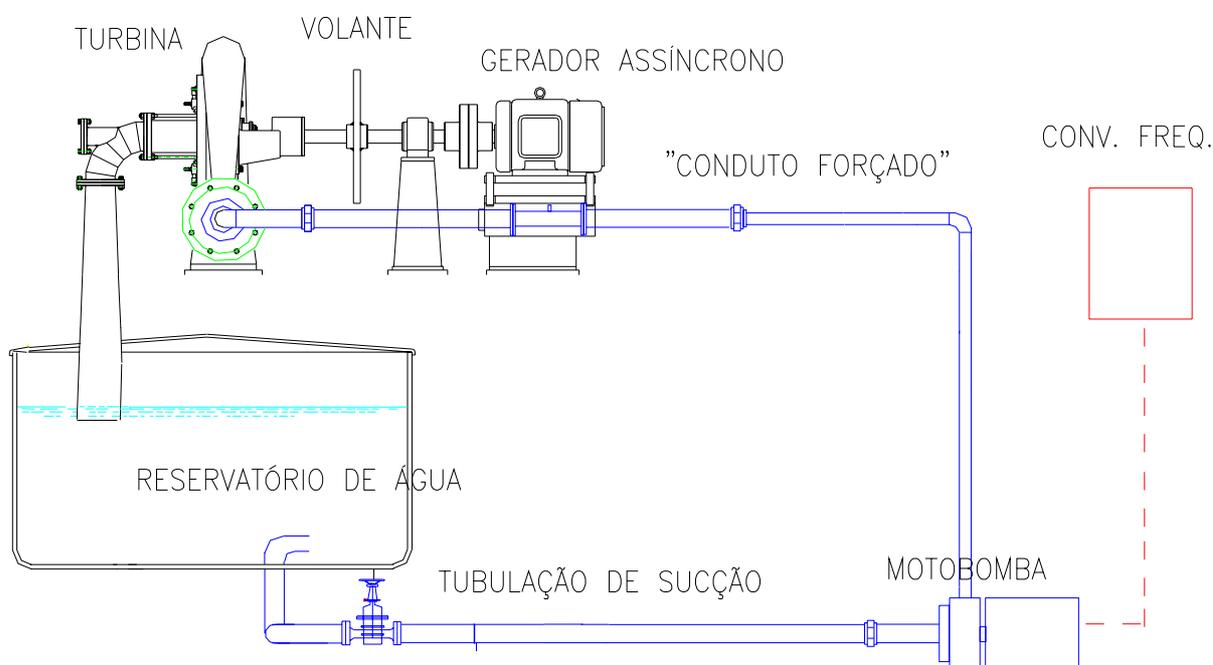


Figura 2 - Circuito hidráulico e equipamentos principais do Projeto PCE

2.2 DESCRIÇÃO DA PARTE ELÉTRICA DA PLANTA PILOTO

O gerador, que é constituído por um motor assíncrono, está eletricamente conectado a um pequeno quadro de comando que funcionalmente representa a subestação, onde estão montados os principais dispositivos de seccionamento e alguns outros dispositivos para medição e sinalização; este quadro conecta-se ao sistema elétrico do prédio do DELET através de um centro de distribuição de luz e força, instalado na sala onde a usina piloto foi instalada.

Os indicadores de painel que fornecem no local o valor das principais grandezas do processo, o controlador lógico programável e os botões de comando manual da planta piloto estão instalados em outro painel elétrico que denominamos quadro de comando local; para este também são enviados os sinais de todos os outros dispositivos que formam o sistema de instrumentação do Projeto PCE.

O conversor de frequência tem a função de fornecer ao motor da bomba d'água tensão e frequência adequadas à vazão que se deseja para manter o gerador com determinado valor de carga.

O microcomputador, do tipo PC, comunica-se por via serial com o CLP com a finalidade de receber dados da planta, processá-los e apresentá-los no monitor, em unidades de engenharia e com recursos sinóticos; também envia dados para o CLP que podem ser ou comandos gerados através do teclado ou carga de programas que serão executados no CLP.

O sistema é ainda integrado por uma fonte de tensão contínua associada a um banco de baterias cuja finalidade é o desligamento da Planta Piloto em caso de falha de algum equipamento elétrico ou mecânico ou ainda por falta de energia elétrica no barramento da subestação, representado pelo centro de distribuição de luz e força.

A figura 3 apresenta o diagrama elétrico e de instrumentação do Projeto PCE; a figura 1 mostra a distribuição física destes elementos na sala onde estão instalados. No capítulo 4 serão fornecidas as especificações técnicas dos equipamentos e dos instrumentos.

2.3 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA PLANTA PILOTO

A planta piloto opera de dois modos: manual e automático. No modo manual o operador terá acesso direto ao controle de cada um dos equipamentos eletromecânicos que interferem no processo de geração de energia elétrica. A ação do operador pode ocorrer ou através do teclado do microcomputador ou por ação direta nos botões do quadro de comando

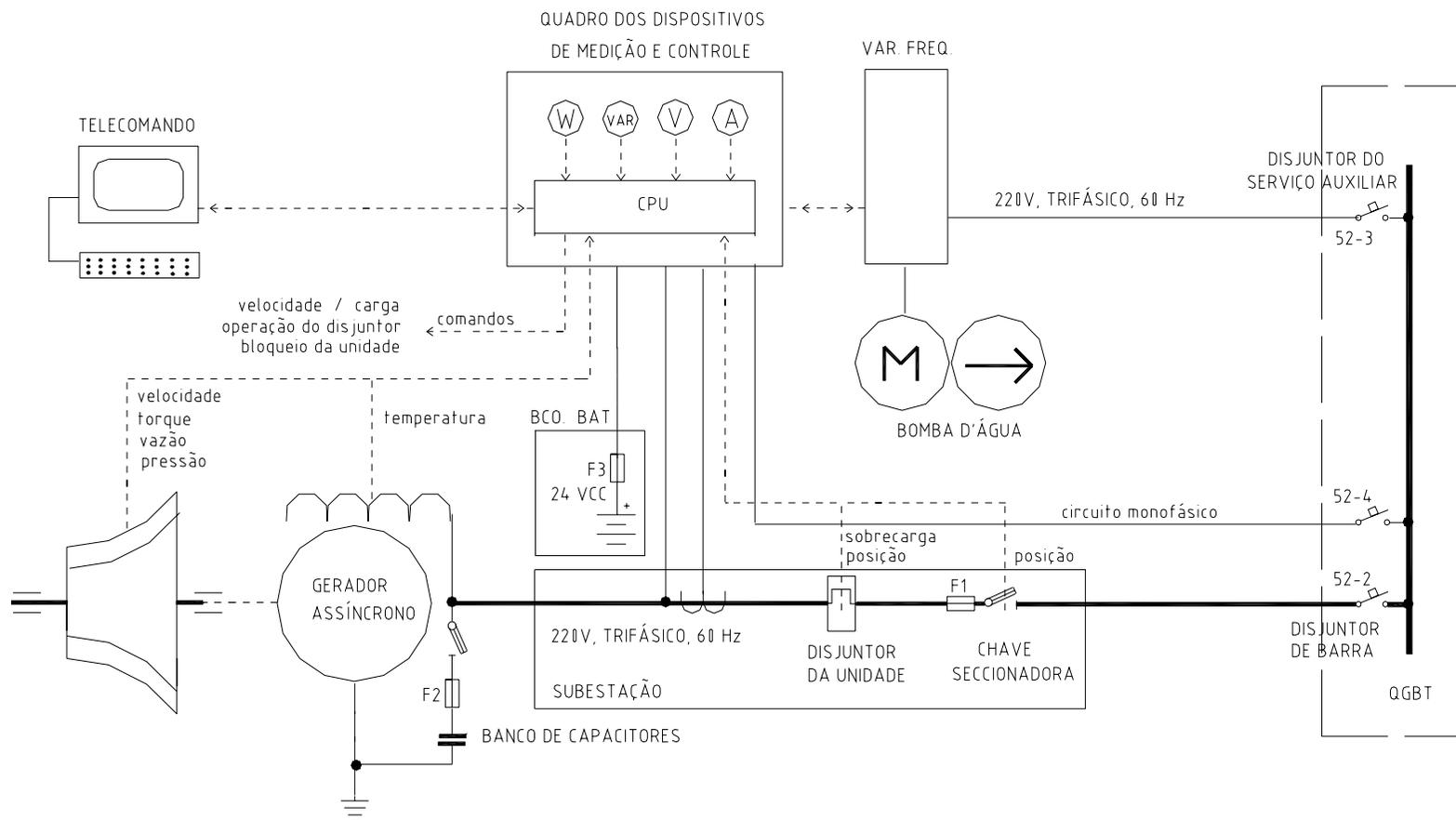


Figura 3 – Diagrama elétrico e de instrumentação do projeto PCE

local. Neste modo de operação, os equipamentos eletrônicos continuam ativos, coletando dados e disponibilizando os mesmos ao software de supervisão.

No modo automático o operador através de um botão no quadro local ou do teclado do microcomputador dará início ao processo de partida. O programa atua sobre a turbina e de forma cronológica controla a velocidade do conjunto turbina-gerador até a rotação síncrona, conecta o gerador à rede e assume a carga segundo o programa de operação. A parada ocorre por intervenção do operador ou por problemas elétricos ou mecânicos; uma lógica independente ao CLP conduz a usina para uma situação de parada por ocasião de eventual degradação do sistema de controle

A supervisão do processo é feita através das indicações e sinalizações no quadro de comando local ou remotamente no monitor de vídeo do microcomputador. A comunicação entre o computador e o controlador lógico é feita através de um canal serial.

As principais grandezas do processo são monitoradas em paralelo pelo CLP e por uma lógica discreta constituída por relés. Na ocorrência de algum evento que possa colocar em risco a integridade de qualquer um dos equipamentos, a microcentral é automaticamente desligada e os valores das principais grandezas estão à disposição, para análise, no arquivo histórico do sistema de supervisão.

Em uma planta real, em funcionamento automático desassistido, a máquina poderá operar com uma carga constante, definida pelo operador, ou ser controlada por outra variável como, por exemplo, o nível da água do local onde ela é captada ou em função da hora ao longo do dia.

2.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS MICROUSINAS SEGUNDO O PROJETO PCE

O Projeto PCE permite não apenas estudos detalhados sobre o funcionamento da máquina assíncrona na função de gerador, mas compreende também a definição de uma estrutura constituída por equipamentos eletromecânicos e um software, com as características gerais de forma a atender às especificações do Projeto, que a seguir passaremos a citar e comentar:

Baixo custo de implantação e manutenção

A opção pelo uso de um gerador assíncrono, funcionando em paralelo com a rede de distribuição local, dispensa a utilização de alguns equipamentos de custo significativo que reduz o investimento necessário à implantação de uma PCH, isto é, excitatriz, regulador de

tensão e equipamento de sincronização.

Um sistema de controle e proteção relativamente simples [10] torna-se necessário apenas para manter a máquina de indução funcionando na região como gerador segundo um programa de geração. A manutenção de um gerador assíncrono é mais simples e menos dispendiosa que a do gerador síncrono especialmente se o rotor for do tipo “gaiola de esquilo”.

Chapalaz [1] afirma que para potências até 30 kW as vantagens são consideráveis em função do espectro de potências de motores elétricos disponíveis nesta faixa de potências em relação ao espectro dos geradores síncronos; acima de 30 kW esta vantagem não é mais significativa, conforme pode ser visualizado na figura 4. A bibliografia cita outras vantagens do gerador assíncrono em relação ao síncrono:

- a) grande disponibilidade de motores elétricos no mercado e em uma faixa ampla de potências;
- b) construção mais simples resultando em maior confiabilidade e baixo custo de manutenção;
- c) em caso de curto circuito perde a excitação não contribuindo para o agravamento do problema.

Tabela 4 - *Potência nominal de motores elétricos assíncronos e de geradores síncronos encontrados no mercado. Fonte: Eletromotores WEG S.A.*

Potência dos Motores em CV		Potência dos Geradores em kVA	
<i>220/380 V</i>	<i>380/660 V</i>	<i>220/440 V – 480 V</i>	<i>380 V – 415 V</i>
0,16		21	20
0,25		38	35
0,33		55	50
0,5		65	56
0,75		80	70
1		105	90
1,5		122	112

Tabela 4 - Continuação

Potência dos Motores em CV		Potência dos Geradores em kVA	
<i>220/380 V</i>	<i>380/660 V</i>	<i>220/440 V – 480 V</i>	<i>380 V – 415 V</i>
2		140	122
3		165	139
4		200	170
5		230	210
6		285	265
7,5		320	270
10		370	340
12,5		405	360
15		480	450
20		515	
25		600	
30		725	
40		830	
50		910	
60		1025	
75		1260	
100		1450	
125		-	
150		-	
175		-	
200		-	
250		-	

Uma avaliação preliminar para comparação de custos de geradores assíncronos em relação aos síncronos pode ser feita considerando-se que a potência do gerador assíncrono em watts seja igual à potência ativa no eixo da máquina em CV. A partir desta premissa e com os dados da Tabela 4 monta-se a Tabela 5, cujas conclusões podem ser melhor visualizadas na figura 4.

Tabela 5 – Custo e equivalência dos motores e geradores elétricos

Fonte: Eletromotores WEG S.A – fev/03

Gerador síncrono		Motor assíncrono			Relação de custos motor / gerador
P (kVA)	R\$	P (CV)	P (kW)	R\$	
21	7441,00	30	22,08	2274,74	0,31
38	8017,00	60	44,16	4895,43	0,61
55	9560,00	75	55,20	5433,27	0,57
65	10086,00	100	73,60	6377,43	0,63
80	10562,00	125	92,00	9448,00	0,89
105	13421,00	150	110,40	10229,68	0,76
122	14098,00	175	128,80	12521,75	0,89
140	15215,00	200	147,20	13180,82	0,87
165	18635,00	250	184,00	15562,38	0,84

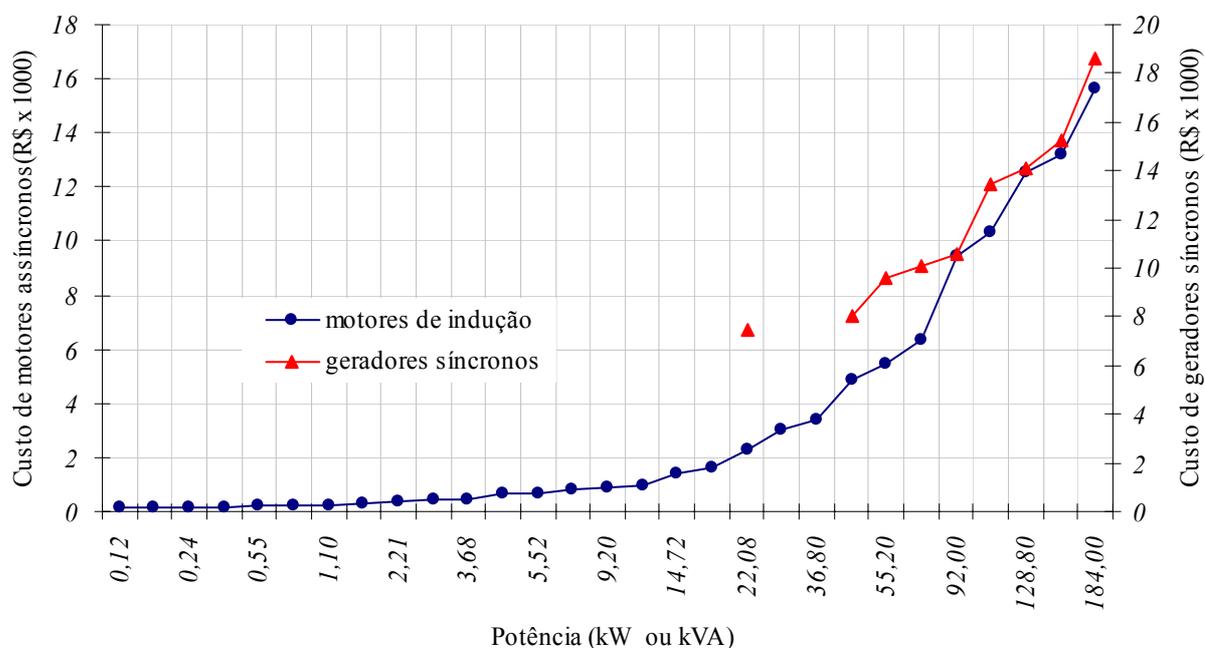


Figura 4 – Comparação entre o custo dos motores e geradores elétricos

As desvantagens que são atribuídas a este tipo de gerador quando interligado a uma rede de distribuição também devem ser analisadas por ocasião da elaboração do projeto básico de um aproveitamento hidrelétrico:

- a) Necessidade de absorção de energia reativa da rede; a máquina assíncrona apresenta um baixo fator de potência quando em velocidade supersíncrona. Como mostraremos no capítulo 4, este parâmetro aumenta ou diminui em função da velocidade, diminuindo muito à medida que a carga aproxima-se de zero. É necessário o uso de capacitores ou outro meio de correção do fator de potência [1], o que implica em aumento do custo de instalação de uma usina;
- b) geralmente apresenta menor rendimento que o gerador síncrono; é menor ainda para as potências mais baixas e para cargas baixas, em relação à sua potência nominal [1];
- c) normalmente não é utilizado volante de inércia; isto significa que no caso de rejeição de carga a máquina pode atingir velocidades duas ou três vezes a nominal [10]. Este tipo de exposição pode prejudicar, sobretudo os rolamentos dos mancais que, como se sabe, são fabricados para funcionarem dentro de determinados limites de velocidades;
- d) pouco suporte por parte dos fabricantes; estes projetam e otimizam a máquina para ser utilizada como motor e há o risco de que uma boa máquina, operando como motor, revele-se um mal gerador [1];
- e) uma máquina de potência maior pode perder a excitação se o sistema elétrico no qual está conectada, em determinado momento, não tiver potência reativa suficiente para atender a sua necessidade de excitação[1].

Automatização

A utilização de um sistema automatizado faz com que a usina opere de uma forma mais uniforme, o que implica no aumento da vida útil dos equipamentos e na redução dos custos de operação da mesma. Entretanto, faz-se necessário uma equipe de manutenção mais qualificada em função da tecnologia dos equipamentos eletrônicos utilizados; a experiência tem demonstrado que, apesar desta exigência, a automatização de PCHs e a conseqüente operação desassistida é a maneira de tornar viáveis estes empreendimentos [4][20][21]. A mão de obra referente ao serviço de operação fica limitada à ação de colocar a máquina em condições de partir, isto é, com as pré-condições de partida atendidas; a operação pode contar com um operador menos qualificado o que contribui para diminuição do custo de operação.

Funcionamento em paralelo com a rede de energia elétrica local de distribuição

A operação em paralelo permite tornar o processo de geração de energia muito simples posto que tanto a tensão como a frequência da usina são definidas pelo sistema de potência ao qual o gerador de indução está conectado. Ao gerador cabe, portanto, o papel de introduzir potência ativa na rede a qual está conectado, às custas da componente reativa da corrente de linha, que é necessária à magnetização da máquina.

O gerador assíncrono pode funcionar também de modo isolado, isto é, sem conexão com uma rede de distribuição. Embora esta forma de operação não faça parte deste trabalho, convém citar sucintamente esta possibilidade. A excitação inicial da máquina é obtida através do magnetismo remanente do rotor e, em regime estacionário, a máquina mantém-se excitada pelo uso de capacitores em paralelo. A tensão e a frequência da energia gerada neste tipo de operação apresentam variações em função da velocidade [1][12]. Este efeito indesejável deve ser compensado a fim de buscar-se qualidade no fornecimento de energia. Um dos artifícios utilizados é a instalação de um sistema de controle que faz um chaveamento automático entre a carga a ser alimentada e uma carga secundária, normalmente constituída por resistores de uma caldeira elétrica de maneira que, para o gerador, a carga seja sempre constante.

Um cuidado com a autoexcitação indesejada deve ser tomado, quando o gerador assíncrono opera em paralelo e está equipado com capacitores para a correção do fator de potência; na ausência de tensão na rede de distribuição se a carga conectada a ele for menor do que a sua potência nominal haverá a energização deste circuito, com tensão e frequência não regulada. Este efeito deve ser eliminado prevendo-se um sistema para a desconexão do gerador na ocorrência deste tipo de falha.

Possibilidade de telecomando ou telesupervisão

Permite que mesmo à distância a usina possa ser controlada e supervisionada, com a utilização de um microcomputador pessoal. O projeto PCE prevê a utilização de um CLP comercial como equipamento gerenciador do automatismo, fazendo interface por um lado com os instrumentos de campo dedicados ao processo e, por outro, através de um canal de comunicação serial, ao microcomputador do sistema de telecomando.

Impacto ambiental

Embora seja pequena a expectativa de danos ao meio ambiente, em função do volume dos recursos hídricos disponíveis para uma PCH na faixa de até 1000 kW, os danos e devem ser considerados. O impacto ambiental é proporcional ao porte de um aproveitamento

hidroelétrico [10] e conforme já citamos, está diretamente relacionado com a inundação de áreas e a formação de lagos artificiais que, além de contribuir para a devastação da flora e da fauna local, pode também ter outras implicações como eliminação de patrimônios naturais, áreas recreativas, esportivas ou locais onde estejam estabelecidas comunidades rurais. A Eletrobrás [33] recomenda que no caso da previsão da necessidade de um reservatório deverá ser examinada a possibilidade do seu uso múltiplo, considerando as seguintes hipóteses: abastecimento de água, agricultura de vazamento, agricultura irrigada, pesca em geral e piscicultura intensiva.

Usinas do porte abrangido por este trabalho são do tipo fio d'água, que não causam grande impacto ao meio ambiente. Contudo, algumas vezes um desvio no curso d'água é necessário, prejudicando, por exemplo, a irrigação de terras vizinhas. A existência de "atalhos" no curso de um rio, em uma região com topografia acidentada, é o que todo o projetista, garimpeiro de "sites" ótimos para a instalação de usinas, procura.

3.0 A MÁQUINA ASSÍNCRONA

A máquina assíncrona, ou o motor assíncrono ou ainda o motor de indução, dentre os motores de corrente alternada, é o de mais extenso uso. Deve-se esta preferência à sua robustez, simplicidade, ausência de coletor, no caso de rotor do tipo gaiola de esquilo, fácil manutenção e à circunstância de suas características de funcionamento adaptarem-se às exigências do trabalho e à velocidade constante [3]. A sua aplicação como motor pode ser observada principalmente na indústria e na agricultura no acionamento de máquinas operatrizes, bombas d'água, moinhos, correias transportadoras, ventiladores, exaustores, serras e outros usos. O seu emprego como gerador vem ao encontro do atendimento de uma das propostas do projeto PCE, qual seja, utilização de equipamentos de fácil obtenção no mercado.

O motor de indução é constituído por duas partes essenciais: uma fixa chamada de estator, e outra móvel de formato cilíndrico, chamado de rotor. O núcleo do estator é feito de aço para fins elétricos e contém ranhuras onde se alojam os condutores, enrolados em forma de bobina. O núcleo do rotor também é fabricado em aço, com ranhuras; nestas são introduzidos os condutores que são ligados entre si. No caso de rotor em gaiola, estes condutores são constituídos ou por barras de cobre ou de ligas metálicas, ou então por alumínio fundido [3]. Este conjunto é instalado entre mancais dentro do estator e separado deste por um entreferro.

O enrolamento do estator pode ser monofásico ou trifásico. A figura 5 mostra um corte transversal em uma máquina assíncrona trifásica. Nela observa-se que o estator e o rotor são constituídos por 36 e 28 ranhuras, respectivamente.

Em funcionamento, as tensões trifásicas aplicadas ao enrolamento do estator estabelecem correntes trifásicas através das bobinas do mesmo; estas correntes criam campos magnéticos alternados que, somados a cada instante, dão origem a um único campo magnético resultante cujos pólos giram em torno de um eixo, formando assim o campo girante da máquina. A velocidade, em rotações por minuto, do campo girante da máquina é dada pela equação 1 [1][2][3][4].

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (1)$$

N_s é a velocidade síncrona em rotações por minuto; f , a frequência em hertz e p representa o número de pólos da máquina.

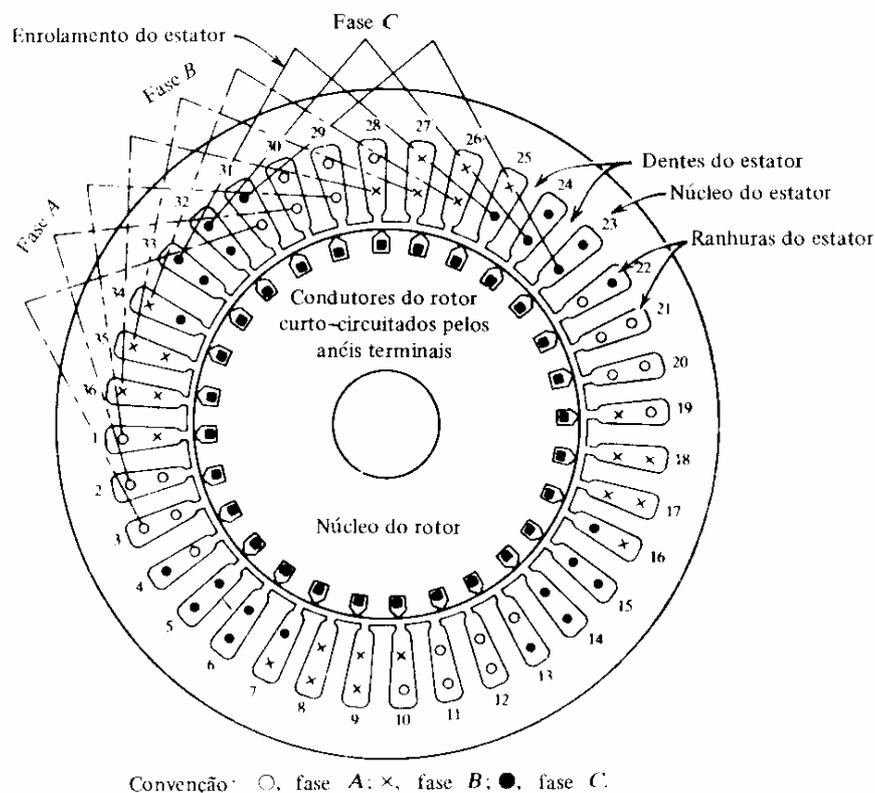


Figura 5 - Corte transversal de uma máquina assíncrona [9]

Na máquina assíncrona o campo girante e o rotor têm velocidades angulares diferentes; observam-se então três possibilidades segundo as quais ela pode funcionar:

- a) se a velocidade do rotor for menor que a do campo girante, mas no mesmo sentido, a máquina assíncrona se comporta como motor, fornecendo potência mecânica em seu eixo;
- b) quando a velocidade do rotor for maior do que a síncrona ela transforma-se em gerador de energia elétrica; neste caso uma outra máquina deve ser ligada ao seu eixo e desta forma transferir-lhe energia mecânica através do eixo que será convertida em energia elétrica nos terminais do estator;
- c) se o campo girante da armadura e o rotor tiverem sentidos de rotação diferentes, a máquina está na região de frenagem; o conjugado motor de origem elétrica e que atua sobre o eixo é o conjugado resistente.

3.1 A MÁQUINA ASSÍNCRONA NA OPERAÇÃO COMO MOTOR

Na operação como motor, quando o fluxo magnético correspondente ao campo girante atravessa o entreferro e corta as barras do rotor, uma força eletromotriz é induzida nas

mesmas e sendo o circuito do rotor eletricamente fechado, uma corrente elétrica é estabelecida, cujo sentido é o de produzir um fluxo magnético que se contrapõe à variação do que a estabeleceu. A interação entre o campo girante e a corrente induzida no rotor dá origem a um conjugado no sentido de giro do campo. Observamos que, para que haja força eletromotriz induzida no rotor, é necessário que as barras ou enrolamentos do rotor cortem as linhas de força do fluxo magnético do campo girante. Isto apenas ocorre, se houver um movimento relativo entre o rotor e o campo girante. Na operação como motor, a velocidade do rotor N é sempre menor que a do campo girante, N_s . A diferença entre a velocidade do campo girante, velocidade síncrona e a do rotor, chama-se deslizamento das rotações[3], ou escorregamento de rotação [3], ou escorregamento de fase [3] ou ainda simplesmente escorregamento. Prefere-se apresentar o escorregamento s correspondente a uma determinada velocidade N em rpm como uma fração da velocidade síncrona N_s , também em rpm. Desta forma:

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (2)$$

Os fenômenos elétricos de transferência de potência que ocorrem no motor assíncrono são muito semelhantes aos que ocorrem no transformador. A diferença é que enquanto esta última é uma máquina totalmente estática que converte apenas grandezas elétricas, o motor de indução transforma grande parte da energia elétrica em energia mecânica. Desta forma, adota-se como circuito elétrico equivalente ao motor assíncrono o mesmo atribuído ao transformador, com uma relação de transformação de um para um [3]. Adotaremos como circuito equivalente da máquina assíncrona, por fase, o representado na figura 6 [1][2][3][5][7]. O termo dispersão aplicado a x_1 e x_2 refere-se ao fluxo que concatena apenas o enrolamento que o produziu [17], ao passo que o fluxo produzido no enrolamento de magnetização x_m concatena-se com o enrolamento do rotor, transferindo-lhe potência.

Entre os aspectos importantes de desempenho em regime permanente estão as variações de corrente, velocidade e perdas, em função do conjugado de carga, o conjugado de partida e o conjugado máximo. Todas estas características podem ser determinadas a partir do circuito equivalente [2].

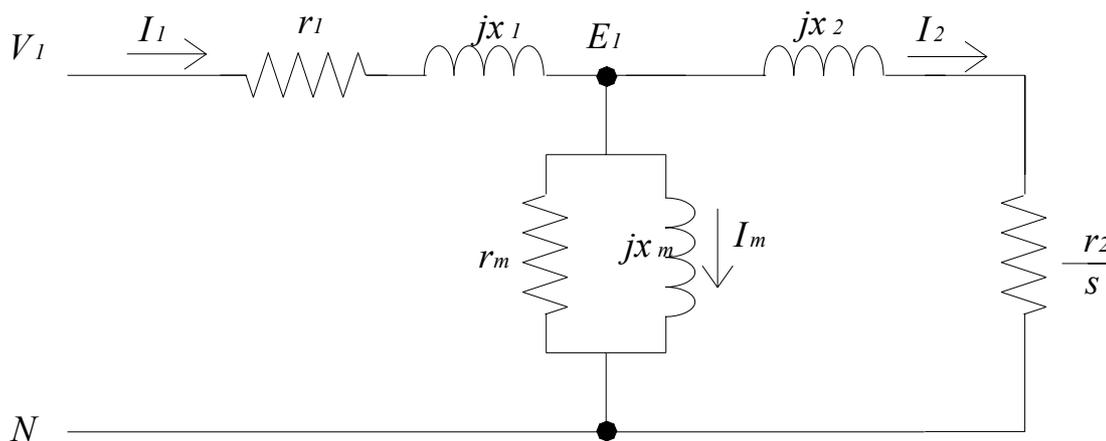


Figura 6 - Circuito equivalente da máquina assíncrona por fase [2][5]

3.2 A MÁQUINA ASSÍNCRONA NA OPERAÇÃO COMO GERADOR

Se a carga de um motor de corrente alternada assíncrono diminuir, haverá uma diminuição do escorregamento, da tensão induzida no circuito do rotor com a conseqüente diminuição de I_2 e a corrente de linha I_1 resultante, será menor; quando a carga no eixo do motor for igual a zero, I_1 terá um valor muito próximo a I_0 . Se com auxílio de uma outra máquina, qualificada de primária, mecanicamente acoplada em seu eixo, aumentar-se a velocidade do rotor ocorrerá que na velocidade síncrona a potência necessária a suprir as perdas por ventilação e atrito será fornecida por esta máquina primária e a máquina assíncrona absorverá apenas energia reativa para a sua magnetização, isto é, I_1 será igual a I_0 . Aumentando a velocidade da máquina primária o rotor atingirá uma velocidade superior à síncrona; com velocidade supersíncrona, isto é, com o escorregamento negativo, a máquina passa a funcionar como gerador assíncrono.

No gerador assíncrono, o sentido relativo do movimento do enrolamento do rotor se inverte em relação ao campo girante; as barras do rotor cortam o fluxo do campo girante em sentido contrário e como conseqüência, as correntes de rotor são invertidas em relação ao sentido que tinham quando funcionava como motor. O conjugado que era motor agora é um conjugado resistente. As correntes do rotor geram no estator uma corrente que, quando fasorialmente decomposta apresenta a componente referente à potência ativa defasada de 180° em relação à operação da máquina como motor. A máquina assíncrona passa a funcionar então como gerador assíncrono.

3.3 DETERMINAÇÃO TEÓRICA DA POTÊNCIA E DO CONJUGADO A PARTIR DO CIRCUITO EQUIVALENTE

O conjugado eletromagnético correspondente à potência transferida ao rotor pode ser obtido a partir da equação [2][7][33]

$$T = \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (3)$$

T é o conjugado em Newton-metro, P_{mec} , a potência envolvida no circuito do rotor, que representa a mecânica no eixo e ω , a velocidade angular em radianos por segundo.

Observando a figura 6, pode-se afirmar que a potência transferida ao circuito elétrico equivalente do rotor, por fase, é [2].

$$P = I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (4)$$

onde I_2 é a corrente eficaz no circuito do rotor e $\frac{r_2}{s}$ é a resistência total equivalente do circuito do rotor que pode ser decomposta em duas parcelas: uma representativa da resistência do enrolamento do rotor e outra na qual será dissipada uma potência equivalente à potência mecânica no eixo da máquina, P_{mec} ; esta é igual a potência ativa representada pelo equação (4) menos as perdas ôhmicas devido à ação de I_2 sobre r_2 , conforme a expressão abaixo cujo resultado nos leva a equação:

$$P_{mec} = I_2^2 \frac{r_2}{s} - I_2^2 r_2 \quad (5)$$

$$P_{mec} = I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} \quad (6)$$

Voltando à equação (3), a parcela de potência envolvida no circuito do rotor, convertida em potência no eixo é a fração:

$$P_{mec} = (1-s)\omega T \quad (7)$$

A figura 7 mostra o circuito apresentado na figura 6 com o ramo referente ao rotor modificado: o resistor r_2 foi dividido em duas partes como forma de representar separadamente os parâmetros correspondentes às perdas por efeito Joule e potência desenvolvida no eixo. A resistência do resistor r_m é muito maior que a reatância de x_m e em função disto, nas análises do circuito equivalente nesta dissertação, será considerado de valor infinito e, portanto, a sua influência desprezada [1][2][3][4][7].

Uma ferramenta da teoria dos circuitos importante para análise do circuito equivalente é a determinação do equivalente Thevenin do circuito do estator. Utiliza-se o circuito da figura 7 para a aplicação da técnica para a determinação do equivalente Thevenin para o circuito do estator, visto pelo lado do rotor.

E_{TH} , tensão do equivalente Thevenin, é a tensão entre o ponto E_1 e N quando I_2 for igual a zero; o módulo desta tensão vale:

$$E_{TH} = \left| \frac{\mathbf{V}_1 \times jx_m}{r_1 + j(x_1 + x_m)} \right| \quad (8)$$

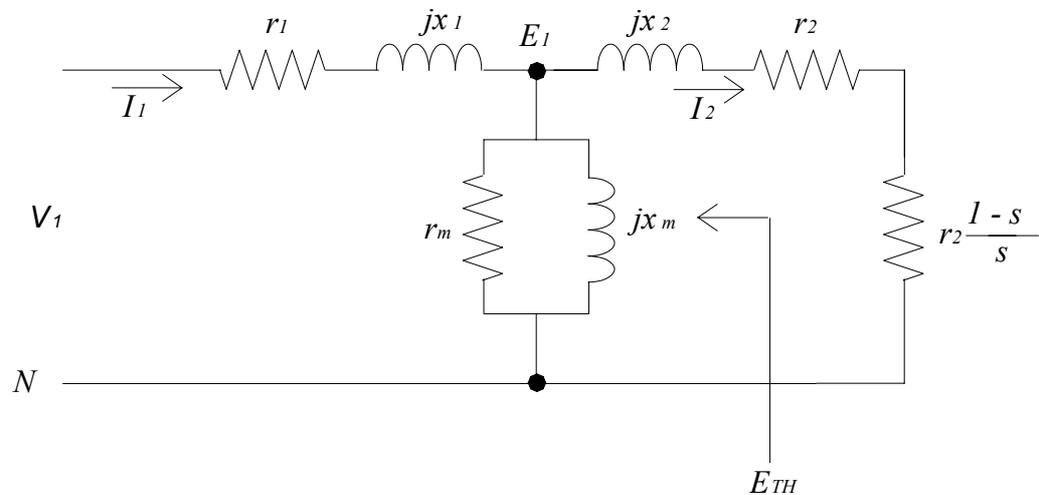


Figura 7 – Circuito equivalente da máquina assíncrona com o resistor, no circuito do rotor, equivalente à potência mecânica no eixo

A impedância \mathbf{Z}_{TH} vista dos terminais do rotor quando V_1 é considerado igual a zero é o resultado do paralelo entre as impedâncias $(r_1 + jx_1)$ que se pode representar por \mathbf{Z}_1 e $jx_m = \mathbf{Z}_m$.

$$\mathbf{Z}_{TH} = \left(\frac{\mathbf{Z}_1 \mathbf{Z}_m}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_m} \right) \quad (9)$$

Considerando as simplificações [7]

$$x_m \gg x_1$$

$$jx_m + jx_1 \gg r_1$$

$$\mathbf{X}_{TH} \approx x_1$$

obtém-se como a impedância do equivalente Thevenin a expressão

$$\mathbf{Z}_{TH} = \mathbf{R}_{TH} + \mathbf{X}_{TH} \approx r_1 \left(\frac{x_m^2}{x_1 + x_m} \right)^2 + jx_1 \quad (10)$$

Chamando de Z_2 a impedância do circuito do rotor, a corrente do rotor I_2 pode ser

definida como:

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{E}_{TH}}{\mathbf{Z}_{TH} + \mathbf{Z}_2} = \frac{\mathbf{E}_{TH}}{R_{TH} + \frac{r_2}{s} + jX_{TH} + jx_2} \quad (11)$$

O módulo da corrente é, portanto:

$$I_2 = \frac{E_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + \frac{r_2}{s})^2 + (X_{TH} + x_2)^2}} \quad (12)$$

Das equações (6) e (7) tira-se que o conjugado, por fase, pode ser dado pela expressão:

$$T = \frac{1}{\omega_s} I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (13)$$

Substituindo I_2 , equação (12), pelo seu valor na equação (13), e considerando o conjugado e a potência resultantes da ação das três fases temos:

$$T = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{E_{TH}^2 \left(\frac{r_2}{s}\right)}{(R_{TH} + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2} \right) \quad (14)$$

A potência total trifásica aplicada ao rotor, equação (4) é representada por:

$$P = 3 \frac{E_{TH}^2 \left(\frac{r_2}{s}\right)}{(R_{TH} + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad (15)$$

Combinando a expressão (7) com a (14), a potência mecânica disponível no eixo da máquina é dada pela equação:

$$P_{mec} = \left(\frac{3E_{TH}^2}{(R_{TH} + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2} \right) (1 - s) \quad (16)$$

Estas expressões serão utilizadas no próximo capítulo para o traçado das curvas teóricas que mostrarão o comportamento da máquina assíncrona para valores de s compreendidos no intervalo $[1, -1]$.

4.0 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DO PROJETO PCE

Os dois motores assíncronos utilizados no projeto PCE foram fabricados por Eberle S.A. Indústria e Tecnologia, empresa com sede na cidade de Caxias do Sul - RS, e são destinados para aplicações gerais. Os dados comuns são: carcaça confeccionada em ferro fundido cinzento; estator e o rotor, compostos por chapas de aço com baixo teor de carbono; as barras que constituem o enrolamento do rotor são em alumínio injetado sob pressão; mancais de rolamentos de esferas. As tabelas 6 e 7 apresentam as características particulares da máquina de 1,5kW deste fabricante.

Tabela 6 - Características técnicas da máquina assíncrona instalada na estrutura do projeto PCE [31]

Potência	2 CV	Elev. de temp.	80 °C
Número de pólos	8	Temp. ambiente	40 °C
Carcaça	112Ma	Massa	30 kg
Forma Const.	B3D	Rotação nominal	870 rpm
Tensão	220 V	Corrente a vazio	7,08 A
Frequência	60 Hz	Corrente nom.	8,81 A
Blindagem	TFVE	Corrente de part.	41,5 A
Grau de proteção	IP55	Conjugado nom.	1,6 kgfm
Regime de func.	S1 - cont.	Conjugado part.	180%
Fator de serviço	1,15	Conjugado máx.	265%
Classe de isol.	B	GD2 do rotor	0,068 kgm
Categoria	N	TMRT	14 s

Tabela 7 - Características operacionais da máquina do projeto PCE [31]

Carga %	Rendimento (%)	Fator de Potência
50	67,0	0,39
75	73,0	0,50
100	75,0	0,60

A figura 8 mostra o gerador assíncrono do projeto PCE montado na microcentral. Observa-se que a carcaça foi fixada através dos pés em uma estrutura flexível que se denomina mesa para medida de conjugado.

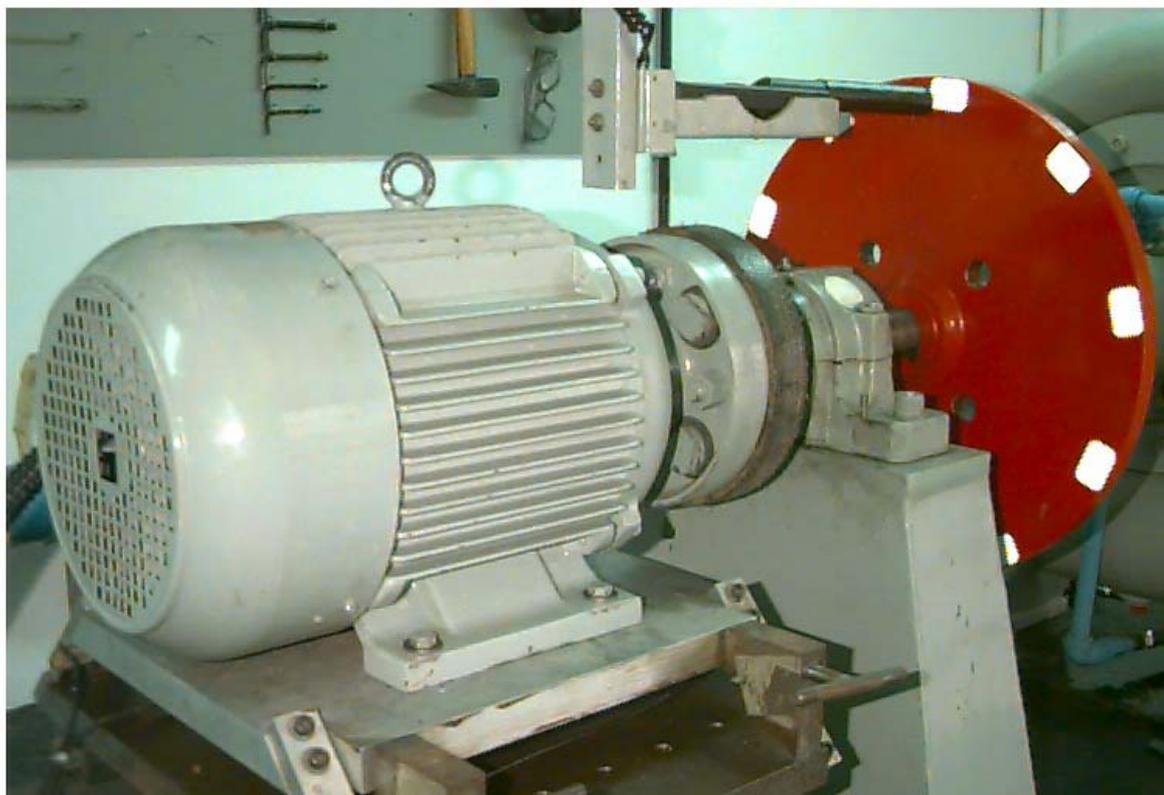


Figura 8 - Vista de uma máquina assíncrona sendo testada na estrutura do projeto PCE

A mesa para medida de conjugado consiste de um transdutor dotado de duas bases metálicas unidas entre si por tirantes instrumentalizados com extensômetros resistivos; estes tirantes comportam-se como células de carga. Maiores informações sobre a mesa serão dadas no capítulo 5.

4.1 DETERMINAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Desenvolve-se o circuito equivalente da máquina assíncrona, por fase, segundo o modelo da figura 6 [2][7]. A importância da determinação dos parâmetros do circuito equivalente da máquina assíncrona, conforme observado no capítulo anterior, está no fato de que através da análise deste circuito podem ser determinados todos os valores das grandezas envolvidas no funcionamento da máquina tais como corrente, potência, conjugado, fator de potência e rendimento.

Pode-se determinar os parâmetros do circuito equivalente de uma máquina

assíncrona através da realização de alguns dos testes previstos no ensaio de rotina, a saber [1][2][7][16]:

- a) medida da resistência do estator;
- b) ensaio da máquina a vazio, com a medição da tensão aplicada ao estator, da corrente de linha e da potência ativa;
- c) ensaio da máquina com o rotor bloqueado, com medição da tensão reduzida aplicada ao estator, da corrente de linha e da potência ativa.

Estes ensaios também são realizados para verificar se a máquina atende a determinadas especificações [17].

Para a sua realização foi utilizado um arranjo composto pelos instrumentos cuja relação e principais especificações técnicas estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - *Relação dos instrumentos de laboratório utilizados nos ensaios a vazio e rotor bloqueado*

Instrumento	Grandeza	Dados do instrumento
Medidor digital de tensão, corrente, potência ativa e reativa	Tensão Corrente Potência ativa Potência reativa	Fabricante: Yokogawa Tipo: Digital Power Meter Modelo: WT1030M Resolução: 16 bits
Multímetro digital	Resistência	Fabricante: Hewlett Packard Tipo: Multímetro Digital Modelo: 3478A Resolução na escala de 30 ohms: 300 μ ohms
Tacômetro	Velocidade	Fabricante: Takotron Tipo: digital eletrônico a cristal de quartzo Modelo: TD-301 Precisão: 1rpm
Variador de tensão	Tensão	Fabricante: Equacional Tipo: Variac tripolar Entrada: 220V Saída: 0 a 240V Corrente de saída: 10A

4.1.1 MEDIDA DA RESISTÊNCIA DO ESTATOR

A NBR7094 [16], assim como a IEEE std 118-1978 [32], admite a utilização do ohmímetro (multímetro) como uma das maneiras de medir a resistência do estator de máquinas elétricas rotativas. Utilizamos para tal o multímetro HP3478A com a opção de medida a quatro fios, para eliminar o efeito da resistência dos cabos das ponteiras.

A fim de medir a resistência da máquina por fase à temperatura ambiente, esta foi ligada na configuração estrela. De acordo com Chapallaz [1] e Chapman [7], a resistência considerada foi a média dos valores medidos em cada fase. Os resultados das medidas estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Medida da resistência do estator, por fase

Temp. ambiente (°C)	Term. do estator	Medida da resistência (ohms)	Resist. Média 25°C (ohms)	Resist. Média 66°C (ohms)
25	U	2,516	2,518	2,91
	v	2,522		
	w	2,518		

Para obter-se um modelo mais fiel para simulação e análise do comportamento da máquina, o valor da resistência medida em laboratório, à temperatura t_0 foi corrigido para o valor à temperatura t , correspondente à de funcionamento [1]. Esta conversão, válida para unidades no Sistema Internacional, é dada pela equação (16) [1][27].

$$R_t = R_{t_0} \frac{(t + k)}{(t_0 + k)} \quad (16)$$

Na expressão acima, R_t e R_{t_0} são os valores das resistências nas temperaturas t e t_0 respectivamente; k é uma constante que vale 234,5 para o cobre puro e 225 para o alumínio com condutividade de 62% [32]. Determina-se a temperatura de trabalho do gerador através da medida da resistência do estator. A leitura do valor da resistência foi feita com a máquina desconectada da rede e com o rotor parado, imediatamente após a estabilização da temperatura da máquina que operara como gerador à corrente nominal.

Durante os ensaios a máquina estava conectada em delta e foi adotado para as resistências equivalentes do estator o valor médio conforme a tabela 10. A temperatura aproximada do enrolamento do estator foi determinada de forma indireta com o uso da equação (12) e considerando o valor médio da resistência entre as linhas, $(r_1 // (r_2 + r_3))$, iguais $1,715\Omega$ e $1,98\Omega$ respectivamente às temperaturas de 25°C e $t^\circ\text{C}$.

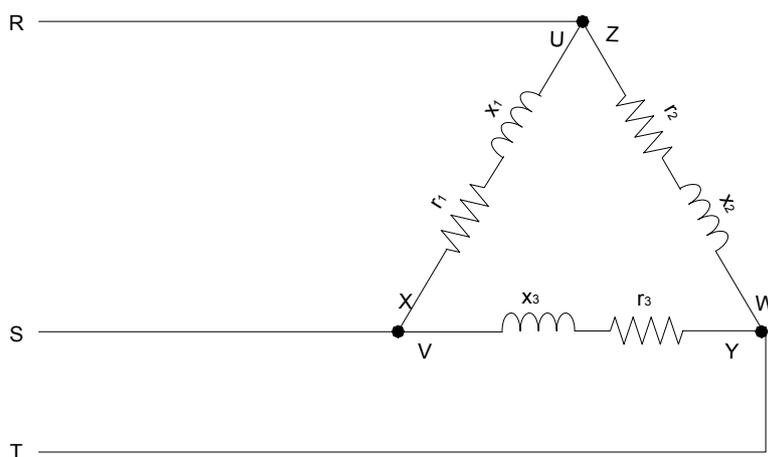


Figura 9 - Ligação interna do motor para determinação da temperatura do estator através da variação da resistência ôhmica

$$1,98 \Omega = 1,710 \Omega \frac{(t + 234,5)}{(25 + 234,5)} \quad t \cong 66^\circ\text{C}$$

Tabela 10 - Variação da resistência do estator em função da temperatura

Terminais	Resistência (Ω)		Δr (%)
	$t_0 (25^\circ\text{C})$	t	
R-S	1,716	1,99	15,96
S-T	1,705	1,98	16,13
T-R	1,710	1,98	15,78

4.1.2 ENSAIO A VAZIO

A tabela 11 resume as medidas obtidas no ensaio a vazio. A velocidade da máquina durante este ensaio foi de 899 rpm e a máquina estava à temperatura ambiente.

Tabela 11 - *Resultado do ensaio a vazio*

Média das tensões de linha (V)	Média das correntes de linha (A)	Potência ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Fator de Potência (%)
219,8	7,23	0,345	2,76	12,4

Os dados da tabela 11 foram compilados da seguinte forma, de acordo com Chapman [7]:

$$\text{Média das tensões de linha aplicada nas três fases} \quad E_m = \frac{E_{RS} + E_{ST} + E_{TR}}{3} \quad (17)$$

$$\text{Média das correntes de linha} \quad I_m = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (18)$$

$$\text{Corrente por fase:} \quad I_F = \frac{I_m}{\sqrt{3}} = \frac{7,23A}{\sqrt{3}} = 4,17A \quad (19)$$

O valor da impedância por fase, na condição de tensão nominal, com vistas à obtenção do circuito equivalente é [7]:

$$Z_{\text{vazio}} = \frac{219,8}{4,17} = 52,65\Omega \quad (20)$$

No ensaio a vazio, a corrente que flui ao circuito do rotor e as conseqüentes perdas neste circuito são muito pequenas, e podem ser negligenciadas [7]; isto ocorre pelo fato de que quando o motor está sem carga, a velocidade do rotor é próxima à síncrona e, portanto, o escorregamento, equação (2), é próximo a zero; com isto, a variação do fluxo magnético criado pelo campo girante, e que atravessa o entreferro e corta o enrolamento do rotor é desprezível; portanto a força eletromotriz nele induzida, pode ser desconsiderada.

Pode-se também neste teste definir as perdas rotacionais da máquina [7], à tensão nominal. A potência ativa absorvida pela máquina pode ser decomposta em duas parcelas: dissipação no enrolamento do estator por efeito Joule + perdas por ventilação e atrito

(rotacionais); na equação (22) aplica-se este conceito. Conhecida a resistência do enrolamento do estator, tabela 9, a potência nele dissipada, por fase é:

$$P_l = I_l^2 r_l \quad (21)$$

$$345 \text{ W} = 3 \times [(4,17\text{A})^2] \times 2,91 + P_{rot} \quad (22)$$

$$P_{rot} = 193,19 \text{ W}$$

4.1.3 ENSAIO COM O ROTOR BLOQUEADO

Este ensaio tem por objetivo determinar as perdas no circuito do rotor. Com o rotor travado a potência ativa é a dissipada nas bobinas do estator e na do rotor. O ensaio foi realizado com a máquina à temperatura ambiente. A tabela 12 apresenta os resultados do ensaio realizado na máquina do PCE.

Tabela 12 - Resultado do ensaio com o rotor travado

Média das tensões de linha (V)	Média das correntes de linha (A)	Potência ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Fator de Potência (%)
58,1	8,63	0,41	0,863	47,2

Seguindo a metodologia adotada por Chapman [7] determina-se a impedância do circuito equivalente por fase, com o rotor travado:

$$Z_{travado} = \frac{58,1\text{V}}{\frac{8,63\text{A}}{\sqrt{3}}} = 11,66 \Omega \quad (23)$$

O fator de potência nesta condição é, segundo a tabela 12, igual a 47,2% que corresponde a um ângulo de defasagem de $61,82^\circ$. A resistência por fase presente no circuito é, conforme figura 6, $r_1 + r_2$, visto que $s=1$, e é determinada por:

$$R_{travado} = 11,66 \times \cos 61,8^\circ = 5,50\Omega \quad (24)$$

Corrigindo o valor de r_1 e $R_{travado}$ para a temperatura de trabalho [1][2], considerando um aumento aproximado de 16%, tabela 10 e sabendo-se que $R_{travado}=r_1+r_2$ tem-se:

$$R_{travado} = (5,50\Omega \times 1,16) = (2,51\Omega \times 1,16) + r_2 \quad (25)$$

$$r_2 = 6,38\Omega - 2,91\Omega = 3,46\Omega$$

A reatância do circuito por fase vale:

$$X_{travado} = 11,66\Omega \times \text{sen } 61,8^\circ = 10,27\Omega \quad (26)$$

Esta reatância envolve a do estator x_1 mais a do rotor x_2 ; para a montagem do circuito equivalente devem ser determinados estes dois parâmetros. A determinação dos valores das reatâncias de dispersão do estator e do rotor é obtida através de uma tabela, portanto por um dado experimental, em função da categoria do motor [2][5][7][8][9]. Os valores tabelados estão definidos para máquinas cujo parâmetro *categoria* é dado segundo a norma NEMA MG1; esta prevê quatro categorias *A*, *B*, *C* e *D*, que são atribuídas aos motores elétricos em função do comportamento da curva do conjugado em relação à velocidade [8].

A máquina assíncrona do projeto PCE, de fabricação EBERLE, segue a norma NBR7094 (1996) que apresenta outra classificação para o parâmetro *categoria*, a saber: *N* e *H*. A categoria da máquina do projeto PCE é *N*, que significa conjugado normal. Analisando as características da categoria *N*[16], com as definidas pela NEMA [2][5][7][8][9]; conclui-se que em função dos valores dos conjugados de partida e do nominal, do valor do escorregamento à potência nominal e à relação I_p/I_n , a categoria *N* - NBR7094, pode ser associada para a máquina em questão à categoria *B* da NEMA. Neste caso a reatância $X_{travado}$ deve ser dividida à razão de 40% para x_1 e 60% para x_2 ou seja[2][7]:

$$x_1 = 4,1\Omega \quad x_2 = 6,16\Omega$$

Conhecido o valor de x_1 , determina-se o valor de x_m :

$$Z_{vazio} = 52,65\Omega = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \quad (27)$$

$$x_m = 48,46 \Omega$$

Conhecidos todos os parâmetros da máquina assíncrona do projeto PCE, define-se o circuito equivalente, figura 10. O resistor r_m , conforme visto em 3.3, não foi considerado.

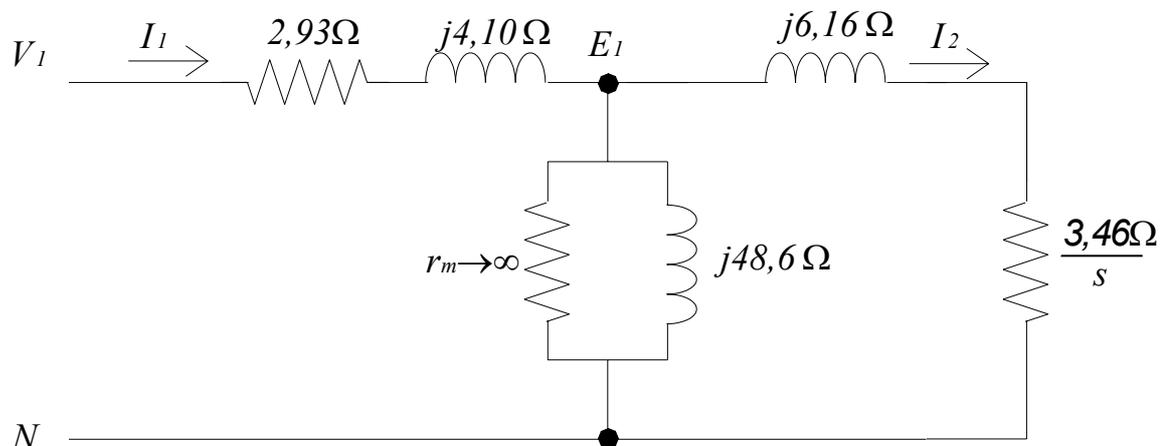


Figura 10 – Circuito equivalente do gerador da planta piloto do projeto PCE

4.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS TEÓRICOS OBTIDOS A PARTIR DO CIRCUITO EQUIVALENTE

A tabela 13 apresenta o resultado da simulação realizada considerando o circuito equivalente definido na figura 10. A tensão considerada nos cálculos foi de 220V e o intervalo de velocidades foi o compreendido entre os valores de 0 rpm ($s=1$) até 1800 rpm ($s=-1$). As figuras 11, 12, 13 e 14 fornecem uma visão mais rápida e abrangente do comportamento teórico da máquina; são apresentadas as grandezas conjugado, potência mecânica, corrente, fator de potência, potência ativa elétrica, potência reativa e rendimento todas em relação à velocidade. O intervalo de velocidades 0 a 900 rpm mostra o comportamento da máquina na função motor e para velocidades acima de 900 rpm é apresentado o comportamento da máquina como gerador. Atenção especial deve ser dada ao comportamento da máquina assíncrona na condição de gerador, faixa em destaque na tabela 13, que foi expandida na tabela 14; esta constitui-se na faixa de velocidades operacionais cujos valores utilizamos para realizar simulações sobre o circuito equivalente. A faixa de valores de velocidades considerada foi desde a velocidade síncrona 900rpm, ($s=0$), até 939 rpm, ($s=4,33\%$), que é algo superior à velocidade nominal. Os resultados são mostrados nas figuras 15, 16, 17 e 18 que correspondem às grandezas acima citadas. Esclarece-se que os valores apresentados são eficazes e teóricos não levando em consideração principalmente perdas rotacionais e perdas por efeito Joule.

Analisando-se os dados obtidos na simulação observa-se que os mesmos estão muito próximos dos publicados pelo fabricante e que reproduzimos nas tabelas 6 e 7. No

próximo capítulo, compara-se o resultado destas simulações com os resultados que se obtém através de medições efetuadas na máquina instalada na estrutura do Projeto PCE.

Apresenta-se agora, sem maiores comentários, apenas para uma melhor visualização do comportamento teórico de uma máquina assíncrona como gerador interligado à rede de distribuição, alguns gráficos de interesse operacional originados da tabela 14. Uma especial atenção pode ser dada às informações contidas na figura 17; nela é apresentada a variação da potência ativa e da reativa em relação à velocidade; é propósito deste trabalho buscar uma forma de determinar analiticamente o valor da potência nominal de uma máquina assíncrona quando esta é colocada na função de gerador. Também interessa analisar a potência reativa absorvida pela máquina. Este assunto será melhor examinado no capítulo 6.

Tabela 13 - Resultado da simulação executada sobre o circuito equivalente do gerador do Projeto PCE. A linha em destaque representa a situação de corrente nominal

s	N(rpm)	T(Nm)	Pmec(kW)	IL(A)	FP	P(kW)	Q(kVAr)	Rend. (%)
1,00	0	2,76	0,00	35,1	0,455	6,09	11,91	0,0
0,98	18	2,80	0,05	35,0	0,458	6,12	11,87	0,8
0,96	36	2,85	0,10	35,0	0,461	6,15	11,83	1,7
0,94	54	2,89	0,16	34,9	0,464	6,17	11,78	2,5
0,92	72	2,94	0,21	34,8	0,467	6,20	11,73	3,4
0,90	90	2,99	0,27	34,7	0,471	6,23	11,68	4,3
0,88	108	3,04	0,33	34,6	0,474	6,26	11,62	5,3
0,86	126	3,10	0,39	34,5	0,477	6,28	11,57	6,2
0,84	144	3,15	0,45	34,4	0,481	6,31	11,51	7,2
0,82	162	3,21	0,52	34,3	0,485	6,34	11,44	8,2
0,80	180	3,27	0,59	34,2	0,489	6,37	11,38	9,2
0,78	198	3,33	0,66	34,1	0,493	6,41	11,31	10,3
0,76	216	3,39	0,73	34,0	0,497	6,44	11,24	11,4
0,74	234	3,46	0,81	33,9	0,501	6,47	11,16	12,5
0,72	252	3,52	0,89	33,7	0,506	6,50	11,08	13,6
0,70	270	3,59	0,97	33,6	0,511	6,53	11,00	14,8
0,68	288	3,66	1,05	33,4	0,516	6,57	10,91	16,1
0,66	306	3,73	1,14	33,3	0,521	6,60	10,82	17,3
0,64	324	3,81	1,23	33,1	0,526	6,63	10,72	18,6
0,62	342	3,89	1,33	32,9	0,532	6,67	10,61	19,9
0,60	360	3,96	1,43	32,7	0,538	6,70	10,50	21,3
0,58	378	4,05	1,53	32,5	0,544	6,73	10,39	22,7
0,56	396	4,13	1,64	32,3	0,550	6,76	10,26	24,2
0,54	414	4,22	1,75	32,0	0,557	6,80	10,13	25,7
0,52	432	4,30	1,86	31,7	0,564	6,82	9,99	27,2
0,50	450	4,39	1,98	31,5	0,572	6,85	9,83	28,8
0,48	468	4,48	2,10	31,1	0,579	6,88	9,67	30,5
0,46	486	4,57	2,22	30,8	0,588	6,90	9,50	32,2
0,44	504	4,67	2,35	30,5	0,596	6,92	9,32	34,0
0,42	522	4,76	2,48	30,1	0,605	6,93	9,12	35,8
0,40	540	4,85	2,62	29,6	0,614	6,94	8,91	37,7
0,38	558	4,94	2,75	29,2	0,624	6,93	8,68	39,7
0,36	576	5,02	2,89	28,7	0,634	6,92	8,44	41,8
0,34	594	5,10	3,03	28,1	0,645	6,90	8,18	43,9
0,32	612	5,17	3,17	27,5	0,656	6,87	7,90	46,1
0,30	630	5,23	3,30	26,8	0,667	6,81	7,61	48,4
0,28	648	5,28	3,42	26,1	0,679	6,74	7,29	50,8
0,26	666	5,31	3,54	25,2	0,691	6,64	6,95	53,2
0,24	684	5,31	3,63	24,3	0,703	6,51	6,59	55,8
0,22	702	5,29	3,71	23,3	0,715	6,35	6,21	58,5
0,20	720	5,22	3,76	22,2	0,727	6,14	5,81	61,2
0,18	738	5,11	3,77	20,9	0,737	5,88	5,39	64,1
0,16	756	4,94	3,73	19,6	0,746	5,56	4,96	67,1
0,14	774	4,69	3,63	18,1	0,752	5,18	4,53	70,1
0,12	792	4,36	3,45	16,4	0,754	4,71	4,11	73,3
0,10	810	3,93	3,18	14,6	0,747	4,17	3,71	76,4
0,08	828	3,39	2,81	12,8	0,726	3,53	3,34	79,6
0,06	846	2,73	2,31	10,8	0,677	2,80	3,04	82,4
0,04	864	1,94	1,67	9,1	0,574	1,98	2,83	84,4
0,02	882	1,02	0,90	7,7	0,373	1,09	2,72	82,4

Tabela 13 - continuação

s	N(rpm)	T(Nm)	Pmec(kW)	IL(A)	FP	P(kW)	Q(kVAr)	Rend. (%)
0,00	900	0,00	0,00	7,2	0,056	0,15	2,75	0,0
-0,02	918	-1,10	-1,01	8,0	0,264	0,81	2,94	79,5
-0,04	936	-2,25	-2,11	9,8	0,469	1,75	3,29	82,9
-0,06	954	-3,40	-3,24	12,1	0,570	2,63	3,79	81,1
-0,08	972	-4,50	-4,37	14,7	0,610	3,42	4,44	78,1
-0,10	990	-5,50	-5,45	17,3	0,618	4,07	5,19	74,8
-0,12	1008	-6,38	-6,43	19,9	0,607	4,59	6,02	71,3
-0,14	1026	-7,12	-7,30	22,2	0,585	4,95	6,88	67,9
-0,16	1044	-7,69	-8,03	24,4	0,556	5,18	7,74	64,4
-0,18	1062	-8,12	-8,63	26,4	0,523	5,27	8,57	61,1
-0,20	1080	-8,41	-9,09	28,2	0,489	5,25	9,36	57,8
-0,22	1098	-8,58	-9,42	29,7	0,454	5,14	10,08	54,6
-0,24	1116	-8,65	-9,66	31,0	0,420	4,97	10,73	51,4
-0,26	1134	-8,64	-9,80	32,2	0,387	4,74	11,31	48,4
-0,28	1152	-8,57	-9,87	33,2	0,355	4,48	11,82	45,4
-0,30	1170	-8,44	-9,88	34,0	0,324	4,20	12,27	42,6
-0,32	1188	-8,29	-9,84	34,8	0,295	3,91	12,66	39,8
-0,34	1206	-8,10	-9,77	35,4	0,268	3,62	13,00	37,0
-0,36	1224	-7,90	-9,68	36,0	0,243	3,33	13,29	34,4
-0,38	1242	-7,70	-9,56	36,4	0,219	3,04	13,54	31,8
-0,40	1260	-7,48	-9,43	36,8	0,197	2,76	13,75	29,3
-0,42	1278	-7,27	-9,29	37,2	0,176	2,50	13,94	26,9
-0,44	1296	-7,06	-9,15	37,5	0,157	2,24	14,09	24,5
-0,46	1314	-6,85	-9,00	37,7	0,139	2,00	14,23	22,2
-0,48	1332	-6,65	-8,85	37,9	0,122	1,77	14,34	20,0
-0,50	1350	-6,45	-8,71	38,1	0,107	1,55	14,44	17,8
-0,52	1368	-6,26	-8,56	38,3	0,092	1,34	14,53	15,6
-0,54	1386	-6,08	-8,42	38,4	0,078	1,14	14,60	13,6
-0,56	1404	-5,90	-8,28	38,5	0,065	0,96	14,66	11,5
-0,58	1422	-5,73	-8,15	38,7	0,053	0,78	14,71	9,6
-0,60	1440	-5,57	-8,02	38,7	0,042	0,61	14,75	7,6
-0,62	1458	-5,41	-7,89	38,8	0,031	0,45	14,79	5,8
-0,64	1476	-5,26	-7,77	38,9	0,021	0,31	14,82	3,9
-0,66	1494	-5,12	-7,65	39,0	0,011	0,16	14,84	2,1
-0,68	1512	-4,99	-7,54	39,0	0,002	0,03	14,86	0,4
-0,70	1530	-4,86	-7,43	39,1	0,007	0,10	14,88	1,3
-0,72	1548	-4,73	-7,33	39,1	0,015	0,22	14,89	3,0
-0,74	1566	-4,61	-7,22	39,1	0,022	0,33	14,90	4,6
-0,76	1584	-4,50	-7,13	39,2	0,030	0,44	14,91	6,2
-0,78	1602	-4,39	-7,03	39,2	0,037	0,55	14,92	7,8
-0,80	1620	-4,29	-6,94	39,2	0,043	0,64	14,92	9,3
-0,82	1638	-4,19	-6,86	39,2	0,049	0,74	14,92	10,8
-0,84	1656	-4,09	-6,77	39,2	0,055	0,83	14,93	12,2
-0,86	1674	-4,00	-6,69	39,2	0,061	0,91	14,92	13,7
-0,88	1692	-3,91	-6,61	39,2	0,067	1,00	14,92	15,1
-0,90	1710	-3,82	-6,54	39,3	0,072	1,07	14,92	16,4
-0,92	1728	-3,74	-6,47	39,3	0,077	1,15	14,92	17,8
-0,94	1746	-3,66	-6,40	39,3	0,082	1,22	14,91	19,1
-0,96	1764	-3,59	-6,33	39,3	0,086	1,29	14,91	20,4
-0,98	1782	-3,52	-6,26	39,3	0,091	1,35	14,90	21,6
-1,00	1800	-3,45	-6,20	39,3	0,095	1,42	14,90	22,9

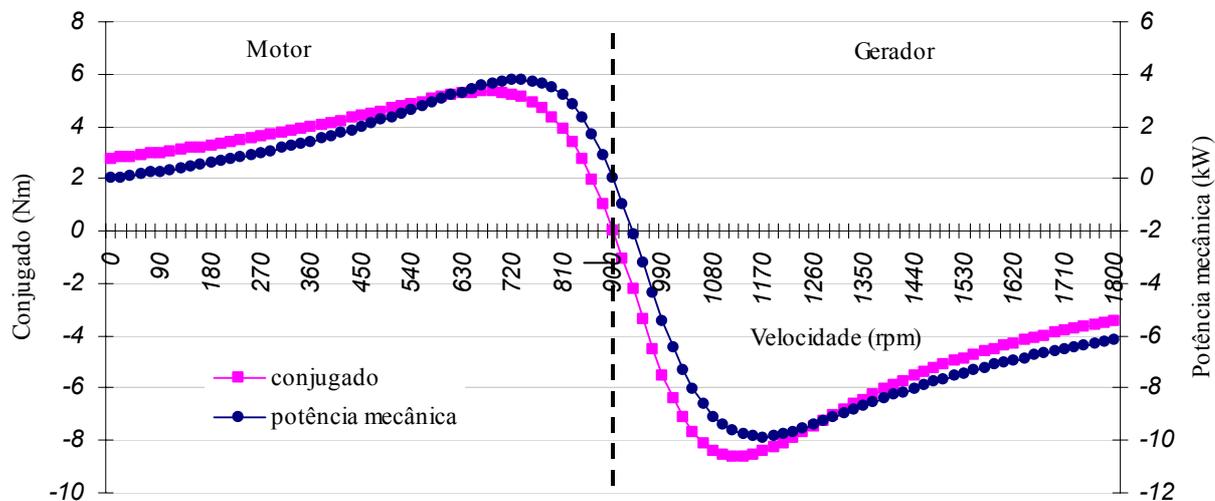


Figura 11 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Conjugado e potência mecânica para escorregamento no intervalo $[1,-1]$

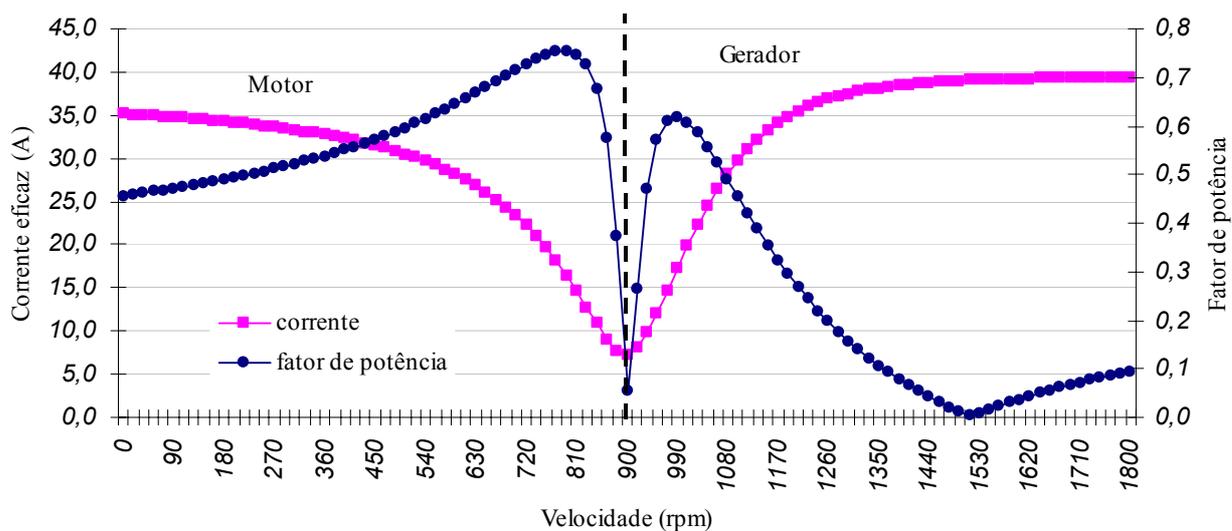


Figura 12 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Corrente eficaz e fator de potência para escorregamento no intervalo $[1,-1]$

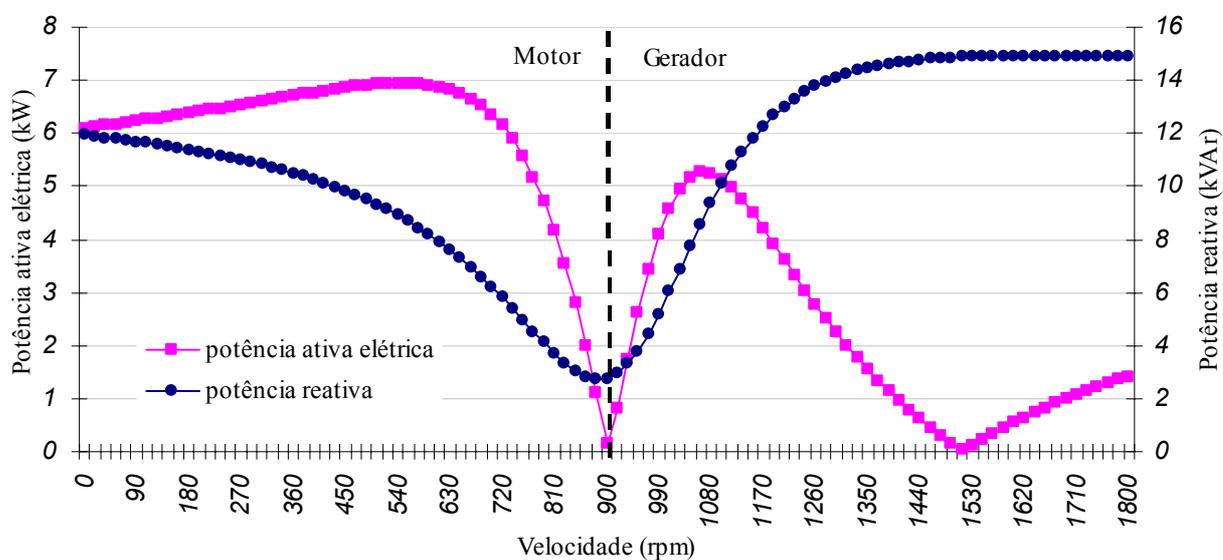


Figura 13 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Potência ativa elétrica e potência reativa para escorregamento no intervalo $[1,-1]$

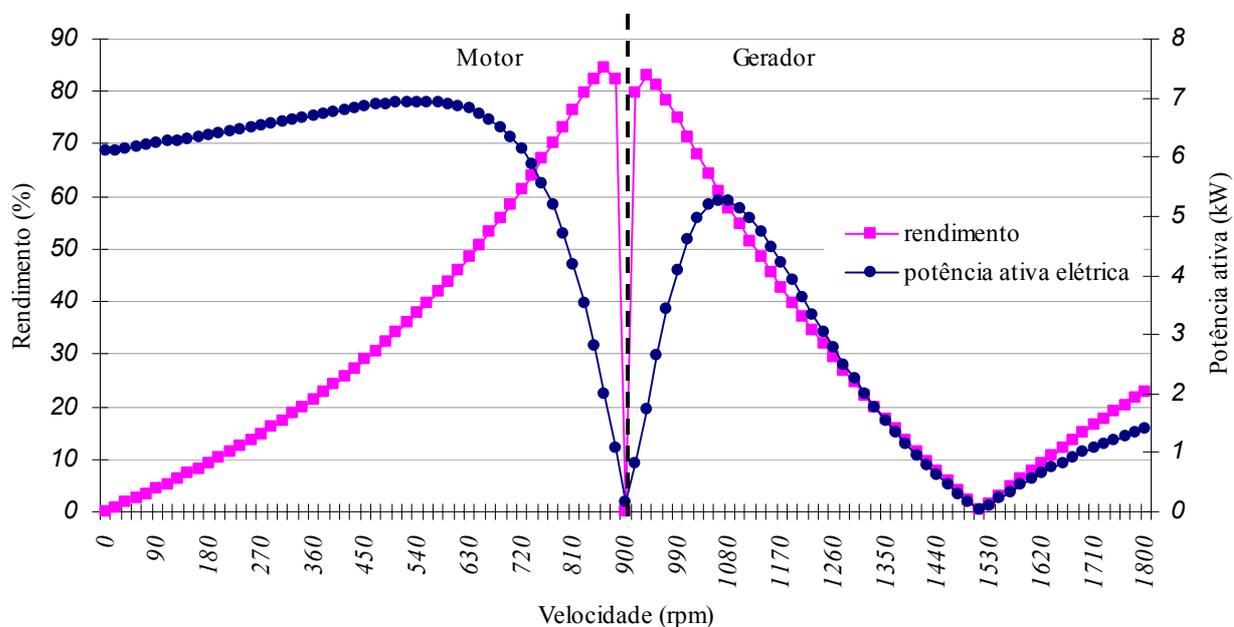


Figura 14 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Rendimento e potência elétrica ativa para escorregamento no intervalo $[1,-1]$

Tabela 14 - Resultado da simulação executada sobre o circuito equivalente do gerador do Projeto PCE, considerando velocidades operacionais. A linha em destaque representa as condições nominais

s	N(rpm)	T(Nm)	Pmec(kW)	IL(A)	FP	P(kW)	Q(kVAr)	Rend. %
-0,0030	903	0,16	0,15	7,3	0,004	0,01	2,77	7
-0,0040	904	0,22	0,19	7,3	0,014	0,04	2,78	19
-0,0050	904	0,27	0,24	7,3	0,031	0,09	2,79	35
-0,0060	905	0,32	0,29	7,3	0,048	0,13	2,79	46
-0,0070	906	0,38	0,34	7,4	0,065	0,18	2,80	53
-0,0080	907	0,43	0,39	7,4	0,082	0,23	2,81	58
-0,0090	908	0,49	0,44	7,4	0,098	0,28	2,82	63
-0,0100	909	0,54	0,49	7,5	0,115	0,33	2,83	66
-0,0110	910	0,60	0,55	7,5	0,131	0,37	2,84	69
-0,0120	911	0,65	0,60	7,6	0,147	0,42	2,85	71
-0,0130	912	0,71	0,65	7,6	0,162	0,47	2,86	73
-0,0140	913	0,77	0,70	7,6	0,178	0,52	2,87	74
-0,0150	913	0,82	0,75	7,7	0,193	0,57	2,88	75
-0,0160	914	0,88	0,80	7,8	0,208	0,61	2,89	76
-0,0170	915	0,93	0,86	7,8	0,222	0,66	2,90	77
-0,0180	916	0,99	0,91	7,9	0,237	0,71	2,91	78
-0,0190	917	1,05	0,96	7,9	0,251	0,76	2,93	79
-0,0200	918	1,10	1,01	8,0	0,264	0,81	2,94	80
-0,0210	919	1,16	1,07	8,1	0,278	0,85	2,95	80
-0,0220	920	1,22	1,12	8,1	0,291	0,90	2,97	81
-0,0230	921	1,27	1,17	8,2	0,303	0,95	2,98	81
-0,0240	922	1,33	1,23	8,3	0,316	1,00	3,00	81
-0,0250	922	1,39	1,28	8,4	0,328	1,04	3,01	82
-0,0260	923	1,45	1,33	8,4	0,339	1,09	3,03	82
-0,0270	924	1,50	1,39	8,5	0,351	1,14	3,04	82
-0,0280	925	1,56	1,44	8,6	0,362	1,19	3,06	82
-0,0290	926	1,62	1,50	8,7	0,372	1,23	3,08	82
-0,0300	927	1,67	1,55	8,8	0,383	1,28	3,09	83
-0,0310	928	1,73	1,61	8,9	0,393	1,33	3,11	83
-0,0320	929	1,79	1,66	9,0	0,402	1,38	3,13	83
-0,0330	930	1,85	1,72	9,1	0,412	1,42	3,15	83
-0,0340	931	1,91	1,77	9,2	0,421	1,47	3,17	83
-0,0350	931	1,96	1,83	9,3	0,430	1,52	3,19	83
-0,0360	932	2,02	1,88	9,4	0,438	1,56	3,21	83
-0,0370	933	2,08	1,94	9,5	0,446	1,61	3,23	83
-0,0380	934	2,14	2,00	9,6	0,454	1,65	3,25	83
-0,0390	935	2,19	2,05	9,7	0,462	1,70	3,27	83
-0,0400	936	2,25	2,11	9,8	0,469	1,75	3,29	83
-0,0410	937	2,31	2,16	9,9	0,476	1,79	3,31	83
-0,0420	938	2,37	2,22	10,0	0,483	1,84	3,33	83
-0,0430	939	2,43	2,28	10,1	0,490	1,88	3,35	83

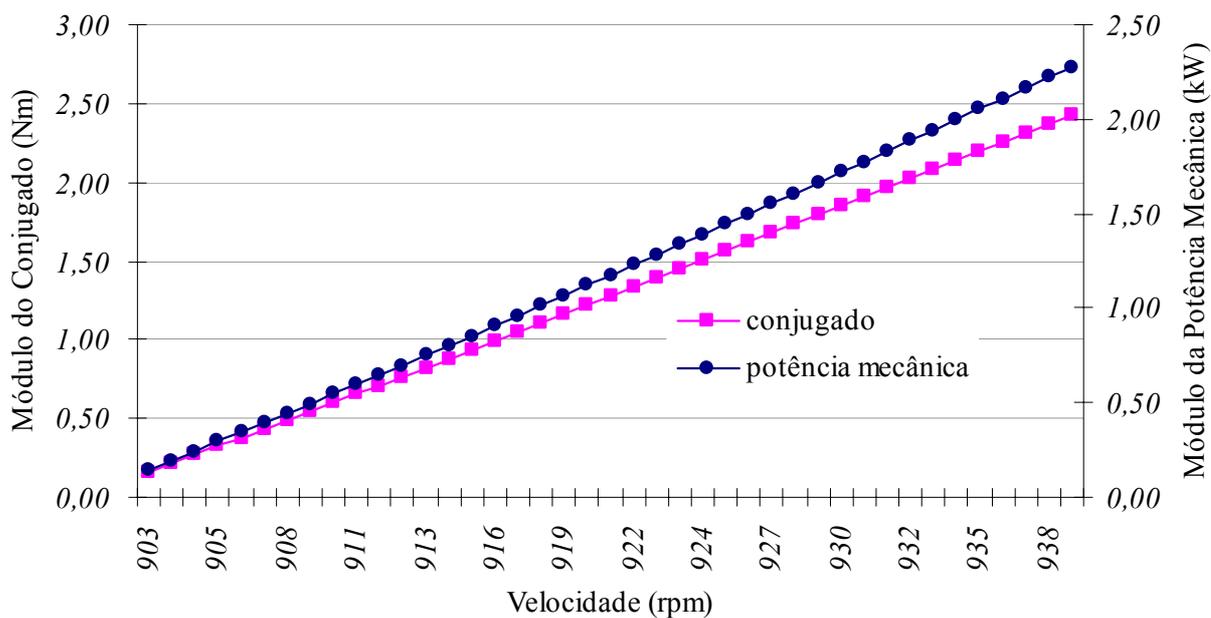


Figura 15 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Conjugado e potência mecânica na região operacional

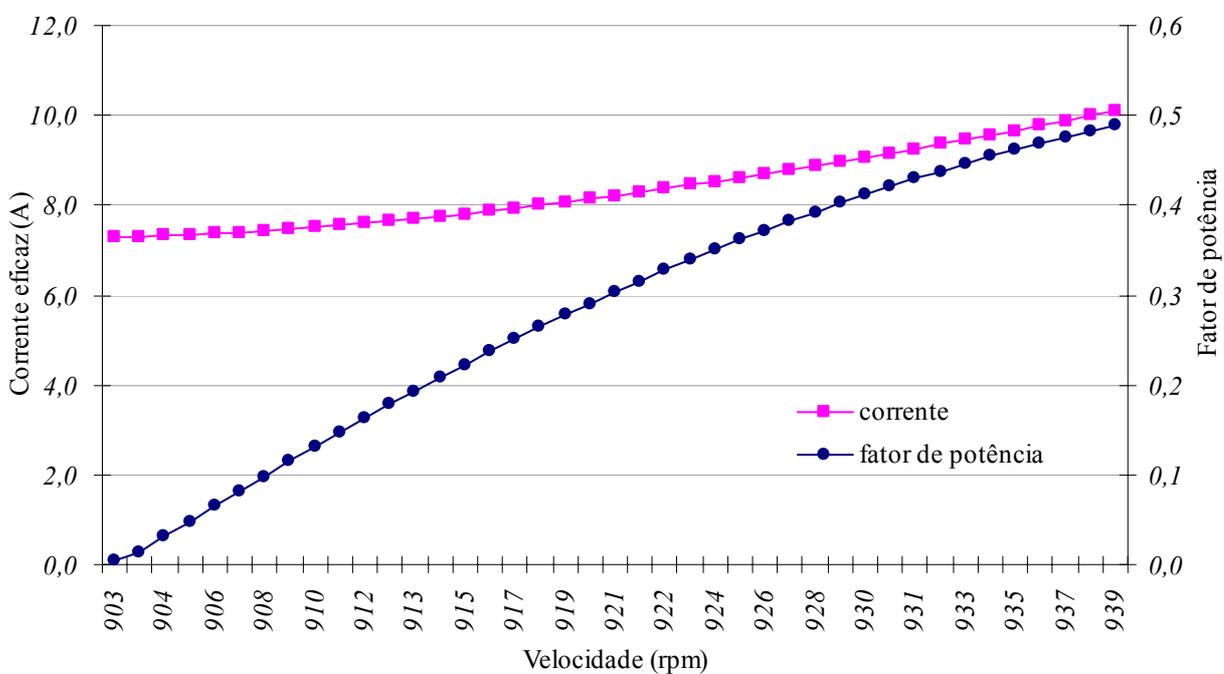


Figura 16 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Corrente e fator de potência na região operacional

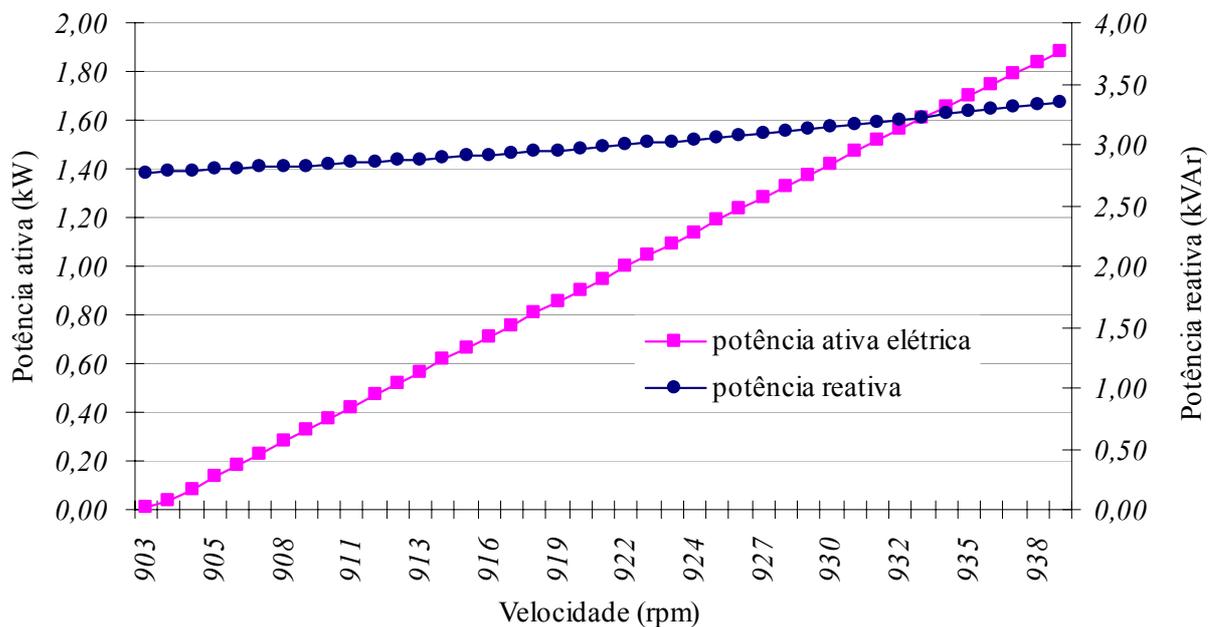


Figura 17 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Potência ativa e potência reativa na região operacional

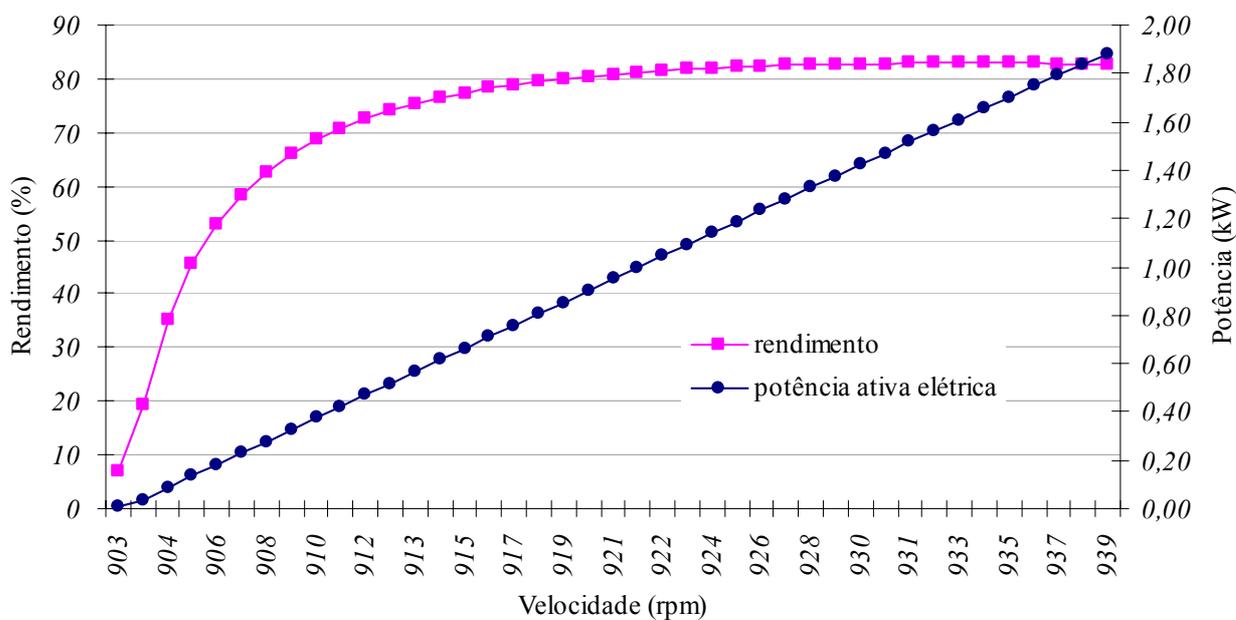


Figura 18 – Desempenho teórico do gerador do Projeto PCE - Rendimento e potência ativa na região operacional

5.0 ENSAIOS DE CAMPO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DO PROJETO PCE

O hardware do projeto PCE, no que diz respeito à automatização, está centrado no seu controlador lógico programável; trata-se de um equipamento comercial, de fabricação nacional, para uso geral, composto por três módulos principais: CPU, módulo de entradas e saídas e fonte. As tabelas 15 e 16 apresentam respectivamente as características técnicas do módulo CPU e do módulo de entradas e saídas.

Tabela 15 - Características técnicas do CLP utilizado no projeto PCE [34]

<i>Pontos de entrada digital</i>	8
<i>Pontos de saídas digitais</i>	6
<i>Circuito de supervisão</i>	Cão de guarda
<i>Comunicação serial</i>	RS 232C e RS 485
<i>Ferramenta de programação</i>	Microcomputador IBM/PC
<i>Carga de programas on line</i>	Sim
<i>Linguagem de programação</i>	“ladder diagram”
<i>Memória do programa aplicativo</i>	EEPROM ou flash eprom
<i>Retentividade da memória de operandos e programas</i>	Sim, mediante bateria interna de lítio (CR2032)
<i>Duração da bateria</i>	3 anos (0 a 40°C)
<i>Canais analógicos</i>	2 configuráveis como entrada ou saída
<i>Entrada para contagem rápida</i>	2
<i>Capacidade de expansão</i>	Até 128 pontos de E/S
<i>Relógio em tempo real</i>	Sim
<i>Processador</i>	Intel 80C32
<i>Freqüência do clock</i>	14,7456 MHz
<i>Capacidade da memória do programa aplicativo</i>	64 kBytes RAM 32 Kbytes de flash
<i>Tempo médio de execução por instrução contato</i>	5 μ s
<i>Temperatura de ambiente de operação</i>	0 a 60°C
<i>Umidade relativa do ar de operação</i>	5 a 95% sem condensação
<i>peso</i>	500g
<i>MTBF</i>	11250 horas @ 40°C
<i>Tensão de operação</i>	19,2 a 30 V; Nominal 24 Vc.c.
<i>Dissipação máxima do módulo</i>	11W
<i>Imunidade a ruídos e transientes</i>	De acordo com normas IEC e IEEE específicas

Tabela 16 - Características técnicas do módulo de E/S [34]

Características	Descrição
Entradas	16 8 programáveis para tensão (-10 V a +10 V) ou corrente (4 mA a 20 mA) 8 somente corrente (4 mA a 20 mA)
Saídas	4 tensão (-10 V a +10 V) e corrente (4 mA a 20mA) simultâneas
Resolução	12 bits
Exatidão	60,1% do fundo da escala @ 25°C
Calibração	Não necessária
Isolação	Entradas e saídas não isoladas
Alimentação	+24Vc.c. (19 Vc.c. a 30Vc.c.) Consumo 350 mA (máx.)

A figura 19 apresenta a configuração adotada para o sistema de automatização do projeto PCE. É radial tipo estrela, levando-se em consideração que mais de 95%[14][15][21] dos dispositivos de instrumentação de uma microcentral hidrelétrica estão na casa de máquinas isto é, estão fisicamente muito próximos; outro motivo é a necessidade do compartilhamento entre o CLP e a lógica discreta de segurança das informações que são colhidas da instrumentação instalada nos equipamentos. O sinal analógico é transmitido em corrente elétrica, na faixa de 4 a 20mA; os sinais digitais tem origem em contatos livres de tensão, (contatos secos) e são polarizados com tensão de 24Vc.c.

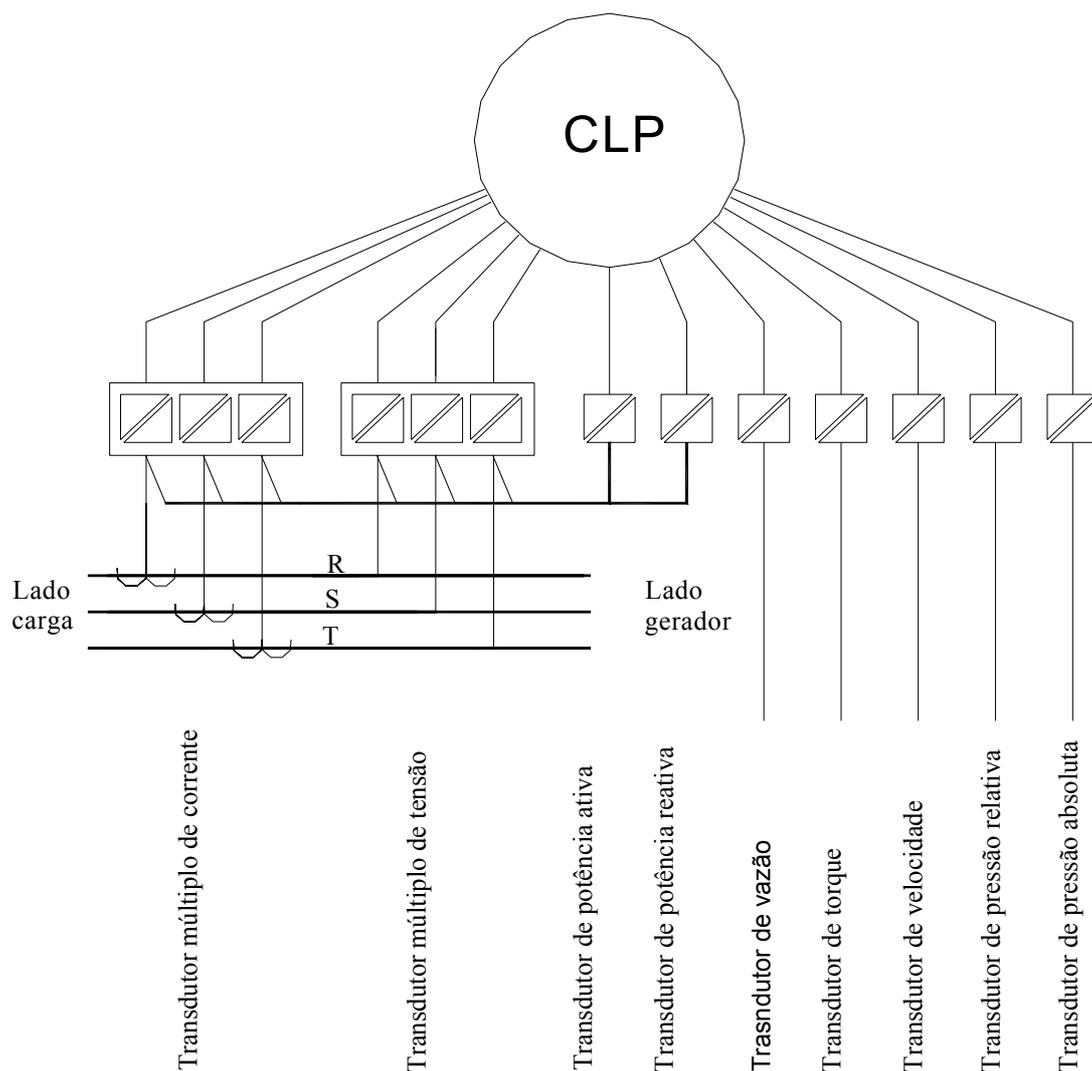


Figura 19 - Topologia do sistema de medição do projeto PCE

5.1 ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS ELETROMECCÂNICOS

O gerador do projeto PCE já teve as suas características apresentadas no capítulo 4. Apresenta-se agora as principais características técnicas dos outros equipamentos e instrumentos que se constituem nos equipamentos eletromecânicos do projeto PCE.

Turbina

Tipo Francis Espiral Simples com eixo horizontal

Altura da queda líquida: 25m

Vazão: 20 l/s

Potência do eixo da turbina: 5 CV (3,6 kW)

Rotação específica: 72 rpm

Bocal: ϕ 100 mm

Rotação de disparo: 3.240 rpm

Fabricante: Indústria Metalúrgica Möller



Figura 20 - Vista superior da Turbina Francis

Motobomba

Motor categoria N

Isolação B

Potência: 12,5 CV

Tensão: 220V/380/440 60Hz

Corrente nominal: 32A @ 220V

IP/IN=8,6

Vazão nominal da bomba: 20 l/s

Rotação: 3.510 rpm

Rotor: ϕ = 136 mm

$\cos \varphi=0,89$

FS=1,15

Rendimento: 87,5 %

Fabricante: Maqmotor

Reservatório de água

Capacidade: 1000 litros

Dimensões: 134 x 113 x 71 cm

Mesa para medição de conjugado

Este equipamento tem por finalidade transmitir ao sistema de aquisição de dados o conjugado mecânico envolvido no processo de geração de energia. A concepção básica do sistema mecânico se fundamentou no uso de uma base inferior rígida fisicamente conectada por quatro células de carga, projetadas para flexão a uma base superior de menor tamanho. As quatro células estão inclinadas de 45° com relação à vertical. O gerador está fisicamente fixado sobre a base superior, figuras 8 e 21.

O arranjo geométrico das partes constituintes da mesa de conjugado evita o aparecimento de oscilações indesejáveis, fazendo com que a única oscilação possível seja a produzida pelo torque do motor. As células de carga, também, foram projetadas de forma a terem uma maior rigidez à flexão no sentido do eixo do motor e permitirem a flexão em torno dele, produzida pelo conjugado [38].

O arranjo montado para a calibração da mesa de conjugado é mostrada na figura 21 e os resultados da calibração, na Tabela 17. O conjugado obtido no ensaio foi o resultado do produto de uma massa padrão pelo raio do volante de inércia; o rotor da máquina foi mantido travado. O sinal das células de carga, montadas na configuração de ponte completa, foi enviado ao condicionador de sinais de extensômetros. Este equipamento foi projetado nos laboratórios do DELET/UFRGS e fornece saída em volts com indicação digital ou saída analógica.

Tabela 17 - Resultado da calibração da mesa de conjugado

Conjugado (Nm)	leitura do indicador						
0,0	0,00	11,1	54,00	22,1	101,00	33,2	148,00
2,2	10,00	13,3	65,00	24,4	111,00	35,4	160,00
4,4	22,00	15,5	74,00	26,6	120,00	37,7	168,00
6,6	34,00	17,7	84,00	28,8	131,00	39,9	180,00
8,9	46,00	19,9	95,00	31,0	140,00	42,1	188,00

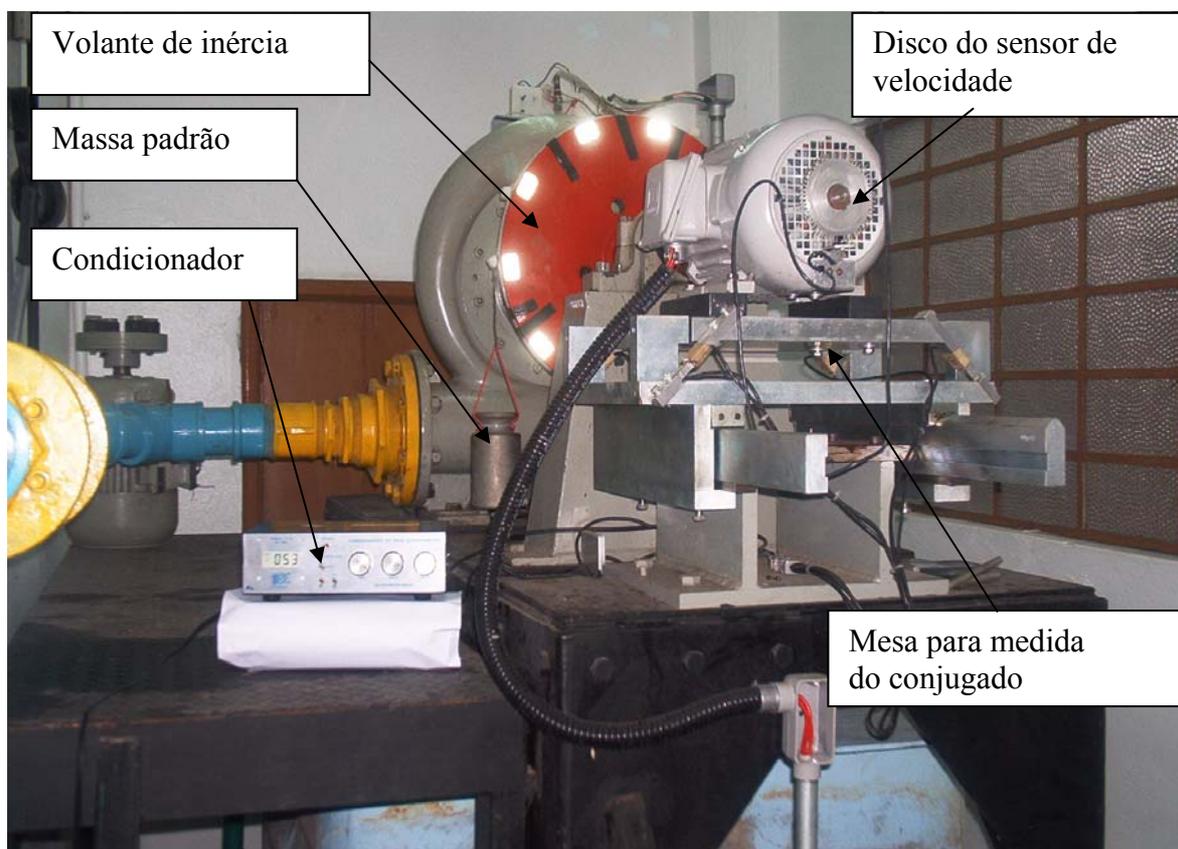


Figura 21 - Arranjo para aferição da mesa de conjugado

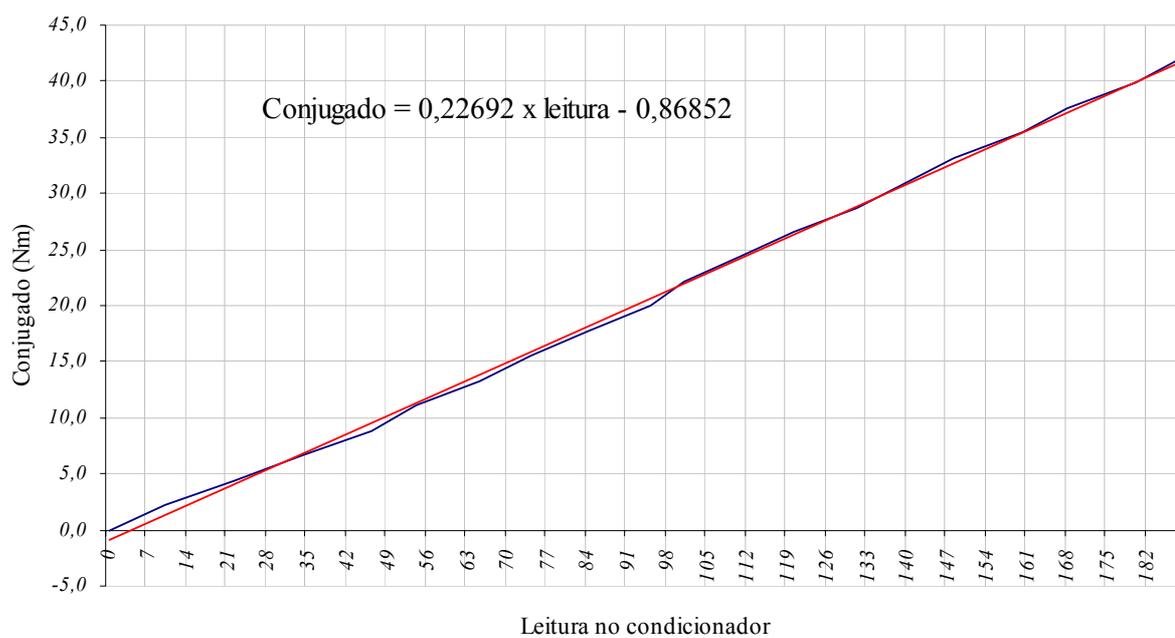


Figura 22 - Curva de calibração da mesa de conjugado

A determinação da equação da curva de calibração, cujo resultado gráfico apontou para uma reta, figura 22, foi obtida pela aplicação do método dos mínimos quadrados por este método apresentar o menor erro neste caso [22]. Observa-se que embora a tabela passe pelo ponto de coordenadas (0,0) a reta representativa do conjugado, determinada conforme descrito acima, apresenta um desvio que não é significativo porque os valores importantes que correspondem à potência nominal da máquina sob teste, estão próximos à outra extremidade do gráfico.

A capacidade da mesa de conjugado pode ser modificada permutando-se os conjuntos de sensores, que são em número de dois. Um conjunto sensor dota a mesa para conjugado máximo de 98,2 Nm e o outro para 392,8 Nm. Este intervalo de conjugados máximos cobre uma faixa de motores de 3 a 15CV [38].

Medida da vazão

Sensor do tipo eletromagnético

Alimentação: 115 a 230 Vc.a.

Saída em corrente: 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA

Saída digital: 0 a 10 kHz

Funções: medição, totalização do fluxo e do tempo, monitoração do fluxo

Fabricante: Danfoss

Modelo: MAG5000

Transmissor de pressão relativa

Alimentação: 10 a 30 Vc.c.

Sinal de entrada: 0 a 10 bar

Saída em corrente: 4 a 20 mA

Precisão: 0,5%

Fabricante: Danfoss

Modelo: MBS4500

Transmissor de pressão absoluta

Alimentação: 10 a 30 Vc.c.

Sinal de entrada: 0 a 2,5 bar

Saída em corrente: 4 a 20 mA

Precisão: 0,5%

Fabricante: Danfoss

Modelo: MBS4500

Quadros de comando

No quadro de comando local estão instalados o controlador lógico programável, os transdutores e os indicadores do sistema de medição local. Medidas indicadas:

Corrente das fases R, S, T;

Tensão das fases R, S, T;

Potência ativa;

Potência reativa;

Velocidade.

O quadro da subestação abriga o disjuntor, a chave seccionadora do gerador e os transformadores de corrente.

Conversor de frequência

Alimentação: 220V

Entrada e saída trifásicas

Corrente nominal: 36A

Torque variável

Aplicável a qualquer motor de indução

Chaves de potência IGBT(menor ruído audível e magnético)

Frequência de saída: 0,1 a 400Hz

Aceleração e desaceleração de 0.1 a 3600 sec

Aceita comando por CLP

Comunicação sinal MOD BUS

Fabricante: Danfoss

Modelo: 5000

Transformador de corrente

Fabricante: Siemens

Tipo: AGK-A

Nível de Isolação: 4 kV

Frequência: 50/60 Hz

Primário: 50 A

Secundário: 5 A

Exatidão: 1,2 a 2,5

Transdutores de corrente e de tensão

Fabricante: Yokogawa

Modelo: 2280A

Medições: CA - RMS

Tipo de Circuito: Múltiplo

Alimentação Auxiliar: 127/60Hz

Entrada: 0 a 5A

Saída: 0 a 5V

Precisão: $\pm 0,25\%$

Transdutores de potência ativa e reativa

Fabricante: Yokogawa

Modelo: 2280A

Tipo de Circuito: Trifásico 4 fios

Alimentação Auxiliar: 127 V/60 Hz

Entrada: 5 A/220 V

Saída: 0 a 5 V

Precisão: $\pm 0,25\%$

Indicadores de painel

Fabricante: Yokogawa

Modelo:

Número de Dígitos: 3 ½

Alimentação Auxiliar: 127 V/60 Hz

Entrada: 0 a 5 Vc.c.

Escala: 0 a 300 V

Precisão: $\pm 0,1\%$

Sistema de corrente contínua

É constituído por um conjunto de duas baterias seladas de 12 V, 54 Ah cada uma, ligadas em série e uma fonte de tensão contínua simétrica, dimensionada para atender todos os consumidores de corrente contínua e ainda apresenta a função de carregador/flutuador de

baterias. A corrente nominal da fonte é de 12 A e a tensão nominal é +12 V / 0 / -12 V. A carga alimentada em tensão contínua é o sistema de controle e proteção da planta piloto.

Sistema de supervisão

A plataforma básica é um microcomputador tipo PC. Este equipamento tem a função de comunicar-se com o controlador, a fim de permitir as seguintes operações: envio de comandos do operador para o controlador; a visualização sinótica do processo; a identificação de alarmes; tratamento das variáveis analógicas; tratamento das variáveis de estado; registro cronológico dos eventos.

O software de suporte e aplicação (supervisório) que é utilizado no microcomputador foi desenvolvido nos laboratórios do LMEAE/DELET/UFRGS. A figura 23 apresenta uma das telas que foram desenvolvidas para o telecomando e supervisão.

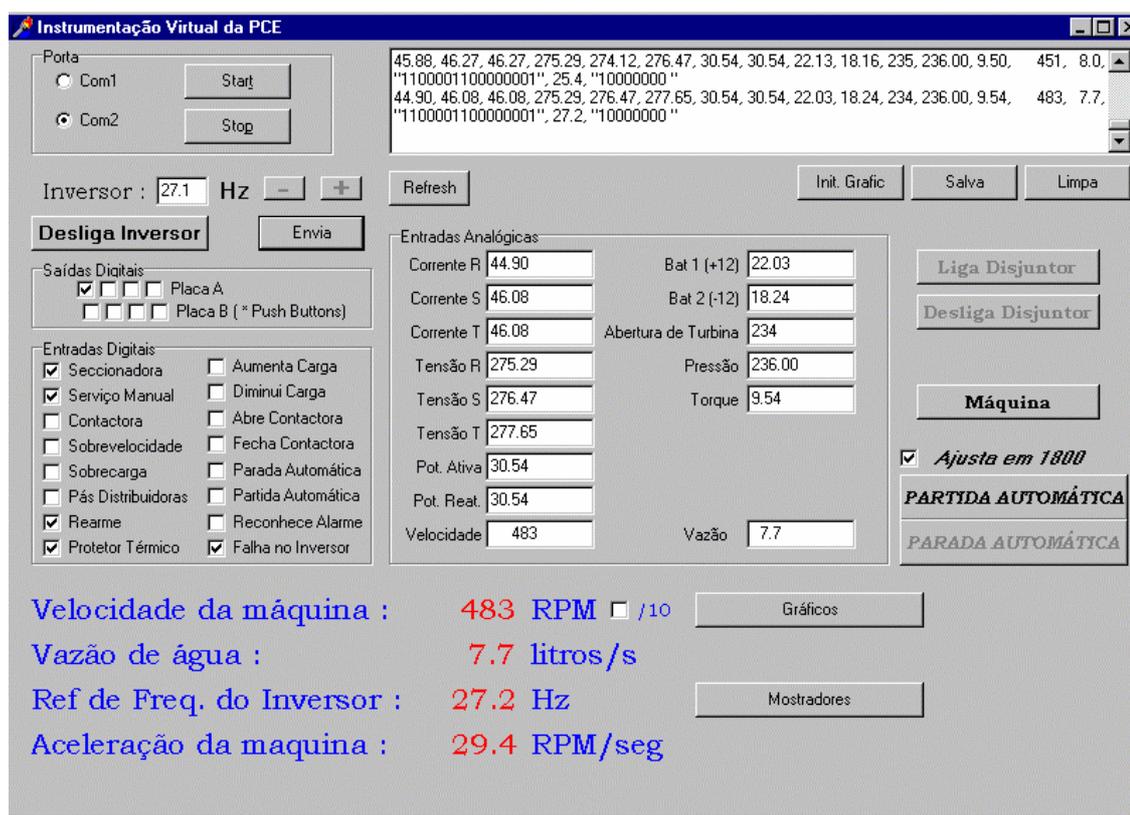


Figura 23 - Tela de comando e supervisão do Projeto PCE

Ela foi montada com o uso da linguagem Delphi; o operador tem a sua disposição a indicação do valor das principais variáveis do processo e pode atuar sobre a planta piloto através de botões de comando virtuais.

Na figura 24 observa-se outra tela desenvolvida com a mesma tecnologia que é

disponível para qualquer uma das variáveis do processo. As informações podem ser acompanhadas e gravadas para análise futura. Os dados armazenados na memória do programa podem ser exportados para planilhas eletrônicas de softwares comerciais e com isto contar com todos os recursos destes produtos. A figura 25 exibe a tela atual para telesupervisão desenvolvida para o Projeto PCE com base na plataforma Elipse.

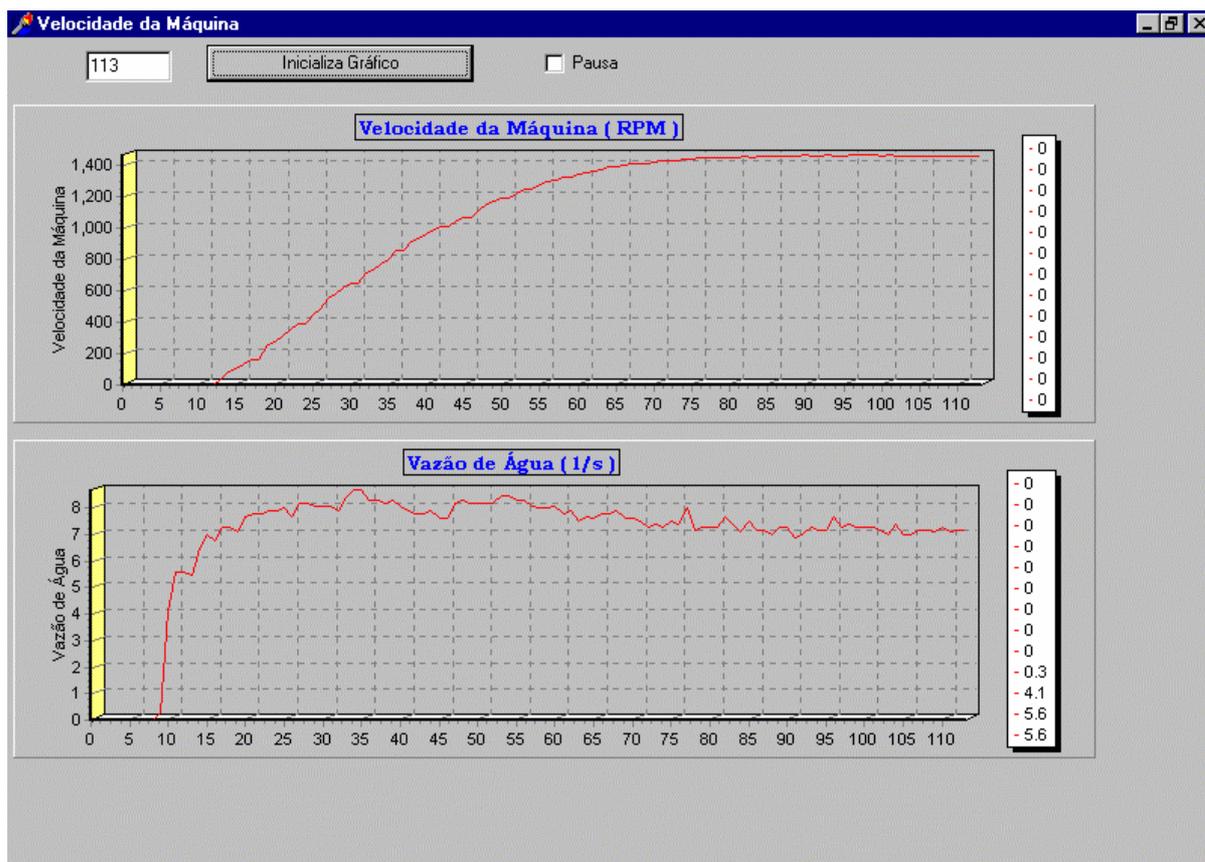


Figura 24 - Tela de registro das variáveis desenvolvida para o projeto PCE

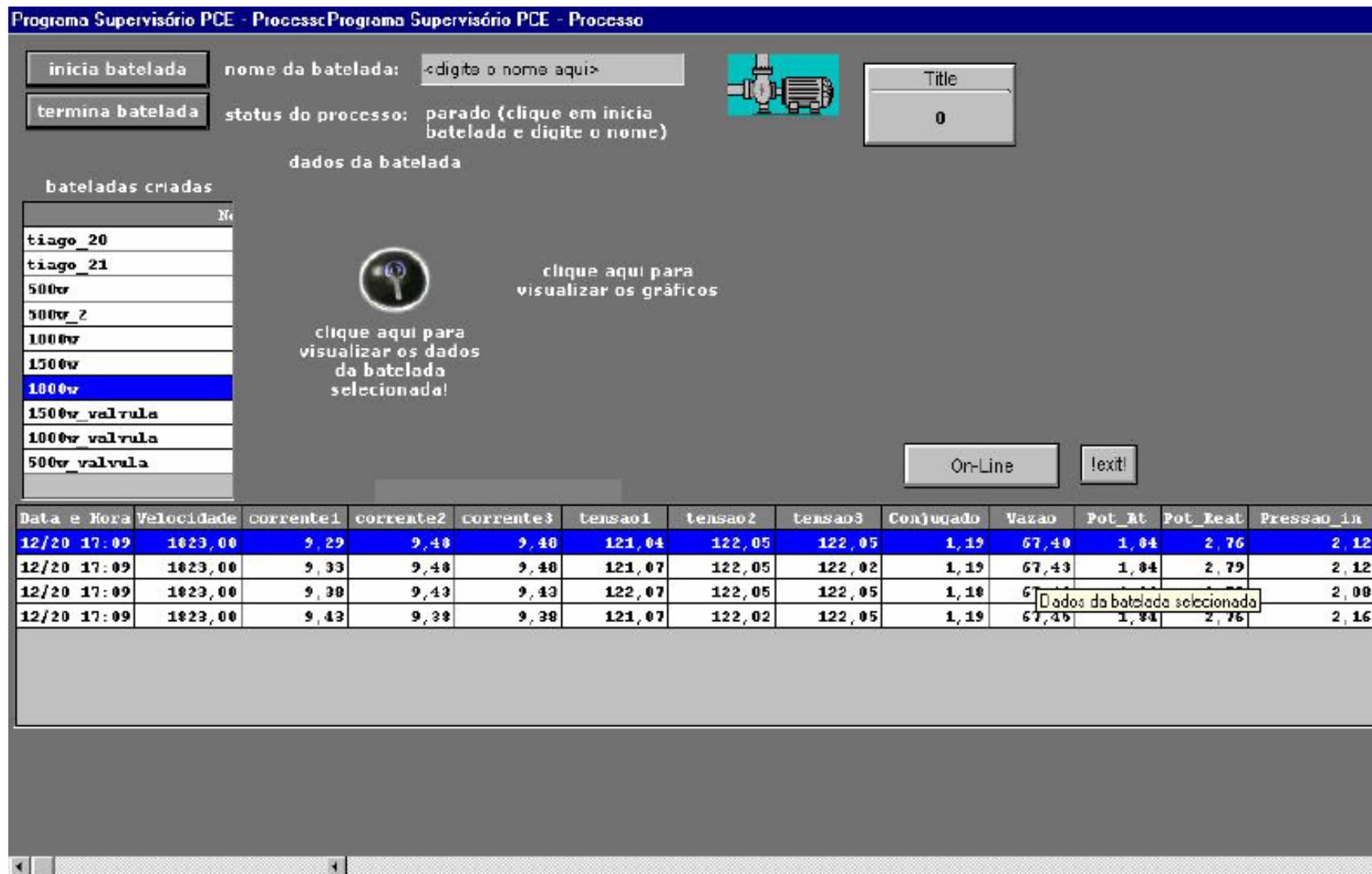


Figura 25 - Versão atual da tela de registro das variáveis desenvolvida para o projeto PCE

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS E GRÁFICOS COMPARATIVOS DO DESEMPENHO

A tabela 18 apresenta o resultado dos ensaios realizados na máquina do Projeto PCE onde foram feitas medidas das principais grandezas operacionais. As figuras 26, 27, 28 e 29 mostram os gráficos que foram gerados a partir desta tabela onde também foram colocados os valores teóricos das grandezas das mesmas grandezas, estabelecidos na Tabela 14; estes estão identificados como valores calculados e os primeiros, obtidos através das medidas feitas com instrumentos de medida de laboratório, na máquina instalada na estrutura do Projeto PCE, identificados como valores medidos.

Como valores calculados, partimos da tabela 14 e selecionamos os valores das grandezas correspondentes aos mesmos 12 valores de velocidade mostrados na tabela 18, desde a situação a vazio até a de plena carga, para que haja uma melhor equalização dos resultados apresentados. Este procedimento levou à existência de um ponto de inflexão na linha do gráfico que não interfere na análise porque ocorre em uma região situada a aproximadamente 50% da faixa de potência ativa. O que se observa de uma maneira geral é que os gráficos são muito semelhantes o que aponta para a coerência dos resultados. Estes diagramas, figuras 23 a 26, serão analisados no capítulo 6, pois deles tiraremos as conclusões para a análise e definição da potência que poderá ser atribuída a uma máquina assíncrona, operando como gerador.

Tabela 18 - Resultados obtidos com o gerador instalado na planta piloto do Projeto PCE

Veloc. (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Pot. reat. (kVAr)	Pot. ativa (kW)	Conjugado (Nm)	Pot. Apar. (kVA)	F.P. (%)	Pot. mec. (kW)	Rend. (%)
904	209,5	6,4	2,374	0,001	1,34	2,374	0,0	0,127	0,8
906	209,5	6,6	2,392	0,189	3,22	2,399	7,9	0,305	61,8
910	208,5	6,8	2,463	0,359	4,92	2,489	14,4	0,468	76,7
912	209,5	7,0	2,552	0,499	6,51	2,600	19,2	0,621	80,3
913	210,0	7,2	2,614	0,582	7,64	2,678	21,7	0,730	79,7
916	210,5	7,4	2,696	0,697	8,66	2,785	25,0	0,830	84,0
917	211,5	7,6	2,782	0,760	9,57	2,884	26,4	0,918	82,8
919	211,0	7,8	2,863	0,862	10,82	2,990	28,8	1,040	82,9
921	211,0	8,0	2,927	0,969	12,29	3,083	31,4	1,184	81,8
923	210,5	8,2	2,995	1,062	13,31	3,178	33,4	1,285	82,6
924	210,5	8,4	3,080	1,135	14,28	3,282	34,6	1,381	82,2
926	210,5	8,6	3,137	1,224	15,53	3,367	36,4	1,505	81,3

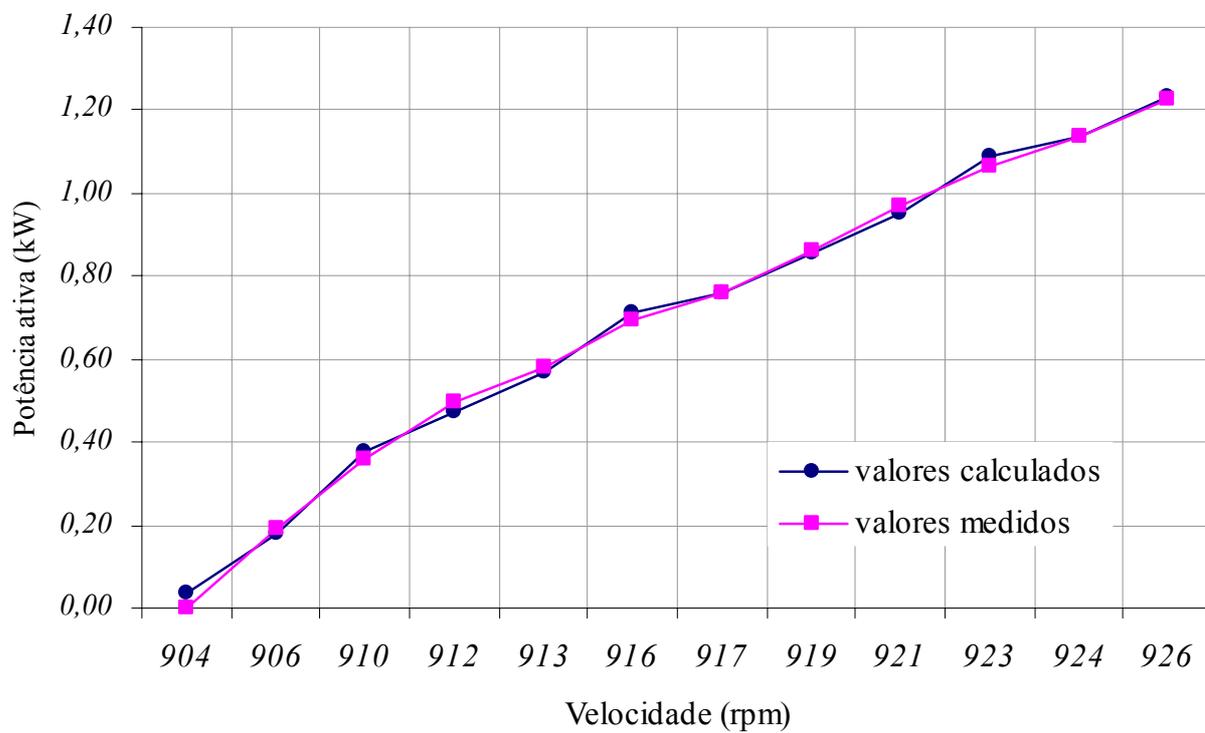


Figura 26 - Potência ativa calculada e medida em relação à velocidade

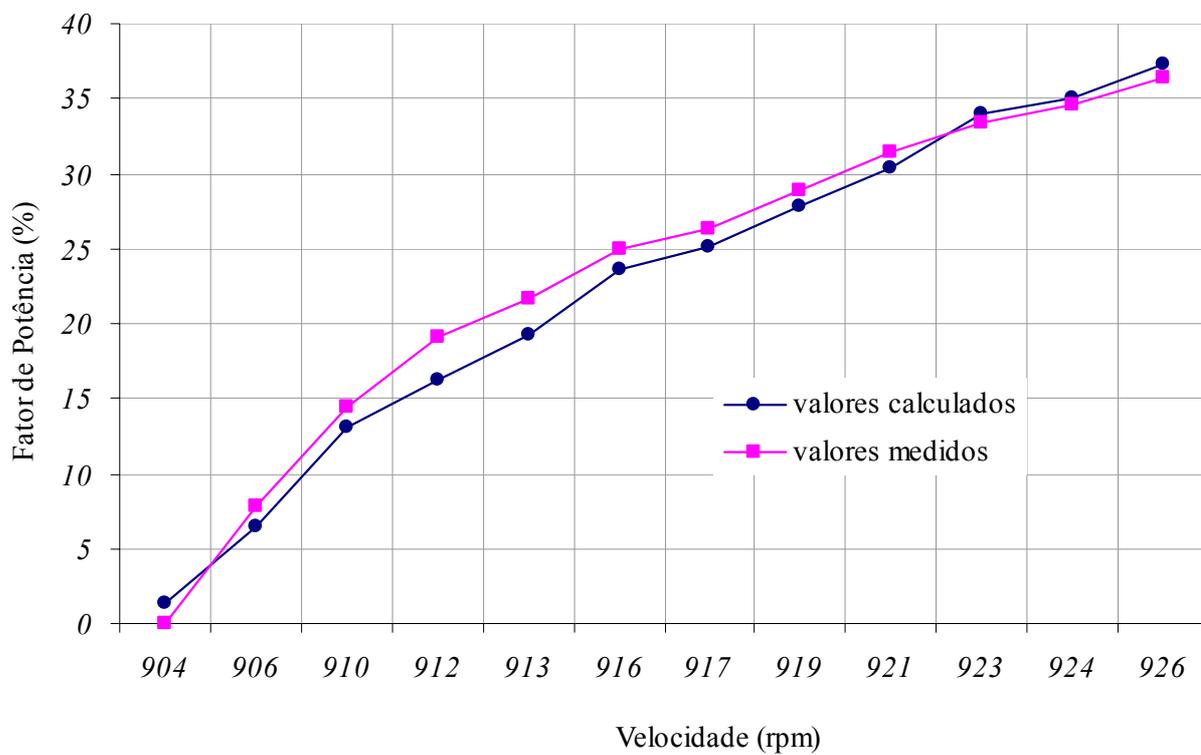


Figura 27 - Fator de potência calculado e medido em relação à velocidade

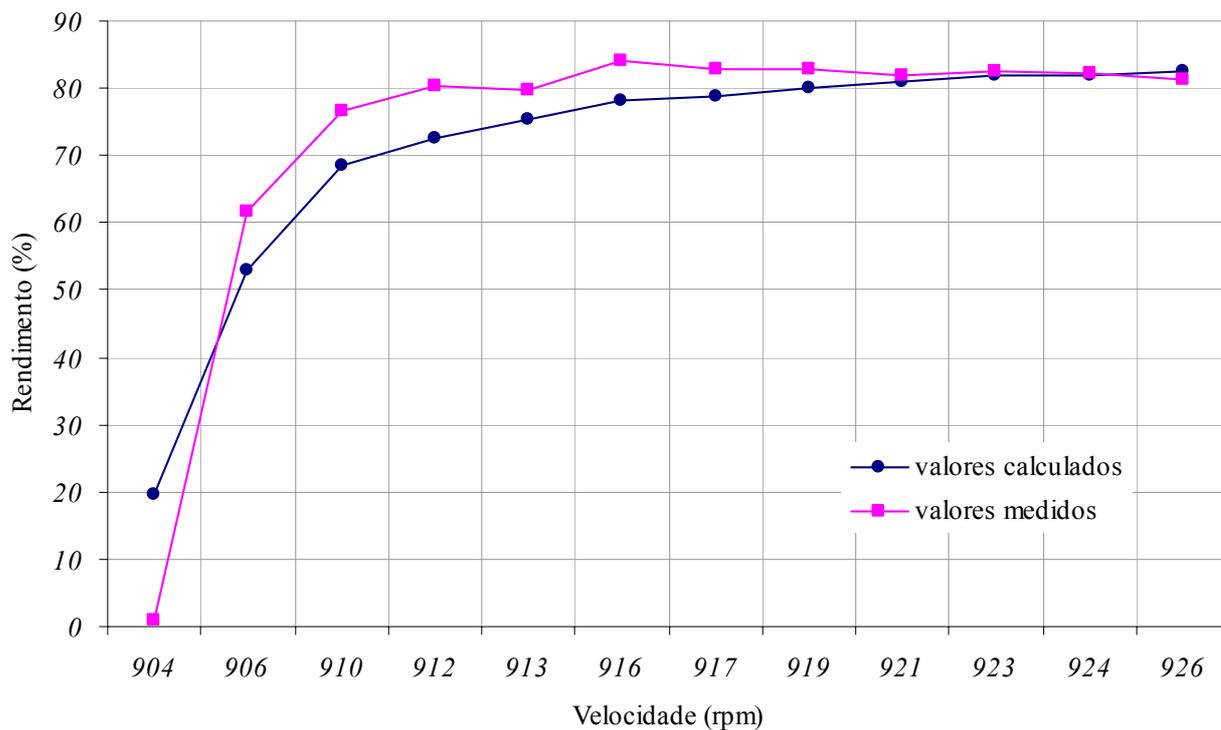


Figura 28 - Rendimento calculado e medido em relação à velocidade

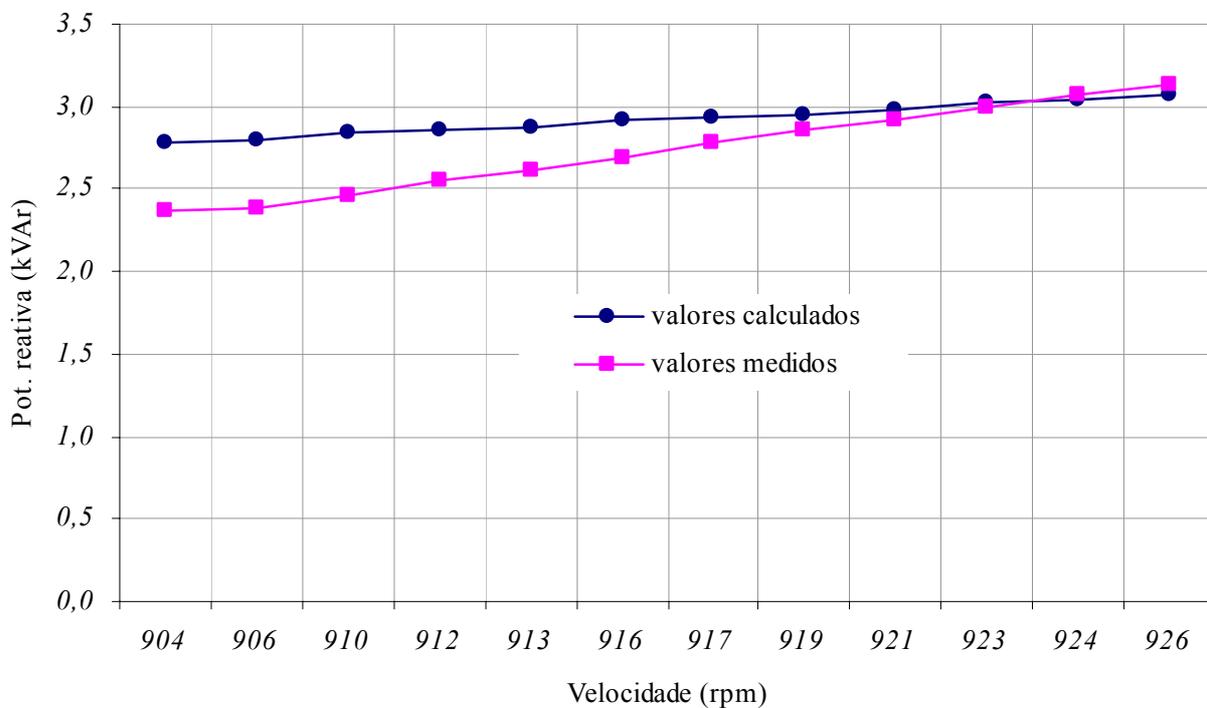


Figura 29 - Potência reativa calculada e medida em relação à velocidade

6.0 DEFINIÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL ATIVA DE UMA PCH IMPLEMENTADA COM GERADOR ASSÍNCRONO

A máquina assíncrona, como se sabe, é fundamentalmente um motor elétrico fabricado para funcionar normalmente em velocidade subsíncrona e para o qual o fabricante definiu uma potência ativa, disponível no eixo, que é um dos dados que está presente na placa de identificação deste equipamento [17]. O nosso propósito é o de explorar o funcionamento da máquina assíncrona em velocidade supersíncrona quando opera como gerador de energia elétrica. Analisaremos agora em três etapas os aspectos que definirão a potência que poderá ser atribuída à máquina assíncrona quando ela está instalada em uma microcentral hidrelétrica.

6.1 POTÊNCIA DO GERADOR ASSÍNCRONO: CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS, LEGAIS E TÉCNICAS

A bibliografia aborda o assunto geração assíncrona de uma forma muito tímida, dirigindo a sua aplicação normalmente a micro-aproveitamentos ou à geração não convencional de energia elétrica [4][10]. Chapallaz [1] afirma que a utilização de geradores assíncronos de até 30 kW reduz o custo do investimento em cerca de dois terços em relação ao custo correspondente à instalação de geradores síncronos; também considera competitiva a utilização de máquinas assíncronas funcionando como geradores com potências nominais acima de 100 kVA. O sistema brasileiro de energia elétrica impõe restrições operacionais para a aplicação de geradores de indução com potências nominal acima de 1 MW [10] em função do baixo fator de potência próprio deste sistema de geração. O limite estabelecido pela Eletrobrás é fruto da política executada por esta empresa, não havendo razão técnica que se estabeleça um limite de forma absoluta; em Portugal, por exemplo, é permitido a utilização de geradores assíncronos com potências individuais de até 5 MVA, com a devida correção do fator de potência [37].

Quando o gerador assíncrono é conectado a uma rede de distribuição alimentada fundamentalmente por máquinas síncronas, a potência reativa necessária à sua excitação deve ser fornecida pela rede na qual ele está conectado. Isto significa que a fonte que alimenta esta rede, normalmente um transformador do sistema de transmissão ou de distribuição que foi dimensionado considerando potência ativa e reativa para atender a sua carga passiva, agora deverá ter disponibilidade para atender também o gerador assíncrono. Eis um limite técnico capaz de definir a potência nominal do gerador assíncrono a ser instalado em uma PCH: a

capacidade de absorção de potência reativa por parte do sistema elétrico local.

6.2 POTÊNCIA DO GERADOR ASSÍNCRONO EM FUNÇÃO DA HIDRAULICIDADE

As pequenas centrais hidroelétricas são classificadas quanto ao seu porte e altura de queda, de acordo com a tabela 1; segundo ainda a classificação de PCH elas podem dispor de um pequeno reservatório ou serem do tipo *fio d'água*.

Se uma PCH tiver um reservatório de água, a vazão disponível para o turbinamento é facilmente definida em função do regime de funcionamento da central, do volume de água disponível e da vazão afluyente. Se for do tipo *fio d'água*, um dos parâmetros observados é a curva de duração, ou curva de permanência ou ainda curva de frequência, que apresenta o levantamento das vazões médias históricas do curso d'água durante um certo período de tempo; sugere-se um período nunca inferior a 20 anos [11][26]. Com base nos dados históricos, a potencialidade do aproveitamento hidrelétrico fica definida como sendo igual à potência disponível para vazões que ocorrem entre 90% e 100% do tempo [26]; este dado é considerado igual à probabilidade de ocorrência de futuras vazões. Considerando o valor médio, pode-se dimensionar a PCH para vazões que ocorrem com uma frequência de 95% [26]; este critério supõe que haverá água vertida sobre a crista da barragem por pequenos intervalos de tempo ao longo do ano.

Conhecida a vazão disponível, determina-se a queda líquida. Esta equivale à queda bruta, topográfica, menos as perdas de carga nas tubulações e dutos por onde deve passar o fluxo, desde o topo da queda até a entrada da turbina.

Com estes dados, a potência mecânica teórica em kW, disponível na entrada da turbina fica determinada pela equação [10][11][26]:

$$P_h = 9,81 Q_v H_l \quad (27)$$

Q_v é vazão em m^3/s e H_l é a queda líquida que corresponde à altura de queda física menos a perda de carga nos órgãos de adução; 9,81 é uma constante para a conversão da vazão de água medida em toneladas por segundo, multiplicada pela altura de queda líquida medida em metros, para obter potência ativa em kW.

A potência mecânica no eixo da máquina assíncrona é igual P_h multiplicado pelo rendimento da turbina [11].

6.3 POTÊNCIA DO GERADOR ASSÍNCRONO EM FUNÇÃO DOS SEUS DADOS NOMINAIS

A potência da máquina assíncrona é limitada basicamente, pela temperatura do enrolamento do estator. Sob condições nominais na função motor, a máquina deve fornecer a sua potência máxima tendo-se como espelho da temperatura do motor a intensidade da corrente nominal. Quando a máquina opera no modo gerador, está com velocidade acima da nominal, mais precisamente com velocidade supersíncrona. Pode-se afirmar nesta situação que ela está fora das condições nominais; a capacidade de refrigeração deve aumentar posto que, se o sistema de arrefecimento da máquina for composto por ventilador acoplado ao eixo do rotor o fluxo de ar refrigerante aumenta. Isto sugere que o limite da potência nominal, não seja o limitado pela corrente nominal, mas por uma corrente de valor algo superior, aumentando a potência do gerador [1]. Evidentemente que este acréscimo de potência, se realmente houver, exigirá que a máquina primária entregue mais potência ao eixo e o rendimento do conjunto pode ser menor, inviabilizando a operação com uma corrente do gerador maior que a nominal. Este estudo é inclusive sugerido no capítulo correspondente à conclusão desta dissertação, com o uso da estrutura do projeto PCE. O que se pode afirmar é que se o gerador for limitado em sua corrente nominal de motor, então a potência aparente disponível na saída será igual à da máquina na função motor. As perdas rotacionais e as perdas por efeito Joule serão compensadas pela máquina primária.

Os motores elétricos em funcionamento a vazio apresentam valores de intensidade muito superior à dos transformadores. Este efeito é intrínseco a este tipo de máquina e é devido ao tipo de materiais utilizados na constituição da máquina e também devido à existência de um entreferro entre o circuito do estator e do rotor. Este fenômeno também acontece quando a máquina é colocada na função de gerador. Na máquina de 1,5 kW objeto dos nossos ensaios, por exemplo, os valores da intensidade da corrente elétrica a vazio que calculamos e que medimos nos levaram a valores da ordem de 84% e 74% respectivamente, conforme pode ser visto nas Tabelas 14 e 18 e na figura 29. Na situação de funcionamento a vazio, a potência ativa em jogo é muito baixo devido apenas às perdas rotacionais e efeito Joule; isto significa que a principal componente da corrente elétrica neste caso é reativa e mostra-se muito significativa. Reproduz-se o valor da potência reativa nas figuras 30 e 31, juntamente com a informação sobre a corrente; nestas figuras as setas indicam os valores das grandezas no ponto correspondente à rotação nominal.

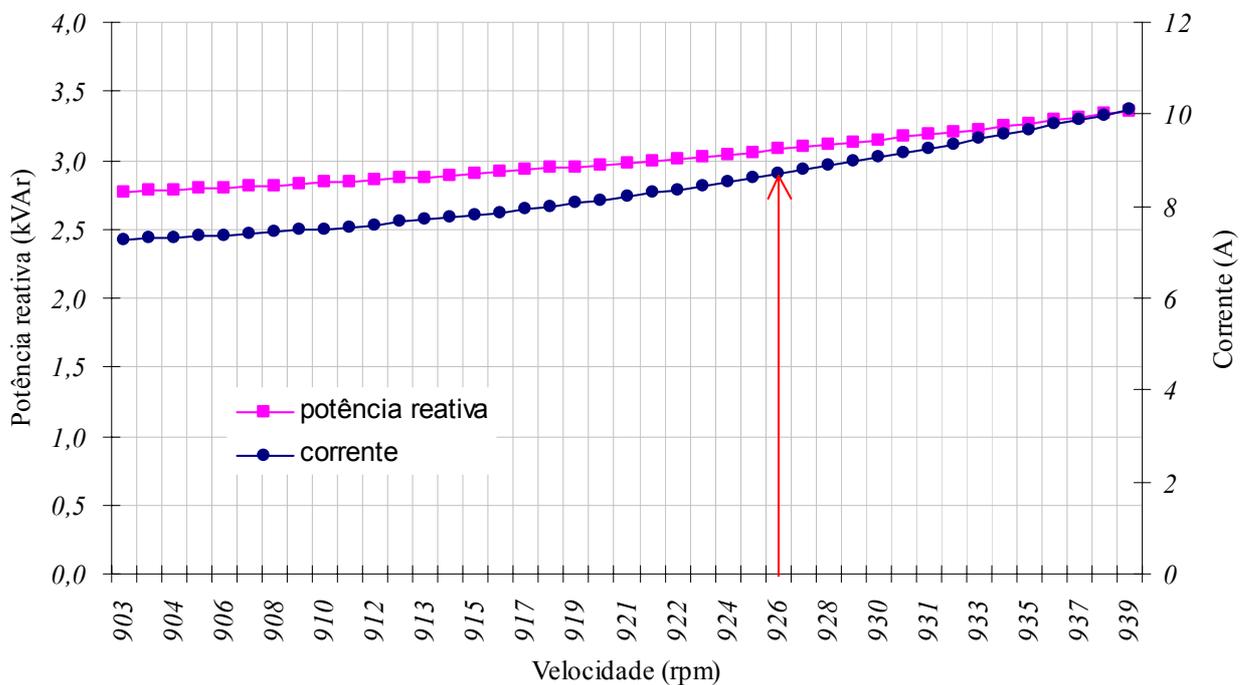


Figura 30 – Corrente e potência reativa teórica em função da velocidade do gerador assíncrono de 2CV, 8 pólos montado na estrutura do Projeto PCE

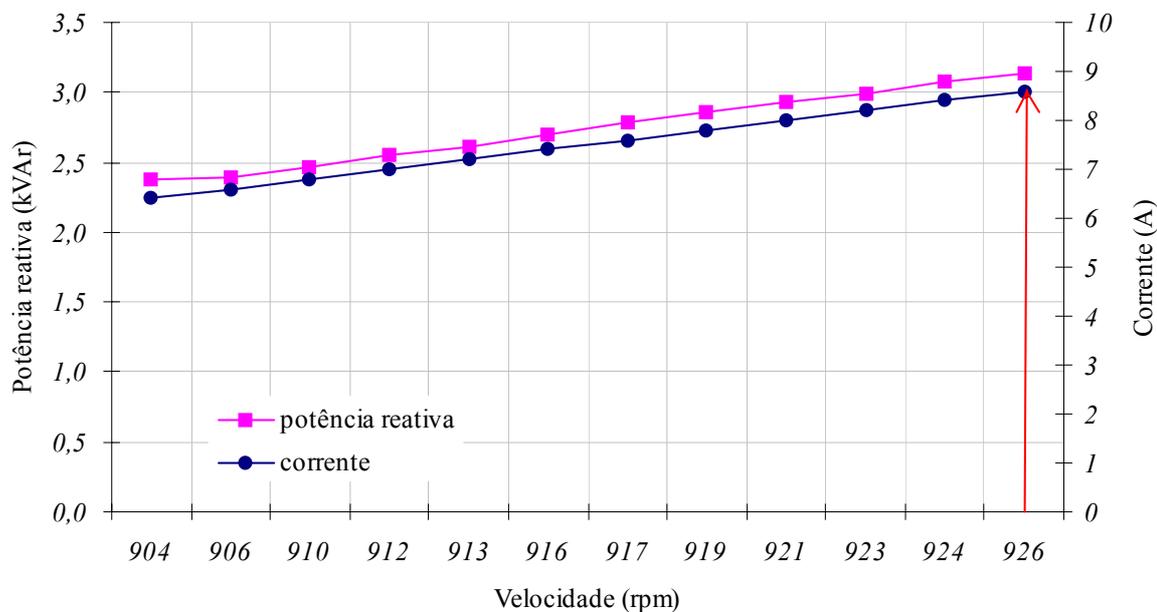


Figura 31 – Corrente e potência reativa em função da velocidade do gerador assíncrono obtida por medições realizadas em uma máquina de 2CV, 8 pólos montado na estrutura do Projeto PCE

A primeira figura foi obtida por simulação considerando o circuito equivalente da máquina e as equações apresentadas no capítulo 3 desta dissertação; a segunda é o resultado de medidas realizadas com a microcentral em funcionamento. Observa-se que quando $s=0$, a intensidade da corrente elétrica é respectivamente 7,6 A e 6,2 A; pode-se atribuir uma parcela desta diferença ao aumento da temperatura do motor, que implicou no aumento da sua impedância. Nesta situação $I_2=0$ e a corrente $I_1 = I_0$ é necessária para alimentar a reatância de magnetização. O resultado é uma considerável potência reativa indutiva e pelo fato das perdas rotacionais estarem sendo fornecidas pela máquina primária; potência ativa é muito baixa, pois corresponde apenas às perdas no cobre e no ferro do estator; como consequência tem-se um fator de potência próximo a zero. Neste momento a potência reativa pode ser dada pelas seguintes expressões:

$$Q = I_m^2 x_m \quad (28)$$

$$Q = \frac{E_1^2}{x_m} \quad (29)$$

A figura 32 mostra o fluxo de corrente no circuito equivalente a uma fase da máquina assíncrona quando esta está em velocidade supersíncrona e conectada à rede de distribuição; o sentido das correntes I_1 e I_2 estão invertidas em relação à situação delas na operação como motor.

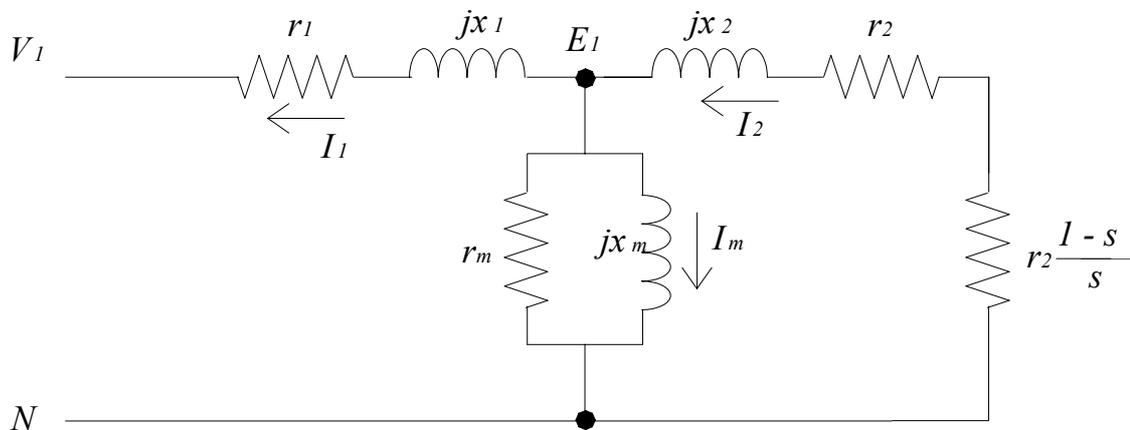


Figura 32 – Fluxo principal de corrente na máquina assíncrona na operação como gerador

A corrente de linha I_l , resultante da soma fasorial da corrente de excitação I_m e da componente ativa I_2 , causa uma queda de tensão na impedância $r_l + jx_l$ que somada à tensão V_l aplicada aos terminais da máquina eleva a tensão E_l aumentando o valor da potência reativa da máquina, conforme mostra a equação (29); este fato pode ser melhor visualizado na figura 33.

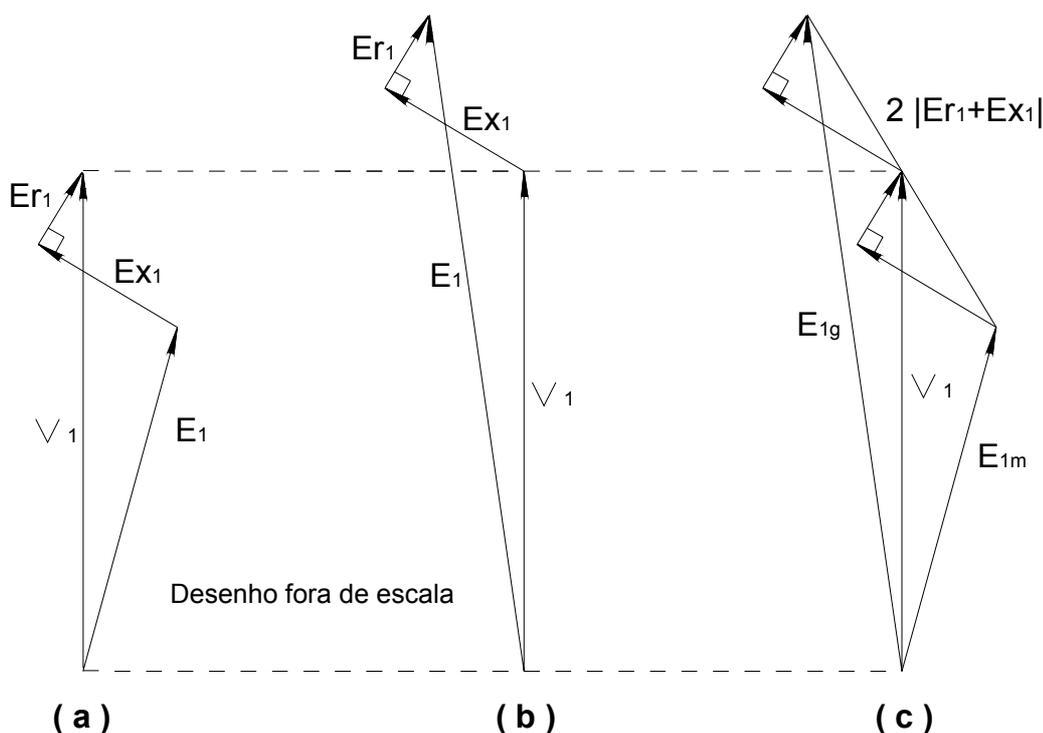


Figura 33 – Diagramas fasoriais da máquina assíncrona na operação como motor(a) e gerador(b) [1]; em (c) visualização da variação da tensão interna E_l

Esta figura, reproduzida de Chapalaz [1], apresenta o diagrama fasorial da máquina assíncrona nas funções de motor (a) e gerador (b), operando com a mesma corrente nominal I_l e mesma tensão de linha V_l . Analisando o diagrama fasorial percebe-se que a tensão E_l responsável pela potência reativa da máquina assíncrona sofre um acréscimo no valor de seu módulo igual a $2 I_l (r_l + jx_l)$; aproveitando a figura 33 e acrescenta-se em (c) uma composição dos dois diagramas destacando o aumento da tensão sobre a reatância de magnetização. Pode-se então com base na equação (30) afirmar que a potência reativa da máquina assíncrona na operação como gerador será maior em relação à operação da mesma máquina como motor, mantidas as mesmas condições de alimentação. Pode-se interpretar este fenômeno de outra forma: na situação mostrada na figura 33 há a necessidade de uma maior excitação da máquina assíncrona na função de gerador para permitir um fluxo maior de potência ativa através do entreferro, no sentido rotor-estator, para compensar as perdas

ôhmicas envolvidas no circuito do estator. Em função do exposto, considerando a máxima potência aparente de uma mesma máquina assíncrona, pode-se afirmar que fator de potência que ela apresenta à rede a que está conectada na função gerador será menor que o fator de potência que ela apresenta na função motor assíncrono; por conseguinte, de acordo com (30) a potência elétrica ativa do gerador assíncrono é menor que a do motor assíncrono.

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (30)$$

Quando se tratar de motor, a potência ativa elétrica envolve a potência mecânica no eixo mais as perdas; a potência nominal do motor é a potência máxima disponível no seu eixo, portanto uma parcela da potência ativa elétrica. No gerador, a potência ativa nominal é a elétrica posto que a potência mecânica é fornecida pela máquina primária que também fornece energia para compensar as perdas.

Uma avaliação da potência elétrica do gerador assíncrono pode ser obtida a partir da hipótese de que a potência aparente da máquina nas duas funções deve ser a mesma. Podemos então escrever respectivamente para a máquina assíncrona na função de motor, equação (31) e para a função gerador, equação (32), as seguintes equações:

$$S_{E-m} = \frac{P_{mec}}{(\cos \varphi_g) \eta_m} \quad (31)$$

$$S_{E-g} = \frac{P_{E-g}}{\cos \varphi_g} \quad (32)$$

Fazendo $S_{E-m} = S_{E-g}$, obtemos a equação (33)[1]

$$P_{E-g} = \frac{\cos \varphi_g}{(\cos \varphi_m) \eta_m} P_{mec} \quad (33)$$

Nesta equação P_{mec} , $\cos \varphi_m$ e η_m são valores nominais da máquina assíncrona fornecidos pelo fabricante e que devem aparecer de forma explícita na placa de identificação da máquina [16]. A definição da potência elétrica nominal da máquina assíncrona na função de gerador fica dependendo unicamente do fator de potência que ela apresenta nesta situação; uma expressão que defina este parâmetro será o nosso objetivo nos próximos parágrafos.

Vamos considerar o circuito equivalente, apresentado na figura 6 modificando os valores das impedâncias com base na simplificação proposta por Chapman [7], ou seja, vamos fazer uma análise no circuito equivalente adaptado para uma região específica de

funcionamento do gerador assíncrono: no entorno negativo do escorregamento, figura 34. Vamos também considerar as conclusões que se obtêm a partir da simulação e dos ensaios realizados nas máquinas instaladas na estrutura do Projeto PCE, figuras 30 e 31; a potência reativa absorvida pela máquina na situação de carga nula é significativa e aumenta à medida que a potência ativa elétrica cresce. Com base nestas observações podemos montar o diagrama da figura 35 onde é mostrado o triângulo das potências válido para a máquina assíncrona operando como gerador. O ângulo φ_g mostrado nesta figura é o que nos interessa determinar para poder definir, de acordo com a equação (33), a potência elétrica máxima do gerador assíncrono. As equações abaixo foram escritas com base nas simplificações e nas figuras 34 e 35.

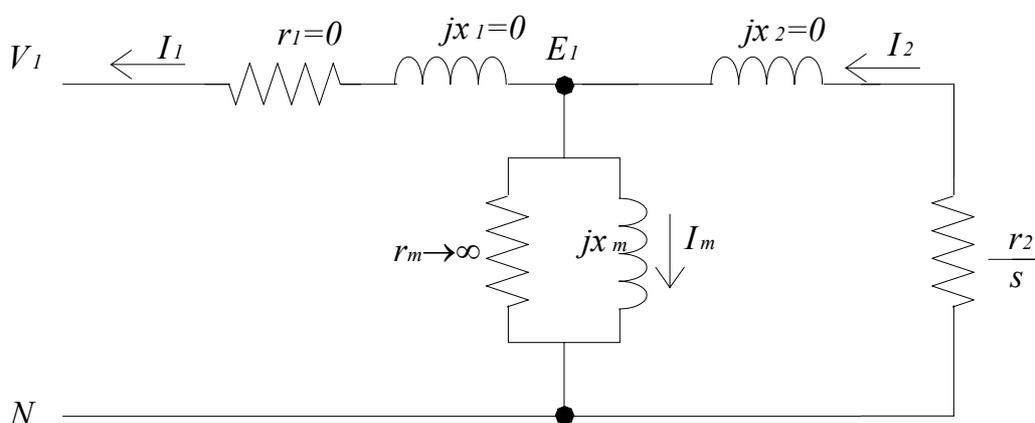


Figura 34 – Circuito equivalente da máquina assíncrona simplificado em função do funcionamento no entorno negativo da velocidade síncrona

A potência reativa indutiva é devida unicamente a x_m e o seu módulo dado pelas equações (28) ou (29).

$$Q_T = Q_0 + \Delta Q \quad (34)$$

$$Q_T = \frac{E_1^2}{x_m} \quad (35)$$

Para a potência ativa, desprezando-se x_2 , podemos escrever a equação:

$$P = \frac{E_1^2}{\frac{r_2}{s}} \quad (36)$$

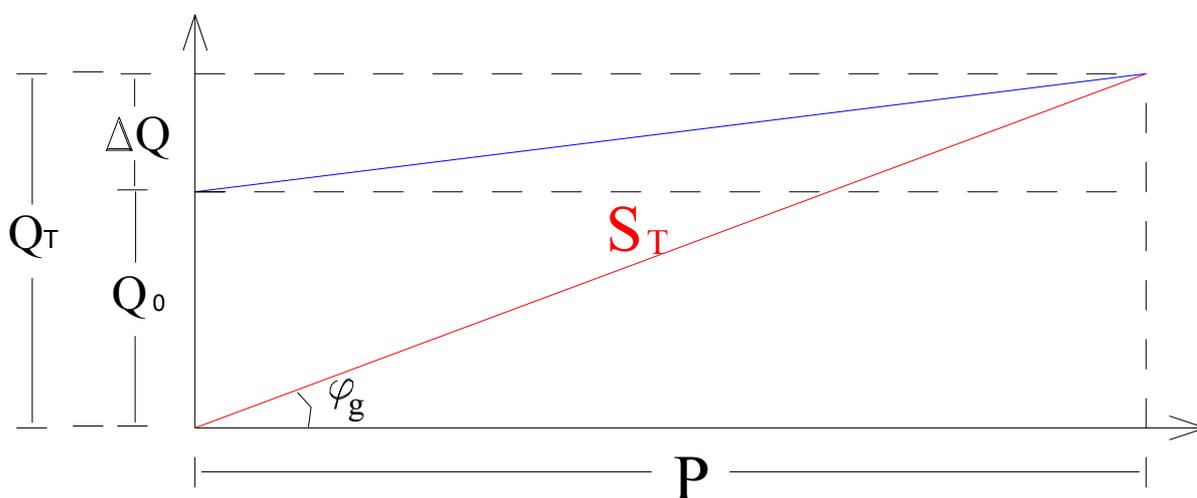


Figura 35 - Triângulo das potências para a máquina assíncrona no entorno negativo do escorregamento

Igualando as equações 31 e 32 segundo o valor de E_1^2 ;

$$Q_T x_m = P \times \frac{r_2}{s}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_T}{P} = \frac{r_2}{x_m s} \quad (37)$$

No triângulo das potências, o ângulo φ_g é igual ao das impedâncias, portanto a defasagem da corrente de linha é $-\varphi_g$. Como $\cos(\varphi_g) = \cos(-\varphi_g)$, podemos concluir que:

$$\cos \varphi_g = \cos\left[\operatorname{arctg} \frac{r_2}{x_m s}\right] \quad (38)$$

De acordo com a equação (38) o valor do fator de potência da máquina na função gerador fica aproximadamente determinado quando se conhece o valor do escorregamento s os seus parâmetros r_2 e x_m que são valores definidos pelo projeto e que podem ser obtidos a partir dos ensaios de rotina [16].

Adotando na equação (33) o valor do fator de potência da máquina assíncrona o definido na equação (38) obtém-se a máxima potência elétrica do gerador assíncrono, que pode ser dada pela expressão:

$$P_{E-g} = \frac{\cos(\arctg \frac{r_2}{x_m s})}{(\cos \varphi_m) \eta_m} P_{mec} \quad (39)$$

Como exemplo de aplicação da equação (39) consideremos os dados nominais da máquina de 2CV instalada na estrutura do projeto PCE e os parâmetros definidos em seu circuito equivalente, tabela 19.

Tabela 19 – *Dados para a avaliação da potência nominal de um gerador assíncrono*

Grandeza	Valor
Potência nominal	1,5kW
Rendimento	0,75
Fator de potência	0,6
Velocidade nominal	870 rpm
r_2	3,46 Ω
x_m	48,46 Ω

Aplicando a equação (38) temos:

$$\cos \varphi_g = \cos\left(-\arctg \frac{3,46\Omega}{48,46\Omega \times 0,033}\right)$$

$$\cos \varphi_g = 0,4226$$

Colocando na equação (33) os valores nominais da máquina e o fator de potência acima determinado obtém-se:

$$P_{E-g} = \frac{0,4226}{(0,60 \times 0,75)} \times 1,5kW = 1,41kW$$

Considerando o resultado do ensaio realizado na máquina onde se obteve uma potência ativa de 1,22kW, tabela 18, a utilização da equação (38) com os dados nominais resultou em 1,41kW o que significa uma diferença de +15,5%. Se nesta equação considerarmos o escorregamento ao qual a máquina foi submetida no ensaio, ou seja, -2,88% correspondentes a 926 rpm conforme a tabela supra citada e aplicando novamente a equação (38) verifica-se:

$$\cos \varphi_g = \cos\left(-\arctg \frac{3,46\Omega}{48,46\Omega \times 0,0288}\right)$$

$$\cos \varphi_g = 0,375$$

Aplicando novamente a equação (33);

$$P_{E-g} = \frac{0,375}{(0,60 \times 0,75)} \times 1,5kW = 1,25kW$$

obtem-se uma potência ativa igual a 1,25 que em relação aos valores medidos na estrutura do Projeto PCE representa uma diferença de aproximadamente +2,5%.

A avaliação do fator de potência da máquina como gerador, cuja proposta apresentamos através da equação (38) deve ser ainda colocada à prova sob ensaios para verificar os limites técnicos da sua aplicabilidade, pois ela foi obtida a partir de simplificações do circuito equivalente. Parte da divergência encontrada nos exemplos acima pode ser devido ao ensaio ter sido truncado em 926 rpm porque com esta velocidade atingimos o valor da corrente nominal 8,6A gravada na placa de identificação da máquina; entretanto, como já citamos, o fabricante em seu catálogo[31] especifica como corrente nominal para esta máquina 8,81A, conforme reproduzimos na tabela 6. A figura 36 mostra o comportamento da potência e da corrente em relação à velocidade obtidos nas medições realizadas no ensaio do gerador, Tabela 18; a extrapolação dos resultados até a rotação de 930 rpm, apresentada na figura, é favorável à nossa proposta representada pela equação (38).

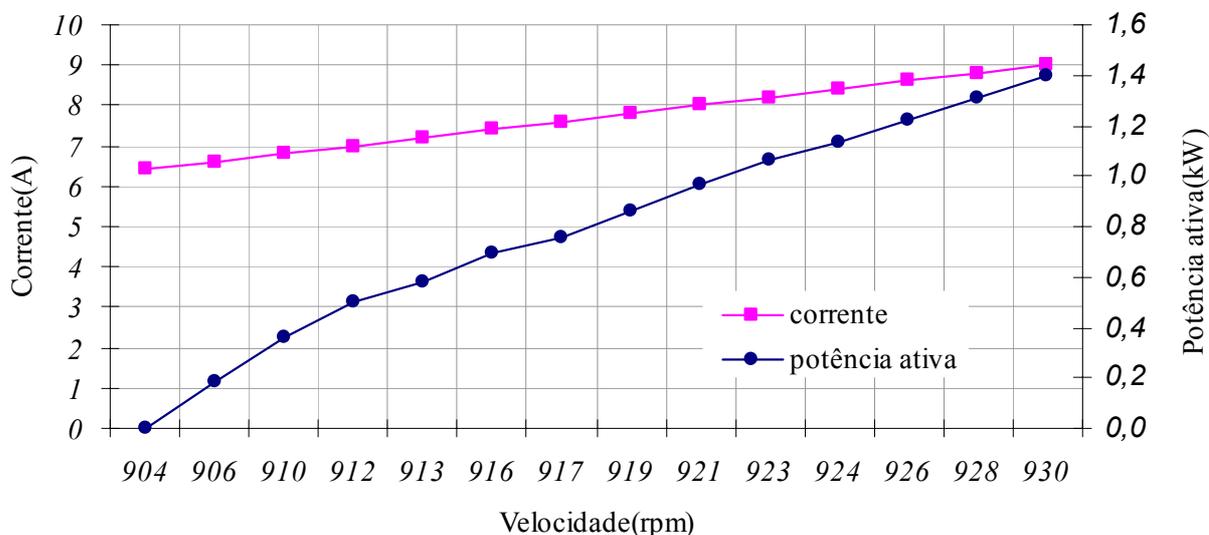


Figura 36 - Relação entre corrente e potência ativa em função da velocidade

6.4 POTÊNCIA APROXIMADA DO GERADOR ASSÍNCRONO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL MECÂNICA DO MOTOR

A tabela 20 sugere uma grande divergência de valores na relação P_{E-g} / P_m especialmente nas potências menores, entretanto a bibliografia não especifica os parâmetros das máquinas responsáveis por este comportamento, pois esta tabela foi obtida de resultados experimentais apresentados por Chapallaz [1]. Ela é, contudo, uma forma expedita de avaliar a potência nominal de um gerador assíncrono. Ao analisar a tabela abaixo, deve-se levar em consideração que P_{mec} é a potência ativa disponível no eixo da máquina assíncrona na função de motor e é igual à potência ativa que o motor recebe da rede P_{E-m} , menos as perdas, sobretudo as rotacionais e por efeito Joule; P_{E-g} é a potência ativa que o gerador entrega à rede e neste caso, cabe à máquina primária o fornecimento da potência ativa necessária para atender todas as perdas.

Tabela 20 – *Relação entre a potência ativa do gerador x potência mecânica do motor, para motores de várias potências nominais [1]*

Potência nominal (kW)	$\frac{P_E}{P_{mec}}$		
	Limite inferior	Limite superior	Valor médio
1	0,4	0,94	0,72
2	0,63	0,96	0,79
3	0,7	0,96	0,83
4	0,75	0,96	0,85
5	0,78	0,97	0,87
7	0,83	0,97	0,9
10	0,88	0,98	0,93
15	0,93	0,99	0,96
20	0,96	1,1	1,03
25	0,96	1,2	1,08

7.0 PROPOSTA PARA AUTOMATIZAÇÃO DE UMA PCH IMPLEMENTADA COM GERADOR ASSÍNCRONO

Em conformidade com o estabelecido no capítulo 1, a presente dissertação propõe a automatização de usinas de até 1 MVA, em função do limite hoje imposto pela Eletrobrás para geração assíncrona interligada à rede pública de distribuição [10]. Como será visto adiante pela simplicidade das instalações, um gerador assíncrono instalado em uma PCH e interligado ao sistema de potência em termos de introdução de potência ativa ao sistema representa vantagem em relação ao síncrono, posto que este, nesta mesma situação, dificilmente teria condições de assumir sozinho a carga na falta de energia no sistema de potência; e, se por ventura, assumisse a carga, no momento do religamento do sistema de potência provavelmente conectaria o gerador síncrono fora de fase. Este fato inviabilizou a automatização e incentivou a conseqüente desmontagem da minicentral hidrelétrica Rio dos Touros, (300kVA) pela Companhia Estadual de Energia Elétrica em 1990. A automatização de PCH's concorre para a redução do custo de operação e é a chave da sua viabilização; mas o que é automatizar?

Automatizar significa criar um sistema no qual os mecanismos nele concebidos controlam seu próprio funcionamento, sem a interferência do homem. Automatizar uma pequena central hidrelétrica é adicionar ao processo de geração de energia dispositivos tais que permitam que a unidade funcione segundo um programa que contemple parâmetros como, por exemplo, carga ativa e/ou reativa, rendimento, fator de potência ou dentro de horários ou situações pré-definidas e ainda zelando pela integridade dos equipamentos e qualidade da energia produzida.

No atual contexto tecnológico e econômico, a automatização de PCH's apresenta as seguintes vantagens:

- a) redução dos custos operacionais;
- b) ganhos de qualidade sobre o processo;
- c) melhor utilização do pessoal;
- d) maior agilidade operativa;
- e) melhor utilização dos recursos disponíveis;
- f) maior produtividade.

Citamos algumas desvantagens da automatização, sendo que a principal diz respeito à redução do quadro de operadores, o que pode significar, em um primeiro momento,

uma contribuição ao desemprego. Um outro aspecto que pode ser abordado é o que se refere à qualidade da mão de obra do pessoal de manutenção que agora deve ser de nível mais elevado. Estas “desvantagens” são, na realidade, fruto do avanço tecnológico muito rápido e inevitável, ao qual todos nós estamos submetidos; assim como algumas atividades caem na obsolescência, outras são criadas; a solução é todos nós nos adaptarmos à tecnologia do presente, a fim de melhor podermos utilizar os seus benefícios.

7.1 O PROCESSO DE AUTOMATIZAÇÃO

Este processo implica na utilização de instrumentação de campo, associada a equipamentos eletrônicos para atender as funções de indicação, controle e proteção da usina.

O investimento em dispositivos de instrumentação representa um custo elevado dentro do empreendimento; desta forma uma análise *custo x benefício x risco* deve ser necessariamente implementada durante a fase de concepção do projeto. Os investimentos recomendados no processo de automatização devem ser balizados pelos custos operacionais destas instalações sem o benefício da automatização e pelo custo da energia comercializada. Os resultados obtidos com uma análise criteriosa destes itens apontarão para soluções técnicas adequadas, com um nível de automatismo ajustado às necessidades das tarefas de operação, contemplando a segurança física dos equipamentos e com custos reduzidos [35][36].

De uma maneira geral pode-se afirmar que a quantidade de instrumentos utilizada na automatização de uma pequena central hidrelétrica depende fundamentalmente dos requisitos funcionais da usina; estes implicam em definições como: operação desassistida ou parcialmente desassistida; telecomando ou operação local; tratamento dos alarmes; características do canal de comunicações; situação geográfica da usina em relação ao sistema de potência interligado. Outros fatores também influenciam na quantidade e especificação dos instrumentos de campo:

- a) porte das instalações;
- b) peculiaridade dos equipamentos;
- c) necessidade de auxílio à operação e à manutenção;
- d) operação isolada ou interligada;
- e) importância da usina para a sociedade.

A solução para a automatização de uma PCH deve ser orientada no sentido da simplicidade, compatível com o porte do empreendimento. Alguns aspectos que possibilitam

uma solução tecnicamente adequada com custo reduzido com a tecnologia hoje disponível são listados a seguir [14]:

- a) utilização de relés de proteção multifunção com recursos de medição e intertravamento para a subestação;
- b) utilização de relés de proteção multifunção com recursos de medição para os geradores;
- c) comando local das unidades geradoras dispensando a necessidade de salas especiais;
- d) interface homem-máquina com tela de cristal líquido e acionamento por toque na tela ou teclado funcional de membrana;
- e) utilização de unidades de aquisição e controle com lógica de automatismo efetuada através de CLP's;
- f) ajuste local para os relés de proteção.

7.2 PROPOSTA PARA INSTRUMENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS CONSTITUINTES DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DE ATÉ 1MW IMPLEMENTADA COM GERADOR ASSÍNCRONO

As pequenas centrais hidrelétricas são constituídas pelas seguintes partes principais [10][26]:

Barragem - tem por finalidade represar a água que será turbinada. Representa energia armazenada. Quando a quantidade de água armazenada não é significativa, isto é, não permite uma produção de energia constante, mas depende da vazão do curso d'água, os aproveitamentos hidrelétricos são chamados de usinas a fio d'água [4]. As PCH's, de uma maneira geral, se enquadram dentro deste conceito, posto que, por definição [2], pequena central hidrelétrica, entre outras características, deve apresentar uma área inundada de até 3,0km²;

Tomada d'água e condutos de adução de água - estas estruturas filtram a água e conduzem-na até as proximidades da casa de força, onde está instalado o conduto forçado;

Conduto forçado - são tubos que transportam a água sob queda significativa até a turbina. Neles o escoamento se dá a pressões crescentes, no sentido do fluxo, estando a sua parte inferior à pressão máxima do aproveitamento [26].

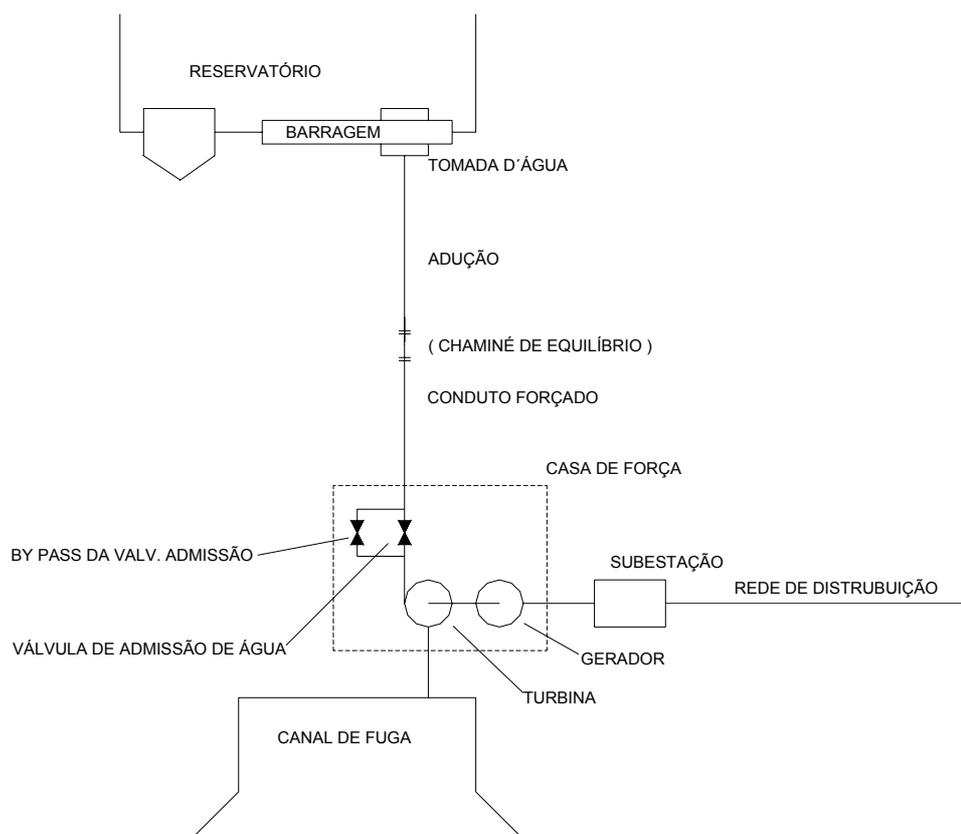


Figura 37 – Interconexão entre os elementos principais de uma PCH

Casa de força ou casa de máquinas - é o local físico onde estão instalados os principais equipamentos eletromecânicos do processo de geração de energia tais como: válvula de admissão de água para a turbina, a turbina, o gerador, o quadro de comando local, os reguladores de velocidade e tensão (se houver), transformador elevador, os equipamentos de controle, de supervisão e de telecomunicações.

Canal de fuga - estrutura que tem por finalidade restituir a água turbinada ao rio e o seu projeto tem relação com o rendimento da turbina;

Subestação: este setor da PCH abriga os dispositivos para a conexão elétrica do gerador ao sistema de potência. Pelo porte das unidades geradoras compreendidas por este trabalho, esta conexão dar-se-á normalmente no sistema de distribuição em BT [10].

7.2.1 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS ELETRO-ELETRÔNICOS

Sob o ponto de vista de sistemas eletro-eletrônicos, uma PCH automatizada, com operação desassistida, pode ser dividida em quatro blocos:

- a) Sistema de medição;

- b) Sistema de controle;
- c) Sistema de proteção;
- d) Sistema de telecomunicações.

A automatização de PCH's implica no estudo da conjugação modulada destes elementos.

Sistema de medição - Os instrumentos típicos que deverão ser implementados em uma PCH [14][15][21], a fim de que as principais informações dos diversos setores da usina estejam à disposição do pessoal de operação, em cada setor da usina são:

Tomada d'água: é onde ocorre a captação da água e o seu direcionamento para a turbina ou roda d'água; a função desta estrutura é [10][26]:

- 1) controle do fluxo de água no canal de adução;
- 2) proteção contra a entrada de material sólido e corpos flutuantes;

Dispositivos de medição e controle que podem ser associados à tomada d'água são [14][15][21]:

- a) nível do reservatório à montante da grade da tomada d'água;
- b) nível do reservatório à jusante da grade da tomada d'água;
- c) posição da comporta;
- d) comando do atuador para abertura e fechamento da comporta.

Adução - A adução, se houver, pode ser a canal aberto ou com o emprego de uma tubulação de baixa pressão. Na transição entre a adução e o conduto forçado poderá haver a necessidade do emprego de um dispositivo destinado ao alívio das ondas de pressão devido à ocorrência de golpe de aríete (**chaminé de equilíbrio**) por ocasião do fechamento rápido do distribuidor da turbina.

Os instrumentos que podem ser instalados na chaminé de equilíbrio são:

- a) detectores de nível;
- b) medidor de nível.

Casa de máquinas - No ambiente da casa de máquinas estão instalados os principais equipamentos da PCH. Para uma planta implementada com gerador assíncrono os equipamentos mínimos necessários são os seguintes:

Válvula de Isolamento da Turbina - Está montada no final do conduto forçado. É uma válvula com função de isolamento, do tipo gaveta, cuja função é o de permitir manutenções na turbina ou na sua válvula de controle. Em operação normal, está 100% aberta. Esta válvula também tem importância no caso de alguma emergência hidráulica; por este motivo

ela pode ser de abertura manual, mas recomendamos o fechamento automático com o uso de um dispositivo que opere com uma forma de energia independente da elétrica (pressão hidráulica, potencial gravitacional, etc.[15][21]); a grandeza associada a esta válvula de interesse ao sistema de controle é a sua situação: aberta ou fechada;

Válvula de Admissão de Água à Turbina - Deverá ser prevista a utilização de válvula de controle com atuação elétrica nas microcentrais equipadas com rodas d'água. Esta válvula tem por função controlar o fluxo de água na roda para fins de controle da potência da unidade. No caso do uso de turbinas, o controle do fluxo de água é realizado por uma válvula especial chamada de distribuidor que é um elemento integrante da turbina. Em ambos os casos um motor elétrico deverá ser instalado para permitir o telecomando; o motor deverá ser de corrente contínua, alimentado por tensão auxiliar ou qualquer outro sistema capaz de funcionar independentemente da alimentação principal da usina.

Dispositivos de medição e controle associados à válvula de admissão:

- a) posição da válvula;
- b) sistema atuador para abertura e fechamento da válvula.

Volante de Inércia - É um equipamento utilizado na proteção contra sobrevelocidade; é onde normalmente atua o freio.

Freio - Em PCH's desassistidas é importante a existência de freio para garantir a parada da máquina no caso de parada emergencial do gerador. A concepção mais simples para o freio é uma alavanca em forma de arco e revestida por material do tipo "lona de freio" que deverá atuar na circunferência do volante de inércia tendo como elemento motor um cilindro pneumático [15][21]. Neste caso deve-se adquirir:

- a) posição do freio;
- b) pressão do ar de frenagem.

Turbina - A instrumentação associada à turbina é função do porte da máquina. Nesta proposta podemos citar:

- a) temperatura dos mancais;
- b) temperatura, nível e fluxo do óleo dos mancais;
- c) temperatura e fluxo da água de refrigeração do óleo;
- d) velocidade da turbina;
- e) posição do controlador de fluxo de água (Potência);
 - e.1) posição do limitador de velocidade / potência;
 - e.2) atuador para controle da velocidade.

Gerador - O conjunto de instrumentos que pode equipar o gerador assíncrono de uma PCH é constituído de:

- a) temperatura dos mancais;
- b) temperatura do enrolamento do estator;
- c) tensão nas fases do gerador;
- d) tensão nas fases do alimentador na subestação;
- e) corrente das fases;
- f) potência ativa;
- g) potência reativa.

Em função destas grandezas que serão diretamente medidas através de instrumentos próprios, o sistema de controle deverá calcular:

- a) fator de potência;
- b) energia gerada.

Banco de capacitores - Equipamento de uso obrigatório em usinas implementadas com geradores assíncronos. É recomendável a previsão de um circuito de pré-carga dos capacitores para diminuir a corrente de surto por ocasião do fechamento do disjuntor da máquina. Para evitar a autoexcitação do gerador, somente devem estar conectados à máquina se houver tensão na rede de distribuição. O controle desta situação, segundo proposta do projeto PCE, é pela monitoração da tensão auxiliar através dos sensores de subtensão e sobretensão.

Sistema auxiliar de tensão contínua - É composto por um banco de baterias e um dispositivo carregador/flutuador. A função deste sistema é alimentar todo os dispositivos ligados ao controle da unidade de maneira a permitir a parada total da usina, na falta de energia elétrica na rede de distribuição a qual o gerador está conectado. Grandezas que podem ser adquiridas:

- a) tensão das baterias;
- b) corrente de carga do banco de baterias;
- c) corrente da carga consumidora.

Casa de máquinas - A grandeza que pode ser medida é o nível de água, em pontos característicos e eventualmente posição de portas e janelas. A primeira medida visa saber as condições da casa de máquinas com relação a inundações e a segunda, considerando que a usina operará de forma desassistida, para detectar a entrada de intrusos no ambiente da mesma.

Subestação - Nas pequenas centrais hidrelétricas pode-se instalar a subestação em um compartimento abrigado dentro da casa de força. A subestação é composta pelo disjuntor e chave seccionadora da máquina e dependendo do porte da usina, dos transformadores elevadores, dos serviços auxiliares e dos sistemas de medição e proteção. Em se tratando de micro e minicentraís interessa-nos saber [14]:

- a) posição chave seccionadora do gerador;
- b) posição do disjuntor do gerador;
- c) tensão alternada auxiliar;
- d) energia elétrica gerada;
- e) sinais dos dispositivos de proteção elétrica.

7.2.2 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle de uma PCH convencional pode ser dividido em dois grupos:

- a) controle em malha aberta, que é constituído por circuitos lógicos, responsáveis pelo intertravamento, comandos, proteção, alarmes e sinalização da unidade;
- b) controle em malha fechada, que é representado pelo controle da turbina que atua no ajuste da velocidade e no valor da carga ativa do grupo gerador.

Os principais circuitos lógicos do sistema de controle a laço aberto da unidade são:

- a) partida, parada, sinalização;
- b) conexão à rede de distribuição;
- c) tomada de carga;
- d) alarmes e condições de bloqueio.

O sistema de controle a laço fechado, conforme acima identificado, controla a velocidade da turbina; tem como consequência a responsabilidade de manter o gerador funcionando segundo a potência desejada ou a estabelecida no programa de geração.

7.2.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO

Entende-se como dispositivos do sistema de proteção aqueles destinados à monitoração do sistema elétrico e mecânico cuja atuação implica no bloqueio da unidade. Tradicionalmente, os dispositivos que atuam diretamente no sistema elétrico são chamados de relés de proteção.

Enfatizamos que um dos fatores importantes a ser analisado na definição do grau de proteção desejado é a forma como a usina será operada, se assistida parcialmente por operadores ou completamente desassistida.

O sistema de proteção deve constituir um sistema independente do sistema de controle digital [10] e as proteções devem atuar diretamente, através de seus contatos de saída, sobre os disjuntores ou dispositivos de parada, de modo a garantir a parada da máquina sem necessidade do sistema de controle digital.

Visando redução de custos, os transformadores de corrente devem assegurar uma precisão de $\pm 1\%$ a I_n e $\pm 10\%$ a $20I_n$, conforme a Norma IEC 185, de modo a atender aos requisitos de medição e proteção simultaneamente.

A configuração mínima de relés de proteção para usinas desassistidas, segundo o Manual de PCH's da Eletrobrás [10], deverá ser constituída por relés de proteção contra:

- a) motorização;
- b) falha do isolamento entre o estator do gerador e a sua carcaça;
- c) sobrecarga do gerador através da medição direta ou indireta da temperatura do gerador.

Chapallaz [1] recomenda ainda, para proteção do gerador, o uso de dispositivos de proteção contra raios e sobretensão e para a turbina, detector de sobrevelocidade e temperatura dos mancais; esta última para máquinas com potência acima de 50 kW.

Como parte de nossa proposta, recomendamos o uso sensores de subtensão e sobretensão (ou efetuar monitoração de frequência), como meio de bloquear eletricamente a usina na falta de tensão na rede de distribuição quando o gerador utilizar capacitores para a correção do fator de potência. É a forma de impedir o funcionamento inadequado do gerador, pois a máquina assíncrona pode autoexcitar-se e se autoexcitada, operar de forma isolada. Nesta situação ela apresenta grande instabilidade da tensão e da frequência em seus terminais em função da carga[13].

Na subestação [14], cabe instalar, em função do porte da instalação, dispositivos sensores diferenciais de tensão da rede de distribuição e de corrente do gerador.

7.2.4 SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÕES

A definição do sistema de telecomunicações deve ser feita considerando-se as necessidades em função da importância da usina e do requisito funcional de telecomandada ou telesupervisionada. A comunicação realiza-se entre o CLP e o microcomputador. Os meios mais utilizados são [14]:

- a) linha privativa de telefonia;
- b) sistema de ondas portadoras sobre as linhas de alta tensão (OPLAT);
- c) rádio na faixa das frequências de VHF ou UHF.

7.3 PROPOSTA PARA O PROGRAMA DE CONTROLE

A lógica de controle de uma central hidrelétrica segue um modelo tradicional que pode ser aplicado a usinas de qualquer porte [14]. Obviamente que quanto maior ou mais importante forem as instalações, mais equipamentos são necessários. A proposta desta dissertação é a de adaptar este modelo às necessidades de uma micro ou minicentral hidrelétrica equipada com gerador assíncrono. Estruturaremos o programa, que será apresentado sob a forma de diagrama de blocos, e que foi desenvolvido segundo o Projeto PCE, em três funções operacionais: partida e parada; tomada de carga; proteções e alarmes.

7.3.1 LÓGICA DE PARTIDA DA UNIDADE

A função básica desta parte do programa é, estando a máquina parada, colocá-la em situação de entrar em paralelo com a rede de distribuição. Para que isto aconteça algumas situações conhecidas como pré-condições de partida e condições de partida devem estar atendidas. Vamos considerar dentro da proposta formulada nesta dissertação que por pré-condições de partida estejam colocadas todas as ações executadas de forma manual; as condições de partida são as ações que, se não estiverem satisfeitas, há como o sistema agir sobre elas ou testá-las. Citamos, por exemplo, como condições de partida, a verificação de tensão da rede de distribuição, o estado do disjuntor da máquina e a frequência inicial do conversor. Na usina piloto do projeto PCE por seu porte, as situações presentes nestas foram reunidas em um único bloco lógico, que também fornece situação de sinalização conforme pode ser visto na figura 38. Também em função do caráter experimental do Projeto PCE introduzimos na lógica o conversor de frequências que representa toda a parte que está envolvida no fornecimento de energia hidráulica em uma usina real. Em instalações maiores, fluxo de água de refrigeração, situação da válvula de isolamento da turbina, situação da comporta e da válvula de admissão de água à turbina são exemplo de condições que poderiam ser incorporadas a esta etapa.

Ao comando de partida automática, satisfeitas as condições de partida, o sistema deve permitir a aceleração da máquina até que ela atinja a velocidade aproximada do campo girante. Nestas ações existem tempo e constantes envolvidas que estão definidas no programa.

7.3.2 LÓGICA DE PARADA DA UNIDADE

A parada do gerador, figura 41, pode ocorrer por questões operacionais ou por atuação das proteções. Tratamento diferente é dado para paradas motivadas por problemas mecânicos ou hidráulicos, figura 42, e elétricos, figura 43; os primeiros obrigam a parada total da unidade e o acionamento das turmas de manutenção; os problemas de ordem elétrica referem-se, por exemplo, a eventos na rede de distribuição como falta de energia, distúrbios causados por raios ou curto circuitos; estas faltas muitas vezes são momentâneas; desta forma na sua ocorrência, a máquina permanece girando em velocidade próxima à síncrona e monitorando as condições para futuro religamento.

As figuras 38 a 43, mostram a lógica de controle sob a forma de diagrama de blocos que é a forma usual de apresentar programas de controle de usinas hidrelétricas [14][15][21]. Os blocos são representativos das funções lógicas *E* (*AND*), *OU* (*OR*), *NÃO* (*NOT*) e funções especiais como a memória de partida e parada, representada por um “*flip-flop J-K*”, alarmes e sinalizações representados respectivamente por blocos *AL* e blocos *S*. Estes diagramas lógicos estão adaptados para a planta piloto do Projeto PCE. Segundo a nossa proposta, estes diagramas lógicos podem ser facilmente ajustados para operar com unidades assíncronas de maior porte, até 1000kW [15].

O diagrama lógico da figura 39 tem por objetivo colocar a máquina na velocidade síncrona. A idéia é dar incrementos de 5 Hz a cada intervalo de 15s; neste intervalo de tempo, obtido experimentalmente, a máquina estabiliza a sua velocidade. Em determinado momento a velocidade do rotor será igual à síncrona ou no entorno dela, então o disjuntor fecha. Se o disjuntor não fechar e a velocidade for superior à síncrona haverá um decremento na frequência de 5Hz. Esta lógica é acompanhada por um relógio de sorte que, se a máquina não fechar o disjuntor dentro de um certo intervalo de tempo, obtido experimentalmente, será comandado o desligamento da usina e será emitido o alarme de tempo longo na partida, figura 42.

A tomada de carga é feita considerando a posição do seletor de carga, figura 40. Este pode ser uma referência fixa de 50%, a máxima potência que será função da corrente de linha, uma função que relacione potência e hora do dia ou referência manual através do teclado. Nesta lógica, para o ajuste da carga é previsto incrementos de 1Hz e decrementos de 1,5Hz integrados em um laço de histerese.

Os diagramas lógicos apresentados, que fazem parte do Projeto PCE, têm o objetivo acadêmico do estudo do comportamento do gerador assíncrono e definições e ajustes de alguns parâmetros operacionais e temporizações.

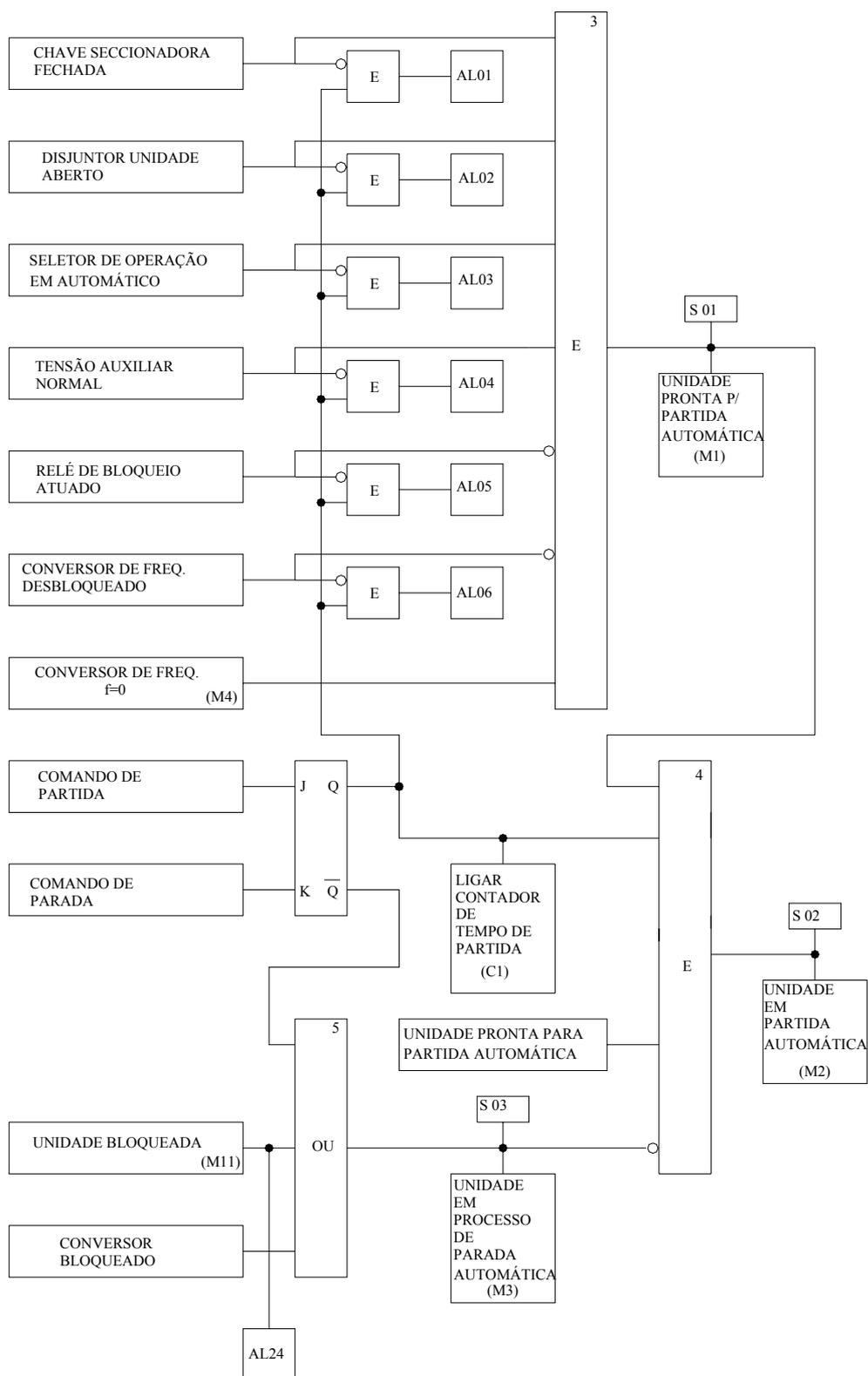


Figura 38 - Diagrama de blocos da lógica de pré-condições e condições de partida

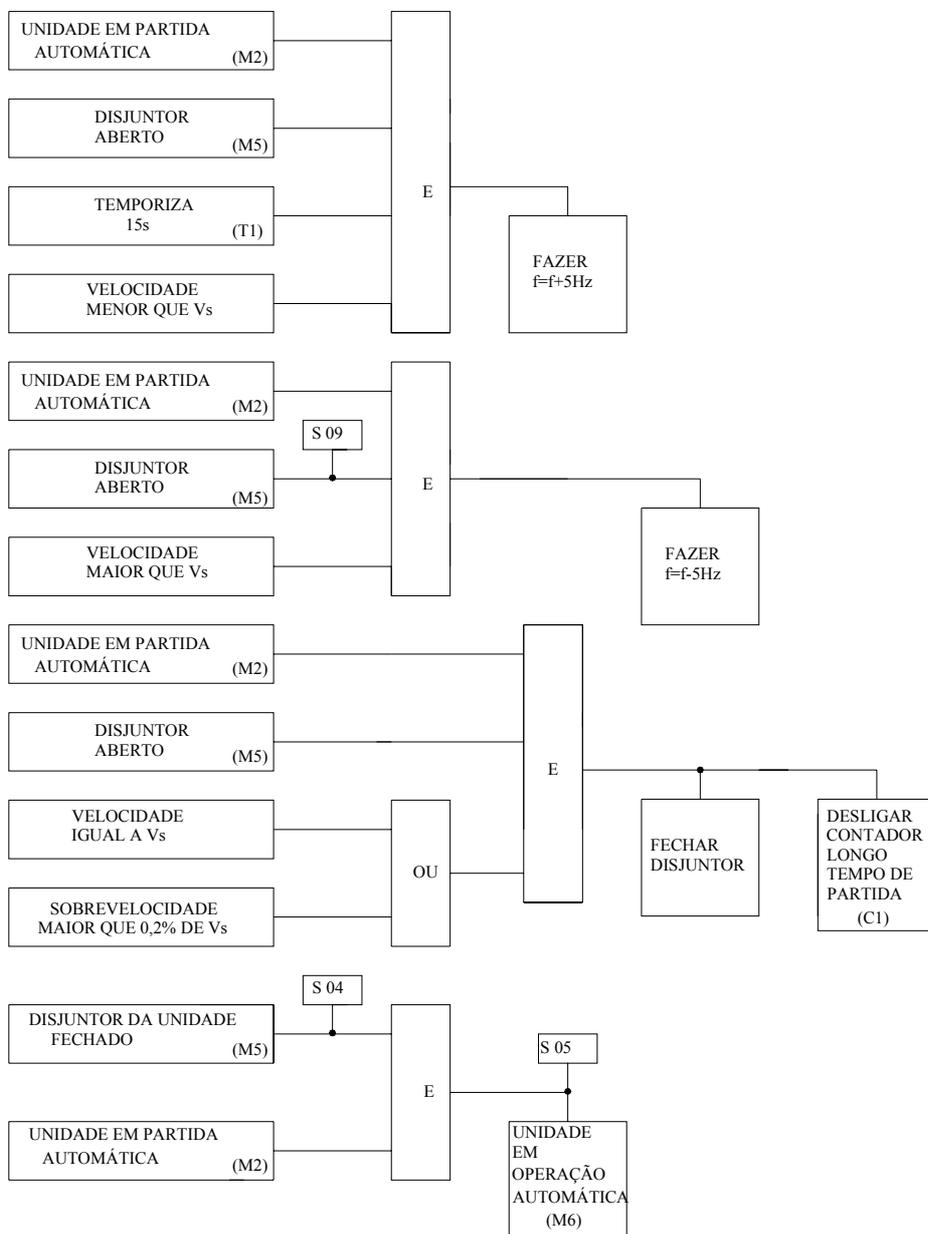


Figura 39 - Diagrama de blocos da lógica de fechamento do disjuntor

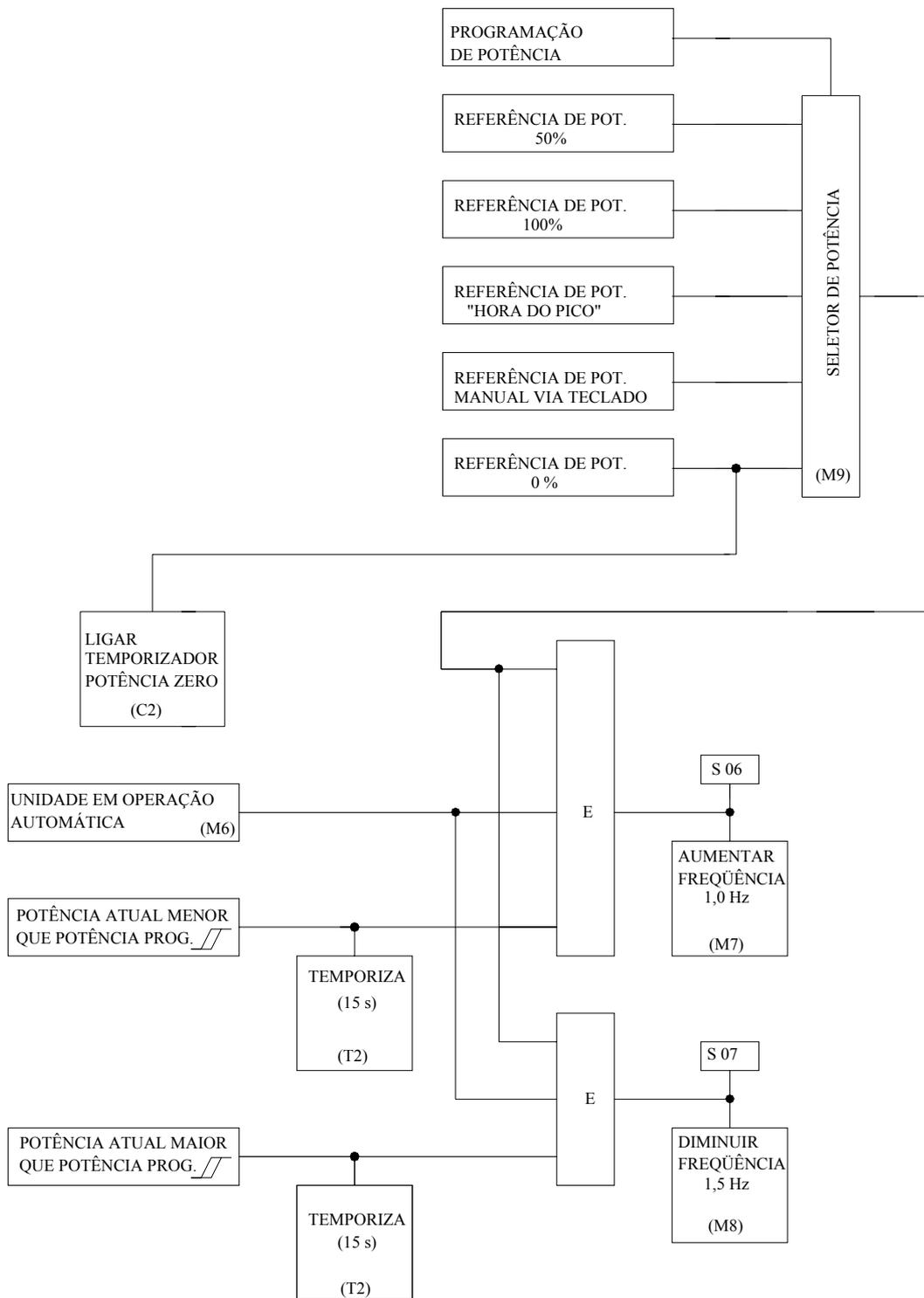


Figura 40 - Diagrama de blocos da lógica de tomada de carga

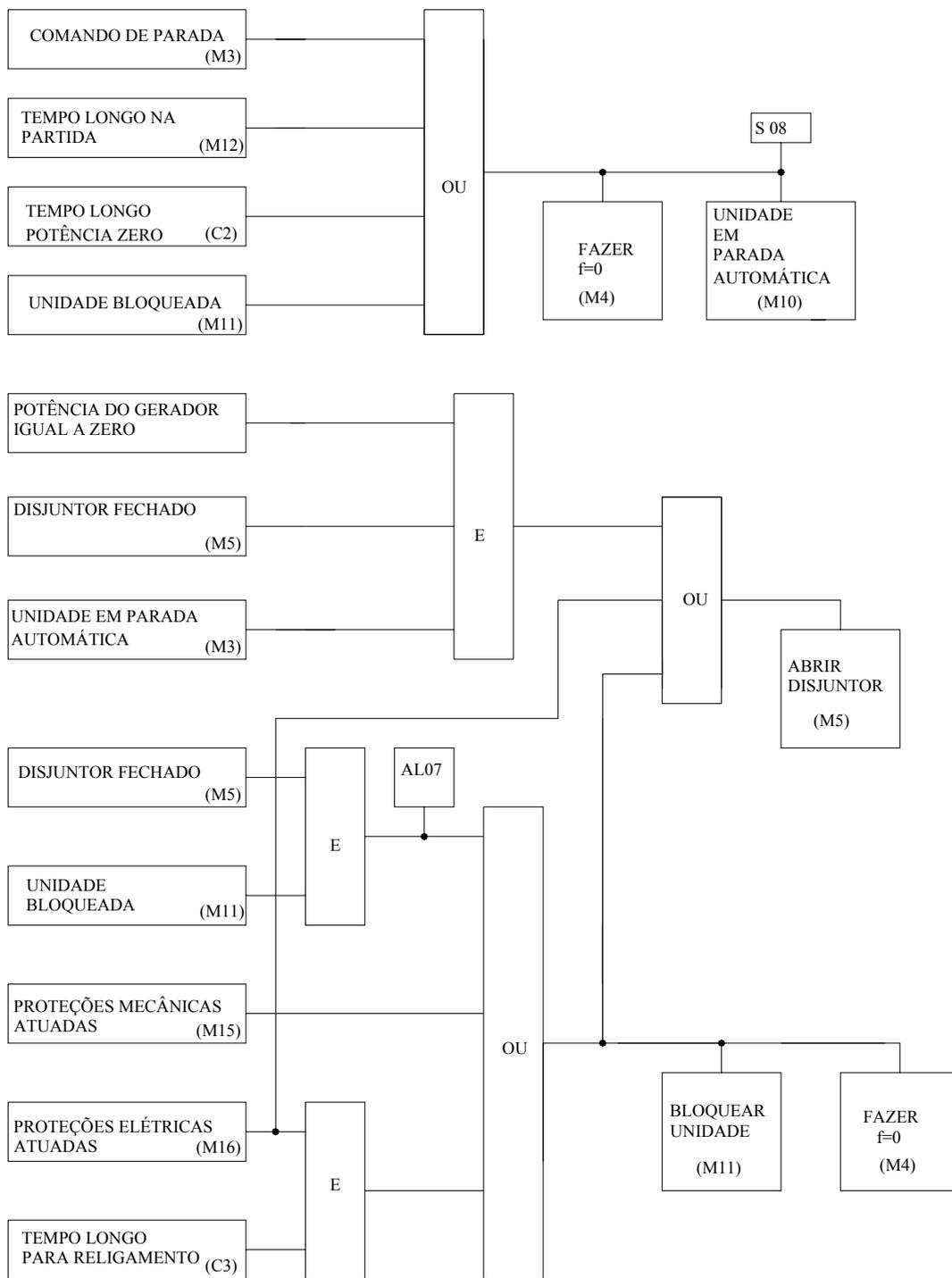


Figura 41 - Diagrama de blocos da lógica de parada

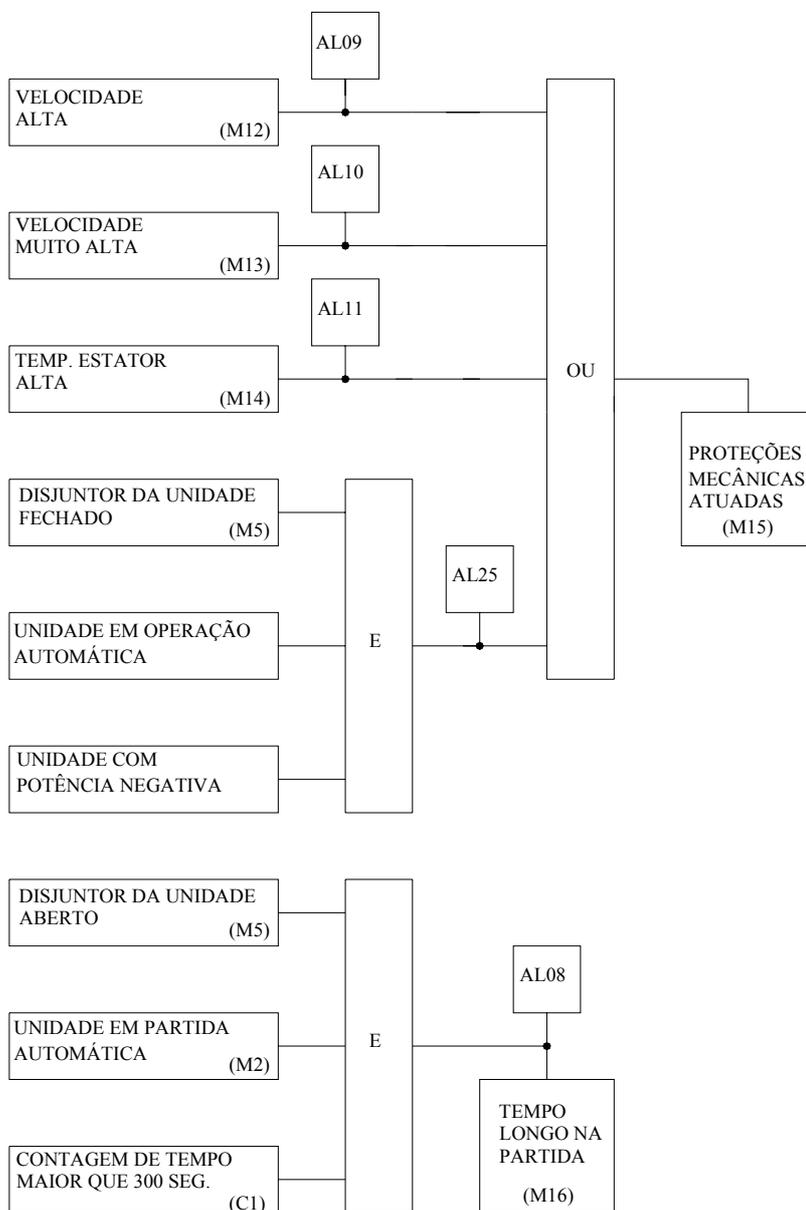


Figura 42 - Diagrama de blocos da lógica de alarmes mecânicos

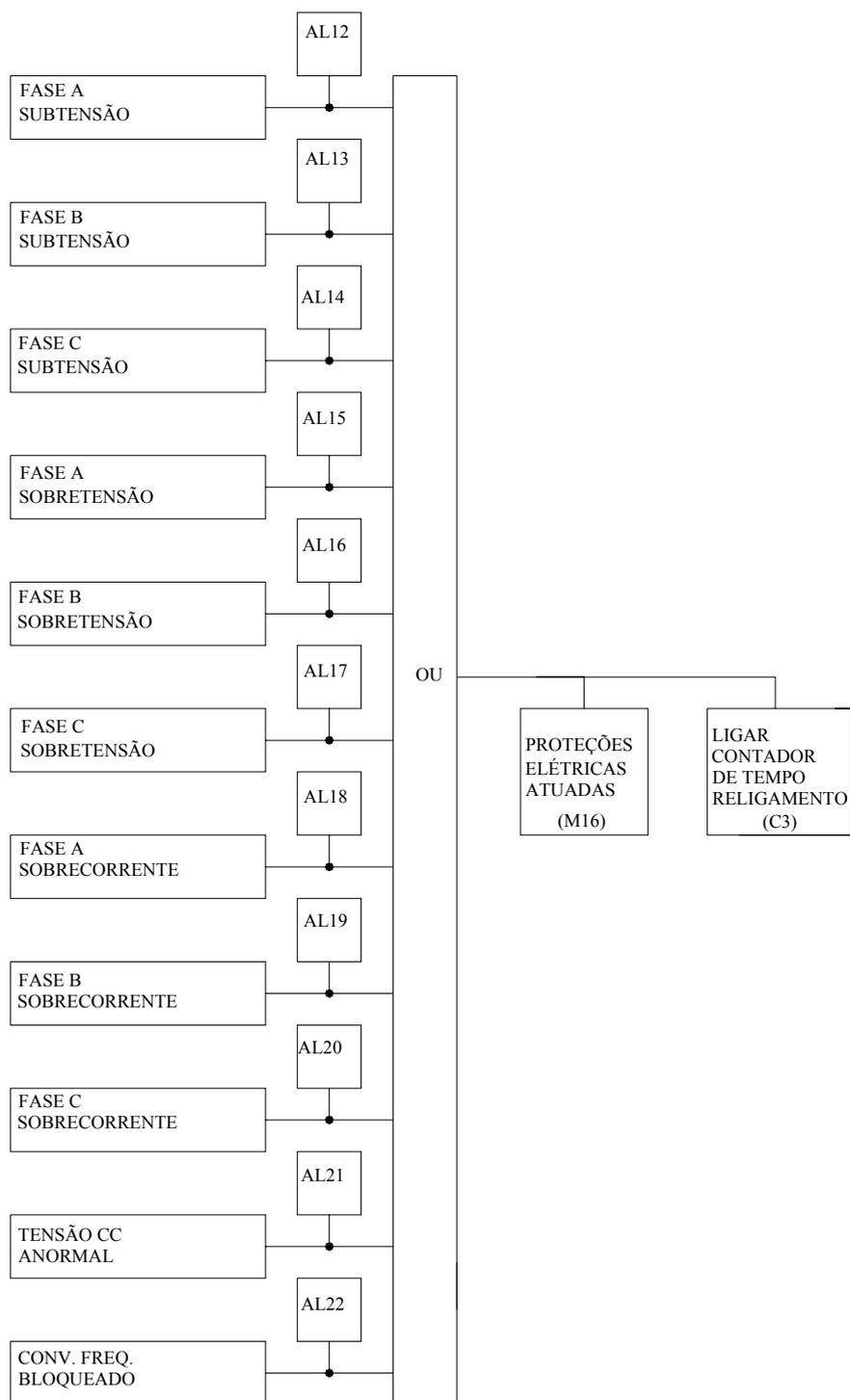


Figura 43 - Diagrama de blocos da lógica de alarmes elétricos

7.4 BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE A AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS NOVAS

A relativa baixa potência ativa de uma PCH atua negativamente no seu custo de implantação o que torna o custo específico, US\$ por kW, instalado, superior ao das médias e grandes usinas. Além disto, um custo adicional pode ser previsto em função do montante das obras civis envolvidas e do nível de automatização pretendido.

A tabela 21 mostra alguns exemplos de pequenos aproveitamentos hidrelétricos que podem nos dar uma idéia do custo de uma microusina nos dias de hoje.

Na tabela 21 todas as usinas consideradas estão equipadas com geradores síncronos e não são consideradas adequadamente automatizadas para funcionamento desassistido.

TABELA 21 - Custos de implantação de microcentrais hidroelétricas [25]

Dado	USINA						
	<i>Santarém</i> <i>Mai/83</i>	<i>Mara- nhão</i> <i>Mai/83</i>	<i>Castilho</i> <i>Jun/82</i>	<i>Lagoa Seca</i> <i>Jul/82</i>	<i>Martins</i> <i>Ago/81</i>	<i>Ascensão</i> <i>Set/83</i>	<i>Serra- Azul</i> <i>Ago/82</i>
<i>Potência kW</i>	8	10	10	14,4	24	32	48
<i>Potência kVA</i>	10	12,5	12,5	18	30	40	60
<i>Custo US\$/kW</i>	1.585,00	965,00	1.108,00	801,00	876,00	1.050,00	700,00

Salienta-se que em um empreendimento hidrelétrico típico, o investimento envolvido em obras civis é diferente para cada usina e representa a maior parcela dos custos de implantação da usina; o terreno deve ser “moldado” às estruturas mais ou menos padronizadas das usinas hidrelétricas: barragem, lago de acumulação, vertedouro, tomada d’água, adução, casa de força, subestação e canal de fuga.

A uniformização de custos unitários de PCH’s é de difícil obtenção tendo em vista as peculiaridades que cada projeto possui em relação aos demais. Pode-se, entretanto, dar uma idéia da distribuição dos custos envolvidos em algumas usinas já construídas, na faixa de potências entre 200 e 1000 kW [25]:

- a) obras civis principais, 30%;

- b) equipamento eletromecânico, 35%;
- c) engenharia, 7%;
- d) transmissão, 7%;
- e) ensecadeiras, 5%;
- f) canteiro e acampamento, 1%;
- g) acesso, 15%.

O tempo de vida útil econômica para PCH's, recomendado pela Eletrobrás [25] nos projetos de viabilidade, é de até 50 anos e para o sistema de transmissão associado, 25 anos.

7.5 FATOS RELACIONADOS COM A AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS NO BRASIL

A automatização de PCH's, que operam de forma manual, representa nos dias de hoje, viabilidade da sua existência. O perfil destas usinas pode ser definido como:

- a) construídas antes dos anos 50;
- b) implementadas com equipamentos que operam com frequência nominal de 50 Hz;
- c) projetadas para operação isolada;
- d) implementadas com geradores síncronos.

Algumas destas usinas estão abandonadas e a explicação para este fato é o seguinte: as grandes empresas que operavam estas usinas adotam a prática de operação contínua de 24 horas por dia. Estas usinas foram dimensionadas para funcionamento como usinas de base visto que o sistema elétrico não era interligado, e elas abasteciam regiões específicas; portanto eram dimensionadas para a mínima vazão do fluxo d'água. Assim, em operação, há a necessidade do emprego de 8640 homens-hora/ano o que significa três operadores por dia (turno), cada um com jornada de 8 horas de trabalho. Considerando o custo da mão de obra, o custo de manutenção e eventualmente por razões diversas, fator de capacidade da usina, o resultado pode levar a uma inviabilidade econômica de operá-la, isto é, um patrimônio que se for utilizado, resulta em prejuízo. Fator de capacidade é a relação entre a potência ativa média em determinado período e a capacidade total instalada em kW.

Estudos importantes de engenharia que devem ser considerados quando o objetivo for automatizar uma usina existente (e antiga):

- a) a substituição e/ou a adaptação dos equipamentos existentes à automatização;
- b) a possibilidade de otimização da queda d'água através da repotenciação da usina;
- c) análise da viabilidade econômica do uso de geradores assíncronos.

Nos próximos itens apresentamos como exemplo dos benefícios introduzidos pela automatização de usinas, o caso de uma PCH gaúcha, e casos ocorridos no estado do Paraná.

7.5.1 AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS ANTIGAS NO RIO GRANDE DO SUL

No dia 20 de novembro de 1991, entrava em operação automatizada a usina Hidrelétrica Passo do Inferno [15], pertencente à CEEE, Companhia Estadual de Energia Elétrica, RS. Esta usina está equipada com um gerador síncrono com potência nominal de 1.665 kVA e potência ativa de 1.100 kW.

Dados operacionais da empresa mostram que, nos últimos 13 anos antes da automação, a energia média gerada era de 353 kW-ano. Havia um único operador, que trabalhava em turno de oito horas diárias (horário comercial), e não funcionava aos sábados, domingos e feriados. O processo de automatização foi levado a cabo pelo corpo técnico da empresa. Todo o material utilizado na automatização foi recolhido nos almoxarifados da Companhia. O sistema de controle é a laço aberto e é implementado por relés eletromecânicos; possui as seguintes funções básicas:

- a) segurança;
- b) controle de geração;
- c) tele-alarme.

A principal característica do sistema de segurança é levar a unidade à parada total, com fechamento da válvula de admissão de água e aplicação dos freios, caso ocorra determinados eventos, de ordem elétrica, mecânica ou hidráulica, que possam prejudicar os equipamentos da usina.

O controle da geração possui as seguintes funções:

- a) manutenção da unidade em operação contínua;
- b) ajuste da carga em função do nível d'água na barragem.

O ajuste de carga significa:

- a) gerar a máxima potência que o nível d'água permite, visando uma operação contínua de no mínimo 50% da potência ativa da máquina;
- b) reduzir a geração para aproximadamente zero, caso tenha pouca afluência. O objetivo é não perder o sincronismo;
- c) realizar, em determinadas condições de operação, testes de afluência do rio, para aumento de geração;

- d) desligar a unidade caso o nível d'água na barragem ou na chaminé de equilíbrio, atinjam níveis impróprios para operação.

O tele-alarme informa aos operadores da usina vizinha, através de um sinal de bip em um enlace de VHF a ocorrência de qualquer anormalidade na usina.

A usina a partir da automatização funciona 24 horas por dia, de forma desassistida, durante os 365 dias do ano, com uma potência média de 1000 kW.

Na seqüência a CEEE automatizou as PCH's Toca, Guarita e Ivaí.

7.5.2 AUTOMATIZAÇÃO DE USINAS ANTIGAS NO ESTADO DO PARANÁ

Outro exemplo interessante foi fornecido pela COPEL. Companhia Paranaense de Energia, apresentados no 2º Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, mostraram que a automatização das Usinas Rio dos Patos e Derivação do Rio Jordão, trouxeram resultados satisfatórios. Eis um breve histórico da situação antes e depois da automatização. A primeira usina era equipada com quatro grupos, com as seguintes potências nominais: 800 kW, 160 kW, 180 kW e 640 kW; apresentavam uma energia média garantida de 1130kW, e disponibilidade 12,5%, em 1994; $\text{disponibilidade} = (\text{Horas calendário} - \text{horas manutenção}) / (\text{horas de operação})$; o Custo de operação era de US\$ 220 / MWh. Esta usina sofreu um processo de repotenciação e automatização, ficando configurada com duas máquinas, com potências nominais de 1080 kW e 640 kW; energia média garantida de 1210 kW. A disponibilidade média em 1999 foi de 98% e o custo de operação e manutenção neste período foi de 27,5 R\$ / MWh. Da mesma forma a Usina Hidrelétrica Derivação Do Rio Jordão, 6,5 MW, apresentou, após a automatização uma disponibilidade de 97%, com operação desassistida. A taxa de falhas (número de falhas / horas de operação) x 8760, no ano de 1999 foi de 12,56%. A meta neste período era de 18%.

8.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Um dos focos do nosso trabalho foi o de fazer uma revisão das propriedades da máquina assíncrona operando como gerador de energia elétrica em paralelo com a rede de distribuição objetivando vislumbrar critérios para o seu dimensionamento. Os resultados a que chegamos e que estão disponíveis no capítulo 6, nos permitem tirar as conclusões que seguem:

A máquina assíncrona na função de gerador tem o rendimento muito próximo ao que apresenta na função de motor, conforme demonstramos através de análises teóricas e de medições realizadas; Kostenko [4] constata que em relação ao gerador síncrono o rendimento do assíncrono não é muito menor. Confirmamos, portanto, que a geração assíncrona é viável [1][12] e sob certas circunstâncias acreditamos que revela-se a melhor opção de investimento em geração, como, por exemplo, quando tratar-se de co-geração, repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas e como fornecedor de complemento de energia. Estas três situações têm em comum o fato da máquina poder operar em paralelo com a rede de distribuição ou de subtransmissão e portando dispensar o uso de alguns equipamentos dispendiosos, típicos de usinas síncronas, citados no capítulo 2, tornando a implantação deste tipo de geração de custo menor em relação às máquinas síncronas.

A co-geração é definida como sendo o aproveitamento para geração de energia elétrica de outra forma de energia que é considerada sobra dentro de um processo industrial, isto é, não é aproveitada.

A repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas síncronas com o acréscimo de geradores assíncronos para o fornecimento de potência elétrica ativa traz muitas vantagens, entre elas destacamos:

- a) a possibilidade do acoplamento do gerador assíncrono ao eixo da turbina com uma relação de polias definidas de sorte que este funcionará com velocidade e potência constantes; desta forma a energia gerada é definida e poderá ser a máxima potência ou então a operação pode ocorrer na região onde o conjunto gerador(es)-turbina apresentem o maior rendimento;
- b) o acoplamento mecânico rígido ao eixo da turbina dispensa o uso de qualquer tipo de regulador de velocidade para o gerador assíncrono, pois o eixo da turbina, em função do gerador síncrono gira a uma velocidade constante;
- c) a energia reativa necessária ao seu funcionamento pode ser fornecida pelo gerador

síncrono ao qual competiria também o acompanhamento da variação da carga.

Complemento de energia significa a conexão do gerador assíncrono em paralelo com a rede elétrica de um consumidor depois da medição de energia elétrica para que parte da potência exigida pela carga do consumidor seja fornecida pelo gerador assíncrono diminuindo na mesma intensidade a parcela de energia elétrica comprada da empresa distribuidora local. A vantagem em relação ao síncrono neste caso fica por conta do grande espectro de valores de potência disponíveis de máquinas assíncronas principalmente em se tratando de baixos valores. Se, entretanto, a produção de energia assíncrona for maior do que a carga do consumidor, o excedente está disponível para venda. No Brasil isto é na atualidade apenas uma possibilidade futura; em outros países onde a estrutura do sistema elétrico está mais consolidada a venda de energia elétrica por um produtor independente é uma realidade, como por exemplo, em Portugal [37].

Também como foco apresentamos uma definição da operação do gerador assíncrono e uma sugestão de programa de controle visando a utilização deste tipo de máquina em pequenas centrais hidrelétricas automatizadas. Contamos mais uma vez com o apoio do Projeto PCE que reproduz, com flexibilidade, o cenário de uma microcentral hidrelétrica automatizada dotada de toda a instrumentação necessária à análise do desempenho de turbinas, geradores e teste das rotinas do programa executivo. O objetivo do programa é o de manter o gerador funcionando de forma automática e desassistida, fornecendo potência ativa segundo definições operacionais que pode contemplar variáveis como máxima potência, máximo rendimento, hora ao longo do dia, nível de água na tomada d'água, necessidade da carga etc. O sistema de proteção age por questões de perturbação elétrica, mecânica ou hidráulica, podendo seletivamente desconectar a máquina da rede para futura conexão mantendo-a sob velocidade próxima à síncrona ou se houver risco à integridade de algum equipamento, levar a usina a uma situação de parada total. A automatização também prevê um sistema de telesupervisão e de telecomando.

Sabe-se que o fator limitante da potência de uma máquina elétrica é justamente a elevação de temperatura nos seus enrolamentos [1][6]. Esta temperatura é função da corrente de carga da máquina. Na estimativa da potência do gerador assíncrono, analisada no capítulo 6, partimos da hipótese que as potências aparentes desta máquina quer na função motor quer na função gerador deveriam ser a mesma; identificamos uma expressão matemática obtida a partir do circuito elétrico equivalente, contemplando a operação da máquina com baixo

escorregamento, que nos permite avaliar a potência de um gerador assíncrono a partir do conhecimento dos dados do motor correspondente. Uma avaliação experimental mais consistente desta conclusão é uma das tarefas que indicamos para a continuidade deste trabalho. Uma outra questão a ser estudada é a influência do aumento do fluxo de ar de auto-refrigeração da máquina assíncrona pelo fato dela estar colocada em situação de velocidade supersíncrona quando opera como gerador. Tendo por base a temperatura que a máquina atinge com carga nominal na função de motor determinar qual é a corrente de carga como gerador com a qual a máquina atinge esta mesma temperatura. Esta corrente seria utilizada para definir a potência aparente do gerador assíncrono; outras questões devem também ser estudadas nesta nova situação como o rendimento do gerador e do conjunto turbina-gerador. Estas são outras tarefas sobre as quais julgamos interessante o desenvolvimento de pesquisas.

Não poderia encerrar esta dissertação sem propor também como tarefa de continuidade deste trabalho da implantação de uma microcentral hidrelétrica automatizada a fim de que possamos acompanhar em laboratório de campo o desempenho da máquina assíncrona como um gerador de energia elétrica no ambiente de uma usina real.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAPALLAZ, J.M. et al. Manual On Induction Motors Used As Generators. Braunschweig: Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologien-Gate, 1992. (Mhpg series harnessing water power on a small scale; v.10).
- [2] FITZGERALD, A.E.;KINGSLEY Jr.,C.;UMANS,S.D. Electric Machinery 5th ed. New York: McGrawHill, 1990. (McGraw-Hill series in electrical engineering).
- [3] DAWES,C Curso De Eletrotécnica. V.2. Porto Alegre: Globo, 1972.
- [4] KOSTENKO, M.P.;PIOTROVSKI,L.M. Electrical Machines. Moscow: Foreign Languages, [1965].v.2.
- [5] SAY, M.G. The Performance And Design Of Alternating Current Machines. 3rd ed. London: Pitman, 1974.
- [6] MATHIEU, M. Calcul Et Construction De Machines Electriques. Paris: Eyrolles, 1949.
- [7] CHAPMAN, S.J. Electric Machinery Fundamentals. 2nd ed. Boston: McGrawHill, 1991.
- [8] LOBOSCO,O.S.;DIAS, J.L.P.C. Seleção E Aplicação De Motores Elétricos. v.1. São Paulo: McGrawHill, 1988.
- [9] NASAR, S.A. Máquinas Elétricas. São Paulo: McGraw-Hill, 1984.
- [10] ELETROBRÁS. Diretrizes Para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidroelétricas. CD ROM. Rio de Janeiro, 2000.
- [11] SCHREIBER, G.P. Usinas Hidroelétricas. São Paulo: Edgar Blücher, 1977.
- [12] BELUCO, A. Viabilidade De Microcentrais Hidrelétricas Baseadas No Emprego De Equipamentos De Mercado. 1994. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- [13] HOMRICH, R.P.;BELUCO,A.;LIVI,F.P. Geração Assíncrona Trifásica Utilizando Motor De Indução Trifásico. In: SEMINÁRIO DE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO, 4. , 1994, Curitiba. Proceedings. Curitiba: COPEL, UFPR, 1994. p 581-590.
- [14] JARDINI, J.A. Sistemas Digitais Para Automação Da Geração, Transmissão E Distribuição De Energia Elétrica. São Paulo: FCA, 1996.
- [15] SANTOS L.C.L. et al. Sistema de Automatização da PCH Passo do Inferno. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., 1993, Recife. Anais... Recife, CHESF, 1993.

- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7094: Máquinas Elétricas Girantes: Motores De Indução: Especificação. Rio de Janeiro, 1996.
- [17] GRAY,A.;WALLACE,G.A.Eletrotécnica: Princípios E Aplicações. 7. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1971.
- [18] YOKOGAWA. Digital Power Meter: User's Manual: I253620-01E: WT1030/WT1030M: 1st ed. Tokio, 1996.
- [19] LIPTÁK,B.G.(Ed.). Instruments Engineers's Handbook: Process control. Rednor: Chilton, 1969
- [20] SOARES, P.R.Q.;PEREIRA, A.A. Operação Das Pmchs Na Copel, Antes E Depois Da Automação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2., 2000, Canela. Anais...Porto Alegre, Comitê Brasileiro de Barragens, 2000. p.471-481.
- [21] SANTOS, L.C.L.;LAZZARI,J.Sistema De Automatização Da PCH Guarita. In: SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3. 1996, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro, 1996.
- [22] SPIEGEL M.R. Estatística. São Paulo: McGraw-Hill, 1974.
- [23] HINDMARSH,J. Electrical Machines And Their Applications. 4th ed.– BPC Wheatons. Exeter, 1984.
- [24] ELETROBRÁS. Plano Decenal De Expansão 1999/2008. Rio de Janeiro, 1999.
- [25] METOLOGIA e Critérios de Elaboração de Alternativas e Avaliação de Projetos Destinados ao Suprimento de Energia Elétrica a Pequenos Sistemas Isolados: Manual De Avaliação Econômica: versão 2. Rio de Janeiro, ELETROBRÁS, 1976. 78p.
- [26] SOUZA,Z.;FUCHS,R.D.;SANTOS,A.H.M. Centrais Hidro e Termoelétricas. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- [27] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 112-1984: IEEE Standard Test Procedure For Polyphase Induction Motors And Generators. New York, 1984.
- [28] SILVA, E.L. Formação De Preços Em Mercados De Energia Elétrica. Porto Alegre: Sagra-Luzzatto, 2001.
- [29] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Operação do Sistema Interligado Nacional. Disponível em: <www.ons.com.br/nos/sin/abertura2.htm>. Acesso em: 10 mar. 2003.
- [30] COMPANHIA DE GERAÇÃO TÉRMICA DE ENERGIA ELÉTRICA. A Empresa:

Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/empresa.htm>>. Acesso em 10 mar. 2003.

- [31] EBERLE. Manual De Motores Elétricos. Disponível em: <<http://www.eberle.com.br>>. Acesso em 28 out. 2002.
- [32] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 118-1978 : IEEE Standard Test Code For Resistance Measurement. New York, 1978.
- [33] MANUAL de Microcentrais Hidrelétricas. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1985. 344p.
- [34] ALTUS. Manual de Utilização: Série Piccolo: Ref 6299-014.4 - Rev. B. nov. 1999.
- [35] SANTOS,S.R.; ANDROVANDI,E.H.; BRITO,R.M.;FLORES FILHO,A.F.Automa-tização de Pequenas Centrais Hidrelétricas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO, 2., 2001, Salvador. Anais...Salvador: Associação dos Profissionais de Instrumentação da Bahia, AINST, 2001. Trabalhos Técnicos: TT-072, p.7, 2001 CD-ROM.
- [36] SANTOS, S. R.; ANDROVANDI, E. H.; BRITO, R. M.; FLORES FILHO, A. F.; BRISTOTI, A. A Proposal For The Automation Of A Small Hydroelectric Plant, 4.,2000, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: PUC/RS, 2000. v 2/2, p 746-749.
- [37] PORTUGAL. Decreto-Lei no. 189/88 de 13 de maio de 1988. Diário Da República Portuguesa, Lisboa, n.123, página 2289, jul. 1988.
- [38] RELATÓRIO Final do Projeto Mesa: Sistema Para Medição De Torque Dinâmico Em Motores Elétricos. Porto Alegre: UFRGS/DELET, 1994.