

CONTROLE DE VELOCIDADE DE UMA MICROCENTRAL HIDROELÉTRICA POR COMUTAÇÃO DE CARGAS RESISTIVAS

Autor: José Carlos Teles Campos Orientador: Henrique Cunha Jr.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, para obtenção do lítulo de Mestre em Engenharia Elétrica.



São Paulo 1991

À minha irmã Clélia À esposa Marluce Às filhas Mirela e Monique

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à cooperação e à contribuição das seguintes entidades:

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), através de sua direção;

À Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL);

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará;

Aos Engenheiros, Técnicos e Estagiários do Agrupamento de Tecnologia de Equipamentos Elétricos (ATEE), da Divisão de Mecânica e Eletricidade (DME) do IPT;

Aos colegas de pós-graduação do Departamento de Eletricidade da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

RESUMO

O presente trabalho pretende identificar o modelo ideal para um regulador eletrônico de velocidade por comutação de cargas de controle, com o intuito de baratear o investimento de implantação, e os custos de manutenção de uma microcentral hidroelétrica.

Seguindo este mesmo objetivo de barateamento de custos, o trabalho mostra também que é possível se encontrar um tipo de turbina hidráulica e um tipo de máquina elétrica ideais para esta utilização.

O trabalho faz a descrição dos vários tipos de turbinas utilizadas de acordo com as alturas de queda d'água e com as vazões que se enquadram dentro do conceito de microcentral.

A seguir é abordado um estudo dos principais tipos de geradores elétricos, enfatizando-se aqueles que são mais viáveis para este tipo de aplicação.

Depois é feita uma descrição dos principais tipos de reguladores de velocidade, desde os clássicos eletromecânicos utilizados em centrais convencionais, até os chamados reguladores eletrônicos de velocidade que são utilizados tanto em centrais convencionais, como em microcentrais.

Finalmente, faz-se um modelo matemático para uma microcentral a partir de simplificações de um modelo de uma central convencional para compará-lo com o modelo identificado a partir dos ensaios realizados em campo.

A identificação deste modelo é feita utilizando-se as rotinas chamadas IDENTIFY do MATLAB. Os dados aquisitados em campo utilizaram o programa chamado AQDADOS, da LYNX.

Com o modelo calculado, faz-se finalmente o projeto de um regulador PID que poderá fazer a regulagem do sistema.

ABSTRACT

This present work deals with micro hydropower electric systems and has its enphasis on the study of the turbine speed regulation by a electronic system. The proposed speed regulator is of local commutation type, where the constant speed is achieved by the constant demand of energy from the generator.

The study presents a bibliographical revision seting up the state of art on micro hydropower. Following this revision, the system modelling is studied. Theoretical and practical results are used the system modelling.

Substancial cost reduction may be achieved using this technology in many ways: civil engineering works; elimination of the conventional turbine speed governor - not only because the governor is itself an expensive item, but because its removal permits simplification of the turbine, particularly where high efficiency is not a dominant concern. The simplified turbine design may lend itself to large-volume production at low unit cost, or it may permit manufacture in a Third World workshop using local labour and readily available materials.

Finnaly this work implements a PID controller for regulation the system frequency.

SUMÁRIO DE FIGURAS

Nº da	pag.
figura	
1.1 Turbina Francis Caixa Aberta, eixo horizontal	80
1.2 Turbina Francis caixa espiral com eixo horizontal	09
1.3 Turbina Francis com eixo vertical	10
1.4 Turbina Kaplan Caixa Aberta	12
1.5 Turbina tipo Bulbo	13
1.6 Turbina tipo Tubo	14
1.7 Bomba centrífuga funcionando como bomba (BFB) e funcio	•
nando como turbina (BFT)	16
1.8 Unidade Geradora tipo sifão	17
1.9 Turbina Pelton com um injetor	18
1.10 Turbina Pelton com dois injetores	19
1.11 Roda Pelton	20
1.12 Turbina Michell-Banki	22
2.1 Diagrama da Máquina Síncrona auto-regulada	25
2.2 Diagrama da Máquina Síncrona sem escovas	26
2.3 Circuito Equivalente de uma Máquina Assíncrona	29
2.4 Circuito Equivalente de uma Máquina Assíncrona em	
função do escorregamento	30
2.5 Gráfico de E_1 e I_2 em função do escorregamento da	
máquina assíncrona	32
2.6 Gráfico do Conjugado y Escorregamento e do Conjugado	

	x velocidade da máquina assíncrona	34
2.7	Gráfico do processo de auto-excitação da máquina assín-	
	crona	35
2.8	Gráfico da variação do ponto de operação com a variação	
	da velocidade da máquina assíncrona	37
2.9	Diagrama trifásico de um gerador alimentando uma	
	carga resistiva isolada	38
2.10	O Circuito equivalente por fase de um gerador trifásico	
	alimentando uma carga isolada	39
3.1	Regulador de velocidade eletromecânico	45
3.2	Regulador eletrônico por controle de defasagem	47
3.3	Regulador eletrônico sequencial	48
3.4	Regulador eletrônico combinacional	48
3.5	Desenho esquemático da turbina utilizada no	
	trabalho	50
3.6	Diagrama do sistema de geração utilizado no trabalho	54
3.7	Diagrama de blocos do circuito de controle utilizado	
	no trabalho	58
3.8	Diagrama de ligação da carga de controle	61
4.1	Representação esquemática dos torques mecânico e	
	elétrico em uma unidade geradora	63
4.2	Diagrama de blocos do gerador síncrono	67
4.3	Diagrama de blocos do conduto forçado	68
4.4	Diagrama de blocos do conjunto gerador/carga	71
4.5	Diagrama de blocos de uma central hidroelétrica	

	convencional	73
4.6	Diagrama de blocos de uma microcentral hidroelétrica	74
4.7	Diagrama de blocos do modelo proposto por Woodward	75
4.8	Forma de onda da tensão do gerador aquisitada pelo	
	AQDADOS	7:7
4.9	Curvas de Potência e de Rotação normalizadas para o	
	ensaio 1	79
4.10	Gráfico de Tal x № de cargas dos ensaios	80
4.11	Gráfico de Ganho x Nº de cargas do ensaio	81
4.12	Modelo encontrado a partir dos dados da tabela 4.1	81
4.13	Diagrama de blocos do modelo identificado	83
4.14	Diagrama de blocos do sistema com a inclusão do PID	84
4.15	Gráfico da resposta do sistema a um degrau na referência,	
	usando métodos de tentativas e erros	85
4.16	Gráfico da resposta do sistema a um degrau na carga,	
	usando métodos de tentativas e erros	8.5
4.17	Gráfico da resposta do sistema a um degrau aplicado	
	na referência, usando-se o método de alocação de pólos	86
4.18	Gráfico da resposta do sistema a um degrau de carga	
	usando-se o método de alocação de pólos	86
A.1	Diagrama de blocos de um sistema a ser identificado	93
	\cdot	
BUMÁ:	RIO DE TABELAS	
3.1	Tabela das combinações possíveis de cargas de controle	56
4.1 '	Tabela dos valores de ganho e de tal do ensajo	ΩΛ

SIMBOLOGIA

- A seção transversal do conduto forçado
- dQ a₁₂ = variação do fluxo de água com a velocidade da turbina dN

- $A_{23} = \frac{dT}{dG}$ variação do torque da turbina com a abertura da válvula da turbina
- C número de combinações de cargas de controle
- $D=K_D$ amortecimento da carga. É definida como sendo a relação entre o percentual de variação da carga dividido pelo percentual de variação da frequência

E₁ f.e.m. no estator

 E_2 f.e.m. no rotor

 E_2 ' f.e.m. no rotor referido ao estator

Fig. figura

 $F_1 = 1/T_W p$

f₁,f₂ representam as escovas para alimentação do campo

g aceleração da gravidade

gn variação da abertura da válvula da turbina

h variação na altura do conduto forçado

H altura do conduto forçado

I₁ corrente no estator da máquina assíncrona

I₂ corrente no rotor da máquina assíncrona

I2' corrente no rotor da máquina assíncrona referida ao estator

J momento inercial (envolvendo os efeitos da inércia do sistema)

K_d ganho derivativo do PID

Ki ganho integral do PID

Kq ganho do regulador eletrônico

Kp ganho proporcional do PID

L comprimento da tubulação do conduto forçado

△Pl variação de carga

M = W_OJ momento angular da máquina

N = W velocidade da turbina

n = \(\Delta \text{W} \) variação da velocidade da turbina

nc número de cargas de controle

p operador de Laplace

P potência da menor carga de controle

P_{el} potência elétrica nos terminais da máquina elétrica

P₁ potência líquida de aceleração

P_{l(freq)} percentual de variação da carga com a frequência

Pmec potência mecânica fornecida ao rotor do gerador

P_{nc} potência da carga de controle nc

Pr potência no rotor da máquina assíncrona

Pt potência nominal do gerador

q variação do fluxo de água na turbina ou no conduto forçado

Q fluxo de água na turbina ou no conduto forçado

R₁ resistência elétrica no estator

R₂ resistência elétrica no rotor

R_m resistência no ramo magnetizante

s escorregamento da máquina assíncrona

T_C conjugado total da carga

 $T_{CC} = T_{1}g$ parcela do conjugado da carga correspondente à carga de controle

 $T_{CU} = T_{1}u$ parcela do conjugado de carga correspondente à carga do usuário

T_d conjugado causado pelo amortecimento D

T_{el} conjugado elétrico

T₁ conjugado líquido de aceleração

 $T_{mec} = T_t$ conjugado mecânico

conjugado no rotor da máquina $\mathbf{r}_{\mathbf{r}}$ =(LQ_O)/Ag constante de tempo da turbina $\mathbf{T}_{\mathbf{W}}$ u velocidade da água no conduto forçado tensão nos terminais do estator da máquina assíncrona V_1 = 1/wC reatância capacitiva do banco de capacitores que $X_{\mathbf{C}}$ faz a auto-excitação da máquina assíncrona reatância do ramo magnetizante da máquina assíncrona X_{m} reatância de dispersão do estator X_1 reatância de dispersão do rotor X_2 X_2' reatância de dispersão do rotor referida ao estator z_{m} impedância de magnetização da máquina assíncrona impedância do estator da máquina assíncrona z_1 impedância do rotor da máquina assíncrona z_{2s} Δ variação em torno do regime permanente valor inicial O

SÍMBOLOS EM LETRAS GREGAS

- α aceleração angular do conjunto turbina/gerador
- δ angulo de fase da máquina síncrona
- τ massa específica da água

W ou W_S velocidade do campo girante ou velocidade síncrona

 $W_{\mathbf{r}}$ velocidade angular do rotor da máquina síncrona

SUMÁRIO

	pag.
APRESENTAÇÃO	01
ESTADO DA ARTE	04
CAPÍTULO 1: TURBINAS HIDRÁULICAS PARA MICROCENTRAIS	
HIDROELÉTRICAS	07
1.1 Introdução	07
1.2 Tipos de Turbinas	07
1.2.1 Turbinas de Reação	07
1.2.1.1 Turbinas Francis	08
1.2.1.1.1 Turbina Francis Caixa Aberta	08
1.2.1.1.2 Turbina Francis Caixa Espiral	09
1.2.1.2 Turbinas Kaplan ou tipo hélice	11
1.2.1.3 Turbinas tipo tubo	13
1.2.1.4 Bomba Centrífuga funcionando como turbina (BFT)	15
1.2.1.5 Unidade Geradora tipo sifão	17
1.2.2 Turbinas de Ação	18
1.2.2.1 Turbinas Pelton	18
1.2.2.2 Roda Pelton	19
1.2.2.3 Turbina Michell-Banki	21

CAPITULO 2: MAQUINAS ELETRICAS UTILIZADAS COMO GERADORES	
EM MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS	23
2.1 Introdução	23
2.1.1 Dados da Turbina	23
2.1.2 Considerações elétricas de operação	23
2.2 Máquinas Síncronas	24
2.2.1 Máquina Síncrona Auto-regulada	24
2.2.2 Máquina Síncrona sem Escovas	26
2.3 Máquinas Assíncronas	27
2.3.1 Princípio de operação da máquina assíncrona	27
2.3.2 Circuito equivalente da máquina assíncrona	29
2.3.2.1 Tensão no estator	30
2.3.2.2 Corrente no rotor	31
2.3.2.3 Potência no rotor	32
2.3.2.4 Conjugado no rotor	33
2.3.3 O Fenômeno da auto-excitação	35
2.3.4 Circuito equivalente de um sistema isolado alimentado	
por uma máquina assíncrona	37
2.3.5 Comparação entre a máquina síncrona e a máquina	
aggingrona	30

CAPITULO 3: CONTROLE DE VELOCIDADE DAS MICROCENTRAIS	
HIDROELÉTRICAS	4:2
3.1 Introdução	42
3.2 Princípio de Operação dos Reguladores de Velocidade	42
3.3 Tipos de Reguladores de velocidade utilizados em Micro	
centrais hidroelétricas	44
3.4 Descrição do sistema de Regulação de velocidade utilizado	
na microcentral do convênio IPT/CPFL	49
3.4.1 Turbina tubular	49
3.4.2 Gerador Elétrico	50
3.4.3 Regulador eletrônico de velocidade	51
3.4.4 Cargas de Controle	61

CAPITOLO 4: MODEDAMENTO MATEMATICO E IDENTIFICAÇÃO DA	
MICROCENTRAL HIDROELÉTRICA	62
4.1 Introdução	62
4.2 Modelo matemático de uma hidroelétrica convencional	62
4.2.1 Modelo matemático do gerador síncrono	62
4.2.2 Modelo matemático do conduto forçado	67
4.2.3 Modelo matemático da turbina hidráulica	69
4.2.4 Modelo matemático da carga isolada ligada ao gerador	
elétrico	70
4.2.5 Diagrama de blocos de uma central hidroelétrica	
convencional	72
4.2.6 Obtenção do modelo de uma microcentral a partir do	
modelo convencional	73
4.2.7 Modelo proposto por Woodward	7:5
4.3 Identificação do modelo da microcentral hidroelétrica	75
4.4 Cálculo do Controlador PID	83
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
APÊNDICE	93
A.1 Descrição do sistema	93
A.2 Modelos Paramétricos	95

APRESENTAÇÃO

O aproveitamento energético de pequenas quedas, foi durante muitos anos relegado a um plano inferior pelas autoridades brasileiras do setor.

Com o discutível esgotamento dos grandes potenciais e com a crise energética da década de setenta, estas autoridades passaram a olhar com mais seriedade o potencial que as pequenas quedas poderiam fornecer.

Foram criados então alguns programas, embora tímidos, de incentivo à produção de energia elétrica a partir de pequenas quedas, sobretudo para suprir aquelas propriedades rurais de pequeno porte e localizadas em áreas remotas.

Aproveitando esta oportunidade, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), juntamente com a então FIPEC do Banco do Brasil, assinaram um convênio para a construção de três microcentrais hidroelétricas na região de Joaquim Egídio em São Paulo, aproveitando as instalações de uma central da CPFL.

O projeto já foi encerrado, embora não tenha sido totalmente concluído, pois não foram feitos os testes finais de validação e nem a implantação definitiva do regulador eletrônico de velocidade.

O objetivo deste trabalho é portanto modelar e identificar o sistema e projetar um controlador PID para fazer a regulação de velocidade para este sistema, que tenha condições de fornecer

energia elétrica de qualidade para ser oferecido aos usuários que se enquadrem dentro da faixa adequada de utilização, ou seja, pequenas comunidades ou pequenas propriedades rurais localizadas em áreas remotas e que possuam energia hidráulica disponível.

O trabalho tem o seguinte desenvolvimento:

No primeiro capítulo é feito um estudo dos principais tipos de turbinas hidráulicas que podem ser utilizadas como máquinas motrizes para microcentrais hidroelétricas, que são aquelas que podem fornecer potências na faixa entre 01kW e 100kW.

No segundo capítulo faz-se um estudo dos principais tipos de máquinas elétricas que podem transformar a energia mecânica fornecida pela turbina em energia elétrica. Embora o projeto utilize como gerador uma máquina síncrona sem escovas, o trabalho destaca também a potencialidade de se utilizar como gerador, uma máquina assíncrona, mais especificamente o motor de indução tipo gaiola de esquilo. Este tipo de máquina já vem sendo utilizado em vários países com relativo sucesso, devido principalmente à sua robustez, ao seu baixo preço de aquisição e ao seu baixo custo de manutenção.

No terceiro capítulo é feita uma descrição dos principais tipos de reguladores de velocidade utilizados nessa faixa de aplicação, desde o ainda muito utilizado em termos nacionais, regulador eletromecânico, até os mais modernos, que utilizam dispositivos semicondutores e eletrônica digital. São feitas comparações entre os diversos tipos de reguladores, destacando-se as vantagens e desvantagens de cada um deles.

Finalmente, o penúltimo capítulo, o quarto, faz um modelamento matemático de uma central hidráulica convencional e são feitas então algumas simplificações para se chegar ao modelo ideal para uma microcentral.

A partir deste modelo teórico, foi feito um conjunto de ensaios de campo e algumas simulações computacionais utilizandose o MATLAB, com o intuito de se chegar a um modelo semelhante ao modelo matemático encontrado.

No capítulo cinco, enfim, são apresentadas as conclusões do trabalho.

ESTADO DA ARTE

Organismos internacionais como a Organização das Nações Unidas, Banco Mundial e Organização dos Estados Americanos tem se interessado bastante nos últimos anos, com o desenvolvimento e implantação de sistemas de energia de médios e pequenos portes, nos países do terceiro mundo. As razões deste interesse se dão sobretudo pelas consequências da crise do petróleo na década de setenta, preocupação com a preservação do meio ambiente e também com a possibilidade de se reduzir a fome na maioria dos países do terceiro mundo, utilizando-se estes potencias para gerar energia que será usada na produção de alimentos, através da irrigação, como é o caso da China.

Constata-se no entanto, que nos países carentes, o maior problema encontrado para a implantação destes sistemas, é a incipiência das indústrias locais no que se refere à construção dos equipamentos necessários.

Para resolver estes entraves, é necessária a colaboração dos países ricos, seja no sentido de se padronizar os equipamentos, seja na transferência de tecnologia ou até mesmo na criação de programas de financiamentos para a compra e instalação destes sistemas.

A seguir será dado um breve relato dos trabalhos desenvolvidos em alguns países do mundo:

- França - nas duas últimas décadas houve um acentuado acréscimo no número de instalações de médio e pequeno porte, devido aos dois primeiros fatores já mencionados tais como a crise do

petróleo, e a preservação do meio ambiente, observando-se que além destes, o fator que teve mais influência foi a liberação por parte dos orgãos do governo, para que entidades privadas pudessem construir seus próprios sistemas, o que não era permitido até então.

com relação aos aspectos antes levantados, a França pode dar uma ajuda importantíssima aos países do terceiro mundo, pelo fato dela possuir uma indústria consolidada no setor e dispõe de meios para financiar instalações utilizando-se seus equipamentos; - China - atualmente é o país que possui o maior número de minis e microcentrais instaladas, da ordem de cem mil unidades. A produção de energia elétrica é sobretudo para atender o meio rural, através da irrigação para a produção de alimentos. Este fato tem sido destacado como sendo o responsável pela melhoria de vida dos camponeses chineses tanto em termos materiais como em termos culturais. Um dos destaques desta política é que ela mesma fabrica todos os equipamentos, ao contrário de outros países do terceiro mundo, inclusive com excedentes para exportação.

- Peru é o país que está mais avançado neste setor na América Latina. É o exemplo mais evidente de que com a ajuda dos países ricos, é possível o aproveitamento dos potenciais de médio e pequeno porte. Neste caso o Peru tem recebido uma significativa ajuda da Alemanha.
- Brasil aqui existe um potencial significativo de desníveis que poderão ser aproveitados, principalmente nas regiões norte e centro-oeste. O país possui indústria que pode perfeitamente produzir os equipamentos necessários, no entanto, o que fica

evidenciado é a falta de iniciativa governamental para incentivar este tipo de empreendimento.

Verifica-se que as empresas concessionárias de energia estão se voltando para este setor, inclusive com programas de recuperação de antigas centrais de médio e pequeno portes.

CAPÍTULO 1 - TURBINAS HIDRÁULICAS PARA MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS

1.1 INTRODUÇÃO

Os tipos de turbinas utilizadas nesta faixa de aplicação são os mesmos usados nas aplicações de médio e grande porte.

O que se verifica é a necessidade de padronização, e a consequente fabricação em massa de alguns tipos, barateando significativamente os custos.

Estas turbinas devem ser selecionadas de modo a se obter facilidade de operação e de manutenção, dando-se destaque à sua robustez.

Este capítulo faz uma descrição dos tipos de turbinas convencionais e daqueles tipos que são específicos ou que melhor se adequam ao uso em mínis e microcentrais hidroelétricas.

1.2 TIPOS DE TURBINAS

As turbinas são divididas em dois tipos principais:

1.2.1- Turbinas de Reação:

São aquelas turbinas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do rotor [01].

1.2.1.1 - Turbina Francis

40

As turbinas Francis podem ser de dois tipos:

1.2.1.1.1 - Francis Caixa Aberta - utilizada em aproveitamentos com quedas abaixo de 10m. O nome caixa aberta é devido ao fato delas não possuírem caixa espiral e nem tubulação forçada, conforme mostra a figura 1.1.

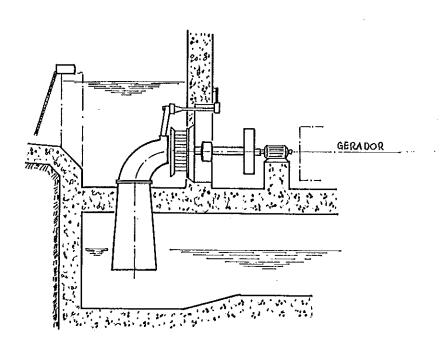
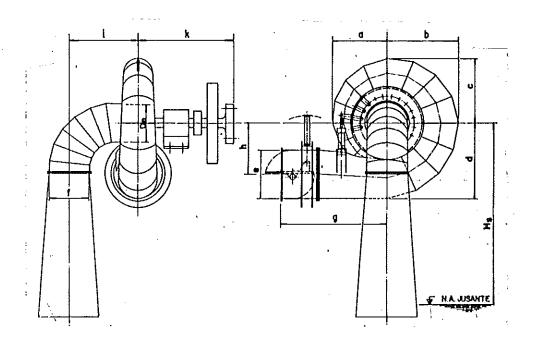


Fig.1.1 Turbina Francis Caixa Aberta, eixo horizontal.

Elas possuem capacidade de geração na faixa de 1kW a 100kW, com vazões que vão de 501/s a 15001/s, com quedas de 3m a 10m.

1.2.1.1.2 - Francis Caixa Espiral - Para quedas acima de 10m, podendo ser feita em chapa de aço soldado ou em ferro fundido. Este tipo de turbina pode gerar potências na faixa de 50kW a 100kW, com vazões que vão de 1201/s a 15001/s.

As turbinas Francis para microcentrais, geralmente são construídas com o eixo na posição horizontal, conforme a figura 1.2, facilitando a instalação e a manutenção do gerador.



g \cdot

, 3

'n

Fig. 1.2 Turbina Francis caixa espiral com eixo horizontal.

O posicionamento na posição vertical, tem a vantagem de se poder colocar o gerador acima do nível máximo da água, conforme mostra a figura 1.3.

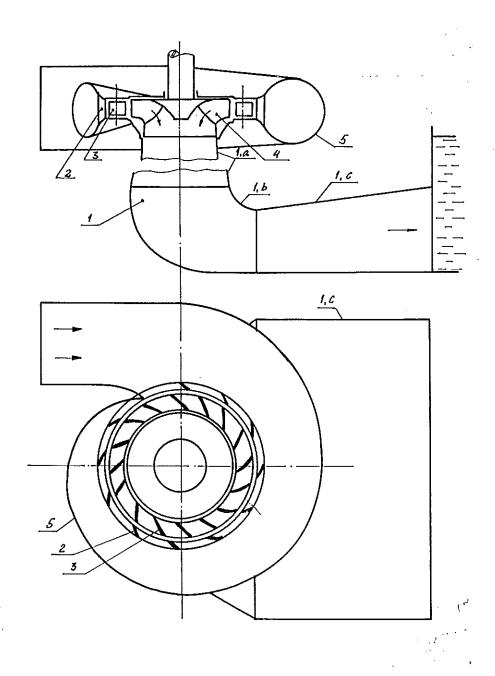


Fig. 1.3 Turbina Francis com eixo vertical.

O rendimento da turbina Francis caixa aberta é obviamente bem inferior àquele correspondente à Francis caixa espiral. Este menor rendimento é justificado pela maior aspereza das paredes em torno das quais ela se aloja, em compensação seu custo é bem mais baixo devido à simplicidade do projeto, porém apresenta baixas velocidades de rotação, exigindo assim, a presença de dispositivos multiplicadores de velocidade para o acoplamento com os geradores.

A nível de Brasil, há uma tendência muito grande de se utilizar as turbinas Francis, não por seu desempenho técnico, mas principalmente porque já existe um conjunto de indústrias fabricando este tipo de equipamento, o que acarreta uma significativa diminuição de custos.

1.2.1.2 - Turbinas Kaplan ou tipo Hélice

Este tipo de turbina é recomendado para aproveitamentos com quedas menores do que 20m [02].

Assim como a turbina Francis, a Kaplan também pode ser instalada em caixa aberta, conforme a figura 1.4, ou no concreto com caixa do tipo semi-espiral.

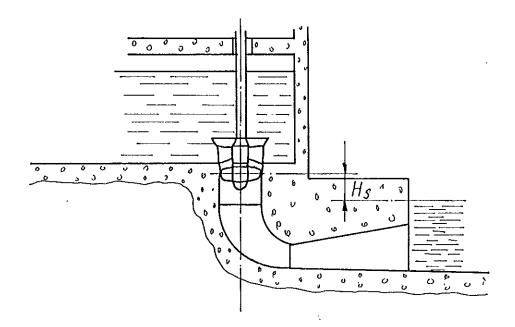


Fig. 1.4 Turbina Kaplan tipo caixa aberta.

Quanto à posição do eixo, estas turbinas podem ser de eixo horizontal, inclinado ou vertical, sendo este último tipo o mais utilizado.

A principal diferença entre este tipo de turbina e a Francis é o seu rotor, que é em forma de hélice, daí a sua outra denominação.

A turbina Kaplan se enquadra nas mesmas faixas de vazão e potência gerada da turbina Francis, com uma vantagem adicional: é que para uma mesma queda, ela desenvolve uma velocidade ligeiramente maior que a turbina Francis.

1.2.1.3 - Turbina tipo Tubo

Este é um tipo especial de turbina hélice ou de fluxo axial que é muito propício para o aproveitamento de pequenas quedas (a partir de 1,5m). Elas podem ser construídas em duas disposições: uma chamada turbina tipo bulbo e outra chamada tipo tubo.

A turbina tipo bulbo tem escoamento axial, o eixo do escoamento é o mesmo do de rotação da turbina, que é o mesmo do gerador elétrico a ela acoplado. O gerador está fechado em um invólucro de perfil hidrodinâmico. Este invólucro possui a forma de um bulbo, daí o nome dado a este tipo de máquina. A figura 1.5 mostra uma turbina tipo bulbo.

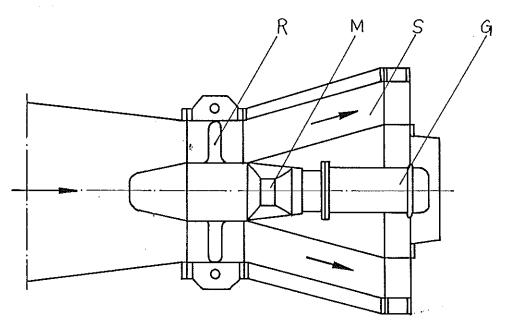


Fig.1.5 Turbina tipo Bulbo, onde R é o rotor, M é um multiplicador de velocidade, S é um aspirador de saída e G é o gerador elétrico.

Este tipo de turbina foi inventado para ser utilizado em fontes maremotrizes, plantas com baixas quedas e microcentrais; porém ela apresenta um inconveniente quando se trata de utilização em áreas remotas: é que a tecnologia avançada do acoplamento do gerador dentro do bulbo, poderá causar problemas de manutenção, daí surgir outra versão desse tipo de turbina, que é chamada turbina tipo tubo. Esta turbina tem as mesmas características da tipo bulbo, porém ela tem o gerador instalado fora do invólucro, conforme mostra a figura 1.6, tornando-a adequada para instalação em áreas remotas.

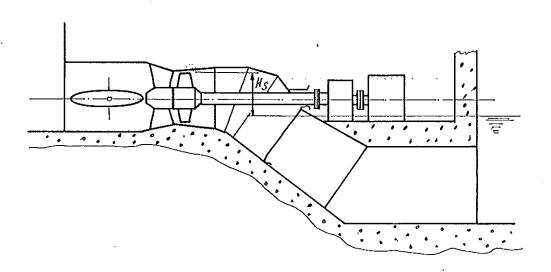


Fig. 1.6 Turbina tipo tubo.

Tem-se verificado que as turbinas tubulares, principalmente as do tipo tubo, são as que proporcionam maiores rendimentos

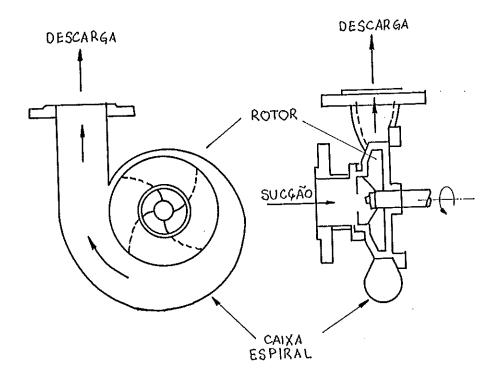
quando utilizadas nas microcentrais. Esta tendência de utilização deste tipo de unidade tem se verificado a nível internacional apenas, pois a nível nacional este tipo de equipamento ainda não despertou interesse no que se refere a sua fabricação em grande quantidade.

1.2.1.4 - Bomba centrífuga funcionando como turbina (BFT) [03],[04],[05].

As bombas centrífugas de fluxo radial podem ser operadas reversamente, funcionando desta forma como turbinas hidráulicas.

As bombas centrífugas de fabricação nacional, com potências inferiores a 50kW, podem perfeitamente funcionar como turbinas, diminuindo consideravelmente os custos, de uma feita que estas bombas são fabricadas em série, em modelos padronizados, e facilmente encontradas no comércio, ao contrário das turbinas, que são fornecidas apenas sob encomenda.

Para que a bomba centrífuga funcione como turbina, o sentido do fluxo de escoamento da água se inverte e consequentemente há a inversão no sentido de rotação. A figura 1.7 mostra uma bomba centrífuga funcionando como bomba e como turbina.



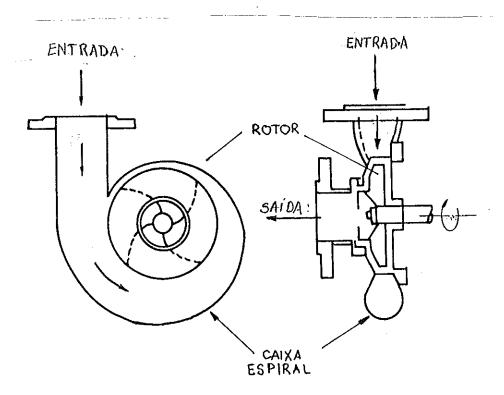


Fig. 1.7 Bomba centrífuga funcionando como bomba (sup) e funcionando como turbina (inf.).

Trabalhos experimentais constataram que na operação da bomba como turbina, na mesma rotação, a vazão e a altura aumentam com relação ao funcionamento como bomba, para se obter o mesmo rendimento e que estes aumentos variam com o tipo de bomba.

1.2.1.5 - Unidade geradora tipo Sifão [06]

O arranjo tipo sifão é uma alternativa para aproveitamentos em quedas inferiores a 4m, e pequenas vazões. Muito utilizado pela companhia estatal francesa de energia. O arranjo é composto pelo sifão e pelo gerador em um único bloco, como no caso das turbinas tipo bulbo, como mostra a figura 1.8.

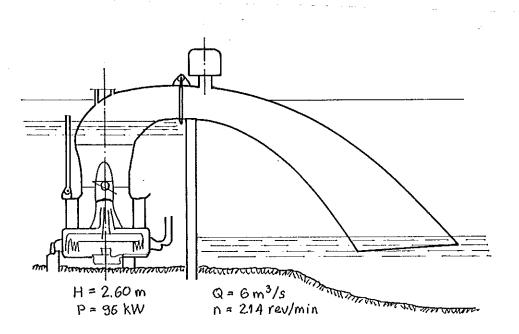


Fig. 1.8 Unidade geradora tipo sifão.

1.2.2 - Turbinas de Ação:

Estas turbinas se caracterizam pela transformação da energia cinética da água em escoamento em trabalho mecânico, através do sistema rotativo hidrodinâmico (rotor).

1.2.2.1 - Turbinas Pelton

A turbina Pelton tem por característica a transformação da energia potencial da queda d'água em energia cinética no jato injetor. Posteriormente esta energia cinética é convertida em energia mecânica no rotor da turbina.

Esta turbina é constituída basicamente por um rotor, em torno do qual estão fixadas as pás ou conchas, por uma tubulação de adução contendo um, dois ou mais injetores e por blindagens metálicas no caminho da água, conforme a figura 1.9.

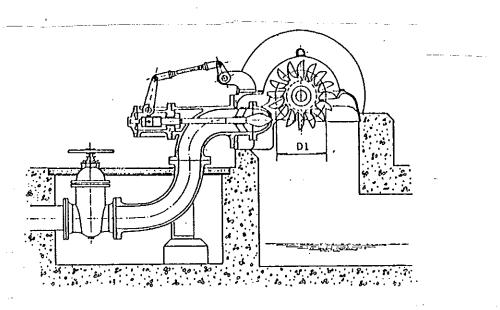


Fig. 1.9 Turbina Pelton com um injetor.

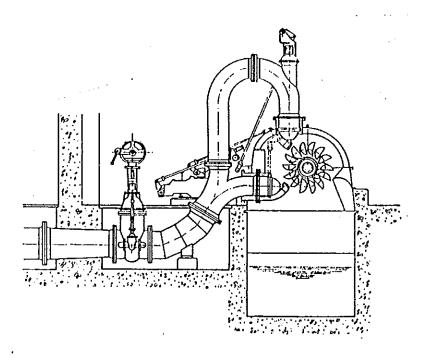


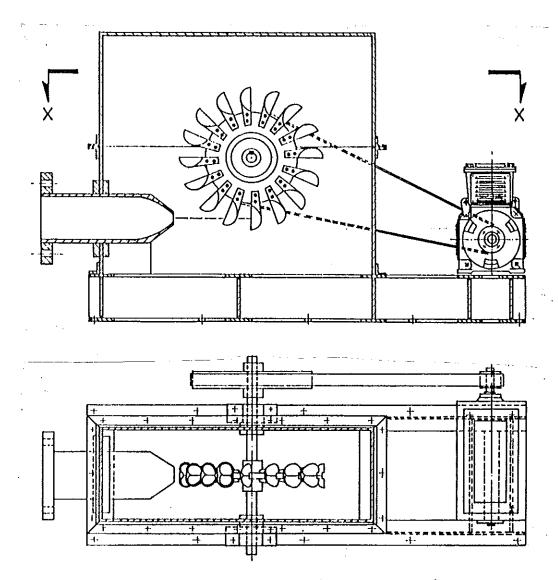
Fig. 1.10 Turbina Pelton com dois injetores

As turbinas Pelton podem ser utilizadas para quedas de 3m a 60m, gerando potências de 1kW a 100kW, com vazões de 201/s a 2001/s. Elas porém tem rendimento melhor em altas quedas e pequenas vazões, condição em que as turbinas Francis apresentam baixo rendimento.

1.2.2.2 - Roda Pelton

Uma simplificação da turbina Pelton é a roda Pelton, que é constituída de uma roda com conchas, de eixo horizontal, com caixa metálica de proteção e acionada por meio de um único jato d'água através de um bocal cônico, mais conhecido pelo nome de "setía". Para microcentrais com potências até cerca de 30kW é

aconselhável um estudo para instalação de uma roda Pelton, devido ao seu baixo custo de aquisição e à sua fácil instalação e manutenção. A figura 1.11 mostra uma roda Pelton.



A roda Pelton não possui regulador de vazão, consequentemente ela só deve ser utilizada para o suprimento de energia para iluminação e aparelhos elétricos de funcionamento

contínuo, a não ser que se utilize cargas resistivas capazes de absorver o excedente.

1.2.2.3 - Turbinas Michell-Banki

Devido à sua simplicidade construtiva e às suas caracteristicas hidráulicas este tipo de turbina è bastante adequado para o uso em microcentrais hidroelétricas. Esta turbina é também chamada de turbina de fluxo cruzado.

O funcionamento da turbina Michell-Banki pode ser descrito da seguinte forma: a água vinda da tubulação passa por uma peça de transição, penetrando no injetor, que é provido de uma pá diretriz. Esta pá além de orientar o fluxo, permite a regulagem da vazão de acordo com a carga da turbina. Do injetor, a água entra no rotor, o qual é constituído de várias pás curvadas radialmente unidas nos extremos por dois discos de aço enchavetados a um eixo passante horizontal. A água passa duas vezes pelas pás do rotor, a primeira na forma centrípeta e a segunda na forma centrífuga. Após a segunda passagem a água escoa pelo tubo de sucção ou canal de fuga, conforme mostra a figura 1.12.

Devido à sua simplicidade construtiva, a turbina Michell-Banki é de baixo custo de fabricação, permite a fabricação seriada e sua tecnologia pode ser absorvida, sendo possível o seu dimensionamento, construção e instalação pelo próprio homem do campo. Por estas razões, elas podem ser aplicadas em regiões remotas, onde há carência de energia.

O campo de aplicação deste tipo de turbina cobre quedas de 3m a 100m, vazões de 501/s a 20001/s cujas potências nominais variam de 1kW a 1000kW.

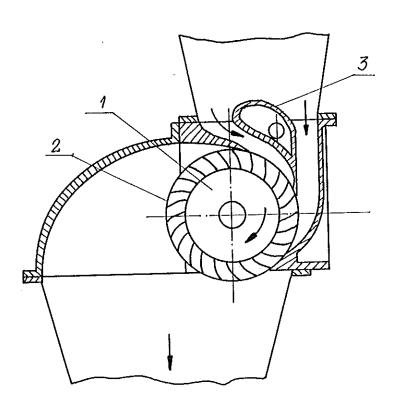


Fig. 1.12 Turbina Michell-Banki. 1- Rotor, 2-Pás do rotor, 3- Pá diretriz.

CAPÍTULO 2: MÁQUINAS ELÉTRICAS UTILIZADAS COMO GERADORES EM MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS

2.1 - Introdução:

As máquinas elétricas que podem ser utilizadas como geradores nas microcentrais hidroelétricas são as máquinas síncronas tanto a tipo convencional (utilizada nas instalações mais antigas); como as auto-reguladas e as máquinas síncronas sem escovas (brushless), e as máquinas assíncronas, mais especificamente o motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo.

A escolha apropriada do gerador pode se basear em importantes detalhes de projeto [07], tais como:

2.1.1 - Dados da Turbina:

- Potência Efetiva
- Velocidade Nominal
- Momento de Inércia
- Controle de Velocidade
- Dimensões Máximas
- Tipo de Construção (horizontal, inclinada ou vertical)

2.1.2 - Condições Elétricas de Operação:

- -Tipo de operação se isolada ou interligada ao sistema de distribuição da concessionária
- -Tipo de Carga se carga constante ou variável
- -Controle de Tensão
- -Potência Reativa
- -Reação aos Transitórios
- -Estabilidade

A seguir será dado um detalhamento sobre os tipos de máquinas elétricas mais utilizados como geradores em microcentrais hidroelétricas.

Será dado mais destaque à máquina assíncrona, porque em primeiro lugar a tecnologia da máquina síncrona como gerador já é bastante conhecida e seus problemas já solucionados e em segundo lugar porque a tecnologia da utilização da máquina assíncrona gerador apresenta problemas, que serão ainda como destacados. O interesse por este tipo de máquina se deve ao fato de que quando seus problemas estiverem resolvidos, a máquina assíncrona com seu baixo preço, sua robustez e sua facilidade de máquina elétrica mais manutenção, poderá tipo de ser recomendado para geração de energia elétrica em microcentrais hidroelétricas.

2.2 - Máquinas Síncronas

Dentre as máquinas síncronas citadas na introdução, as mais utilizadas neste tipo de instalação são:

2.2.1 - Máquina Síncrona Auto-regulada [08]

A figura 2.1 mostra o diagrama simplificado da máquina síncrona auto-regulada.

A função do resistor variável e do diodo é a de efetuar a auto-excitação e manter a tensão de saída no valor nominal para funcionamento em vazio. O conjunto de TC'S e a ponte retificadora trifásica permitem compensar os efeitos provocados pela carga, como a queda de tensão. Os pontos f_1 e f_2 representam as escovas para alimentação do campo.

Conforme se pode ver na figura 2.1, o nome auto-regulado se deve ao fato de que a excitação é feita com a própria tensão gerada nos terminais da máquina.

Uma desvantagem desse tipo de máquina em comparação com o tipo que será descrito no item seguinte, é exatamente a presença de escovas, o que acarreta maiores cuidados com a manutenção.

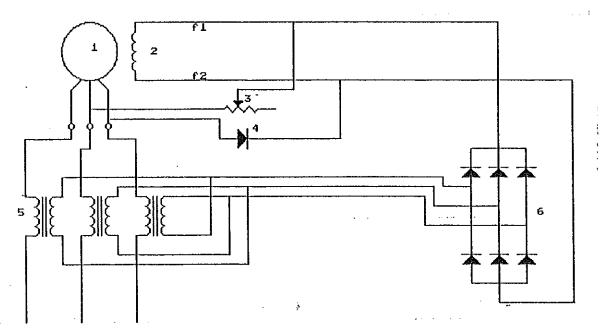


Fig. 2.1 Máquina síncrona auto-regulada. 1- Armadura,

2- Campo, 3 e 4 efetuam a auto-excitação, 5- TC'S,

6- Ponte retificadora.

2.2.2 - Máquina Síncrona sem Escovas (brushless)

Este é o tipo de máquina mais utilizado em microcentrais hidroelétricas. Sua configuração básica está mostrada na figura 2.2.

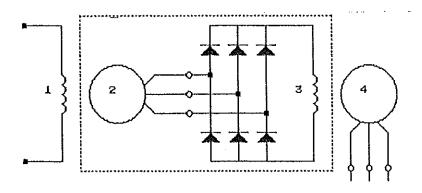


Fig. 2.2 Máquina síncrona sem escovas. 1- Campo do excitador, 2- Excitador, 3- Campo do alternador, 4- Alternador. O destaque pontilhado é a ponte retificadora.

A máquina principal, geralmente com estator de pólos salientes trifásico, possui uma excitatriz, também de pólos salientes trifásica, ligada a uma ponte retificadora trifásica. Este conjunto de componentes substitui a excitatriz de corrente contínua com comutador, usada nas máquinas síncronas clássicas.

Este tipo de máquina não possui portanto, qualquer contato de fricção com as partes girantes, resultando em fácil manutenção e operação praticamente automática.

Nestes tipos de máquinas síncronas citadas, a corrente reativa necessária para a magnetização é produzida pela excitatriz. Além disso, elas possuem reguladores de tensão, que tem a função de manter a tensão constante, independente da carga que o gerador esteja alimentando. Por tais motivos é que este tipo de máquina pode ser utilizado tanto para alimentar cargas isoladas, como para ser ligado em paralelo com o sistema de distribuição da concessionária.

2.3 - Máquinas Assíncronas

O tipo de máquina assíncrona mais utilizado para gerar energia elétrica em microcentrais hidroelétricas é o motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo.

2.3.1 - Princípio de Operação da Máquina Assíncrona [09]

Quando os enrolamentos de armadura de uma máquina de indução trifásica são ligados a um sistema de corrente alternada, cria-se um fluxo rotativo no entreferro da máquina. A velocidade desse fluxo é a velocidade síncrona, normalmente denominada Ws.

Considere-se um campo magnético girante com uma frequência angular Ws, produzido por uma corrente que circula pelos enrolamentos do estator. Se o rotor é formado por um conjunto de

enrolamentos curto-circuitados, no caso do rotor bobinado, ou se ele é formado por um conjunto de barras também curto-circuitadas, no caso do rotor tipo gaiola de esquilo, então a corrente fluirá por ele numa direção oposta ao campo que a criou.

O rotor portanto começa a girar na mesma direção, com uma frequência angular Wr, que é menor do que Ws. Este é o princípio de funcionamento do motor de indução.

A diferença entre Ws e Wr é chamada de escorregamento, que pode ser expressa pela equação:

$$s = Ws - Wr (2.1)$$

Em termos relativos, como é mais comummente conhecido,

$$s\% = \frac{(Ws - Wr) *100}{Wr}$$
 (2.2)

Conclui-se portanto que quando a máquina assíncrona funciona como motor, seu escorregamento é positivo.

Quando a máquina assíncrona funciona como gerador, ela tem seu eixo acoplado a uma outra máquina normalmente chamada de máquina primária, esta máquina produzirá um conjugado mecânico fazendo com que o eixo da máquina assíncrona gire a uma velocidade Wr, que neste caso deve ser maior do que Ws, o que acarreta um escorregamento positivo.

Ö

A partir da auto-excitação da máquina assíncrona haverá a indução de tensão, que descontadas as perdas no entreferro e nos enrolamentos do estator, fornecerá ao sistema externo a tensão gerada. O procedimento é análogo ao do funcionamento como motor, apenas de modo reverso.

A potência de saída é a diferença entre a potência de entrada no eixo da máquina e as perdas internas. Ela depende do escorregamento, conforme será visto no item 2.3.2.3.

2.3.2 - Circuito Equivalente da Máquina Assíncrona[10]

O circuito equivalente da máquina assíncrona é semelhante ao circuito do transformador convencional, adicionando-se apenas o efeito do escorregamento. Os valores aqui considerados serão tomados como valores de fase. A figura 2.3 ilustra o circuito equivalente da máquina assíncrona.

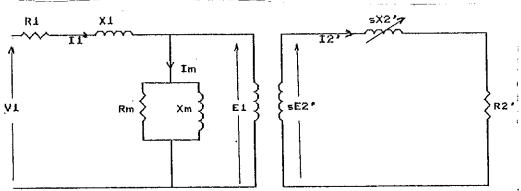


Fig. 2.3 Circuito equivalente da máquina assíncrona.

Dividindo-se os valores de E_2' , I_2' , X_2' e R_2' por s, e referindo-se estes valores do rotor para o estator resulta no circuito da figura 2.4.

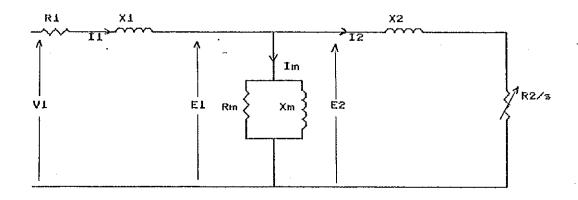


Fig. 2.4 Idem em função do escorregamento.

A partir do circuito da figura 2.4, pode-se tirar as equações da corrente, da tensão, da potência e do conjugado da máquina assíncrona. Para tanto pode-se fazer as seguintes considerações:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \tag{2.3}$$

$$Z_2s = (R_2/s) + jX_2$$
 (2.4)

$$z_m = R_m // x_m \qquad (2.5)$$

2.3.2.1 - Tensão no Estator

$$I_1 = I_m + I_2$$
 (2.6)

$$I_1 = (E_1/Z_m) + (E_1/Z_2s)$$
 (2.7)

$$V_1 = E_1 + I_1 * Z_1$$
 (2.8)

$$V_1 = E_1 + Z_1 * ((E_1/Z_m) + (E_1/Z_2s))$$
 (2.9)

$$V_1 = E_1 * (1 + (Z_1/Z_m) + (Z_1/Z_2s))$$
 (2.10)

Normalmente \mathbf{Z}_1 é bem pequeno quando comparado com \mathbf{Z}_m , embora ambos sejam indutivos e tenham ângulos da mesma ordem. É conveniente escrever-se:

$$c = 1 + (z_1/z_m) = c/\beta$$
 (2.11)

Desta forma encontra-se o valor da tensão no estator:

$$V_1 = E_1 * (c + (Z_1/Z_2s))$$
 ou (2.12)

$$V_1 = E_1 * (c + (R_1 + jX_1)/((R_2/s) + jX_2))$$
 (2.13)

2.3.2.2 - Corrente no rotor

$$I_2 = E_2 / Z_2 s$$
 (2.14)

Da figura 2.4, vê-se que $E_2 = E_1$, então:

$$I_2 = E_1 / Z_2 s$$
 (2.15)

Da equação 2.12 , tira-se que:

$$E_1 = V_1/((c + (Z_1/Z_2s)))$$
 (2.16)

Então

$$I_2 = (V_1/(Z_2s * c + (Z_1/Z_2s))) \text{ ou}$$
 (2.17)

$$I_2 = V_1 / (c * Z_2 s + Z_1)$$
 ou (2.18)

$$I_2 = V_1 / (c *((R_2/s) + jX_2) + (R_1 + jX_1))$$
 (2.19)

ou
$$I_2 = V_1 / ((R_1 + (c*R_2 \setminus s)) + j(X_1 + c*X_2))$$
 (2.20)

Os gráficos de ${\rm E}_1$ e ${\rm I}_2$ em função do escorregamento estão mostrados na figura 2.5.

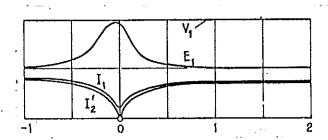


Fig. 2.5 E_1 e I_2 em função do escorregamento.

2.3.2.3 - Potência no Rotor

A potência no rotor da máquina assíncrona é dada por:

$$P_2 = \frac{(R_2)*(I_2)^2}{s}$$
 (2.21)

da equação 2.20, tira-se o módulo de I_2 , ou seja:

$$I_2 = \frac{V_1}{((R_1 + (c*R_2/s))^2 + (X_1 + c*X_2)^2)^{\frac{1}{2}}}$$
 (2.22)

então

$$P_2 = \frac{R_2}{s} \cdot \frac{{V_1}^2}{(R_1 + c*(R_2/s))^2 + (X_1 + c*X_2)^2}$$
 (2.23)

2.3.2.4 - Conjugado no Rotor

O conjugado desenvolvido pelo eixo do rotor é dado por:

$$T_r = \frac{P_2}{Ws} \tag{2.24}$$

$$T_r = \frac{R_2}{s*Ws} \cdot \frac{{V_1}^2}{(R_1+c*(R_2/s))^2+(X_1+c*X_2)^2}$$
 (2.25)

Para efeito de simplificação, como foi dito antes, \mathbf{Z}_1 é bem menor do que \mathbf{Z}_m , de tal modo que pode-se considerar c como sendo igual a 1. Desta forma a equação do conjugado fica mais simplificada, ou seja:

$$T_r = \frac{R_2}{s*Ws} \cdot \frac{{V_1}^2}{((R_1 + (R_2/s))^2 + (X_1 + X_2)^2)}$$
 (2.26)

O gráfico do conjugado x escorregamento e conjugado x velocidade é dado na figura 2.6, onde se percebe com clareza que a máquina assíncrona não desenvolve conjugado quando s=0.

Este ponto é exatamente o ponto que separa a região de escorregamento positivo (motor) da região de escorregamento

negativo (gerador), mostrando que para a máquina assíncrona funcionar como gerador, ela deve desenvolver uma velocidade superior à velocidade síncrona.

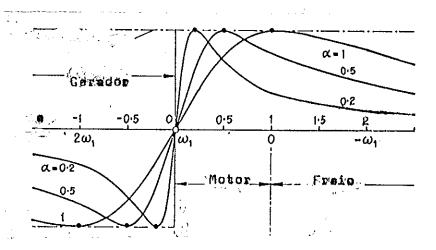


Fig. 2.6 Gráfico do conjugado x escorregamento e conjugado x velocidade da máquina assíncrona.

O valor do escorregamento s que proporciona conjugado máximo é:

$$s = \frac{\pm R_2}{(R_1^2 + (X_1 + X_2)^2)^{\frac{1}{2}}}$$
 (2.27)

O valor do conjugado máximo é portanto:

Tmax =
$$\frac{1}{2 \text{ Ws}} = \frac{{v_1}^2}{\pm R_1 + (R_1^2 + (X_1 + X_2)^2)^{\frac{1}{2}}}$$
 (2.28)

2.3.3 - O Fenômeno da Auto-excitação [11],[12],[13],[14]

Quando o gerador assíncrono alimenta uma carga isolada, como é o caso das pequenas propriedades rurais remotas, é necessário a colocação de um banco de capacitores em paralelo com os terminais da máquina, para fornecer a energia reativa para suprir as necessidades de magnetização da máquina, a chamada auto-excitação.

O fenômeno da auto-excitação pode ser explicado a partir da ilustração da figura 2.7.

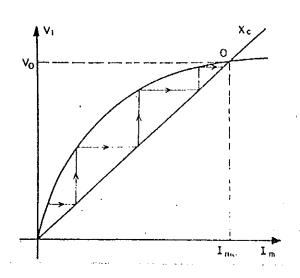


Fig. 2.7 Auto-excitação da máquina assíncrona.

Esta ilustração mostra a curva de magnetização da máquina, justaposta a uma reta, que representa a reatância capacitiva X_C . Acionando-se o eixo da máquina a uma rotação constante, com a máquina sem carga, o fluxo residual existente no material

magnético provocará a indução de uma tensão de pequena amplitude nos terminais da máquina. Esta tensão fará circular uma corrente no circuito formado pelos capacitores e pelos enrolamentos do estator da máquina, corrente esta que produzirá um fluxo de reação de armadura que se somará ao fluxo residual. O acréscimo no fluxo fará aumentar a tensão induzida, a qual por sua vez aumentará a corrente e assim por diante, num processo bastante semelhante ao do escorvamento de motores de corrente contínua em derivação. O processo continua até ser atingido o ponto de equilíbrio 0.

Para uma dada velocidade de rotação do eixo, verifica-se que só poderá haver auto-excitação se a reatância $\rm X_C=1/wC$ tiver uma interseção bem definida com a curva de magnetização. Conforme indicado na figura 2.7. Caso a reatância $\rm X_C$ coincida ou possua inclinação maior que a linha do entreferro, como é o caso da curva $\rm X_{C}$ ", a auto-excitação não poderá ocorrer. A figura 2.8 ilustra esta situação.

Variando-se a velocidade de rotação, varia-se a frequência da tensão gerada e consequentemente, o ponto de operação da figura 2.8.

Caso a máquina esteja há muito tempo sem funcionar, provavelmente ela não terá fluxo residual, será então necessário a aplicação de um pulso nos seus terminais para que o fluxo seja restabelecido.

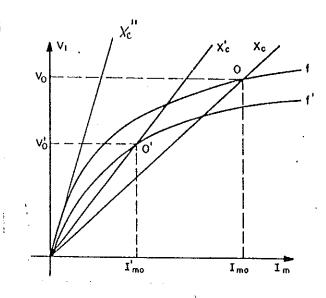


Fig. 2.8 Variação do ponto de operação com a variação da velocidade da máquina.

2.3.4 - Circuito Equivalente de um sistema isolado alimentado por uma máquina assíncrona [15].

Conforme já foi aqui citado, se o sistema a ser alimentado pela máquina assíncrona for isolado, há necessidade de se instalar bancos de capacitores nos terminais da mesma. Estes capacitores além de proporcionar a auto-excitação da máquina, fazem também o suprimento de reativos para ela e para a carga a ser alimentada. No caso aqui mostrado, como a carga do usuário é resistiva, os capacitores serão utilizados apenas para as necessidades de reativos da máquina.

Se o gerador assíncrono estiver conectado à rede de distribuição da concessionária, o banco de capacitores pode ser

dispensado, de uma feita que o sistema de distribuição tem condições de suprir as necessidades de reativos da máquina e do consumidor.

A configuração do sistema isolado é mostrada na figura 2.9, para o caso de uma carga resistiva.

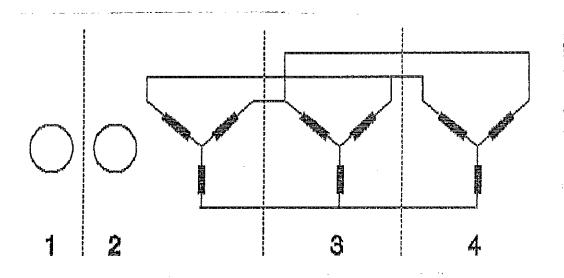


Fig. 2.9 Sistema isolado alimentando carga resistiva.

1- Turbina, 2- Gerador, 3- Banco de capacitores, 4- Carga resistiva.

O circuito equivalente por fase da configuração apresentada pode ser visto na figura 2.10.

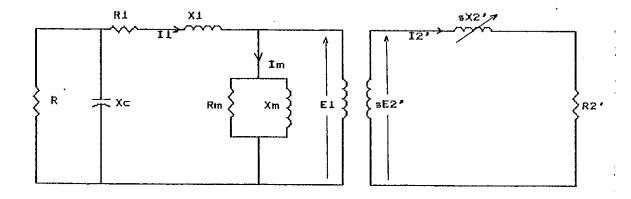


Fig. 2.10 Circuito equivalente por fase da fig.2.9.

2.3.5 - Comparação entre a máquina síncrona e a máquina assíncrona[16].

As características essenciais de comparação entre os dois tipos de geradores são:

- Peformance da operação, se isolada ou em paralelo com a rede de distribuição;
 - Custo de aquisição e de manutenção;
 - Compensação de Potência reativa;
 - Excitação;
 - Sincronização;
 - Controle de Tensão;

O gerador assíncrono do tipo gaiola de esquilo é uma máquina robusta, de baixo custo, que requer um mínimo de manutenção, devido principalmente à sua construção e pelo fato de não exigir excitação e nem controle de tensão, se estiver

conectado à rede de distribuição da concessionária. Neste caso ela obtém a corrente reativa necessária à sua magnetização, do próprio sistema de distribuição. No caso de operação isolada, ela obtém a corrente de excitação de um banco de capacitores a ela conectado.

As máquinas assíncronas podem ser construídas para potências de até 6MW por pólo.

Em muitos casos contudo, este limite não é atingido devido a limitações mecânicas.

O gerador assíncrono é acionado sem carga, não exigindo equipamento específico de sincronização. A corrente de partida é independente da velocidade e é aproximadamente igual à corrente de curto-circuito. Em casos de surtos, a corrente é rapidamente dissipada e logo volta ao seu valor nominal.

A máquina assíncrona deve ser usada preferencialmente com carga constante, de uma feita que o seu fator de potência decresce significativamente com o decréscimo da carga.

O gerador síncrono sem escovas é o tipo de máquina síncrona que mais se aproxima da máquina assíncrona em termos de facilidade de manutenção, por isto ela atualmente é o tipo mais utilizado em mínis e microcentrais.

Como a máquina síncrona obtém a corrente reativa necessária à sua magnetização da sua própria excitatriz, este tipo de máquina pode ser utilizado indiferentemente em sistemas isolados ou interligados à rede da concessionária.

A máquina síncrona não possui limitações mecânicas construtivas como a assíncrona, podendo portanto fornecer

potência por polo bem maior do que aquele tipo de máquina.

Uma das vantagens da máquina síncrona é que ela pode funcionar convenientemente com cargas variáveis, ao contrário da máquina assíncrona.

Uma desvantagem da máquina síncrona sem escovas em comparação com a máquina assíncrona de mesmo porte, é o seu preço de aquisição, que devido ao sistema de excitação e ao regulador de tensão, é bem mais elevado.

CAPÍTULO 3 - CONTROLE DE VELOCIDADE DAS MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS

3.1 Introdução:

O mecanismo de controle de velocidade é um dos principais entraves no controle e na operação de microcentrais. Além de elevar o custo da instalação, a maioria dos mecanismos de controle de velocidade exigem peças mecânicas que serão tanto mais sofisticadas quanto melhor for o desempenho exigido no controle da frequência. Em geral, esta exigência esbarra na disponibilidade comercial, notadamente em lugares ermos e de poucos recursos sócio-econômicos, que é o caso dos locais aonde as microcentrais normalmente são instaladas.

Este capítulo faz um levantamento dos diversos tipos de reguladores de velocidade utilizados nas mínis e microcentrais hidroelétricas, e faz uma descrição do tipo de regulador que o convênio IPT/CPFL projetou para seu projeto piloto.

3.2 - Princípio de Operação dos Reguladores de Velocidade [17]

O controle de velocidade nas centrais hidroelétricas que alimentam cargas isoladas pode ser baseado de modo simplificado pela equação mecânica abaixo:

$$J \frac{dW}{dt} = T_{\text{mec}} - T_{C}$$
 (3.1)

Da equação 3.1, constata-se que para se manter a velocidade constante, quando da variação da carga (variação de $T_{\rm C}$), é necessário que o conjugado motor também varie. A variação no conjugado mecânico é conseguida através da variação da vazão da água que flui para a turbina, que possui pás e distribuidor móveis.

Para o caso das microcentrais hidroelétricas, o que vem sendo feito ultimamente é o controle da velocidade através da variação de uma carga específica chamada de carga de controle. Para um melhor entendimento do que ocorre, é necessário reescrever a equação 3.1, desdobrando-se o momento de carga $T_{\rm C}$ em duas parcelas, ou seja:

$$J \frac{dW}{dt} = T_{\text{mec}} - (T_{\text{CC}} + T_{\text{CU}})$$
 (3.2)

Ao contrário da sistemática adotada nas centrais convencionais, aqui T_{mec} é mantido constante, com a turbina tendo pás e distribuidor fixos, e supõe-se que a vazão e a queda da água são mantidas constantes.

Para se manter a velocidade constante com a variação da carga do usuário (variação de $T_{\rm cu}$), varia-se $T_{\rm cc}$ na mesma proporção, mantendo-se desta forma constante a frequência do sistema.

3.3 -Tipos de Reguladores de Velocidade utilizados em microcentrais hidroelétricas

O sistema de regulação de velocidade tem por finalidade manter a rotação e portanto a frequência da unidade geradora dentro dos limites considerados aceitáveis em função da variação da demanda da rede elétrica. Estes valores são normalmente os seguintes: ± 5% para a tensão, ± 2% para a frequência e fator de potência maior do que 80%. A maioria dos países que possuem microcentrais em funcionamento, adotam limites menos rígidos, dependendo evidentemente do tipo de carga que esteja sendo alimentada pelo gerador. Como geralmente o tipo de equipamento alimentado por estas unidades são de utilização no meio rural, estas cargas geralmente suportam variações de tensão e de frequência, sem prejuízo do seu desempenho.

Até recentemente, a maioria dos reguladores automáticos de velocidade empregados nas microcentrais eram do tipo eletromecânico. A figura 3.1 mostra um modelo de regulador eletromecânico que é constituído por um servomecanismo acionado por óleo pressurizado comandado por um pêndulo centrífugo. Este pêndulo detecta qualquer variação de velocidade do sistema, causada por variação de carga na rede, pondo em funcionamento o servomecanismo de acionamento do distribuidor da turbina. Este, regula o fluxo da água através da turbina, controlando deste modo, a variação da potência da mesma, de acordo com a variação da carga da unidade geradora.

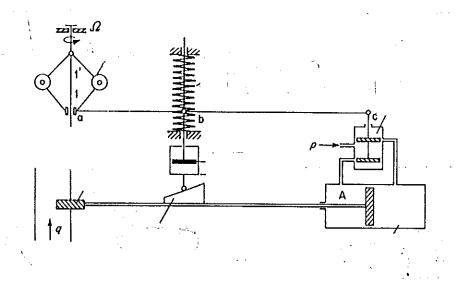


Fig. 3.1 Regulador de velocidade eletromecânico.

Com o barateamento e com a facilidade de utilização dos componentes semicondutores, o regulador discutido anteriormente está sendo substituído nas mínis e microcentrais hidroelétricas pelo chamado regulador eletrônico de velocidade.

A utilização dessa técnica de regulação possibilita substanciais reduções de custos, dos quais serão citadas três:

A primeira dessas vantagens é a redução nos custos de obras de engenharia civil, que normalmente consomem de um terço a um meio do investimento total da obra, devido a exigência de reservatórios para acumulação de água. Este tipo de regulador é apropriado para sistemas que dispensam o reservatório para acumulação de água. A segunda vantagem é que o tradicional regulador de velocidade pode ser eliminado, acarretando uma substancial redução de custos. Finalmente, a terceira vantagem diz respeito à simplicidade do tipo de turbina que pode ser

utilizado. Desde que o controle de velocidade não será feito pelo controle da vazão, o projeto da turbina fica bastante acessível pois não haverá necessidade da utilização de pás e de distribuidor móveis. Como a vazão neste tipo de regulador não é controlada, o recomendável é que a microcentral trabalhe com uma vazão fixa ou praticamente fixa.

Dentro da filosofia de se construir este regulador eletrônico, Woodward [18], destaca três técnicas que são utilizadas, baseadas em dois problemas básicos: - o primeiro é como as cargas de controle podem variar com a variação da carga do usuário e o segundo é saber qual o valor apropriado dessas resistências de controle.

Olhando o primeiro dos problemas, o da variação da carga de controle, a técnica ideal seria a variação de modo contínuo da resistência de controle com a variação da carga do consumidor. Um sistema desse tipo pode ser construído usando-se um servomecanismo para variar um grande reostato mecanicamente. Na prática este método teria uma excelente peformance em regime permanente, mas seria lento, teria um tempo de resposta longo, seria caro e poderia ter uma confiabilidade discutível se não fosse permanentemente submetido a manutenções.

A segunda técnica que poderia ser utilizada seria um sistema sem partes móveis, como o anterior. Trata-se do controle das cargas através de um sistema tiristorizado que alimenta um resistor de valor fixo, controlando a defasagem entre tensão e corrente, conforme mostra a figura 3.2.

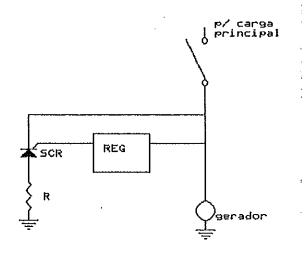


Fig. 3.2 Regulador eletrônico com resistor fixo.

Este tipo de sistema é feito de modo contínuo e tem um tempo de resposta rápido, usa um pequeno número de componentes, consequentemente é de baixo custo. Contudo, este controle através da defasagem da tensão, injeta correntes harmônicas no sistema, provocando distorções na forma de onda da tensão de saída, especialmente nestes casos, onde um percentual significativo da potência total do gerador pode ser atribuído à carga de controle. Este método, por causa dessas limitações, também é pouco utilizado.

Além dos dois métodos anteriormente citados, o que atualmente encontra maior receptividade é o chamado controle de frequência por comutação de cargas [19]. Embora ele se enquadre no segundo tipo de problema levantado, que é o do valor apropriado da resistência que será utilizada como carga de controle. Este método utiliza a passagem da tensão por zero, para

haver o chaveamento e produz pequena distorção harmônica e insignificante geração de rádio interferência, no entanto, variação da carga de controle não é feita de modo contínuo, mas discreto. Este regulador é composto por um conjunto de resistências elétricas que podem comutar de modo següencial, conforme mostra а figura 3.3 ou então comutar de modo combinacional, conforme mostra a figura 3.4.

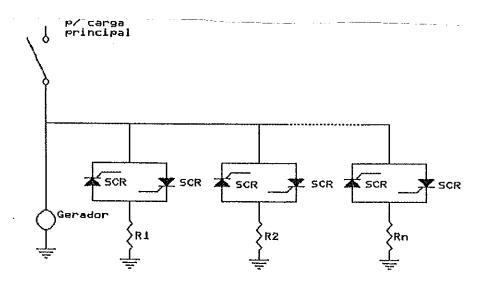


Fig. 3.3 Regulador eletrônico com carga sequencial.

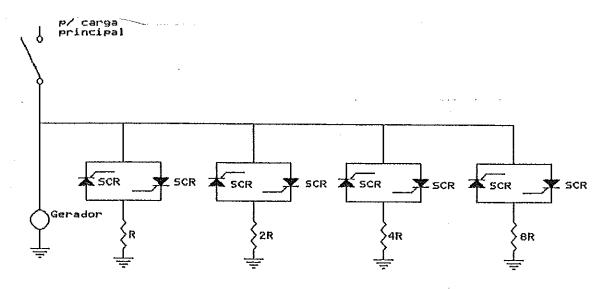


Fig. 3.4 Regulador eletrônico com carga combinacional.

Nos dois casos a potência das cargas de controle geralmente tem o mesmo valor da potência nominal do gerador elétrico. A carga que este gerador alimenta é portanto composta pelas cargas de controle e pelas cargas do usuário, de tal forma que o sistema trabalha sempre em plena carga.

Dependendo da variação da carga do usuário, haverá a comutação das cargas de controle, de tal modo que o gerador mantém sempre o suprimento da potência nominal.

3.4 - Descrição do sistema de regulação de velocidade utilizado na microcentral do convênio IPT/CPFL [19].

A microcentral utilizada no presente estudo pertence ao convênio IPT/CPFL, e está localizada na usina de Salto, propriedade da CPFL, no município de Joaquim Egídio, São Paulo, tendo a seguinte composição:

3.4.1 - <u>Turbina Tubular</u> - Esta turbina foi projetada e construída pelo IPT, com capacidade de 20kW, vazão de funcionamento entre 0,15m³/s e 0,63m³/s, alturas efetivas de funcionamento entre 01m e 20m, rotação nominal de 900rpm, eixo vertical. A transmissão entre turbina e gerador é feita através de correias. A figura 3.5 mostra o desenho da turbina projetada.

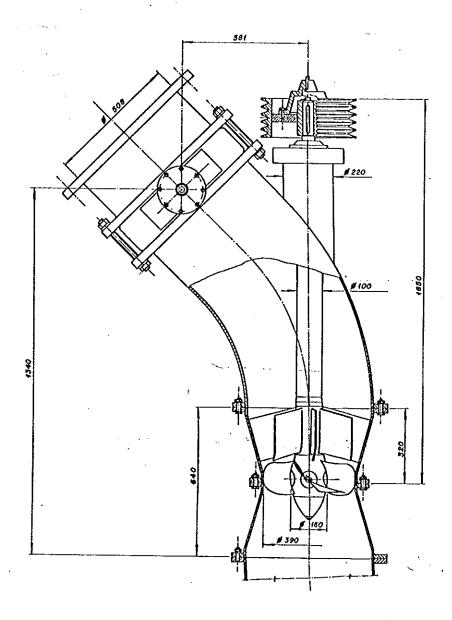


Fig. 3.5 Turbina tubular utilizada no projeto IPT/CPFL.

3.4.2 - Gerador Elétrico - O gerador utilizado é do tipo síncrono sem escovas, 4 pólos, com potência de 22kVA, para ligar cargas de até 18kW, para evitar eventuais problemas de aquecimento, de uma feita que o mesmo trabalha sempre a plena carga. A tensão gerada trifásica é de 380V e a monofásica de 220V.

3.4.3 - Regulador Eletrônico de Velocidade - Este regulador baseia-se no princípio de que para manter-se a velocidade constante em um gerador de energia elétrica é necessário que a potência elétrica fornecida por ele seja praticamente igual à potência mecânica externa fornecida a ele. Como a potência mecânica fornecida ao gerador pode ser variável e não controlada e a potência elétrica consumida pelas cargas externas, também pode ser variável e não controlada, torna-se necessária a colocação de cargas de controle em paralelo com as cargas externas.

A colocação das cargas de controle é feita de tal forma que a potência consumida pelas mesmas, somada à potência consumida pelas cargas externas em cada instante seja praticamente igual à potência mecânica fornecida ao gerador no mesmo instante, conservando assim, a velocidade do gerador constante. O comando das cargas de controle é efetuado pelo circuito de controle eletrônico de velocidade que através da informação de velocidade do gerador e da corrente elétrica fornecida às cargas externas, insere ou retira as cargas de controle de forma combinacional.

As cargas de controle comandáveis pelo circuito de controle eletrônico de velocidade são caracterizadas por possuírem as potências:

Carga 1 : $P_1 = 2^0 P$

Carga 2 : $P_2 = 2^1 P$

Carga 3 : $P_3 = 2^2 P$

Carga 4: $P_A = 2^3 P$

Carga nc : $P_n = 2^{nc-1}P$

onde P é a potência mínima dada pela equação:

$$P = \frac{Pt}{2^{nc}-1} \tag{3.3}$$

O número de combinações C das cargas de controle é:

$$C = 2^{nC} \tag{3.4}$$

Especificamente, no caso do regulador do IPT, nc = 4 significando que:

Carga 1 : $P_1 = 1P$

Carga 2 : $P_2 = 2P$

Carga 3 : $P_3 = 4P$

Carga 4: $P_4 = 8P$

A soma das quatro cargas, 15P deve ser igual portanto, à potência nominal do gerador.

Além da função de manter a velocidade constante, o circuito de controle eletrônico de velocidade possui duas funções de proteção:

- A primeira função de proteção é de só dar condições do regulador de tensão atuar quando a velocidade do gerador atingir 85% da velocidade nominal, para proteger o próprio regulador de tensão, bem como, os enrolamentos do gerador contra sobrecorrentes;
- A segunda função de proteção que o circuito de controle eletrônico de velocidade possui, é a de desativar a fonte

responsável pelo fornecimento da potência mecânica ao gerador, parando o sistema antes da ocorrência de uma sobrevelocidade.

Este sistema de regulação escolhido utiliza o comando de cargas de controle de forma combinacional, pois este processo requer poucas cargas de controle, poucos dispositivos de chaveamento e um número considerável de possíveis combinações.

Este sistema supervisiona a velocidade do gerador através de um sensor de velocidade instalado junto ao eixo do gerador, o que dá a possibilidade de utilização de geradores de corrente contínua ou corrente alternada do tipo síncrono indistintamente.

No caso do gerador de corrente alternada do tipo síncrono, pode-se supervisionar a velocidade indiretamente, através de um sensor de frequência na saída do gerador.

Além do monitoramento de velocidade, este sistema possui também um sensor de corrente que detecta as variações das cargas externas. Sendo assim, quando a corrente fornecida às cargas externas aumenta ou diminui bruscamente, o sensor de corrente transmite esta informação prontamente ao circuito de controle eletrônico de velocidade. Com isto, mesmo antes da velocidade do gerador variar, o circuito de controle eletrônico de velocidade já inicia o comando buscando o ajuste das cargas de controle, para a nova condição das cargas externas a fim de que a velocidade do gerador não sofra grandes variações. Por causa deste sensor de corrente, este regulador de velocidade possui um tempo de resposta mais rápido às variações das cargas externas do que se supervisionasse apenas a velocidade do gerador.

A descrição do funcionamento do regulador de velocidade aqui utilizado é feita com mais facilidade com a ajuda das figuras 3.6, e 3.7.

Iniciando-se pela figura 3.6, tem-se:

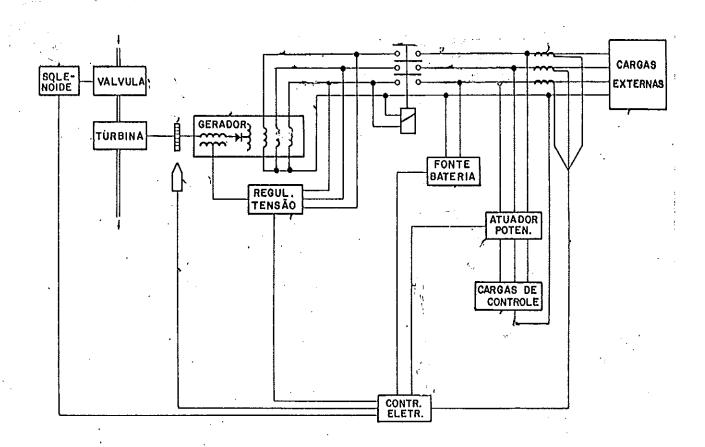


Fig. 3.6 Diagrama de blocos básico do sistema de geração.

Abrindo-se manualmente a válvula borboleta até o ponto em que a mesma fique travada pelo solenóide, a água tem acesso à turbina. Em conseqüência da passagem da água, a turbina começa a acelerar. Como o eixo da turbina está acoplado através de

correias ao gerador, este também adquire velocidade. No mesmo eixo do gerador está instalada uma roda dentada confeccionada com ferromagnético, que juntamente de material com sensor velocidade transmite a informação desta para o circuito de controle eletrônico. Quando a velocidade angular do gerador atinge aproximadamente 85% da nominal, o circuito de controle eletrônico liga o regulador de tensão. Este só é ligado a partir deste valor, para proteger a si próprio assim como a excitatriz e o campo do gerador contra sobrecorrentes. Estando ligado o regulador de tensão, este excita o gerador, aparecendo nos seus terminais, a tensão gerada. Não havendo cargas externas ligadas, a velocidade no conjunto turbina-gerador continua aumentando, tendendo assim a ultrapassar o valor nominal. O circuito de controle eletrônico de velocidade detecta a sobrevelocidade através dos condutores que transmitem a informação de velocidade captada no sensor magnético, acionando o atuador de potência que insere as cargas trifásicas de controle necessárias no circuito principal, a fim de que a velocidade e consequentemente a frequência de saída do gerador retornem aos valores nominais, estabilizando-se assim o sistema. O atuador de potência chaves eletromagnéticas trifásicas composto de quatro responsáveis pela conexão das quatro cargas trifásicas de controle ao circuito principal. A combinação das quatro cargas trifásicas de controle dão a possibilidade de se consumir desde a potência mínima P até a potência total 15P em degraus de potência P como pode-se verificar na tabela 3.1

Nível lógic Combi nação	acionam. da carga	acionam. da carga 4P	acionam. da carga 2P	acionam. da carga P	Pot. cons. na carga
			,		de contr
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	Р
2	0	0	1	0	2P
3	0	0	1.	1	3P
4	0	1	0	0	4P
5	0	1	0	1	5P
6	0	1	1	0	6P
7	0	1.	1	1	7P
8	1	0	0	0	8P
9	1	0	0	1	9P
10	1	0	1	0	10P
11	1	0	1	1	11P
12	1	1.	0	0	12P
13	· 1	1	0	1	13P
14	1.	1	1	0	14P
15	1	1	1	1-	15P

Tabela 3.1 Combinações possíveis de cargas de controle

Cada uma das quatro chaves eletromagnéticas trifásicas do atuador de potência é acionada independentemente por sinais de

controle binário fornecidos pelo circuito de controle eletrônico de velocidade. Quando o usuário conecta cargas externas, o gerador diminui sua velocidade lentamente em virtude da inércia Por outro lado, os transformadores de mecânica do sistema. corrente detectam instantaneamente a nova condição de corrente, transmitindo esta informação para o controle eletrônico de velocidade, que comanda rapidamente uma diminuição das cargas trifásicas de controle através do atuador de potência. Esta cargas trifásicas de controle inicial das diminuição aproximadamente proporcional à intensidade de corrente consumida pelas cargas externas e serve para diminuir o tempo de resposta do sistema. Como o ajuste das cargas de controle efetuado através da informação da corrente consumida pelas carqas externas é aproximado, o ajuste final é feito pela informação de velocidade transmitida pelo sensor magnético e consequentemente a velocidade do gerador retorna ao seu valor nominal e a frequência na saída do gerador estabiliza-se também no seu valor nominal. Quando o usuário diminui as cargas externas, o gerador aumenta a sua rotação lentamente. O controle eletrônico comanda o atuador de potência que insere cargas de controle, fazendo com que a velocidade e consequentemente a frequência retornem aos seus valores nominais. Quando a velocidade do gerador ultrapassar o máximo valor admissível, o circuito de controle eletrônico de velocidade comanda o fechamento da válvula borboleta através do solenóide, interrompendo o fluxo de água na turbina, protegendo sobrevelocidades assim sistema contra prejudiciais. alimentação do circuito de controle eletrônico é feita através de bateria e fonte. A bateria alimenta o circuito de controle eletrônico no início da operação do sistema, nas eventuais manutenções e na falta de geração de energia elétrica provocada por um defeito no circuito de excitação. A fonte alimenta o circuito de controle eletrônico quando o sistema está em operação normal.

Com referência à figura 3.7, tem-se:

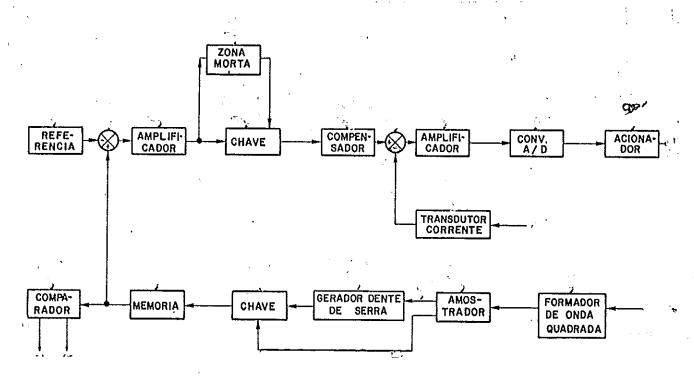


Fig. 3.7 Diagrama de blocos do circuito de controle eletrônico.

O formador de onda quadrada tem a função de receber o sinal de frequência aproximadamente senoidal proveniente do sensor magnético que é proporcional à velocidade do gerador e transformá-lo em um sinal de onda quadrada de mesma frequência do sinal recebido e transmití-lo para o amostrador. Este é formado

por dois temporizadores mono-estáveis que fornecem um pulso de largura constante a cada ciclo da onda quadrada de entrada, sendo que um deles inicia-se no instante da descida do outro pulso. Uma · dessas saídas vai para o gerador de dente de serra e a outra vai para a chave analógica. O gerador dente de serra é formado por um integrador, gerando um sinal dente de inclinação constante e período igual ao do sinal proveniente da saída do amostrador. A chave analógica transmite para a memória o máximo nível de tensão atingido pelo dente de serra em cada período deste. Uma das saídas do amostrador é r**ésp**onsável pelo controle dessa transmissão feita pela chave analógica. A memória armazena o nível de tensão transmitido pela chave analógica até que se forneça um novo nível de tensão no período sequinte. O conjunto formado pelo amostrador, gerador de dente de serra, chave analógica e memória tem a função de um conversor de frequência-tensão, onde o nível de tensão na saída é inversamente proporcional à velocidade do gerador. Este nível de tensão na saída do conversor frequência-tensão é fornecido aos comparadores e ao somador. Os comparadores tem a função de ligar o regulador de tensão, quando a velocidade do gerador atingir 85% de sua velocidade nominal e também de atuar o solenóide quando a velocidade do gerador ultrapassar o limite máximo de segurança. A de referência fornece um nível de tensão fixo que representa a referência de velocidade nominal em que o gerador deve funcionar. 0 somador tem a função de fornecer amplificador, um sinal de erro proporcional à diferença entre os sinais provenientes da tensão de referência e da memória. O

circuito de zona morta inibe a chave analógica quando o sinal de erro estiver abaixo de um valor pré-estabelecido. A função do circuito de zona morta é de eliminar instabilidades no sistema. A chave analógica transmite o sinal de erro para o compensador. Este tem como função principal, transmitir para o somador um sinal que é integral do sinal de erro entre a velocidade do gerador e a referência de velocidade. Com isto, independentemente da característica potência x velocidade da turbina, o controle eletrônico procura a condição de equilíbrio a fim de que a velocidade do gerador se iguale à referência de velocidade ajustada. O transdutor de corrente recebe dos transformadores de corrente a informação da corrente fornecida às cargas externas, convertendo esta informação em um sinal de tensão contínua proporcional. O somador tem a função de fornecer ao amplificador um novo sinal de erro proporcional à diferença entre os dois sinais provenientes do transdutor de corrente e do compensador. A amplificação desse sinal de erro fornecido pelo somador efetuada pelo amplificador. O sinal amplificado é enviado ao conversor analógico digital. Este é composto de uma rede de divisores resistivos, comparadores e circuitos combinatórios de portas lógicas. Este conversor transforma o nível de tensão analógico da sua entrada em quatro saídas binárias paralelas. O acionador é composto de quatro amplificadores de potência e relés que recebem os quatro sinais binários paralelos do conversor analógico digital, amplificando-os e comandando o atuador de potência.

3.4.4 - Cargas de Controle

O banco das cargas de controle é composto de 45 resistores de 120 ohms, 400 watts, ligados em estrela, com a seguinte distribuição:

Carga 1 - Um resistor de 120 ohms por fase, totalizando uma potência de 1,2kW.

Carga 2 - Dois resistores de 120 ohms em paralelo por fase, totalizando 2,4kW.

Carga 3 - Quatro resistores de 120 ohms em paralelo por fase, totalizando 4,8kW.

Carga 4 - Oito resistores de 120 ohms em paralelo por fase, totalizando 9,6kW.

A figura 3.8 mostra o banco de resistores utilizado como carga de controle.

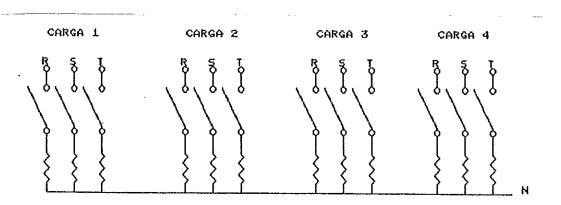


Fig. 3.8 Diagrama de ligação da carga de controle.

CAPÍTULO 4 - MODELAMENTO MATEMÁTICO E IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA DA MICROCENTRAL HIDROELÉTRICA

4.1 Introdução:

Este capítulo apresenta a modelagem de uma usina hidroelétrica convencional que alimenta uma carga isolada, e a partir desta modelagem, através de um conjunto de simplificações, chega-se ao modelo proposto por Woodward [21], para uma microcentral hidroelétrica.

Para se chegar ao diagrama de blocos completo do sistema estudado, será visto os modelos do gerador síncrono, do conduto forçado, da turbina hidráulica e da carga que o sistema alimenta. Depois destas etapas apresenta-se as simplificações para se chegar ao modelo utilizado por [21].

A identificação do sistema estudado será feita na segunda parte desse capítulo, considerando-se as características do sistema real. De posse desta identificação, é calculado um controlador PID para o sistema.

- 4.2 Modelo Matemático de uma Central Hidroelétrica Convencional.
- 4.2.1 Modelo do Gerador Síncrono [22].

Um gerador que tem seu eixo acoplado a uma turbina hidráulica pode ser representado pela figura 4.1, onde pode-se

ver que há dois conjugados agindo em sentidos opostos: T_{mec} designa o conjugado mecânico, que acelera o sistema do repouso à velocidade de regime e T_{el} é o conjugado elétrico, produzido pelas cargas elétricas. É o chamado conjugado de desaceleração do sistema. Quando estes dois conjugados são iguais em magnitude, a velocidade angular do sistema é constante. Se a carga elétrica estiver crescendo, o conjugado elétrico também crescerá. Caso este atinja um valor superior ao conjugado mecânico, a velocidade será reduzida. Como esta redução de velocidade pode causar danos ao sistema, é necessário fazer com que T_{mec} cresça novamente, restaurando assim o equilíbrio anterior.

Tendo como base a figura 4.1 e a partir das equações da dinâmica dos sólidos, pode ser estabelecido o modelo dinâmico do sistema.

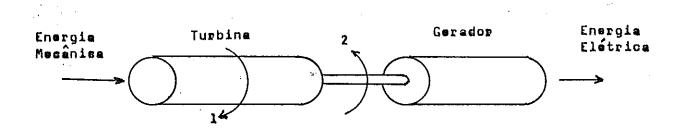


Fig.4.1 Conjunto turbina-gerador utilizado para simular o modelo matemático. 1- Torque mecânico, 2- Torque elétrico.

Seja

$$J\alpha = T_{1} \tag{4.1}$$

$$M = WJ \qquad (4.2)$$

$$P_1 = wT_1 = w(J\alpha) = M\alpha \qquad (4.3)$$

Supondo que a máquina tem uma velocidade angular de regime Wo e um ângulo de fase δ_0 , e que haja pequenas variações em torno dessas grandezas de regime que serão denominadasrianglew eriangle\delta , podese dizer que este último é equacionado da seguinte forma:

$$\triangle \delta = \int wdt - \int w_0 dt \qquad (4.4)$$

fazendo-se

$$W = W_O + \alpha t \tag{4.5}$$

então

$$\triangle \delta = \int (w_0 + \alpha t) dt - \int w_0 dt \qquad (4.6)$$

$$\triangle \delta = \frac{w_0 t + 1 \alpha t^2 - w_0 t}{2}$$

$$\triangle \delta = \frac{1}{2} \alpha t^2$$
(4.7)

$$\triangle \delta = \frac{1}{2} \alpha t^2 \tag{4.8}$$

A variação da velocidade extstyle extstyleentão ser estabelecida:

$$\triangle w = \alpha t = \underline{d}(\triangle \delta)$$
 (4.9)

A equação 4.1 pode agora ser escrita como:

$$T_1 = \frac{J_{dt}(\triangle w)}{dt} = \frac{J_{dt}^2(\Delta \delta)}{dt^2}$$
 (4.10)

A potência líquida de aceleração pode ser escrita como:

$$P_1 = P_{\text{mec}} - P_{\text{el}} \tag{4.11}$$

que é escrita como a soma entre a potência líquida de regime e a variação dela em torno deste ponto de regime, podendo ser escrita como:

$$P_1 = P_{10} + P_1 (4.11)$$

onde
$$P_{10} = P_{mec0} - P_{e10}$$
 (4.12)

$$e \qquad \triangle P_1 = \triangle P_{\text{mec}} - \triangle P_{\text{el0}}$$
 (4.13)

então

$$P_1 = (P_{mec0} - P_{e10}) + (\Delta P_{mec} - \triangle P_{e1})$$
 (4.14)

o mesmo equacionamento pode ser feito para os torques, resultando em:

$$T_1 = (T_{mec0} - T_{e10}) + (\triangle T_{mec} - \triangle T_{e1})$$
 (4.15)

Associando-se as equações 4.3 e 4.11 com a equação 4.15, o resultado será:

$$(P_{\text{mec0}} - P_{\text{el0}}) + (\Delta P_{\text{mec}} - \triangle P_{\text{el}}) =$$

$$(w_{\text{o}} + \triangle w) [(T_{\text{mec0}} - T_{\text{el0}}) + (\Delta T_{\text{mec}} - \triangle T_{\text{el}})] \qquad (4.16)$$

desprezando-se os termos de segunda ordem e supondo que

$$P_{\text{mec0}} = P_{\text{el0}} \tag{4.17}$$

e que

$$T_{\text{mec0}} = T_{\text{el0}} \tag{4.18}$$

então

$$\triangle P_{\text{mec}} - \triangle P_{\text{el}} = w_{\text{o}} (\triangle T_{\text{mec}} - \triangle T_{\text{el}})$$
 (4.19)

associando-se as equações 4.15 e 4.3 com a equação 4.19, o resultado será:

$$(T_{\text{mec0}} - T_{\text{el0}}) + (\Delta T_{\text{mec}} - \triangle T_{\text{el}}) = \frac{J_{\text{d}}}{dt}(\Delta w)$$
(4.20)

como

$$T_{mec0} = T_{el0}$$

então

$$(\Delta T_{\text{mec}} - \Delta T_{\text{el}}) = \int \frac{d}{dt} (\Delta W)$$
 (4.21)

finalmente, substituindo-se (4.21) na equação (4.19) o resultado é:

$$\triangle P_{\text{mec}} - \triangle P_{\text{el}} = {}^{W_0 J} \frac{d}{dt} (\triangle W)$$
 (4.22)

ou
$$\triangle P_{\text{mec}} - \triangle P_{\text{el}} = M \frac{d (\triangle W)}{dt}$$
 (4.23)

fazendo-se a transformação de Laplace na equação (4.23), resulta:

$$\triangle P_{\text{mec}} - \triangle P_{\text{el}} = Mp (\Delta w)$$
 (4.24) cujo diagrama de blocos é representado pela figura 4.2

oujo dragrama de proces o representado pera rigara 112

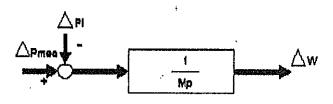


Fig. 4.2 Diagrama de blocos do gerador síncrono.

4.2.2 - Modelo Matemático do Conduto Forçado [23].

Quando o conduto forçado é curto e os efeitos de ondas não estacionárias não são importantes, é suficiente analisar a coluna de água no conduto forçado, somente na base da inércia da água, desprezando-se a elasticidade da tubulação e as perdas por fricção da água com a parede interna da tubulação.

Portanto a partir da figura 4.3, pode-se deduzir a função de transferência da tubulação de adução da água.

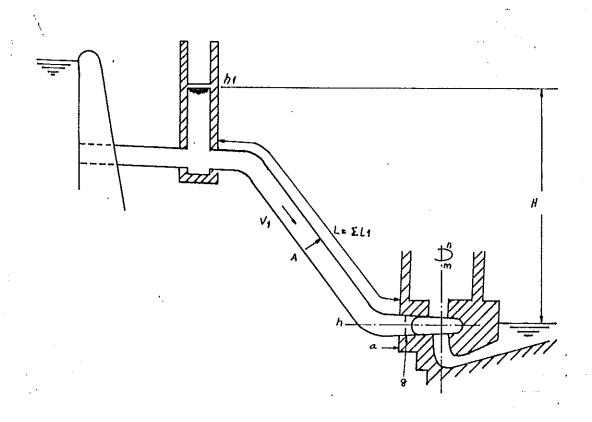


Fig. 4.3 Tubulação de adução da água.

Pode-se dizer que a massa de água no conduto forçado é dada por TAL e que a equação do movimento é:

$$\tau AL \frac{du}{dt} = -A\Delta p \tag{4.25}$$

como

$$q = Au \tag{4.26}$$

considerando-se a área da tubulação como sendo uniforme, então pode-se escrever:

$$\frac{dq}{dt} = A \frac{du}{dt}$$
 (4.27)

consequentemente

$$\tau L \frac{dq}{dt} = -A\Delta p$$
 (4.28)

mas como

$$\triangle p = \tau g \Delta h \tag{4.29}$$

então

$$\tau L \frac{dq}{dt} = -A\tau g \Delta h \tag{4.30}$$

ou

4

$$\frac{L}{Ag} \frac{dq}{dt} = -h \tag{4.31}$$

Convertendo-se a equação (4.31) para a forma em p.u., pela divisão por $Q_{\rm O}$ e $H_{\rm O}$, obtém-se:

$$T_{W} \frac{dq}{dt} = -h \tag{4.32}$$

Fazendo-se a transformada de Laplace da equação 4.32, o resultado é:

$$\frac{h}{\alpha} = -T_W p \tag{4.33}$$

4.2.3 - Modelo da Turbina Hidráulica [24]

A turbina hidráulica, geralmente é simulada por duas equações que representam a sua performance, linearizada em torno de pequenas variações da condição de regime permanente. Estas duas equações são:

$$q = \frac{dQ}{dH} \frac{h + dQ}{dN} \frac{n + dQ}{dG} g_n$$
 (4.34)

ou

$$q = a_{11}h + a_{12}n + a_{13}g_n$$
 (4.35)

$$T = \frac{\partial T}{\partial H} h_{+} \frac{\partial T}{\partial N} n_{+} \frac{\partial T}{\partial G} g_{n}$$
 (4.36)

ou

$$T = a_{21}h + a_{22}n + a_{23}g_n$$
 (4.37)

4.2.4 - Modelo da Carga Isolada ligada ao Gerador Síncrono

As cargas de um modo geral em um sistema de potência consistem em uma variedade de equipamentos elétricos. Alguns são puramente resistivos, independentes portanto da variação da frequência industrial. Outros no entanto, como os motores elétricos que são maioria na composição das cargas, tem características indutivas, portanto dependentes da variação da frequência. Por isto é necessário se fazer o modelamento das cargas levando-se em consideração a variação da frequência, ou seja o efeito que a variação da frequência provoca na variação da carga alimentada pelo gerador. A relação entre a variação da carga devido à variação da frequência é dada por:

$$\triangle P_{1}(freq) = D\Delta w \tag{4.38}$$

ou

$$D = \frac{P_1(freq)}{\Delta w} \tag{4.39}$$

onde D é expresso como sendo a relação entre o percentual de variação da carga dividido pelo percentual de variação da frequência. Por exemplo se a variação da carga for de 1,5% para 1,0% de variação da frequência, então o valor de D será igual a 1,5.

Para cargas puramente resistivas, o valor de D é zero.

Ao diagrama de blocos da máquina síncrona mostrado na figura 4.2 pode-se acrescentar o modelo da carga, resultando no diagrama de blocos mostrado na figura 4.4. Para tal basta dizer que:

ou seja, esta equação diz que a carga nada mais é do que uma composição entre componentes dependentes da frequência e componentes que não dependem dela. Com isto o diagrama do conjunto gerador/carga fica representado pela figura 4.4.

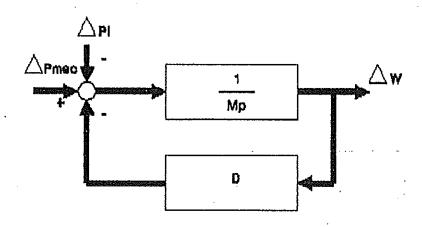


Fig. 4.4 Diagrama de blocos do conjunto gerador/carga.

4.2.5 - Diagrama de Blocos de uma Central Hidroelétrica Convencional [25]

Com os modelos levantados nos itens anteriores, facilmente se monta o diagrama de blocos da central hidroelétrica que alimenta uma carga isolada.

Para tanto será necessária a utilização das equações 4.35, 4.37 e 4.33:

$$\triangle T = a_{21}h + a_{22}n + a_{23}g_n$$

$$\triangle q = a_{11}h + a_{12}n + a_{13}g_n$$

$$\frac{h}{\sigma} = -T_w p$$

Substituindo-se o valor de h da equação 4.33 nas equações 4.35 e 4.37, encontra-se:

$$\triangle T = -a_{21}T_{W}pq + a_{22}n + a_{23}g_{n}$$

 $\triangle q = -a_{11}T_{W}pq + a_{12}n + a_{13}g_{n}$

Desta última equação tira-se que:

$$\triangle q = \frac{a_{12}n + a_{13}g_n}{(1 + a_{11}T_wp)}$$

também para a variação do conjugado, encontra-se que:

$$\triangle T = \frac{(-a_{21}a_{12}T_{w}p + a_{22} + a_{11}a_{22}T_{w}p)n + (1 + a_{11}T_{w}p)}{(1 + a_{11}T_{w}p)} + \frac{(a_{23} + a_{11}a_{23}T_{w}p - a_{21}a_{13}T_{w}p)g_{n}}{(1 + a_{11}T_{w}p)}$$
(4.41)

Com esta equação e com o modelo gerador/carga, encontra-se o diagrama de blocos completo para a Central hidroelétrica convencional, mostrado na figura 4.5.

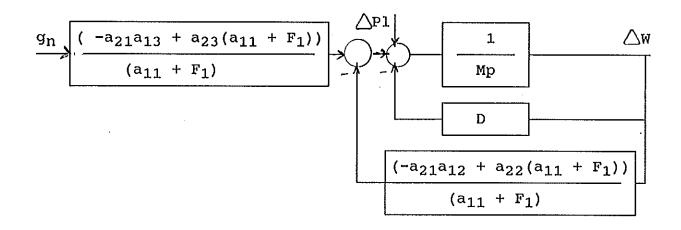


Fig. 4.5 Diagrama de blocos da Central Hidroelétrica Convencional.

4.2.6 - Obtenção do modelo de uma Microcentral a partir do Modelo Convencional.

Para se obter o modelo ideal que represente uma microcentral hidroelétrica são necessárias algumas considerações que são implícitas de suas características físicas. As principais simplificações são:

a - Como o tipo de turbina aqui utilizado possui distribuidor e pás fixas, então não se considera a variação ${\bf g}_n$ na equação 4.41;

b - Supondo que o sistema funcione com velocidades próximas da nominal, e sem grandes variações na sua altura de queda, pode-se estipular os seguintes valores para a equação 4.41:

 $a_{11} = 0.5$; $a_{12} = 0.0$; $a_{13} = 1.0$; $a_{21} = 1.5$; $a_{22} = -1.0$; $a_{23} = 1.0$, conforme sugestão do IEEE Committee Report [26].

c - A simulação feita no campo utilizou como carga, o conjunto de resistências de controle, portanto para este caso, pode-se fazer D=0.0, no diagrama de blocos da figura 4.5.

d - Como todos os valores desta figura estão em pu, então $w_{\rm O}$ = 1,0, conseqüentemente M = J e P = T.

Com as simplificações acima citadas, o diagrama de blocos para a microcentral hidroelétrica fica modelado pela figura 4.6, semelhante ao utilizado por [20].

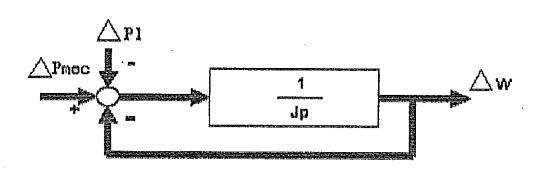


Fig. 4.6 Diagrama de Blocos para a Microcentral Hidroelétrica.

4.2.7 - Modelo proposto por Woodward

Na literatura consultada, quem apresentou o modelo mais apropriado para utilização em microcentrais foi Woodward. Segundo ele, a microcentral hidroelétrica pode ser representada pelo seguinte modelo:

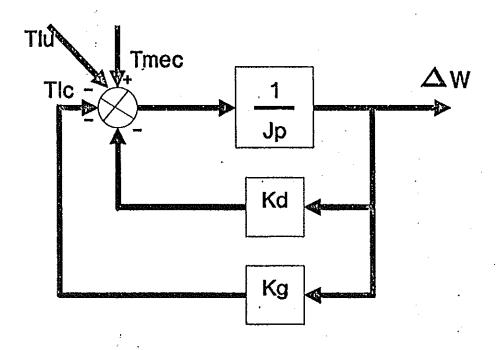


Fig. 4.7 Diagrama de blocos do modelo proposto por Woodward

Comparando-se com o diagrama simplificado do item anterior, conclui-se que $K_{\rm d}$ = D = 0 e que $K_{\rm q}$ = 1.

4.3 - Identificação do Modelo da Microcentral Hidroelétrica [27],[28].

Para se identificar o sistema da microcentral cujos dados foram fornecidos no capítulo 3, foi feito um ensaio utilizando-se

como carga apenas o conjunto de resistências de controle, dispensando-se assim qualquer quantidade de carga principal.

O ensaio constou de variações em degraus nas cargas de controle ($\Delta 1$), para se observar as variações no comportamento da velocidade (Δw).

Para se fazer a medição das grandezas foi utilizado um sistema de aquisição de dados chamado AQDADOS da LYNX.

A medição de potência foi feita com um transdutor de potência com saída de 1,5V no canal 00 do AQDADOS. A tensão foi medida no canal 01 e a rotação foi medida com um equipamento da marca TELDIX, cuja saída varia de 0 a 3V, com sensor ótico e contador de pulsos, no canal 02.

No ensaio contatou-se que o regulador de tensão manteve o valor eficaz da tensão inalterado, sem sofrer influência do degrau de carga aplicado. Esta constatação pode ser vista na figura 4.8.

Com relação às distorções na forma de onda da tensão, deve-se ao fato de que o gerador não apresenta inclinação nas ranhuras do rotor. Este fato provoca harmônicas de ordem elevada. Além disto é comprovado que quando o gerador de pólos salientes alimenta cargas resistivas ele tende a deformar a forma de onda da tensão.

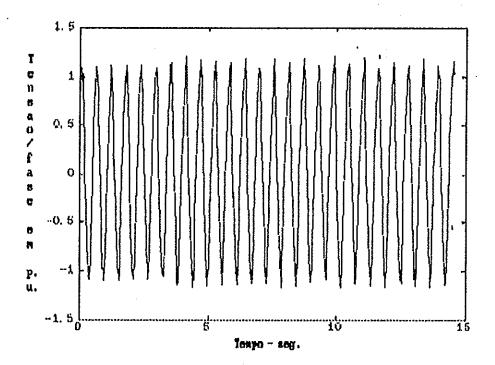


Fig. 4.8 Forma de onda da tensão do gerador aquisitada pelo AQDADOS.

O ensaio foi feito com a aplicação de vários degraus de carga, cada um com duração de dezessete segundos, gerando três vetores: um de potência, um de tensão e um de rotação. Cada vetor com cinquenta mil pontos.

Para se fazer a identificação do sistema, utilizou-se um conjunto de rotinas do MATLAB, chamadas de IDENTIFY, cujas equações estão mostradas no apêndice A. Estas rotinas trabalham com variáveis discretas, mas o próprio MATLAB faz a conversão para variáveis contínuas. Como o MATLAB trabalha com vetores de no máximo cinco mil pontos, foi necessário passar os dados de potência e de rotação por um filtro de quinta ordem. Este filtro reduziu o tamanho dos vetores e ainda eliminou uma grande quantidade de ruídos que foram captados pelo ensaio. Deste modo,

cada vetor ficou com quatro mil pontos, compatível portanto com a capacidade das rotinas do IDENTIFY.

Foram feitos cinco ensaios, assim discriminados:

Ensaio 1 - Degrau de duas cargas para quatro cargas, cuja função de transferência resultante foi:

$$G(p) = \frac{0.334}{p + 0.410}$$

Ensaio 2 - Degrau de quatro cargas para seis cargas, resultando na seguinte função de transferência:

$$G(p) = \frac{0.361}{p + 0.368}$$

Ensaio 3 - Degrau de seis cargas para sete cargas, resultando na seguinte função de transferência:

$$G(p) = \frac{0.273}{p + 0.268}$$

Ensaio 4 - Degrau de oito cargas para nove cargas, resultando na seguinte função de transferência:

$$G(p) = \frac{0.392}{p + 0.242}$$

Ensaio 5 - Degrau de doze cargas para treze cargas, cuja função de transferência resulta:

$$G(p) = \frac{0.447}{p + 0.241}$$

A figura 4.9 mostra a curva de potência normalizada e a curva de rotação normalizada para o ensaio 1.

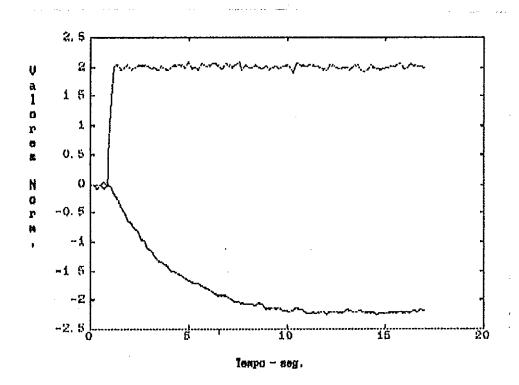


Fig. 4.9 Curvas de potência e de rotação normalizadas para o ensaio 1.

Estas funções de transferências foram colocadas na forma de Ganho e de Constante de Tempo na tabela 4.1

Ensaio	Transit.	Tal	Ganho
1	2-4	2.439	0.814
2	4-6	2.720	0.981
3	6-7	.3.734	1.021
4	7-8	4.125	1.615
5	12-13	4.146	1.855

Tabela 4.1. Tabela dos valores de Ganho e de Tal do ensaio realizado

Com estes dados pode-se traçar as curvas de Tal x Nº de cargas e Ganho x Nº de cargas mostradas nas figura 4.10 e 4.11

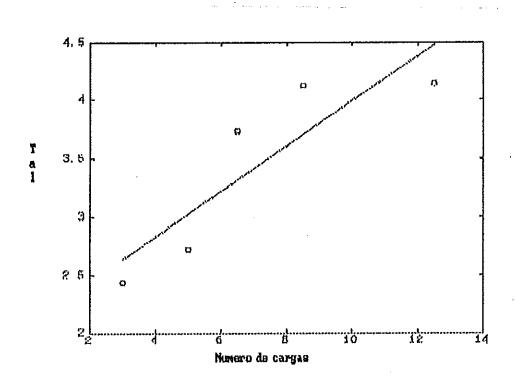


Fig.4.10 Gráfico de Tal $x N^{o}$ de cargas dos ensaios

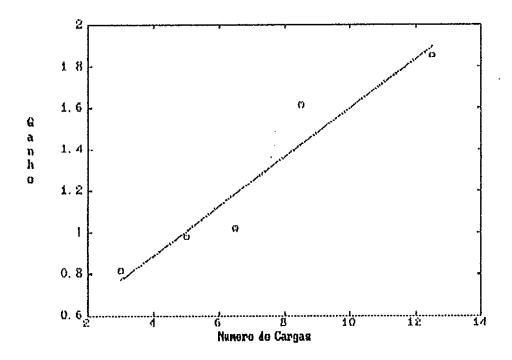


Fig. 4.11 Gráfico de Ganho x Nº de cargas dos ensaios

Observa-se que existe um comportamento semelhante nas curvas de Tal e Ganho. Isto permite considerar como modelo do sistema, o indicado na figura 4.12.

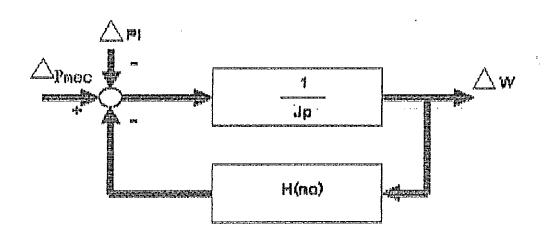


Fig. 4.12 Modelo encontrado a partir dos dados da tabela 4.1

Conforme se observa, foi constatado que a função de realimentação H(N) é função do n^{o} de cargas necessárias para se manter o sistema em regime para uma determinada vazão.

O valor de no foi obtido variando-se a vazão do sistema, com o controle automático já implementado ligado. Observava-se quantas cargas mantinham o sistema com razoável equilíbrio, ajustava-se então estas cargas, passando-se em seguida o sistema para o controle manual.

Neste modelo, a função de transferência é:

$$G(p) = \frac{W(p)}{P(p)} \tag{4.42}$$

ou em termos de Tal e de Ganho:

$$G(p) = \frac{A(p)}{1 + A(p) \cdot H(nc)}$$
 (4.43)

$$G(p) = \frac{K(nc)}{(1 + Tal(nc) \cdot p)}$$
(4.44)

Tendo-se os diversos resultados experimentais indicados na tabela 4.1 para K(nc) e TAL(nc), procedeu-se da seguinte maneira para obter-se H(nc) e J:

a - Supôs-se que K(nc) e TAL(nc) fossem lineares com o número de cargas;

b - Calculou-se J como:

J = Média (TAL(nc)/Média(K(nc))

obteve-se J = 2.73

c - Da figura 4.11, tirou-se K(nc) = 0.1190nc + 0.412, assim:

$$H(N) = \frac{1}{(0,412 + 0,119*nc)}$$
 (4.45)

4.4 - Cálculo do Controlador PID.

Para o cálculo do PID tomou-se um valor de carga médio e substituiu-se seu valor na equação 4.45, obtendo-se então a seguinte função de transferência em termos de diagrama de blocos, como mostra a figura 4.13:

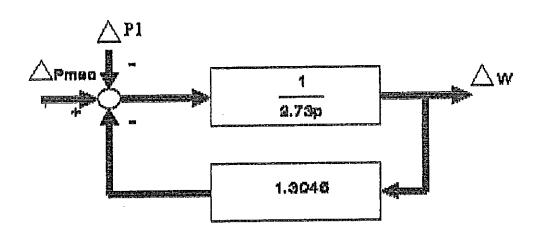


Fig. 4.13 Diagrama de blocos do modelo identificado

A partir deste diagrama de blocos foi calculado um PID usando-se o MATLAB, cujo diagrama de blocos está mostrado na

figura 4.14. Primeiro foi usado um método de tentativas e erros para o cálculo dos valores de Kp, Kd e Ki, obtendo-se as respostas mostradas nas figuras 4.15 e 4.16. Como pode-se observar, os tempos de acomodação resultaram bastante grandes, portanto, inviáveis. Usou-se então o método de alocação de pólos, apresentando respostas mais satisfatórias como pode ser visto nas curvas das figuras 4.17 e 4.18, resultando nos seguintes valores:

Kp = 120,234

Ki = 1200

Kd = 12,463

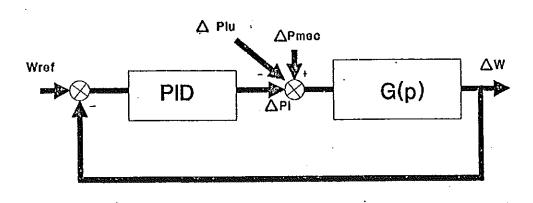


Fig.4.14 Diagrama de blocos do sistema com a inclusão do PID.

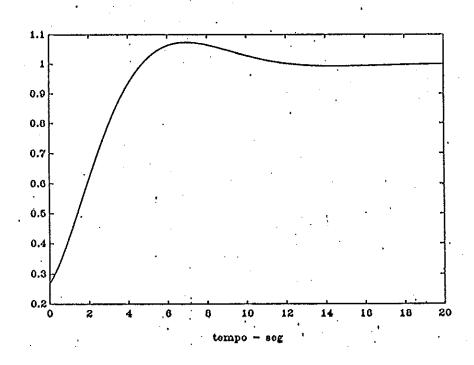


Fig. 4.15 Resposta do sistema a um degrau na referência, usando-se um método de tentativas e erros.

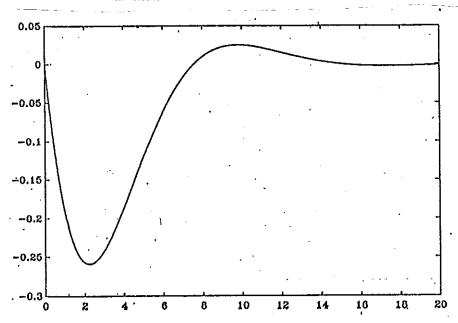


Fig. 4.16 Resposta do sistema a um degrau de carga aplicado, usando-se um método de tentativas e erros.

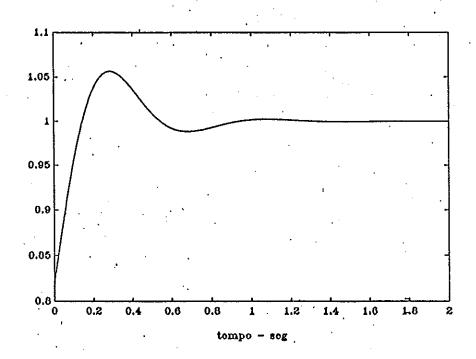


Fig. 4.17 Resposta do sistema a um degrau aplicado na referência, usando-se o método de alocação de pólos.

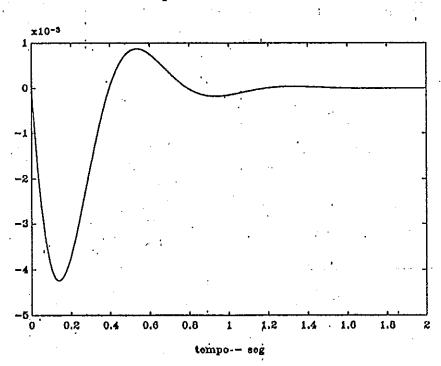


Fig. 4.18 Resposta do sistema a um degrau de carga, usando-se o método de alocação de pólos

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

A utilização de cargas de comutação para fazer a regulação de velocidade de uma microcentral hidroelétrica é uma alternativa que deve ser considerada com mais dedicação por parte das autoridades governamentais brasileiras.

está evidenciado outros países COM em ήá características semelhantes às do Brasil, os pequenos potenciais regiões mais afastadas, são nas sobretudo hidráulicos, perfeitamente adequados para gerar energia de qualidade redução de custos, tanto em termos de investimento inicial, como em termos de facilidade de manutenção.

Como toda solução tecnológica inovadora, a utilização de cargas auxiliares como reguladora de velocidade ainda necessita de alguns aperfeiçoamentos. Dentre estes, pode-se destacar a utilização de microprocessadores para fazer a regulação de frequência com maior eficácia.

Pelo fato da variação das cargas de controle ser feita de maneira discreta, a utilização de microprocessadores permitirá que se faça por exemplo, um ajuste fino, permitindo assim uma aproximação com os sistemas chamados contínuos.

Ainda pelo fato da variação ser discreta, é necessário que o usuário do sistema faça um planejamento adequado da entrada e da retirada de cargas, objetivando um funcionamento ótimo do conjunto.

Há ainda a se considerar o aproveitamento da energia que é

dissipada pelos resistores de comutação. Esta energia poderá ser aproveitada para aquecimento de água, secagem de grãos, produção de fertilizantes, etc.

Finalmente, pode-se concluir que a solução a médio prazo, depois de vencidas algumas etapas que estão sendo estudadas, será a configuração composta por uma bomba centrífuga funcionando como turbina; um motor de indução tipo gaiola de esquilo atuando como gerador elétrico e a regulação de velocidade sendo feita através controladas por auxiliares comutáveis, cargas de microprocessadores, aproveitando-se esta energia dissipada de maneira racional. Uma outra alternativa, que já vem sendo testada com certo êxito, é a regulação localizada, ou seja, o sistema como um todo, tem vários pontos para fazer a regulação de frequência, dependendo das características de cada carga, com toda a regulação sendo feita com a ajuda de microprocessadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

4 .

9

- [01] United Nations Industrial Development Organization.

 "Guidelines for the application of the small
 hydraulic turbines". UNIDO/IS. 495, nov. 1984
- [02] Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás), <u>"Manual de Microcentrais hidroelétricas"</u>, Rio de Janeiro, 1985.
- [03] VIANA, A.N.C; FILHO, G.L.T. "Bombas Centrífugas funcionan do como turbinas". IX Seminário Nacional de Produção e transmissão de energia elétrica, Belo Horizonte, 1987.
- [04] VIANA, A.N.C., "Comportamento de bombas centrífugas fun cionando como turbinas hidráulicas." <u>Dissertação de mes trado apresentada na Escola Federal de Engenharia de Ita jubá</u>, Itajubá, nov. 1987.
- [05] SHAFER, L; AGOSTINELLI, A. "Using pumps as small turbines"

 Water Power & Dam Construction, nov. 1981, pp. 25-26.
- [06] COTILLON, J. "Micropower: an old idea for a new problem".

 Water Power & Dam Construction, jan. 1979, pp. 42-48.
- [07] HOTHERSALL, R.J. "Microhydro: Turbine selection criteria" Water Power & Dam Construction, feb. 1984, pp. 26-29.

- [08] COGO, J.R.; ALMEIDA, A.T.L; BERNARDES, D.F. "Rendimento de ge radores para microcentrais hidroelétricas". Revista Mundo Elétrico, out. 1988, pp. 64-69.
- [09] MONITION, L. "Les Microcentrales hydroeléctriques", Masson S.A., Paris, 1981.
- [10] SAY, M.G., "Alternating current machines", John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [11] ELDER, J.M; BOYS, J.T. & WOODWARD, J.L. "Self-excited induction machines as a small low-cost generator". <u>IEE PROC.</u>, vol. <u>131</u>, pt. C, nº 2, march. 1984, pp. 33-41.
- [12] BARKLE, J. E, FERGUSON, R.W. "induction generator theory and application". AIEE TRANS., pt. III, 1954, pp. 12-19.

4

- [13] DOXEY, B.C., "Theory and application of the capacitor-excited induction generator". The Engineer, nº 29, nov. 1963, pp. 893-897.
- [14] JÚNIOR, S.C.; CALDAS, F.P. "Utilização do gerador de in dução em usinas hidroelétricas de pequeno porte". <u>VI Se minário Nacional de Produção e Transmissão de Energia E-létrica</u>, Balneário de Camboriú-SC, 1981.

- [15] QUAZENE, L., MCPHERSON, G. JR. "Analysis of the isolated induction generator". <u>IEEE PAS-102</u>, nº8, aug. 1983, pp. 2793-2798.
- [16] GAAL, V. & RIEZINGER, F. "Small hydro-electric power stations a contribution to the solution of the energy problem".

 Brown Boveri Rev. 7/8 83.
- [17] BOGERT, J.M. "Automatic control for small hydro plants".

 Water Power & Dam Construction, oct. 1985, pp. 20-25.
- [18] WOODWARD, J.L & BOYS, J.T. "Electronic load governor for small hydro plants". Water Power & Dam Construction, july 1980, pp. 37-39.
- [19] CROVETO, G. & MASSA, G. "Controllo di velocità per minitur bine idrauliche mediante carico reostatico. Realizzazio ne di un prototipo da 100kw". L'Energia Elettrica, nº12, 1986.
- [20] Relatório interno do Convênio IPT/CPFL.

4 .

1

[21] WOODWARD, J.L., & BOYS, J.T. "A low cost electronic load governor for load managment". Proceedings, First International Conference on small hydro, Singapore, feb. 1984.

- [22] WOOD, A.J. "Power Generation, Operation and Control" John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [23] MELLO, F.P. de ," <u>Dinâmica e Controle da Geração</u>". Trad./de/Almoraci S. Algarve /e/ João M. Soares, Santa Maria,
 Universidade Federal de Santa Maria, 1979.

A.

- [24] LEVA, F., " Hydro plant frequency regulation". Water Power & Dam Construction, may. 1986, pp. 27-31
- [25] ARAKI, M.; KUWABARA, T. "Water column effect on speed control of hydraulic turbines and governor improvment". Hitachi Re view, vol. 22, nº2, 1979.
- [26] "Dynamic Models for Steam and hydro Turbines in Power System Studies". <u>IEEE COMMITTEE REPORT, PES Winter Power Meeting</u>, New York, N.Y., 1973.
- [27] TEIXEIRA, J.C. Relatório de Atividades no IPT.
- [28] CAMPOS, J.C.T, TEIXEIRA, J.C., LIMA, P.S.P, CUNHA, H.

 "O Problema do Regulador de Velocidade e da Modelagem

 do Sistema em uma Microcentral Hidroelétrica".

 Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, 1991

 pp 217-224
- [29] LJUNG, L. "System Identification",
 Prentice-Hall, 1987, New Jersey

APÊNDICE

O problema da identificação de um sistema é estimar um modelo baseado nos dados aquisitados de entrada e de saída. Existem vários modos para se estimar e se descrever um sistema, um deles é o adotado por Ljung [29] e que foi usado neste trabalho.

A.1 - Descrição do sistema

A descrição do sistema pode ser feita a partir da figura A.1:

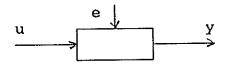


Figura A.1 - Diagrama de blocos de um sistema

O sinal de entrada é definido como:

$$u(t); t = 1, 2, ..., N$$

$$y(t); t = 1, 2, ..., N$$

Supondo que os sinais de entrada e de saída são relacionados por um sistema linear, pode-se escrever:

$$y(t) = G(q)*u(t) + v(t)$$
 (a.01)

$$G(q) *u(t) = \Sigma g(k) *u(t-k)$$
 (a.02)

$$G(q) = \sum g(k)q^{-k}$$
 (a.03)

$$q^{-1}u(t) = u(t-1)$$
 (a.04)

A função de transferência G(q) avaliada no círculo unitário resulta na função frequência definida por $G(e^{jw})$.

Na equação (a.01), v(t) é um distúrbio (ruído), que pode ser expresso por seu auto-spectro $\Phi_{\mathbf{V}}(\mathbf{W})$, que é definido por:

$$\Phi_{\mathbf{V}}(\mathbf{W}) = \Sigma \mathbf{R}_{\mathbf{V}}(\sigma) \, \mathbf{e}^{-\mathbf{j}\mathbf{W}\sigma} \tag{a.05}$$

$$R_{V}(\sigma) = EV(t)V(t-\sigma)$$
 (a.06)

Alternativamente, o distúrbio pode ser descrito como um ruído branco filtrado:

$$v(t) = H(q) *e(t)$$
 (a.07)

$$\Phi(W) = \lambda |H(e^{jW})|^2$$
 (a.08)

As equações (a.01) e (a.08) juntas dão a descrição do sistema no domínio do tempo:

$$y(t) = G(q)*u(t) + H(q)*e(t)$$
 (a.09)

A.2 - Modelos Paramétricos

para se estimar as funções G(q) e H(q) na equação (a.09), deve-se primeiro parametrizá-las, geralmente em funções racionais usando-se o operador atraso q^{-1} .

O modelo paramétrico mais usado é modelo ARX, que corresponde a:

$$G(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)}$$
 (a.10)

onde B(q) e A(q) são polinômios no operador atraso q^{-1} :

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots \cdot a_{na}q^{-na}$$
 (a.11)

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots b_{nb} q^{-nb+1}$$
 (a.12)

Pode-se referir-se a na e nb como sendo as ordens dos respectivos polinômios. O número nk é o número de atrasos da entrada para a saída. O modelo pode ser também escrito da seguinte forma:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-nk) + e(t)$$
 (a.13)

ou, explicitamente,

$$y(t) + a_1y(t-1) + ... \cdot a_{na}y(t-na) =$$

$$b_1u(t-nk) + b_2u(t-nk-1) + ... \cdot$$

$$+ b_nbu(t-nk-nb) + e(t)$$
(a.14)

Há ainda outras estruturas além da ARX, que podem ser utilizadas, tais como a ARMAX, OE, BOX JENKINS, que consistem apenas na inclusão de outros quocientes de polinômios.