

ÁLVARO CHRISTIAN MONTAÑO SAAVEDRA

**MONTAGEM E MODELAGEM DE UM GRUPO GERADOR
SÍNCRONO – TURBINA HIDRÁULICA PARA SEU ESTUDO E
OPERAÇÃO EM MICRO CENTRAIS HIDROELÉTRICAS PARA
PEQUENOS SISTEMAS ISOLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Denti Filho

VITÓRIA
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S112m Saavedra, Álvaro Christian Montaña, 1982-
Montagem e modelagem de um grupo gerador síncrono –
turbina hidráulica para seu estudo e operação em micro centrais
hidroelétricas para pequenos sistemas isolados / Álvaro Christian
Montaña Saavedra. – 2011.
120 f. : il.

Orientador: José Denti Filho.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Modelagem. 2. Geradores hidrelétricos. 3. Turbinas
hidráulicas. 4. Usinas hidrelétricas. I. Denti Filho, José. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 621.3

ÁLVARO CHRISTIAN MONTAÑO SAAVEDRA

**MONTAGEM E MODELAGEM DE UM GRUPO GERADOR
SÍNCRONO – TURBINA HIDRÁULICA PARA SEU ESTUDO E
OPERAÇÃO EM MICRO CENTRAIS HIDROELÉTRICAS PARA
PEQUENOS SISTEMAS ISOLADOS**

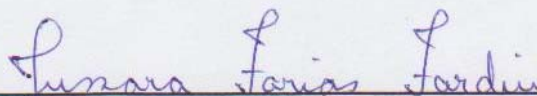
Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de maio de 2011.

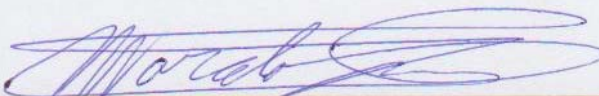
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. José Denti Filho - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Marcelo Lucas Pereira Machado
Instituto Federal do Espírito Santo

RESUMO

O trabalho apresenta a montagem e modelagem de uma planta formada por uma turbina hidráulica e um gerador síncrono para seu funcionamento como parte de uma Micro Central Hidroelétrica (MCH) para pequenos sistemas isolados.

Uma vez feita a montagem da planta, partiu-se para o desenvolvimento de um modelo empírico do processo, na forma de curvas de reação, obtidas utilizando-se a técnica de resposta ao degrau; e que possibilitou a aproximação das variáveis principais envolvidas para um modelo de primeira ordem com tempo morto.

Depois de obtidas as funções de transferência da planta, projetou-se um controlador PID com a finalidade de manter a tensão de saída do gerador num valor de referência adequado para a sua distribuição na rede elétrica no sistema isolado.

Com a finalidade de validar os resultados obtidos nas simulações, obtiveram-se curvas de resposta do sistema real em laboratório e compararam-se ambas as respostas, dando um resultado satisfatório e muito parecido.

Estes resultados servirão como base para futuros estudos nas áreas de controle de velocidade (ou governador de carga) e estabilidade do sistema, entre outros, no campo das MCHs para pequenos sistemas isolados.

ABSTRACT

This work presents the assembly and modeling of a plant constituted by one turbine and one synchronous generator to function as a part of a Micro Hydroelectric Plant (MHP) for small isolated systems.

Once the assembly of the plant at the laboratory was constructed, has started the developing of an empirical model of the process in the form of reaction curves, obtained by the use of the step response technique that allowed the approximation of the main variables involved in a first order with dead time model.

After obtaining the transfer functions of the plant, a PID controller was designed in order to maintain the output voltage of the generator on an appropriate reference value for electrical distribution in the network of the isolated electric system.

With the purpose of validate the simulation results, curves of response were obtained from the real system in the laboratory and were compared to both responses, giving a satisfactory and very similar result.

These results will functionate as a basis for further studies in the areas of speed control (or charge controller) and system stability, among others, in the field of MHPs for small isolated systems.

Sumário

RESUMO	IV
ABSTRACT	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 A Hidroenergia na Bolívia.....	1
1.2 Grupos de Geração para MCHs.	2
1.3 Ações de Controle Necessárias nas MCHs.	3
1.4 Objetivo do Trabalho.	6
1.5 Organização do Texto.....	7
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	9
2.1 Geração de Energia Elétrica em Sistemas Isolados com Micro-centrais Hidroelétricas (MCHs).....	9
2.2 Sistema, Modelagem e Identificação de Parâmetros.....	10
2.3 Métodos de controle de tensão e velocidade na geração de energia elétrica em MCHs.....	12
2.4 Simulação Teórica do Grupo Gerador Síncrono – Turbina Hidráulica.	14
2.4.1 Função de Transferência de uma Turbina Hidráulica.	14
2.4.2 Modelo do Gerador Síncrono.	15
2.4.3 Modelo Geral do conjunto Gerador – Turbina Hidráulica.	17
3. MATERIAIS, MODELO DINÂMICO E CONTROLE PROPOSTO.....	20
3.1 Elementos Usados nos Ensaios de Laboratório.....	20
3.1.1 Gerador.....	20
3.1.2 Turbina.....	24
3.1.3 Bomba d’água.	24
3.1.4 Definição das Variáveis do Processo.....	25
3.1.5 Instrumentação e Equipamento Utilizado.	26
3.2 Montagem da Planta.....	27
3.3 Posta em Operação da Planta no Laboratório.	28

3.4 Operação da Planta em Regime Permanente	29
3.5 O Modelo Dinâmico	29
3.5.1 Método de Identificação Dinâmica através do Teste Degrau.....	29
3.5.2 Obtenção de Modelos de Primeira Ordem com Tempo Morto.	32
3.5.3 Procedimento para Levantamento das Curvas de Reação.	35
3.5.4 Respostas da Planta ao Teste Degrau sem AVR. Obtenção das Funções de Transferência.	40
3.6 Controle Proposto.....	60
3.6.1 Sistema de Controle.....	60
3.6.2 Descrição do Sistema de Controle.....	66
3.6.3 Estratégia de Controle Utilizada.	67
3.6.4 Sintonia do Controlador.	68
3.6.5 Estruturas do Modelo do Processo.....	70
4. RESULTADOS.....	81
4.1 Estrutura com duas funções de transferência.	81
4.2 Média das funções de transferência.....	88
5. CONCLUSÕES.....	92
6. RECOMENDAÇÕES.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE 1: MANUAL DE INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO GERADOR RANGO A.	100
APÊNDICE 2: MANUAL DE INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO ANALÓGICO GRGT-06.....	101
APÊNDICE 3: GRÁFICOS OBTIDOS COM REGISTRADOR NOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO.....	102
APÊNDICE 4: OBTENÇÃO DA CURVA SIGMOIDAL.....	103
APÊNDICE 5: DIAGRAMA ELÉTRICO GERAL DE UMA MCH.	106

Lista de Figuras

Figura 1.1 Potencial Hidroelétrico Específico da Bolívia.....	1
Figura 1.2 Grupo completo de geração fabricado no IHH – UMSA.	2
Figura 1.3 Grupos eletromecânicos de geração hidroelétrica IHH - UMSA.....	3
Figura 1.4 Controlador eletrônico de carga.....	6
Figura 2.1 Partes de uma MCH.	10
Figura 2.2 Princípios para a construção de um modelo matemático.	11
Figura 2.3 Gerador síncrono com AVR.	13
Figura 2.4 Esquema geral de uma MCH.	14
Figura 2.5 Diagrama de blocos de um gerador síncrono.....	16
Figura 2.6 Modelo em <i>Simulink</i> do gerador síncrono com seus controles.....	17
Figura 3.1 Gerador utilizado.	20
Figura 3.2 Sistema de excitação do gerador sem escovas.....	21
Figura 3.3 Diagrama de blocos do AVR.....	22
Figura 3.4 Diagrama de controle do AVR.	23
Figura 3.5 Diagrama de esboço do AVR.	23
Figura 3.6 Turbina tipo Banki de fabricação boliviana.	24
Figura 3.7 Montagem da planta.	27
Figura 3.8 Planta montada para experimentação.	28
Figura 3.9 Esquema da planta montada para experimentação.....	28
Figura 3.10 Operação e monitoramento da planta.	29
Figura 3.11 Avaliação de processos perante sinais de teste.	30
Figura 3.12 Respostas típicas ao degrau em malha aberta.	32
Figura 3.13 Variável controlada e variável manipulada com funções de transferência para um degrau positivo e outro negativo.	33
Figura 3.14 Métodos de ZN e HAG para a modelagem de processos de primeira ordem.	34
Figura 3.15 Teste da curva de reação do processo.	36
Figura 3.16 Diagrama de blocos da malha de controle com controlador em modo manual.	36
Figura 3.17 Respostas ao teste degrau da planta.....	37
Figura 3.18 Diagrama de blocos da planta.	38
Figura 3.19 Resposta ao teste degrau do circuito aberto.	38
Figura 3.20 Circuito para o teste.	40
Figura 3.21 Elementos usados no teste.....	42
Figura 3.22 Obtenção das respostas do sistema.	42
Figura 3.23 Algumas respostas obtidas do sistema com ajuda do registrador.	43
Figura 3.24 Degraus positivos na tensão de excitação e resposta do sistema do primeiro teste.....	44

Figura 3.25 Curva de reação da tensão de saída do sistema do primeiro teste.....	45
Figura 3.26 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do primeiro teste.	45
Figura 3.27 Diagrama de blocos da simulação.	47
Figura 3.28 Respostas dos modelos e a resposta real.	48
Figura 3.29 Degraus positivos na tensão de excitação e resposta do sistema do segundo teste.	49
Figura 3.30 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do segundo teste.	49
Figura 3.31 Degraus positivos na tensão de excitação e resposta do sistema do terceiro teste.	51
Figura 3.32 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do terceiro teste.	51
Figura 3.33 Degraus negativos na tensão de excitação e resposta do sistema do quarto teste.....	53
Figura 3.34 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do quarto teste.	53
Figura 3.35 Degraus negativos na tensão de excitação e resposta do sistema do quinto teste.	55
Figura 3.36 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do quinto teste.....	55
Figura 3.37 Degraus negativos na tensão de excitação e resposta do sistema do sexto teste.	57
Figura 3.38 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do sexto teste.....	57
Figura 3.39 Diagrama de blocos do sistema de controle por realimentação.	60
Figura 3.40 Diagrama de blocos do controlador PID paralelo	64
Figura 3.41 Diagrama de blocos do controlador PID série.	65
Figura 3.42 Diagrama do sistema de controle em malha fechada.	67
Figura 3.43 Primeira estrutura do modelo.	75
Figura 3.44 Segunda estrutura do modelo.	79
Figura 4.1 Malha fechada submetida a variação no SP.	81
Figura 4.2 Diagrama de conexão do AVR.	82
Figura 4.3 Conexão do AVR e da chave comutadora.....	82
Figura 4.4 Realização do ensaio, degrau no <i>Set Point</i>	83
Figura 4.5 Diagrama de blocos da simulação para o degrau positivo.	83
Figura 4.6 Resposta do sistema ao degrau positivo no SP.	84
Figura 4.7 Visualização da resposta do sistema no ponto da aplicação do degrau.....	84
Figura 4.8 Comparação entre os métodos ZN e IMC.....	85
Figura 4.9 Diagrama de blocos da simulação para o degrau negativo.	86
Figura 4.10 Resposta do sistema ao degrau negativo no SP.	86
Figura 4.11 Visualização da resposta do sistema no ponto da aplicação do degrau.	87
Figura 4.12 Comparação entre os métodos ZN e IMC.....	87

Figura 4.13 Diagrama de blocos utilizado para a simulação com a média das funções de transferência..	88
Figura 4.14 Resposta do sistema ao degrau positivo no SP.	89
Figura 4.15 Resposta do sistema ao degrau negativo no SP.	89
Figura A.1 Obtenção da curva <i>Sigmoide</i>	105
Figura A.2 Diagrama elétrico geral de uma MCH.	107

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Classificação das MCHs.	2
Tabela 3.1 Resultados das respostas do processo ao teste degrau.	59
Tabela 3.2 Controlabilidade dos testes realizados.	68
Tabela 3.3 Funções de transferência com as unidades adaptadas.	72
Tabela 3.4 Funções de transferência para os testes com degrau positivo e negativo.	73
Tabela 3.5 Fórmulas para ajuste do controlador segundo Ziegler – Nichols.	76
Tabela 3.6 Funções obtidas para as diferentes estruturas de controle.	79

Lista de Siglas e Símbolos

MCH	Micro Central Hidroelétrica
AVR	Automatic Voltage Regulator
LFC	Load Frequency Control
ΔP_m	Potência mecânica no eixo da turbina
ΔP_v	Potência na saída da turbina
τ_w	Constante de tempo d'água
a_{ij}	Coefficientes do modelo não ideal da turbina
E_{ef}	Tensão efetiva por fase
ϕ	Fluxo por pólo
N_p	Número total de espiras
\mathfrak{R}	Relutância
K	Ganho estático
τ	Constante de tempo
θ	Tempo morto
E_{exc}	Tensão de excitação
$V_{saída}$	Tensão de saída
K_p	Ganho proporcional
T_i	Tempo integral
T_d	Tempo derivativo
SCMF	Sistema de controle em malha fechada
SP	Set Point
OP	Output to process
PV	Process variable
MV	Manipulate variable
P_u	Parâmetro de incontrolabilidade

1. INTRODUÇÃO.

A Bolívia é um país no qual só se alcança aproximadamente 35% de suprimento de energia elétrica na área rural e que, porém, tem um grande potencial hidroenergético (Mercado,2006). A energia hidráulica como fonte de energia limpa e renovável é uma opção muito competitiva para a eletrificação de povoados isolados das redes elétricas do país, além de dar a opção de executar todo o projeto com participação dos beneficiários nas construções, levando a custos mais baixos.

1.1 A Hidroenergía na Bolívia.

O país tem um importante potencial hidroenergético (ao redor de 39.850[MW]) dos quais aproximadamente 1% (491 [MW]) são explorados atualmente; porém, com essa reduzida quantidade pode se gerar aproximadamente 48% da energia elétrica que é consumida na Bolívia (Monroy, 2002). Na Figura 1.1 podemos ver a região onde se encontra concentrada o potencial hidroelétrico da Bolívia.

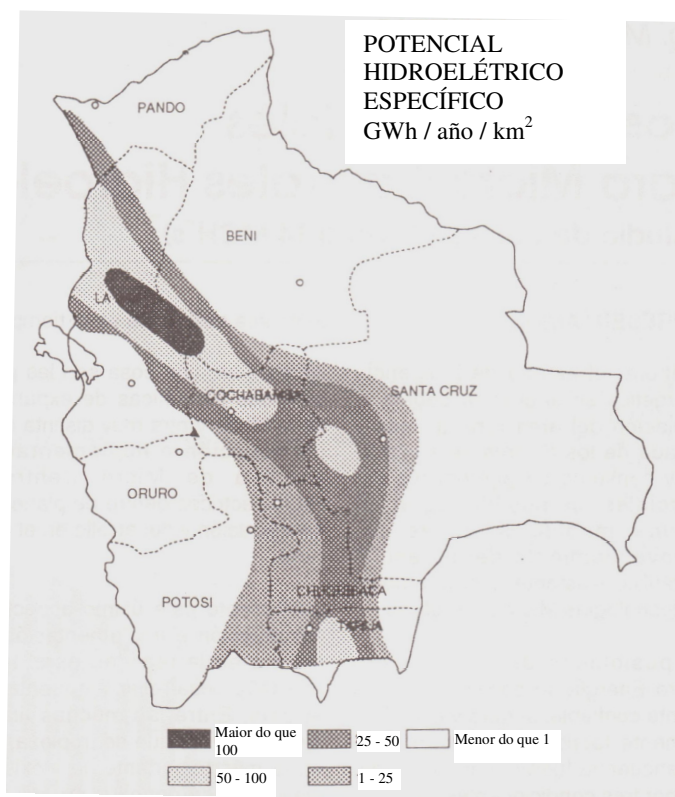


Figura 1.1 Potencial Hidroelétrico Específico da Bolívia.

(Fonte: Centro de Información en Energías Renovables, CINER)

Geralmente, quando ouvimos o termo “micro – hidroenergia (MHE)” ou “Micro Centrais Hidroelétricas (MCHs)” automaticamente entendemos como se fosse a versão “micro” das grandes centrais hidráulicas. Desta maneira, tem-se a necessidade de definir claramente o que se entende por MHE e a sua aplicação, as MCHs (Monroy, 2002). Na Tabela 1.1 encontram-se as classificações mais usadas no âmbito das MCHs por quantidade de potência elétrica gerada e altura de operação.

Tabela 1.1 Classificação das MCHs.

	TIPO	POTÊNCIA [kW]	ALTURA [m]		
			Baixo	Médio	Alto
OLADE*	Micro	50	15	15 a 20	50
	Mini	500	20	20 a 100	100
	Pequena	5 000	25	25 a 130	130
ONUDI**	Micro	até 100			
	Mini	até 1 000			

* OLADE, Organización Latinoamericana de Energía.

** ONUDI, Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.

1.2 Grupos de Geração para MCHs.

O Instituto de Hidráulica e Hidrologia (IHH) da Universidad Mayor de San Andrés (UMSA em La Paz, Bolívia), dentro das suas tarefas específicas de pesquisa e desenvolvimento, desde 1986 trabalha diretamente com os setores beneficiários rurais afastados das redes públicas de distribuição de energia elétrica, inicialmente na identificação e elaboração de desenhos até a execução de projetos de desenvolvimento de grupos de geração hidroelétrica. As Figuras 1.2 e 1.3 mostram os diferentes tipos de grupos de geração hidroelétrica desenvolvidos por pesquisadores do IHH.

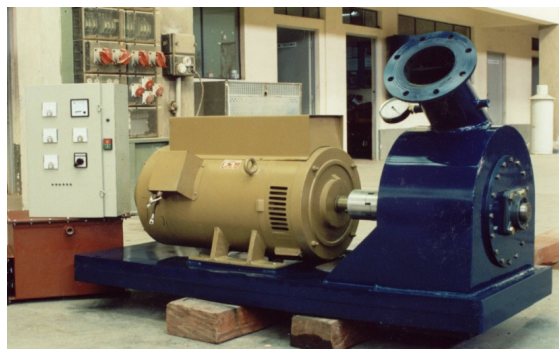


Figura 1.2 Grupo completo de geração fabricado no IHH – UMSA.



a) Grupo de geração com turbina tipo Pelton. (injetores, controle eletrônico de carga e união direta por meio de união flexível).



b) Grupo de geração com turbina tipo Banki. (controle eletrônico de carga e união por meio de polias).

Figura 1.3 Grupos eletromecânicos de geração hidroelétrica IHH - UMSA.

1.3 Ações de Controle Necessárias nas MCHs.

O grupo turbina – gerador precisa para o seu correto funcionamento de governadores ou controladores que o mantenham funcionando a valores nominais de operação, posto que diante das variações na demanda produzem-se acelerações ou desacelerações que ocasionam variações na tensão e na frequência da energia elétrica gerada.

O objetivo da estratégia de controle é gerar e levar potência a um sistema de energia elétrica de maneira mais econômica e confiável possível e ao mesmo tempo manter os limites de frequência e tensão dentro da faixa permissível.

As variações na potência real (ou ativa) afetam principalmente à frequência do sistema, enquanto que variações na potência reativa afetam principalmente a amplitude da tensão. Por tanto, é possível controlar a potência ativa e reativa de maneira independente. A malha de controle de potência real – frequência LFC (*load frequency control*), controla a potência real e a frequência (velocidade de rotação do gerador); enquanto que a malha do regulador automático de tensão ou de potência reativa – tensão AVR (*automatic voltage regulator*) regula a potência reativa e a amplitude da tensão, como poderá ser visto nos capítulos posteriores. Mudanças na potência real podem ser feitas através do ângulo do rotor e, por conseguinte, da

freqüência; a potência reativa pode ser controlada através da tensão de excitação do gerador. Como a constante de tempo do sistema de excitação é muito menor do que a constante de tempo da turbina, a interação entre a malha LFC e a malha do AVR é desprezível (Vanfretti, 2005).

A malha LFC vem adquirindo importância com o crescimento de sistemas interconectados e até agora é ainda a base de muitos conceitos avançados para o controle de sistemas de grande porte.

Na atualidade existem basicamente dois tipos de controladores ou governadores de velocidade em Micro Centrais Hidroelétricas: os controladores de vazão e os controladores eletrônicos de carga. Os primeiros são servo-mecanismos que controlam a vazão de entrada na turbina conseguindo que a velocidade do conjunto permaneça constante, estes são usados normalmente em grandes centrais. Os controladores eletrônicos de velocidade (ou governadores de carga) são utilizados em pequenas centrais e sistemas isolados; estes mantêm a velocidade do conjunto turbina – gerador constante desviando para um dissipador (aquecedor de água ou ar) toda a energia elétrica que não esteja sendo consumida, para que esteja disponível quando for preciso (podendo-se usar depois a água aquecida para algum uso específico).¹

Por outro lado, a interação entre os controles de tensão e freqüência é geralmente fraco, o que justifica uma análise independente dos mesmos. Algumas fontes de potência reativa são capacitores, lâmpadas fluorescentes, motores elétricos, etc. A potência reativa dos geradores é controlada por meio dos sistemas de controle de excitação. A função básica de um sistema de excitação é de prover a corrente direta ao enrolamento de campo de uma máquina síncrona. Além disso, o sistema de excitação desempenha funções de controle e proteção essenciais para o funcionamento satisfatório do sistema de potência através do controle da tensão de campo e, conseqüentemente, da corrente de campo. As funções de controle incluem o controle da tensão e da potência reativa, como também o melhoramento da estabilidade do sistema.

Atualmente, o meio primário para o controle de potência reativa dos geradores é o sistema de controle de excitação utilizando o regulador automático de tensão AVR

¹ Esta afirmação é feita pelo autor baseada na própria experiência profissional no campo das MCHs.

(*automatic voltage regulator*). A função do AVR é de manter a amplitude da tensão nos terminais do gerador síncrono em nível especificado. Na Seção 2.3 se descreve com mais detalhe o funcionamento deste regulador.

Geralmente, o gerador síncrono vem acompanhado do AVR (em alguns casos o gerador e o AVR podem ser vendidos em separado) e o que deve ser projetado é o controlador de frequência da planta de geração. Nos sistemas isolados em povoados rurais, a regulação de frequência (com ajuda de um controlador eletrônico) junto com um painel de controle com instrumentos de medição, dispositivos de manobra e proteção, constituem o sistema de controle mais adequado devido a seu baixo custo em relação a um servomecanismo e a sua automação que precisa de algumas pessoas para a operação.

Outro ponto importante é que um controlador eletrônico de carga desenvolvido de acordo com a realidade e as necessidades do meio boliviano (de baixo custo em relação a grupos similares importados, e com possibilidade de ser manobrado por pessoas com mínima capacitação técnica, além de contar com a disponibilidade imediata de peças de reposição no mercado), resulta ser a melhor opção frente a grupos importados, que além de terem custos mais elevados, devem receber manutenção e reparação por pessoal especializado.

No IHH foi desenvolvido controladores eletrônicos de carga tanto para sistemas monofásicos quanto para trifásicos (Figura 1.4), com potências de até 150 [kW] e dissipação de energia mediante aquecedores de água; têm um microcontrolador ATMEL 89C52 que testa 50 vezes por segundo a energia elétrica consumida pelos usuários e comanda tiristores e triac's para que liguem ou desliguem as resistências do tanque dissipador.



Figura 1.4 Controlador eletrônico de carga.

Somando as turbinas hidráulicas, os controladores de tensão e de frequência, e os painéis de controle, podem-se montar grupos completos de geração hidroelétrica com geradores importados. Estes grupos se mostraram muito eficientes e de alta confiabilidade nos diferentes projetos executados, no entanto, não se tem um modelo matemático do grupo turbina – gerador – AVR - controlador de velocidade que possa descrever o comportamento do sistema diante perturbações de carga.

Alguns problemas têm ocorridos nos novos projetos no momento de testar o controlador de frequência no laboratório, devido a que atualmente se importam geradores com características diferentes dos que se usavam anteriormente, entre outras razões por causa da variação de custos e o avanço tecnológico na área de geradores. Portanto, um algoritmo de processo de identificação de parâmetros e obtenção de um modelo que represente adequadamente o comportamento do grupo de geração de uma MCH seria de muita ajuda para a solução deste e de futuros problemas que possam se apresentar no processo de controle de velocidade.

1.4 Objetivo do Trabalho.

Este trabalho tem por finalidade a identificação dos parâmetros e a obtenção do modelo dinâmico da planta, definida como o conjunto turbina hidráulica – gerador elétrico, a partir de ensaios experimentais em laboratório; para depois desenvolver a sintonia do controlador de tensão de saída da energia elétrica gerada, com o objetivo de ter um modelo que sirva como base para futuras pesquisas sobre desenvolvimento e projeto dos controladores eletrônicos de frequência em pequenos sistemas isolados.

1.5 Organização do Texto.

Neste capítulo foram introduzidos aspectos relacionados às Micro Centrais Hidroelétricas e a sua situação atual de desenvolvimento e aplicação na República da Bolívia. Foram descritas algumas ações de controle necessárias para garantir o correto funcionamento do grupo e a qualidade da energia gerada. Ao final, foi estabelecido o objetivo deste trabalho. No Capítulo 2 são descritas as partes de uma MCH, assim como os métodos de controle e a simulação teórica do grupo gerador síncrono – turbina hidráulica. A montagem da planta e os elementos usados nos ensaios do laboratório são apresentados no início do Capítulo 3. Depois, é apresentado o método de identificação utilizado para obter o modelo dinâmico da planta e, no final do capítulo, é feita a descrição do controle proposto. Com a finalidade de poder validar o trabalho de identificação do modelo da planta e de sintonia do controlador proposto, é necessária a comparação da sua resposta com o comportamento real da planta a variações no *Set Point*. Neste sentido, no Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados na planta real e das simulações, comparando a resposta real da planta com as respostas obtidas utilizando as duas estruturas do processo propostas. Finalmente, nos Capítulos 5 e 6 se relacionam os métodos abordados e os resultados alcançados, apresentando as conclusões obtidas e apontando as perspectivas futuras de trabalho.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Neste capítulo, são abordados alguns aspectos de identificação de parâmetros e modelagem de sistemas; também são explicados os métodos de controle da tensão e da frequência em uma MCH (Seção 2.3). Uma breve explicação das simulações da turbina hidráulica e do gerador síncrono encontradas na literatura é apresentada (Seção 2.4).

2.1 Geração de Energia Elétrica em Sistemas Isolados com Micro-centrais Hidroelétricas (MCHs).

Os componentes típicos de uma MCH são mostrados na Figura 2.1 e podem se agrupar da seguinte forma:

- Toma d'água (uma represa pequena).
- Canal (permite a condução d'água, desde a toma até o depósito de carga).
- Depósito de carga (atua como um pequeno reservatório de amortecimento e separador da areia com a água).
- Tubulação de pressão (dirige a vazão necessária até a turbina, através do desnível projetado).

A casa de máquinas tem a função de proteção do equipamento eletromecânico de geração; dentro dela podem-se encontrar os seguintes elementos:

- Turbina hidráulica (encarregada de converter a *energia hidráulica* em energia mecânica rotacional)².
- Gerador elétrico (converte a energia mecânica da turbina em energia elétrica).
- Controlador de velocidade.
- Tanque com resistências de dissipação no caso de um controlador eletrônico de velocidade (balastros).

² A energia hidráulica ou energia hídrica é a energia obtida a partir da energia potencial e cinética contida nas massas d'água que transportam os rios.

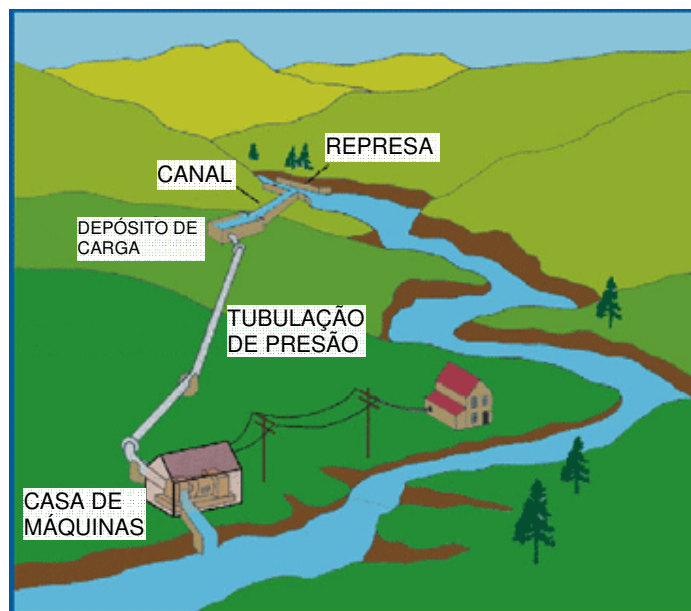


Figura 2.1 Partes de uma MCH.

2.2 Sistema, Modelagem e Identificação de Parâmetros.

Antes de continuar com o desenvolvimento do projeto, é importante ter claro alguns conceitos básicos:

Sistema.

O conceito de sistema pode ser estabelecido de diferentes formas. Em controle de processos, denota-se como um objeto ou uma coleção de objetos que realiza certo objetivo e cujas propriedades pretende-se estudar. Alguns exemplos são: sistema de fabricação de papel ou cerâmica, sistema de energia solar, circuito elétrico, servomecanismo de posição, sistema biológico ou econômico, manipulador robótico, reator, coluna de destilação, entre outros (Coelho, 2004).

Um sistema contínuo normalmente se refere a sistemas dinâmicos observados continuamente no tempo, e são modelados por equações diferenciais (Aguirre, 2007).

Modelagem e Identificação.

Entende-se por modelagem e identificação a determinação do modelo matemático de um sistema representando os seus aspectos essenciais de forma

adequada para uma utilização particular (diagnóstico, supervisão, otimização, controle). Os procedimentos envolvidos na elaboração de modelos matemáticos estão mostrados na Figura 2.2 e são usualmente classificados em:

- Análise físico–matemática: baseia-se nas leis da física que caracterizam um sistema particular, como as leis da massa, energia e momento;
- Análise experimental: baseia-se nas medidas ou observações do sistema.

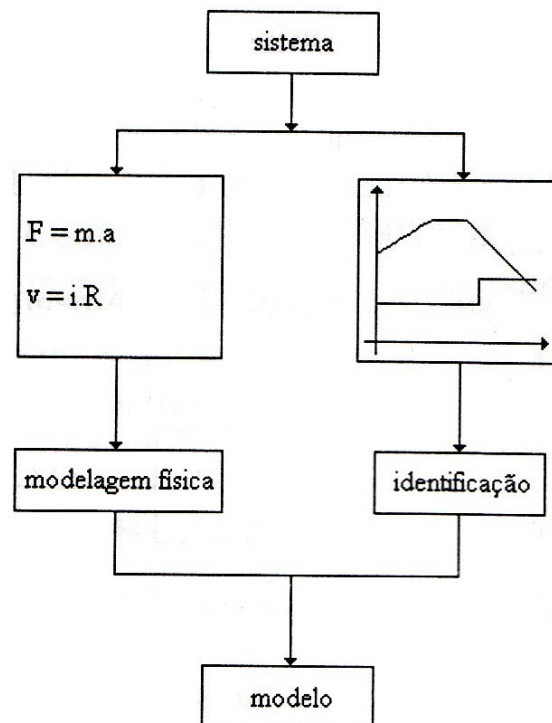


Figura 2.2 Princípios para a construção de um modelo matemático.

(Fonte: Coelho, 2004)

Estes procedimentos propiciam a obtenção de modelos que representam a dinâmica do sistema (processo ou planta). Para fins de controle de processos, não se pretende encontrar um modelo matemático exato, mas um modelo adequado para uma determinada aplicação. Na prática, utiliza-se a hipótese básica, para a elaboração de modelos, de que processos reais, em geral, não necessitam obrigatoriamente de modelos complexos (Hang e Chin, 1991).

Um modelo é uma representação matemática de um sistema. Por ser um análogo matemático do sistema, espera-se que o modelo seja representativo das principais características do sistema real. No contexto de identificação, o modelo é aquilo que é obtido para representar o sistema real (Aguirre, 2007).

Alguns dos diferentes propósitos para a utilização de modelos matemáticos em automação industrial são: previsão, análise e projeto de sistemas de controle, supervisão e otimização de processos.

Neste trabalho, o sistema é formado pelo conjunto turbina hidráulica-gerador elétrico, como foi definido na Seção 1.4.

2.3 Métodos de controle de tensão e velocidade na geração de energia elétrica em MCHs.

Como poderá ser visto em próximo item, uma mudança na demanda da potência ativa gerada, afeta essencialmente à frequência; enquanto que uma mudança na potência reativa afeta principalmente à amplitude da tensão. A interação entre os controladores de tensão e frequência (velocidade) é geralmente fraca, o que justifica uma análise de forma independente.

Controle de Tensão.

A potência reativa dos geradores síncronos se controla por meio da excitação; o meio primário para o controle de potência reativa é o sistema de controle de excitação utilizando o regulador automático de tensão AVR (*automatic voltage regulator*), a localização comum do regulador no gerador é mostrada na Figura 2.3.

Como já foi dito na Seção 1.3, a função do AVR é de manter a amplitude da tensão nos terminais do gerador a um nível especificado; a seguir explicamos como é que é feito isto: um acréscimo na demanda de potência reativa vem acompanhado por uma queda na amplitude da tensão nos terminais do gerador; depois a amplitude de tensão é detectada através de uma das fases da máquina e a tensão é retificada e comparada com um sinal de corrente direta; então o sinal de erro amplificado controla o enrolamento de campo e acrescenta a tensão nos terminais do excitador. Portanto, a corrente do enrolamento de campo aumenta, o que dá como resultado um acréscimo

da FEM gerada; a geração de potência reativa é aumentada e atinge um novo equilíbrio ao mesmo tempo em que se aumenta a tensão nos terminais do gerador a um valor desejado.

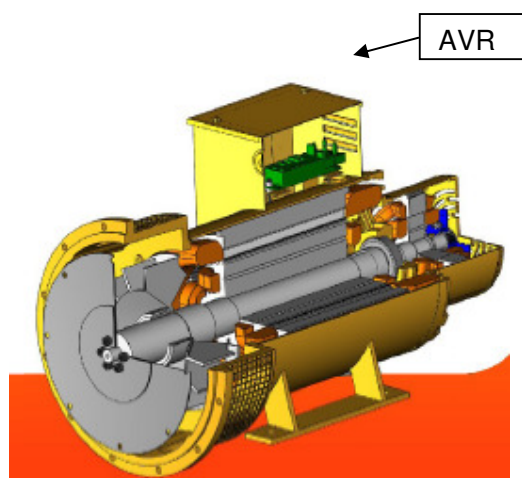


Figura 2.3 Gerador síncrono com AVR.

Controle de Velocidade.

Diferentemente das grandes centrais, as MCHs que operam em áreas distantes são relativamente sensíveis às variações da potência hidráulica de entrada, assim como a potência elétrica de saída, ou seja, à carga elétrica; é por essa razão que é preciso um controle de velocidade de ação rápida. Nem sempre é possível usar para isto um regulador clássico importado, dado que seu preço pode ser maior que o custo da turbina e do gerador. Por outro lado, o controle manual requer a atenção constante de um operário. Portanto, no laboratório do Instituto de Hidráulica e Hidrologia da Universidade Mayor de San Andrés (IHH-UMSA) em La Paz – Bolívia foi desenvolvido um regulador eletrônico de carga (controlador de velocidade) com as seguintes características (Montaño, 2000):

- Teste de frequência, processando o sinal digitalmente.
- Operação monofásica ou trifásica.
- Potência máxima controlada de 100 [kW].
- Tolerância máxima de 0,2 [Hz] a 50 [Hz].
- Proteção contra excesso de velocidade em caso de falha no circuito de dissipação de carga ou desconexão da carga principal (usuários).
- Proteção em caso de vazão insuficiente.

- Cada controlador de velocidade construído até a data tem sido submetido a muitos ensaios no laboratório e apresentam ótimo desempenho nas centrais onde operam.

Na figura 2.4 é mostrado o esquema geral de uma Micro Central Hidroelétrica, onde pode se ver a localização comum do AVR, do controlador eletrônico de velocidade e dos diferentes instrumentos de medição, como o amperímetro e os medidores de freqüência e de tensão.

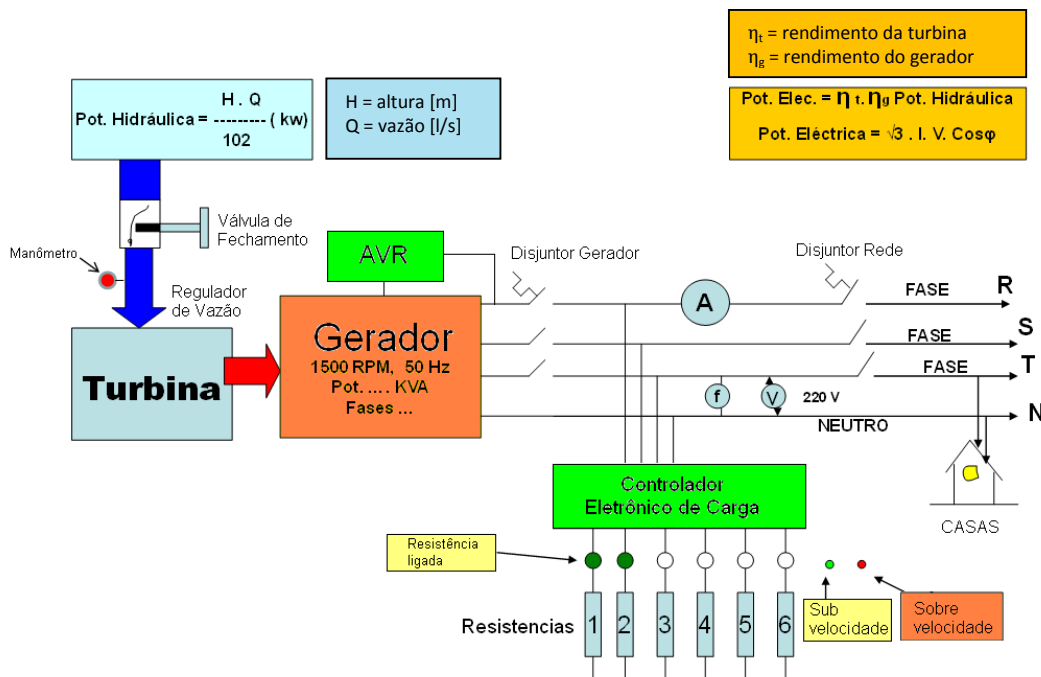


Figura 2.4 Esquema geral de uma MCH.

(Fonte: Elaboração própria do autor baseada na experiência profissional na área)

2.4 Simulação Teórica do Grupo Gerador Síncrono – Turbina Hidráulica.

Apresenta-se a seguir modelos existentes na literatura especializada para realizar as simulações de um gerador síncrono e de uma turbina hidráulica.

2.4.1 Função de Transferência de uma Turbina Hidráulica.

O modelo mais simples ou “clássico” em forma de função de transferência que representa uma turbina hidráulica tem a característica de representar as mudanças na

potência de saída da turbina em resposta às variações na abertura da válvula para uma turbina ideal e sem perdas, este modelo corresponde à seguinte expressão (Vanfretti, 2005):

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_v} = \frac{1 - \tau_w s}{1 + \frac{1}{2} \tau_w s} \quad (\text{eq. 2.1})$$

Onde:

- ΔP_m , é a potência mecânica no eixo da turbina.
- ΔP_v , é a potência na saída da válvula.
- τ_w , é a constante de tempo d'água ou “*water starting time*”.

O modelo não ideal de turbinas hidráulicas pode ser obtido considerando a expressão geral para valores de perturbação da velocidade d'água e da potência da turbina (Kundur, 1993).

A função de transferência do modelo não ideal é:

$$\frac{\Delta P_v}{\Delta P_m} = a_{23} \frac{1 + (a_{11} - a_{13} a_{21} / a_{23}) \tau_w s}{1 + a_{11} \tau_w s} \quad (\text{eq. 2.2})$$

Os coeficientes “ a_{ij} ” variam consideravelmente de uma turbina para outra. Os coeficientes a_{11} e a_{13} são as derivadas parciais do fluxo com respeito à abertura da válvula, e os coeficientes a_{21} e a_{23} são as derivadas parciais da saída de potência da turbina com respeito à abertura da válvula (Vanfretti, 2005).

2.4.2 Modelo do Gerador Síncrono.

Hoje em dia existem modelos amplamente difundidos da máquina síncrona, os quais se baseiam na transformação de Park (Chee-Mun, 1998). Os modelos matemáticos do gerador dependem fortemente da determinação correta dos parâmetros da máquina, o que faz com que estes modelos nem sempre sejam representativos do comportamento dinâmico da planta.

Na figura 2.5, apresenta-se o diagrama de blocos em *Simulink* da máquina síncrona:

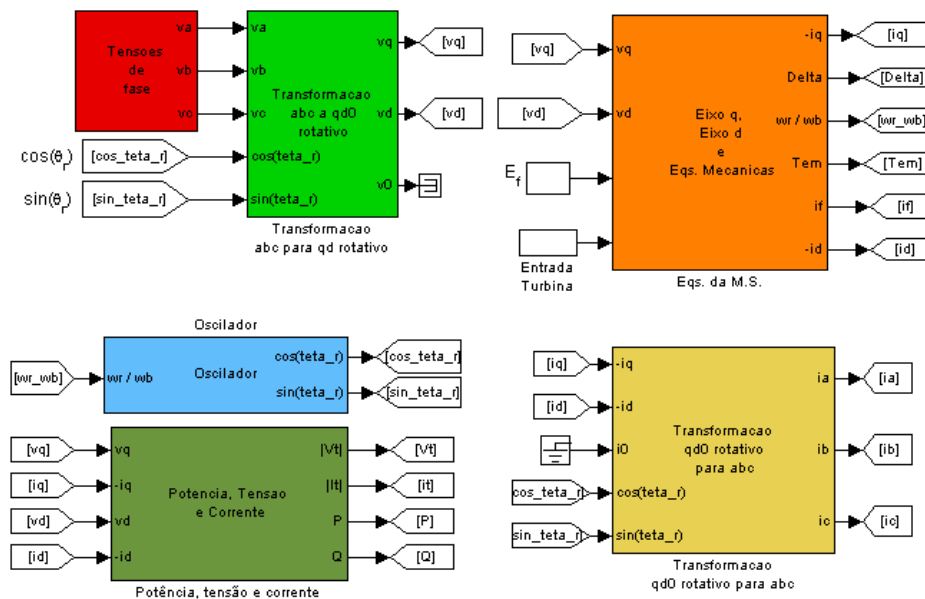


Figura 2.5 Diagrama de blocos de um gerador síncrono.

(Fonte: Vanfretti, 2005)

A descrição do procedimento matemático, transformações e da programação das equações que descrevem o comportamento do gerador síncrono estão fora do objetivo do trabalho; para maior informação sobre estes procedimentos podem-se consultar as referências citadas.

Entretanto, nesta seção tenta-se mostrar a dificuldade de se obter um modelo para simulação que possa representar com exatidão o comportamento dinâmico de um determinado gerador devido, entre outras razões, à determinação dos parâmetros da máquina ser inexata e pouco confiável por diversos motivos, como por exemplo: inexatidão nas medições, erros dos instrumentos, ensaios mal feitos.

Alguns dos parâmetros necessários para poder realizar a simulação em *Simulink* são os seguintes: reatância síncrona, reatância transitória, reatância subtransitória, constante de tempo transitório de circuito aberto, indutância de fuga do estator, resistência de armadura, etc (Kundur, 1993).

Algumas alternativas de medição e analíticas que têm sido propostas e utilizadas para obter informação para melhores modelos, são as seguintes: ensaios de

curto-circuito melhorados, resposta em frequência, análise dos dados de desenho da máquina.

Também, para poder desenvolver o modelo matemático da máquina síncrona deve se considerar as seguintes suposições (Vanfretti, 2005):

- Os enrolamentos do estator estão senoidalmente distribuídos ao longo do entreferro.
- As ranhuras do rotor não causam uma variação apreciável das indutâncias devidas à posição do rotor.
- A histerese magnética é desprezível.
- Os efeitos da saturação magnética são desprezíveis.

As primeiras três suposições são razoáveis. A principal justificativa vem da comparação da operação calculada baseada nestas suposições e a operação medida nas máquinas reais. A última suposição é feita por conveniência para facilidade da análise.

2.4.3 Modelo Geral do conjunto Gerador – Turbina Hidráulica.

Para poder mostrar como seria um diagrama de blocos com a integração dos sistemas de controle de potência ativa – frequência e potência reativa – tensão através do *Simulink*, apresenta-se a Figura 2.6, onde o LFC (*load frequency control*) se encontra dentro do bloco da máquina síncrona.

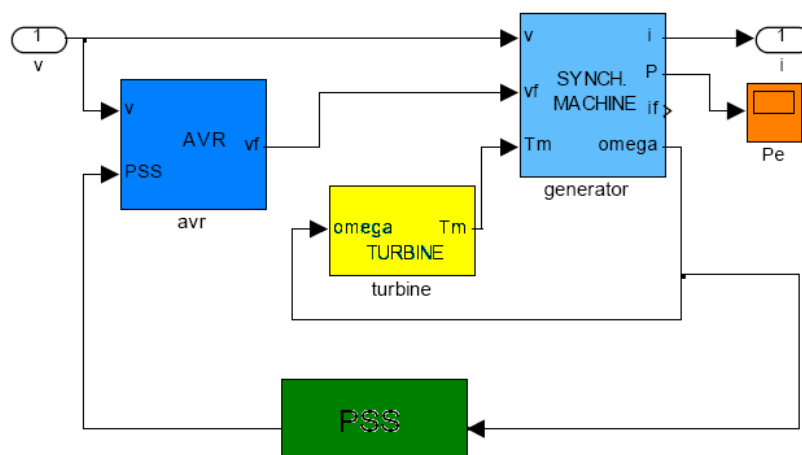


Figura 2.6 Modelo em *Simulink* do gerador síncrono com seus controles.

(Fonte: Thierry, 2004)

O PSS (*Estabilizador de Sistema de Potência*) é utilizado como um meio de melhorar o amortecimento das oscilações. A sua função é de somar um sinal adicional que possa compensar as oscilações do sinal de saída. O PSS pode ser do seguinte tipo (Vanfretti, 2007):

- Baseado no sinal de velocidade do eixo do rotor.
- Baseado na potência elétrica.
- Baseado na frequência.

Ao finalizar este capítulo pode-se dizer que, um modelo teórico utilizado para simulação pode ser de grande ajuda para a análise da estabilidade do sistema, porém, também deve-se notar que se os parâmetros da máquina síncrona não forem corretamente calculados e obtidos, o sistema simulado não poderá representar o comportamento real dinâmico da planta. É por esta razão, que tendo a possibilidade de obter dados experimentais de geradores reais a serem usados em futuros projetos de eletrificação com MCHs, no IHH - UMSA fizeram-se os ensaios correspondentes no sistema (gerador síncrono – turbina hidráulica) com a finalidade de poder obter um modelo que possa representar o mais próximo possível a resposta real dinâmica do sistema; e que seja a base de futuras pesquisas no que se refere a controle de velocidade e tensão em pequenos sistemas isolados de geração hidroelétrica.

3. MATERIAIS, MODELO DINÂMICO E CONTROLE PROPOSTO.

Os elementos usados nos ensaios de laboratório são apresentados neste capítulo (Seção 3.1); depois é descrita a montagem da planta, é colocada em operação e o funcionamento da mesma em regime permanente.

A metodologia seguida para a obtenção do modelo dinâmico é descrito a detalhe na Seção 3.5; e por último, com a finalidade de poder projetar um controlador de tensão que possa representar o comportamento do AVR real do gerador, propõem-se duas estruturas diferentes do modelo do processo e se efetua a sintonia do controlador para cada uma delas (Seção 3.4).

3.1 Elementos Usados nos Ensaios de Laboratório.

No presente trabalho, denomina-se sistema ou planta ao conjunto gerador – turbina hidráulica, sem considerar o controlador de tensão (AVR) nem o controlador de velocidade. A seguir, os elementos usados nos ensaios de laboratório.

3.1.1 Gerador.

O gerador utilizado nos ensaios de laboratório no IHH – UMSA (La Paz, Bolívia) pode ser visto na Figura 3.1, e a seguir suas características:



Figura 3.1 Gerador utilizado.

Indústria:	Peruana	
Potência nominal:	72	kW
Tensão nominal:	380/220	V
Fases:	3	
Frequência:	50	Hz
Velocidade nominal:	1500	rpm
f.p. ($\cos\phi$):	0.8	
Tensão de excitação:	94	V
Corrente de excitação:	6.4	A
³ Isolamento tipo:	B	

⁴Grau de proteção IP:23

O gerador⁵ é síncrono do tipo 'BRUSHLESS' (a Figura 3.2 mostra um esquema do sistema de excitação do mesmo), de três fases com conexão em estrela com ponto neutro; uma tensão de linha de 380 V e tensão de fase de 220 V, frequência de 50 Hz e fator de potência de 0.8.

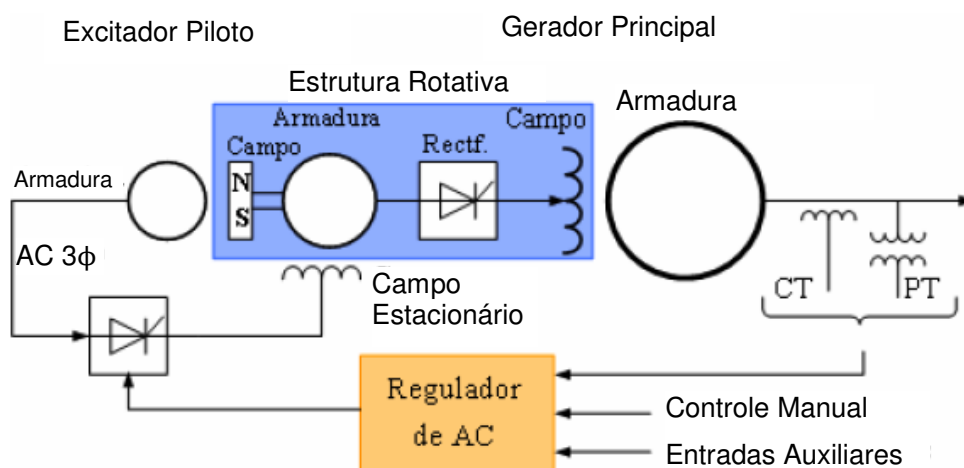


Figura 3.2 Sistema de excitação do gerador sem escovas.

(Fonte: Vanfretti, 2005)

³ O aumento permissível de temperatura, para uma temperatura normal ambiente de 40 °C é de 90 °C e a temperatura máxima limite do lugar mais quente do gerador é de 130 °C para este tipo de isolamento.

⁴ Proteção contra o contato dos dedos com partes internas em sobre tensão ou em movimento. Proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos de tamanho médio. Proteção contra chuva. A queda d'água em forma de chuva, em ângulo não superior a 60° em relação à vertical, não deve ter efeito prejudicial.

⁵ Para maior informação sobre o gerador ver o apêndice 1.

O regulador automático de tensão AVR (*Automatic Voltage Regulator*) é um equipamento compacto que foi desenvolvido para regulação de tensão em geradores síncronos sem escovas. Seu circuito de controle e regulação utiliza semicondutores e circuitos integrados; não possui componentes mecânicos para escovamento e seu sistema é totalmente estático. Também possui ajuste interno de tensão de referência via *trimpot* e externo via potenciômetro.

A estabilidade do sistema de controle é ajustada através de um *trimpot* possibilitando uma ampla faixa de ajuste. Dotado de proteção contra subfrequência (limitador U/F que impede que o gerador seja excitado durante o desligamento ou a redução da rotação), seu ponto de intervenção é ajustável via *trimpot*, e a frequência nominal de operação é configurável para 50 ou 60 Hz. A estrutura do regulador é apresentada na Figura 3.3.

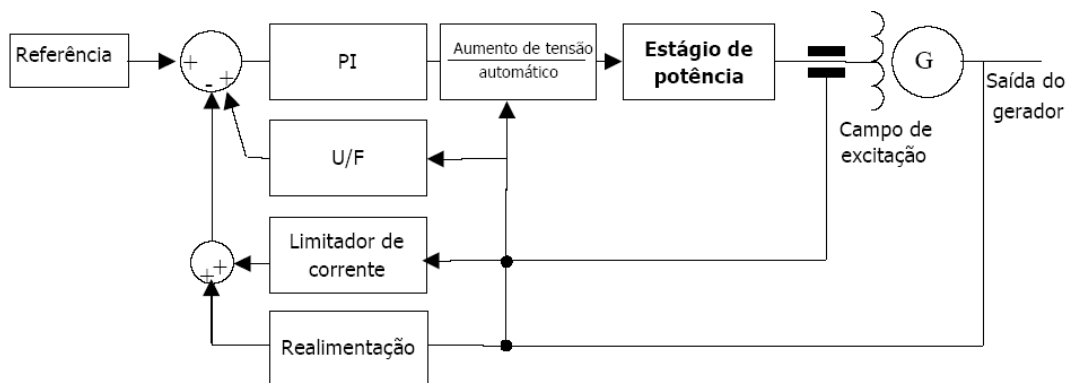


Figura 3.3 Diagrama de blocos do AVR.

(Fonte: Manual do Regulador de Tensão Analógico GRGT-06 Ind. Grameyer)

O funcionamento do AVR é baseado na comparação do valor eficaz da tensão de realimentação com a referência de tensão, ajustada pela soma do *trimpot* de ajuste de tensão com o *trimpot* externo. O erro é processado pela malha de realimentação cujo valor determina o ângulo de disparo do tiristor que pode variar de 0 a 180°, controlando desta forma a tensão de saída do gerador. Com zero graus de disparo tem-se zero volts na saída do retificador, e com disparo de 180 graus, tem-se a saída máxima dada pelo retificador de meia onda.

O início de geração se dá através da tensão residual do gerador. Após a tensão atingir aproximadamente 10% da nominal, o regulador controla a tensão do gerador fazendo com que a tensão suba de acordo com a rampa inicial em

aproximadamente 1 segundo, até atingir a tensão nominal. A partir deste momento, a malha de controle manterá a tensão de saída do gerador constante de acordo com o valor ajustado.

Na Figura 3.4, apresenta-se o diagrama de controle do regulador de tensão GRGT-06. O controle é semelhante ao ST1A, apresentado pela IEEE, aplicado a sistemas onde o retificador é alimentado a partir da saída do gerador (Type ST – Static Excitation Systems), seja diretamente ou por bobinas auxiliares ou por transformador.

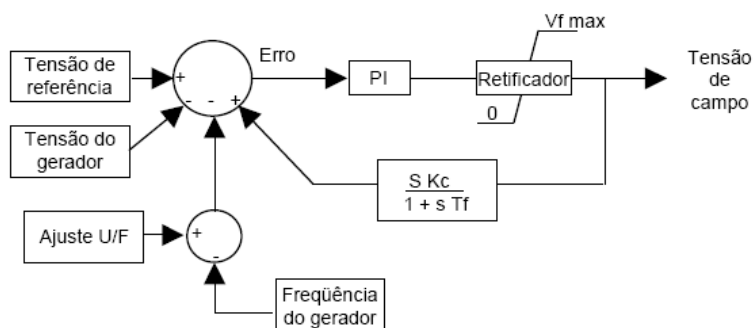


Figura 3.4 Diagrama de controle do AVR.

(Fonte: Manual do Regulador de Tensão Analógico GRGT-06 Ind. Grameyer)

Na figura 3.5 pode-se ver um esboço geral do AVR utilizado nos ensaios em laboratório, com as dimensões físicas do mesmo⁶.

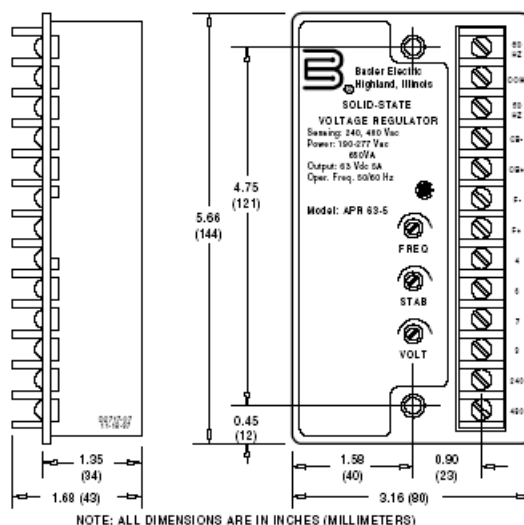


Figura 3.5 Diagrama de esboço do AVR GRGT-06.

(Fonte: Manual do Regulador de Tensão Analógico GRGT-06 Ind. Grameyer)

⁶ Para maior informação sobre o AVR ver o apêndice 2.

3.1.2 Turbina.

Seguem as características da turbina utilizada nos ensaios de laboratório e na Figura 3.6 pode-se ver uma fotografia dela.

Indústria:	Boliviana	
Turbina tipo:	Banki	
Vazão:	30	l/s
Altura:	40	m
Potência no eixo:	8	kW

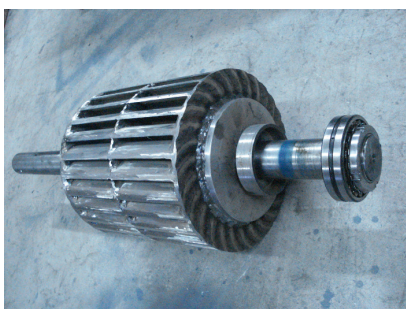


Figura 3.6 Turbina tipo Banki de fabricação boliviana.

Deve-se mencionar que os ensaios no laboratório estiveram restritos às condições dos equipamentos existentes no laboratório do IHH (isto explica, por exemplo, a diferença entre as potências do gerador e da turbina)

3.1.3 Bomba d'água.

As características da bomba elétrica utilizada para simular a queda d'água no laboratório são:

Indústria:	Norte - Americana	
Potência:	70	Hp, 3 Φ
Altura:	50	m
Vazão:	60	l/s

3.1.4 Definição das Variáveis do Processo.

Baseado nos objetivos do projeto, para a planta define-se a necessidade de medir as seguintes variáveis: tensão de excitação do gerador, tensão de saída do gerador, frequência da onda do sinal de saída, e a potência elétrica de saída para tê-la como um dado de referência.

A tensão de excitação do campo influencia diretamente na tensão de saída do gerador dado que (Kosow, 1993):

$$E_{ef} = 4,44\phi N_p f \times 10^{-8} [V] \quad (\text{eq. 3.1})$$

Onde:

E_{ef} é a tensão efetiva por fase.

ϕ é o fluxo por pólo em Maxwells.

N_p é o número total de espiras de uma fase na armadura.

f é a frequência em Hertz.

E o fluxo é dado por (Kosow, 1993):

$$\phi = \frac{0,4\pi IN}{\mathfrak{R}} \quad (\text{eq. 3.2})$$

Onde:

ϕ é a intensidade de campo magnético desejada para gerar uma FEM na máquina síncrona, em Maxwells.

\mathfrak{R} é a relutância total da trajetória fechada.

IN são os ampére – espira totais da força – magnetomotriz que deve produzir o enrolamento de campo.

A equação anterior é chamada de “lei Circuital de Ampére do campo magnético”.

A medição da frequência do sinal de saída é feita com o objetivo de ter certeza que o gerador encontra-se trabalhando à velocidade nominal e constante de operação.

3.1.5 Instrumentação e Equipamento Utilizado.

Devido à necessidade de monitoração e controle das variáveis do processo, foi necessário o uso de vários instrumentos para que o comportamento da planta pudesse ser corretamente monitorado.

Como os instrumentos são, em sua grande maioria, caros e de difícil aquisição por instituições públicas, seguiram-se alguns critérios iniciais:

- Aproveitar instrumentos já existentes no laboratório.
- Otimizar gastos com os equipamentos e materiais necessários.
- Utilizar alguns equipamentos existentes para traçar as respostas da planta a diferentes perturbações.

Os instrumentos e equipamentos utilizados nos diferentes experimentos foram os seguintes:

- Transformador de 220 [V]/24 [V]_{AC}, 2 [A] com ponto médio.
- Pontes retificadoras de onda completa, uma de 600 [V] e 25[A] e outra de 600 [V] e 2 [A].
- Registrador Philips de dois canais modelo PM 8222, para obtenção da resposta da planta.
- Multímetros.
- Resistências de distintos valores usados como divisores de tensão para possibilitar a utilização do registrador.
- 6 Resistências de ar de 1000 [W] cada uma e 3 lâmpadas de 60 [W] utilizadas como carga elétrica à saída do gerador.
- Osciloscópio digital de dois canais.
- Válvula para controle de vazão de entrada à turbina tipo cortina de 4 polegadas.
- Governador de velocidade utilizado para manter a frequência de geração constante durante os ensaios.

- Chave comutadora de três posições, utilizado para aplicar os distintos degraus.
- Potenciômetro de 1 [k Ω] utilizado para aplicar um degrau na tensão de referência do AVR.

3.2 Montagem da Planta.

No laboratório do Instituto de Hidráulica e Hidrologia (IHH) da UMSA já se tinha instalada toda a estrutura desde a bomba até a turbina hidráulica (através das tubulações mecânicas e conexões), porém, não se tinha o gerador instalado nem as cargas elétricas. Então, teve-se que trazer o gerador (Figura 3.7), que iria servir para realizar os ensaios, com grua e colocá-lo na posição certa para depois segurá-lo com ajuda de parafusos, tendo cuidado de passar antes a banda pelas polias e garantir assim a transmissão de potência mecânica.



Figura 3.7 Montagem da planta no laboratório do IHH - UMSA.

Imediatamente depois de ter feito a instalação do gerador, fez-se a conexão da carga elétrica (no caso, resistências de ar e lâmpadas) nas três fases, tentando ter uma carga balanceada. Nas próximas seções se pode ver a instalação dos diferentes instrumentos e equipamentos utilizados em cada ensaio realizado.

3.3 Posta em Operação da Planta no Laboratório.

Inicialmente se deve ter a válvula de controle de vazão totalmente aberta para que a água não chegue à turbina, depois ligar a bomba e começar fechar a válvula devagar.

Na Figura 3.8 pode-se ver a planta real montada no laboratório do IHH e na Figura 3.9 mostra-se o esquema geral da mesma.

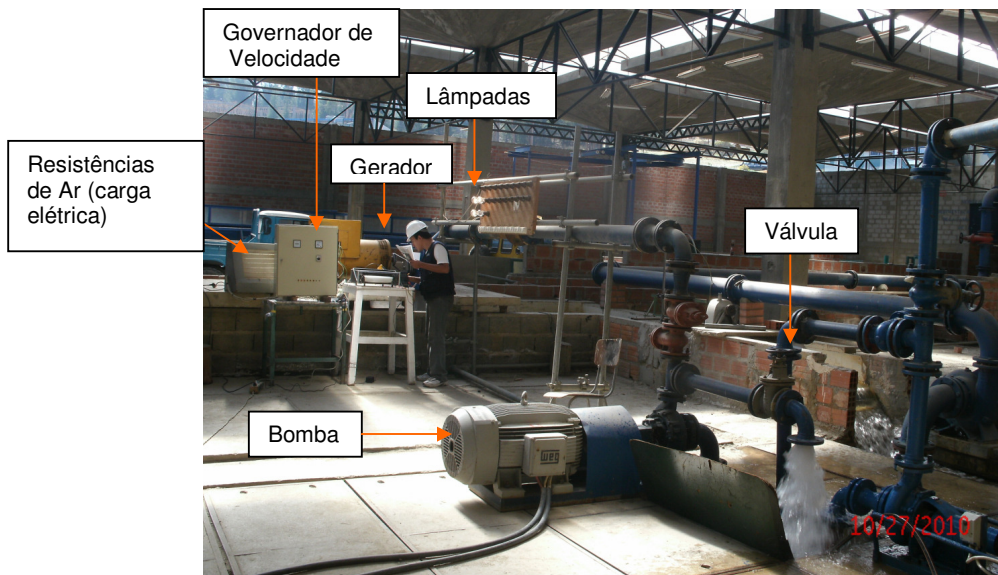


Figura 3.8 Planta montada para experimentação.

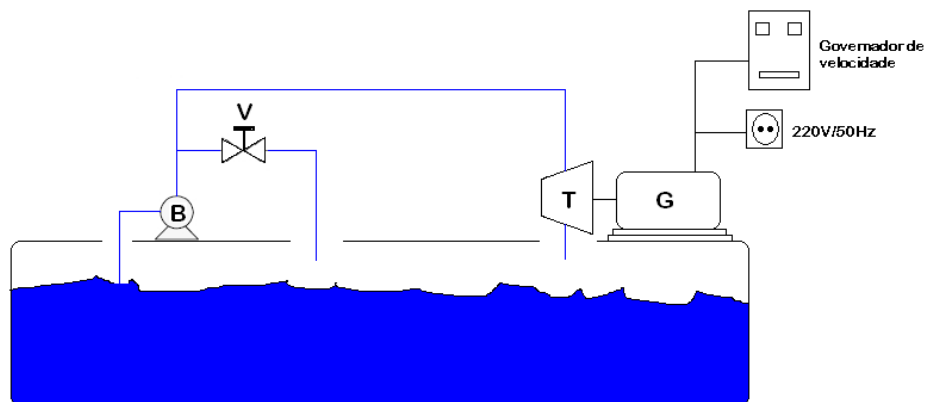


Figura 3.9 Esquema da planta montada para experimentação.

É importante ver que com a válvula totalmente fechada toda a vazão possível irá à turbina, e com a válvula totalmente aberta chegará muita pouca água ao sistema.

3.4 Operação da Planta em Regime Permanente.

Após ter ligado a bomba, ir fechando a válvula de controle de vazão devagar, com a finalidade de não ter uma batida d'água forte na turbina, até chegar aos valores nominais de geração de energia elétrica. O monitoramento da planta deve ser constante, para ter certeza que a planta encontra-se trabalhando dentro dos valores desejados (Figura 3.10).



Figura 3.10 Operação e monitoramento da planta.

Deve-se notar que inicialmente o gerador encontra-se ligado a cargas elétricas externas (resistências de ar e lâmpadas), isto para evitar que o gerador funcione em vazio (o gerador pode ficar danificado se funciona em vazio entre 645 e 1 400 rpm, segundo o fabricante)⁷.

3.5 O Modelo Dinâmico

3.5.1 Método de Identificação Dinâmica através do Teste Degrau.

Os sinais de teste de entrada comumente utilizados são: impulso, degrau, rampa e senoidal. A Figura 3.11 ilustra o procedimento de avaliação da dinâmica de um processo perante sinais de teste.

⁷ Ver apêndice 1, Manual do Gerador RANGO, Pg. 13, Operação.

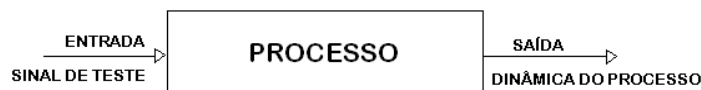


Figura 3.11 Avaliação de processos perante sinais de teste.

Para a identificação das características essenciais de um processo sob avaliação, é possível utilizar uma entrada degrau. Assim, o chaveamento abrupto através de um acréscimo ou decréscimo na amplitude do degrau pode ser estabelecido pela variação da tensão (como neste caso) ou pela abertura ou fechamento de uma válvula de entrada.

As características e comportamento de um sistema (como por exemplo, estabilidade, dinâmica assimétrica, atraso) podem ser obtidos a partir do conhecimento da resposta ao degrau. Também se pode dizer que um sistema é considerado linear pela determinação da sua resposta ao degrau para diferentes amplitudes no sinal de entrada (teorema da superposição): “um sistema é linear se a forma (curva) da resposta ao degrau não depende da amplitude do sinal de entrada” (Coelho, 2004). Porém, o teste degrau tem alguns inconvenientes que são apresentados a seguir (Seborg, Edgar e Mellichamp, 1989):

- É difícil introduzir um degrau perfeito. Usualmente os equipamentos como bombas e válvulas não permitem mudanças instantâneas, porém se o tempo em que ocorre a rampa é muito pequeno comparado às constantes de tempo do processo, pode-se obter uma boa aproximação. Para a planta (gerador - turbina) obteve-se uma boa realização de degraus na variável de entrada tensão de excitação, com a utilização de uma chave comutadora, conforme mostram os Itens 3.5.3 e 3.5.4.
- O modelo do processo geralmente não é de primeira ordem nem linear. Só os processos mais simples terão este comportamento. Em processos complexos, como a geração de energia hidroelétrica, o desenvolvimento do modelo da planta (gerador - turbina) é de difícil execução, devido ao grande número de equações diferenciais e com um considerável número de parâmetros com comportamentos não conhecidos. No entanto, o propósito é obter um modelo o mais simples

possível que possa refletir de forma aproximada o comportamento real da planta.

- Os dados de saída usualmente são corrompidos por ruído, ou seja, contém componentes indesejáveis para a saída, que podem proceder da instrumentação utilizada. Neste trabalho, fez-se uma aproximação da curva com ruído por uma curva *Sigmoidal* para tentar minimizar os ruídos, como mostrado no Item 3.5.4.
- Outra entrada diferente (distúrbio) pode mudar durante o teste sem o conhecimento do operador. Tentando diminuir este efeito foram feitos muitos ensaios na planta, das quais se analisou as que apresentaram melhores resultados ao teste degrau.

Os parâmetros a serem estimados dos resultados obtidos de um teste degrau são: o ganho do processo, a constante de tempo e o tempo morto. A maioria dos métodos para sintonia de controladores precisa desses três parâmetros para estimar os parâmetros do controlador. Para um processo qualquer, o 'ganho' indica quanto é que a variável controlada muda para uma determinada variação no sinal de saída do controlador; a 'constante de tempo' indica quão rápido mudam as variáveis controladas, ou seja, caracteriza a velocidade com que o sistema responde a certa entrada (Aguirre, 2007); e o 'tempo morto' indica quanto tempo demora o controlador em detectar o começo da variação no transmissor de saída (Corripio, 2001).

Alguns exemplos de resposta ao degrau em malha aberta (curva de reação da planta) são mostrados na Figura 3.12.

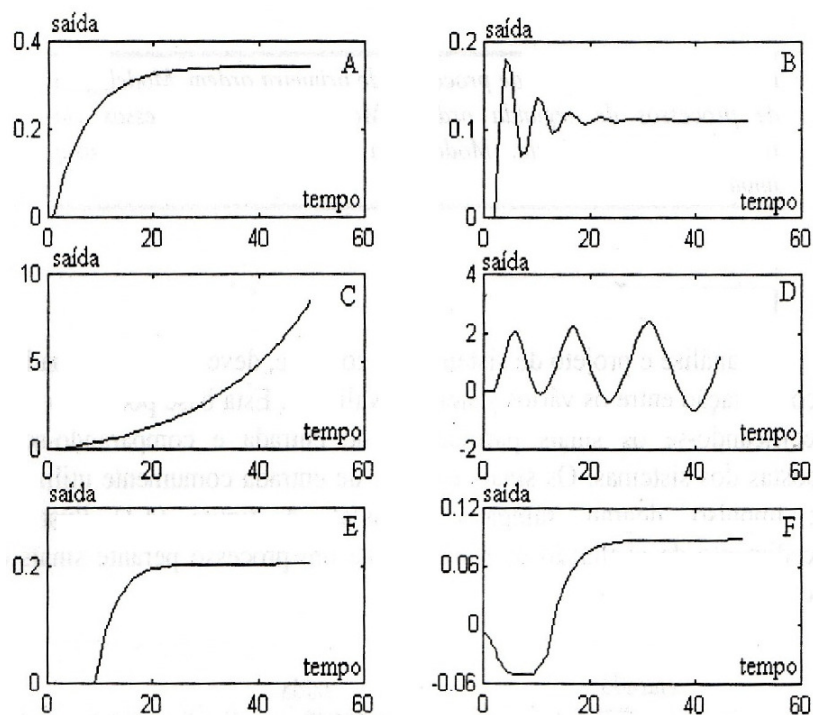


Figura 3.12 Respostas típicas ao degrau em malha aberta.

(Fonte: Coelho, 2004)

Assim, a resposta ao degrau é um procedimento adequado para caracterizar, de forma preliminar, a dinâmica de um processo por meio da simples interpretação gráfica (Brosilow e Joseph, 2002).

3.5.2 Obtenção de Modelos de Primeira Ordem com Tempo Morto.

Dado que o sistema pode sofrer perturbações tanto positivas quanto negativas (ligamento ou desligamento da carga elétrica à saída do gerador), neste estudo utilizaram-se degraus positivos e negativos com a finalidade de observar o comportamento da planta diante estas perturbações. Portanto, obtiveram-se duas funções de transferência que descrevem a dinâmica do processo (Figura 3.13).

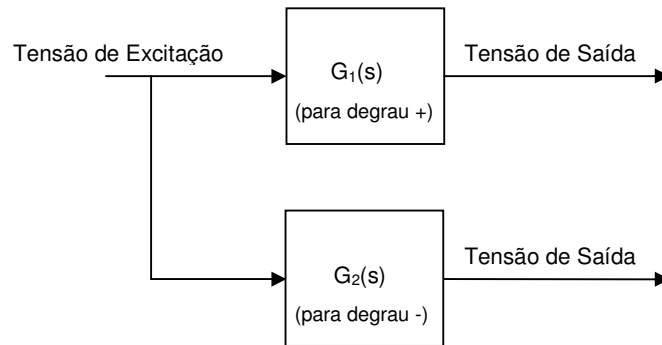


Figura 3.13 Variável controlada e variável manipulada com funções de transferência para um degrau positivo e outro negativo.

(Fonte: Ferreira, 2000)

Os testes de entrada tipo degrau foram feitos na tensão de excitação mantendo-se a velocidade do gerador fixa. Obtidas as curvas de resposta prosseguiu-se à estimativa de um modelo de primeira ordem com tempo morto.

O ganho estático é um dos mais importantes parâmetros do processo. É uma medida da sensibilidade da saída do processo a mudanças na entrada do mesmo. O ganho é definido como a mudança no estado estável na saída pela mudança na entrada que o causou (Corripio, 2001):

$$K = \frac{\text{Variação}_{na_saída}}{\text{Variação}_{na_entrada}} = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (\text{eq. 3.3})$$

Onde ' K ' é o ganho do processo. A constante de tempo ' τ ' é uma medida de quanto tempo demora o processo em alcançar o novo estado estável após o início da variação na saída for detectada. O tempo morto ' θ ' é uma medida de quanto demora a ser detectada a variação inicial na saída depois de ocorrida a variação na entrada.

Existem vários métodos para estimar a constante de tempo de um processo e o tempo morto a partir da resposta ao degrau. O primeiro destes métodos foi proposto originalmente por Ziegler e Nichols. Podemos chamar este método de 'método da tangente'. Outros dois métodos, o 'método do ponto e da tangente' e o 'método dos dois pontos', dão resultados mais próximos em comparação com o 'método da tangente'.

Nos métodos de Ziegler e Nichols (ZN) e Hägglund (HAG, 'método do ponto e da tangente'), os parâmetros K , τ e θ são calculados conforme é ilustrado na Figura 3.14. A reta traçada corresponde à tangente no ponto de máxima inclinação da curva de reação. O atraso θ nos dois métodos, é calculado pelo intervalo de tempo entre a aplicação do degrau na entrada do processo e o instante t_1 em que a reta tangente toca a reta $y(t)=y(0)$. No método de ZN, a constante de tempo τ é determinada pelo intervalo de tempo entre t_1 e o instante t_3 em que a reta tangente toca a reta $y(t)=y_f$, enquanto que, no método de Hägglund, τ é calculado pelo intervalo entre t_1 e o instante t_2 em que a curva de resposta alcança o valor $y(t)=y(0)+0.63y_f$. O parâmetro K é calculado com a equação 3.3 (Coelho, 2004).

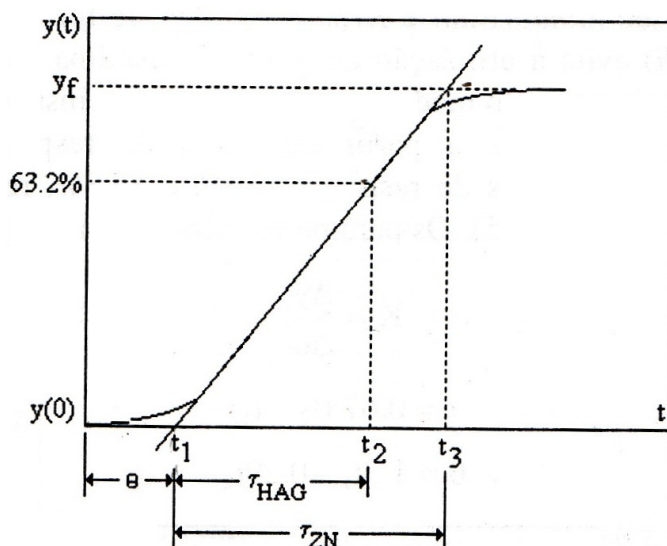


Figura 3.14 Métodos de ZN e HAG para a modelagem de processos de primeira ordem.

(Fonte: Coelho, 2004)

Podemos dizer que o 'método dos dois pontos' resulta em uma estimação mais alta do tempo morto e uma estimação mais baixa da constante de tempo do processo em comparação com os outros dois métodos. Entretanto, 'método da tangente' é o outro extremo (Corripio, 2001).

Portanto, baseado no dito anteriormente, decidiu-se por utilizar o 'método do ponto e da tangente', porém, com os resultados do primeiro teste degrau, fez-se a comparação com o 'método da tangente' e o 'método do ponto e da tangente'.

3.5.3 Procedimento para Levantamento das Curvas de Reação.

Para um processo genérico, admitindo uma malha de controle, a resposta ao degrau pode ser obtida de acordo com os seguintes passos (Mollenkamp, 1988):

- Ajustar o controlador em modo manual (isto significa malha aberta, Figuras 3.15 e 3.16).
- Aplicar uma mudança em degrau, positiva ou negativa, na saída do controlador (entrada do processo). A amplitude da mudança deve ser o grande suficiente para que se possa medi-la na saída do sistema de medição, no entanto, não tão grande para que as não linearidades do processo ocasionem uma distorção na resposta (Corripio, 2001).
- Registrar a variável de saída do processo; para isto, usar um registrador de carta contínua ou qualquer outro sistema adequado, devendo-se tomar cuidado quanto à resolução no registrador. A saída do processo $y(t)$ no tempo deve cobrir um período completo da resposta, desde a introdução do degrau até que o sistema alcance um novo estado estacionário.
- Neste caso, a variável que sofre o degrau é a tensão de excitação do gerador síncrono (Seção 3.5.4).

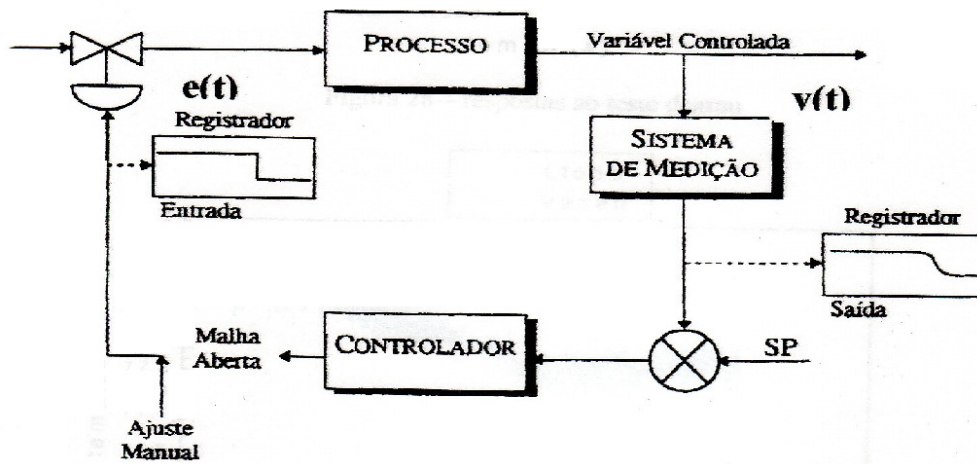


Figura 3.15 Teste da curva de reação do processo.

(Fonte: Ferreira, 2000)

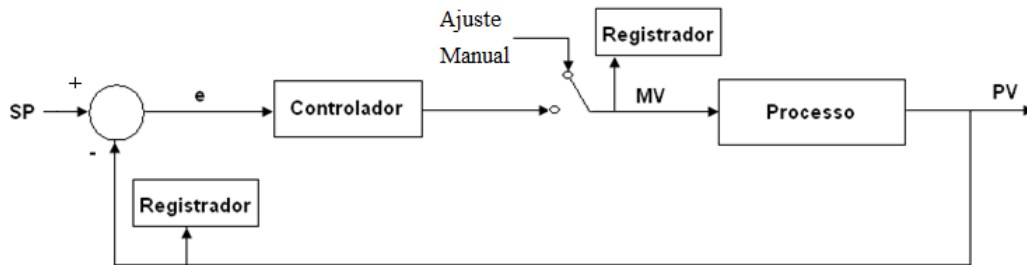
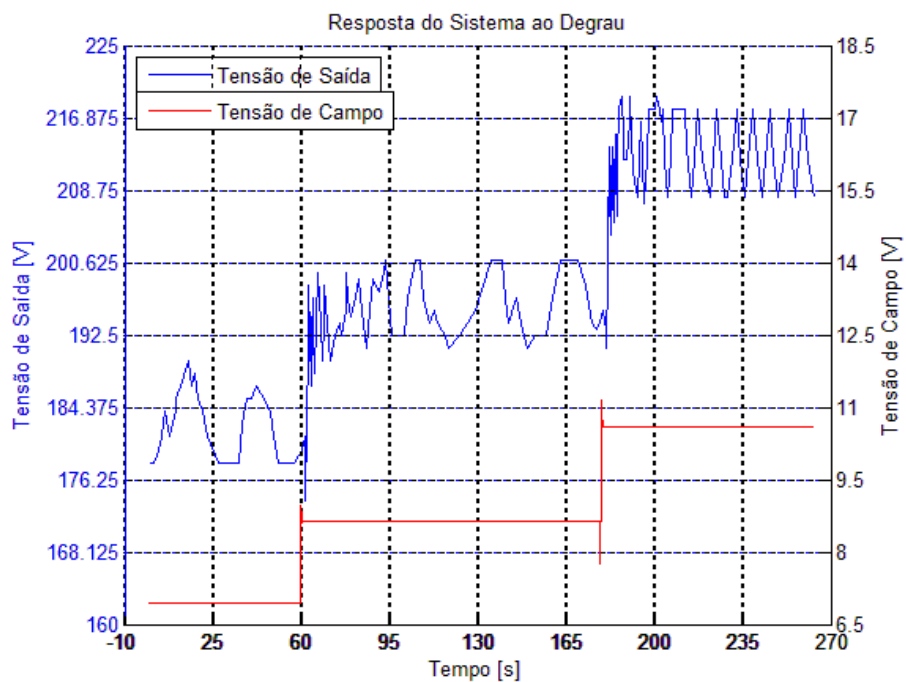


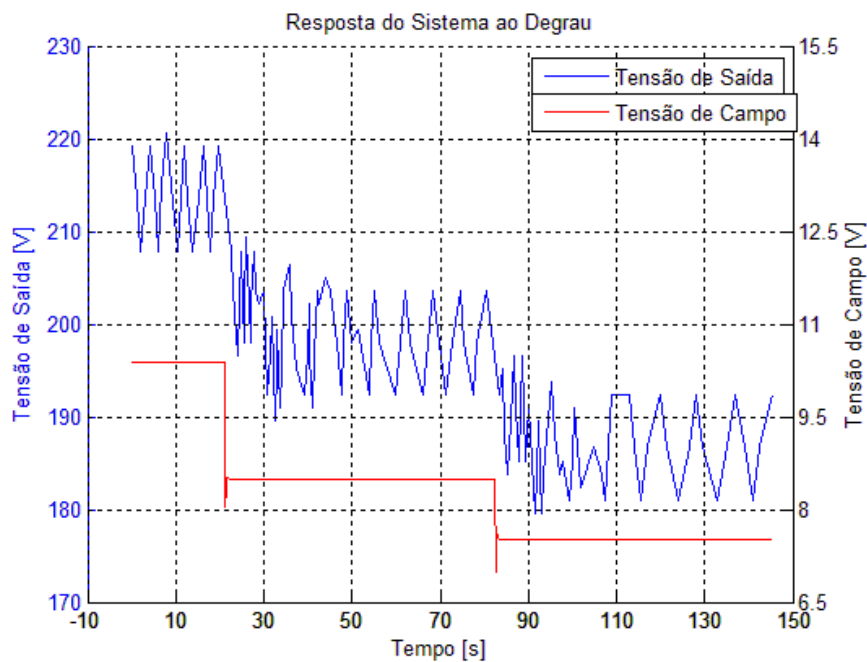
Figura 3.16 Diagrama de blocos da malha de controle com controlador em modo manual. O processo considera o conjunto gerador - turbina, MV é a saída do controlador ou a variável manipulada, PV é a variável do processo.

(Fonte: Elaboração própria do autor)

Algumas curvas reais do processo são mostradas na Figura 3.17.



a)



b)

Figura 3.17 Respostas ao teste degrau da planta. a) Degrau positivo, b) degrau negativo.

A resposta em forma de '**S**' é característica dos processos de segunda ordem ou superior, com ou sem tempo morto (Corripio, 2001). O seguinte passo é fazer coincidir a curva de reação do processo com o modelo de um processo simples para determinar os parâmetros do mesmo; a seguir isto é feito para um modelo de primeira ordem mais tempo morto.

Em ausência de perturbações e para as condições do ensaio, pode se assumir o diagrama de blocos da Figura 3.18.

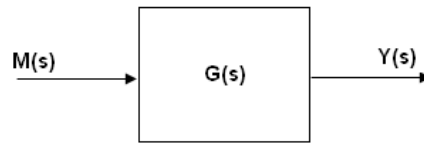


Figura 3.18 Diagrama de blocos da planta. $M(s)$ é a transformada de *Laplace* do sinal de saída do controlador, $Y(s)$ é a transformada de *Laplace* do sinal de saída da planta.

A resposta do sinal de saída pode ser escrita como:

$$Y(s) = G(s)M(s) \quad \text{eq. (3.4)}$$

Para uma mudança em degrau de amplitude Δm na saída do controlador e um modelo de primeira ordem com tempo morto (Figura 3.19), tem-se:

$$Y(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \cdot \frac{\Delta m}{s} \quad \text{eq. (3.5)}$$

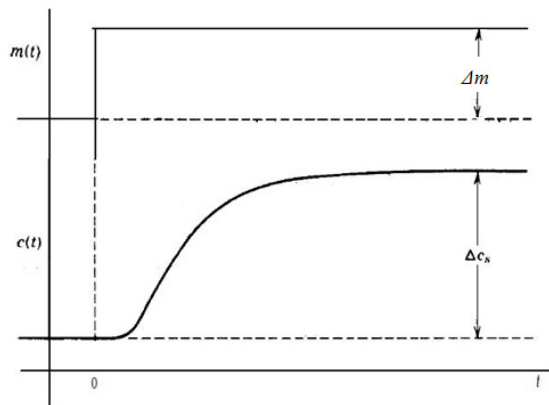


Figura 3.19 Resposta ao teste degrau do circuito aberto.

(Fonte: Corripio, 2001)

Expandindo em frações parciais, obtém-se:

$$Y(s) = K \cdot \Delta m \cdot e^{-\theta s} \left[\frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right] \quad \text{eq. (3.6)}$$

Aplicando a transformada inversa de *Laplace* e teorema da translação real para obter (Corripio, 2001):

$$\Delta y(t) = K \cdot \Delta m \cdot u(t - \theta) \left[1 - e^{-\frac{-(t-\theta)}{\tau}} \right] \quad \text{eq. (3.7)}$$

Inclui-se a função degrau unitário $\mu(t-\theta)$ para indicar explicitamente que:

$$\Delta y(t) = 0 \quad \text{para} \quad t \leq \theta$$

O termo Δy é a perturbação ou mudança na saída do processo ao respeito do seu valor inicial:

$$\Delta y(t) = y(t) - y(0) \quad \text{eq. (3.8)}$$

Na Figura 3.19 o termo Δy é a mudança em estado estacionário de $y(t)$. Da eq. (3.7) tem-se que:

$$\Delta y = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta y(t) = K \cdot \Delta m \quad \text{eq. (3.9)}$$

A partir desta equação, e tendo em conta que a resposta do modelo deve coincidir com a curva de reação do processo em estado estável, pode-se calcular o ganho em estado estacionário do processo que é um dos parâmetros do modelo:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta m} \quad \text{eq. (3.10)}$$

A equação (3.10) expressa a mesma relação da equação (3.3). O tempo morto θ e a constante de tempo τ podem ser encontrados usando-se os métodos citados na Seção 3.5.2.

3.5.4 Respostas da Planta ao Teste Degrau sem AVR. Obtenção das Funções de Transferência.

Levantam-se as funções de transferência pelo registro das curvas de reação da tensão de saída do gerador frente a degraus aplicados à tensão de excitação do campo.

O registrador analógico de dois canais utilizado permitiu traçar as curvas, que depois foram passadas para Excel com o objetivo de poder analisá-las.

O objetivo desses ensaios foi encontrar a resposta dinâmica do sistema (máquina síncrona e turbina) a perturbações na tensão de excitação (E_{exc} VS $V_{saída}$).

O circuito montado é mostrado na Figura 3.20.

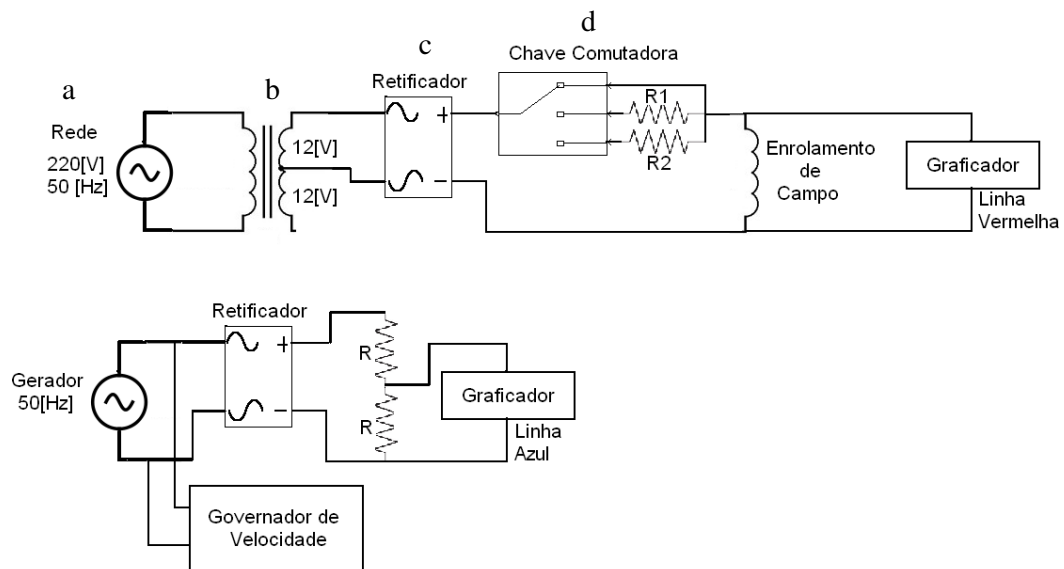


Figura 3.20 Circuito para o teste, com $R1 = 4[\Omega]$ e $R2 = 8[\Omega]$.

- Tomada da rede, 220 [V] / 50 [Hz].
- Transformador de 220 [V]/24 [V]_{AC}, 2 [A] com ponto médio.
- Ponte retificadora de onda completa de 600 [V] e 25[A].
- Chave comutadora de três posições e resistências para o divisor de tensão.

Procedimento.

Os passos seguidos para realizar o ensaio foram os seguintes:

- I. Ligar a bomba d'água.
- II. Alimentar o circuito da tensão de excitação (sem importar a posição do seletor).
- III. Ir fechando devagar a válvula d'água.
- IV. Começar gerar até chegar aos valores nominais ($n=1500$ [r.p.m.], $f=50$ [Hz]). Operação em regime permanente.
- V. Medir os valores da tensão de excitação e da tensão gerada.
- VI. Escolher escalas adequadas para o registrador.
- VII. Começar traçar.
- VIII. Dar um degrau positivo ou negativo na tensão de excitação.
- IX. Aguardar que o sistema se estabilize.
- X. Medir os valores da tensão de excitação e da tensão gerada.
- XI. Dar outro degrau positivo ou negativo na tensão de excitação.
- XII. Aguardar a que o sistema se estabilize.
- XIII. Medir os valores da tensão de excitação e da tensão gerada.

Os distintos elementos usados nos testes podem ser vistos na Figura 3.21. Todos os ensaios foram feitos a velocidade constante, com ajuda de um governador eletrônico de carga ($f = \text{cte.}$); isto foi feito devido a que o sistema é basicamente um sistema linearmente independente, ou seja, que o controle de tensão e de velocidade pode ser feito de forma independente. Se não tivesse sido usado o governador de velocidade, teríamos obtido dados que não refletiriam o comportamento real do gerador, devido a que a resposta também estaria influenciada pela inércia dos demais componentes da planta (p.e. a turbina hidráulica).

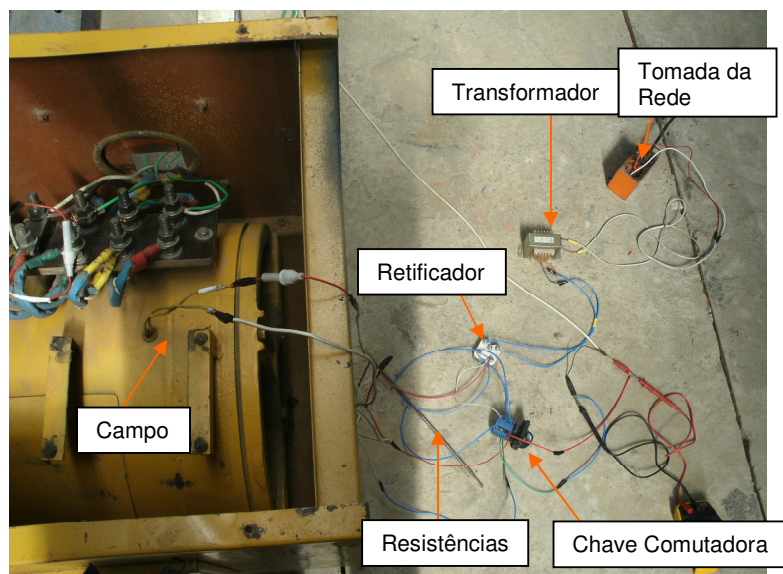


Figura 3.21 Elementos usados no teste.

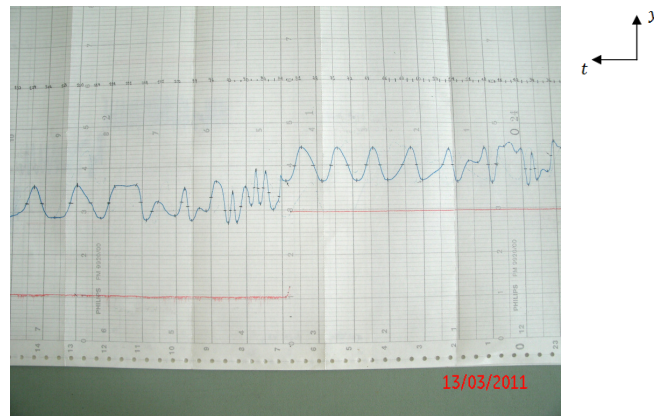
Fizeram-se vários ensaios dos quais se obtiveram os gráficos do comportamento dinâmico do gerador (Figura 3.22).



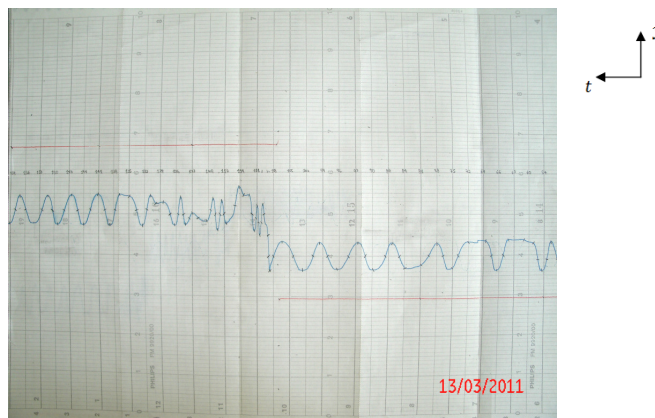
Figura 3.22 Obtenção das respostas do sistema no laboratório do IHH - UMSA.

Algumas respostas obtidas do sistema se mostram na Figura 3.23. Deve-se notar que o sentido de traço do graficador é de direita à esquerda. É importante dizer que foram feitos vários testes tanto para o degrau positivo como para o negativo, em

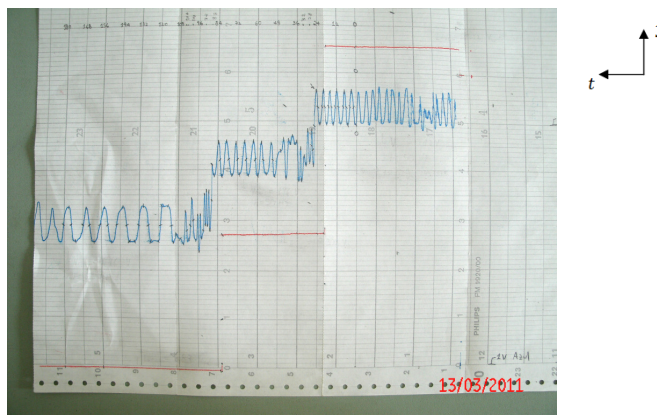
distintos dias e horários, isto com a finalidade que poder ter uma maior quantidade de dados para análise e tentar ter uma maior exatidão nos resultados.



a) Resposta ao degrau negativo.



b) Resposta ao degrau positivo.



c) Resposta aos dois degraus negativos.

Figura 3.23 Algumas respostas obtidas do sistema com ajuda do registrador.

a) Primeiro Teste.

Este ensaio apresentou as seguintes respostas para degraus positivos na tensão de excitação (Figura 3.24).

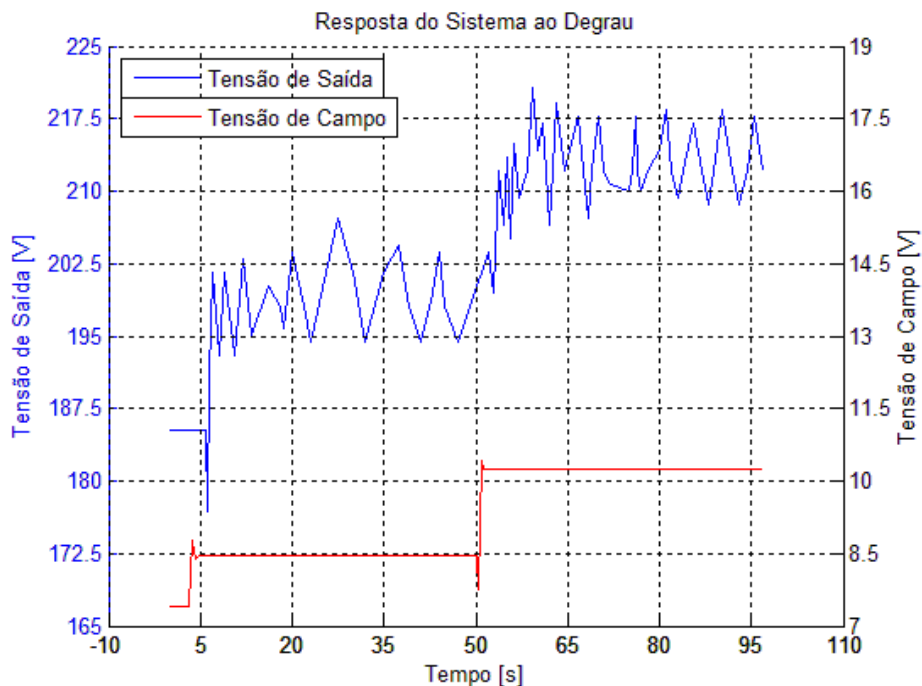


Figura 3.24 Degraus positivos na tensão de excitação e resposta do sistema do primeiro teste.

Tomando só os dados do segundo degrau, devido a que se supõe que a planta irá trabalhar numa faixa entre 190 – 240 [Vac]⁸, e como já foi dito no Item 3.5.1, minimizando os ruídos por *software* fazendo uma aproximação da curva com ruído por uma curva *Sigmoidal*⁹, obtém-se o gráfico da Figura 3.25.

⁸ A faixa entre 240 – 190 [Vac] é a recomendada pelo fabricante do AVR (*automatic voltage regulator*) para que este não sofra danos e possa funcionar corretamente. Para mais informações ver o Apêndice 2.

⁹ No apêndice 4 é mostrado o método usado para obter a curva *Sigmoidal*.

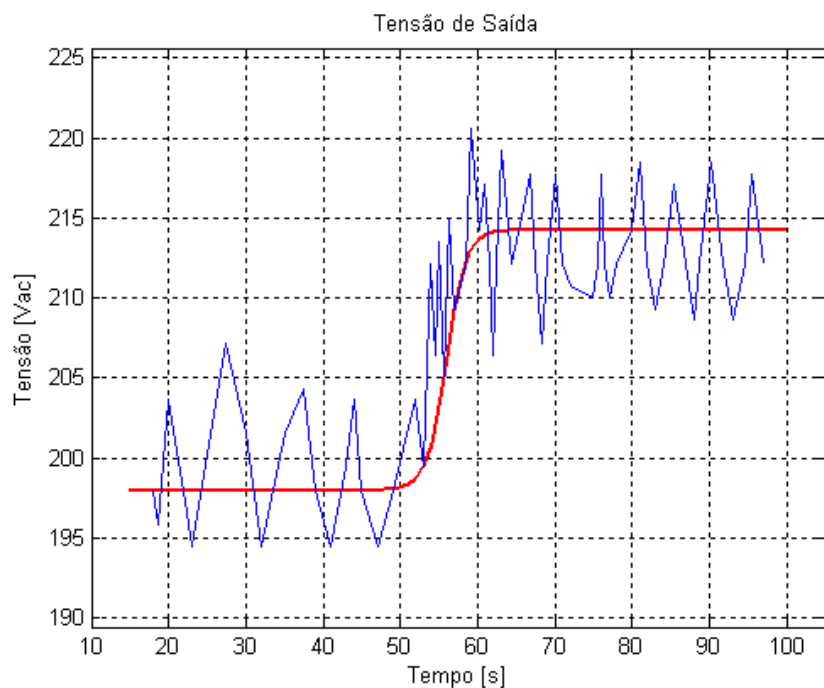


Figura 3.25 Curva de reação da tensão de saída do sistema do primeiro teste.

Agora, registrando a variação da tensão de saída até que estabilize em um novo valor de estado estacionário, conforme a Figura 3.26.

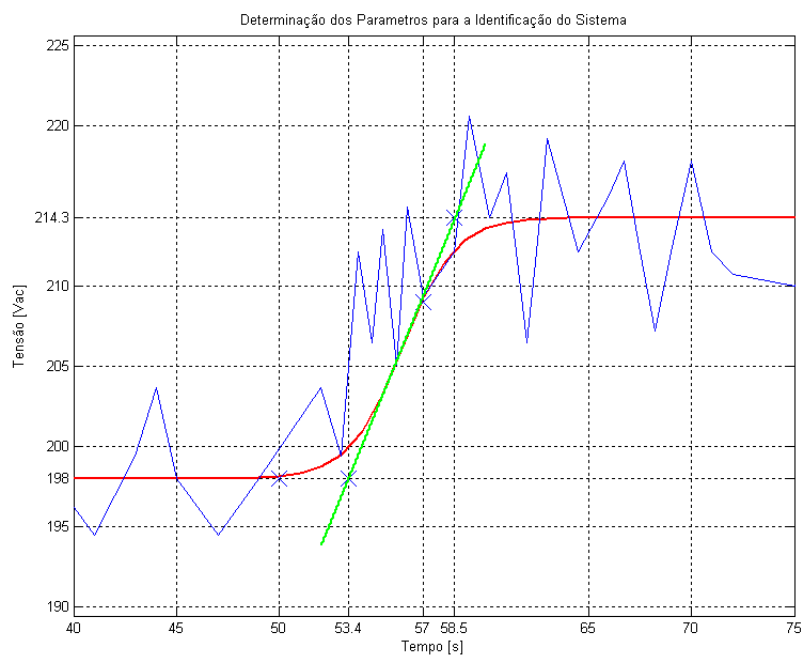


Figura 3.26 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do primeiro teste.

A partir das curvas obtém-se a função de transferência, para um sistema de primeira ordem com tempo morto:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad \text{eq. (3.11)}$$

O cálculo do ganho em estado estacionário é dado pela eq. (3.3). Tem-se:

$$\Delta y = 16,2721[\text{Vac}] \quad (\text{diferença entre o valor mínimo e o valor máximo atingido pela curva } \textit{Sigmoidal} \text{ dos dados utilizados em } \textit{Matlab})$$

$$\Delta u = 1,8[\text{Vdc}] \quad (\text{diferença entre o valor final e o valor inicial do degrau dado na tensão de excitação})$$

$$K = 9,0401[\text{Vac/Vdc}]$$

Observando a Figura 3.26, e sendo de 53,4 [s] o tempo em que a tangente intercepta a linha no valor inicial 198 [Vac] e de 50 [s] o momento em que se iniciou o degrau na tensão de excitação, tem-se:

$$\theta = (53,3591 - 50)[s] = 3,3591[s]$$

Pelo primeiro método (ZN) a constante de tempo é obtida através do intervalo de tempo em que a tangente ao ponto de inflexão toca a linha do valor inicial em $t = \theta$ e a reta de valor final em $t = \theta + \tau$, portanto τ_1 é:

$$\tau_1 = (58,4607 - 53,3591)[s] = 5,1016[s]$$

Pelo segundo método (HAG) a constante de tempo é obtida determinando-se que valor de y corresponde a 63,2% do Δy . Este valor é:

$$y = (0,632 \times 16,2721) + 197,9899 = 208,2739[\text{Vac}]$$

Este ponto da curva corresponde a um tempo de 57 [s]. A constante de tempo τ_2 é, portanto calculada:

$$\tau_2 = (57 - 53,3591)[s] = 3,6409[s]$$

As funções de transferência para os dois métodos são respectivamente:

$$G_1(s) = \frac{9,0401}{5,1016s + 1} e^{-3,359s} \quad (\text{Método ZN})$$

$$G_2(s) = \frac{9,0401}{3,6409s + 1} e^{-3,359s} \quad (\text{Método HAG})$$

Uma simulação das funções de transferência para este degrau na tensão de excitação é realizada usando a ferramenta *Simulink* do software *Matlab*. O diagrama de blocos da simulação é apresentado na Figura 3.27.

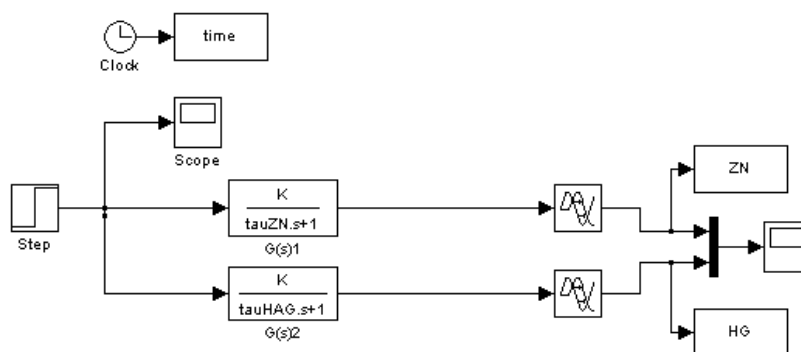


Figura 3.27 Diagrama de blocos da simulação.

As respostas obtidas pelo *Scope* do *Simulink* para as funções e também a aproximação da resposta real pela sua curva *Sigmoidal* são observadas na Figura 3.28.

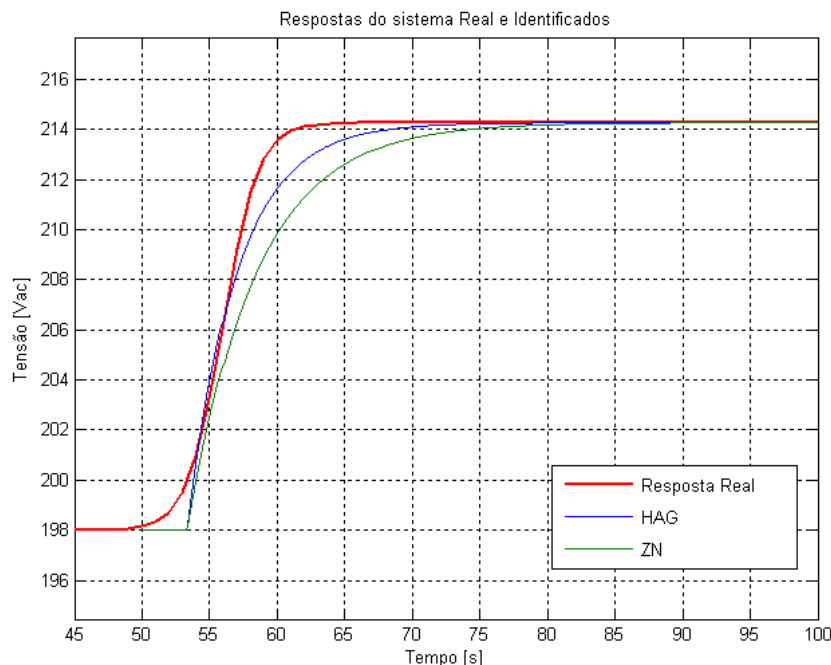


Figura 3.28 Respostas dos modelos e a resposta real.

A observação das curvas acima comprova que se consegue uma melhor aproximação à curva de resposta real da tensão de saída do gerador com o modelo obtido pelo segundo método ($G_2(s)$, método de Hägglund) do que pelo primeiro ($G_1(s)$, método de Ziegler e Nichols). A partir desta verificação os demais modelos serão apresentados diretamente usando-se o segundo método. Portanto, assume-se $G_2(s)$ como sendo a função de transferência $G_{t.saída}$ para um degrau na tensão de excitação do campo do gerador. Então, tem-se a primeira função de transferência:

$$G_{t.saída}(s) = \frac{V_{saída}}{E_{excitação}} = \frac{9,0401}{3,6409s + 1} e^{-3,359s}$$

b) Segundo Teste.

Com o sistema operando em regime permanente, fizeram-se variações positivas na tensão de excitação do gerador, segundo é mostrado na Figura 3.29.

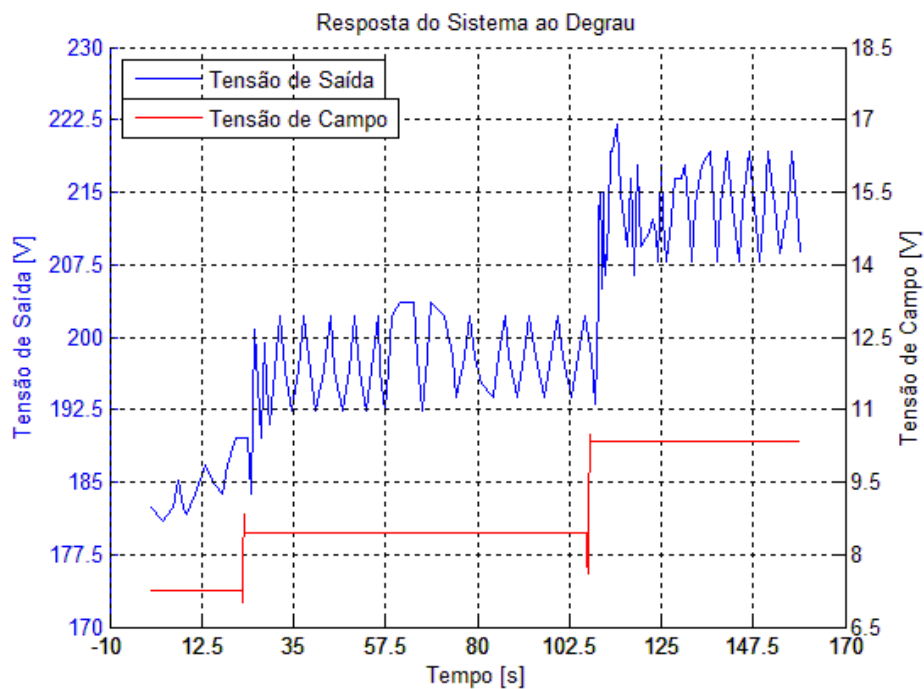


Figura 3.29 Degraus positivos na tensão de excitação e resposta do sistema do segundo teste.

A tensão de saída comportou-se conforme a Figura 3.30.

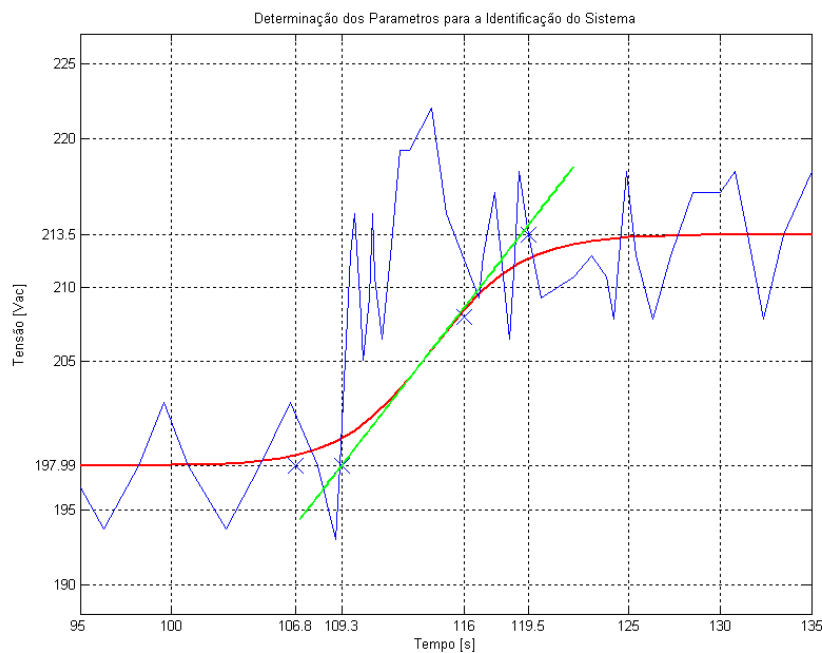


Figura 3.30 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do segundo teste.

Então, os cálculos dos parâmetros ficam:

O ganho estacionário:

$$\Delta y = 15,5563[Vac]$$

$$\Delta u = 1,9[Vdc]$$

$$K = 8,1875[Vac / Vdc]$$

O tempo morto:

$$\theta = (109,3 - 106,8)[s] = 2,5[s]$$

O valor de y correspondente a 63,2% do Δy é:

$$y = (0,632 \times 15,5563) + 197,9899 = 207,8215[Vac]$$

Este ponto da curva corresponde a um tempo de 116 [s]. A constante de tempo τ é, portanto calculada:

$$\tau = (116 - 109,3)[s] = 6,7[s]$$

Portanto, a função de transferência para o degrau positivo na tensão de excitação é:

$$G_{1.saída2}(s) = \frac{V_{saída}}{E_{excitação}} = \frac{8,1875}{6,7s + 1} e^{-2,5s}$$

c) Terceiro Teste.

Com o sistema operando em regime permanente, através da variação de tensão elétrica sobre a resistência com o uso de uma chave comutadora, realizaram-se degraus positivos na tensão de excitação como mostra a Figura 3.31.

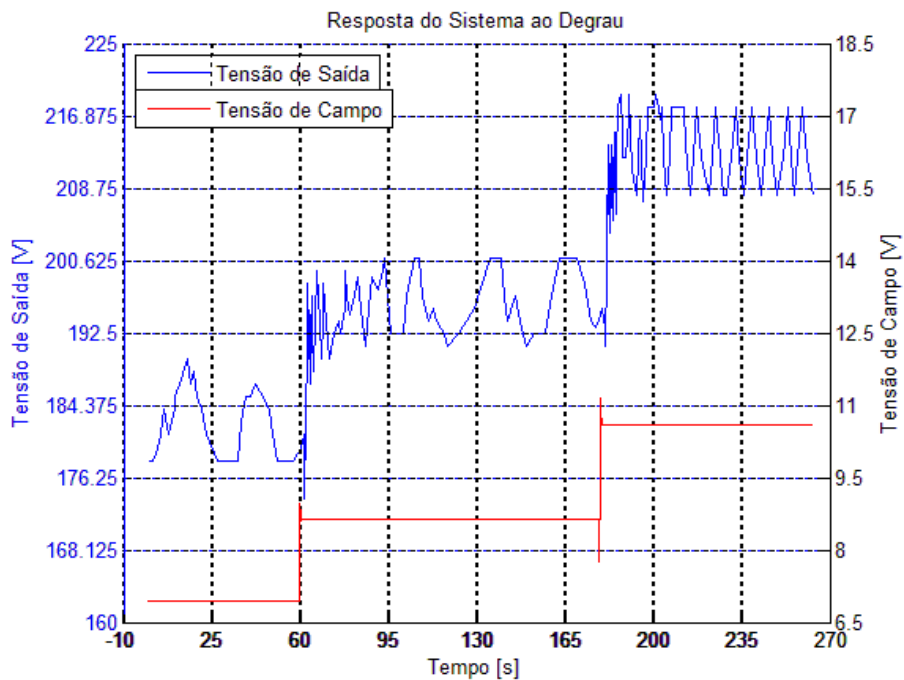


Figura 3.31 Degraus positivos na tensão de excitação e resposta do sistema do terceiro teste.

A tensão de saída comportou-se conforme a Figura 3.32.

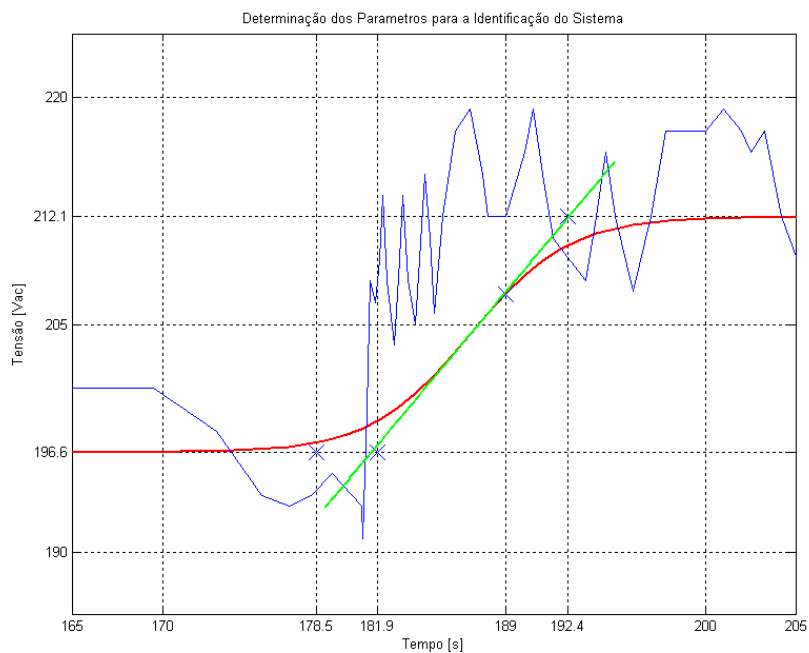


Figura 3.32 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do terceiro teste.

Então, os cálculos dos parâmetros ficam:

O ganho estacionário:

$$\Delta y = 15,5563[\text{Vac}]$$

$$\Delta u = 1,95[\text{Vdc}]$$

$$K = 7,9776[\text{Vac} / \text{Vdc}]$$

O tempo morto:

$$\theta = (181,9 - 178,5)[s] = 3,4[s]$$

O valor de y correspondente a 63,2% do Δy é:

$$y = (0,632 \times 15,5563) + 196,5757 = 206,4073[\text{Vac}]$$

Este ponto da curva corresponde a um tempo de 189 [s]. A constante de tempo τ é, portanto calculada:

$$\tau = (189 - 181,9)[s] = 7,1[s]$$

Portanto, a função de transferência para o degrau positivo na tensão de excitação é:

$$G_{l.saída3}(s) = \frac{V_{saída}}{E_{excitação}} = \frac{7,9776}{7,1s + 1} e^{-3,4s}$$

d) Quarto Teste.

Este ensaio apresentou as seguintes respostas para degraus negativos na tensão de excitação (Figura 3.33).

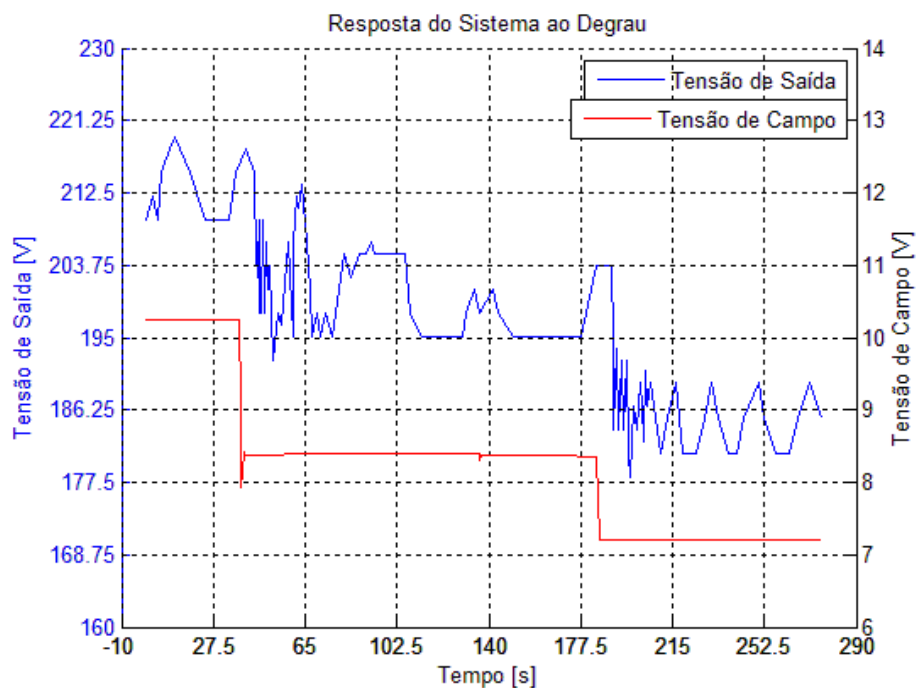


Figura 3.33 Degraus negativos na tensão de excitação e resposta do sistema do quarto teste.

Agora, registrando a variação da tensão de saída até que estabilize em um novo valor de estado estacionário, conforme a Figura 3.34.

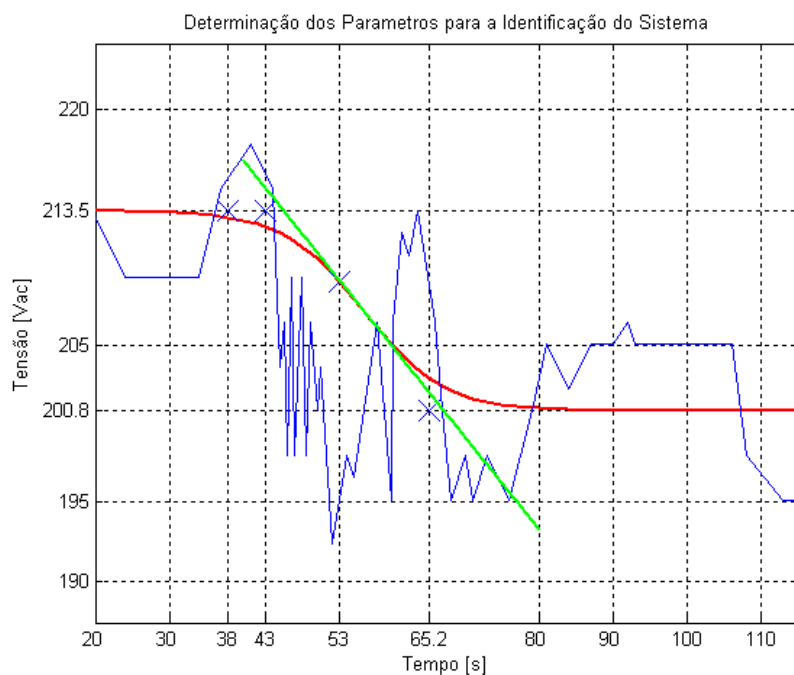


Figura 3.34 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do quarto teste.

Então, os cálculos dos parâmetros ficam:

O ganho estacionário:

$$\Delta y = 12,7275[Vac]$$

$$\Delta u = 1,8575[Vdc]$$

$$K = 6,8520[Vac / Vdc]$$

O tempo morto:

$$\theta = (43 - 38)[s] = 5[s]$$

O valor de y correspondente a 63,2% do Δy é:

$$y = (0,632 \times 12,7275) + 200,8183 = 208,8621[Vac]$$

Este ponto da curva corresponde a um tempo de 53 [s]. A constante de tempo τ é, portanto calculada:

$$\tau = (53 - 43)[s] = 10[s]$$

Portanto, a função de transferência para o degrau negativo na tensão de excitação é:

$$G_{t.saída4}(s) = \frac{V_{saída}}{E_{excitação}} = \frac{6,852}{10s + 1} e^{-5s}$$

e) Quinto Teste.

Com o sistema operando em regime permanente, através da variação de tensão elétrica sobre a resistência com o uso de uma chave comutadora, realizaram-se degraus negativos na tensão de excitação como mostra a Figura 3.35.

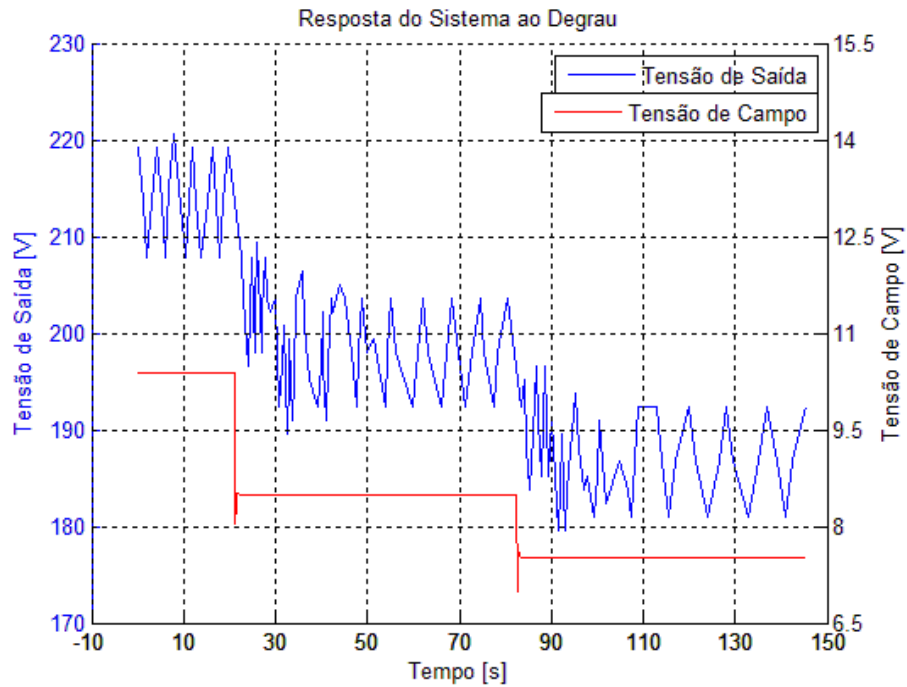


Figura 3.35 Degraus negativos na tensão de excitação e resposta do sistema do quinto teste.

A tensão de saída comportou-se conforme a Figura 3.36.

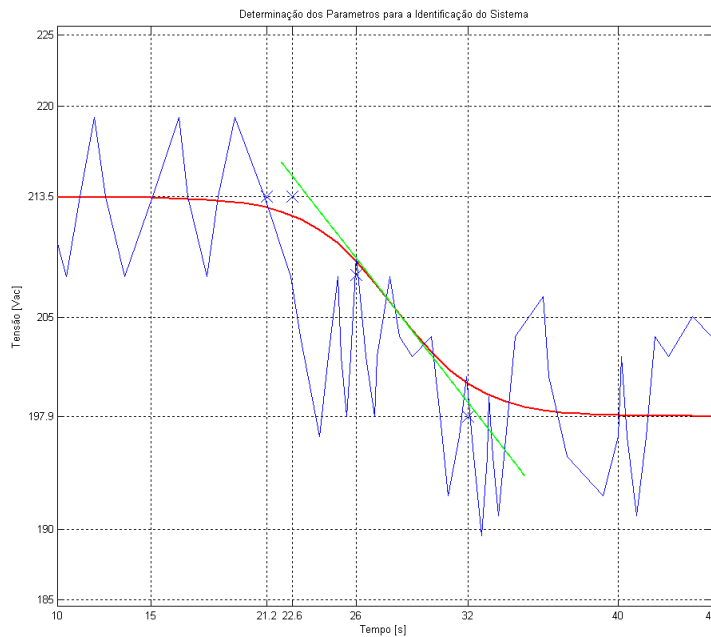


Figura 3.36 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do quinto teste.

Então, os cálculos dos parâmetros ficam:

O ganho estacionário:

$$\Delta y = 15,5571[\text{Vac}]$$

$$\Delta u = 1,9[\text{Vdc}]$$

$$K = 8,188[\text{Vac/Vdc}]$$

O tempo morto:

$$\theta = (22,6 - 21,2)[s] = 1,4[s]$$

O valor de y correspondente a 63,2% do Δy é:

$$y = (0,632 \times 15,5571) + 197,989 = 207,8211[\text{Vac}]$$

Este ponto da curva corresponde a um tempo de 26 [s]. A constante de tempo τ é, portanto calculada:

$$\tau = (26 - 22,6)[s] = 3,4[s]$$

Portanto, a função de transferência para o degrau negativo na tensão de excitação é:

$$G_{l.saída5}(s) = \frac{V_{saída}}{E_{excitação}} = \frac{8,188}{3,4s + 1} e^{-1,4s}$$

f) Sexto Teste.

Este ensaio apresentou as seguintes respostas para degraus negativos na tensão de excitação (Figura 3.37).

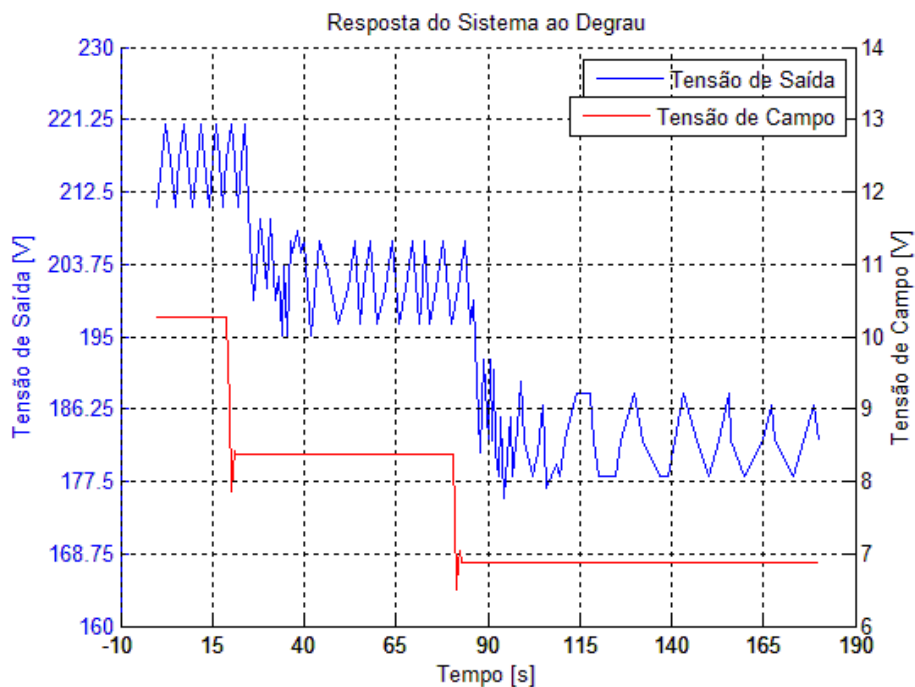


Figura 3.37 Degraus negativos na tensão de excitação e resposta do sistema do sexto teste.

Agora, registrando a variação da tensão de saída até que estabilize em um novo valor de estado estacionário, conforme a Figura 3.38.

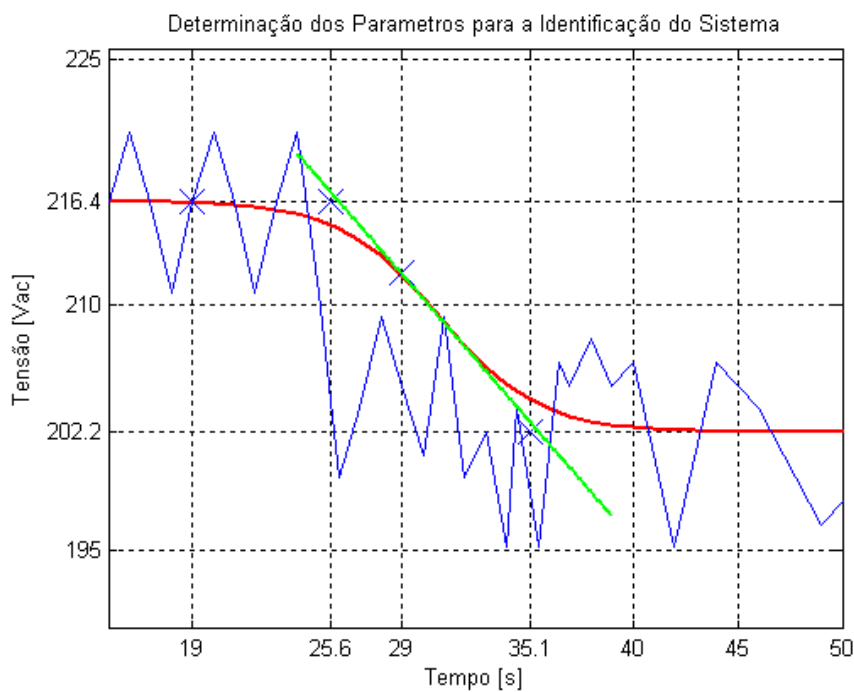


Figura 3.38 Curva de reação do sistema e obtenção dos parâmetros para a modelagem do processo do sexto teste.

Então, os cálculos dos parâmetros ficam:

O ganho estacionário:

$$\Delta y = 14,1422[\text{Vac}]$$

$$\Delta u = 1,9[\text{Vdc}]$$

$$K = 7,4432[\text{Vac} / \text{Vdc}]$$

O tempo morto:

$$\theta = (25,6 - 19)[s] = 6,6[s]$$

O valor de y correspondente a 63,2% do Δy é:

$$y = (0,632 \times 14,1422) + 202,2325 = 211,1704[\text{Vac}]$$

Este ponto da curva corresponde a um tempo de 29 [s]. A constante de tempo τ é, portanto calculada:

$$\tau = (29 - 25,6)[s] = 3,4[s]$$

Portanto, a função de transferência para o degrau negativo na tensão de excitação é:

$$G_{t.saída6}(s) = \frac{V_{saída}}{E_{excitação}} = \frac{7,4432}{3,4s + 1} e^{-6,6s}$$

A seguir, na Tabela 3.1, pode-se ver um resumo de todas as funções de transferência encontradas nos distintos testes.

Tabela 3.1 Resultados das respostas do processo ao teste degrau (↑ degrau positivo e ↓ para o degrau negativo).

Entradas	Saídas	Tensão de saída do gerador
Teste 1 $E_{exc}(8,22\%)$ ↑		$G(s) = \frac{9,04}{3,641s + 1} e^{-3,36s}$
Teste 2 $E_{exc}(7,86\%)$ ↑		$G(s) = \frac{8,19}{6,7s + 1} e^{-2,5s}$
Teste 3 $E_{exc}(7,91\%)$ ↑		$G(s) = \frac{7,978}{7,1s + 1} e^{-3,4s}$
Teste 4 $E_{exc}(5,96\%)$ ↓		$G(s) = \frac{6,85}{10s + 1} e^{-5s}$
Teste 5 $E_{exc}(7,28\%)$ ↓		$G(s) = \frac{8,19}{3,4s + 1} e^{-1,4s}$
Teste 6 $E_{exc}(6,54\%)$ ↓		$G(s) = \frac{7,44}{3,4s + 1} e^{-6,6s}$

Algumas vantagens de se usar o método degrau, segundo Valdman (2008), são:

- Só requer a realização de um único teste.
- Pode ser repetido para um teste degrau negativo e outro positivo.
- Não precisa utilizar nenhum método tentativa e erro.

- Não provoca grandes alterações no processo, pois o teste é realizado em malha aberta.
- Também pode ser utilizado em uma metodologia combinada analítica empírica, desde que se tenham modelos mais precisos ou mesmo aproximados e a curva de reação do processo para malha aberta possa ser obtida por simulação em programas computacionais.
- Pode ser utilizado, com boa aproximação, mesmo para respostas incompletas, que não tenham atingido o novo valor de equilíbrio, usando as correlações originalmente propostas por Ziegler e Nichols.

3.6 Controle Proposto.

3.6.1 Sistema de Controle.

Existem basicamente duas estratégias de controle. O controle por realimentação (Figura 3.39) e o controle por antecipação, o restante como cascata, adaptativo e split range, são modificações ou variações das estratégias básicas (Mollenkamp, 1988).

A finalidade do controlador com realimentação é duplo. Primeiro, calcula o erro como a diferença entre a variável controlada e a referência (valor desejado), e segundo, calcula o sinal para o atuador baseado no erro (Corripio, 2001).

O princípio da realimentação pode ser expresso como segue: “Incrementar a variável manipulada quando a variável do processo é menor do que o *Set Point* e decrementar a variável manipulada quando a variável do processo é maior do que o *Set Point*” (Aström, 1995).

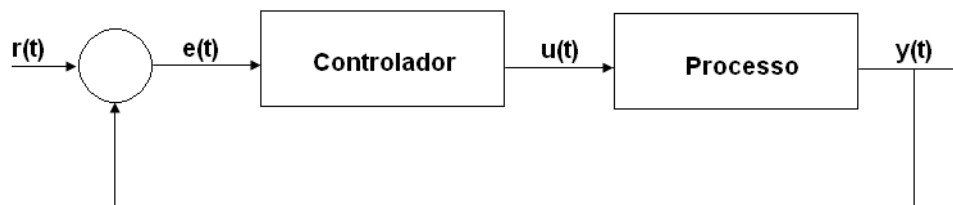


Figura 3.39 Diagrama de blocos do sistema de controle por realimentação.

O jeito pelo qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamado de “ação de controle” (Ogata, 1998).

O controlador PID é de longe o algoritmo mais comum de controle. A maioria das malhas de realimentação é controlada por este algoritmo ou variações pequenas dele; o controlador pode ser implementado em sistemas isolados ou como parte de sistemas DDC's (*Direct Digital Control*). O algoritmo PID pode ser visto como um dispositivo que pode ser operado com algumas regras simples, mas também pode ser enfocado desde o ponto de vista analítico (Aström, 1995).

Os três modos de controle por realimentação são: proporcional, integral ou *reset* e derivativo. Cada um deles introduz um parâmetro ajustável na operação do controlador por retroalimentação.

Ação do Controle Proporcional (P).

Par um controlador com ação de controle proporcional, a relação entre a saída do controlador $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$ é:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Em transformada de Lapalce:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad \text{eq. (3.12)}$$

Onde K_p é considerado o ganho proporcional. O controle proporcional puro é essencialmente um amplificador com ganho ajustável. No controle proporcional há um erro de regime estacionário na resposta à entrada degrau. Este desajuste pode ser eliminado se for incluída uma ação de controle integral (Ogata, 1998).

Ação do Controle Integral (I).

Em um controlador com ação de controle integral, o valor de saída do controlador $u(t)$ muda a uma taxa proporcional ao sinal de erro $e(t)$. Ou seja:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t)$$

Ou:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{eq. (3.13)}$$

Onde K_i é uma constante ajustável. A função de transferência do controlador integral é:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad \text{eq. (3.14)}$$

Se o valor de $e(t)$ for o dobro, o valor de $u(t)$ variará duas vezes mais rápido. Geralmente:

$$K_i = \frac{1}{T_i}$$

Sendo T_i o tempo integral (*reset time*). Então a eq. (3.14) ficará:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_i s} \quad \text{eq. (3.15)}$$

A ação integral é sempre associada à ação proporcional. Esta combinação (PI) permite corrigir os erros de forma instantânea (P) e eliminar o erro de *off-set* ao longo do tempo (I).

A ação integral tem o inconveniente de saturar a saída do controlador. Ou seja, se por algum motivo o erro permanece, a ação integral vai incrementando a saída até a mesma chegar à saturação. Este fenômeno é chamado de *reset Wind up* e é comum em controladores pneumáticos e eletrônicos analógicos (Mollenkamp, 1988).

Também deve se notar que, “se o erro mudar de sinal, a ação integral começa a diminuir, porém, como a saída do controlador estava saturada em um valor superior ao limite, durante certo tempo a saída permanecerá na condição de saturação

impedindo a correção do erro” (Souza, 1998). Este fenômeno de saturação da ação integral é muito prejudicial em processos lentos e/ou com um grande tempo morto.

Ação do Controle Derivativa (D).

A ação de controle derivativa, também chamada de controle de velocidade, atua em função da velocidade do erro. Tem por finalidade antecipar para onde vai o processo por meio da sua derivada, ou seja, da observação da rapidez para a mudança do erro (Corripio, 2001). Nesta ação quanto mais veloz variar o erro maior será a intensidade da correção. A equação é a seguinte:

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{eq. (3.16)}$$

Em transformada de *Laplace*:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = T_d s \quad \text{eq.(3.17)}$$

Onde T_d é chamado de tempo derivativo. Observa-se que a ação derivativa nunca é usada sozinha, devido a que é eficaz só em períodos transitórios. A ação derivativa é sempre acompanhada da ação proporcional e o tempo derivativo T_d é o intervalo de tempo durante o qual a ação da velocidade faz avançar o efeito da ação do controle proporcional (Ogata, 1998).

Ação proporcional + integral + derivativa.

Os três modos de controle, anteriormente descritos, podem ser combinados em um instrumento de controle para obter todas as suas vantagens. A essa ação de controle se chama de PID (proporcional – integral - derivativo).

A maior parte dos controladores retroalimentados industriais, como 75%, são PI (proporcional - integral), e a maioria dos restantes são PID (proporcional - integral - derivativo) (Corripio, 2001).

A fórmula mais simples do PID é a soma das ações proporcional, integral e derivativa, como segue:

$$m = K_p \cdot e + \frac{K_p}{T_i} \cdot e + K_p \cdot T_d s \cdot e = K_p [1 + (1/T_i \cdot s) + T_d s] \cdot e \quad \text{eq. (3.18)}$$

Onde m é o sinal de saída do controlador. A Equação 3.18 mostra que o controlador PID tem três parâmetros ajustáveis: o ganho K_p , o tempo integral ou *reset* T_i , e o tempo derivativo T_d . O diagrama de blocos da Figura 3.40 mostra a implementação da Eq. (3.18). A figura também mostra uma forma alternativa que é mais comumente usada, porque evita pegar a razão da variação da entrada do *Set Point* ao controlador. Isto prevê o que se chama de *derivative kick*, um indesejável pulso de curta duração na saída do controlador que poderia acontecer quando o operador do processo muda o *Set Point*.

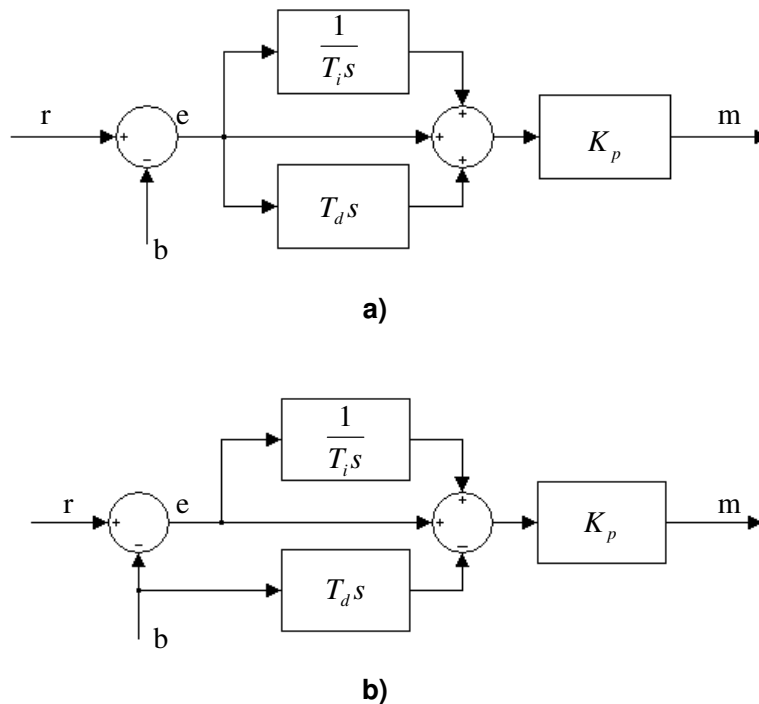


Figura 3.40 Diagrama de blocos do controlador PID paralelo com: a) ação derivativa no sinal do erro, e b) ação derivativa na medição do sinal de saída.

A fórmula da Eq. (3.18) é comumente usada em controladores digitais. Esta forma é algumas vezes chamada de controlador PID paralelo porque, como mostra a Figura 3.40, as três ações de controle estão em paralelo. Todos os controladores analógicos usam o controlador PID série, que é dado pela seguinte equação (Corripio, 2001):

$$m = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s) \cdot e \quad \text{eq. (3.19)}$$

O diagrama de blocos da Figura 3.41 mostra a implementação da Eq. (3.19).

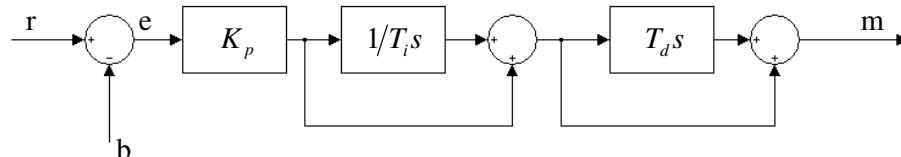


Figura 3.41 Diagrama de blocos do controlador PID série.

Ao fazer a sintonia de um controlador, deve-se determinar se é um controlador paralelo ou série usando os manuais específicos do controlador.

Todos os controladores realimentados industriais sejam eletrônicos, pneumáticos ou digitais, têm as seguintes características (Corripio, 2001):

Características pretendidas pelo operador da planta.

- Display da variável controlada.
- Display do *Set Point*.
- Display do sinal de saída do controlador.
- Ajustador do *Set Point*.
- Ajustador manual externo.
- Seletor local / remoto de *Set Point*.
- Seletor automático / manual para a operação do processo.

Características pretendidas pelo engenheiro de controle.

- Ajustador do ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo.
- *Switch* de avançar / retroceder.

3.6.2 Descrição do Sistema de Controle.

Uma descrição detalhada do diagrama funcional do sistema de controle em malha fechada (SCMF) é dada na Figura 3.42. Este diagrama mostra os principais componentes do sistema de controle, definidos a seguir.

Referência (SP): Valor desejado da variável a ser controlada.

Comparador: Dispositivo que constrói o sinal de erro entre o valor desejado e o obtido.

Controlador: Dispositivo que manipula o sinal de erro, gerando um sinal de controle que será aplicado no sistema, com a finalidade de corrigir a variável a ser controlada.

Atuador: Dispositivo que recebe o sinal de controle e gera um sinal com potência suficiente para atuar sobre o sistema.

Sistema: Dispositivo ou fenômeno que se deseja operar com alguma finalidade (objetivo de controle).

Medidor (transdutor): Dispositivos responsáveis pela medição e conversão da variável a ser controlada para fins de comparação e obtenção do erro de saída.

Output to Process (OP): É a ação ou sinal de saída do controlador.

Process Variable (PV): É a variável do processo ou variável controlada.

Manipulate Variable (MV): É a variável manipulada através do atuador.

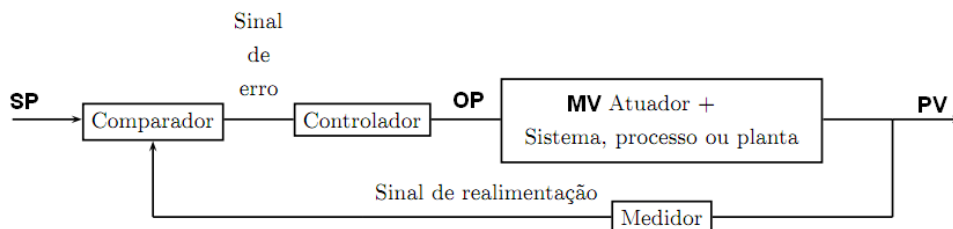


Figura 3.42 Diagrama do sistema de controle em malha fechada.

No caso analisado, o sinal de saída do controlador (OP) é a tensão de excitação do gerador (E_{cd}), a variável manipulada (MV) é a intensidade de campo magnético para poder gerar a FEM induzida (Kosow, 1993), e a variável do processo (PV) é a tensão gerada (V_{ac}).

Deve-se observar que na maioria dos casos não se tem acesso à variável manipulada, é por isto que a MV aparece no mesmo bloco conjuntamente a planta que é formada pela turbina e gerador síncrono.

3.6.3 Estratégia de Controle Utilizada.

A controlabilidade da malha decresce quando a taxa entre o tempo morto do processo e sua constante de tempo se incrementa. Agora pode-se definir o *parâmetro de incontrolabilidade* da malha como:

$$P_u = \frac{\theta}{\tau} \quad \text{eq. (3.20)}$$

Onde:

θ = tempo morto do processo.

τ = constante de tempo do processo.

Um processo com um longo tempo morto é controlável se a sua constante de tempo for muito maior do que o tempo morto (Corripio, 2001). Para valores do *parâmetro de incontrolabilidade* maiores do que 1, o sistema será incontrolável. Baseado no dito acima se fez a Tabela 3.2 com todos os ensaios feitos com a finalidade de estudar a sua controlabilidade.

Tabela 3.2 Controlabilidade dos testes realizados.

Teste	$\tau[s]$	$\theta[s]$	P_u
Teste 1 ↑	3,641	3,36	0,9228
Teste 2 ↑	6,7	2,5	0,3731
Teste 3 ↑	7,1	3,4	0,4789
Teste 4 ↓	10	5	0,5
Teste 5 ↓	3,4	1,4	0,4118
Teste 6 ↓	3,4	6,6	1,9412

Como se pode ver na Tabela 3.2, os parâmetros estimados do teste 6 dão como resultado um $P_u > 1$, isto pode ser por causa de diversas razões, como por exemplo a má recolha dos dados quando feito o teste, uso incorreto do registrador, erro dos instrumentos de medição. Portanto, foram excluídos os dados do teste 6 para os futuros cálculos.

3.6.4 Sintonia do Controlador.

Lembrando que o objetivo deste trabalho é a obtenção do modelo dinâmico da planta, definida como o conjunto turbina hidráulica – gerador elétrico, e conseqüentemente conhecer todos os parâmetros das funções de transferência tanto do controlador quanto do processo, agora se deve achar os parâmetros mais próximos do controlador de tensão (AVR) que possam descrever o seu funcionamento.

Como mostrado na Figura 3.3 (Pag. 22), o AVR (*Automatic Voltage Regulator*) tem incorporado um controlador PI, porém, devido ao tempo rápido de resposta do

sistema com AVR (como será visto no Capítulo 4), decidiu-se por usar um controlador PID paralelo para poder representar de uma maneira mais próxima o comportamento do AVR real operando juntamente com a planta (gerador - turbina hidráulica).

O desempenho desejado do sistema está diretamente ligado a escolha dos parâmetros do controlador. Diversos critérios de desempenho podem ser empregados para os diferentes processos.

A principal orientação é que o processo e os objetivos de controle determinem os critérios a serem adotados. Dentre os critérios mais comuns encontram-se: erro mínimo (*off-set*), sobrepasso (*overshoot*), tempo de subida, tempo de estabelecimento, e oscilação mínima (sem oscilação). Estes critérios são conflitantes, pois na medida em que um ou dois são satisfeitos outro pode não ser alcançado. Portanto, dependendo do método utilizado para sintonizar o controlador obtém-se um melhor desempenho em alguns critérios em detrimento de outros. O teste tradicional usado para verificar se as especificações definidas por estes critérios foram atingidas, é uma variação no *Set Point* em malha fechada (Valdman, 2008).

Muitas fórmulas de sintonia e métodos foram propostos na literatura desde que Ziegler e Nichols introduziram suas fórmulas pioneiras. Os métodos variam em como é definido o 'bom desempenho do controlador' e usualmente fórmulas são usadas para calcular os parâmetros de sintonia. Alguns requerem modelos do processo que são mais complexos do que o modelo de primeira ordem mais atraso que é o assumido neste caso. Como a finalidade é obter uma sintonia rápida e simples do sistema de controle, utilizaremos um dos métodos mais simples e efetivos proposto para realizar a sintonia de controladores com realimentação. Este método é conhecido como regras de sintonia IMC (*Internal Model Control*) e foi originalmente introduzido com o nome de *controller synthesis* por Martin (1976).

Para o modelo do processo de primeira ordem mais atraso, as regras IMC de sintonia consistem em fazer o tempo integral (T_i) igual à constante de tempo do processo e o tempo derivativo (T_d) igual à metade do tempo morto (θ) do processo; o ganho do processo (K_p) é depois ajustado para obter a resposta desejada.

$$T_i = \tau$$

eq. (3.21)

$$T_d = \frac{\theta}{2}$$

Ajuste do ganho.

As seguintes fórmulas são propostas:

- Para uma boa resposta a distúrbios, quando P_u estiver entre 0,1 e 0,5, usar a fórmula: $K_p = 2\tau / K\theta$.
Quando P_u for menor do que 0,1 ou maior do que 0,5 deve-se usar só a metade do ganho como o valor inicial.
- Para uma resposta ótima a variações no *Set Point*, quando P_u estiver na faixa 0,1 a 0,5 e para um controlador PID usar a fórmula: $K_p = 0,83\tau / K\theta$.
- Para 5% de overshoot diante uma variação no *Set Point*, usar a seguinte fórmula: $K_p = 0,5\tau / K\theta$.

As fórmulas acima confirmam a idéia de que o ganho do controlador pode ser ajustado para obter vários tipos de resposta.

Neste trabalho o controle foi sintonizado por tentativa – erro, e após vários ensaios foram obtidas respostas satisfatórias, como se poderá ver mais adiante.

3.6.5 Estruturas do Modelo do Processo.

Antes de se definir as estruturas do modelo e fazer a sintonia do controlador, deve-se adaptar as unidades das funções de transferência encontradas, isto é, o ganho adimensional (% / %), τ e θ em minutos (Ferreira, 2000).

Para isto, deve-se fazer os seguintes cálculos:

$$K_{(\%)} = K \frac{(u_2 - u_1)}{(y_2 - y_1)} [\% / \%] \quad \text{eq. (3.22)}$$

Onde:

$$y_2 = 240 \text{ [V}_{\text{ac}}]$$

$$y_1 = 190 \text{ [V}_{\text{ac}}]$$

$$u_2 = 13,4 \text{ [V}_{\text{dc}}]$$






$$u_1 = 7,6 \text{ [V}_{\text{dc}}]$$

Os valores de y_1 e y_2 formam a faixa de operação recomendada pelo fabricante do AVR para uma correta operação do mesmo e sem que este sofra danos¹⁰. Conseqüentemente, os valores de u_1 e u_2 são obtidos a partir dos valores de y_1 e y_2 .

Segundo a Tabela 3.1, e fazendo os cálculos para os distintos testes tem-se a Tabela 3.2 com as funções de transferência e as unidades adaptadas.

¹⁰ *Instruction Manual for Voltage Regulator Model: APR 63-5.* Para maiores informações ver o apêndice 2.



Tabela 3.3 Funções de transferência com as unidades adaptadas.

Entradas \ Saídas	Tensão de saída do gerador
Teste 1 $E_{exc}(8,22\%)$ 	$G(s) = \frac{1,0442}{0,0607s + 1} e^{-0,056s}$
Teste 2 $E_{exc}(7,86\%)$ 	$G(s) = \frac{0,9458}{0,1117s + 1} e^{-0,0417s}$
Teste 3 $E_{exc}(7,91\%)$ 	$G(s) = \frac{0,9215}{0,1183s + 1} e^{-0,0567s}$
Teste 4 $E_{exc}(5,96\%)$ 	$G(s) = \frac{0,7914}{0,1667s + 1} e^{-0,0833s}$
Teste 5 $E_{exc}(7,28\%)$ 	$G(s) = \frac{0,9458}{0,0567s + 1} e^{-0,0233s}$

Lembrando que o teste 6 foi descartado por causa do valor elevado do seu P_u ,
 Seção 3.6.4.

Agora, optou-se por ter somente uma única função de transferência para cada teste, ou seja, uma para o teste com degrau positivo e outra para o teste com degrau negativo; para isto obtiveram-se os valores médios de cada um dos parâmetros correspondentes às funções de transferência (a média das três funções de transferência para o degrau positivo e a média das duas funções de transferência para o degrau negativo), dando como resultado o mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Funções de transferência para os testes com degrau positivo e negativo.

Entradas \ Saídas	Tensão de saída do gerador
Teste (+) 	$G_1(s) = \frac{0,9705}{0,0969s + 1} e^{-0,0515s}$
Teste (-) 	$G_2(s) = \frac{0,8686}{0,1117s + 1} e^{-0,0533s}$

Agora podemos descrever as estruturas do modelo propostas para o presente trabalho.

Primeira Estrutura (duas funções de transferência).

Esta estrutura propõe a utilização de duas funções de transferência, as quais são as que foram obtidas na Tabela 3.4; e a partir delas, fazer a sintonia dos controladores PID para cada uma delas (Ferreira, 2000).

Usando as fórmulas propostas na Seção 3.6.4 para fazer a sintonia do primeiro controlador baseada na função de transferência obtida para um degrau positivo na tensão de excitação (E_{exc}), segundo as regras IMC tem-se:

$$T_i = \tau = 0,0969[\text{min}]$$

$$T_d = \frac{\theta}{2} = 0,0257[\text{min}]$$

Agora, primeiro calcula-se o P_u da nova função de transferência:

$$P_u = \frac{0,0515}{0,0969} = 0,5315$$

Pode-se assumir este valor como muito próximo de 0,5. Então, segundo as regras IMC para poder obter uma ótima resposta para variações no *Set Point* o valor de K_p será:

$$K_p = 0,83 \frac{\tau}{K\theta} = 0,83 \frac{0,0969}{0,9705 \times 0,0515} = 1,6092 [\% / \%]$$

A equação do controlador PID 1 será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 1,6092 + \frac{1,6092}{0,0969s} + 1,6092 \times 0,0257$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 1,6092 + \frac{16,6068}{s} + 0,0414$$

Depois, o segundo controlador é sintonizado baseado na função de transferência obtida para um degrau negativo na tensão de excitação (E_{exc}), segundo a Tabela 3.4.

Usando as fórmulas propostas na Seção 3.6.4 para fazer a sintonia do controlador segundo as regras IMC tem-se:

$$T_i = \tau = 0,1117 [\text{min}]$$

$$T_d = \frac{\theta}{2} = 0,0267 [\text{min}]$$

Agora, primeiro calcula-se o P_u da nova função de transferência:

$$P_u = \frac{0,0533}{0,1117} = 0,4772$$

Este valor encontra-se na faixa de 0,1 - 0,5; então, segundo as regras IMC para poder obter uma ótima resposta para variações no *Set Point* o valor de K_p será:

$$K_p = 0,83 \frac{\tau}{K\theta} = 0,83 \frac{0,1117}{0,8686 \times 0,0533} = 2,0026 [\%/ \%$$

A equação do controlador PID 2 será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,0026 + \frac{2,0026}{0,1117 s} + 2,0026 \times 0,0267$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,0026 + \frac{17,9284}{s} + 0,0535$$

O diagrama de blocos da primeira estrutura de controle é apresentado na Figura 3.43.

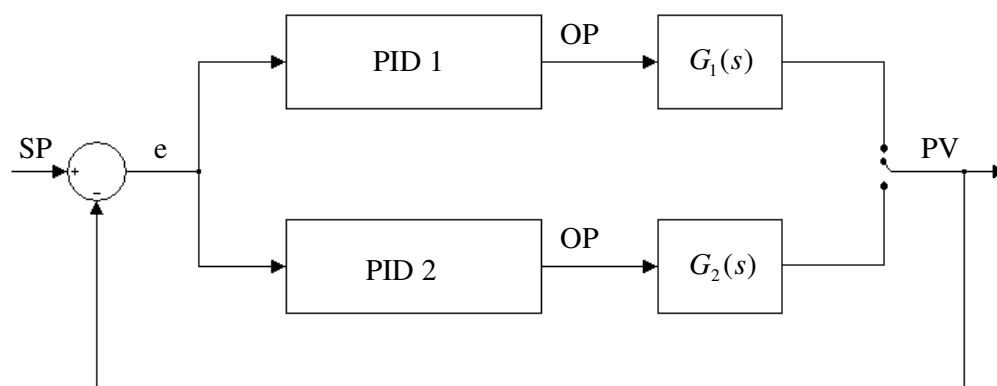


Figura 3.43 Primeira estrutura do modelo.

Com a finalidade de fazer uma comparação com o método de sintonia apresentado por Ziegler e Nichols, fez-se a sintonia dos controladores PID baseados nos dois métodos (IMC e ZN). A Tabela 3.5 mostra as fórmulas usadas na sintonia do controlador com o método ZN.

Tabela 3.5 Fórmulas para ajuste do controlador segundo Ziegler – Nichols.

(Fonte: Corripio, 2001)

Tipo de Controlador	Símbolo	Ganho Proporcional	Tempo de Integração	Tempo de Derivação
Proporcional	P	$\frac{1}{K} \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
Proporcional – Integral	PI	$\frac{0,9}{K} \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{-1}$	$3,33\theta$	-
Proporcional – Integral - Derivativo	PID	$\frac{1,2}{K} \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{-1}$	$2,0\theta$	$0,5\theta$

Segundo a Tabela 3.5, os parâmetros do controlador PID 1 serão:

$$K_p = \frac{1,2}{0,9705} \left(\frac{0,0515}{0,0969} \right)^{-1} = 2,3265[\% / \%]$$

$$T_i = 2 \times 0,0515 = 0,103[\text{min}]$$

$$T_d = 0,5 \times 0,0515 = 0,0257[\text{min}]$$

A equação do controlador PID 1 será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,3265 + \frac{2,3265}{0,103s} + 2,3265 \times 0,0257$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,3265 + \frac{22,5874}{s} + 0,0598$$

Segundo a Tabela 3.5, os parâmetros do controlador PID 2 serão:

$$K_p = \frac{1,2}{0,8686} \left(\frac{0,0533}{0,1117} \right)^{-1} = 2,8953[\% / \%]$$

$$T_i = 2 \times 0,0533 = 0,1066[\text{min}]$$

$$T_d = 0,5 \times 0,0533 = 0,0267[\text{min}]$$

A equação do controlador PID 2 será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,8953 + \frac{2,8953}{0,1066s} + 2,8953 \times 0,0267$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,8953 + \frac{27,1604}{s} + 0,0773$$

Segunda Estrutura (média das funções de transferência).

A segunda estrutura de controle propõe que, na identificação experimental do processo, ao se repetir um teste degrau positivo e outro negativo, uma média dos parâmetros pode ser obtida.

Obtendo a média dos parâmetros das duas funções de transferência da Tabela 3.4 (Pag. 73), tem-se:

$$\bar{K} = 0,9196[\% / \%]$$

$$\bar{\tau} = 0,1043[\text{min}]$$

$$\bar{\theta} = 0,0524[\text{min}]$$

$$\bar{G}(s) = \frac{0,9196}{0,1043s + 1} e^{-0,0524s}$$

Agora, primeiro calcula-se o P_u da nova função de transferência:

$$P_u = \frac{0,0524}{0,1043} = 0,5024$$

Pode-se assumir que esse valor encontra-se na faixa de 0,1 - 0,5; então, segundo as regras IMC para poder obter uma ótima resposta para variações no *Set Point* o valor de K_p será:

$$K_p = 0,83 \frac{\tau}{K\theta} = 0,83 \frac{0,1043}{0,9196 \times 0,0524} = 1,7965 [\% / \%]$$

$$T_i = \tau = 0,1043 [\text{min}]$$

$$T_d = \frac{\theta}{2} = 0,0262 [\text{min}]$$

A equação do controlador PID segundo o critério IMC será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 1,7965 + \frac{1,7965}{0,1043s} + 1,7965 \times 0,0262$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 1,7965 + \frac{17,2244}{s} + 0,0471$$

Depois, segundo a Tabela 3.5, os parâmetros do controlador PID utilizando as fórmulas de sintonia de ZN serão:

$$K_p = \frac{1,2}{0,9196} \left(\frac{0,0524}{0,1043} \right)^{-1} = 2,5974 [\% / \%]$$

$$T_i = 2 \times 0,0524 = 0,1048 [\text{min}]$$

$$T_d = 0,5 \times 0,0524 = 0,0262 [\text{min}]$$

A equação do controlador PID segundo o critério de Ziegler e Nichols será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,5974 + \frac{2,5974}{0,1048s} + 2,5974 \times 0,0262$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,5974 + \frac{24,7844}{s} + 0,0681$$

A Figura 3.44 mostra o diagrama de blocos que representa a segunda estrutura de controle.

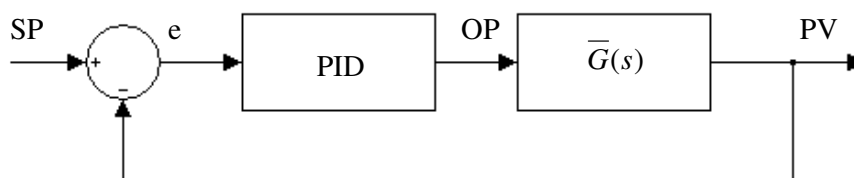


Figura 3.44 Segunda estrutura do modelo.

Finalmente, na Tabela 3.6 pode-se ver um resumo das funções utilizadas nas duas estruturas.

Tabela 3.6 Funções obtidas para as diferentes estruturas de controle.

		$G(s)$	PID - IMC
Primeira Estrutura	Degrau (+)	$\frac{0,9705}{0,0969s + 1} e^{-0,0515s}$	$\frac{U(s)}{E(s)} = 1,6092 + \frac{16,6068}{s} + 0,0414$
	Degrau (-)	$\frac{0,8686}{0,1117s + 1} e^{-0,0533s}$	$\frac{U(s)}{E(s)} = 2,0026 + \frac{17,9284}{s} + 0,0535$
Segunda Estrutura		$\frac{0,9196}{0,1043s + 1} e^{-0,0524s}$	$\frac{U(s)}{E(s)} = 1,7965 + \frac{17,2244}{s} + 0,0471$

Então, como foi visto no final do capítulo, propuseram-se duas estruturas para o modelo dinâmico e o projeto do controlador do sistema, a primeira estrutura tendo duas funções de transferência, uma para o degrau positivo e outra para o degrau negativo (e como consequência dois controladores); e a segunda estrutura proposta tendo somente uma única função de transferência e um único controlador, tanto para o degrau positivo quanto para o degrau negativo no *Set Point*.

4. RESULTADOS.

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos através da realização de simulações e testes experimentais com a finalidade de validar o trabalho de identificação de parâmetros da planta (turbina hidráulica – gerador síncrono), e de sintonia do controlador PID proposto.

Para isto, conforme já citado na Seção 3.6.4, utilizou-se o teste tradicional para verificar se as especificações definidas pelos critérios usados foram atingidas, isto é, uma variação no *Set Point* em malha fechada.

4.1 Estrutura com duas funções de transferência.

O primeiro ensaio tem por objetivo analisar a resposta do sistema de controle da tensão de saída do gerador diante de um degrau (positivo ou negativo) no *Set Point* do AVR com o controlador em malha fechada e com os parâmetros já definidos. A Figura 4.1 mostra o sistema em malha fechada, a Figura 4.2 mostra o diagrama elétrico de conexão do AVR e as Figuras 4.3 e 4.4 mostram as conexões na planta real.

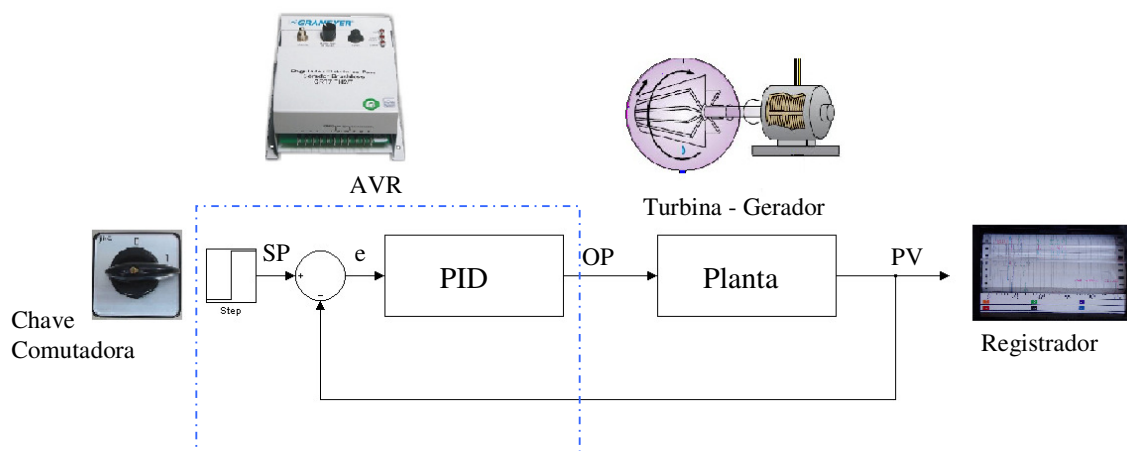


Figura 4.1 Malha fechada submetida a variação no SP.

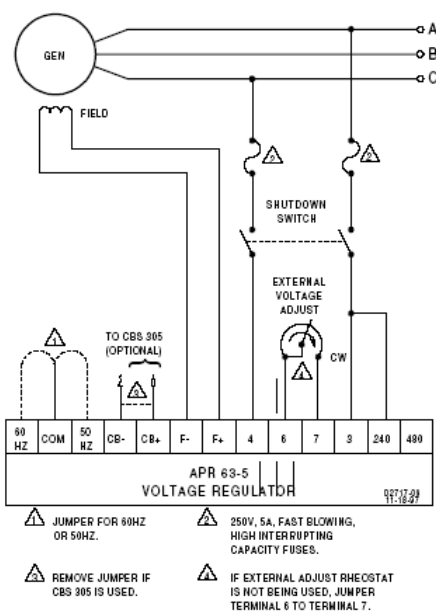


Figura 4.2 Diagrama de conexão do AVR.

(Fonte: Manual do Regulador de Tensão Analógico GRGT-06 Ind. Grameyer)

Como visto na Figura 4.2, os pinos 6 e 7 do AVR são utilizados para fazer um ajuste externo da tensão de referência (SP); neles foi instalado uma chave comutadora de duas posições, uma para colocá-los em curto-circuito e a outra para conectar uma resistência de 1 [kΩ]. Deve-se notar inicialmente que cargas elétricas externas (resistências de ar e lâmpadas) estavam ligadas ao gerador, isto para poder ter um funcionamento correto do AVR e poder atingir os valores nominais sem problemas; isto pode ser visto nas Figuras 4.3 e 4.4.

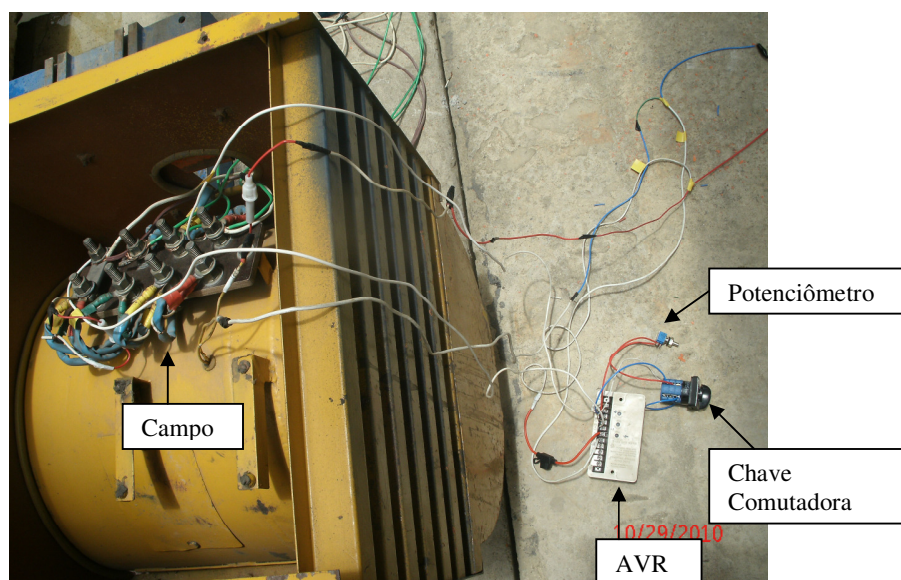


Figura 4.3 Conexão do AVR e da chave comutadora.



Figura 4.4 Realização do ensaio, degrau no Set Point.

Como dito anteriormente, todos os ensaios foram feitos a velocidade constante, com ajuda de um governador eletrônico de carga ($f = \text{cte.}$); isto foi feito devido a que o sistema é basicamente um sistema linearmente independente, ou seja, que o controle de tensão e de velocidade pode ser feito de forma independente. Outro fator importante é que o fabricante recomenda que o AVR não trabalhe a frequências muito baixas, para não causar danos nele.

Degrau positivo no ponto de referência.

Na Figura 4.5 pode-se ver o diagrama de blocos utilizado para fazer a simulação do sistema. Para fins de comparação entre os métodos de sintonia utilizados (IMC e Ziegler e Nichols) fez-se a simulação dos dois sistemas.

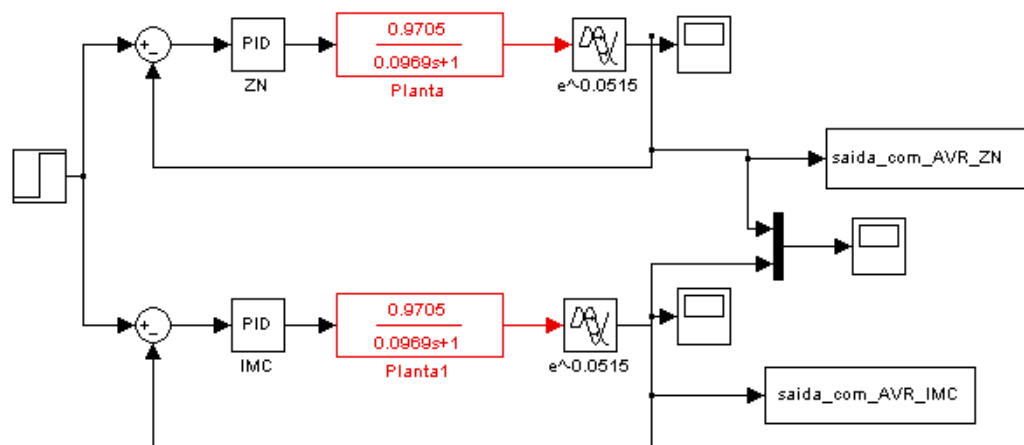


Figura 4.5 Diagrama de blocos da simulação para o degrau positivo.

A Figura 4.6 mostra o registro da variação na tensão de saída do gerador por causa de um degrau positivo no SP (tanto a resposta real da planta como a resposta obtida na simulação). Para fazer a parte da simulação, utilizou-se a função de transferência para um degrau positivo e o PID sintonizado para essa função, segundo a Tabela 3.6.

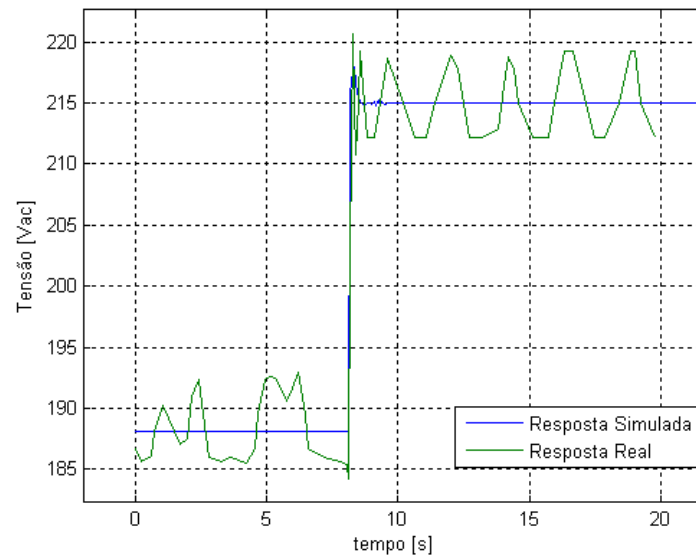


Figura 4.6 Resposta do sistema ao degrau positivo no SP.

Fazendo um zoom na Figura 4.6, tem-se o gráfico da Figura 4.7.

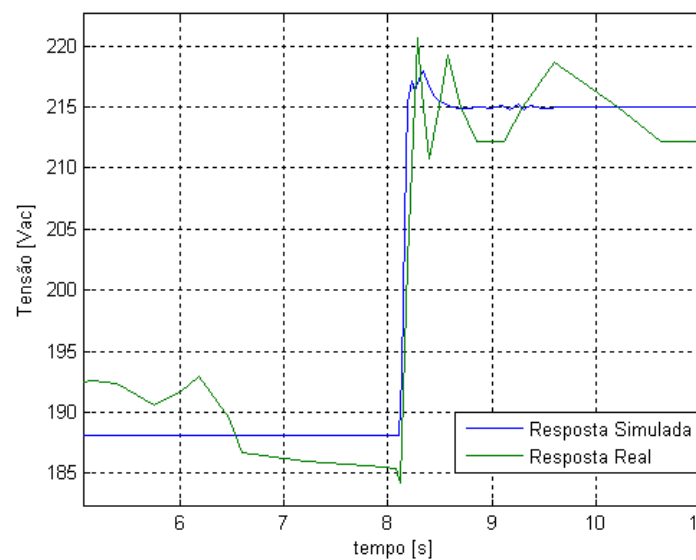


Figura 4.7 Visualização da resposta do sistema no ponto da aplicação do degrau.

Como pode-se ver nas Figuras 4.6 e 4.7, a resposta do controlador sintonizado via IMC e da função de transferência obtida mediante identificação de parâmetros da planta, é muito parecida com a resposta real ao degrau, o que valida o trabalho feito no presente projeto.

Na Figura 4.8, mostram-se as respostas do sistema com um controlador sintonizado via método de Ziegler e Nichols e via IMC.

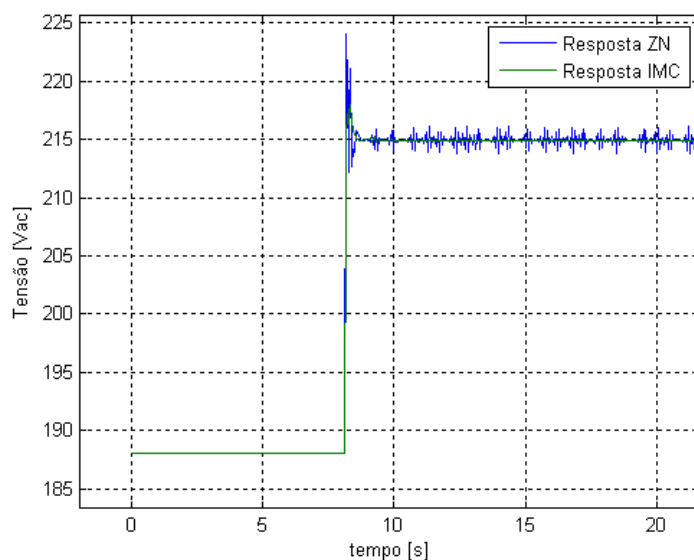


Figura 4.8 Comparação entre os métodos ZN e IMC.

A Figura 4.8 mostra que, com um controlador sintonizado usando as fórmulas de Ziegler e Nichols¹¹ se obtém uma resposta com uma sobre-elevação maior e mais oscilatória do que com um controlador sintonizado via IMC.

Degrau negativo no ponto de referência.

Na Figura 4.9 pode-se ver o diagrama de blocos utilizado para fazer a simulação do sistema.

¹¹ O método de Ziegler e Nichols especifica uma resposta de razão de diminuição gradual de $\frac{1}{4}$ com relação à mudança na entrada de uma perturbação no *Set Point* (Corripio, 2001). Este comportamento do sinal de saída do controlador pode ser visto nas respostas obtidas nas simulações.

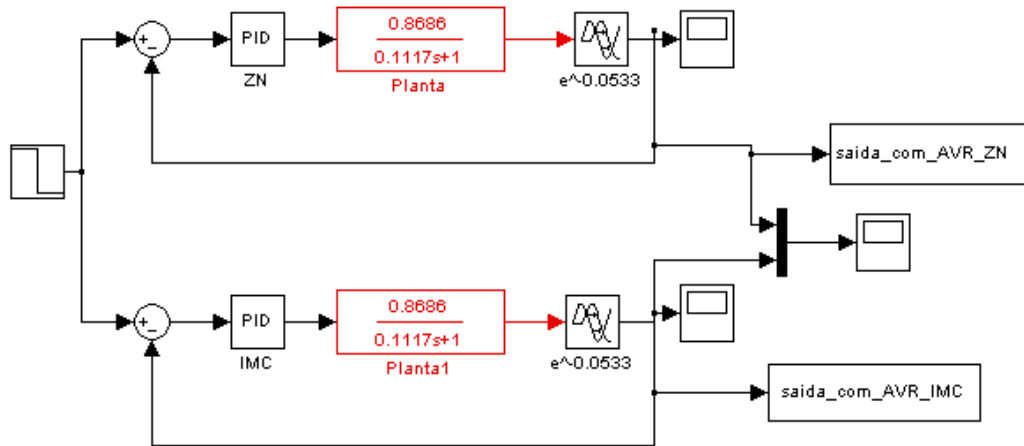


Figura 4.9 Diagrama de blocos da simulação para o degrau negativo.

A Figura 4.10 mostra o registro da variação na tensão de saída do gerador por causa de um degrau negativo no SP (tanto a resposta real da planta como a resposta obtida na simulação). Para fazer a parte da simulação, utilizou-se a função de transferência para um degrau negativo e o PID sintonizado para essa função, segundo a Tabela 3.6 (página 79).

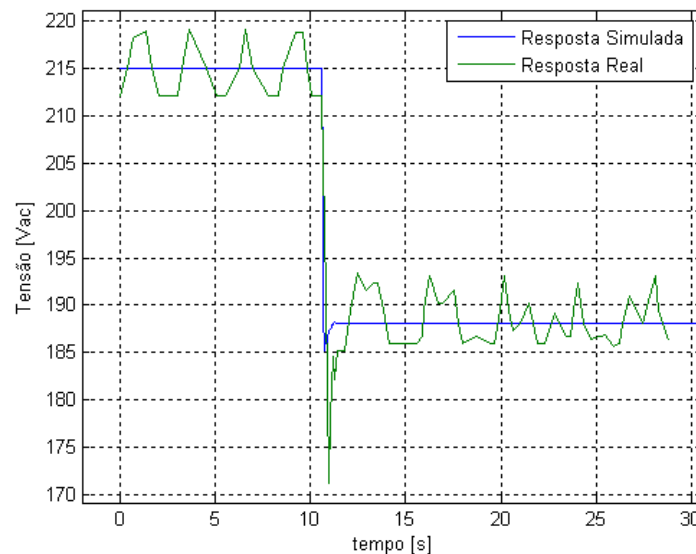


Figura 4.10 Resposta do sistema ao degrau negativo no SP.

A Figura 4.11 mostra um zoom na Figura 4.10.

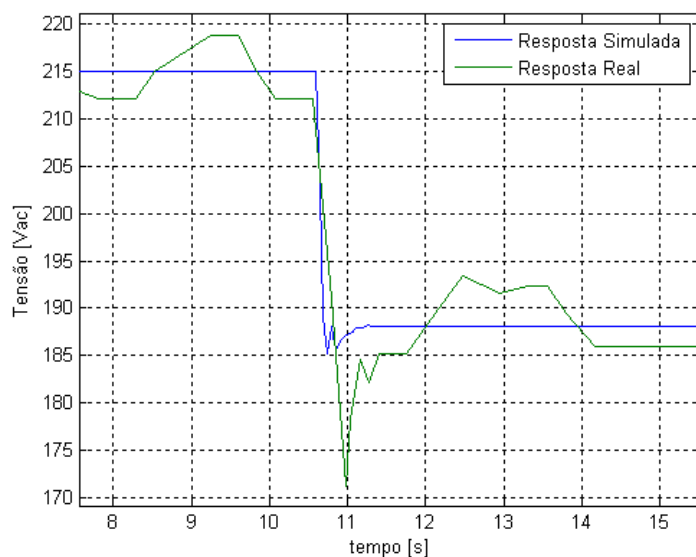


Figura 4.11 Visualização da resposta do sistema no ponto da aplicação do degrau.

Como pode-se ver na Figura 4.10 e 4.11, a resposta do controlador sintonizado via IMC e da função de transferência obtida mediante identificação de parâmetros da planta, é muito parecida com a resposta real ao degrau, o que valida o trabalho feito no presente projeto.

A seguir (Figura 4.12), mostram-se as respostas do sistema com um controlador sintonizado via método de Ziegler e Nichols e via IMC.

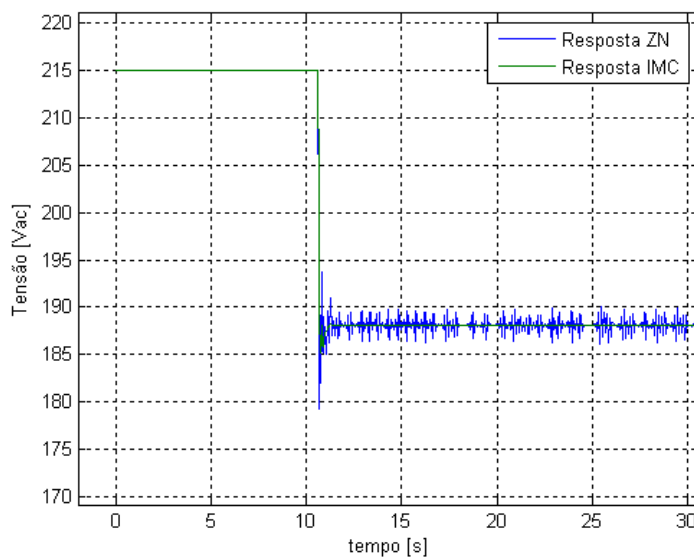


Figura 4.12 Comparação entre os métodos ZN e IMC.

Novamente, pode-se ver na Figura 4.12 que, com um controlador sintonizado usando as fórmulas de Ziegler e Nichols se obtém uma resposta com uma sobre-elevação maior e mais oscilatória do que com um controlador sintonizado via IMC.

4.2 Média das funções de transferência.

O segundo ensaio tem por objetivo analisar a resposta do sistema de controle da tensão de saída do gerador diante de um degrau (positivo ou negativo) no *Set Point* do AVR com o controlador em malha fechada e com os parâmetros já definidos na Tabela 3.6 (página 79), para uma única função de transferência e um único controlador.

A Figura 4.13 representa o sistema em malha fechada utilizado na simulação e as Figuras 4.14 e 4.15 as respostas do sistema diante uma variação do ponto de referência positivo e negativo.

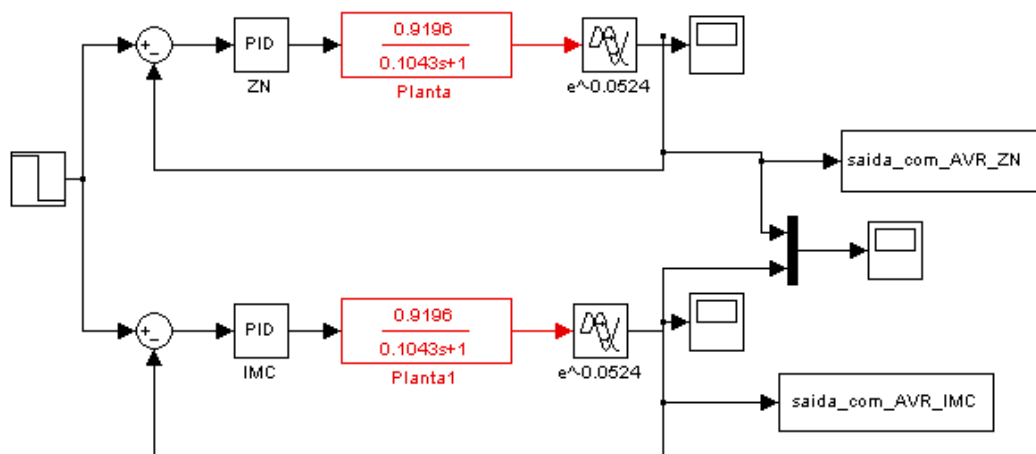


Figura 4.13 Diagrama de blocos utilizado para a simulação com a média das funções de transferência.

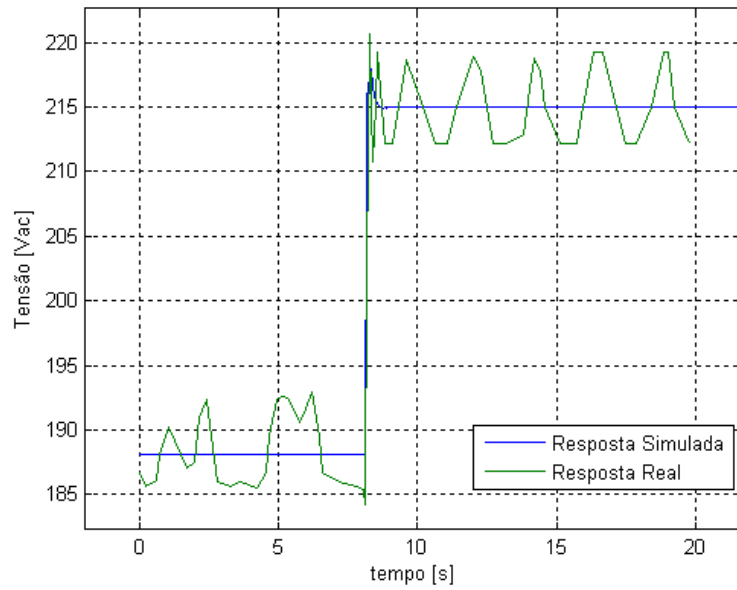


Figura 4.14 Resposta do sistema ao degrau positivo no SP.

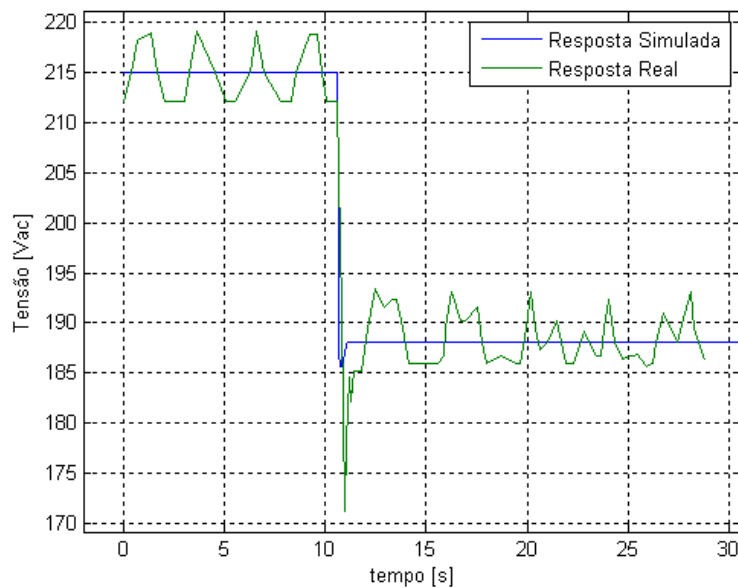


Figura 4.15 Resposta do sistema ao degrau negativo no SP.

Como pode-se ver nas Figuras 4.14 e 4.15, a utilização de uma única função de transferência e de um único controlador sintonizado via IMC dá uma resposta bastante parecida com as obtidas no primeiro ensaio (estrutura com duas funções de transferência), obtendo-se um *offset* de 0% e um *overshoot* menor a 2% em ambas as respostas.

No presente trabalho, tentou-se expor da maneira mais clara e didática possível todo o procedimento feito para a obtenção de um modelo matemático que possa representar o comportamento de uma planta real definida como o conjunto turbina hidráulica – gerador síncrono; desde a montagem da planta em laboratório, explicando os procedimentos experimentais para a obtenção dos dados reais da planta, até chegar ao modelo da mesma e a projeção dos controladores; e a comparação das respostas do modelo teórico (obtidas em *Simulink*) e da planta real (obtidas em laboratório) diante perturbações no *Set Point*, que confirmaram a validade do trabalho realizado.

No final do trabalho, as conclusões às que se chegaram durante o desenvolvimento do presente projeto e algumas recomendações para futuras pesquisas nesta área podem ser encontrados nos Capítulos 5 e 6.

5. Conclusões.

Ao finalizar o presente projeto, chegamos às conclusões seguintes:

- O modelo da planta obtido (gerador – turbina hidráulica) e o controlador PID projetado usado para controlar a tensão de saída da energia elétrica gerada, demonstraram ter um comportamento dinâmico muito próximo com a planta real, o que foi comprovado fazendo a comparação das respostas obtidas em laboratório com as respostas das simulações.
- Para poder realizar os ensaios no laboratório, fez-se a montagem da planta nos ambientes do IHH – UMSA e se usaram os componentes e instrumentos próprios do laboratório para otimizar gastos.
- Nos ensaios realizados na planta, usou-se um gerador síncrono BRUSHLESS que é o tipo de geradores que atualmente são usados nos projetos executados no IHH.
- O procedimento efetuado nos ensaios de obtenção de dados é válido para qualquer tamanho de gerador com AVR.
- O modelo dinâmico da planta obtido através de ensaios experimentais em laboratório foi usado para realizar a sintonia do controlador PID, que demonstrou um desempenho satisfatório cumprindo com os critérios desejados na resposta do sistema.
- Uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto demonstrou poder representar o comportamento do processo de forma satisfatória.
- Obtiveram-se duas funções de transferência que descrevem o comportamento dinâmico do sistema: uma para uma perturbação positiva e outra para uma perturbação negativa na referência.
- O controle proposto é do tipo PID paralelo, devido a que se procurava uma resposta rápida e quase sem sobrelevação.

- Fez-se a sintonia do controlador PID usando os métodos de Ziegler – Nichols e o IMC (*Internal Model Control*), conseguindo-se melhores resultados com este último método.
- Propuseram-se duas estruturas de controle, demonstrando as ambas um desempenho satisfatório.
- Finalmente podemos dizer que o trabalho feito atingiu o objetivo proposto, e que poderá ser a base para futuros trabalhos no que se refere a pesquisas nas áreas de controle de velocidade, estabilidade do sistema, entre outros, no campo das Micro Centrais Hidroelétricas.

6. Recomendações.

Com a finalidade de dar continuidade à pesquisa visando à melhoria na obtenção de dados e ensaios futuros, sugerem-se os seguintes pontos:

- Com a finalidade de poder monitorar as variáveis do processo com mais precisão e para fins de análise, recomenda-se o uso de algum dispositivo de aquisição de dados junto com um software de supervisão e controle de processos, como por exemplo, a placa de aquisição de dados CIO-DAS08/Jr-AO e o programa *In Touch* da *Wonderware Corporation*.
- Antes de iniciar qualquer ensaio na planta real, é fortemente recomendado estudar com antecedência o manual do AVR e garantir a sua operação na faixa dos valores recomendado pelo fabricante, posto que esse dispositivo é muito sensível e pode ficar danificado ou até ficar inservível se operar fora dos limites por um tempo considerável.
- Os resultados obtidos neste trabalho podem ser utilizados como base para futuros projetos de controle de frequência em MCHs, tanto em sistemas isolados como em sistemas interligados.
- Também os modelos obtidos da planta e do AVR podem ajudar de grande maneira no estudo da estabilidade do sistema e seu comportamento diante falhas, como por exemplo, falhas trifásicas ou falha linha-terra no gerador síncrono.
- Em futuros trabalhos, seria interessante estudar também a utilização de um PSS (estabilizadores de sistemas de potência) e a sua influência na resposta do sistema.

Referências Bibliográficas

- Aguirre, L. (2007). Introdução à Identificação de Sistemas, *Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC*, Santa Catarina.
- Aström, K. e Hägglund, T. (1995). PID Controllers: Theory, Design and Tuning, *ISA*, USA.
- Brosilow, C. e Joseph, B. (2002). Techniques of Model – Based Control, *Prentice-Hall*, Upper Saddle River, NJ.
- Chee-Mun, O. (1998). Dynamic Simulation of Electric Machinery, *Prentice Hall PTR*, New Jersey, USA.
- Coelho, A. e Coelho, L. (2004). Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. *Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC*, Santa Catarina.
- Corripio, A. (2001). *Tuning of Industrial Control Systems*, *International Society of Automation*, ISA, USA.
- Ferreira, E. (2000). Proposta de Controle para uma Coluna de Destilação Didática, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica/Automação, UFES*, Espírito Santo.
- Hang, C. e Chin, D. (1991). Reduced Order Process Modeling in Self-Tuning Control, *Automatica*, v.27, p. 529-534.
- Kosow, I. (1993). Máquinas Eléctricas y Transformadores, *Prentice-Hall*, Ciudad de México, México.
- Kundur, P. (1993). Power System Stability and Control, *McGraw-Hill*, California, USA.
- Martin, J Jr. (1976). How to Select Controller Modes and Tuning Parameters from Simple Process Models, *ISA Transactions*, Vol. 15, pp. 314-19.
- Mercado, J. (2006). Programa Electricidad para Vivir con Dignidad, *Ministério de Obras Públicas, Servicios y Vivienda*, La Paz, Bolívia.
- Mollenkamp, R. (1988). Controle Automático de Processos, *Ebra*, São Paulo.
- Monroy, J. (2002). Potencial Hidroeléctrico Específico de la República de Bolívia, *Centro de Información en Energías Renovables (CINER)*, Número 21, Cochabamba, Bolívia.

- Montaño, E. (2000). Regulación de Velocidad en Micro Centrales Hidroeléctricas, *Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH), Recursos Hídricos*, Número 1, La Paz, Bolivia.
- Ogata, K. (1998). Ingeniería de Control Moderna, *Prentice-Hall Hispanoamericana*, México.
- Seborg, D., Edgar, T., Mellichamp, D. (1989). Process Dynamics Control, *Wiley*, Texas, USA.
- Souza, F. (1998). Sistema de Sintonia de Malhas de Controle Industriais Utilizando Técnicas Adaptativas à Modelo de Referência, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica/Automação, UFES*, Espírito Santo.
- Thierry, Van Custem. (2004). An Educational Simulation Tool for Power System Control and Stability, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol 19, no. 1, pp. 48-55.
- Valdman, B., Salgado, A., Folly, R. (2008). Dinâmica, Controle e Instrumentação de Processos, *Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ*, Rio de Janeiro.
- Vanfretti, L. (2005). Modelación y Simulación de la Máquina Síncrona y su Operación en Sistemas de Potencia, *Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC*, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Vanfretti, L. (2007). Sistemas de Control de Excitación y Estabilizadores de Sistemas de Potencia, *Rensselaer Polytechnic Institute, RPI*, New York, USA.

APÊNDICE 1: Manual de Instalação, Operação e Manutenção do Gerador RANGO A.

APÊNDICE 2: Manual de Instalação e Operação do Regulador de Tensão Analógico GRGT-06

APÊNDICE 3: Gráficos Obtidos com Registrador nos Ensaios em Laboratório.

APÊNDICE 4: Obtenção da curva *Sigmoidal*.

Muitos processos naturais de sistemas complexos apresentam uma progressão temporal desde uns níveis baixos no início, até ficar perto do ponto de maior intensidade depois de certo tempo; a transição se produz numa região caracterizada por uma forte aceleração intermédia. A função *Sigmoide* permite descrever esta evolução; sua gráfica tem uma forma típica de ‘S’.

No presente trabalho, a obtenção da curva *Sigmoide* para realizar a análise dos dados obtidos em laboratório, foi feita através de um algoritmo criado em *Matlab* e baseado na publicação “*Modeling market adoption in Excel with a simplified s-curve*”¹².

A seguir é mostrado o algoritmo feito para a análise dos dados, em que se mostra a parte da obtenção da curva *Sigmoidal*.

```
%CURVA SIGMOIDAL
base_year=0;                                     %ponto no tempo onde
                                                começa a curva Sigmoidal

MP_inicial=213.5462;                             %valor inicial da curva

saturat=197.989;                                 %valor da estabilização
                                                após a aplicação do
                                                degrau

saturation=saturat-MP_inicial;

hypergrowth=23.0;                               %Ponto no tempo
                                                correspondente a 10% do
                                                valor de saturation
                                                Começo do crescimento
                                                rápido

takeov=33;                                       %Ponto no tempo
takeover=takeov-hypergrowth;                   correspondente a 90% do
                                                valor de saturation
                                                %Ponto final do
                                                crescimento rápido

tempo_inicial=base_year;
tempo_final=90;
h=(tempo_final-tempo_inicial)+1;
tempo_inicial=tempo_inicial-1;
for k=1:h
    ano(k)=tempo_inicial+k;
    MP(k)=saturation/(1+81^((hypergrowth+takeover/2-ano(k))/takeover))+MP_inicial;
                                                %Market Penetration
                                                segundo a publicação
end

figure(92)
plot(ano,MP,'r',tempoN,ondaN,'b'),axis([base_year-5 tempo_final+5 min(ondaN)-5 max(ondaN)+5]).grid
```

¹² <http://8020world.com/blog/2007/04/excel/modeling-market-adoption-in-excel-with-a-simplified-s-curve>.

E o gráfico obtido pode-se ver na Figura A.1.

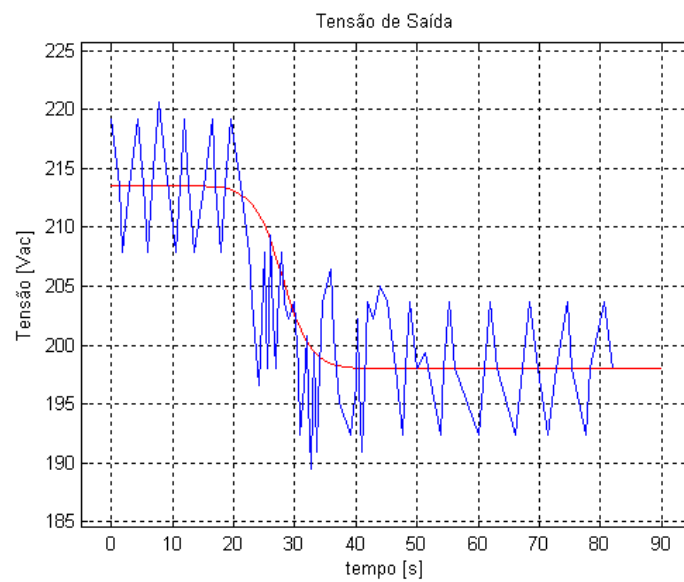


Figura A.1 Obtenção da curva *Sigmoide*.

APÊNDICE 5: Diagrama Elétrico Geral de uma MCH.

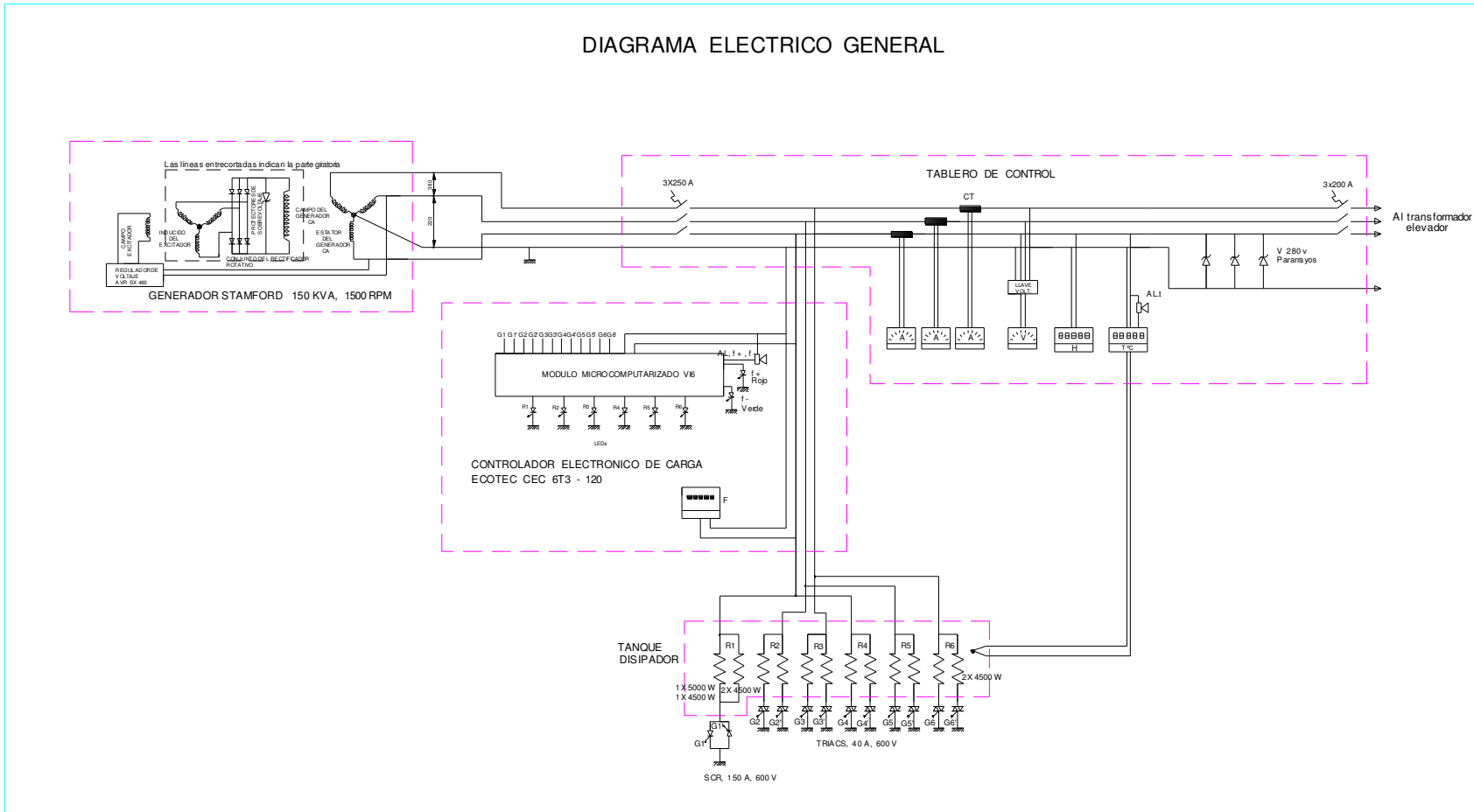


Figura A.2 Diagrama eléctrico geral de uma MCH.