

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA ÊNFASE EM AUTOMAÇÃO

DANILO CANCELA DA ROCHA
FELIPE MAIA BARBOSA OLIVEIRA
MAURICIO NARDI

**SIMULADOR DE REGULADOR DE VELOCIDADE PARA TURBINAS
HIDRÁULICAS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

DANILO CANCELA DA ROCHA
FELIPE MAIA BARBOSA OLIVEIRA
MAURICIO NARDI

SIMULADOR DE REGULADOR DE VELOCIDADE PARA TURBINAS HIDRÁULICAS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Elétrica, ênfase em Automação, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Jorge Assade Leludak, MSc.

Co-Orientador: Prof. Edson Mancini Filho, MSc.

CURITIBA

2013

DANILO CANCELA DA ROCHA
FELIPE MAIA BARBOSA OLIVEIRA
MAURÍCIO NARDI

Simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica, ênfase em Automação, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 11 de setembro de 2013

Prof. Paulo Sérgio Walenia.
Coordenador de curso
Engenharia Industrial Elétrica ênfase Automação

Prof. Marcelo de Oliveira da Rosa, Dr.
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Jorge Assade Leludak, Msc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Edson Mancini Filho, Msc.
Intertechne
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Jorge Assade Leludak, Msc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Daniel Balieiro Silva, Msc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José da Silva Maia, Msc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica ênfase em Automação

AGRADECIMENTOS

Diante de todas as dificuldades, sacrifícios e renúncias, chegamos ao fim, e, junto a isto, não poderíamos esquecer-nos de agradecer a Deus por permitir a oportunidade de estudar numa instituição de ensino referência no país, a qual nos proveu as ferramentas necessárias para a elaboração deste trabalho.

Palavras são restritas para expor o sentimento de gratidão ao nosso dedicado e incentivador Msc. Professor Edson Mancini Filho, que nos serviu como alicerce principal para a consolidação deste trabalho, e, ao nosso orientador Msc. Professor Jorge Assade Leludak.

RESUMO

ROCHA, Danilo; OLIVEIRA, Felipe; NARDI, Mauricio. **Simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas** 2013. 107 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Este trabalho de conclusão de curso tem o objetivo de fornecer ao meio acadêmico um simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas. O regulador de velocidade realiza o comando de abertura ou fechamento do distribuidor ou bico injetor das turbinas hidráulicas Francis, Kaplan ou Pelton, regulando a vazão da água que chega ao rotor da turbina. O simulador consiste em abordar diferentes condições de operações do sistema (partida, parada e rejeição de carga) e proporcionar ao usuário o controle das variáveis do processo: potência ativa, velocidade, frequência e abertura, a partir de valores inseridos pelo usuário do programa. Foi elaborado um manual de operação para utilização do simulador no qual são demonstradas as sequências de operação e uma explicação das funções executadas pelo regulador de velocidade.

Palavras-chave: Usinas Hidrelétricas. Geração de energia. Regulador de velocidade. Turbinas Hidráulicas.

ABSTRACT

ROCHA, Danilo; OLIVEIRA, Felipe; NARDI, Mauricio. **Simulator speed governor for hydraulic turbines of hydroelectric** 2013. 107 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

This completion of course work is aimed to supply in academic mean a simulator of speed governor used in hydraulic turbines of hydroelectric plant. The speed governor execute an opening or closing command of slide valve or spear of Francis, Kaplan or Pelton turbines in order to control flow of water that comes from turbine rotor. The simulator consists in show different operations conditions system (start, stop and rejection) and provides to user a control of process variables, like: active power, speed, frequency and opening, according to initial values sets from user. It has made a guide of operation where is shown the sequences of operation and one explanation about speed governor functions.

Keywords: Hydroelectric plant. Energy Generation. Speed Governor. Hidraulic Turbines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de funcionamento da usina hidrelétrica.....	14
Figura 2- Francis eixo vertical em corte	22
Figura 3 - Francis Eixo Horizontal	23
Figura 4 - Turbina Kaplan em corte.....	24
Figura 5 - Corte transversal Turbina Kaplan.....	24
Figura 6 - Rotor da Turbina Kaplan	25
Figura 7 - Corte parcial e total rotor Kaplan	25
Figura 8 - Palhetas diretrizes Kaplan	26
Figura 9 - Caixa espiral Kaplan	26
Figura 10 - Rotor turbinas Pelton	27
Figura 11 - Pás turbinas Pelton	27
Figura 12- Esquema de funcionamento turbina Pelton	28
Figura 13 - Reservatório de óleo.....	30
Figura 14 - Visão superior das moto bombas.....	31
Figura 15 - Trocadores de calor.....	32
Figura 16 - Acumulador de ar e óleo	32
Figura 17 - Compressor de ar	33
Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema de bombeamento	34
Figura 19 - Válvula distribuidora (esquerda) e válvula de isolamento (direita).....	35
Figura 20 – Atuador.....	35
Figura 21 – Servomotor	37
Figura 22 - Aro de regulação.....	37
Figura 23 - Dispositivo de sobrevelocidade	38
Figura 24 - Lógica de acionamento do dispositivo de sobre velocidade	38
Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema de regulação	39
Figura 26 - Compressor de ar.....	40
Figura 27 - Detalhe do controle de nível	41
Figura 28 - CPU S7300 com cartão de memória.....	42
Figura 29 - Interface humano e máquina.....	43
Figura 30 - Fonte de alimentação.....	44
Figura 31 - Emissão de pulso magnético.....	44
Figura 32 - Diagrama trifilar da instalação dos transformadores de potência.....	45
Figura 33 - Diagrama de blocos do circuito eletrônico.....	46
Figura 34 - Representação esquemática do circuito eletrônico.....	47
Figura 35 - Gráfico da partida da máquina.....	49
Figura 36 - Gráfico de rejeição de carga ativa P e regulação da velocidade no seu valor nominal 100%.....	51
Figura 37 - Gráfico de rejeição de carga ativa e parada total.....	51
Figura 38- Painel Frontal e o seu diagrama de bloco.....	56
Figura 39 - Elementos básicos dos diagramas de blocos	57
Figura 40 - subVI "Temp"	57
Figura 41 – Bloco lógico <i>Timer on</i>	58
Figura 42 – Bloco lógico <i>Set Reset</i>	58
Figura 43-Bloco lógico Integrador	59
Figura 44- Bloco lógico do Integrador com limitação.....	59
Figura 45 - Bloco lógico da função de transferência	60
Figura 46 - Bloco lógico entrada de rampa	60

Figura 47 - Bloco lógico da bomba de óleo	61
Figura 48 - Bloco lógico da Válvula de descarga	62
Figura 49 - Blocos lógicos acumulador de óleo pressurizado	63
Figura 50 - Bloco lógico da válvula de isolamento	64
Figura 51 - Blocos lógicos da eletroválvula de emergência.....	65
Figura 52 - Simulação da trava hidráulica	66
Figura 53 - Bloco lógico da válvula distribuidora	66
Figura 54 - Bloco lógico do servomotor.....	67
Figura 55 - Bloco lógico da inércia do conjunto girante.....	67
Figura 56 - Bloco lógico turbina Francis.....	68
Figura 57- Bloco lógico turbina Kaplan Fonte.....	69
Figura 58- Bloco lógico turbina Pelton.....	69
Figura 59 - Bloco lógico bomba do mancal escora.....	70
Figura 60 - Blocos lógicos Freio do gerador.....	70
Figura 61 - Simulação da partida e parada do circuito eletrônico.....	72
Figura 62 - Simulação do disjuntor 52-G.....	72
Figura 63 - Simulação dos modos de regulação do regulador de velocidade.....	73
Figura 64 - Simulação dos modos de regulação do regulador de velocidade	74
Figura 65 - Bloco lógica conversão potência/abertura	74
Figura 66 - subVI servomotor.....	75
Figura 67 - IHM Regulador de velocidade.....	76
Figura 68 - Permissão partida sistema.....	79
Figura 69 - Regulação abertura 20%	80
Figura 70 - Regulação de abertura 10%	81
Figura 71 - Disjuntor de campo 41G	81
Figura 72 - Disjuntor do gerador 52G.....	82
Figura 73 - Foto da IHM rejeição de carga.....	83
Figura 74 - Efeito da ação integral	86
Figura 75 - Regulação de potência ativa	86
Figura 76 - Regulação de abertura.....	88
Figura 77 - Referência de estatismo	89
Figura 78 - Estatismo permanente	89
Figura 79 - Foto IHM turbina Francis.....	91
Figura 80 - Foto IHM turbina Kaplan	91
Figura 81 - Foto IHM turbina Pelton	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

41G	Variável de Saída do disjuntor de campo
52G	Variável de Saída do disjuntor do gerador
A	Ampère
A/D	Analógico/Digital
AC-B	Variável do Limite Inferior de Pressão
AC-M	Variável do Limite de Pressão Mínima
AC-S	Variável do Limite Superior de Pressão
AGC	<i>Automatic Generation Control</i>
and	Função Lógica E
BO	Variável da Bomba de Óleo
CLP	Controlador Lógico Programável
DLL	<i>Dinamic Link Library</i>
EVE	Variável de Eletroválvula de Emergência
H	Altura
Hz	Hertz
if	Função lógica SE
IHM	Interface Homem-Máquina
Labview	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
m	Metro
MW	Megawatt
N-AC	Variável de Pressão de Saída

not	Função Lógica Não
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
or	Função Lógica OU
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
SEP	Sistemas Elétrico de Potência
SM	Servomotor
SM-A	Servomotor Fechado
SM-F	Servomotor Fechado
sub vis	Sub-rotinas do simulador LabView
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TH	Turbina Hidráulica
TVH	Trava Hidráulica
UG	Unidade Geradora
V	Volt
VD	Válvula de Descarga
VDIST	Válvula Distribuidora
VI-A	Abertura da Válvula de Isolamento
VI-F	Fechamento da Válvula de Isolamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. TEMA	14
1.1.1. Delimitação do Tema.....	15
1.2. PROBLEMA E PREMISSAS	16
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4. JUSTIFICATIVA	17
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	18
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. REGULADOR DE VELOCIDADE	20
2.1 TURBINAS HIDRÁULICAS	20
2.1.1 Turbina hidráulica Francis.....	21
2.1.2 Turbina hidráulica Kaplan	23
2.1.2.1 Palhetas diretrizes	26
2.1.2.2 Caixa espiral	26
2.1.3 Turbina Hidráulica Pelton.....	27
2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO REGULADOR DE VELOCIDADE	29
2.2.1 Circuito hidráulico	29
2.2.1.2 Reservatório de óleo.....	30
2.2.1.3 Motobombas	30
2.2.1.4 Válvulas de retenção	31
2.2.1.5 Válvulas comutadoras.....	31
2.2.1.6 Válvulas de descarga.....	31
2.2.1.7 Trocadores de calor	31
2.2.1.8 Acumulador de ar e óleo	32
2.2.1.9 Compressor de ar	33
2.2.1.10 Válvulas de intermitência	33
2.2.1.11 Válvula de isolamento.....	33
2.2.1.12 Sistema de Regulação.....	34
2.2.1.13 Válvula distribuidora.....	34
2.2.1.14 Atuador ou Bobina de imersão.....	35
2.2.1.15 Filtro de óleo	36
2.2.1.16 Êmbolo de travamento mecânico.....	36
2.2.1.17 Válvula de segurança	36

2.2.1.18 Válvula de comando da emergência.....	36
2.2.1.19 Válvula de bloqueio.....	36
2.2.1.20 Servomotores.....	37
2.2.1.21 Aro de regulação.....	37
2.2.1.22 Relé de sobrevelocidade	38
2.2.1.23 Redutor de pressão	39
2.2.1.24 Transdutores de posição	39
2.2.2 Circuito elétrico	40
2.2.2.1 Controle do compressor de ar	40
2.2.2.2 Pressostatos	41
2.2.2.3 Controlador do acumulador de ar-óleo	41
2.2.3 Circuito eletrônico	42
2.2.3.1 Controlador Lógico programável (CLP)	42
2.2.3.2 Interface humano-máquina.....	43
2.2.3.3 Fonte de alimentação	43
2.2.3.4 Transdutores de posição do distribuidor	44
2.2.3.5 Transdutores de potência	45
2.3 FUNÇÕES DO REGULADOR DE VELOCIDADE.....	47
2.3.1 Partida da unidade geradora	48
2.3.2 Ajuste de frequência	49
2.3.3 Parada da Unidade Geradora.....	49
2.3.4 Controle de potência ativa	50
2.3.5 Controle da frequência após rejeição de carga sem parada total.....	50
2.3.6 Regulação de velocidade/potência ativa e estatismo	52
2.3.7 Regulação de abertura	53
2.3.8 Monitoração	53
2.3.9 Limitações de abertura e potência	54
3. REPRESENTAÇÃO DOS BLOCOS LÓGICOS	55
3.1 LABVIEW	55
3.1.1 Instrumentos Virtuais (VI)	56
3.2 BLOCOS LÓGICOS.....	58
3.3 CIRCUITO HIDRÁULICO.....	60
3.3.1 Bomba de óleo.....	61
3.3.2 Válvula de descarga	61
3.3.3 Acumulador de óleo pressurizado.....	62
3.3.4 Válvula de isolamento.....	64
3.3.5 Eletroválvula de emergência.....	64

3.3.6 Trava hidráulica	65
3.3.7 Válvula distribuidora.....	66
3.3.7 Servomotor	66
3.3.8 Turbina Hidráulica.....	68
3.3.9 Bomba do mancal escora	70
3.3.10 Freio do gerador	70
3.4 CIRCUITO ELETRÔNICO	71
3.2.1 Partida e parada do regulador de velocidade	71
3.2.2 Disjuntores 41G/52G	72
3.2.3 Modos de regulação	73
4. IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR E ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
4.1 Operações do sistema	77
4.1.1 Partida da unidade geradora	77
4.1.1.1 Comandos hidráulicos	77
4.1.1.2 Comandos eletrônicos	79
4.1.2 Rejeição de carga	82
4.1.3 Parada da unidade geradora	83
4.1.3.1 Comandos eletrônicos	83
4.1.3.2 Comandos hidráulicos	84
4.2.2 Modos de regulação	85
4.2.2.1 Controle de potência.....	85
4.2.2.2 Controle de Velocidade (Frequência) – Antes do Sincronismo.....	87
4.2.2.3 Controle de velocidade – Após o sincronismo	87
4.2.2.4 Regulação de abertura	87
4.2.2.5 Estatismo	88
4.2.3 Seletor de turbinas.....	89
5.CONCLUSÃO.....	92
REFERÊNCIAS.....	94
APÊNDICE A.....	96

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

Atualmente a matriz energética brasileira representa uma das fontes de energia mais limpas do mundo, em que a maioria de toda energia adquire-se através da utilização de usinas hidrelétricas (GOVERNO FEDERAL, 2013).

O princípio de funcionamento de uma usina hidrelétrica consiste no processo de transformar energia potencial gravitacional da água em energia mecânica na turbina hidráulica, a qual acoplada ao gerador “gera” energia elétrica, conforme demonstrado na figura 1.

O regulador de velocidade atua no controle da vazão de água, que se relaciona diretamente com a geração de energia elétrica, no qual se deve ajustar a potência elétrica gerada de acordo com a demanda de energia elétrica solicitada pelo Sistema Elétrico de Potência (SEP).

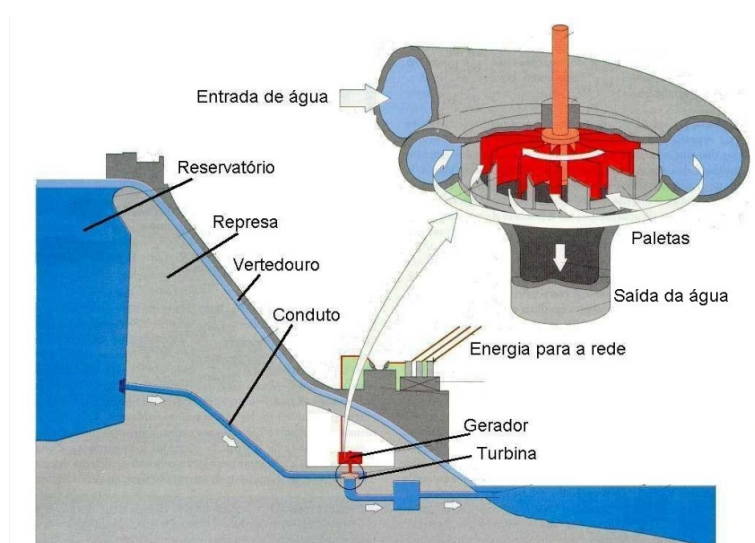


Figura 1 - Princípio de funcionamento da usina hidrelétrica
Fonte: Infoescola (2013).

1.1.1. Delimitação do Tema

O regulador de velocidade da turbina hidráulica é responsável pelo controle da velocidade e da potência ativa fornecida ao Sistema Elétrico pelos geradores acionados por turbinas hidráulicas nas usinas hidrelétricas. Em resumo, o regulador de velocidade atua no circuito hidráulico do distribuidor da turbina (Francis ou Kaplan) ou no bico injetor (Pelton) comandando sua abertura ou fechamento, regulando a vazão de água que entra no rotor da turbina, onde a energia hidráulica é transformada em energia mecânica no eixo acoplado ao gerador; o gerador produz energia elétrica para atender a demanda do Sistema Elétrico mantendo sua frequência constante no valor nominal (60 Hz).

Conforme citado, em uma usina hidrelétrica, a turbina hidráulica tem a função de converter a energia hidráulica em energia mecânica, na forma de rotação e torque no seu eixo. A água proveniente de um canal ou reservatório, que se encontra em um nível elevado, é conduzida à turbina, localizada em um nível inferior, através de um conduto forçado, túnel ou estrutura de concreto, e, ao passar pelo rotor da turbina, transforma a energia hidráulica (velocidade ou diferença de pressão da água) em rotação e torque no eixo da turbina. O rotor da turbina é acoplado ao eixo do gerador que transforma a energia mecânica em energia elétrica, que é fornecida ao Sistema Elétrico.

“O regulador de velocidade hidráulico tem como ação final a abertura ou o fechamento do distribuidor da turbina. Óleo sob pressão saindo da válvula distribuidora chega aos servomotores, direito e esquerdo, que, simultaneamente, acionam o anel de regulação e este, aciona um conjunto de bielas que movimentam as palhetas móveis do distribuidor no sentido abri-las ou fechá-las. Com essa ação de abrir ou fechar o distribuidor o regulador executará as funções descritas neste item.” (MANCINI FILHO, E., 2004)

As ações realizadas pelo regulador de velocidade que são indicadas no trecho acima por Mancini (2004), são: partida da unidade geradora, ajuste da frequência para o sincronismo do gerador com o Sistema elétrico, parada da unidade geradora, controle da potência ativa, controle da frequência após a rejeição de carga sem parada total, ação da regulação de velocidade e estatismo, operação compensador síncrono, detector de deslizamento e relés de velocidade.

A necessidade de se manter a frequência constante (60 Hz) é para garantir que a potência ativa gerada seja igual à potência ativa consumida, mantendo a energia fornecida para o Sistema Elétrico dentro do padrão de qualidade estipulado pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). A energia fornecida pelo gerador não pode ser armazenada e, por isso, ela deve ser gerada na medida certa, sempre que for solicitada pela carga. Grandes quantidades de energia ativa de origem hidráulica só podem ser armazenadas nos reservatórios das usinas hidrelétricas.

1.2. PROBLEMA E PREMISSAS

Para a elaboração de um simulador do regulador de velocidade, faz-se necessário a integração de blocos lógicos, que representam os componentes do sistema, aquisição de dados empíricos (características dinâmicas do sistema) e estudos dos componentes hidráulicos e eletrônicos, contidos no sistema de regulação de velocidade de uma turbina hidráulica.

Em termos de simulação, a integração de diversos componentes inseridos numa mesma estrutura pode representar uma dificuldade para elaborar um roteiro de operação do *software*, então, um sistema que exhibe interligações com diversas variáveis e pré-condições de funcionamento, conseqüentemente, poderão gerar erros durante a simulação. Além da integração entre sistemas hidráulicos e eletrônicos, o simulador tem a opção de modificar o tipo de turbina utilizada (Kaplan, Francis ou Pelton) de forma a avaliar os valores das variáveis de saídas (potência ativa, frequência, e rotação) dessas turbinas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho proposto são:

- a) pesquisar um referencial bibliográfico para a realização do trabalho;
- b) estudar sobre o regulador de velocidade e seu funcionamento;
- c) realizar um estudo sobre os componentes hidráulicos e eletrônicos do regulador de velocidade;
- d) estudar sobre as turbinas hidráulicas Kaplan, Francis e Pelton;
- e) desenvolver uma representação lógica do regulador de velocidade para os três modelos de turbina hidráulica;
- f) simular o modelo proposto utilizando o software Labview;
- g) desenvolver IHM para interação com o simulador de regulação de velocidade;
- h) implementar um simulador capaz de realizar o controle de posicionamento do servomotor para partida e parada da turbina, regulação de frequência e controle da potência ativa;
- i) elaborar um manual de instruções para o simulador;

1.4. JUSTIFICATIVA

O simulador poderá ser utilizado como material didático para treinamento da operação, manutenção elétrica e manutenção mecânica da usina hidrelétrica, além de que, as instituições de ensino não possuem laboratórios com os equipamentos necessários para experimentos físicos dessa natureza, tornando interessante um simulador que execute as funções de forma semelhante. A análise do funcionamento do regulador de velocidade é importante visto a necessidade de sua utilização para a geração de energia elétrica, sendo interessante o uso do simulador para a formação acadêmica de engenheiros eletricitas.

No ano de 2003, um trabalho de conclusão de curso nesta instituição realizou um simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis. Motivado pelo referido trabalho, a proposta é de realizar um simulador para os três modelos de turbinas hidráulicas mais utilizadas no mercado, Francis, Kaplan e Pelton. O avanço da tecnologia dos programas computacionais permite elaborar uma interface

humano-máquina, com características mais próximas da realidade de um controle de regulador de velocidade, o que representa um atrativo para o desenvolvimento do trabalho.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A fim de estruturar uma linha de desenvolvimento deste trabalho, o estudo e simulação foram decompostos em diversas etapas, com o propósito de cumprir os objetivos pré-estabelecidos:

- I. reunir os materiais relacionados ao tema central do trabalho;
- II. estudo sobre o funcionamento do regulador de velocidade e os componentes do circuito hidráulico e eletrônico com o material pesquisado;
- III. elaboração da teoria com a explanação sobre o funcionamento do regulador de velocidade e seus circuitos hidráulico e eletrônico, turbinas hidráulicas Francis, Kaplan e Pelton e o sistema de controle da operação;
- IV. definição de uma representação lógica utilizando diagrama de blocos que representem os componentes necessários para o funcionamento do regulador de velocidade, para os três tipos de turbinas hidráulicas utilizadas no trabalho;
- V. simulação dos blocos lógicos através do software Labview;
- VI. criação de um simulador com uma IHM do sistema de controle de regulador de velocidade considerando os três modelos de turbinas hidráulicas;
- VII. desenvolvimento de um manual para utilização do simulador;

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será composto por cinco capítulos, também contendo os elementos pré e pós-textuais de acordo com as normas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. No primeiro capítulo, será representada a proposta

em que é subdividido em: delimitação do tema, objetivos, justificativa, procedimentos metodológicos e estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, será feito o embasamento teórico sobre o funcionamento do regulador de velocidade, contendo a explicação sobre os modos de regulação, descrição dos circuitos hidráulicos e eletrônicos dos componentes do referido regulador e algumas funções adicionais. Também conterà a teoria sobre as turbinas hidráulicas Francis, Kaplan e Pelton.

A representação lógica desenvolvida no software Labview, que será utilizada para a simulação, estará presente no terceiro capítulo.

O quarto capítulo conterà a implementação do simulador, com a explicação de como serão realizados os procedimentos para a elaboração do simulador, entrada dos dados e a utilização do programa. O resultado final deste capítulo é a produção de um aplicativo, executável, de fácil instalação em computadores que possuam o sistema operacional *Windows*, para ser distribuído no meio acadêmico.

As considerações finais do trabalho estarão presentes no quinto capítulo do trabalho proposto.

2. REGULADOR DE VELOCIDADE

O regulador de velocidade é um sistema automático que interage com o distribuidor da turbina hidráulica (palhetas diretrizes para as turbinas Francis e Kaplan e bico injetor para a turbina Pelton) de forma a manter uma rotação constante, fornecendo ao sistema energia elétrica com frequência de 60Hz. Para as turbinas Pelton e Kaplan, o regulador de velocidade controla também, respectivamente o defletor e as pás do rotor (MANCINI FILHO, E., 2004).

A ação de controle consiste na regulação da vazão de água que entra no rotor da turbina. Esta regulação é feita através do comando de abertura ou fechamento do distribuidor da turbina (MANCINI FILHO, E., 2004).

O regulador de velocidade utilizado neste trabalho para os três tipos de turbinas hidráulicas é um regulador do tipo P.I.D (Proporcional-Integral-Derivativo), cujo algoritmo é largamente utilizado na indústria, similar às representações da norma ISA (The International Society of Automation), ajustado por parâmetros. O regulador de velocidade possui três conjuntos de parâmetros: para operação em vazio, operação em rede isolada e operação em paralelo com a rede interligada. Os parâmetros são formados por constante de tempo derivativo, estatismo transitório, estatismo permanente, constante de tempo de amortecimento e ganho derivativo (ESTEVE; BENTO JUNIOR, 2000).

2.1 TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas hidráulicas convertem energia potencial hidráulica em energia cinética. A energia hidráulica é obtida, através da construção de uma barragem, a qual possibilita uma diferença entre dois níveis de água. Essa conversão de energia consiste em propiciar um movimento rotativo ao rotor da turbina, que está mecanicamente acoplado ao eixo do rotor do gerador elétrico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987).

De acordo com a norma TB-74 da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas existem dois tipos de turbinas:

- Turbinas de reação: são turbinas que transformam a energia cinética e de pressão da água em escoamento em energia mecânica, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor), Podendo ser de

pás ajustáveis (Turbinas Kaplan) e pás fixas (Turbinas Francis). São encontradas em regiões que apresentam quedas úteis entre (1,5m e 300m), sendo assim a mais utilizada no Brasil.

- Turbinas de ação: são turbinas em que a energia mecânica é obtida pela transformação da energia cinética do fluxo d'água, através do rotor. As turbinas de ação são instaladas em regiões onde apresentam maiores quedas em relação as turbinas de reação, entre 350 e 1110 m. Apresentam características totalmente distintas das turbinas de reação, seu rotor apresenta pás em formato de uma concha, e o jato de água proveniente dos bicos injetores, colidem contra as pás garantindo assim o movimento do rotor (Turbinas Pelton).

Devido à utilização das turbinas hidráulicas Francis, Kaplan e Pelton para o trabalho realizado, segue um descritivo sobre as características, princípios de funcionamento dos principais componentes dessas turbinas.

2.1.1 Turbina hidráulica Francis

Desenvolvida em 1849 pelo americano James B. Francis, a turbina Francis é a mais utilizada nas Usinas Hidrelétricas do Paraná, projetadas para operar em quedas de 10m a 650m e pode alcançar uma potência de 750 MW por unidade. Atualmente são construídas para grandes aproveitamentos hidrelétricos (MELLO, A., 2005).

A turbina Francis tem o rotor localizado internamente ao distribuidor, sendo que a água ao atravessar o rotor da turbina aproxima-se constantemente do eixo. O tubo de sucção conduz a água até um poço, tendo a função de manter a continuidade de massa líquida em escoamento, impedindo que caia livremente, proporcionando assim um aumento de queda hidráulica. Com isso, existe um aumento na potência da turbina, pois ocorre transformação da energia cinética da água ao sair em energia de pressão (COSTA, A.S, 2003).

O controle para a turbina é exercido sob a forma de aletas-guia móveis, essas são chamadas coletivamente de Distribuidor, por onde a água flui antes de chegar

ao rotor da turbina. A posição que o distribuidor se encontra pode fazer com que a água tenha uma velocidade tangencial ao passar pelo rotor da turbina. Nesta posição, que corresponde normalmente de 80% a 90% da abertura total, o rotor operará com sua máxima eficiência. Estando o distribuidor em qualquer outra posição, uma parte da energia é perdida devido à angulação pouco eficiente do fluxo de água. Por mais que o distribuidor seja bem projetado, é normal que aconteçam vazamentos na posição completamente fechada, uma vez que o mesmo está sujeito a pressão integral do conduto forçado. Esse é o motivo pelo qual uma válvula de fechamento é normalmente instalada a montante da turbina permitindo o desligamento total da unidade (COSTA, A.S, 2003).

De acordo com Costa (2003), existem aplicações da turbina Francis tanto com eixo na horizontal quanto na vertical. Sua aplicação com eixo na horizontal, ou seja, o rotor trabalhando verticalmente é mais utilizado em pequenas unidades de geração, sendo esta apoiada em mancais de deslizamentos radiais e não utilizando assim os mancais guias. Na construção vertical, mancais guias e mancal de escora axial são utilizados. As figuras 2 e 3 mostram aplicações da turbina Francis em eixos verticais e horizontais respectivamente.

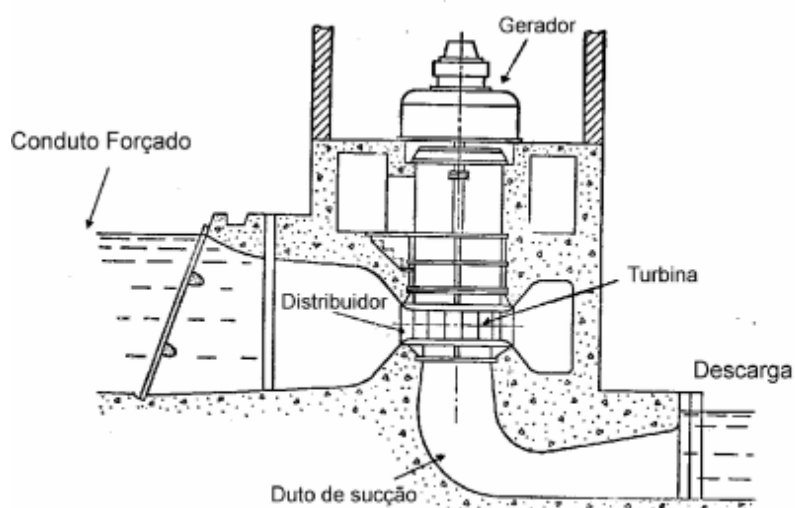


Figura 2- Francis eixo vertical em corte
Fonte: Costa (2003).

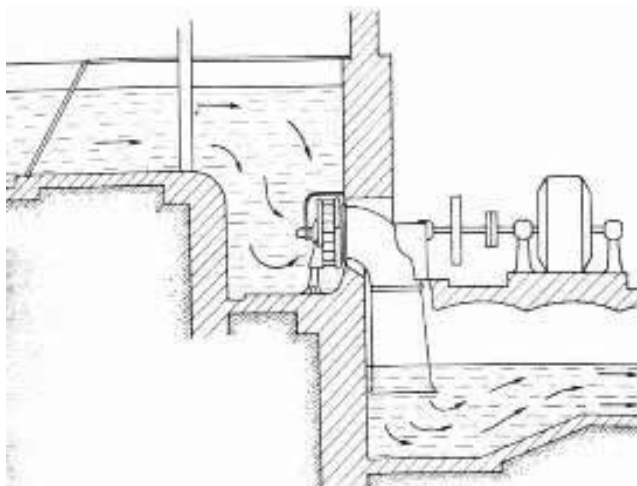


Figura 3 - Francis Eixo Horizontal
Fonte: Cuenca (2009).

Na operação da turbina Francis, a água entra no rotor, após passar pelas pás diretrizes guiando o líquido em um determinado ângulo para a entrada das pás do rotor, deixando-o axialmente em relação ao eixo. As pás diretrizes são comandadas pelo regulador de velocidade, através do servomotor, que ajustam a vazão conforme a carga da turbina (COSTA, A.S, 2003).

2.1.2 Turbina hidráulica Kaplan

De acordo com Pellegrini e Scola (2005), as turbinas Kaplan foram concebidas pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan através de estudos teóricos e empíricos durante a década de 1910 - 1920. Estas turbinas são projetadas para operar em quedas de água entre 20m e 50m. As turbinas hidráulicas Kaplan apresentam pás reguláveis que permitem controlar a vazão de água disponível ao rotor através da variação do ângulo destas palhetas diretrizes, conforme exibido na figura abaixo. Além disto, estas podem ser classificadas como do tipo axial, de reação e ação total. A figura 4 demonstra uma Turbina Kaplan em corte.

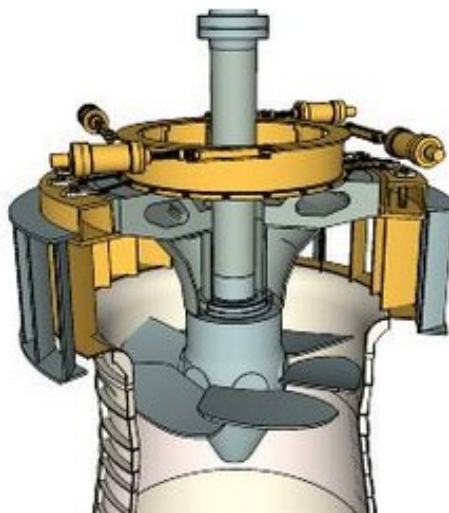


Figura 4 - Turbina Kaplan em corte
Fonte: Hidroenergia (2012).

O princípio de funcionamento da turbina Kaplan consiste na regulação de um ângulo específico das pás diretrizes – através do acionamento do servomotor, de forma a disponibilizar um fluxo de água controlado ao rotor. O volume de água disponibilizado ao rotor é comandado por um sistema automático de regulação denominado regulador de velocidade, conforme será descrito posteriormente neste trabalho. Pode-se salientar que as turbinas Kaplan são utilizadas para rotações específicas acima de 350 rpm e permitem uma ampla variação da descarga e da potência sem variação do rendimento total (PELLEGRINI; SCOLA, 2005).

A figura 5 exhibe os principais componentes construtivos da turbina Kaplan, conforme serão descrito a seguir.

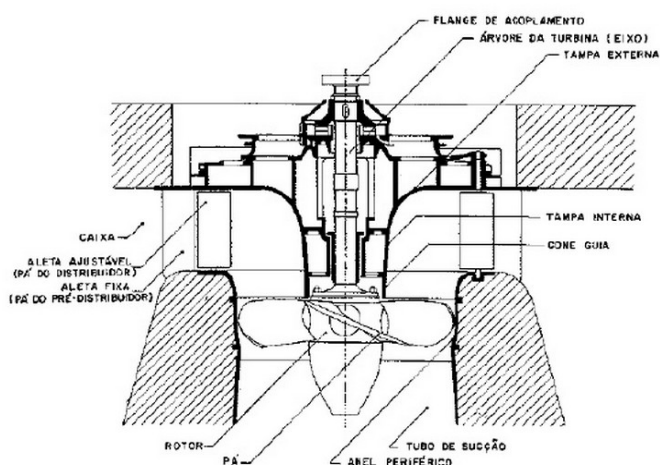


Figura 5 - Corte transversal Turbina Kaplan
Fonte: Cordeiro (2010).

O Rotor desta turbina assemelhasse a um propulsor de navio (formato helicoidal) cuja função é propiciar movimento rotativo ao eixo do gerador. A figura 6 apresenta um rotor da turbina Kaplan.



Figura 6 - Rotor da Turbina Kaplan
Fonte: Exatecno (2012).

Quanto ao número de pás as turbinas Kaplan podem ser de:

4 pás (para $10 < H < 20\text{m}$);

5 pás (para $12 < H < 23\text{m}$);

6 pás (para $15 < H < 35\text{m}$);

8 pás (para $H > 35\text{m}$)

Sabendo-se que H é a altura da queda de água. A figura 7 é referente aos cortes total e parcial das pás da turbina hidráulica Kaplan.

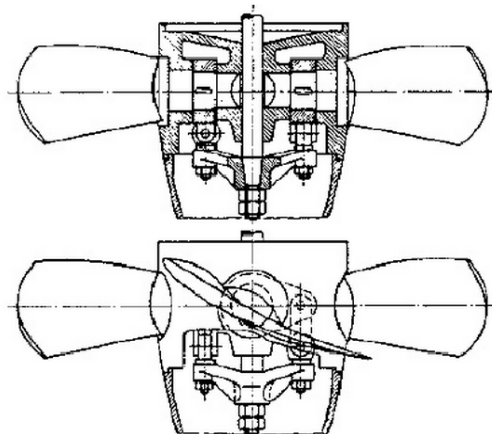


Figura 7 - Corte parcial e total rotor Kaplan
Fonte: Cordeiro (2010).

2.1.2.1 Palhetas diretrizes

Possuem a função de controlar a vazão de água disponibilizada ao rotor. A ação de controle consiste na regulação do ângulo de abertura a qual é realizada pelo servomotor. É possível visualizar na figura 8 detalhes desse componente.



Figura 8 - Palhetas diretrizes Kaplan
Fonte: Voith (2011).

2.1.2.2 Caixa espiral

É o caminho percorrido pelo fluxo de água que se situa ao redor das palhetas diretrizes. Esta caixa apresenta como função direcionar a vazão de água ao rotor da turbina hidráulica, porém, encontra como barreira para este fluxo as pás reguláveis. A figura 9 detalha a caixa espiral da turbina Kaplan em corte.

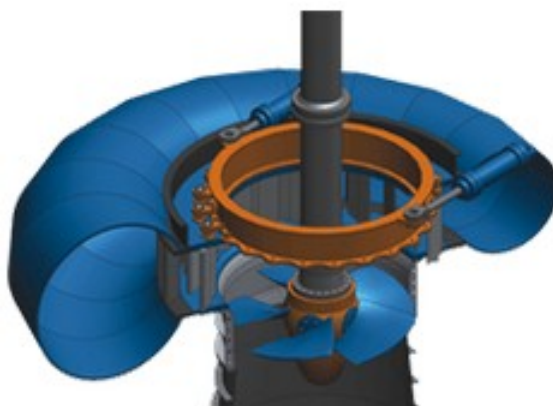


Figura 9 - Caixa espiral Kaplan
Fonte: Hidroenergia (2012).

2.1.3 Turbina Hidráulica Pelton

A turbina Pelton é constituída das seguintes partes consideradas principais: o rotor, o injetor e a caixa. Os rotores atuais são fundidos em uma só peça, com as conchas e a roda formando um só conjunto conforme pode ser observado na figura 10. Entretanto, é possível a fabricação separada das conchas e da roda e a fixação por meio de pinos e parafusos. A concha (pá), ilustrada na figura 11, deve ter a capacidade de absorver a energia cinética transmitida pela ação do jato que sai do injetor e, ao mesmo tempo, distribuí-la no seu retorno, sem interferir com a pá subsequente (MELLO, A., 2005).

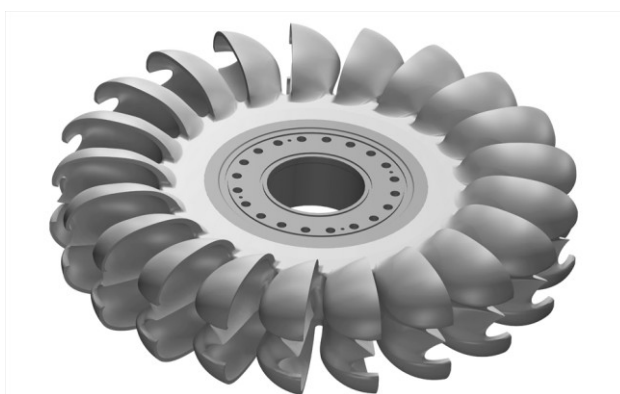


Figura 10 - Rotor turbinas Pelton
Fonte: Voith (2012).



Figura 11 - Pás turbinas Pelton
Fonte: Alterima (2011).

Conforme apresentado acima o número de bicos varia de dois a seis, igualmente espaçados angularmente para garantir um balanceamento dinâmico do rotor. Um dos maiores problemas destas turbinas, devido à alta velocidade com que a água se choca com o rotor, é a erosão provocada pelo efeito abrasivo da areia misturada com a água, comum em rios de montanhas (COSTA, A.S, 2003).

Geralmente o gerador é acoplado diretamente ao eixo da turbina, por meio de acoplamentos rígidos, mas um ajuste de rotações pode ser feito com o uso de transmissão por correias ou redutores de engrenagens (MELLO, A., 2005).

No Injetor, a pressão da água é convertida em velocidade, consiste em uma peça cônica fixada ao extremo da tubulação e uma agulha interna acionada por uma haste, a qual regula e direciona o fluxo de saída da água para a roda da turbina. Tanto o injetor quanto a agulha sofrem severo desgaste, sendo feitos de material de alta qualidade. O defletor, inserido entre o bico injetor e a turbina, é responsável pelo direcionamento dos jatos de água, tendo a parte côncava voltada para o furo do bico (MELLO, A., 2005).

O princípio de funcionamento das turbinas Pelton é baseado no bico injetor. A água represada é conduzida até o bico injetor e este direciona o fluxo de água contra as pás do rotor, movimentando-as; assim a energia cinética do fluxo de água é transferida para turbina. O funcionamento é ilustrado na figura 12 (COSTA, A.S, 2003).

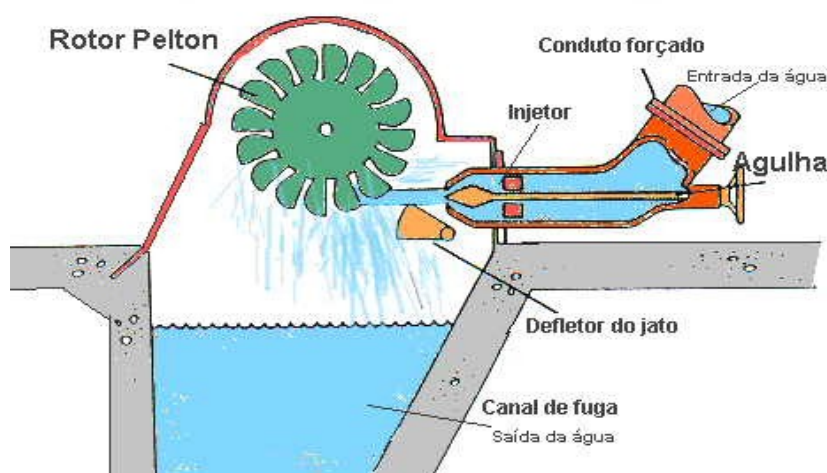


Figura 12- Esquema de funcionamento turbina Pelton
Fonte: Mello, A. (2005).

O volume do fluxo de água determina a rotação da turbina e conseqüentemente a potência transmitida ao gerador. O regulador de velocidade atua através da agulha dos bicos injetores, controlando o fluxo de água (COSTA, A.S, 2003).

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO REGULADOR DE VELOCIDADE

O regulador de velocidade pode ser dividido em três circuitos principais (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004):

- **Circuito hidráulico:** possui função de fornecer e acumular óleo sob pressão e acionar as válvulas do distribuidor da turbina;
- **Circuito elétrico:** cuja função é acionamento dos elementos hidráulicos que necessitam de energia elétrica (motores em geral e fonte de alimentação) e supervisão de variáveis de processo (nível de óleo, pressão e etc.);
- **Circuito eletrônico:** sua função é elaboração de um sinal de controle adequado para que a regulação da frequência seja estável e precisa.

2.2.1 Circuito hidráulico

Existem duas atribuições principais do circuito hidráulico: gerenciamento da manutenção do óleo e controle do movimento das válvulas diretrizes. Estas válvulas têm por finalidade direcionar o fluxo de óleo para os servomotores atuando no comando a partir do sinal enviado pelo circuito eletrônico, de abertura ou fechamento das palhetas diretrizes do distribuidor.

Conforme citado acima, o circuito hidráulico é dividido em dois sistemas: bombeamento e regulação (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.1 Sistema de bombeamento

É responsável pelo fornecimento e manutenção do óleo pressurizado utilizado em todas as operações do regulador de velocidade. A seguir estão descritos os

principais componentes deste sistema (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.2 Reservatório de óleo

O reservatório de óleo é um tanque onde é acumulado óleo e são instaladas as motobombas e válvulas do circuito de bombeamento, conforme exhibe a figura 13 (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 13 - Reservatório de óleo
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.3 Motobombas

As motobombas são compostas por bomba de fuso – acionada continuamente por motores elétricos, cuja função é fornecer pressão e vazão atuando no comando da movimentação do distribuidor. Utilizam-se duas bombas com a finalidade de aumentar a confiabilidade, conforme a figura 14 (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 14 - Visão superior das moto bombas
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.4 Válvulas de retenção

As válvulas de retenção não permitem que o óleo sob pressão do acumulador retorne ao reservatório quando as bombas estão paradas (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.5 Válvulas comutadoras

As válvulas comutadoras possuem a função de direcionar o fluxo de óleo entre trocador de calor e o reservatório de óleo (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.6 Válvulas de descarga

As válvulas de descarga garantem a segurança do sistema em casos de sobre pressão. São calibradas com determinada pressão de tal forma que quando superada esta pressão de calibração abre-se a mola e o excesso de pressão é liberado pelo sistema (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.7 Trocadores de calor

Os trocadores de calor são utilizados para resfriar óleo através de água

durante o processo de regulação da frequência (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 15 - Trocadores de calor
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.8 Acumulador de ar e óleo

O acumulador de ar e óleo é um tanque armazenador de óleo e ar sob pressão utilizado para comandar o distribuidor se houver a queda de energia elétrica. É utilizado em situações de emergência, conforme ilustra a figura 16 (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 16 - Acumulador de ar e óleo.
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004)

2.2.1.9 Compressor de ar

O compressor de ar é utilizado com o objetivo de repor a pressão de ar consumida no tanque de óleo (perdas por vazamentos ou emulsão de ar no óleo). É possível visualizar um compressor de ar na figura 17 (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 17 - Compressor de ar
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.10 Válvulas de intermitência

As válvulas de intermitência são usadas para manter o acumulador em um determinado nível de pressão (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.11 Válvula de isolamento

Utiliza-se a válvula de isolamento quando a turbina hidráulica estiver parada. A função desta válvula é isolar a parte do circuito hidráulico responsável pelo acionamento do distribuidor. Aciona-se através de um comando elétrico.

A figura 18 representa um diagrama de blocos que exhibe a interação entre os componentes do sistema de bombeamento de um circuito hidráulico do regulador de velocidade.

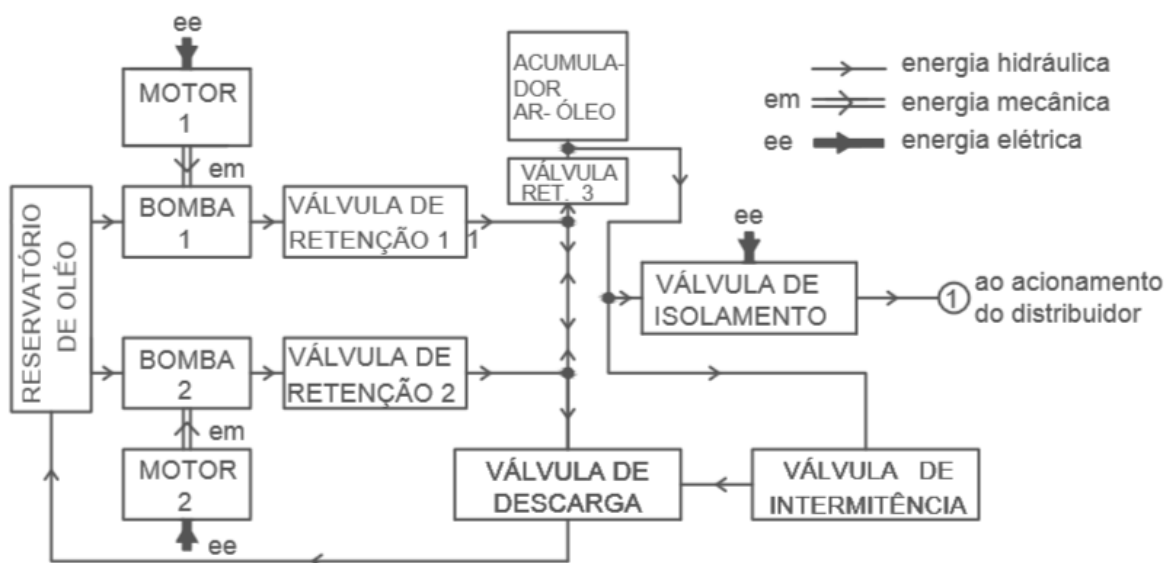


Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema de bombeamento
Fonte: Autoria própria.

2.2.1.12 Sistema de Regulação

É responsável pela movimentação do distribuidor sendo realizada a partir do envio de óleo pressurizado oriundo do sistema de bombeamento. A seguir serão enumerados os principais componentes deste sistema (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.13 Válvula distribuidora

É responsável pela regulação da posição das pás diretrizes ou bico injetor através da abertura ou fechamento dos servomotores. Interage com o circuito eletrônico de velocidade, através do sinal recebido pela bobina de imersão (ou atuador), de forma a disponibilizar uma vazão constante aplicada no rotor da turbina hidráulica, sendo assim possível manter a frequência da tensão elétrica gerada constante em 60Hz. Em outras palavras, é responsável por executar os comandos hidráulicos de abertura ou fechamento dos servomotores de acordo com o sinal recebido do atuador. A figura 19 exhibe a foto de uma válvula distribuidora (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

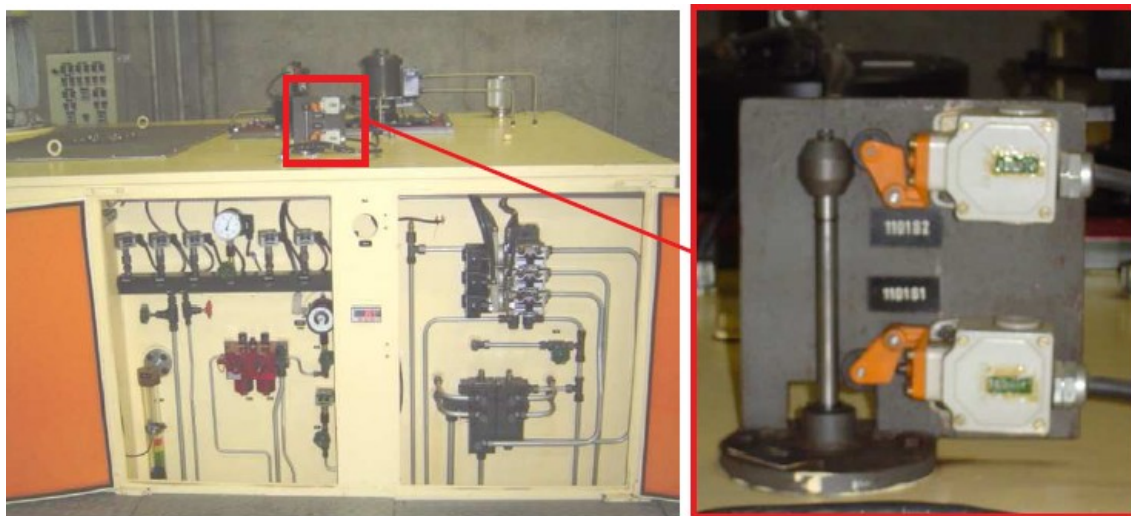


Figura 19 - Válvula distribuidora (esquerda) e válvula de isolamento (direita)
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.14 Atuador ou Bobina de imersão

O atuador recebe o sinal elétrico – proveniente do regulador eletrônico de velocidade, e transforma-o num comando de abrir ou fechar os servomotores, conforme figura 20 (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

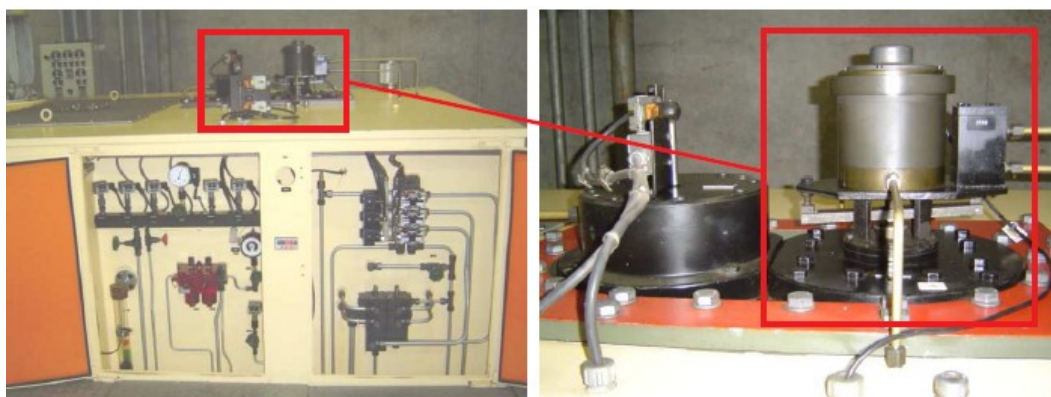


Figura 20 – Atuador
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.15 Filtro de óleo

O filtro de óleo possui a finalidade de filtrar o óleo que vai para a bobina de imersão, geralmente apresenta indicadores de filtro sujo uma vez que seja necessária a limpeza deste filtro (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.16 Êmbolo de travamento mecânico

Este êmbolo apresenta a função de travar a válvula distribuidora na posição de fechamento do distribuidor. Ele pode ser aplicado para diversas circunstâncias: rejeição de carga, parada da unidade geradora, controle da frequência da tensão elétrica e etc. (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.17 Válvula de segurança

A válvula de segurança, como o próprio nome indica, é responsável pelo fechamento imediato do distribuidor sem o acionamento da válvula distribuidora. É controlada pela válvula de comando de emergência (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.18 Válvula de comando da emergência

É responsável pelo comando da movimentação da válvula de emergência (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.19 Válvula de bloqueio

Executa o comando de travamento e destravamento das travas hidráulicas as quais estão ligadas com a válvula distribuidora operando diretamente com o distribuidor, ou seja, com as palhetas diretrizes (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.20 Servomotores

Os servomotores possuem a finalidade de propiciar movimento para o aro de regulação. É possível visualizar estes servomotores na figura 21(SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 21 – Servomotor
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.21 Aro de regulação

É um dispositivo que transmite movimento oriundo dos servomotores, conforme figura 22, para as palhetas diretrizes do distribuidor (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



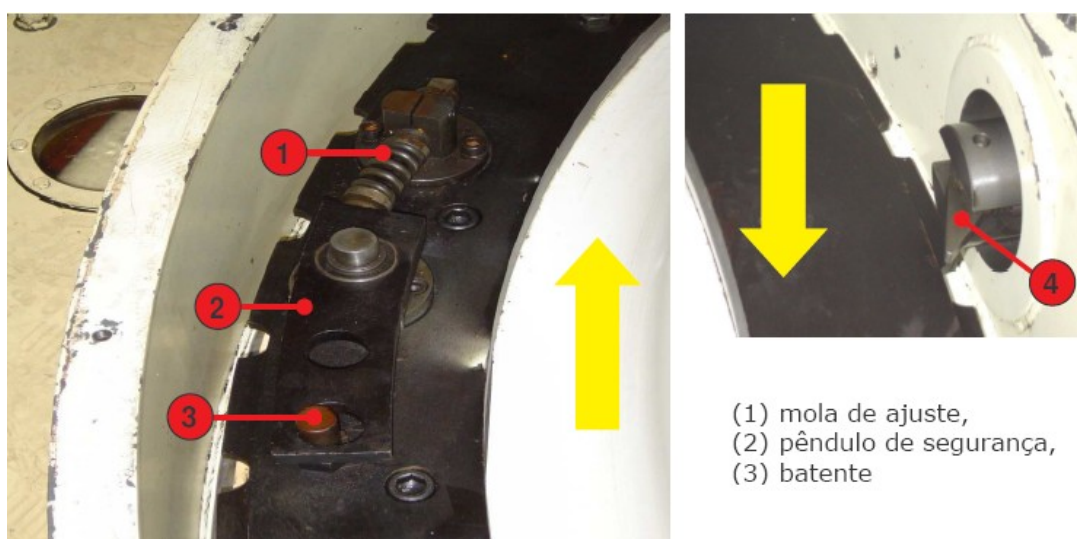
Figura 22 - Aro de regulação
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.22 Relé de sobrevelocidade

Este dispositivo tem por função atuar na válvula de emergência quando a máquina atinge uma rotação (sobrevelocidade) fora do especificado. Uma vez acionado, o sistema de bombeamento direciona óleo sob pressão para o acumulador de óleo de forma a reduzir a velocidade do sistema até o intervalo aceitável, as figuras 23 e 24, exibem o funcionamento deste dispositivo (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 23 - Dispositivo de sobrevelocidade
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).



- (1) mola de ajuste,
- (2) pêndulo de segurança,
- (3) batente

Figura 24 - Lógica de acionamento do dispositivo de sobre velocidade
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.1.23 Redutor de pressão

O redutor de pressão é utilizado para reduzir a pressão disponível ao atuador (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.24 Transdutores de posição

Os transdutores de posição são utilizados para garantir a estabilidade e permitir o uso do estatismo, uma vez que são as realimentações do circuito eletrônico. O diagrama de blocos da figura 25 exibe a interação entre os componentes do sistema de regulação da parte mecânica de um circuito hidráulico do regulador de velocidade (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.1.25 Bomba do mancal escora

Os mancais apresentam a função de acondicionar movimento relativo entre elemento mecânicos, devido ao elevado desgaste das peças utilizadas para propiciar movimento ao eixo do rotor. Em outras palavras, o mancal escora fornece um suporte axial ao rotor da turbina hidráulica.

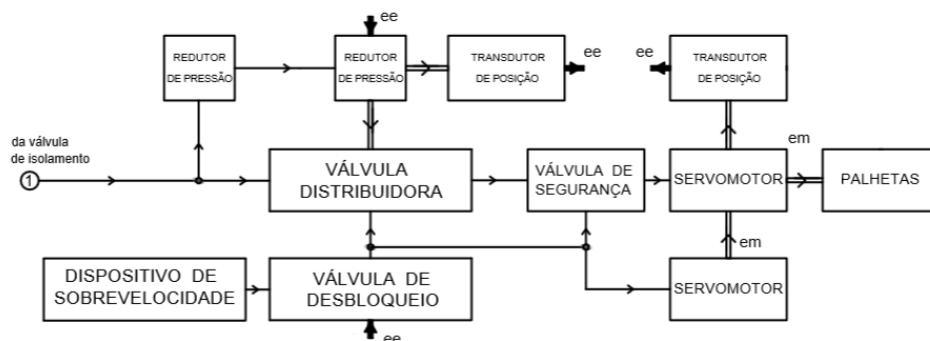


Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema de regulação
Fonte: Autoria própria

É válido ressaltar que a diferença entre os circuitos hidráulicos para as turbinas hidráulicas Francis, Kaplan e Pelton é apenas no componente que o servomotor irá atuar. Por exemplo, no caso das turbinas Francis e Kaplan o servomotor atua nas palhetas diretrizes e para a turbina Pelton o servomotor atua nos bicos injetores.

2.2.2 Circuito elétrico

Aos circuitos elétricos, podem-se atribuir algumas funcionalidades principais: circuito de força de alimentação dos motores e circuito de comando dos motores, das válvulas de isolamento, das válvulas de segurança e etc. Em outras palavras, a parte elétrica é responsável pela supervisão e controle das variáveis envolvidas no circuito hidráulico além de fornecer energia elétrica para os motores do circuito hidráulico. A seguir, serão enumerados os principais dispositivos eletrônicos nos componentes hidráulicos (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.2.1 Controle do compressor de ar

O controle do compressor de ar é responsável por manter a pressão do sistema de regulação dentro de valores desejáveis ao processo de acordo com o nível do tanque ar-óleo, é possível visualizar este compressor na figura 26 (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 26 - Compressor de ar
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

2.2.2.2 Pressostatos

Existem pressostatos cujas funções são acionar o grupo de moto bomba se a pressão estiver em níveis inferiores / superiores aos limites ajustados (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).

2.2.2.3 Controlador do acumulador de ar-óleo

É responsável pela verificação de nível e pressão realizada através de pressostatos montados no reservatório de óleo. A figura 27 exhibe um acumulador de ar-óleo (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004).



Figura 27 - Detalhe do controle de nível
Fonte: Santiago, Becker e Kern (2004).

Em geral são produzidos vários sinais elétricos de forma a gerenciar os componentes hidráulicos envolvidos no sistema de regulação de velocidade da turbina hidráulica. Dentre estes, pode-se citar (SANTIAGO; BECKER; KERN, 2004):

- Nível de óleo do acumulador;
- Posição da válvula de isolamento;
- Pressão de óleo no regulador;
- Acionamento das moto bombas.

2.2.3 Circuito eletrônico

Este circuito é responsável por enviar o sinal eletrônico para o atuador informando sobre a necessidade de abertura ou fechamento da válvula distribuidora, que por sua vez acionam palhetas diretrizes no caso das turbinas Kaplan e Francis e bico injetor para turbina Pelton. A partir deste sinal é efetuado o controle da vazão de água disponibilizada ao rotor da TH. No entanto, existem outras atribuições deste circuito, conforme descritas abaixo (KONDO, C., 2001):

- Verificar o erro de velocidade agregado ao sistema;
- Fornecer características de estatismo;
- Controle da potência ativa disponível ao sistema elétrico;
- Ajuste do valor de referência.

A seguir, são enumerados os principais dispositivos eletrônicos deste circuito.

2.2.3.1 Controlador Lógico programável (CLP)

Executa a lógica de programação, enviando um sinal adequado ao atuador do circuito hidráulico. A figura 28 exibe um CLP utilizado numa usina hidrelétrica.



Figura 28 - CPU S7300 com cartão de memória
Fonte: Kondo, C. (2001).

2.2.3.2 Interface humano-máquina

É responsável por realizar a interface com a parte operacional. Portanto esta interface necessita ser de simples manuseio. Abaixo é exibida uma interface humano-máquina. A figura 29 exibe esta IHM (KONDO, C., 2001).

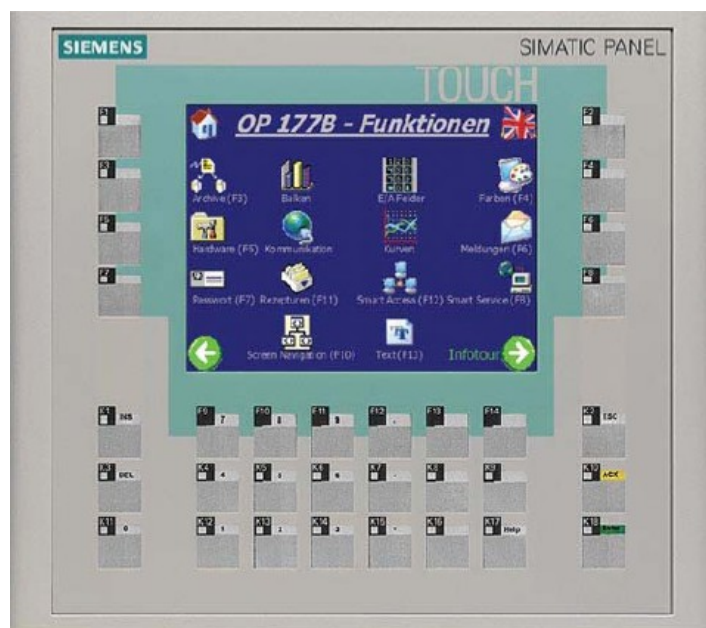


Figura 29 - Interface humano e máquina
Fonte: Kondo, C. (2001).

São funcionalidades desta interface: supervisão das principais grandezas vinculadas à turbina (rotação, pressão, nível de óleo e etc.) e monitoramento dos alarmes, alteração dos parâmetros do regulador de velocidade. Além disto, podem-se visualizar gráficos com informações pertinentes ao processo, como por exemplo: velocidade da turbina, potência ativa gerada e abertura do distribuidor (KONDO, C., 2001).

2.2.3.3 Fonte de alimentação

Os reguladores de velocidade, geralmente, são projetados com fontes de alimentação de 125V / 24V (Figura 30). Se ocorrer uma falta de energia é enviado um sinal para o sistema de supervisão. Na figura 30 pode-se visualizar uma fonte de

125V / 24V Quint Power – Phoenix Contact – 10 A (KONDO, C., 2001).



Figura 30 - Fonte de alimentação
Fonte: Kondo, C. (2001).

2.2.3.4 Transdutores de posição do distribuidor

O princípio de funcionamento é similar ao sonar. A medição da posição do distribuidor é enviada para o CLP através de um pulso magnético emitido por uma haste móvel acoplada ao servomotor. Este pulso, quando encontra o distribuidor é refletido até o emissor sendo possível mapear com exatidão a posição do distribuidor. No esquema demonstrado na figura 31 é possível visualizar este sistema. (KONDO, C., 2001).

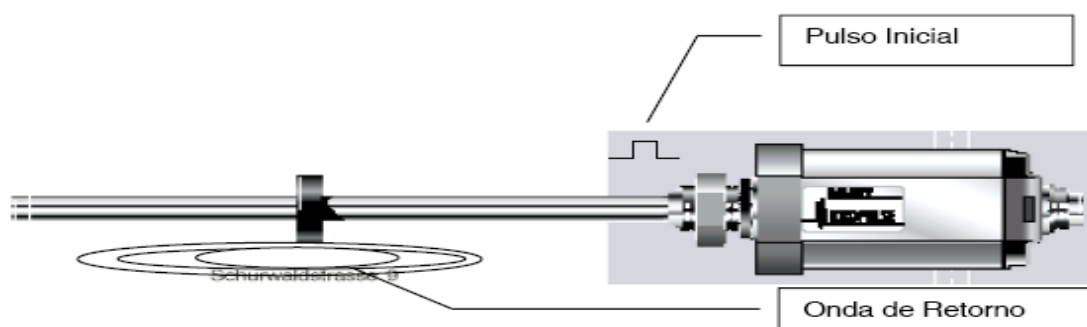


Figura 31 - Emissão de pulso magnético
Fonte: Kondo, C. (2001).

2.2.3.5 Transdutores de potência

Os transdutores de potências são responsáveis por captar os sinais de tensão e corrente dos TPs e TCs respectivamente e gerar em sua saída sinais de 2 – 10V proporcional a potência ativa da unidade. Este sinal de tensão é enviado até o controlador sendo possível executar o controle da potência ativa demandado pelo SEP. A figura 32 apresenta um diagrama que demonstra a ligação dos transdutores de potência em um diagrama trifilar (KONDO, C., 2001).

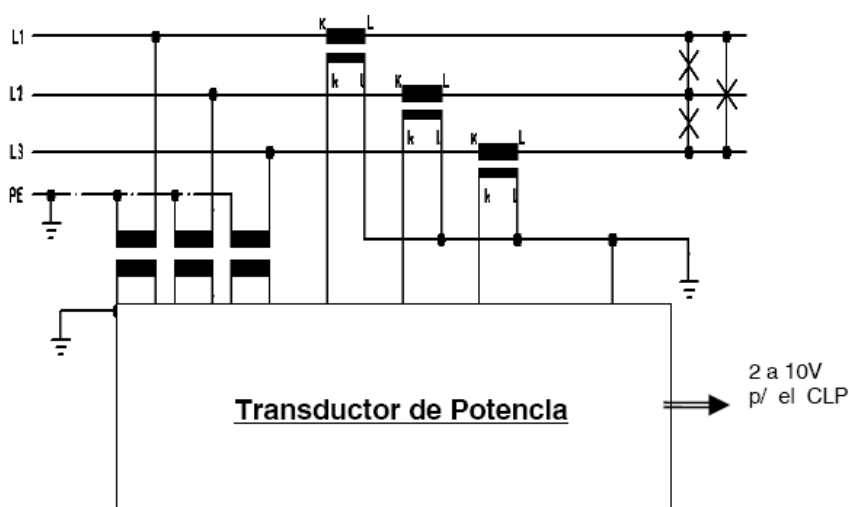


Figura 32 - Diagrama trifilar da instalação dos transformadores de potência
Fonte: Kondo, C. (2001).

Além destes componentes, o circuito eletrônico possui outros equipamentos, conforme representado. (KONDO, C., 2001):

- Relés;
- Interface de comunicação serial;
- Disjuntores;
- Componentes para interface de sinais;
- Dispositivo de seleção do tipo de controle;
- Dispositivo de ajuste dos valores de referência (potência frequência, abertura do distribuidor e rotação da turbina).

O diagrama de bloco geral para o circuito eletrônico é exibido na figura 33.

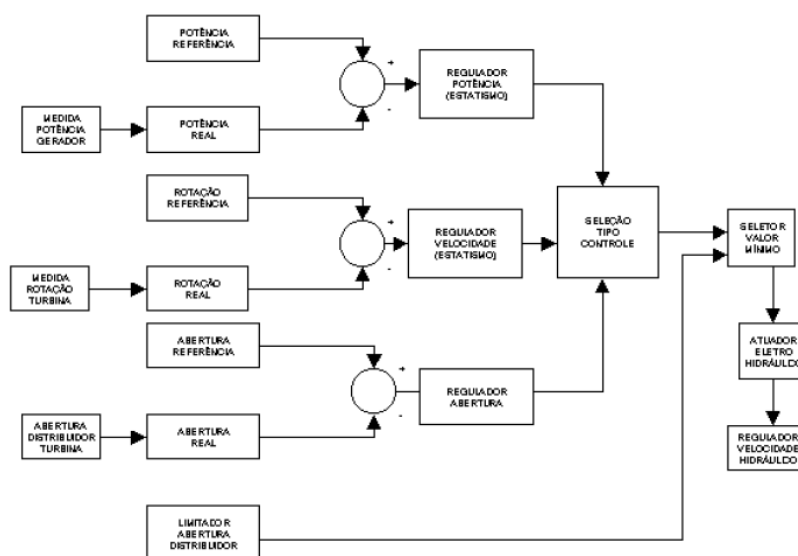


Figura 33 - Diagrama de blocos do circuito eletrônico
Fonte: Autoria Própria

O princípio de funcionamento do circuito eletrônico consiste na supervisão das variáveis de processo: potência, frequência e abertura do distribuidor. A partir de uma comparação com um valor referência (*set point*) já parametrizada anteriormente pode-se realizar o controle destas variáveis utilizando os componentes descritos no bloco do circuito eletrônico (KONDO, C., 2001).

A representação esquemática – exibida na figura 34, geral de um regulador de velocidade para a turbina Francis.

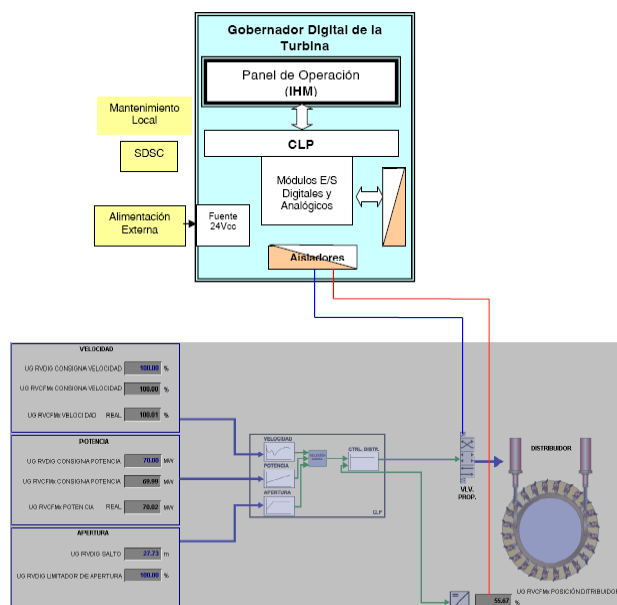


Figura 34 - Representação esquemática do circuito eletrônico.
Fonte: Kondo, C. (2001).

Como pode ser visto na figura 34, o circuito eletrônico interage diretamente com o circuito hidráulico através da elaboração de um sinal – através do CLP, transdutores de posição e rotação e outros, emitindo para o atuador, ou também denominado bobina de imersão, o qual irá realizar a parte mecânica da abertura ou fechamento do servomotor. No esquema acima, foi escolhida a turbina hidráulica Francis, no entanto, se fosse outra turbina a única modificação seria no dispositivo em que servomotor atuaria (palhetas diretrizes para Francis e Kaplan e bico injetor para Pelton) (KONDO, C., 2001).

2.3 FUNÇÕES DO REGULADOR DE VELOCIDADE

A função principal do regulador de velocidade é manter a rotação da turbina constante para que o gerador forneça energia ao sistema elétrico na frequência de 60 Hz (Brasil); para isso a ação do regulador é de controlar a abertura ou o fechamento do distribuidor da turbina (palhetas para as turbinas Francis e Kaplan e bico injetor para a turbina Pelton) (FUTIKAMI et al., 2003).

O regulador de velocidade utilizado, para os três tipos de turbinas hidráulicas, é um regulador do tipo P.I.D., conforme citado no item 2 deste trabalho, ajustado por parâmetros, sendo que existem três conjuntos de parâmetros: para operação em

vazio, operação em rede isolada e operação em paralelo com a rede interligada. Os parâmetros são formados por constante de tempo derivativo, estatismo transitório, estatismo permanente, constante de tempo de amortecimento e ganho derivativo (ESTEVE; BENTO JUNIOR, 2000).

2.3.1 Partida da unidade geradora

Para a partida da unidade geradora ocorre a abertura do distribuidor por ação do regulador de velocidade, levando a unidade geradora da rotação nula até a rotação nominal. Quando o regulador de velocidade digital recebe a ordem de “PARTIR”, envia um sinal de controle para a válvula proporcional (atuador, ou bobina de imersão) de acionamento da válvula distribuidora; essa válvula provoca a abertura do distribuidor da turbina até a posição de partida 2 (20%, valor típico) e, quando a velocidade de 80% é alcançada, o comando passa para a posição de abertura 1, que corresponde à marcha em vazio. O valor de marcha em vazio (10%, típico) leva a velocidade próxima do valor síncrono. Quando a velocidade está próxima do valor síncrono o regulador de velocidade, com sua ação P.I.D. controla a velocidade mantendo-a exatamente na rotação síncrona (60 Hz nos terminais do gerador) (MANCINI FILHO, E., 2004).

Com a velocidade síncrona atingida é liberado um sinal para a sincronização da unidade geradora. Neste momento, é possível executar o ajuste de aumentar/diminuir velocidade para que haja uma diferença de frequência mínima, inferior a 0,05 Hz, entre a frequência do gerador e frequência do Sistema Elétrico, permitindo sincronização do gerador.

A sincronização executada produz a informação de “DISJUNTOR DO GERADOR FECHADO” que permite ao regulador de velocidade comutar seus parâmetros para operação interligada com o Sistema Elétrico, terminando o processo de partida da máquina (FUTIKAMI et al., 2003). A figura 35 mostra o gráfico de partida da máquina.

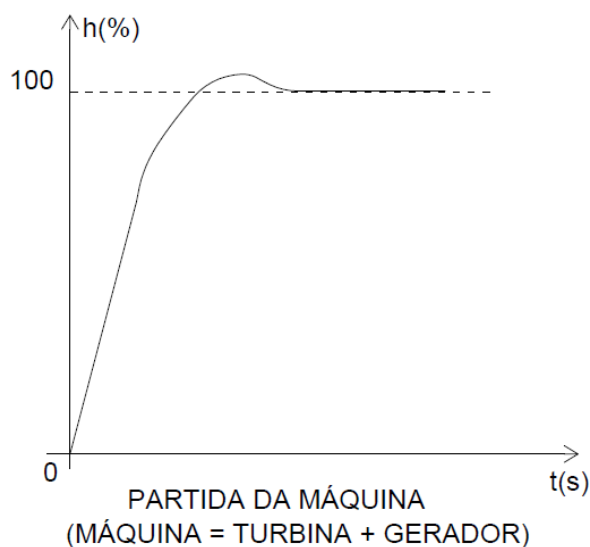


Figura 35 - Gráfico da partida da máquina
Fonte: Autoria própria

2.3.2 Ajuste de frequência

Com o objetivo de facilitar o sincronismo da unidade geradora com o sistema elétrico, a diferença de frequência deverá ser inferior a 0,05 Hz. O regulador de velocidade digital realiza a leitura do dado da frequência da rede elétrica; com esse dado a função de controle de frequência para sincronização será executada. Com o sincronismo realizado (fechamento do disjuntor do gerador), essa função é desativada (FUTIKAMI et al., 2003).

2.3.3 Parada da Unidade Geradora

A parada da unidade geradora significa levar a máquina desde a rotação que ela se encontra até a rotação nula. Após a ordem de “PARADA”, o regulador atua na válvula proporcional de acionamento do distribuidor da turbina, fechando-o com velocidade ajustável até a posição em vazio. Com a ordem de parada e o distribuidor na posição de marcha em vazio, uma ordem externa ao regulador (lógica de partida e parada da unidade geradora) envia um sinal para a abertura do disjuntor da rede (disjuntor do gerador). Em seguida o distribuidor fecha com sua máxima velocidade (tempo de fechamento hidráulico) até a posição totalmente fechado. No caso de

emergência, do tipo elétrico (curto-circuito no gerador) ou hidráulico (sobrevelocidade), o regulador atua hidraulicamente provocando o fechamento total do distribuidor. Nestes dois últimos casos a ordem de abertura do disjuntor do gerador é imediata, provocando rejeição de carga ativa, se a potência ativa fornecida pelo gerador estiver presente (valor maior que zero) (MANCINI FILHO, E., 2004).

2.3.4 Controle de potência ativa

O ajuste de potência ativa é o modo de controle normal quando a unidade está sincronizada com o sistema elétrico, isto é, com o disjuntor do gerador fechado, e se o sinal do transdutor de potência disponível. Enquanto o valor de potência ativa real estiver diferente da potência ativa de referência, o regulador atuará sobre o distribuidor da turbina com o intuito de diminuir o erro de potência ativa a zero (MANCINI FILHO, E., 2004).

A regulação de potência ativa é feita pela comparação entre a potência ativa real e a potência ativa de referência, sendo feito uma regulação PI (proporcional-integral) para o seu ajuste. Com o objetivo de se obter uma resposta satisfatória da turbina hidráulica, é elaborada uma curva de regulação de potência em função da abertura do distribuidor, sendo que o ajuste de potência ativa é de simplesmente controlar a imprecisão existente na curva (FUTIKAMI et al., 2003).

Os valores de referência da regulação de velocidade e da regulação de abertura são ajustados para ser igual ao valor da abertura real do distribuidor para que não haja transitórios de movimentação do distribuidor, quando é passado do modo de regulação de potência para o modo de regulação de velocidade, ou de abertura (FUTIKAMI et al., 2003).

2.3.5 Controle da frequência após rejeição de carga sem parada total

Quando ocorre uma rejeição de carga ativa, isto é, abertura do disjuntor do gerador quando o gerador está fornecendo potência ativa superior a zero, o regulador atua no controle automático da velocidade (frequência) mantendo a

unidade em marcha em vazio. Após a rejeição de carga sem atuação de parada de emergência, a unidade geradora permanece na rotação nominal esperando um novo comando para sincronização ou parada total (MANCINI FILHO, E., 2004). A seguir são apresentadas as figuras 36 e 37, que demonstram a rejeição de carga com parada parcial e total, respectivamente.

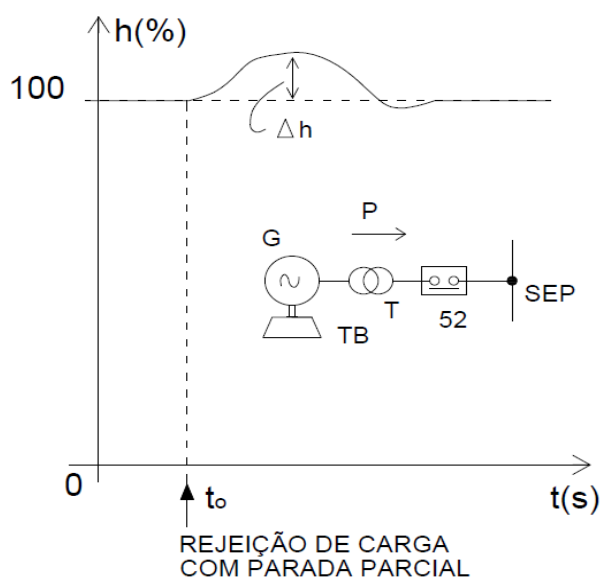


Figura 36 - Gráfico de rejeição de carga ativa P e regulação da velocidade no seu valor nominal 100%

Fonte: Autoria Própria.

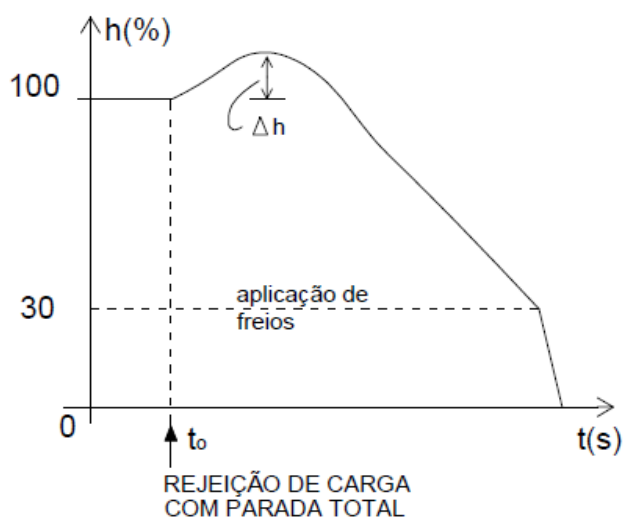


Figura 37 - Gráfico de rejeição de carga ativa e parada total
Fonte: Autoria própria.

2.3.6 Regulação de velocidade/potência ativa e estatismo

Os reguladores de velocidade das unidades geradoras interligadas com o sistema elétrico possuem a função de estatismo nas malhas de controle de potência ativa e de velocidade, para que ocorra a regulação primária de velocidade, mantendo o equilíbrio entre a potência ativa gerada e a carga ativa ligada a essas unidades geradoras. Quando ocorre falta de geração (desligamento involuntário de uma unidade geradora em operação) ou excesso de geração (abertura de uma linha de transmissão retirando repentinamente a carga ativa), ocorre a distribuição da diferença de potência entre as unidades geradoras (proporcional à potência nominal de cada unidade) pela ação do estatismo. A frequência do sistema elétrico após esta perturbação se estabilizará em um valor diferente de 60 Hz até que haja uma ação de controle suplementar executada pelo controle automático de geração (AGC), implementado nos Centros de Operação do Sistema Elétrico, injetando ou retirando o valor correspondente à variação da potência ativa (FUTIKAMI et al., 2003).

No Sistema Elétrico Brasileiro, o estatismo é ajustado em 5% em todos reguladores, o que significa uma variação de 3 Hz (5% de 60Hz) na frequência do sistema, provoca uma variação de 100% na potência ativa gerada. Normalmente a variação é da ordem de décimos de Hz o que permite uma ação efetiva dos reguladores de velocidade. Variação da ordem de 3 Hz correspondente à carga total do sistema e conseqüentemente conduz a um *Black-out* (FUTIKAMI et al., 2003).

Se a frequência da máquina estabilizar em 59,7 Hz, houve uma perda de geração de 10% e, automaticamente, cada unidade terá que gerar uma potência adicional de 10%. Se a frequência estabilizar em 60,3 Hz, ocorre um excesso de geração de 10% e cada unidade geradora, terá que reduzir em 21% o valor de sua potência ativa. O valor de 5% para ajuste de regulação de velocidade e estatismo é dado pela ONS, para todos os reguladores de velocidade interligados no sistema elétrico nacional (FUTIKAMI et al., 2003).

A comutação manual de operação isolada para operação interligada somente é possível se o disjuntor do gerador estiver fechado, já a comutação automática ocorre se a faixa permitida de frequência for ultrapassada ou o disjuntor abrir. Quando o disjuntor do gerador estiver aberto sempre é efetivo a operação em vazio (FUTIKAMI et al., 2003).

2.3.7 Regulação de abertura

O ajuste de regulação de abertura atua na malha de controle de posicionamento do servomotor do distribuidor da turbina hidráulica, sendo que quando a regulação de abertura está ligada, em operação interligada, o distribuidor da turbina acompanha o ajuste de regulação (MANCINI FILHO, E., 2004).

Para a partida da unidade geradora, o valor da regulação de velocidade é comparado com a regulação de abertura e o modo de regulação que possuir o menor valor é transferido para a regulação do distribuidor, pela seleção do valor mínimo. Em outros métodos de regulação, a regulação de abertura é válida como uma limitação de abertura (MANCINI FILHO, E., 2004).

2.3.8 Monitoração

O regulador gera sinais de falha quando os sinais analógicos que são monitorados possuem uma falta de sinal. O monitoramento do desvio entre realimentação da posição real do distribuidor e o ajuste de regulação de abertura é realizado, se o desvio for maior que 5% durante certo tempo, sendo emitido o sinal de falha na regulação de abertura (FUTIKAMI et al., 2003).

São emitidos os seguintes sinais de falhas pelo regulador da turbina hidráulica:

- falha no transdutor de posição;
- falha no controle de abertura;
- falha no sensor de rotação;
- sobrevelocidade primeiro e segundo nível;
- falha no conversor DC/DC;
- detecção de movimento indevido da turbina;
- falha na alimentação da válvula de controle;
- falha no transdutor de potência;

- falha no sinal de frequência da rede.

A abertura do distribuidor é a base para a medição do sinal de velocidade, se o servomotor permanecer aberto por um período, deve existir um sinal de velocidade, verificando um valor de medida nulo é gerado um sinal de saída de defeito. Também é emitido o sinal de defeito, quando o sinal de velocidade for reduzido em 70% e o disjuntor do gerador se encontrar fechado (FUTIKAMI et al., 2003).

2.3.9 Limitações de abertura e potência

São utilizados parâmetros de limite máximo e mínimo para abertura do distribuidor, quando a unidade geradora estiver em operação interligada e o disjuntor do gerador estiver fechado. O valor de ajuste normalmente é o de 100%, sendo que essa limitação permanece ativa em todos os modos de regulação (MANCINI FILHO, E., 2004).

A potência elétrica pode ser ajustada a um valor máximo através do limitador de potência, essa limitação ocorre em qualquer modo de regulação assim como a limitação de abertura, mas em curtos períodos de tempo e em rápidas aberturas do distribuidor esse limite pode acabar sendo excedido (MANCINI FILHO, E., 2004).

O regulador pode atuar como compensador síncrono, por controle remoto, quando o disjuntor do gerador estiver fechado. O distribuidor é fechado totalmente e com a remoção do comando remoto, a abertura do distribuidor ocorre até um valor pré-definido ajustado por parâmetros. (FUTIKAMI et al., 2003).

3. REPRESENTAÇÃO DOS BLOCOS LÓGICOS

Os componentes do circuito hidráulico e eletrônico do regulador de velocidade são representados por um conjunto de blocos lógicos, de forma a possibilitar uma simulação do seu funcionamento. É válido salientar que, para fins didáticos, as grandezas envolvidas nas simulações foram representadas em valores percentuais. Nos itens 3.3, 3.4 serão apresentados os blocos lógicos para cada componente dos circuitos hidráulico e eletrônico.

Os componentes descritos neste capítulo são usados para a simulação do regulador de velocidade, onde é feita uma integração entre todos os circuitos do regulador de velocidade e também uma integração com o sistema de excitação elaborado por Flávio Mancini (2005).

3.1 LABVIEW

O *software* utilizado para a elaboração dos blocos lógicos e simulação é o Labview na versão estudantil; possui uma linguagem de programação denominada gráfica em que se utilizam ícones de forma a criar aplicações baseando-se no fluxo de dados entre usuário e o software que determinam a execução do programa. A interface software-usuário no Labview é dinâmica, considerando que o próprio usuário elabora esta interface de acordo com os requisitos e funcionalidades da aplicação. Esta programação gráfica permite uma interpretação da lógica mais intuitiva assemelhando-se a um fluxograma de dados (SANTOS, W., 2013).

O ramo de aplicação do Labview se estende por diversas áreas da engenharia uma vez que se podem criar aplicações de teste e medição, aquisição de dados, controle de instrumento, registro de dados, análise de medição e geração de relatórios. Pode-se também criar executáveis e bibliotecas compartilhadas, como por exemplo, DLLs sabendo-se que o Labview é um compilador real de 32 bits (SANTOS, W., 2013).

3.1.1 Instrumentos Virtuais (VI)

Existe a denominação de instrumentação virtual para especificar programas elaborados em Labview. Existem três componentes principais: o painel frontal, o diagrama de bloco e o painel de ícones e conectores.

Monta-se o painel frontal através de controles e que são, respectivamente, os terminais interativos de entrada de uma VI. Os controles podem ser considerados dispositivos de entrada de instrumentos de forma a disponibilizar dados para o diagrama de bloco do VI, já os indicadores simulam dispositivos de saída dos instrumentos exibindo os dados de saída do diagrama de bloco em execução. Após montado o painel frontal existe a necessidade de inserir o diagrama de blocos que irá executar as funções pré-determinadas pelo usuário. Os objetos são exibidos como terminais e incluem: subVIs, funções, constantes, estruturas e ligações de forma a executar a transferência de dados entre os objetos do fluxograma. A figura 38 exibe um exemplo do painel frontal e o diagrama de bloco correspondente. Já na figura 39 são apresentados os elementos básicos do diagrama de blocos.

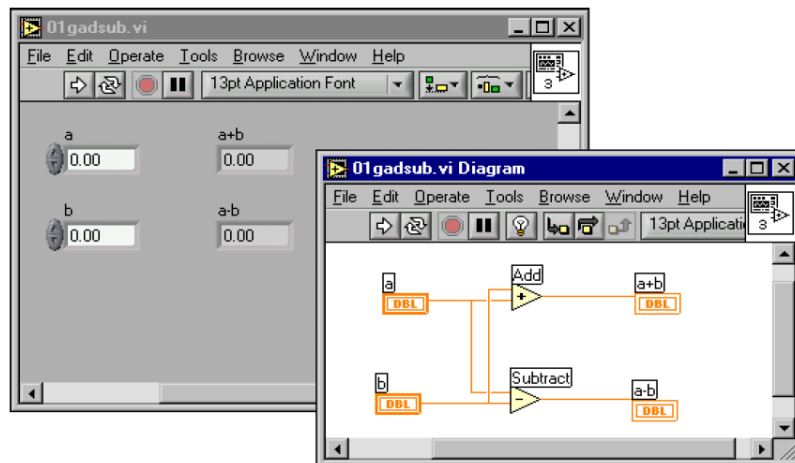


Figura 38- Painel Frontal e o seu diagrama de bloco
Fonte: Santos,W. (2013).

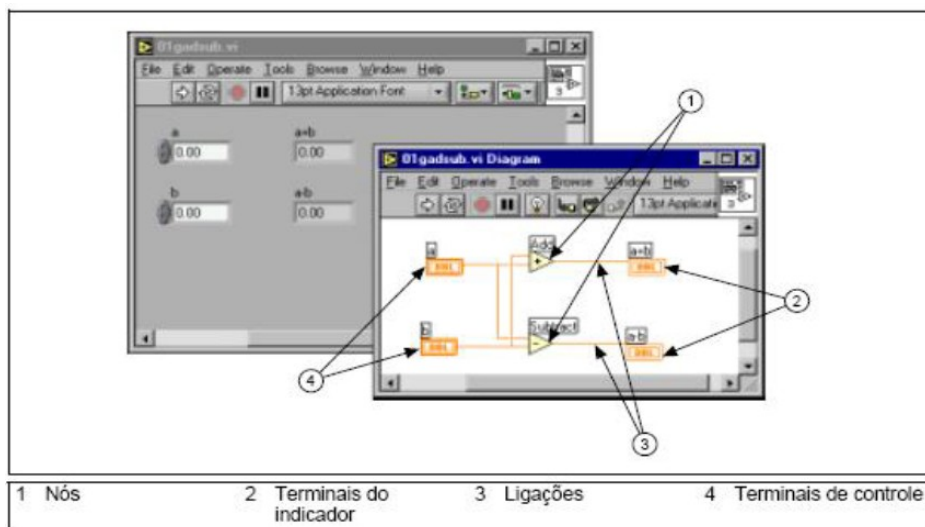


Figura 39 - Elementos básicos dos diagramas de blocos
Fonte: Santos, W.(2013).

Após a elaboração do painel frontal e do diagrama de bloco, faz-se necessário a montagem do painel de ícones e conectores, possibilitando a inserção de um VI dentro de outro o que é denominado de subVI. Um subVI corresponde a uma sub-rotina atrelada a um fluxograma principal o qual exibe a lista de parâmetros. O painel de conectores define quais são as entradas e saídas que podem ser ligadas na VI transferindo os dados para o código fonte do diagrama de blocos. Esta característica hierárquica do Labview, resulta numa programação mais simplificada e organizada para elaborar programas. A figura 40, exibe a utilização de uma subVI denominada “Temp”.

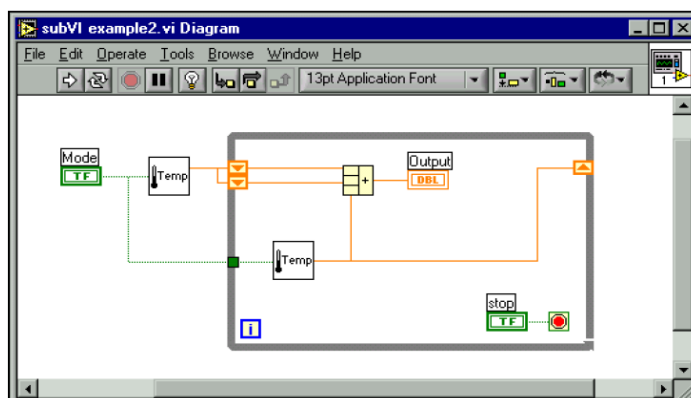


Figura 40 - subVI "Temp"
Fonte: Santos,W. (2013).

3.2 BLOCOS LÓGICOS

Para realizar a representação dos circuitos em blocos lógicos é necessário demonstrar as sub-rotinas básicas que serão utilizadas. As sub-rotinas e funções lógicas da simulação são baseadas nas operações matemáticas e no funcionamento das portas lógicas digitais.

O *Timer on* é uma das sub-rotinas encontrada no simulador e tem como função fazer a temporização de uma entrada. Essa estrutura tem entrada booleana (Verdadeiro ou Falso), caso a entrada seja Verdadeira o programa irá começar uma contagem de zero até o tempo pré-determinado, assim, quando a contagem alcançar tal valor, a saída será verdadeira. A figura 41 representa o bloco lógico do *Timer on* no Labview (MANCINI, F., 2005).

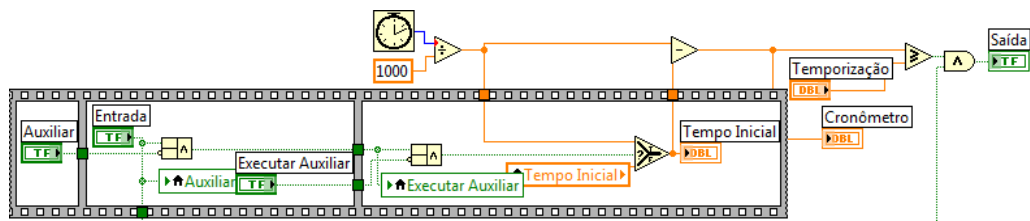


Figura 41 – Bloco lógico *Timer on*
 Fonte: Mancini, F (2005).

O bloco *set-reset* é uma sub-rotina utilizada com frequência no simulador. O bloco apresenta duas entradas SET e RESET, ao assumir sinal alto na entrada SET o bloco lógico apresentará a saída em sinal alto, estando assim em execução. Caso a entrada RESET esteja assumindo sinal alto, a saída será em sinal baixo tirando de funcionamento o bloco. O bloco *SET RESET* está representado na figura 42.

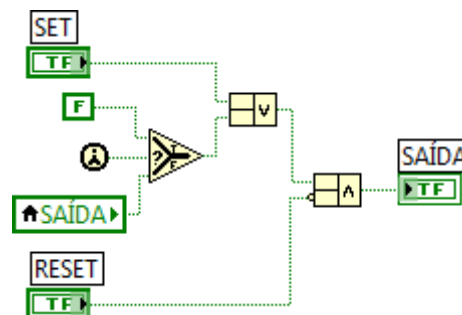


Figura 42 – Bloco lógico *Set Reset*
 Fonte: Mancini, F (2005).

O bloco lógico integrador é utilizado no simulador com o objetivo de simular uma rampa, em situações onde o sistema é de malha aberta ou em um sistema de primeira ordem em sistemas de malha fechada. O bloco lógico do integrador pode ser observado na figura 43 (MANCINI; F., 2005).

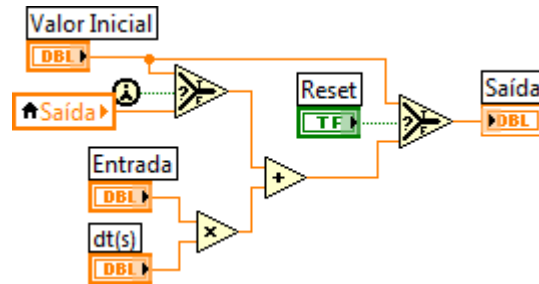


Figura 43-Bloco lógico Integrador
Fonte: Mancini, F (2005).

Em determinadas estruturas utilizou-se um integrador com valores de limitação ajustáveis. Os valores são regulados em dispositivos internos ao bloco (limitadores). O integrador com limitação é ilustrado na figura 44. (MANCINI; F., 2005).

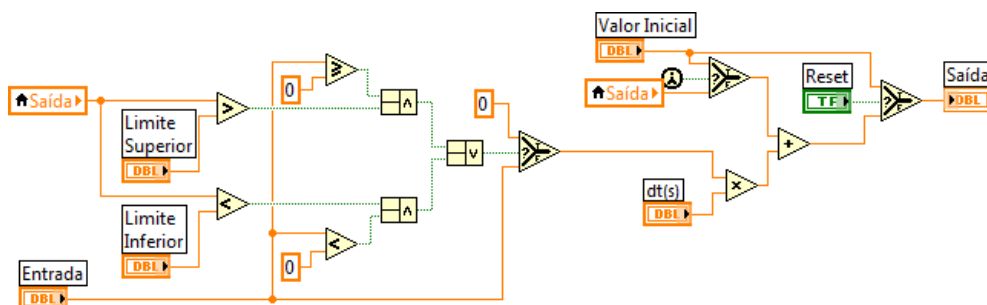


Figura 44- Bloco lógico do Integrador com limitação
Fonte: Mancini, F (2005).

Funções de transferência de primeira ordem foram inseridas ao longo da simulação, como exemplo no bloco da inércia do conjunto girante da turbina hidráulica. A figura 45 mostra uma sub-rotina da função de transferência de primeira ordem (MANCINI; F., 2005).

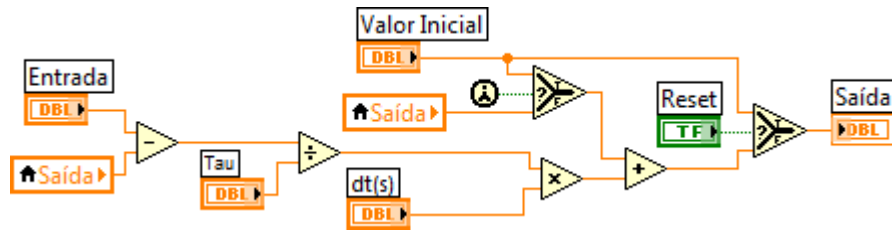


Figura 45 - Bloco lógico da função de transferência
 Fonte: Mancini, F (2005).

Na figura 46 podem-se visualizar os blocos lógicos e terminações utilizados para elaborar a rampa do sinal cuja função é estabelecer requisitos de partida para o sistema através de uma seleção dos valores de entrada da rampa (MANCINI; F., 2005).

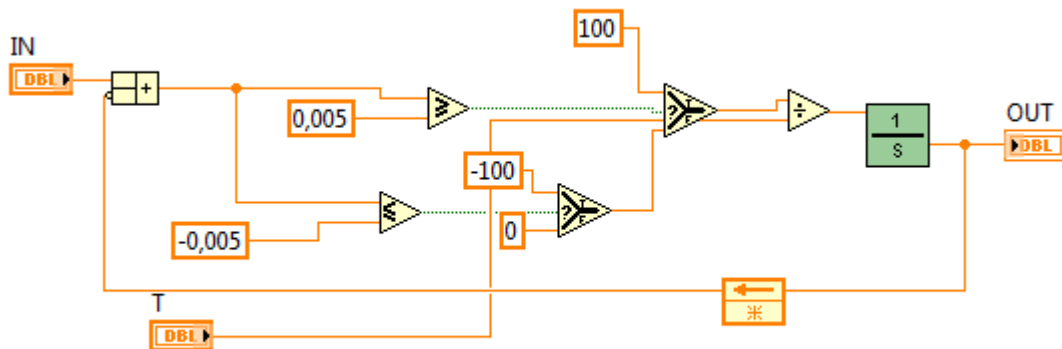


Figura 46 - Bloco lógico entrada de rampa
 Fonte: Autoria própria

3.3 CIRCUITO HIDRÁULICO

Conforme exibido no capítulo 2 – item 2.2 Aspectos construtivos do regulador de velocidade, deste trabalho, o circuito hidráulico do regulador de velocidade para turbina hidráulica é dividido em dois sistemas: sistema de bombeamento e sistema de regulação. Conforme estão listados os componentes para estes sistemas:

- Bomba de óleo;
- Válvula de descarga;
- Acumulador de óleo pressurizado;

- Válvula de isolamento;
- Eletro válvula de emergência;
- Trava hidráulica;
- Válvula distribuidora;
- Servomotor;
- Turbina hidráulica.

3.3.1 Bomba de óleo

Todo o princípio de funcionamento do circuito hidráulico é baseado no fornecimento de óleo pressurizado para o servomotor. Para o fornecimento de óleo adequado é utilizada uma bomba de óleo.

Esta bomba foi representada por um bloco lógico comandado por um botão: liga e desliga. A operação deste componente é indicada por um sinalizador luminoso. A variável de saída (Bomba) será um pré-condição para os componentes: válvula de descarga e válvula de isolamento. Utilizou-se um bloco set/reset para simular este componente, como pode ser visto na figura 47.

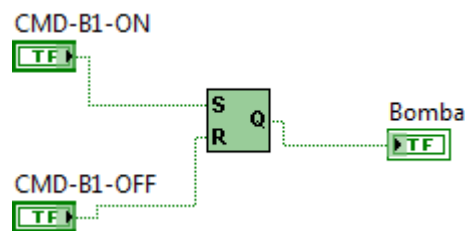


Figura 47 - Bloco lógico da bomba de óleo
Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Válvula de descarga

A válvula de descarga mantém a pressão de óleo nas condições desejadas do processo. Utiliza-se à válvula de descarga energizada quando a pressão do

sistema está abaixo do *set point*. Quando a pressão está superior ao *set point* esta válvula não é energizada. As condições iniciais para partida desta válvula são: bomba de óleo ligada (variável BO) e a pressão do acumulador deverá apresentar o valor do limite inferior (variável AC-B). As condições para desligamento da válvula são: bomba de óleo desligada ou pressão do acumulador ar - óleo com o valor no limite superior (AC-S). A sua variável de saída é VD.

Durante o funcionamento da turbina a bomba de óleo permanece ligada. Com a válvula de descarga energizada, a bomba fornece óleo com pressão para o acionamento hidráulico e reposição do nível de óleo no acumulador. Com a válvula de descarga desenergizada, esta direciona o óleo para o circuito de baixa pressão para resfriamento através de um trocador de calor água-óleo.

Foi utilizado um bloco set/reset, portas lógicas *and*, *or*, *not*, *if* e um divisor para a simulação deste componente, conforme pode ser visualizado na figura 48.

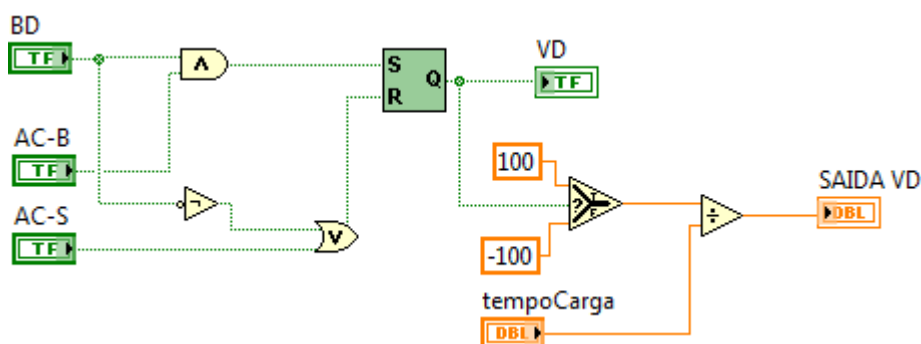


Figura 48 - Bloco lógico da Válvula de descarga
Fonte: Autoria própria.

3.3.3 Acumulador de óleo pressurizado

O acumulador de óleo sob pressão possui a função de manter pressurizado o óleo no seu tanque em casos de falta de tensão alternada para o acionamento da bomba de óleo. A energia armazenada no acumulador (óleo sob pressão) garante uma parada segura da máquina, neste caso. A despressurização, até o limite de acionamento da válvula de descarga, ocorre de forma automática através da movimentação do servomotor, quando então, pelo circuito da figura 48 ocorreu comando para a pressurização, que é dado pela válvula de descarga definida por VD. A partir da aquisição de dados práticos de usinas hidrelétricas, foram definidos

os valores de variação da pressão de 40% a 70%, sendo 70% a pressão máxima e 40% como pressão mínima. Os valores de *set point* e a variação ao longo do tempo são representados através de um tanque com nível variável.

As variáveis de saída do acumulador de óleo são:

N-AC: indica a pressão de saída;

AC-S: indica o limite máximo de pressão;

AC-B: indica o limite inferior de pressão;

AC-M: indica o limite para a pressão mínima.

Para estabelecer os limites de variação da pressão e tempo de pressurização do óleo foram utilizados os blocos funcionais: um integrador, um divisor e três comparadores. A figura 49 exibe a simulação deste componente hidráulico.

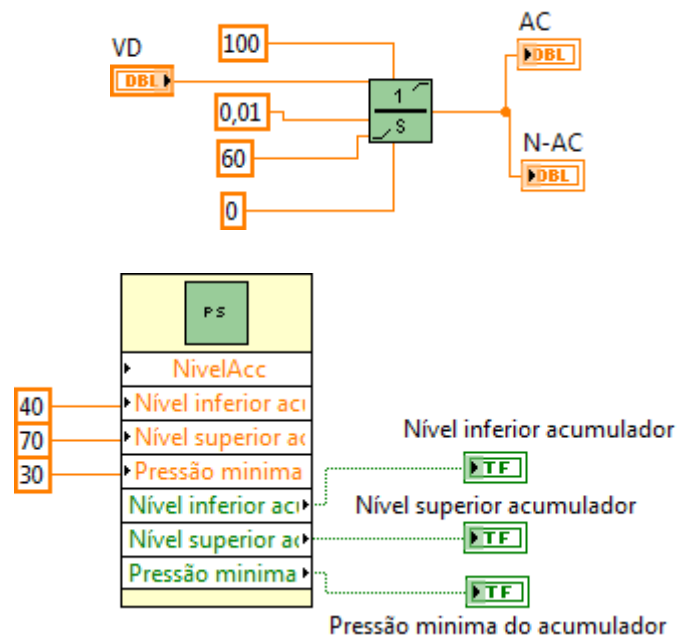


Figura 49 - Blocos lógicos acumulador de óleo pressurizado
 Fonte: Autoria própria.

As variáveis deste componente são pré-condições para o acionamento da válvula de descarga, válvula de isolamento e eletroválvula de emergência.

3.3.4 Válvula de isolamento

A válvula de isolamento tem por função evitar a fuga de óleo do acumulador quando o sistema estiver desligado, isto é, com a turbina parada e a bomba de óleo do regulador desligada. Para a abertura da válvula de isolamento a pressão do óleo deverá estar dentro dos limites descritos no acumulador de óleo e a bomba de óleo acionada. As condições para o fechamento da válvula de isolamento são: o servomotor deverá estar fechado (variável SM-F) e a trava hidráulica deverá estar aplicada (variável TVH-A).

As variáveis de saída para a válvula de isolamento são:

- VI-Aberta: indica a abertura da válvula de isolamento;
- VI-Fechada: indica o fechamento da válvula de isolamento.

Para elaborar a representação deste componente foram utilizados um bloco set/reset, um bloco *if*, comparador, divisor, integrador e duas portas *and*. Foi inserido um sinalizador luminoso para indicar a abertura e fechamento desta válvula. É possível visualizar a representação lógica da válvula de isolamento na figura 50.

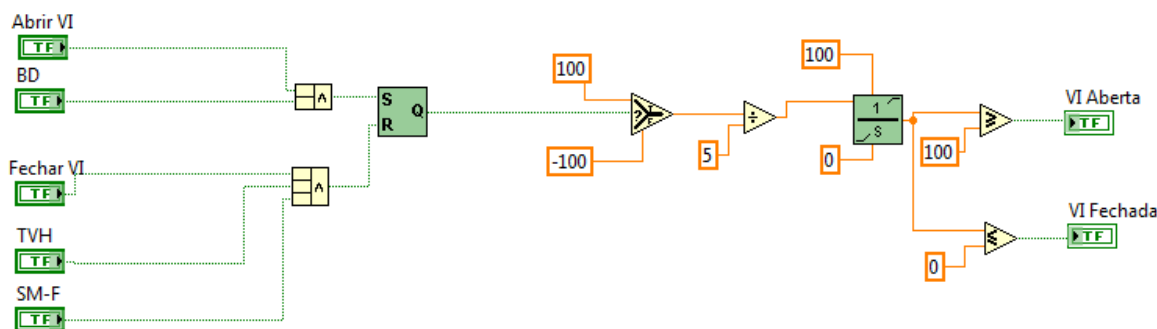


Figura 50 - Bloco lógico da válvula de isolamento
 Fonte: Autoria própria.

3.3.5 Eletroválvula de emergência

A eletroválvula de emergência tem a função de executar o desbloqueio hidráulico do regulador de velocidade para permitir a partida e funcionamento da máquina. Este desbloqueio hidráulico ocorre com a liberação do óleo sob pressão para a válvula distribuidora, que aciona o servomotor. As condições iniciais de energizar este componente são: válvula de isolamento aberta (variável VI-A), o valor

de pressão deve ser superior a mínima (variável AC-M) já as condições para desligamento são: válvula de isolamento fechada (variável VI-F). O tempo para a energização deste componente foi definido como 0.5s.

Na partida da turbina e durante seu funcionamento, esta eletroválvula permanece energizada por razões de segurança, isto é, se houver falta de corrente contínua ou o solenóide da eletroválvula queimar, o regulador de velocidade hidráulico provoca o fechamento total do distribuidor (FRANCIS E KAPLAN) e do bico injetor e defletor (PELTON).

Para elaborar esta simulação, foram utilizados blocos lógicos *and*, *or* e um bloco *set/reset*, além de um indicador de operação desta válvula, conforme figura 51.

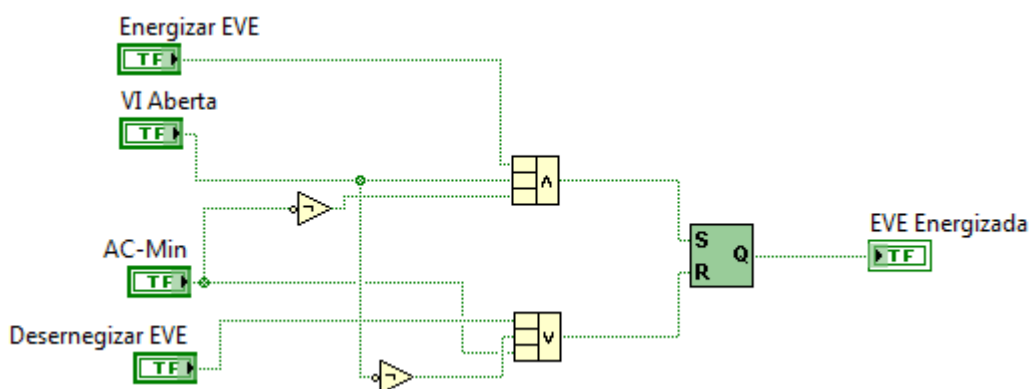


Figura 51 - Blocos lógicos da eletroválvula de emergência
Fonte: Autoria própria.

3.3.6 Trava hidráulica

O comando para a trava hidráulica é manual e representa um dispositivo de segurança para o regulador de velocidade. Existe a necessidade de manter o servomotor travado quando a máquina estiver parada. Esta ação é executada pela trava hidráulica. O destravamento é permitido através das seguintes pré-condições: a válvula de isolamento aberta (variável VI-A). O travamento é permitido através do sinal da variável do servomotor fechado (SM-F). A variável da trava hidráulica é chamada por TVH.

Seguem os blocos lógicos utilizados para representar o funcionamento da trava hidráulica, conforme a figura 52.

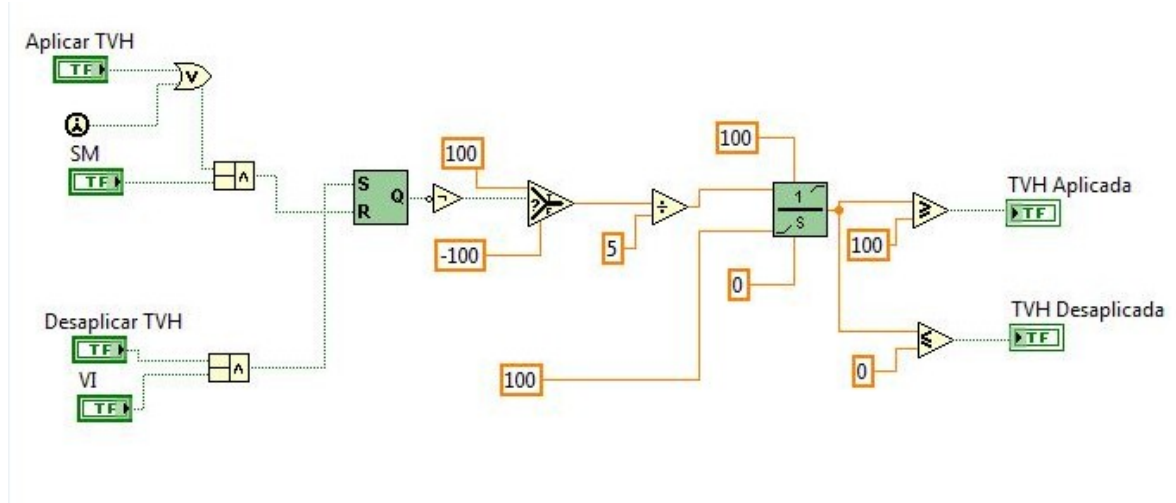


Figura 52 - Simulação da trava hidráulica
Fonte: Autoria própria.

3.3.7 Válvula distribuidora

A válvula distribuidora recebe óleo pressurizado que possibilita o comando do servomotor. O diagrama de blocos funcionais da figura 53 representa o funcionamento da válvula distribuidora. Na entrada da integral, tem-se o valor de referência da válvula distribuidora com um divisor de 0,2 (valor típico) em que a variação da posição da válvula é de -100 a 100, indicando a sua posição. A simulação deste componente utiliza um integrador e um divisor, conforme figura 53.

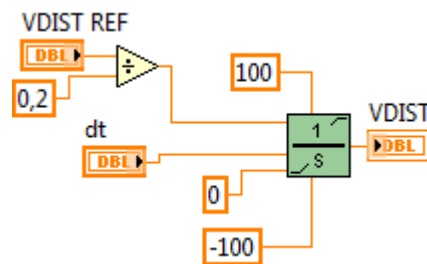


Figura 53 - Bloco lógico da válvula distribuidora
Fonte: Autoria própria.

3.3.7 Servomotor

O servomotor comanda a abertura e fechamento do distribuidor de forma a controlar a vazão de água disponibilizada à turbina hidráulica. O diagrama de blocos

funcionais da figura 54 representa o funcionamento do servomotor. O valor de entrada na integral com limitador de 0 a 100 é à saída da válvula distribuidora (comanda o servomotor) com um divisor por cinco (valor típico) e na sua saída tem-se a posição do servomotor. A simulação deste componente utiliza um divisor e uma integral, conforme figura 54.

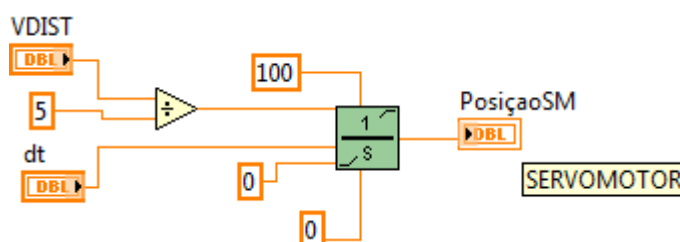


Figura 54 - Bloco lógico do servomotor
Fonte: Autoria própria.

Na figura 55, pode-se visualizar a representação lógica, utilizando uma função de primeira ordem, da inércia do conjunto girante, o que associa o fenômeno de inércia do conjunto girante (turbina e gerador) com a rotação do eixo da turbina hidráulica. A potência mecânica disponibilizada em potência útil no eixo do conjunto girante transforma-se em rotação, cujo valor varia conforme sua massa. Devido aos diferentes aspectos construtivos de todas as turbinas hidráulicas, os valores deste diagrama de bloco é função do tipo de turbina utilizada.

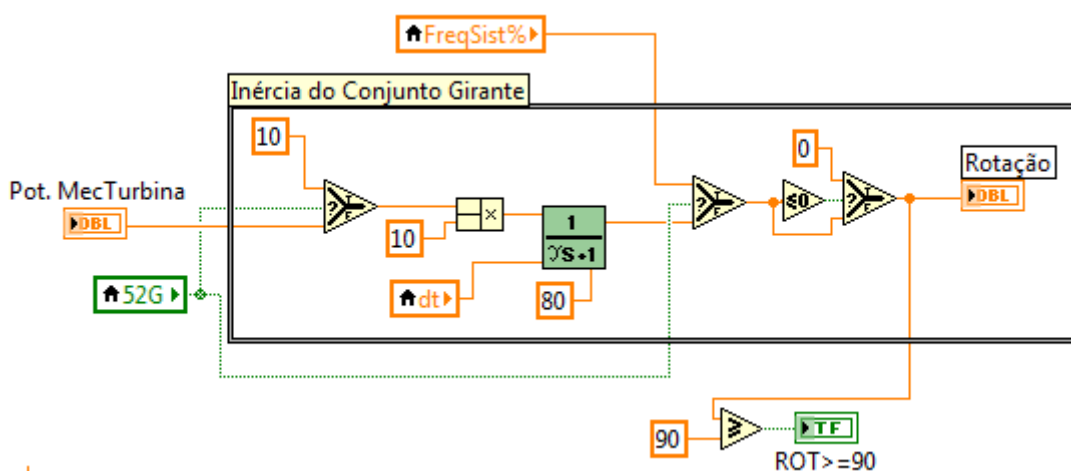


Figura 55 - Bloco lógico da inércia do conjunto girante
Fonte: Autoria própria

3.3.8 Turbina Hidráulica

A turbina hidráulica possui a função de transformar energia hidráulica, proveniente de uma queda de água, em energia mecânica que, posteriormente, será transformada em energia elétrica alternada, na frequência de 60Hz, pelo gerador. As figuras 56, 57 e 58 representam as simulações deste componente hidráulico, que utiliza um integrador cuja variável de entrada é Posição SM (posição do servomotor) e a de saída é Potência mecânica no eixo da TH. Esta representação lógica apresentada é utilizada na simulação das turbinas Francis, Kaplan e Pelton.

A turbina Francis foi representada conforme a figura 56, em que se utilizou um integrador com as funções soma, subtração e divisão, com a realimentação do sinal de saída (Potência Mecânica da TH), a constante T_w (inércia da massa de água) e a variável de entrada principal que é a posição do servomotor. Nesta turbina o ângulo das pás é fixo, e por isso que não é possível realizar o ajuste de fluxo de água para aperfeiçoar seu desempenho, restringindo sua faixa de operação para atingir o melhor rendimento.

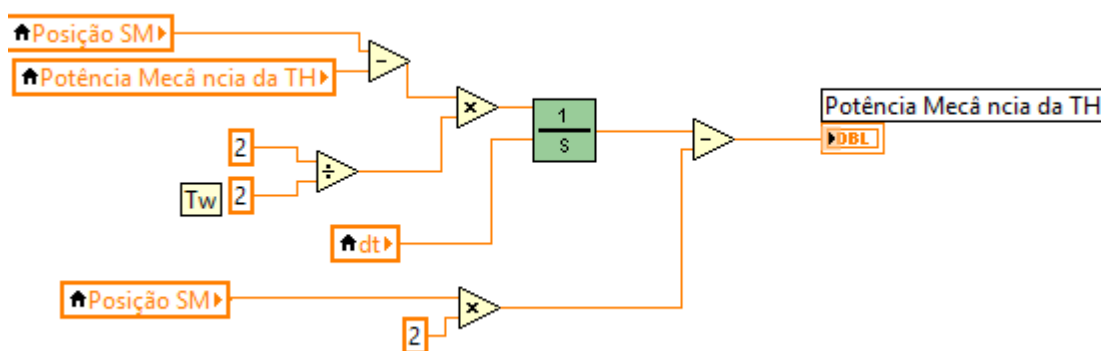


Figura 56 - Bloco lógico turbina Francis
 Fonte: Autoria própria.

Para a turbina Kaplan a posição da pá do rotor irá aperfeiçoar a utilização da turbina, fazendo com que ela opere no seu melhor rendimento e estabilidade hidráulica. A representação lógica utilizou a estrutura da figura 57, em que o controle da vazão de água disponibilizada ao rotor é controlado pelo ângulo das pás e a estrutura da figura 56 para a conversão da posição do distribuidor em potência mecânica no eixo da turbina.

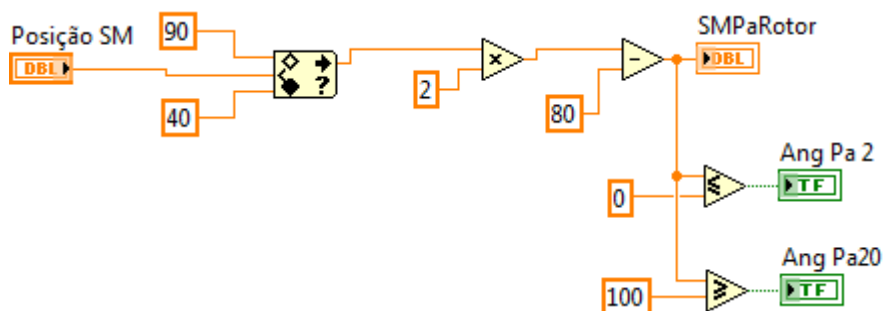


Figura 57- Bloco lógico turbina Kaplan
 Fonte: Autoria própria.

Para a turbina Pelton, o defletor atua sobre o jato de água que sai do bico injetor. A posição do defletor é dada pela posição do servomotor que o aciona. O defletor corta totalmente o jato de água, para evitar sobrevelocidade excessiva na parada da turbina ou nas rejeições de carga ativa, onde a variável Posição SM da figura 56 é substituída pelo valor zero (servomotor totalmente fechado). Se, entretanto, o defletor deixa o jato de água passar livremente na partida da turbina ou na tomada de carga, o valor da variável Posição SM é o valor real da posição do servomotor que aciona o bico injetor. Pelo exposto, e a estrutura da figura 56 é utilizada para a conversão da posição do distribuidor em potência mecânica no eixo da turbina, fazendo parte também da representação da turbina Pelton.

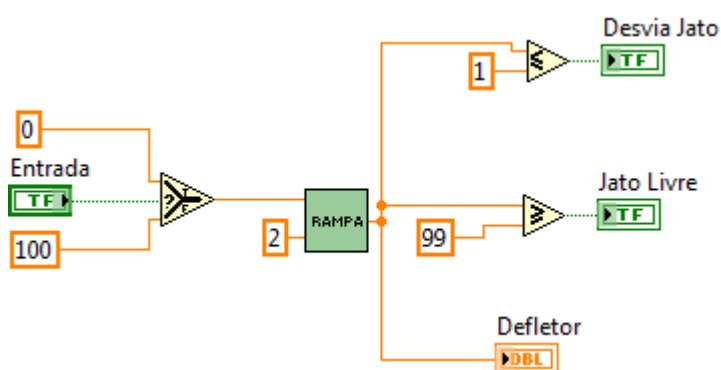


Figura 58- Bloco lógico turbina Pelton
 Fonte: Autoria própria.

3.3.9 Bomba do mancal escora

A representação lógica da bomba do mancal escora pode ser visualizada na Figura 59. A lógica de acionamento é interligada por pulsos do sinal do comando de parada do regulador de velocidade.

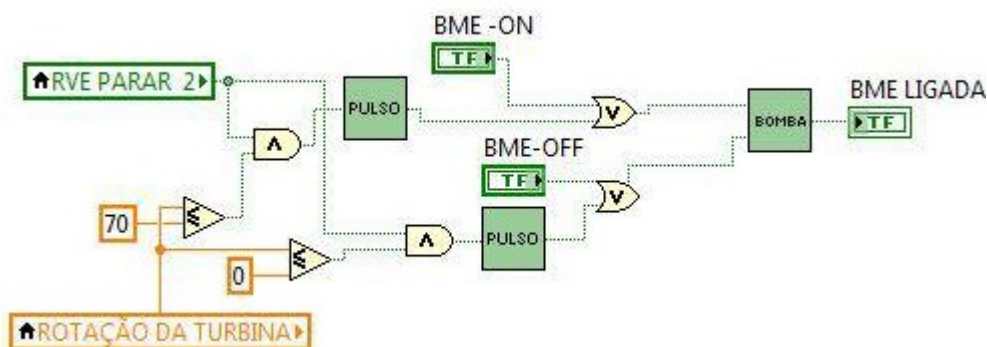


Figura 59 - Bloco lógico bomba do mancal escora
Fonte: Autoria própria

3.3.10 Freio do gerador

A função deste componente é fornecer condições de partida e parada para a unidade geradora. O bloco lógico utilizado para o freio do gerador pode ser visualizado na figura 60.

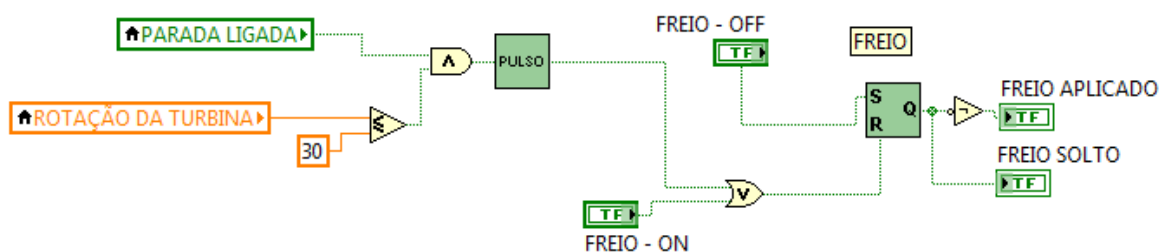


Figura 60 - Blocos lógicos Freio do gerador
Fonte: Autora própria

3.4 CIRCUITO ELETRÔNICO

Neste item do trabalho são apresentados os blocos lógicos para funcionamento do circuito eletrônico, para as condições de partida/parada do regulador de velocidade, além da regulação de abertura, potência e velocidade, efetuadas a partir de um controle automático deste sistema.

3.2.1 Partida e parada do regulador de velocidade

A partida do regulador de velocidade ocorre com a abertura do distribuidor (posição SM do servomotor) controlada pela válvula distribuidora até que se atinja a rotação nominal. As condições de partida são: eletroválvula de emergência energizada, válvula de isolamento aberta, trava hidráulica desaplicada, bomba de lubrificação do mancal escora ligada e freios do gerador desaplicados. Após estabelecidas as pré-condições de partida é dado comando de partida. Para a parada da unidade geradora é necessário uma das condições: comando de parada do circuito eletrônico ou eletroválvula de emergência desligada. Para a elaboração desta simulação foram utilizados uma porta *and*, uma porta *or*, um bloco *set/reset*, um *timer on* sinais de comando do circuito hidráulico e botões de partida e parada. Se ocorrer alguma falha no circuito hidráulico automaticamente o circuito eletrônico será desabilitado através do desligamento da eletroválvula de emergência (EVE), conforme figura 61.

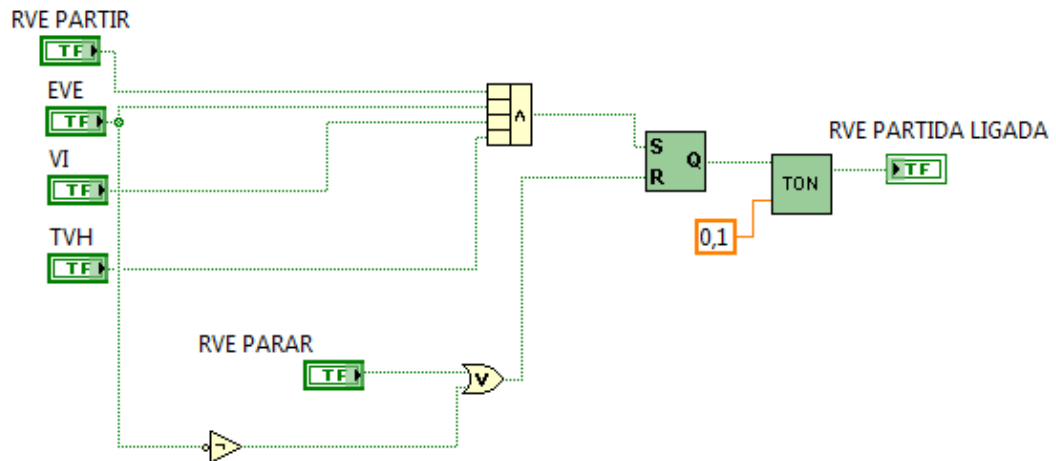


Figura 61 - Simulação da partida e parada do circuito eletrônico
 Fonte :Autoria própria.

3.2.2 Disjuntores 41G/52G

Para a abertura e fechamento do disjuntor de campo e disjuntor do gerador são utilizados a mesma lógica. Para esta simulação, utilizaram-se um bloco *set/reset*, um botão e um sinal luminoso que sinaliza o acionamento deste componente. Sendo que o disjuntor do gerador só pode ser fechado se estiver atendendo às condições do sincronismo e, o disjuntor de campo, só pode ser fechado se a rotação da turbina hidráulica atingir 95% da sua rotação nominal. A figura 62 que representa o bloco do disjuntor do gerador (52G) e também para o disjuntor de campo 41G, onde a variável 52G é substituída por 41G.

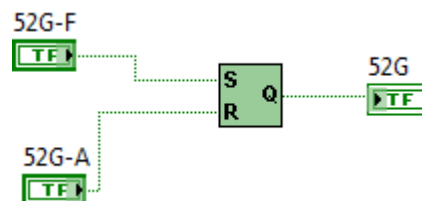


Figura 62 - Simulação do disjuntor 52-G
 Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Modos de regulação

Existem três modos de regulação: potência, abertura e velocidade. Para a simulação da seleção destes modos de regulação foram utilizados dois blocos set/reset, duas porta lógicas *not* e uma porta *and*, contidos no bloco “MODO REGUL.”. O modo de abertura é o modo inicial quando ocorre a partida da unidade geradora. Quando ocorre o fechamento do disjuntor do gerador o modo acionado é o de potência. O modo de velocidade pode ser usado para ajuste da frequência antes do fechamento do disjuntor do gerador. O modo de velocidade pode também ser usado quando o disjuntor do gerador estiver fechada se houver falha do modo de controle de potência. As saídas são indicadores luminosos que representam o modo ativo, conforme figura 63.

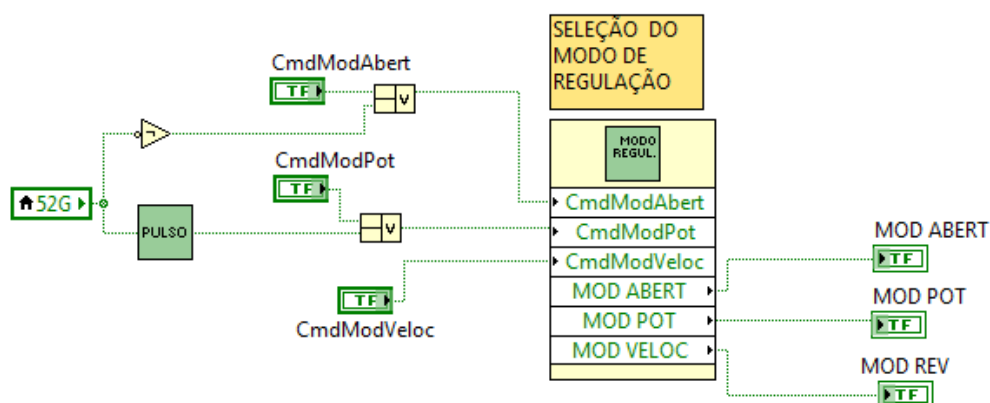


Figura 63 - Simulação dos modos de regulação do regulador de velocidade
Fonte: Autoria própria.

O diagrama de bloco lógico exibido representa o controle dos modos de regulação baseado por um valor referência (*set point*) determinado pelo usuário. A partir deste valor é realizado um controle desta grandeza.

Quando acionado o botão “partir” e selecionado o controle do modo de regulação desejado inicia-se o processo de regulação. Inicialmente, a partida é feita pelo modo de regulação de abertura e, quando a rotação atingir 90% do valor nominal, o modo de regulação passa a ser o modo de regulação de velocidade. Após o sincronismo da unidade geradora com o sistema elétrico, o modo de regulação passa a ser o modo de regulação de potência, conforme figura 64.

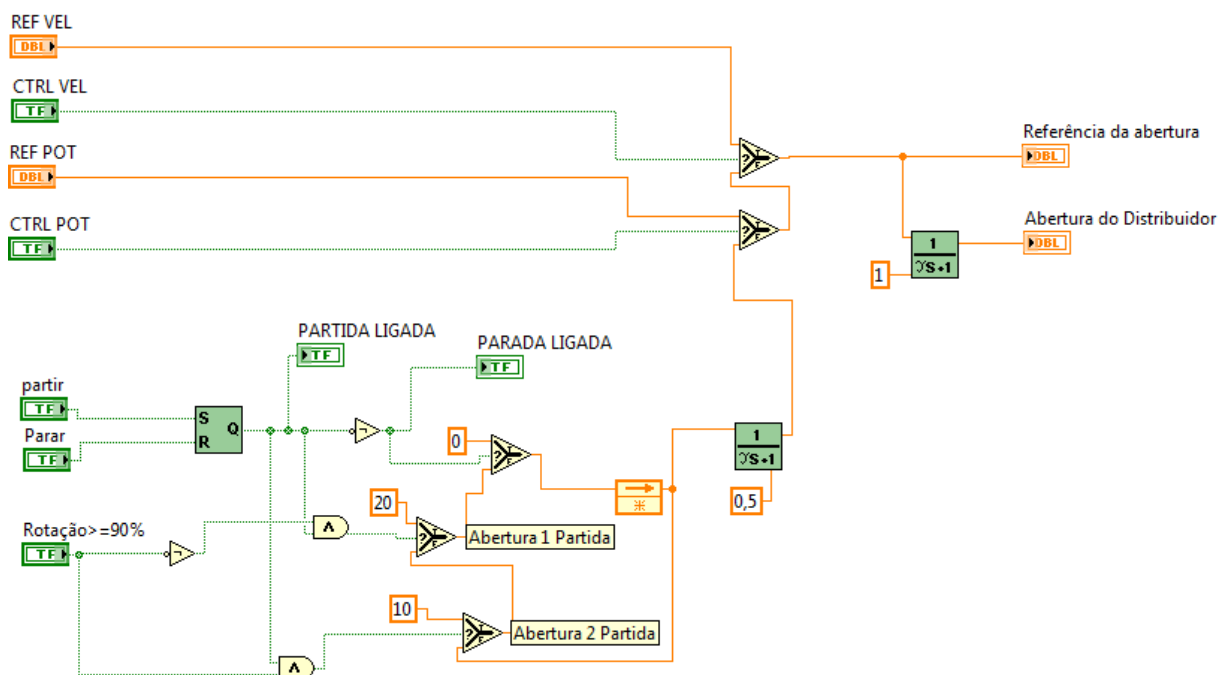


Figura 64 - Simulação dos modos de regulação do regulador de velocidade
Fonte: Autoria própria.

É possível visualizar na figura 65 os blocos lógicos e os sinais utilizados para simular o funcionamento da conversão de potência em abertura, ou seja, entra-se com determinado valor de potência e converte-se em determinada referência de abertura necessária para atender o valor desejado (*set point*) de potência.

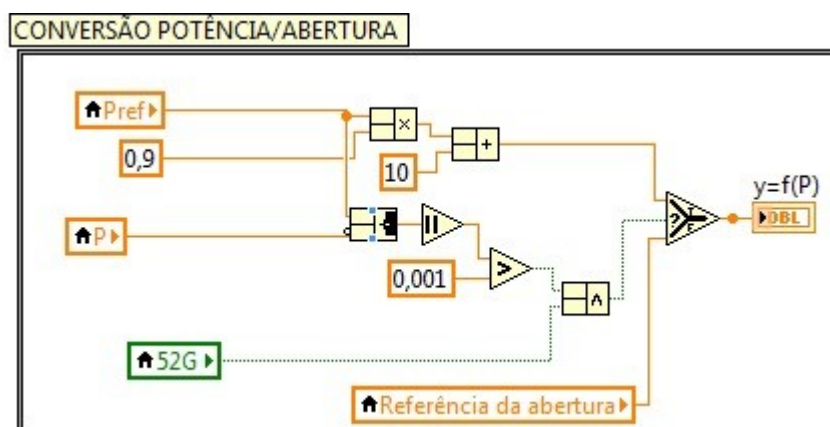


Figura 65 - Bloco lógico conversão potência/abertura
Fonte: Autoria própria.

No capítulo referente à simulação, serão integrados todos os blocos lógicos apresentados e incluídas as funções complementares de estatismo, transferência

dos modos de regulação sem transitório e, desenvolvida a IHM com o regulador de velocidade hidráulico e elétrico completos.

As representações lógicas do servomotor, da válvula distribuidora, da turbina e de outros necessários serão apresentados como sub-rotinas (sub vis) para facilitar o entendimento do simulador, conforme figura 66.

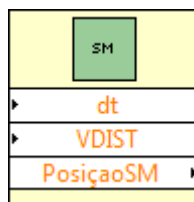


Figura 66 - subVI servomotor
Fonte: Autoria própria

4. IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a elaboração do simulador faz-se necessário uma comparação dos resultados obtidos em cada passo da simulação e dos valores esperados, de acordo com o embasamento teórico visto no capítulo 2, considerando uma integração entre os blocos lógicos. Os blocos lógicos do trabalho “Simulador de um sistema de excitação estática para geradores síncronos” (MANCINI, F., 2005) foram utilizados para uma integração do sistema de regulador de velocidade com o sistema de excitação, com o objetivo é da representação das funções do regulador de velocidade atuando no sistema de excitação para permitir a excitação do gerador, sincronização com o SEP (Sistema Elétrico de Potência), quando efetivamente ocorre a conversão de potência mecânica em potência elétrica.

Foi elaborada uma IHM (figura 97) em que são exibidos os elementos hidráulicos e eletrônicos do regulador de velocidade e, uma representação do sistema de geração de energia elétrica.

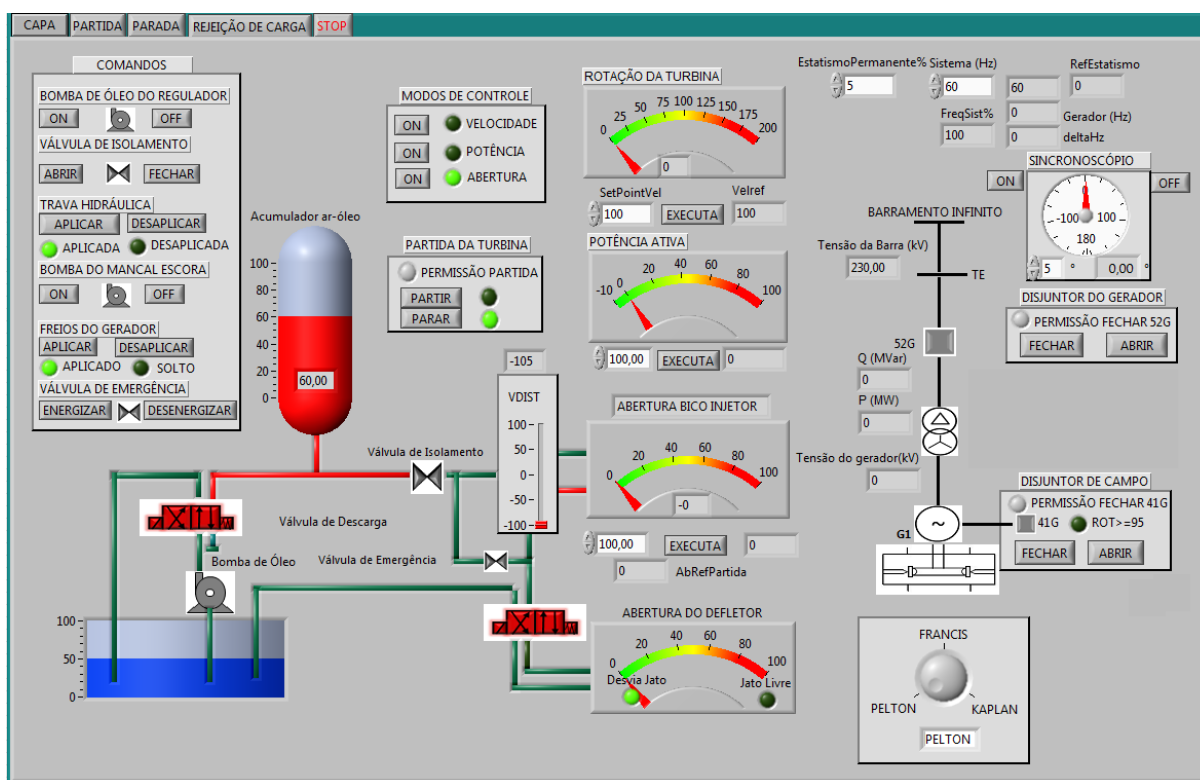


Figura 67 - IHM Regulador de velocidade
Fonte: Autoria própria

Nesta Interface Humano-Máquina, existem os componentes hidráulicos e eletrônicos necessários para a operação do sistema de regulador de velocidade e dos modos de regulação. Durante a execução do simulador, será possível que o usuário visualize os indicadores de rotação, potência, frequência, entre outros. Além disto, será possível modificar o tipo de turbina hidráulica (Pelton, Francis ou Kaplan).

O desenvolvimento do simulador consiste em verificar as respostas dos indicadores da simulação do sistema e compará-los com os resultados esperados na teoria. Isto ocorrerá em duas etapas: operação do sistema e modos de regulação.

4.1 Operações do sistema

Pode-se definir que partida da unidade geradora, rejeição de carga e parada da unidade geradora sejam as operações principais do sistema conforme explicado no item 2.3 deste trabalho, “Funções do regulador de velocidade”. A seguir será explicado o sequenciamento de operação para cada etapa.

4.1.1 Partida da unidade geradora

Abaixo estão apresentadas as pré-condições para a partida da unidade geradora, em que se pode dividir entre comandos hidráulicos (movimentação de óleo pressurizado, intertravamento mecânico do servomotor, acionamento de válvula de emergências, entre outros) e comando eletrônicos (fechamento de disjuntores, regulações de abertura, velocidade, potência, entre outros).

4.1.1.1 Comandos hidráulicos

A função dos comandos apresentados a seguir é atender aos requisitos necessários para permitir a partida da unidade geradora e, conseqüentemente liberar os comandos de fechamento dos disjuntores de campo e do gerador para produção de energia elétrica.

I) Ligar bomba de óleo: o acionamento da bomba de óleo conduz o óleo sem pressão até o acumulador de óleo sob pressão – onde é mantido com

determinada pressão, que será utilizado nos processos seguintes para efetuar o movimento do servomotor.

II) Abrir válvula de isolamento: permite que o óleo com pressão seja liberado para válvula distribuidora acionar o servomotor e outras partes do circuito hidráulico de regulação. É válido ressaltar de que existe um tempo de resposta de cinco segundos para abrir a válvula de isolamento, conforme ocorre durante a partida de uma unidade geradora.

III) Desaplicar trava hidráulica: executa o desbloqueio do servomotor para permitir o funcionamento dinâmico do sistema.

IV) Ligar bomba do mancal escora: permite a lubrificação do mancal escora.

V) Soltar freio hidráulico: permitir o movimento da turbina hidráulica.

VI) Energizar Eletroválvula de emergência: executa o desbloqueio hidráulico do regulador de velocidade de forma a permitir a partida máquina.

Durante o processo de partida da turbina a bomba de óleo do regulador permanece ligada. Com a válvula de descarga energizada a bomba fornece óleo com pressão para o acionamento hidráulico e reposição do nível de óleo no acumulador. Com a válvula de descarga desenergizada esta direciona o óleo para o circuito de baixa pressão, para resfriamento através de um trocador de calor água-óleo. O movimento desta válvula é feito automaticamente pelo simulador.

Após executados estes comandos hidráulicos estará sinalizada a permissão da partida do regulador de velocidade digital, conforme figura 68.

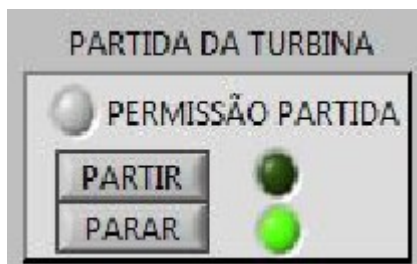


Figura 68 - Permissão partida sistema
Fonte: Autoria própria

Após receber a permissão da partida do regulador de velocidade, o usuário do programa deve executar os comandos eletrônicos, conforme a seguir.

4.1.1.2 Comandos eletrônicos

Depois de atendidos os requisitos hidráulicos para permitir a partida da UG (Unidade Geradora) e atingida a rotação próxima ao seu valor nominal pode-se comandar o fechamento do disjuntor de campo e o disjuntor do gerador para, consecutivamente, obter a tensão nominal nos terminais do gerador e conectar a unidade geradora ao Sistema Elétrico de Potência (SEP).

- I) **Partida do regulador de velocidade digital até 90% da rotação nominal:** Deve-se pressionar o botão de “partida RVD” para iniciar o processo de partida da UG. Após iniciado este comando, o óleo pressurizado é disponibilizado, através do circuito de bombeamento, para a válvula distribuidora que comanda a posição do servomotor de forma a aumentar a rotação da turbina até 90% da rotação nominal. Em paralelo a isto os indicadores referência de abertura, posição do servomotor está crescendo de seus valores iniciais. A figura 69, exibe o momento em que foi enviado sinal da partida do regulador de velocidade digital, o distribuidor abriu 20% e rotação está em torno de 20%.

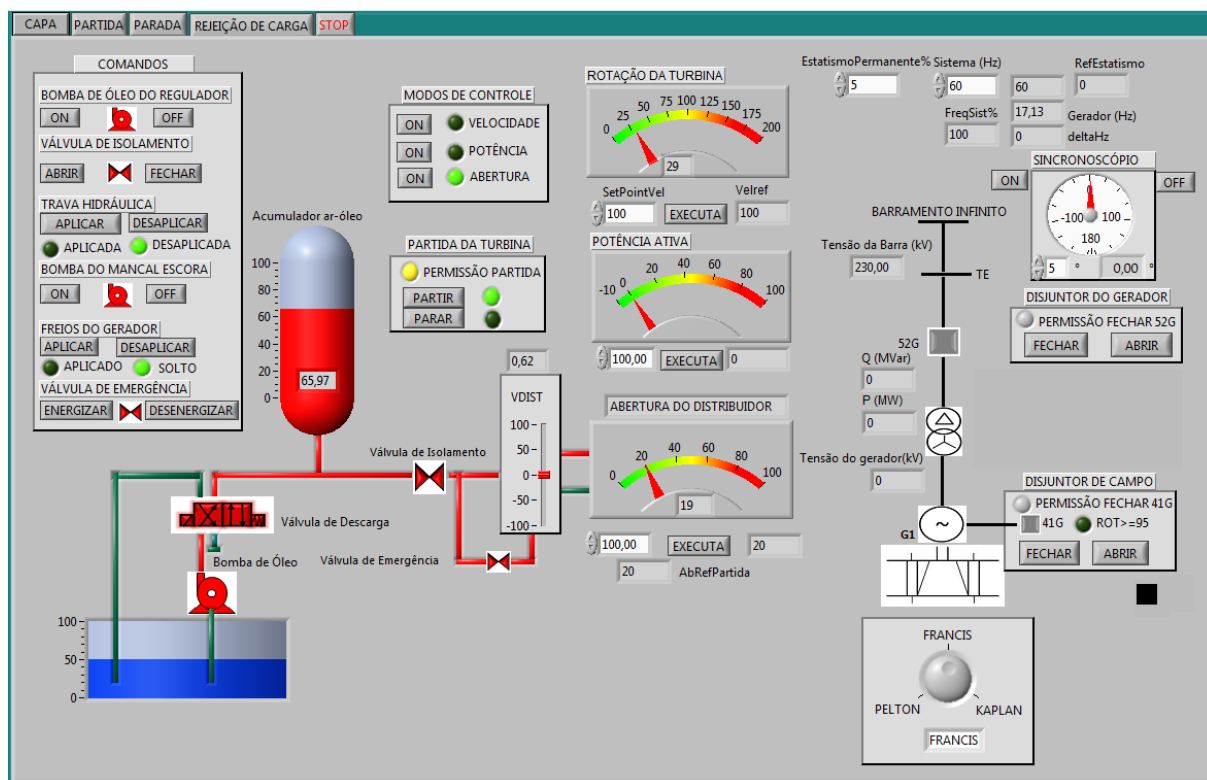


Figura 69 - Regulação abertura 20%

Fonte: Autoria própria

Observa-se que a referência de abertura permanece com 20% do valor nominal até que a rotação nominal encontre-se com o valor inferior a 90% da rotação. Isto permite uma partida segura e estável do sistema. É válido ressaltar que o disjuntor de campo e o disjuntor do gerador encontram-se abertos, ou seja, todas estas etapas de operação estão ocorrendo em vazio (sem geração de energia), pois trata-se de um “*setup*” da máquina, necessário para atender aos requisitos de estatismo e sincronismo na rede ao SEP.

- II) **Partida do regulador de velocidade digital de 90% até 100% da rotação nominal:** com o objetivo de evitar que a velocidade passe do seu valor nominal, quando se chega à 90% da rotação automaticamente a referência de abertura é reduzida para 10%, deste modo reduzindo a vazão de água disponibilizada ao rotor da turbina e atingir suavemente a velocidade nominal. A figura 70 exhibe a indicação

de 10% da referência de abertura distribuidora, ou seja, é a situação em que a máquina está se estabilizando até 100% da rotação nominal.

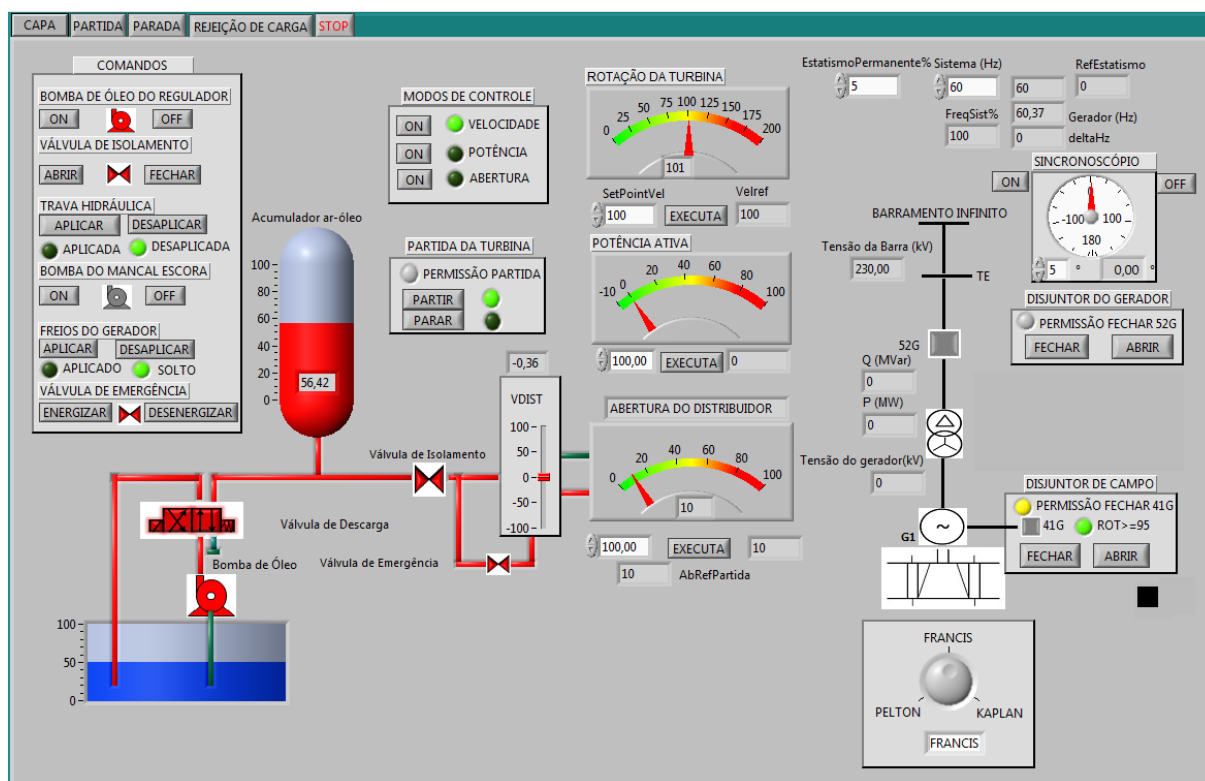


Figura 70 - Regulação de abertura 10%
Fonte: Autoria própria

- III) Fechamento do disjuntor de campo:** Após a rotação nominal atingir um valor superior a 95%, deve-se fechar o disjuntor de campo, cuja função é ligar o sistema de excitação para produzir tensão nos terminais do gerador elétrico acoplado mecanicamente ao eixo da turbina. O Disjuntor de campo do simulador pode ser visto na figura 71.

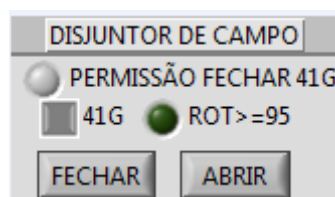


Figura 71 - Disjuntor de campo 41G
Fonte: Autoria própria

IV) Fechamento do disjuntor do gerador: Quando se fecha o disjuntor de campo existe a necessidade de ajustar a frequência da tensão, para posteriormente disponibilizar esta energia ao Sistema Elétrico de Potência (SEP). Isto ocorre com o fechamento do disjuntor do gerador, que só pode ser realizado quando o sincronoscópio indicar permissão para fechamento do disjuntor do gerador. O disjuntor do gerador é ilustrado na figura 72.

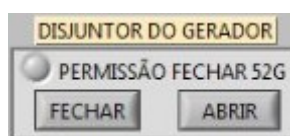


Figura 72 - Disjuntor do gerador 52G
Fonte: Autoria própria

4.1.2 Rejeição de carga

Na elaboração do projeto de uma usina hidrelétrica, dimensionam-se diversos circuitos de segurança, para evitar danos ao sistema e possíveis faltas de energia ao SEP. A abertura do disjuntor do gerador sem reduzir a potência ativa fornecida ao SEP significa que alguma condição insegura ocorreu e que o sistema deve ser desligado imediatamente. Para simular esta condição será aberto manualmente o disjuntor do gerador e verificar que os indicadores (potência, corrente, rotação nominal e etc.). Com a abertura do disjuntor do gerador a potência ativa será zerada e ocorre a sobrevelocidade da turbina hidráulica devido a essa rejeição de carga.

O regulador de velocidade atua de forma a buscar estabilizar a rotação da turbina hidráulica em 100% da rotação nominal e o usuário tem a opção de parar a unidade geradora ou fechar o disjuntor do gerador e colocar em sincronismo com o sistema elétrico de potência novamente. A figura 72 ilustra a simulação da rejeição de carga.

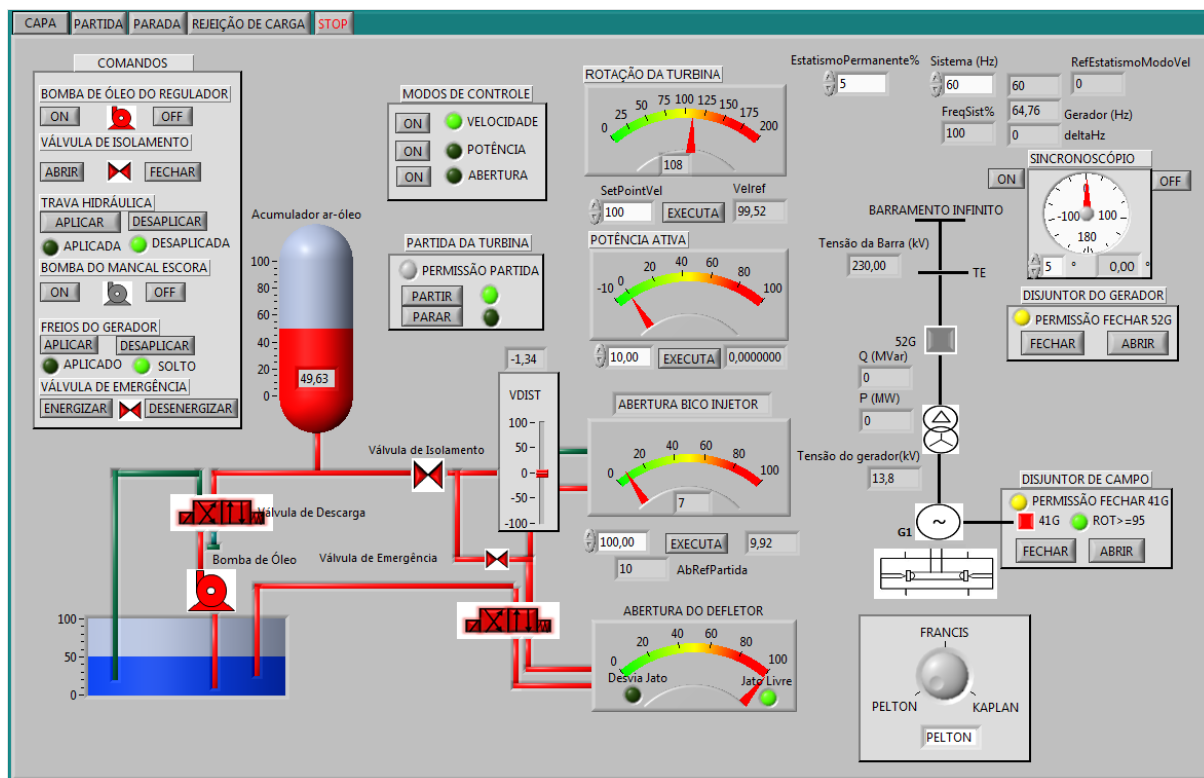


Figura 73 - Foto da IHM rejeição de carga
Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Parada da unidade geradora

Para executar a parada da unidade geradora faz-se necessário o sequenciamento de comandos hidráulicos e eletrônico do regulador de velocidade com o objetivo de garantir uma parada segura do sistema.

4.1.3.1 Comandos eletrônicos

Os comandos eletrônicos, descritos abaixo, foram concebidos através de dados adquiridos de usinas hidroelétricas brasileiras ou seja, é o procedimento usual de parada da unidade geradora. É válido ressaltar que o seqüenciamento deve obedecer restritamente os itens a seguir:

- I) **Reduzir carga ativa para zero:** deve-se retirar a carga ativa até um valor próximo de zero para iniciar o seqüenciamento de parada;
- II) **Abrir disjuntor do gerador:** após atingido o valor de carga ativa nula o disjuntor do gerador será aberto;
- III) **Abrir disjuntor do campo:** a abertura deste disjuntor, reduz a tensão do gerador ao valor zero (desexcitação do gerador);
- IV) **Acionar PARAR do regulador de velocidade:** realiza o fechamento do distribuidor ou bico injetor da turbina hidráulica e conseqüente redução da velocidade até seu valor nulo (unidade geradora parada).

4.1.3.2 Comandos hidráulicos

- I) **Desligar Eletroválvula de emergência:** este comando impede o fornecimento de óleo pressurizado para a válvula distribuidora.
- II) **Aplicar trava hidráulica:** executa o travamento do servomotor na posição totalmente fechado;
- III) **Fechar válvula de isolamento:** impede a fuga de óleo durante a unidade geradora está parada.
- IV) **Ligar bomba mancal escora:** quando a rotação atingir o valor de 70% do valor nominal automaticamente é ligada a bomba do mancal escora para lubrificação forçada do mancal na parada da unidade geradora;
- V) **Aplicar freio:** o freio é aplicado automaticamente, quando a rotação do eixo atingi o valor de 30% da rotação nominal.
- VI) **Desligar bomba mancal escora:** quando se chega na rotação nula é desligada a bomba do mancal escora, pois a máquina encontra-se em repouso;
- VII) **Soltar o freio:** no estado estático da máquina pode-se soltar o freio para posteriormente permitir futuras partidas.

VIII) Desligar bomba de óleo: cessa-se a produção de óleo pressurizado do sistema, pois este encontra-se desligado.

4.2.2 Modos de regulação

Existem três modos de regulação aplicados ao sistema do regulador de velocidade que executam os controles de potência, velocidade e abertura. Aqui será apresentada a função do estatismo, isto é, a ação da variação de frequência no entorno de 60 Hz quando a unidade geradora está ligada ao SEP.

4.2.2.1 Controle de potência

O controle da potência ativa é ativado automaticamente, quando o disjuntor do gerador é fechado, ou seja, unidade em sincronismo com o sistema elétrico. O regulador atuará no distribuidor ou bico injetor da turbina hidráulica, permitindo a entrada de água no rotor, com isso, aumentando a potência mecânica da turbina e, por conseguinte, aumentando a potência ativa da unidade geradora. O objetivo é igualar a potência ativa real aos valores de referência inseridos, sendo a regulação ajustada através de um controlador PI (Proporcional Integral).

O controlador PI é normalmente utilizado pelos fabricantes de reguladores de velocidade na malha de controle de potência. A figura 65 ilustra a aplicação da ação integral em conjunto com ação proporcional, onde **Ti** é o tempo integral, ou seja, o tempo em que a parcela relativa à ação proporcional da ação de controle é duplicada, medido em segundos no simulador (da Silva Jr.; J., 2013). O efeito da ação integral é ilustrado na figura 73.

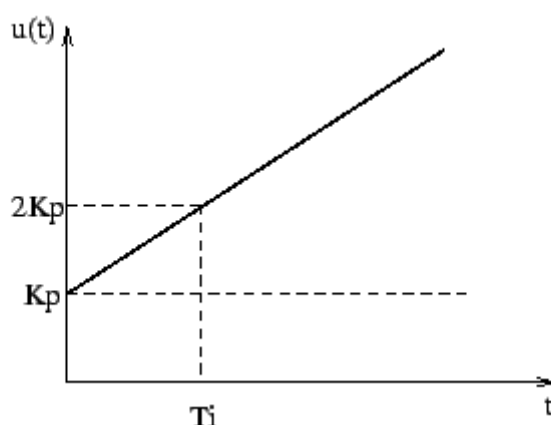


Figura 74 - Efeito da ação integral
Fonte: da Silva Jr (2013)

A simulação do controle de potência é feito através de um bloco lógico, onde o usuário tem como dado de entrada, os valores de potência ativa real e potência ativa de referência. Interno ao bloco lógico do controle de potência contém um componente subtrator, responsável por quantificar a diferença entre as potências ativa real e de referência. Na simulação, o controlador PI foi ajustado para atuar apenas quando o subtrator apresentar valores inferiores a 0,5%. A figura 74 apresenta o bloco lógico responsável pelo controle da potência.

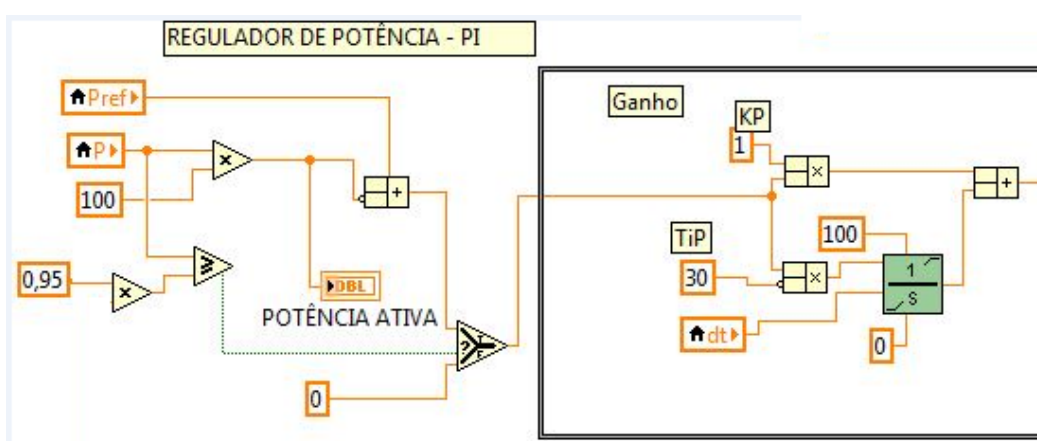


Figura 75 - Regulação de potência ativa
Fonte: Autoria própria

Como exemplo, comprovando a validade dos resultados do software, foi realizada uma simulação do modo de controle de potência ativa, onde o *set point* foi definido em 10%.

4.2.2.2 Controle de Velocidade (Frequência) – Antes do Sincronismo

O controle de velocidade (frequência) tem como objetivo viabilizar o sincronismo entre a unidade geradora e sistema elétrico, e fornecer ao usuário condições para o fechamento do disjuntor do gerador. O simulador mostrará, através de um sincronoscópio, a diferença de frequência da unidade geradora e da rede (SEP) através da movimentação de seu ponteiro indicador e a diferença angular entre a tensão do gerador e a tensão da rede (SEP). A condição ideal de sincronismo do gerador com o SEP é a referida diferença angular em zero e movimentação lenta do ponteiro do sincronoscópio (diferença de frequência entre o gerador e o SEP na ordem de 0,05Hz).

4.2.2.3 Controle de velocidade – Após o sincronismo

O controle de velocidade após o sincronismo é utilizado quando o controle de potência não está disponível.

4.2.2.4 Regulação de abertura

A regulação de abertura é realizada quando o sistema estiver operando atuando no controle da posição do servomotor do distribuidor da turbina hidráulica. Quando a regulação está em operação interligada, o distribuidor da turbina acompanha o ajuste de regulação.

Com as condições de partida do circuito hidráulico previamente realizado e o fechamento dos disjuntores de campo e do gerador, é possível realizar a regulação

da abertura. A figura 75 ilustra os blocos lógicos utilizados para a regulação de abertura do distribuidor.

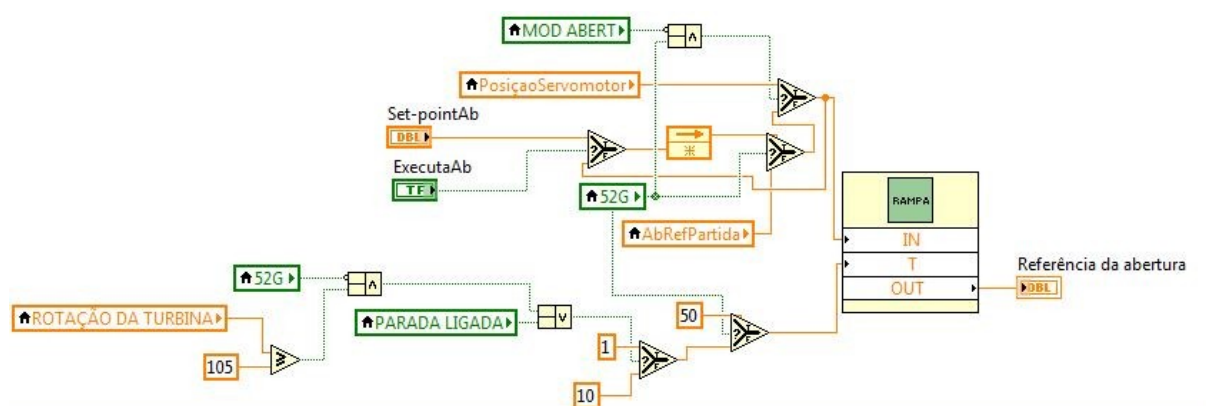


Figura 76 - Regulação de abertura
Fonte: Autoria própria

4.2.2.5 Estatismo

O estatismo tem como objetivo manter o equilíbrio entre a potência ativa gerada e a carga ativa ligada as unidades geradoras quando a frequência desvia do seu valor nominal, 60 Hz. Em situações onde há falta de geração, ou excesso ocorrerá uma redistribuição de potência entre as unidades geradoras, proporcionalmente a potência nominal de cada unidade. Após a perturbação a frequência do sistema passará a ser diferente de 60Hz, até que o controle automático de geração (AGC) atue fornecendo o controle para o restabelecimento do equilíbrio.

Nas figuras 76 e 77, pode-se visualizar o diagrama de blocos que representa a referência de estatismo do sistema e o estatismo permanente. Conforme visto no capítulo 2.3, Funções do Regulador de Velocidade, o sistema deve garantir uma variação de frequência da tensão gerada que seja inferior ao estatismo especificado. No caso das usinas brasileiras, este valor é de 5% da frequência nominal (60Hz), ou seja, uma variação tolerável de 5Hz.

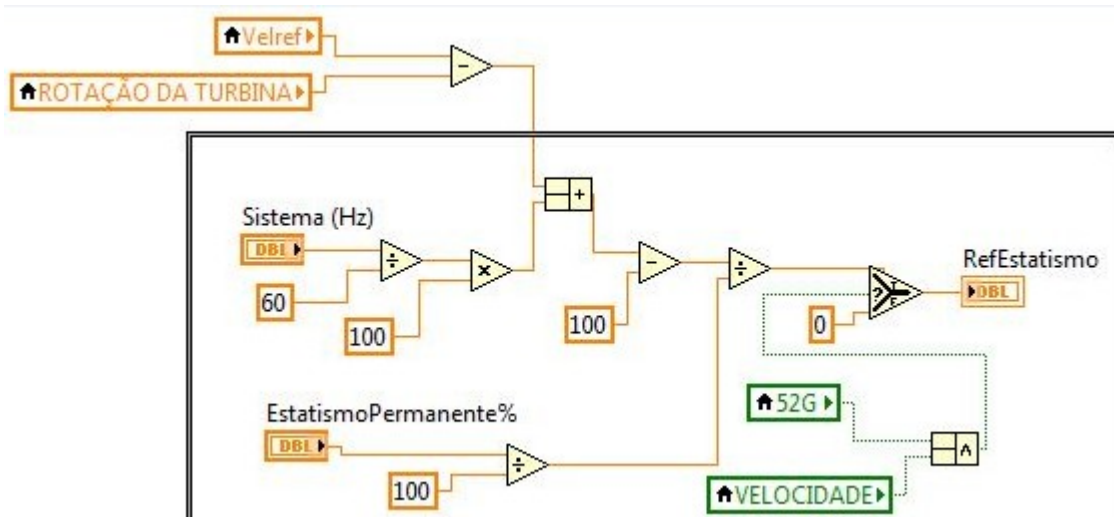


Figura 77 - Referência de estatismo
Fonte: Autoria própria

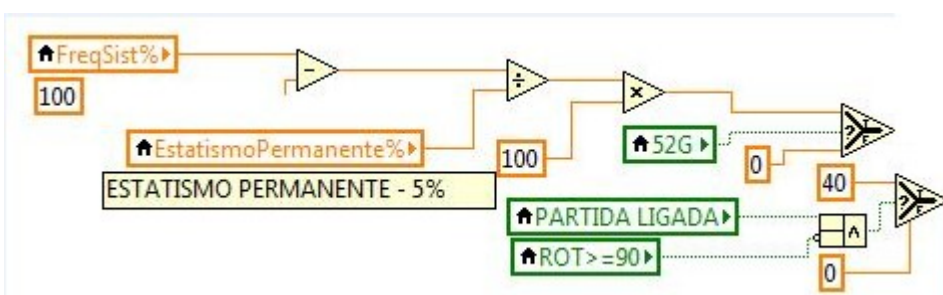


Figura 78 - Estatismo permanente
Fonte: Autoria própria

4.2.3 Seletor de turbinas

Foi elaborado um seletor de turbina hidráulica em que o usuário pode selecionar a turbina a ser utilizada e verificar a desempenho do sistema. Isto ocorre através da utilização blocos lógicos diferenciados, conforme exibidos no item 3.3.8.



Figura 78 – Seletor de turbinas
Fonte: Autoria própria.

A representação do resultado da escolha é representado nas figuras 79, 80 e 81.

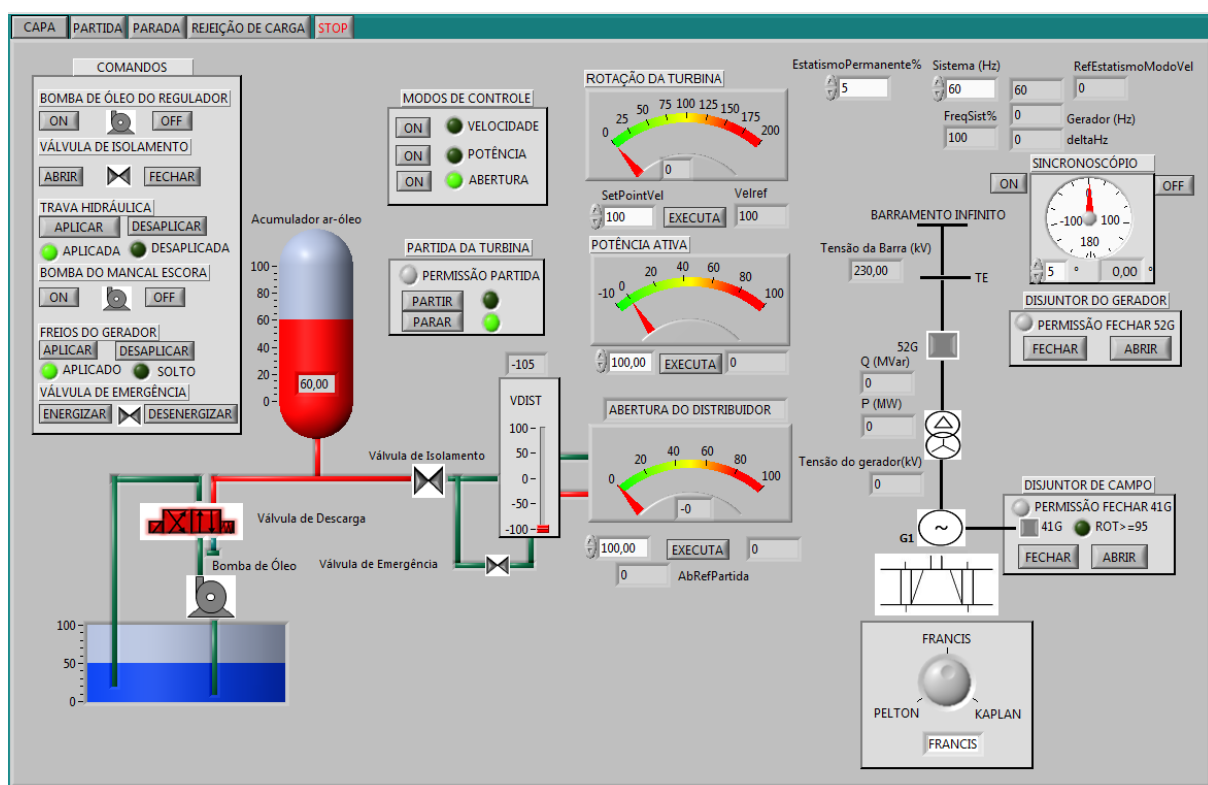


Figura 79 - Foto da IHM com turbina Francis.
Fonte: Autoria própria.

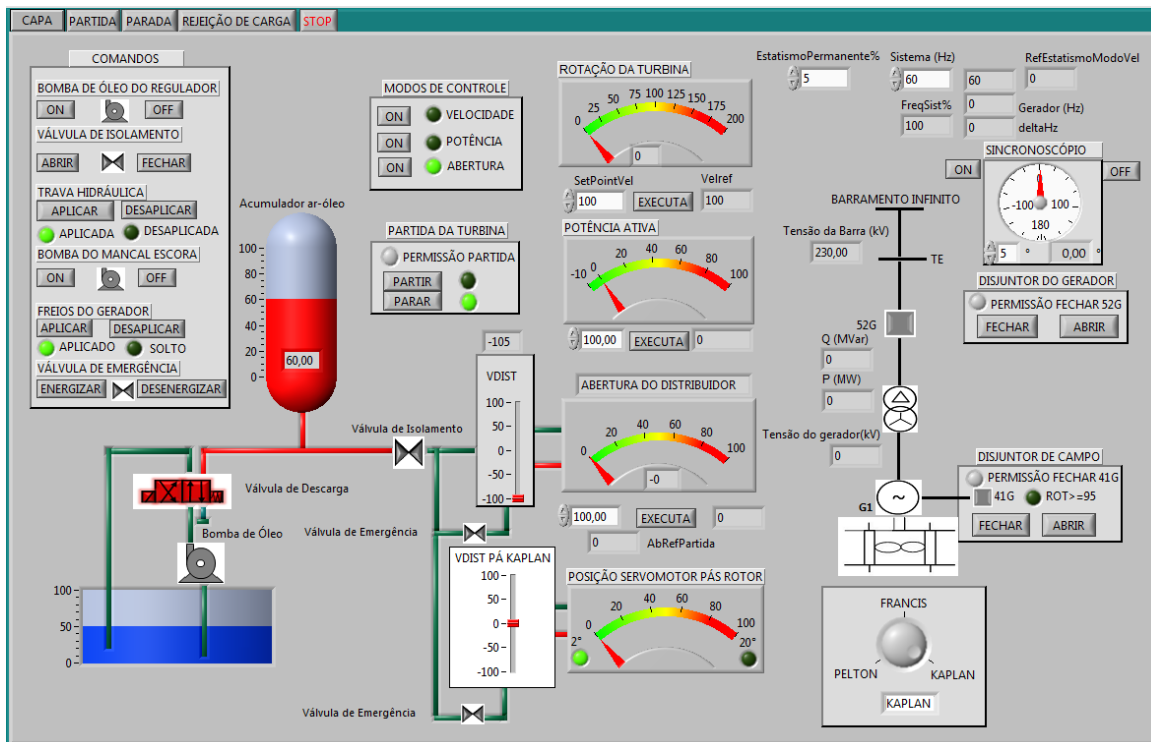


Figura 80 - Foto IHM turbina Kaplan
 Fonte: Autoria Própria.

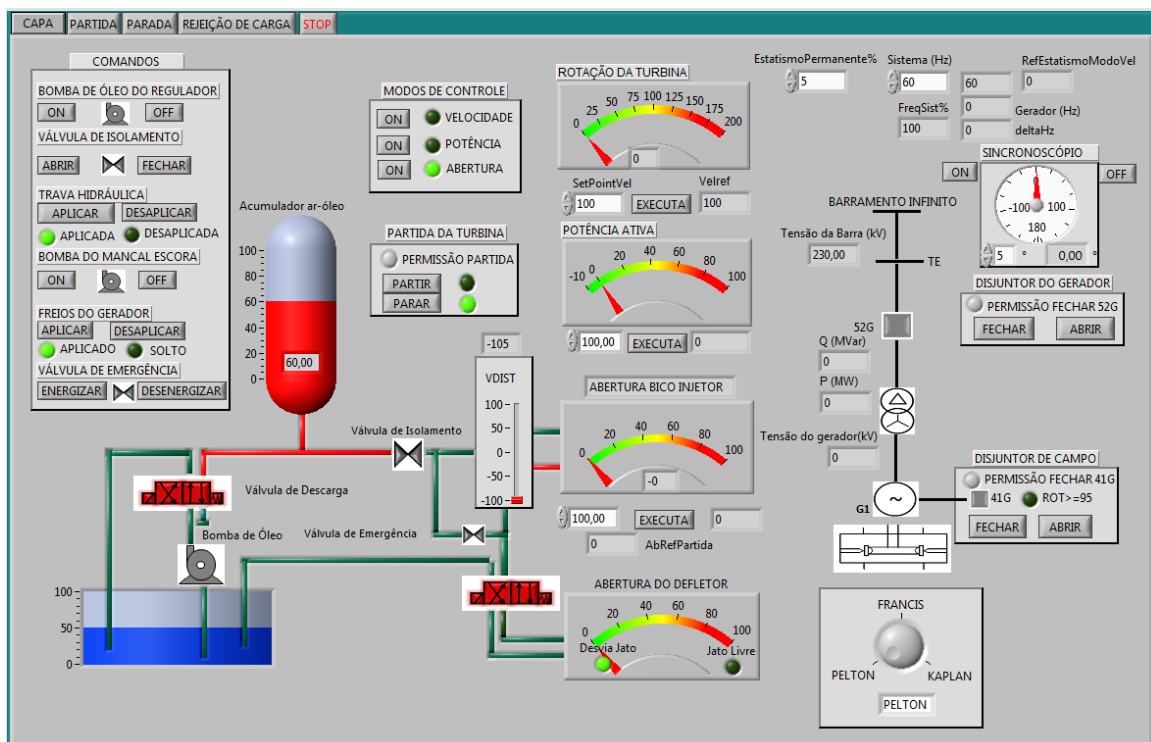


Figura 81 - Foto IHM turbina Pelton
 Fonte: Autoria própria.

5.CONCLUSÃO

A partir das simulações realizadas em diferentes operações do sistema (partida, rejeição de carga e parada) e modos de regulação (abertura, velocidade, potência e frequência/estatismo) pode-se verificar de acordo o embasamento teórico estabelecido, o correto funcionamento da simulação através dos indicadores de rotação, de abertura, de potência ativa e tensão gerada, entre outros.

Ressalta-se que houve a necessidade de estabelecer uma convergência das referencias bibliográficas que tratavam dos diferentes conhecimentos que foram abordados para a execução do trabalho, vez que, são raras as fontes que tratam especificamente do tema. Aliado a isso, os conhecimentos adquiridos na disciplina de Controle a respeito da utilização de integradores, cálculo de constante para ajuste do PI (proporcional e integral) e funções de primeira ordem, foram fundamentais para a elaboração do simulador. É eminente salientar a importância que as disciplinas de Instrumentação virtual, Geração de energia e Eletrônica digital contribuíram com os princípios de funcionamento do *software* Labview, usinas hidrelétricas e blocos lógicos utilizados no trabalho respectivamente.

A expectativa de uma simulação dos componentes do regulador de velocidade foi superada ao passo que se agregaram as funções do sistema de excitação e geração de energia elétrica do trabalho de conclusão de curso do ex-aluno da instituição Flávio Enrico Mancini, o qual disponibilizou os blocos lógicos do sistema de excitação, que posteriormente foram integrados nas estruturas do simulador, viabilizando assim o desenvolvimento de uma interface humano - máquina que permite o controle e a supervisão do regulador.

A Interface desenvolvida apresenta indicadores gráficos, que por sua vez auxiliam na visualização do comportamento do regulador perante as operações do sistema, e facilitam a compreensão do funcionamento dos dispositivos do regulador de velocidade, ademais, foi desenvolvido um manual didático que permite ao usuário obter as informações necessárias para realizar a operação desejada durante a utilização do *software*.

Portanto, foram atingidos os objetivos previamente propostos no trabalho em que se implementou o simulador – de acordo com o embasamento teórico, do regulador de velocidade. Tendo vista a restrita literatura deste tema, verifica-se a

possibilidade de utilização desta simulação como uma ferramenta didática a ser disponibilizada ao meio acadêmico, que em longo prazo pode ser útil para análise de sistemas mais abrangentes e permitir estudos dentro da área de geração de energia elétrica aplicadas a usinas hidrelétricas.

REFERÊNCIAS

- ALTERIMA. **Turbinas Hidráulicas**. Disponível em: <http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=24>. Acesso em 15 de setembro de 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Turbinas Hidráulicas, Turbinas-bombas e bombas acumulação** – NBR 6445. Rio de Janeiro, 1987.
- CORDEIRO, Luiz. **Máquinas Térmicas e Hidráulicas**. Rio de Janeiro: UERJ, 2010.
- COSTA, Antônio Simões. **Turbinas Hidráulicas e Conduitos**. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/dincont/turb-hidr-2003.pdf>. Acesso em: 08 de agosto de 2012.
- CUENCA, Jr. **Hidraulic Turbines**. Disponível em: http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/English/Turbines/hydraulic_turbines.htm. Acesso em: 08 de agosto de 2012.
- DA SILVA JR., João. Disponível em: <http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node28.html>. Acesso em: 10 de agosto de 2013.
- ESTEVE, D.A.; BENTO JUNIOR, M. **Regulador digital VGC 211 3P2: Descrição técnica**. São Paulo: VOITH SIEMENS, 2000. Relatório técnico.
- EXATECNO. Disponível em: <http://www.exatecno.net/ampliacion/energia/TurbinaKaplan.htm>. Acesso em: 08 de agosto de 2012.
- FUTIKAMI, Edmar Eidy et al. **Simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas Francis**. 2003. 85 f. (Trabalho de conclusão de curso) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003.
- GOVERNO FEDERAL. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica>. Acesso em: 16 de setembro de 2012.
- HIDROENERGIA. Disponível em: <http://www.hidroenergia.com.br/br/index.php?i=turbina-kaplan>. Acesso em :15 de setembro de 2012.
- INFOESCOLA. Disponível em: <http://www.infoescola.com/energia/usina-hidreletrica/> Acesso em: 17 de setembro de 2012.

KONDO, Carlos. **Governador de velocidade digital - descripción de funcionamiento**. São Paulo: VOITH, 2001. Relatório técnico.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro:1983

MANCINI FILHO, E. **Regulador de velocidade para turbinas hidráulicas tipo Francis**. Curitiba: Unicenp, 2004. Artigo técnico.

MANCINI FILHO, E. **Treinamento de pessoal. Unidade Geradora Regulador de Velocidade**. Curitiba: COPEL, 2004. Relatório técnico.

MANCINI, Flavio Enrico **Simulador de um sistema de excitação estática para geradores síncronos** 2005. 75 f. (Trabalho de conclusão de curso) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.

MELLO, Antonio. Disponível em:

<http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%E1ulicas/CAP%CDTULO%203REV.htm>. Acesso em: 14 de setembro de 2012.

PELLEGRINI, Claudio; SCOLA, Luis. **Geração de Potência**. São João Del-Rei: Universidade Federal de São João Del-Rei, 2005.

SANTIAGO, Cesar; BECKER, Gilson; KERN, Mário. **Regulador hidráulico de velocidade REV1H**. Curitiba: COPEL,2004. Relatório técnico.

SANTOS, Winderson. **Introdução a Programação com LabVIEW**. Curitiba: UTFPR,2009. Apostila.

SATO, Fujio. **Máquinas Síncronas: Noções Básicas dos Controles**. Campinas: Unicamp, 2004. 10p.

SOUZA, Z.; FUCHS, R.D.; SANTOS, A.H.M. **Centrais hidro e termelétricas**. São Paulo: Ed. Edegard Blucher, 1983.

VOITH. Disponível em: <http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-pelton-563.html>. Acesso em 15 de setembro de 2012.

APÊNDICE A

MANUAL DO USUÁRIO

SIMULADOR DE REGULADOR DE VELOCIDADE PARA TURBINAS HIDRÁULICAS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Autores: Danilo Cancela da Rocha

Felipe Maia Barbosa Oliveira

Mauricio Nardi

1. INTRODUÇÃO

O simulador foi desenvolvido com o objetivo de simular o funcionamento de um regulador de velocidade das turbinas hidráulicas Pelton, Francis e Kaplan de usinas hidrelétricas. O *software* utilizado para a elaboração do trabalho foi o *Labview* 2011.

A IHM do simulador representa em tempo real o funcionamento do regulador de velocidade de acordo com as ações executadas pelo usuário.

O software será distribuído no meio acadêmico, através de um instalador do programa executável, com o objetivo de auxiliar no aprendizado das matérias relacionadas à geração de energia elétrica e no treinamento de operadores em usinas hidrelétricas.

O usuário poderá simular as situações de partida da unidade geradora, parada da unidade geradora, controle de potência ativa, controle de frequência, controle de abertura e rejeição de carga, no regulador de velocidade das turbinas hidráulicas Francis, Kaplan e Pelton.

2. INSTALAÇÃO

O Simulador é um arquivo executável, pequeno (aproximadamente 140Mb) e de fácil instalação, sendo compatível com qualquer computador que tenha o sistema operacional Windows.

Os requisitos mínimos de Hardware para o funcionamento do simulador são:

- Processador de 866 MHz;
- 1GB de memória RAM;
- 140 Mb de espaço livre no disco rígido;
- Unidade de CD-ROM ou Entrada USB;
- Resolução da tela de 1024 x 768 píxeis.

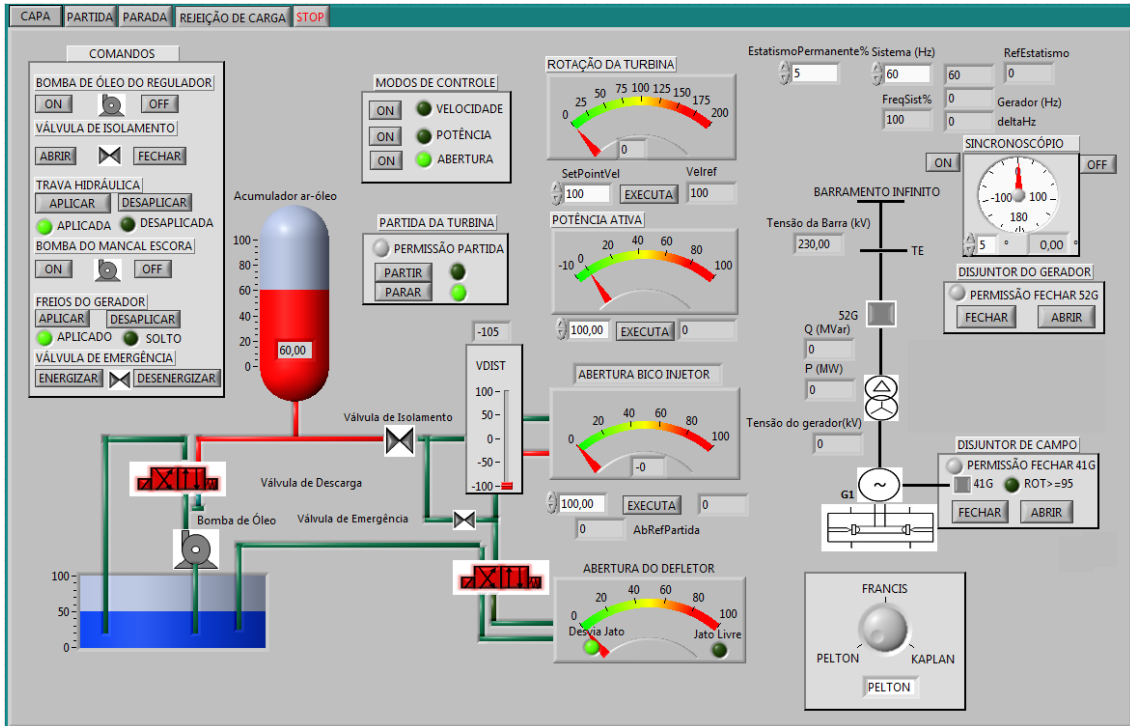
3. IHM DO SIMULADOR

Após a instalação do software, o usuário está apto a iniciar as atividades no simulador. Executando o aplicativo instalado no computador, o simulador começa na tela inicial que é a capa do trabalho, uma apresentação do projeto, que contém a informação sobre os autores e os professores orientadores.



Para iniciar a simulação o usuário deverá pressionar o “x” no canto superior direito da tela da capa, que irá alterar o simulador da tela de apresentação para a IHM do regulador de velocidade, onde será possível começar a simulação.

Para sair do programa o usuário deve clicar no botão “STOP” na parte superior da IHM.

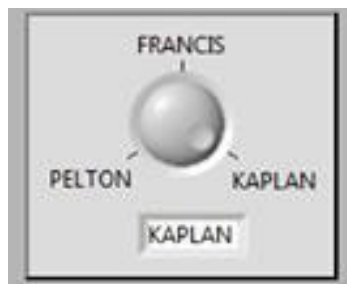


4. FUNCIONAMENTO

Como já citado anteriormente, o *software* pode simular as situações de:

- Partida da unidade geradora;
- Parada da unidade geradora;
- Rejeição de carga;
- Controle de potência ativa;
- Controle de abertura;
- Controle de velocidade.

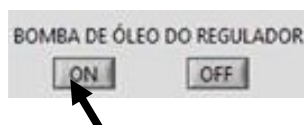
O simulador possui uma chave de seleção do tipo de turbina hidráulica para a simulação das situações previamente citadas. Pode-se alterar a turbina em qualquer momento da simulação, o que seria impossível em uma usina hidrelétrica, mas para fins didáticos essa característica é útil para verificar a diferença no funcionamento das turbinas hidráulicas Francis, Kaplan e Pelton.



I. PARTIDA DA UNIDADE GERADORA:

Para simular a partida da unidade geradora, o usuário deve executar uma sequência de operações, sendo elas:

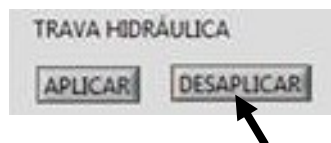
1. Ligar a Bomba de Óleo - : O acionamento da bomba de óleo conduz o óleo sem pressão até o acumulador de óleo sob pressão – onde é mantido com determinada pressão, que será utilizado nos processos seguintes para efetuar o movimento do servomotor. Pressionar o botão “BOMBA DE ÓLEO DO REGULADOR-ON”.



2. Abrir Válvula de Isolamento - permite que o óleo com pressão seja liberado para válvula distribuidora acionar o servomotor e outras partes do circuito hidráulico de regulação. É válido ressaltar de que existe um tempo de resposta para abrir a válvula de isolamento de 5 segundos conforme ocorre durante a partida de uma unidade geradora. Pressionar o botão “VÁLVULA DE ISOLAMENTO – ABRIR”.



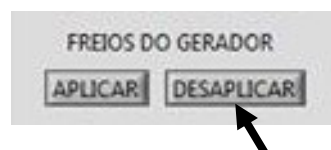
3. Desaplicar Trava Hidráulica - executa o desbloqueio do servomotor para permitir o funcionamento dinâmico do sistema. Pressionar o botão TRAVA HIDRÁULICA - DESAPLICAR.



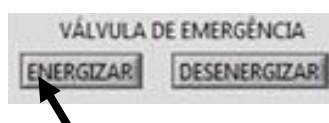
4. Ligar Bomba do mancal escora – permite a lubrificação do mancal escora. Pressionar o botão BOMBA DO MANCAL ESCORA-ON



5. Soltar freios do gerador - permite o movimento da turbina hidráulica. Pressionar o botão FREIOS DO GERADOR-DESAPLICAR.



6. Energizar Eletroválvula de emergência –:executar o desbloqueio hidráulico do regulador de velocidade de forma a permitir a partida máquina. Pressionar o botão VÁLVULA DE EMERGÊNCIA – ENERGIZAR.



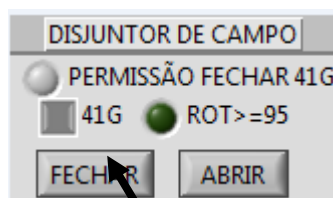
Durante o processo de partida da turbina a bomba de óleo permanece ligada. Com a válvula de descarga energizada a bomba fornece óleo com pressão para o acionamento hidráulico e reposição do nível de óleo no acumulador. Com a válvula de descarga desenergizada esta direciona o óleo para o circuito de baixa pressão para resfriamento através de um trocador de calor água-óleo. O movimento desta válvula é feito automaticamente pelo simulador.

7. Partida da Turbina – Depois de realizadas as etapas anteriores pressionar o botão PARTIDA DA TURBINA – PARTIR.



Aguardar a rotação nominal de a turbina hidráulica estabilizar em 100% para ter condições de fechar o disjuntor de campo.

8. Fechar Disjuntor do Campo – Após a rotação nominal atingir um valor superior a 95%, deve-se fechar o disjuntor de campo, cuja função é ligar o sistema de excitação para produzir tensão nos terminais do gerador elétrico acoplado mecanicamente ao eixo da turbina. Clicar no botão DISJUNTOR DE CAMPO FECHAR



9. Fechar Disjuntor do Gerador (Sincronização com o SEP)

Após o fechamento do disjuntor de campo, com a tensão nominal nos terminais do gerador, o simulador mostrará, através de um sincronoscópio, a diferença de frequência da unidade geradora e da rede (SEP) através da movimentação de seu ponteiro indicador e a diferença angular entre a tensão do gerador e a tensão da rede (SEP). A condição ideal de sincronismo do gerador com o SEP é a referida diferença angular em zero e movimentação lenta do ponteiro do sincronoscópio (diferença de frequência entre o gerador e o SEP na ordem de 0,01Hz). Com as condições de sincronismo atingidas, o

sincronoscópio mostrará a informação “PERMISSÃO PARA FECHAR O DISJUNTOR 52G”, quando então pode ser dado o comando de fechar o disjuntor 52G. Pressionar o botão DISJUNTOR DO GERADOR-FECHAR.



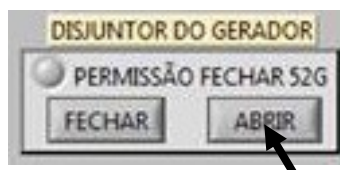
II. PARADA DA UNIDADE GERADORA

Após realizada a sequência de comandos para a partida da unidade geradora haverá condições de simular sua parada, executando um passo a passo de comandos hidráulicos e eletrônicos:

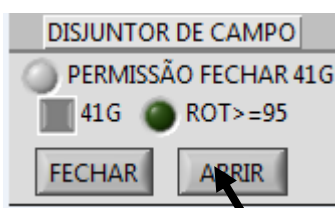
- v) **Reduzir carga ativa para zero:** deve-se retirar a carga ativa até um valor próximo de zero para iniciar o seqüenciamento de parada. Estando o modo de controle de potência acionado, inserir o valor “0” no campo da potência de referência e pressionar o botão “executa”.



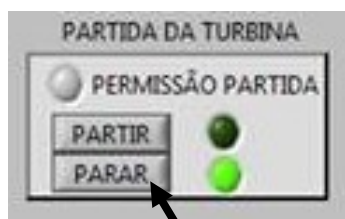
- 1) **Abrir disjuntor do gerador:** após atingido o valor de carga ativa nula o disjuntor do gerador poderá ser aberto. Pressionar o botão “DISJUNTOR DO GERADOR-ABRIR”.



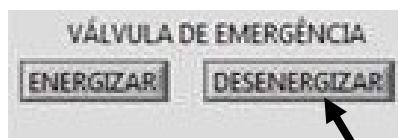
- VI) **Abrir disjuntor do campo:** com o disjuntor do gerador aberto, pode-se comandar a abertura do disjuntor de campo, o que reduz a tensão do gerador ao valor zero (desexcitação do gerador). Clicar em “DISJUNTOR DE CAMPO – ABRIR”.



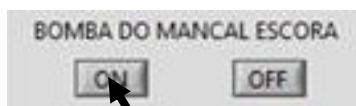
- VII) **Parar a turbina:** realiza o fechamento do distribuidor ou bico injetor da turbina hidráulica e conseqüente redução da velocidade até seu valor nulo (unidade geradora parada). Clicar no botão “PARAR”.



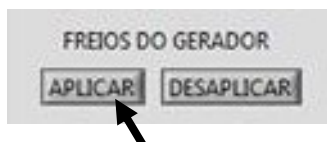
- 2) **Desligar válvula de emergência:** este comando provoca o deslocamento da válvula distribuidora para posição de fechamento hidráulico do distribuidor, ou bico injetor e defletor, para desviar o jato, na turbina Pelton. Clicar no botão “VÁLVULA DE EMERGENCIA – DESENERGIZAR”.



- 3) **Ligar bomba mancal escora:** quando a rotação atingir o valor de 70% do valor nominal automaticamente é ligada a bomba do mancal escora para lubrificação forçada do mancal na parada da unidade geradora. Pressionar o Botão “BOMBA MANCAL ESCORA – OFF”.



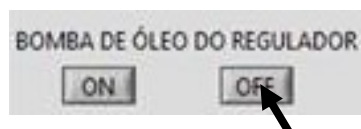
- 4) **Aplicar freios do gerador:** O freio é aplicado automaticamente quando a rotação do eixo atingi o valor de 30% da rotação nominal.Pressionar o Botão “FREIOS DO GERADOR- APLICAR”.



- 5) **Desligar bomba mancal escora:** quando chega-se na rotação nula é desligada a bomba do mancal escora pois a máquina encontra-se em repouso. Pressionar o Botão MANCAL ESCORA – OFF.

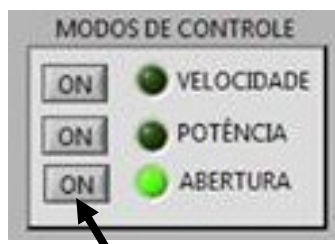


- 6) **Soltar o freio:** No estado estático da máquina pode-se soltar o freio para posteriormente permitir futuras partidas. Pressionar o Botão FREIOS DO GERADOR – DESAPLICAR.
- 7) **Desligar bomba de óleo:** Cessa-se a produção de óleo pressurizado do sistema pois este encontra-se desligado. Pressionar o botão BOMBA DE ÓLEO DO REGULADOR OFF



3- CONTROLE DA ABERTURA DO DISTRIBUIDOR

Com a unidade em operação selecionar o modo de controle abertura, pressionando o botão MODO DE CONTROLE – ABERTURA ON.



Inserir o valor de referência de abertura do distribuidor que deseja simular no campo ABREF.



4- CONTROLE DA POTÊNCIA ATIVA

Com a unidade em operação pressionar o botão MODO DE CONTROLE – POTÊNCIA ON.



E inserir no campo POTREF o valor de potência ativa que deseja simular a regulação.



5- CONTROLE DE VELOCIDADE

Com a unidade operando selecionar o modo de regulação de velocidade pressionando o botão MODO DE CONTROLE – VELOCIDADE ON e determinar no campo Velocidade de referência a velocidade de rotação que deseja operar sua unidade geradora.



6- REJEIÇÃO DE CARGA

Esse caso é simulado com a abertura manual do disjuntor do gerador, quando a unidade geradora estiver em operação com potência ativa positiva (o pior caso é potência ativa igual a 100) e a análise do comportamento dos indicadores. O usuário deverá pressionar o botão DISJUNTOR DO GERADOR – ABRIR. Com a abertura do disjuntor do gerador a potência ativa será zerada e ocorre a sobrevelocidade da turbina hidráulica devido a essa rejeição de carga.

O regulador de velocidade atua de forma a buscar estabilizar a rotação da turbina hidráulica na rotação nominal e o usuário tem a opção de parar a unidade geradora ou fechar o disjuntor do gerador e colocar em sincronismo com o sistema elétrico de potência novamente.

