



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMACAÇÃO – CECAU



JONATHAN ALVES MELQUIADES

ESTUDO DE CASO DE COMISSONAMENTO:

PAINEL REGULADOR INTEGRADO DE TENSÃO, VELOCIDADE E
AUTOMAÇÃO DA REIVAX INSTALADO NA PEQUENA CENTRAL
HIDRELÉTRICA DE CABOCLO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto – MG, 2017

JONATHAN ALVES MELQUIADES

ESTUDO DE CASO DE COMISSONAMENTO:
PAINEL REGULADOR INTEGRADO DE TENSÃO, VELOCIDADE E AUTOMAÇÃO
DA REIVAX INSTALADO NA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA DE CABOCLO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Ouro Preto – MG

Escola de Minas – UFOP

Maiο 2017

M528e Melquiades, Jonathan Alves.
Estudo de caso de Comissionamento [manuscrito]: Painei regulador integrado de tensão, velocidade e automação da Reivax instalado na Pequena Central Hidrelétrica de Caboclo / Jonathan Alves Melquiades. - 2017.

156f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Usina Hidrelétrica - Comissionamento. 2. Reguladores (Maquinas) - Tensão. 3. Reguladores (Maquinas) - Velocidade. I. Monteiro, Paulo Marcos de Barros. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

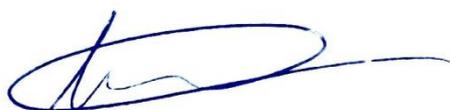
CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 26 de maio de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva – Professor Convidado



Prof. Dr. Washington Luis Vieira da Silva – Professor Convidado



Tiago Nascimento – Engenheiro Convidado

AGRADECIMENTOS

Pela realização desse trabalho sou grato à Escola de Minas pelo ensino de qualidade e suporte acadêmico. À Veralice Maciel e João Paulo Simim pelo apoio e incentivo. Ao Júlio Cesar Baptista e Cristiano Burker, ambos sempre muito prestativos e dispostos a ajudar, pelo suporte técnico em relação aos equipamentos da Reivax. Ao Tiago Nascimento (CEI) e Tales Melo (BEI) pelo apoio, suporte técnico e incentivo para realização desse trabalho. E à Maynard por permitir o acompanhamento e acesso a todos documentos necessários para conclusão dessa monografia.

RESUMO

Em fevereiro de 2015, a Companhia Energética Integrada (CEI) adquiriu a propriedade das pequenas centrais hidrelétricas (PCH) situadas no distrito de Santo Antônio do Salto em Ouro Preto – MG. Entre estas, se encontra a PCH de Caboclo, que logo após ser incorporada ao grupo CEI através da empresa Maynard Energética, passa por uma modernização de suas instalações sendo o principal investimento na automação de suas unidades geradoras de energia. A abordagem desta monografia se dá através dos amplos princípios e conceito teóricos de comissionamento, com foco no estudo do enquadramento do caso da PCH de Caboclo seguido pela documentação e relatório do que foi realizado nesta usina através de formulário de liberação, certificados de conclusão mecânica, data-book de construção, passagens de custódia e etc. Além disso, o trabalho se aprofunda mais especificamente no estudo do comissionamento do painel Regulador Integrado de Tensão, Velocidade e Automação (RTVAX) da Reivax abordando um conceito teórico funcional, resultados esperados e descrição e relato real do trabalho desenvolvido.

Palavras Chave: Pequena central hidrelétrica, PCH, Comissionamento, usina de Caboclo, regulador de tensão, regulador de velocidade, RTVAX.

ABSTRACT

In February 2015, Companhia Energética Integrada (CEI) acquired ownership of the small hydroelectric plants, located in the district of Santo Antônio do Salto in Ouro Preto - MG. Among these is the hydroelectric Caboclo which, shortly after being incorporated into the CEI group through the company Maynard Energética, is undergoing a modernization, being the main investment in the automation their generating units. The approach of this monograph is based on the broad principles and theoretical concepts of commissioning, focusing on the study of the framework of the case of the hydroelectric Caboclo, followed by the documentation and report of what was accomplished in this plant through a release form, certificates of mechanical completeness, Data-building book, custody tickets and etc. In addition, the work goes deeper into the commissioning study of Reivax's Integrated Voltage, Speed and Automation Regulator (RTVAX) panel, addressing a theoretical functional concept, expected results and a description and actual report of the work developed.

Keywords: Small hydroelectric plant, PCH, Commissioning, Caboclo, voltage regulator, speed regulator, RTVAX.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de geração de energia elétrica até o consumidor final	19
Figura 2 - Corte longitudinal esquemático de uma PCH e seus principais componentes	20
Figura 3 - Casa de força de uma PCH em corte lateral	23
Figura 4 - Planta da PCH da figura 3.....	23
Figura 5 - Componentes de uma Unidade Geradora de eixo horizontal	25
Figura 6 - Representação detalhada do conjunto de componentes de uma turbina Francis de eixo horizontal	27
Figura 7 - Esquema básico de um TC à esquerda e um TP à direita.....	30
Figura 8 - Planejamento do comissionamento.....	37
Figura 9 - Documentação de completção mecânica e handover para o comissionamento....	38
Figura 10 - Planejamento do comissionamento no ciclo de vida do projeto.....	42
Figura 11 - Modelo do processo de comissionamento	42
Figura 12 - Encerramento do comissionamento e <i>startup</i> para projetos da Vale.....	44
Figura 13 - Foto de satélite da localização da PCH.....	46
Figura 14 - Válvula da BRC	47
Figura 15 - Casa de força da usina de Salto	48
Figura 16 - Casa de força da usina de Funil/Prazeres.....	48
Figura 17 - Subestação de Caboclo	49
Figura 18- Canal de Caboclo com a casa do limpador de grade ao fundo	50
Figura 19 - Areeiro do canal.....	51
Figura 20 - Vertedouro do canal.....	51
Figura 21 - Casa de força da PCH Caboclo.....	53
Figura 22 - Gerador da UG2.....	53
Figura 23 - Turbina da UG2	54
Figura 24 - Grupo de empresas do <i>holding</i> CEI.....	55

Figura 25 - TC antigo à esquerda e TC novo à direita.....	57
Figura 26 - TP antigo à esquerda e TP novo à direita.....	58
Figura 27 - Piso recortado para acesso e troca da válvula de adução acima; abaixo válvulas gaveta antigas retiradas do conduto.....	60
Figura 28 - Acima visão da válvula borboleta nova instalada e adaptações para a válvula by-pass abaixo cilindro de atuação na válvula borboleta e flange de adaptação soldado.....	62
Figura 29 - TC's e TP's de proteção e medição novos instalados.....	64
Figura 30 - Painel de controle PC02 antigo à esquerda e PC02 novo à direita.....	65
Figura 31 - Malha de controle do regulador de velocidade.....	81
Figura 32 - Parâmetros da Malha de Controle do Atuador.....	82
Figura 33 - Partida Automática – Posição de abertura do atuador.....	86
Figura 34 - Partida Automática - Evolução da rotação em frequência.....	86
Figura 35 - Malha de Controle de Velocidade.....	89
Figura 36 - Circuito de Potência da Regulação de Tensão.....	91
Figura 37 - Medição da Corrente de Campo.....	92
Figura 38 - Medição da tensão de Campo.....	93
Figura 39 - Saída da pré-excitação.....	95
Figura 40- Excitação parcial para $V_t=0,45pu$	96
Figura 41 - Excitação automático.....	97
Figura 42 - Registros de tensão de uma desexcitação.....	97
Figura 43 - Registros de corrente de campo de uma desexcitação.....	98
Figura 44 - Malha de Controle de Tensão e Controle de Corrente.....	101
Figura 45 - Malha de Controle do Limitador de V / Hertz.....	103
Figura 46 - Curvas de excitação de geradores.....	104
Figura 47 - Malha de Controle de Velocidade / Potência.....	107
Figura 48- Regulação das barras de alta e baixa.....	109
Figura 49 - Malha de Controle de Tensão, Controle de Corrente e Reativo.....	110

Figura 50 - Curva de Capabilidade de um Gerador.....	111
Figura 51 - Curva de capabilidade mostrando a linha de atuação do LSE.....	114
Figura 52 - Diagrama de blocos do LSE	114
Figura 53 - Diagrama de blocos do Limitador de Corrente de Campo	116
Figura 54 - Limitador de Mínima Corrente de Campo.....	117
Figura 55- Limitador de Corrente Estatórica.....	118
Figura 56 - Malha de Controle do ESP	120
Figura 57 - Análise de Rejeição de Carga	123
Figura 58 - Resposta da posição do distribuidor à sequencia degraus 10%	127
Figura 59 - Resposta do sinal de controle do distribuidor à sequencia degraus 10%.....	127
Figura 60 - Partida automática	128
Figura 61 - Ajuste da malha de velocidade – Resposta ao degrau de 3%	128
Figura 62 - Comutação de medição de velocidade TP – Pickup1- Pickup2-TP	129
Figura 63 - Rampeamento da corrente de campo da Excitação em modo manual.....	130
Figura 64 - Rampeamento da tensão terminal da Excitação em modo manual.....	130
Figura 65 - Desexcitação em controle manua	131
Figura 66 - Controle de tensão terminal resposta ao degrau de 3%	132
Figura 67 - Controle de corrente de campo em resposta ao degrau de 3%	132
Figura 68 - Atuação do limitador V/Hertz.....	133
Figura 69 - Atuação do Limitador LCC	134
Figura 70 - Comutações dos modos de controle	134
Figura 71 – Sincronismo	135
Figura 72 - Rejeição de carga com 25% de potência, 6,2% de sobrevelocidade e 19,59s de tempo de reestabelecimento.....	135
Figura 73 - Rejeição de carga com 75% de potência, 29,9% de sobrevelocidade e 53,8s de tempo de reestabelecimento.....	136

Figura 74 - Ajuste dinâmico, resposta ao degrau 5%, tempo de subida de 3,05s, referência inicial 0,7 e final 0,75.....	136
Figura 75 - Ajuste da dinâmica do controle de potência – Rampa de tomada de carga (posição do distribuidor).....	137
Figura 76 - Ajuste da dinâmica do controle de potência – Rampa de retirada de carga (posição do distribuidor).....	137
Figura 77 - Controle de tensão terminal: resposta ao degrau de 2%, referência inicial 90,7%, overshoot 0%, tempo de subida 2,03s e erro em regime 0,21%	138
Figura 78 - Controle de corrente de campo resposta ao degrau de 10%, referência inicial 70%, overshoot 10,63%, tempo de subida de 509ms, e erro em regime 0,25%	139
Figura 79 - Atuação do limitador LCE	140
Figura 80 - Atuação do limitador LSE.....	140
Figura 81 - Comutação de modo de controle	141
Figura 82 - Ajuste dinâmico relativo.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Característica técnicas dos transformadores	49
Tabela 2 - Característica técnicas do gerador e da excitatriz	52
Tabela 3 - Valores típicos para a malha de controle de velocidade	90
Tabela 4 - Parâmetros que ajustam a pré-excitação	94
Tabela 5 - Parâmetros para esta excitação gradativa	96
Tabela 6 - Parâmetros para esta automática total	97
Tabela 7 - Parâmetros para ajuste da Malha de Excitatriz Rotativa	101
Tabela 8 - Parâmetros ajustáveis do Limitador de V / Hertz	103
Tabela 9 - Faixas de valores típicos para a malha de controle de velocidade	108
Tabela 10 - Parâmetros para ajuste da dinâmica do controle de Tensão e o Controle de Corrente	110
Tabela 11 - Parâmetros para ajuste da dinâmica do controle de Tensão e o Controle de Corrente com excitatriz rotativa	111
Tabela 12 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Mínima	115
Tabela 13 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Corrente de Campo	116
Tabela 14 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Mínima	117
Tabela 15 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Corrente Estatórica	119
Tabela 16 - Status da saída analógicas gerado no relatório de comissionamento	126
Tabela 17 - Controle de Posição do Distribuidor	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AZM	Anti Zona Morta
ABNT	Associação Brasileiras de Normas Técnicas
BRC	Barragem Ribeirão da Cachoeira
BEI	Brasil Engenharia Inteligente
CPX	Central de Processamento Reivax
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CPU	Central Processing Unit - Unidade Central de Processamento
COG	Centro de Operação de Geração
CEI	Companhia Energética Integrada
CCR	Compensação de Reativo
CCR	Compensador e Corrente Rativa
PI	Compensador Proporcional Integral
PID	Controle Proporcional, Integral e Derivativo
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Ic	Corrente de Campo
DdB	Decibés
DRV	Driver de potência
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESP	Estabilizador de Sistema de Potência
FEL	Front End Loading
Kcr	Ganho de compensação de corrente reativa
Kd	Ganho derivativo da malha
Ki	Ganho integral da malha
Kp	Ganho proporcional da malha
Kac	Ganho proporcional da malha de carga
Kec	Ganho proporcional de controle de corrente
Kq	Ganho proporcional de controle reativo
Gep(jw)	Ganhos do controlador de tensão no domínio de Laplace
G.E.	General Electric
HZ	Hertz
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor - Transistor bipolar de porta isolada

IHM	Interface Homem Máquina
LCE	Limitador Corrente Estatórica (Máxima)
LCC	Limitador de Corrente de Campo (Limitador de Sobreexcitação)
LSE	Limitador de Mínima Excitação (Limitador de Subexcitação)
Li	Limite inferior do ganho de integração
Ls	Limite superior do ganho de integração
MTBF	Mean Time Between Failures - Tempo Médio entre Falhas.
MG	Minas Gerais
NOK	Não ok
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
pu	Percentual de Unidade
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram - Diagrama de instrumentação e tubulação
PLC	Programmable Logic Controller
PLC AUX	Programmable Logic Controller Auxiliar
PL	Punch List
QDI	Quadro de Distribuição Interno
Ref	Referência
RTVAX	Regulação integrado de tensão, velocidade e automação
RT	Regulador de Tensão
RTX	Regulador de Tensão Reivax
RVX	Regulador de Velocidade Reivax
RTVX	Regulador integrado de Tensão e Velocidade Reivax
RPM	Rotações por Minuto
SE	Sobrevelocidade
SE	Subestação
Tf	Tempo de fechamento do servomotor
Tmrv	Tempo morto do regulador de velocidade
Trv	Tempo para reestabelcimento
Vt	Tensão Terminal
TAF	Termo de Aceite Final
TAP	Termo de Aceite Provisório
TC	Tranformador de Corrente
T77	Transformador 77
T78	Transformador 78
TP	Transformador de Potencial

TH	Turbina Hidraulica
UG	Unidade Geradora
UH	Unidade Hidráulica
USA	United States of American
UHE	Usina Hidrelétrica
VPN	Virtual Private Network - Rede Particular Virtual
Vca	Volts em Corrente Alternada
Vcc	Volts em Corrente Contínua
xq	Reatância de eixo em quadratura da máquina
xd	Reatância Síncrona de Eixo Direto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivo	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Metodologia	17
1.4	Estrutura do trabalho.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Comissionamento	19
2.2	Centrais hidrelétricas.	19
2.3	Partes de uma PCH	20
2.4	Modernização e automação de PCH.....	32
3	COMISSIONAMENTO	35
3.1	Conceituação.....	35
3.2	Sistemas e subsistemas	35
3.3	Fases ou etapas do comissionamento	36
4	PCH CABOCLO	45
4.1	Histórico	45
4.2	Localização	45
4.3	Descrição da casa de força.....	48
4.4	<i> Holding CEI - Maynard</i>	54
5	RETROFIT PCH CABOCLO	57
5.1	Projeto descritivo de automação e <i>retrofit</i>	57
5.2	O painel RTVAX	69
6	MANUAL DE COMISSIONAMENTO DO PAINEL RTVAX.....	73
6.1	Informações gerais.....	74
6.2	Verificações iniciais.....	75
6.3	Ensaio de água morta	77
6.4	Ensaio dinâmico à vazio do regulador de tensão/corrente;	84
6.5	Ensaio em carga	106
7	RELATORIO DE RESULTADOS DE COMISSIONAMENTO DO RTVAX	125
7.1	Responsáveis.....	125
7.2	Período	125
7.3	Relatório de Resultados de Comissionamento	125

8	CONCLUSÃO	143
9	BIBLIOGRAFIA.....	145
	ANEXOS	147

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo a elucidação dos conceitos e princípios básicos de comissionamento que visem garantir os padrões de segurança e de confiabilidade de equipamentos complexos. E, ainda aborda de forma mais aprofundada o estudo do caso específico do comissionamento de painéis reguladores de tensão, velocidade e automação em PCH's; apresentando as rotinas de testes e parametrização do painel RTVAX, relatório de resultados de comissionamento e comentários acerca dos procedimentos adotados. E também do atendimento as especificações do equipamento para garantia de atendimento aos requisitos operacionais da PCH de Caboclo.

1.2 Justificativa

Devido a constante e crescente demanda de energia elétrica no Brasil e após a nova resolução do Congresso Nacional que, em 1995, viabilizou o retorno da iniciativa privada ao setor de geração de energia elétrica, as PCH's têm sido uma fonte segura de investimentos no país. Dessa forma, os estudos de viabilidade, construção e modernização de instalações já existentes se encontram em expansão.

Nesse interim, por ser uma área multidisciplinar, que interage com conceitos de mecânica, elétrica e automação, na qual são empregados equipamentos complexos, de alta tecnologia e alto valor agregado, faz-se necessário à garantia dos padrões de qualidade e confiança dos mesmos e, portanto, um bom comissionamento.

Apesar de ser uma prática antiga e um jargão bem conhecido do ramo naval, as práticas e aplicações dos conceitos de comissionamento são um pouco recentes e infelizmente carecem de um material técnico e confiável que aborde o assunto. Dessa forma, com o presente trabalho foi possível explanar o tema supracitado de forma que este interagisse com a aplicação prática do curso de Engenharia de Controle e Automação.

1.3 Metodologia

A pesquisa desse trabalho baseou-se em literaturas e artigos que abordam o tema, o estudo de procedimentos operacionais internos de indústrias consolidadas no mercado, manuais de operação e manutenção de equipamentos, instruções de fornecedores e fabricantes, normais do setor elétrico e em relatórios de comissionamento. Também foi utilizado como

metodologia o acompanhamento em campo do comissionamento do caso da PCH Caboclo, que o correu no final de 2016 e início de 2017.

Assim, o trabalho será aprofundado nos conceitos de comissionamento de usinas, a apresentação do caso do *retrofit* da PCH Caboclo, estudo do manual de comissionamento do RTVAX, descrição de alguns resultados do relatório de resultados de comissionamento do RTVAX e comentários finais acerca do comissionamento da PCH Caboclo e do painel RTVAX.

1.4 Estrutura do trabalho

O capítulo 1 apresenta o objetivo do texto, justificativa da temática, metodologia utilizada e estrutura da composição.

O Capítulo 2 aborda uma referência teórica sobre os principais temas abordados no trabalho.

O Capítulo 3 objetiva contribuir para o entendimento acerca do tema de comissionamento em projetos industriais e apresentar alternativas para o entendimento e a realização deste em projetos de modernização de PCH's.

O capítulo 4 retrata as características e especificações da PCH de Caboclo.

O capítulo 5 versa sobre a modernização da PCH de Caboclo e suas fases de comissionamento.

O capítulo 6 trata do painel regulador de tensão, velocidade e automação – RTVAX da Reivax implantado na unidade geradora 1 da usina.

O capítulo 7 expõe o como é feito o comissionamento do RTVAX, com descrição da metodologia de trabalho, testes realizados e resultados esperados.

O capítulo 8 descreve de como se deu o real comissionamento do painel, bem como as dificuldades encontradas e os resultados obtidos com o trabalho.

O capítulo 9 discorre uma breve conclusão da importância do serviço de comissionamento realizado no RTVAX.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Comissionamento

Conforme cita Brito (2008), o comissionamento é um conjunto estruturado de conhecimento, práticas e procedimentos aplicáveis a produtos complexos de engenharia que objetiva garantir a operabilidade do produto.

Mais especificamente no caso de centrais hidrelétricas, Souza (2009) define que o comissionamento tem por objetivo verificar se o que foi, por escrito, acordado entre a contratante e a contratada foi de fato cumprido.

Ainda, para Nascimento (2014), o comissionamento é considerado um dos melhores investimentos que possa ser realizado em projetos, pois vários desvios podem ser mitigados e evitados durante a implementação das fases.

2.2 Centrais hidrelétricas.

Centrais hidrelétricas são instalações cujo objetivo é o aproveitamento hídrico de cursos d'água para geração de energia elétrica. A regulamentação para exploração de recursos hídricos para geração de energia elétrica no Brasil é feito pela ANEEL.

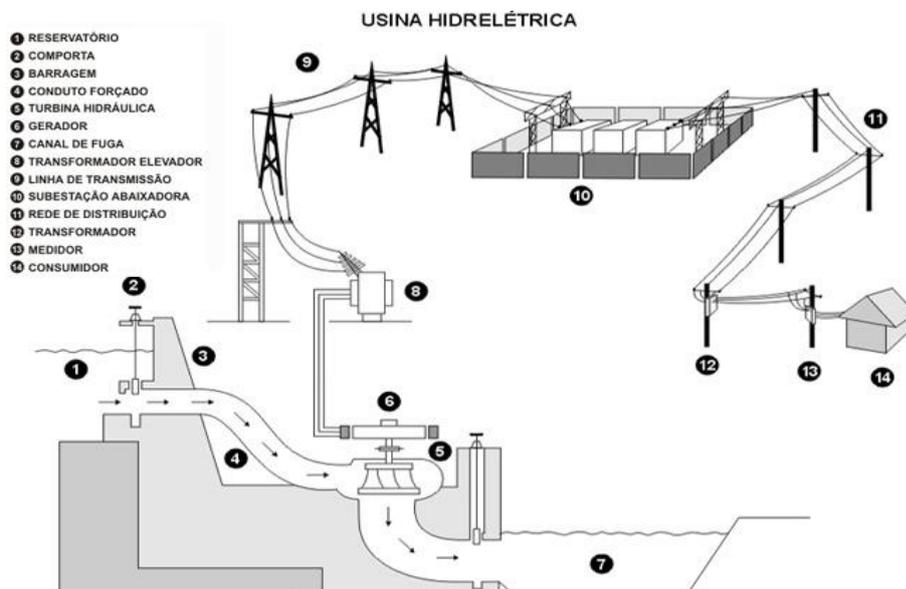


Figura 1 - Esquema de geração de energia elétrica até o consumidor final. Fonte: http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funciona.asp

De acordo com a resolução da ANEEL 673 de 4 de agosto de 2015 os empreendimentos hidrelétricos podem ser classificados quanto a sua capacidade instalada de geração de energia em:

- CGH (Central Geradora Hidrelétrica), potencial menos que 3000kW;
- PCH (Pequena Central Hidrelétrica), potencial maior que 3000kW e menor que 30000W;
- UHE (Usina Hidrelétrica), empreendimentos com potencial instalado maior que 30000kW.

2.3 Partes de uma PCH

Segundo Souza (2009), basicamente, existe três tipos de arranjos para as partes e arranjos de uma PCH: represamento, de desvio, de derivação ou combinação destes; unidade geradora de eixo vertical ou horizontal; e ainda tomada d'água afogada ou de superfície. A figura 2 ilustra um caso clássico de uma PCH de desvio, com eixo da unidade geradora horizontal e com tomada d'água de superfície, demonstrando os seus principais componentes que serão abordados com mais detalhes adiante.

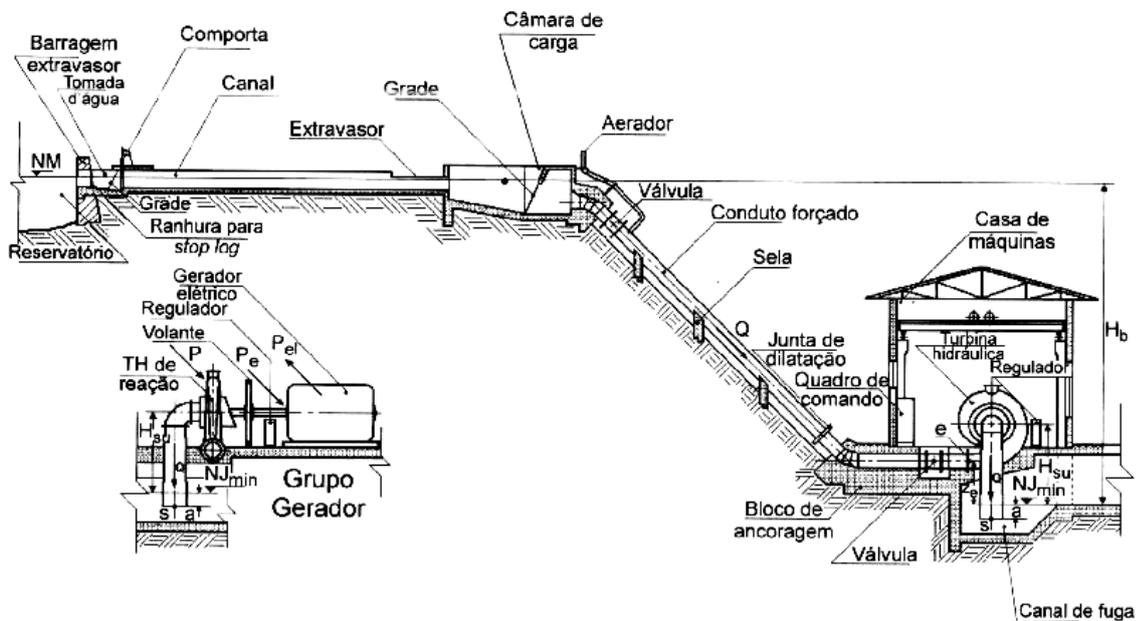


Figura 2 - Corte longitudinal esquemático de uma PCH e seus principais componentes. Fonte: Souza (2009)

2.3.1 Barragens e seus componentes

2.3.1.1 Reservatórios

Os reservatórios hidrelétricos, popularmente conhecidos como lago, são por definição os locais reservados para acúmulo da água utilizada na geração hidrelétrica. Conforme explica Souza (2009) as características dele são resultados naturais do barramento do curso d'água e da topografia a montante. Ainda, o volume útil do reservatório é dimensionado para se obter o controle da geração de energia, de forma a regularizar os ciclos de carga diário, semanal e mensal ou os ciclos hidrológicos anuais ou plurianuais.

2.3.1.2 Barragens

As barragens são obstáculos artificiais construídos no curso d'água com o intuito interromper, reduzir ou modificar este curso. Em usinas hidrelétricas as barragens tem por finalidade criar um desnível local, denominados nível a montante como a cota antes do barramento e nível a jusante após o barramento (geralmente após a passagem pelas unidades geradoras). Além dessa função as barragens podem ser do tipo desvio, ou seja, não tem por finalidade gerar um desnível e sim conduzir o curso d'água para um local específico, normalmente um canal ou conduto de baixa pressão.

Segundo Souza (2009), vertedouro ou extravasor é uma obra projetada e construída com o objetivo de escoar o excesso de água acumulada pelo reservatório durante grandes cheias do curso de água.

Associado às barragens é comum encontrarmos o conjunto de tomada d'água. Em Souza (2009), é descrito que esse conjunto é destinado a captar a água necessária para o funcionamento da unidade geradora, a qual deve conter dispositivos para eliminar e reter o material sólido do curso d'água que poderia danificar as turbinas hidrelétricas.

Um dos dispositivos utilizados para conter os materiais sólidos do curso de água é a grade da tomada d'água. O principal componente da grade é o limpador de grade, que pode ser de uso manual, geralmente utilizado em tomadas d'água de superfície e mecanizado para as demais.

Outro dispositivo do barramento de água são as comportas, que são dispositivos mecânicos para controle da vazão de entradas no sistema de baixa pressão.

2.3.1.3 Sistemas de baixa e alta pressão

Os sistemas de baixa pressão, também conhecidos como sistemas de adução, tem por finalidade transportar a água captada na barragem até a casa de força. São caracterizados por

apresentarem pressões relativamente menores, se comparadas às de trabalho da unidade geradora. Os sistemas de baixa pressão são basicamente formados por: canal e câmara de carga a céu aberto, galeria e câmara de carga a céu aberto, conduto de baixa pressão e chaminé de equilíbrio, túnel e chaminé de equilíbrio ou a combinação destes.

De acordo com Souza (2009), os canais são caracterizados pelo escoamento ter uma superfície livre onde a pressão atuante seja a atmosférica, sendo o movimento de água nele provocado pela diferença de cotas entre os pontos de calha.

No sistema de adução por canais, logo antes da câmara de descarga, são projetados regiões onde o escoamento da água possa ser mais lento, de forma que os sedimentos em suspensão possam sedimentar e posteriormente retirados. Essas regiões são denominadas desarenador ou areeiro.

A câmara de carga, popularmente conhecida como castelo, é a estrutura responsável por fazer a interligação do canal com o conduto forçado. Devem ser dimensionadas para suprir as necessidades de trabalho das turbinas, que apresentam pontos críticos de operação no momento de parada e partida brusca.

Os condutos forçados são tubulações destinadas a interligar o sistema de adução à caixa espiral (caracol) das unidades geradoras. Podem ser instalados a céu aberto ou enterrados. Trabalham sob pressões mais elevadas, se comparados ao sistema de baixa pressão, por isso exigem mais manutenção quanto às juntas de dilatação.

2.3.2 Casa de força

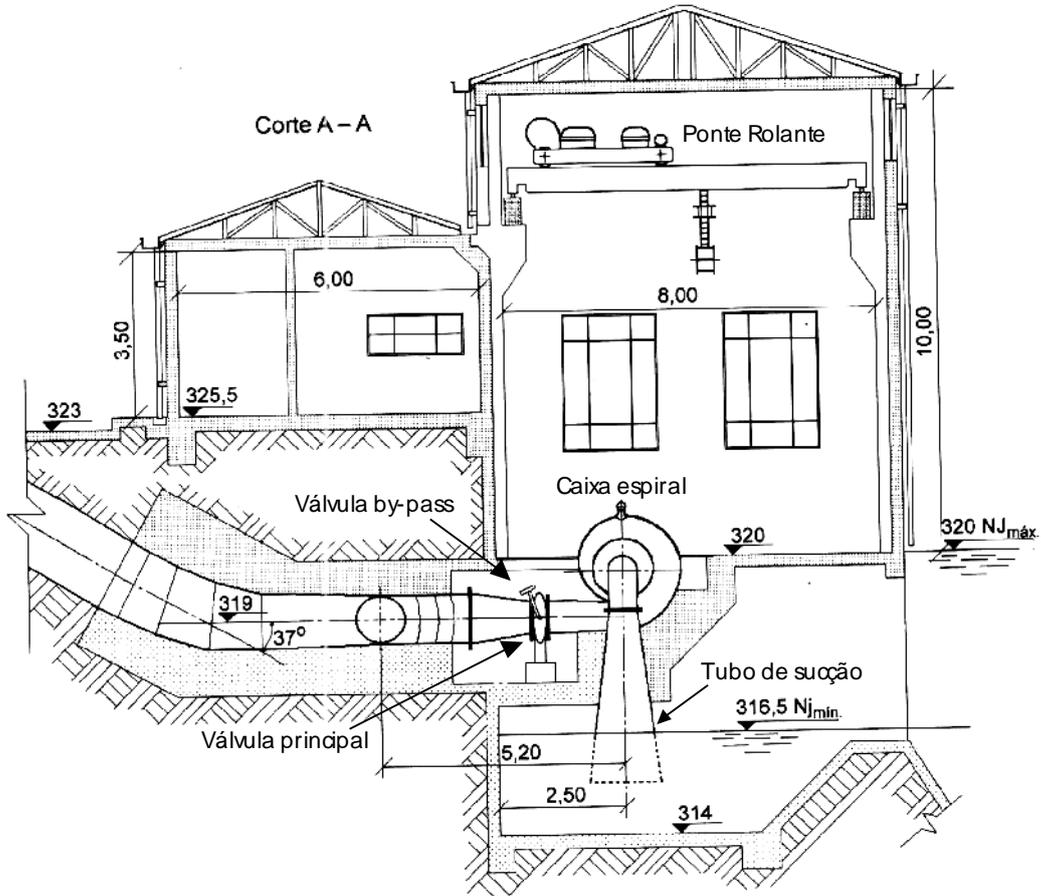


Figura 3 - Casa de força de uma PCH em corte lateral. Fonte: adaptado Souza (2009)

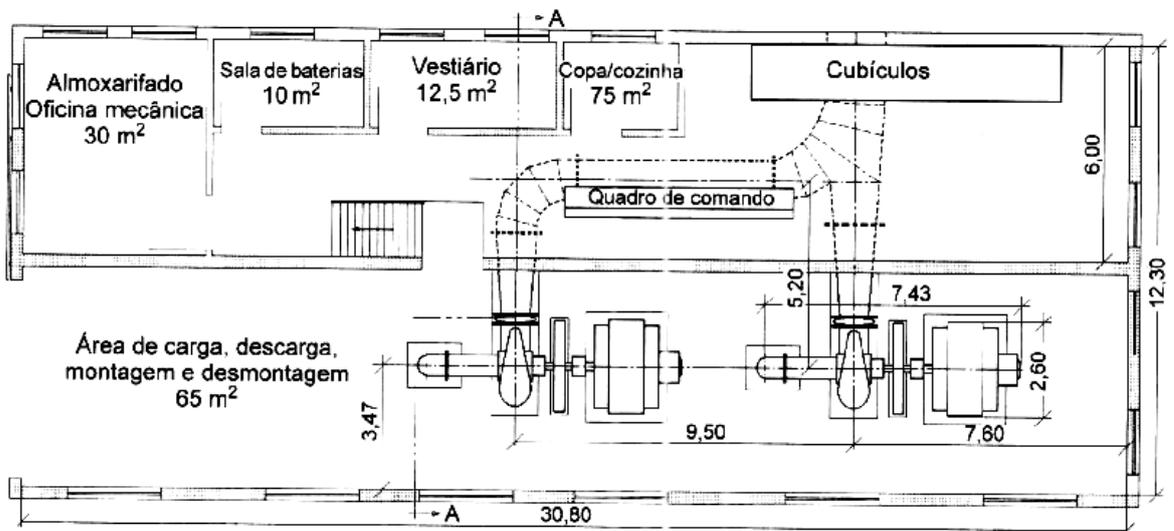


Figura 4 - Planta da PCH da figura 3. Fonte: Souza (2009)

As figuras 3 e 4 ilustram uma representação clássica de uma casa de força, ou casa de máquinas, de uma PCH com duas máquinas geradoras. Nelas também são indicados os principais componentes, os quais serão mais bem abordados a diante.

2.3.2.1 Caixa espiral ou caracol

A caixa espiral é o elemento semi-final por onde a água passa antes de entrar de fato no rotor da turbina. Tem como principal função promover um escoamento potencial circular ao fluido que acionará a turbina.

2.3.2.2 Válvula principal

Segundo Souza (2009), as válvulas hidráulicas possuem como função interromper ou regular a vazão ou pressão em dutos. A válvula principal da unidade geradora é utilizada como válvula de bloqueio, isto é, opera totalmente aberta ou totalmente fechada. Geralmente são usadas válvulas borboletas, de acionamento mais rápido e automático, ou gavetas, mais lentas e de acionamento manual. Possui a finalidade de finalizar ou permitir o escoamento de água pela turbina.

2.3.2.3 Válvula by-pass

Para evitar fortes golpes na caixa espiral, ao se abrir a válvula principal é usada uma válvula secundária, de menor vazão e em paralelo com esta, para se equalizar as pressões no final do conduto forçado e na caixa espiral. Tal válvula é comumente conhecida como by-pass. Sua atuação faz parte da sequência de partida da máquina sempre que esta estiver vazia.

2.3.2.4 Unidade Geradora - UG

Os grupos geradores são o coração das usinas uma vez que respondem diretamente, pelas transformações e qualidades das energias, pela estabilidade e segurança operacional dos sistemas que conduzem e suportam as massas energéticas, além de ser o ponto de partida para o dimensionamento físico da casa de força e de todos os pertences utilizados na montagem, operação e manutenção. (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009, p. 309)

Portanto, será dado destaque especial a UG usada em PCH's, composta principalmente por equipamentos hidromecânicos, elétricos e componentes auxiliares.

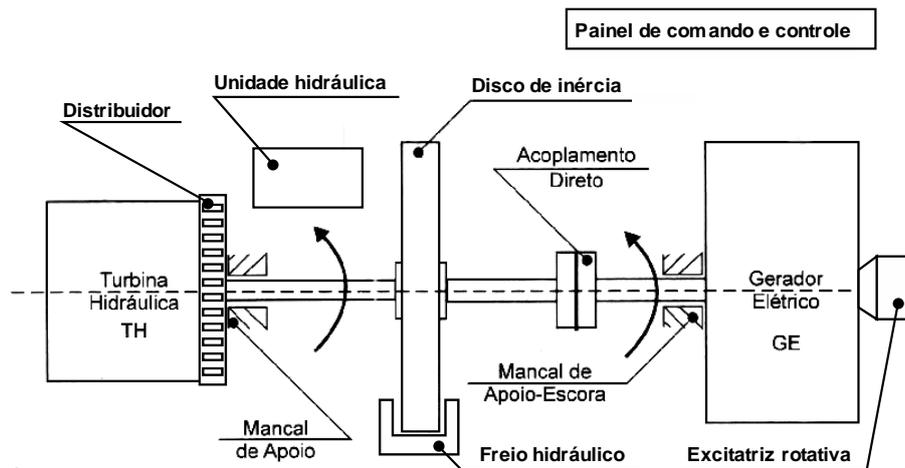


Figura 5 - Componentes de uma Unidade Geradora de eixo horizontal. Fonte: Adaptado Souza (2009)

2.3.2.5 Equipamentos mecânicos e hidromecânicos

2.3.2.5.1 Turbina hidráulica

Para a ABNT as TH podem ser de ação, que são as que o escoamento através do rotor ocorre sem a variação de pressão estática, e de reação, que são as que o escoamento através do rotor ocorre com variação da pressão estática. O rotor é diretamente ligado ao eixo da turbina, que é apoiado sobre mancais também é ligado a outros componentes da UG.

As TH mais utilizadas são as de reação denominadas Francis. Segundo Souza (2009), podem ser aplicadas para usinas com quedas que variam de 8m à 600m, com potências que podem chegar até 850MW.

2.3.2.5.2 Distribuidor

Conforme Rocha (2013) explica, na operação da turbina Francis, a água passa pelas pás diretrizes guiando o fluido líquido em um ângulo específico para a entrada nas pás do rotor, deixando-o axialmente em relação ao eixo.

O conjunto das pás diretrizes é chamado de distribuído, caminho pelo qual a água, proveniente da caixa espiral, passa e por onde ela deve passar antes de chegar ao rotor da TH. O controle das pás diretrizes é feito pelo regulador de velocidade, que através de um servomotor ajusta a sua abertura e assim regula a vazão de água no rotor conforme a carga desejada.

2.3.2.5.3 Disco de inércia e freio

O disco de inércia ou volante é diretamente ligado ao eixo da turbina. Geralmente são utilizados em unidades geradoras de menor capacidade e ajudam o regulador de velocidade para garantir uma regulação e velocidade de rotação estável.

É comum que em PCH's mais modernas seja acoplado ao disco de inércia freios hidráulicos, que tornam a parada da máquina menos lenta e são usados como mecanismos de intertravamento.

2.3.2.5.4 Mancais

A função dos mancais é de servir de suporte e apoio para ao eixo da UG. Os mancais são componentes de máquinas que estão sujeitas às forças de atrito, e essas forças acontecem por causa da rotação dos eixos que irão exercer cargas neles. Por isso, exigem um constante monitoramento, lubrificação e controle de temperatura. Os mancais de deslizamento são os mais aplicados em turbinas hidráulicas. A escolha desses mancais se dá basicamente em função da rotação do eixo, da carga atuante e da durabilidade que é esperada.

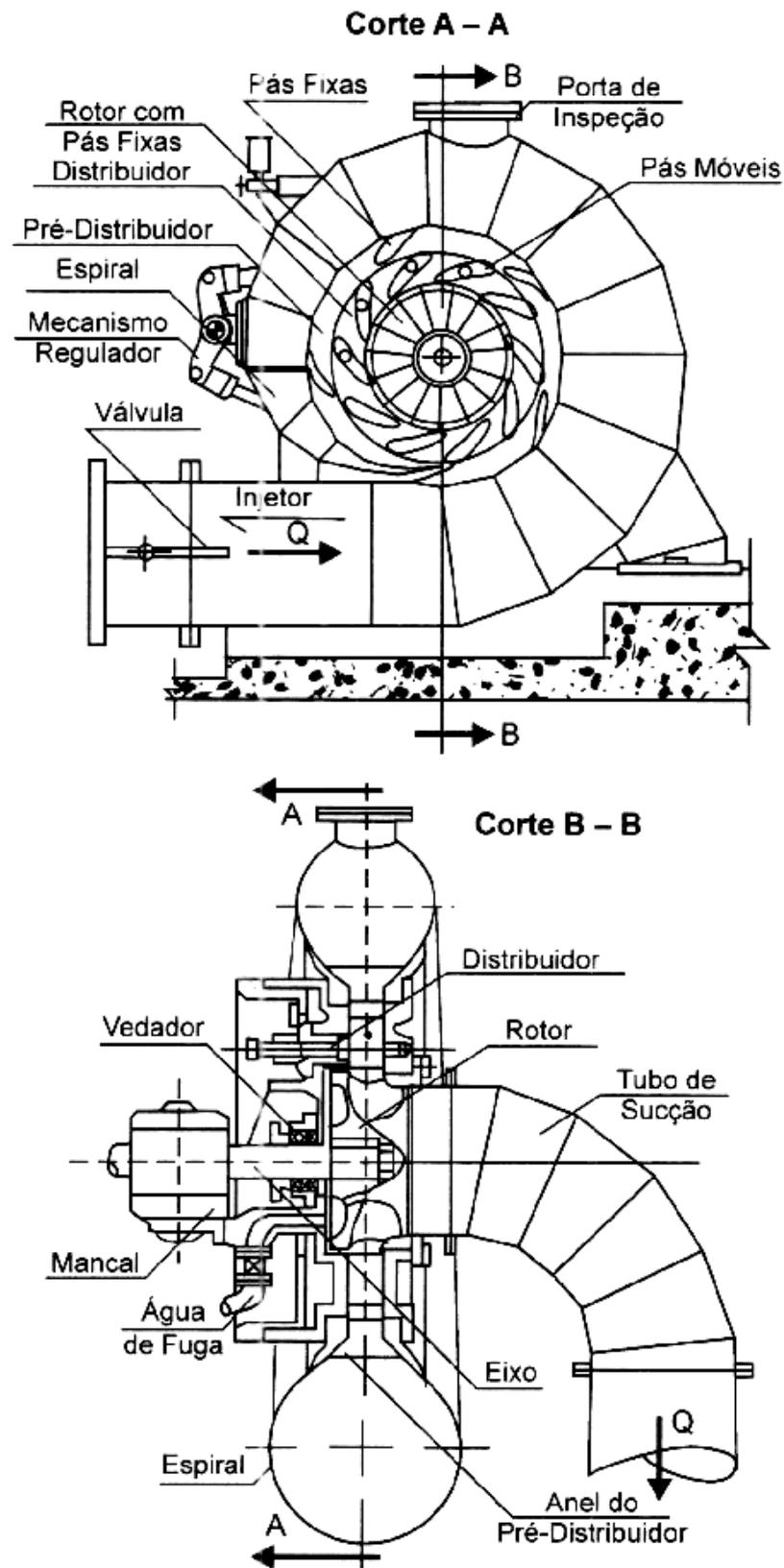


Figura 6 - Representação detalhada do conjunto de componentes de uma turbina Francis de eixo horizontal. Fonte: Souza (2009)

2.3.2.6 Equipamentos elétricos

Os geradores elétricos do tipo síncronos são os de maior aceitação no mercado de hidrelétricas. São máquinas que trabalham com velocidades constantes e iguais a de sincronização do sistema energético. Tais geradores produzem tanto energia ativa quanto energia reativa mediante o fornecimento de energia de máquinas primárias e a excitação do enrolamento de campo no rotor dos geradores elétricos.

Nestes geradores o campo no rotor é alimentado em corrente contínua através das escovas e anéis coletores provenientes de uma máquina conversora CC-CC chamada excitatriz. A tensão de saída do gerador é mantida constante dentro de suas características nominais através do regulador de tensão, que verifica constantemente a tensão de saída e atua na excitatriz estática. A principal vantagem desse sistema de excitatriz estática com escovas é o curto tempo de resposta na recuperação de tensão. Porém esse tipo de aplicação já não tem sido usual em instalações mais modernas por exigir uma alta taxa de manutenção entre outras desvantagens.

2.3.2.7 Sistema de descarga

Também conhecidos como tubo de sucção estes deverão operar sempre afogados. São os responsáveis por canalizar o fluxo proveniente da TH para a jusante. Em turbinas de reação geralmente provocam a redução da aeração do rio a jusante, sendo, portanto, necessário uma análise criteriosa do meio ambiente a fim de se evitar prejuízos ambientais significativos.

2.3.2.8 Unidade Hidráulica

As centrais responsáveis por promover a pressão para os atuadores pneumáticos são chamadas de unidades hidráulicas. Elas são responsáveis por manter o fluxo de pressão, acumulação, resfriamento e filtragem do óleo. São constituídas por grupo de motor bombas, cilindros ou bexigas acumuladoras de pressão, central de troca de calor para refrigeração do fluido, tanque de armazenamento de óleo, filtros, válvulas de controle e etc. Em UG geralmente são divididas em UH de refrigeração dos mancais, que são responsáveis por controlar a temperatura desses, e UH de acionamento e regulação de velocidade, que são responsáveis por promover o acionamento de partes móveis de comando como freio, válvula principal e bypass, pistão de acionamento do distribuidor e etc.

2.3.2.9 Painel de comandos

Para Souza (2009), os sistemas de proteção, medição e comando de uma usina devem desempenhar o papel de detecção e isolamento de falhas, interface com operador e viabilidade de comando remoto ou local de forma que vise sempre à operação normalizada, prevenção contra falhas e limitação de defeitos. Uma evolução dos sistemas de medição e controle são os sistemas de monitoramento e supervisão que, por sua vez, fornecem os subsídios para automação da usina. Adiante veremos alguns dispositivos que são comumente utilizados para alimentar e fornecer dados aos painéis de comandos.

2.3.2.10 Regulador de velocidade

Segundo Souza (2009), a função original do RV é manter a UG em rotação constante, a fim de que a frequência da tensão gerada seja mantida em valor nominal, atuando, para tanto, sobre a vazão da TH. Como a potência gerada é função direta da vazão turbinada, o RV desempenha também o papel fundamental de controle da potência ativa.

Os RV podem ser encontrados com a concepção hidromecânica e analógicas em usinas mais antigas ou digital e microprocessado em usinas mais modernas; sempre utilizando-se de servomotores para atuar no distribuidor. A principal vantagem em se utilizar os sistemas eletrônicos de RV é oferecer a possibilidade de alteração e ajuste de parâmetros, incorporando diferentes funções e limitadores.

2.3.2.11 Regulador de tensão

Os RT têm a função principal de manter a tensão da armadura em seu valor ajustado, atuando sobre a corrente de excitação do gerador elétrico síncrono. Sendo, assim tem-se que os mesmos são fundamentais no controle da potência reativa gerada, principalmente quando se deseja obter uma repartição apropriada da potência entre unidades geradoras conectadas a um mesmo barramento, através do ponto de regulagem, ou para controlar a tensão em um ponto distante dos terminais da unidade geradora. (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009, p. 385).

Adicionalmente, em PCH's e CGH's conectadas ao sistema interligado de transmissão de energia, os RT têm por finalidade realizar o controle de potência gerada, além do controle de tensão. Assim, garantindo uma quantidade de potência reativa proporcional à potência ativa gerada.

Ainda segundo Souza (2009), os RT são fundamentais também para o funcionamento correto do gerador elétrico, assegurando que a operação deste ocorra dentro dos limites impostos pela sua curva de capacidade, onde existem limites operativos em função da corrente de excitação. Limites como o de aquecimento dos enrolamentos do rotor, limites de sobre-

excitação, de sub-excitação e etc., de forma que o RT preveja um esquema especial de compensação e limitação de corrente de campo.

2.3.2.12 Transformador de corrente e Transformador de potencial

Segundo Muzy (2012), os TC's são instrumentos de medição e proteção que possuem a função de suprir de corrente os medidores e os equipamentos de medição e proteção com valores proporcionais aos dos circuitos de potencia, entretanto, respeitando seus limites de isolamento. Possuem o enrolamento primário ligado em série a um circuito elétrico e o secundário se limita a alimentar bobinas de corrente dos instrumentos da subestação.

Também para Muzy (2012), os TP's são instrumentos de medição e proteção que têm a função de possibilitar a medição de tensão em sistemas com tensão acima de 600 V. Eles possuem uma filosofia de funcionamento análogo ao dos transformadores de corrente, fornecendo uma tensão proporcional aos circuitos de alta tensão que estão sendo medidos.

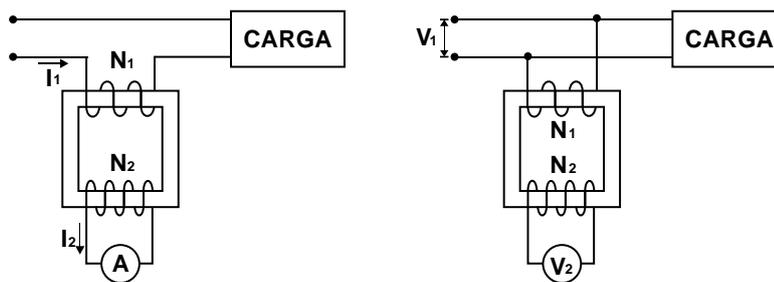


Figura 7 - Esquema básico de um TC à esquerda e um TP à direita. Fonte: o autor

“No seu dimensionamento não há a necessidade de se considerar todos os fatores observados no dimensionamento dos transformadores de corrente, pois, sua ligação em paralelo com a rede faz com que a corrente de curto não tenha a mesma influência como no TC's.” (MUZY, 2012, p. 25)

2.3.2.13 Bancos de baterias e sistemas de CC

Alguns sistemas críticos de uma UG funcionam com corrente contínua, como é o caso das excitatrizes. Para isso, conforme explica Souza (2009), o fornecimento de energia em CC utiliza de retificadores, inversores e banco de baterias. Quando a tensão em CC está disponível, a partir da própria usina ou de um sistema auxiliar de alimentação trifásica CA, as baterias ficam continuamente sendo carregadas, permitindo a sua posterior utilização. Sendo assim, não só o atendimento de cargas em CC fica garantido, mas também o atendimento de cargas prioritárias e CA, que poderá ser feito através do emprego de inversores.

2.3.3 Subestação

Segundo Muzy (2012), subestação é um conjunto de máquinas, aparelhos industriais e circuitos interligados entre si com os objetivos de controlar o fluxo de potencia, modificar tensões e modificar os níveis de corrente e tensão com intuito de garantir a distribuição e proteção do sistema elétrico.

As subestações podem ser classificadas quanto à relação entre os níveis de tensão de entrada e saída em:

- a) Elevadora: geralmente estão associadas a usinas geradoras de energia e possuem como principal função elevar os níveis de tensão dos geradores para níveis de linha de transmissão;
- b) Abaixadora: normalmente estão localizadas próximas a periferias de grandes centros urbanos e fazem o abaixamento da tensão da linha para níveis menos inconvenientes para população próxima (interferências eletromagnéticas e etc);
- c) Manobra: é utilizada para o chaveamento de linhas e circuitos sob o mesmo nível de tensão;
- d) Distribuição: são responsáveis por abaixar o nível de tensão da linha de transmissão para os níveis da linha de distribuição urbana ou de do uso consumidor final;
- e) Conversoras: são utilizadas para associar sistemas CC-CA / CA-CC (SE retificadora) ou CA-CA (SE inversoras).

“Nas centrais hidrelétricas, as subestações cumprem a importante função de ligar o gerador elétrico, através de seu transformador, caso exista, ao sistema de transmissão, distribuição ou indústria, dependendo de sua localização, finalidade e porte”. (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009, p. 309)

Este objetivo é alcançado pela conveniente comutação ou manobra de disjuntores e chaves seccionadoras, energizando ou desligando os barramento e linhas de cargas conectadas. Além destes, outros componentes auxiliares garantem o cumprimento seguro desta tarefa, tais como TC, TP, relés, para-raios, malhas de terra, chaves de aterramento, dentre outros.

2.3.3.1 Chaves seccionadoras

As chaves podem desempenhar nas subestações diversas funções, sendo a mais comum a de seccionamento de circuitos por necessidade operativa, ou por necessidade de isolar componentes do sistema (equipamentos, barras, vão ou linhas)

para a realização de manutenção, por exemplo. Neste último caso, as chaves abertas que isolam o componente em manutenção devem ter uma suportabilidade, entre terminais, às solicitações dielétricas de modo que o pessoal de campo possa executar o serviço de manutenção em condições adequadas de segurança. (MUZY, 2012, p. 31)

2.3.3.2 Disjuntores:

Os disjuntores são os principais equipamentos de segurança da subestação, além de serem os mais eficientes dispositivos de manobra em uso nas redes elétricas. São capazes de conduzir, interromper e estabelecer correntes normais e anormais especificadas dos sistemas. São usados para controlar circuitos, ligando e desligando em qualquer condição, conduzindo corrente de carga e proporcionando uma supervisão automática das condições do sistema e sua operação. Devem ser sempre instalados acompanhados dos respectivos relés, que são os elementos responsáveis pela detecção das correntes elétricas do circuito, e que tomam a decisão de acionamento ou não do disjuntor. O disjuntor sem o acompanhamento dos seus relés torna-se apenas uma chave de manobra, sem qualquer característica de proteção. (MUZY, 2012, p. 31)

2.3.3.3 Para-raios:

“O Para-raios é um equipamento de proteção que tem por finalidade limitar os valores dos surtos de tensão transiente que, de outra forma, poderiam causar sérios danos aos equipamentos elétricos.” (MUZY, 2012, p. 46)

2.4 Modernização e automação de PCH

Até 1995, todos os consumidores de energia elétrica do Brasil eram cativos da empresa concessionária da área geográfica em que se situavam. A partir desse ano, o congresso, através de lei, permitiu que os consumidores com demanda igual ou superior a 10.000 kW, atendidas em tensão igual ou maior a 69 kV, optar por contratar diretamente seu fornecimento de energia elétrica, demandando das concessionárias locais apenas o aluguel da linha de distribuição.

Concomitantemente, a partir de estudos realizados pela EPE, o governo adotou a política de incentivos fiscais e com financiamentos as fontes de energia alternativas, entre elas a modernização das PCH's existentes com intuito de aumentar oferta de energia com o aumento da eficiência destas.

Segundo Tolmasquim (2003), a maior parte das PCH's construídas no país foi construída numa época em que os dados hidrológicos eram incipientes e a tecnologia permitia a construção de equipamentos com eficiência limitada. Ainda segundo o autor, estudos indicam que um novo estudo das condições hidrológicas, a adaptação do sistema de adição e modernização e redefinição dos componentes da unidade geradora poderão agregar um volume considerável de energia em curto período de tempo.

A reabilitação de antigas PCH's apresenta-se como um mercado promissor. O uso de tecnologias mais modernas e eficientes, estudos hidrológicos mais apurados, investimentos na automatização das centrais podem lograr um aumento considerável nas capacidades instaladas das antigas centrais consideráveis com consideráveis reduções nos custos operacionais das mesmas. (TOLMASQUIM, 2003, p. 189)

3 COMISSIONAMENTO

3.1 Conceituação

Para Brito (2008), o termo comissionamento vem do latim *committere* e foi traduzido para o inglês como *commissioning*, sendo consolidado no meio marítimo como um termo referente à entrega de um navio ao serviço ativo, com todas as garantias de confiabilidade. Dessa forma, o comissionamento é um termo comum do jargão marítimo e diz-se de longa data dos navios, quando estes estão “prontos para cumprir sua missão”, isto é, o navio foi entregue em plenas condições de operação e provisionado de todo necessário para zarpar em viagens.

De forma prática:

O comissionamento, em termos modernos, pode ser definido como um conjunto estruturado de conhecimentos, práticas, procedimentos e habilidades, aplicável a produtos complexos de engenharia com o objetivo de assegurar sua operabilidade e garantir sua transferência ordenada e segura do construtor para o operador (ou da fase de construção e montagem para a fase de operação estável). (BRITO, 2008)

Ainda para Brito (2008), o comissionamento é uma prática capaz de agregar alto valor econômico a empreendimentos quando aplicado de forma correta. Dessa, pode-se dizer que as bases para um bom comissionamento são a competência, experiência e confiança entre os contratantes do serviço e a equipe/empresa comissionadora de fato.

3.2 Sistemas e subsistemas

3.2.1 Sistemas

Para facilitar o comissionamento, as plantas industriais são divididas em sistemas e subsistemas. Os sistemas são compreendidos como uma subdivisão maior de uma instalação. São definidos de forma que um ou mais sistemas possam ser testados simultaneamente ou em sequencia de forma independente. As subáreas operacionais geralmente podem ser representadas como subsistemas de comissionamento, todavia nem sempre possuem os mesmos limites, isso porque uma subárea pode conter mais de um subsistema ou vice e versa.

Portanto, é muito importante que faça parte da equipe de comissionamento uma pessoa ou mais que estejam muito familiarizadas com a planta em questão, ou seja, que sejam profundos conhecedores do processo e auxiliem a equipe de planejamento de comissionamento durante a elaboração dos planos de comissionamento considerando a sequencia logica de testes do processo.

3.2.2 Subsistemas

Os subsistemas são compreendidos como os equipamentos ou grupo deles dentro dos sistemas que possam ser construídos, montados e pré-comissionados com certa independência. Por exemplo, em uma central geradora de energia elétrica a subestação pode ser determinada como um sistema de comissionamento, já os disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores, TP's, TC's, para-raios, malha de aterramento, painéis e outros equipamentos podem ser vistos como subsistemas ou itens comissionáveis.

3.3 Fases ou etapas do comissionamento

Para melhor conduzir a etapa de comissionamento em instalações industriais, esta pode ser dividida em fases que contemplam desde o planejamento do comissionamento até as etapas de geração de relatório e transferência de custódia, passando pelas fases de execução e testes. As principais divisões da etapa de comissionamento adotadas são:

- a) Planejamento do comissionamento;
- b) Completação mecânica;
- c) Pré-comissionamento;
- d) Testes de comissionamento;
- e) Elaboração do relatório de comissionamento;
- f) Transferência de custódia e aceite de empreendimento/projeto.

3.3.1 Planejamento do comissionamento

Segundo Houaiss (2010), planejar é sinônimo de elaborar plano, roteiro ou planta, projetar, organizar, programar e pretender a realização de algo. Em síntese, nada mais é do que uma organização prévia que tem como produto final um plano, que geralmente se trata de um documento escrito com a descrição de um roteiro com a determinação das atividades a serem realizadas com a incumbência de responsabilidades.

Dessa forma, a fase de planejamento do comissionamento compreende na elaboração de um plano de comissionamento, elaboração de um cronograma de atividades e detalhamento das atividades a serem executadas. Geralmente, em equipes maiores e mais experientes o plano é composto por um preliminar, no qual se tem um escopo previsto das atividades a serem executadas, e um plano definitivo que seria o preliminar revisado e aprovado pela gerência responsável pelo empreendimento ou projeto a ser comissionado.

Conforme relata Nascimento (2014), uma ferramenta bastante comum e útil no desenvolvimento do planejamento de projetos é o FEL (*Front End Loading*), que surgiu nos projetos das indústrias de petróleo com o intuito de incluir todas as atividades primárias para definição de viabilidade. Esse processo é tipicamente dividido como se fossem três fases conhecidas como FEL1, FEL2 e FEL3.

O FEL 3 compreende exatamente na principal atividade desenvolvidas no plano preliminar que seria: o desenvolvimento, a análise de perigos, a estimativa, o projeto econômico e a análise de riscos como pode ser mais bem entendido pela figura 8.



Figura 8 - Planejamento do comissionamento. Fonte: Vale (2011)

O plano de comissionamento tem como principal objetivo reunir informações sobre o comissionamento de forma a abranger o escopo completo dos serviços, a serem realizados pela equipe de comissionamento. Aprovado, o plano deverá ser o principal guia do comissionamento, mudando muito pouco durante o projeto. Podendo, porém, ser bem flexível no que diz respeito aos cronogramas, refletindo a realidade de entrega de construção, montagem e dificuldades do próprio comissionamento.

Como pode ser visto em Vale (2011), o plano deve apresentar dados consistentes, com objetivos claros e apresentar itens, tais como:

- a) Requisitos de saúde, segurança e meio-ambiente no comissionamento;
- b) Estratégias de recebimento das instalações;

- c) Sistemas e subsistemas de comissionamento;
- d) Papéis e responsabilidades do comissionamento;
- e) Organograma do comissionamento;
- f) Cronograma mestre de comissionamento;
- g) Histograma do comissionamento;
- h) Orçamento do comissionamento;
- i) Plano de preservação;
- j) Plano de comunicação do comissionamento;
- k) Documentação do comissionamento (dinâmica de *handover*);
- l) Plano de treinamento.

A figura 9 exemplifica um dos processos de documentação exigida entre os processos de conclusão mecânica e comissionamento: o *handover*, que nada mais é que a passagem de custódia do equipamento (subsistema) de comissionamento da equipe de construção para a equipe de comissionamento, assim como todas as responsabilidades sobre os equipamentos, instrumentos e acessórios pertencentes ao respectivo subsistema.



Figura 9 - Documentação de conclusão mecânica e handover para o comissionamento. Fonte: Vale (2014)

Além dos procedimentos e explicitação das documentações necessárias, é de suma importância que no planejamento do comissionamento seja elaborada a matriz de papéis e responsabilidades do comissionamento. Isso porque, ele deixará claro a divisão das equipes, suas funções e principalmente como se dará a comunicação entre elas e demais áreas de montagem e construção ou demais etapas da execução do empreendimento/projeto.

3.3.2 Completação mecânica

A etapa de completção mecânica ocorre ao final da etapa de montagem eletromecânica do projeto. Seu principal objetivo é a eliminação de falhas, defeitos ou pendências das instalações físicas do empreendimento como pré-requisito para a etapa de pré-comissionamento. De forma prática, a função da completção mecânica é a verificação da correta montagem das instalações conforme especificações, normas, documentos e desenhos do projeto.

As atividades típicas de complementação mecânica são inspeções, verificações e registros das mesmas, conforme detalhado nos protocolos de completção mecânica. São aplicáveis a todas as disciplinas relacionadas à construção e montagem. As atividades de verificação dos protocolos de completção mecânica e levantamento de pendências deverão ser planejados dentro do cronograma de comissionamento, com base na rede de precedência de subsistemas elaborada, de forma que seja possível realizar a sequência ideal de testes nas etapas posteriores. A verificação dos protocolos de completção mecânica e listas de pendências (*punch lists* ou PL) deverão ser conduzidas antes de qualquer atividade de pré-comissionamento.

Apesar de formalmente ser discriminada como uma das etapas do comissionamento, pela sua estreita e entrelaçada relação com as atividades de comissionamento, a realização da completção mecânica é realizada e portanto de responsabilidade da equipe de construção e montagem.

3.3.3 Pré-comissionamento

A etapa de pré-comissionamento abrange o conjunto de atividades executadas em subsistemas, de forma a garantir que todo o subsistema esteja testado antes do comissionamento propriamente dito. Nessa etapa, normalmente ocorre a energização dos equipamentos de forma que seja possível a realização de alguns testes funcionais como de comunicação, intertravamento, alarmes, lubrificação de componentes, verificações de segurança e etc.

O que marca o início do pré-comissionamento é a transferência de custódia da equipe de completção mecânica para equipe de comissionamento através dos certificados de completção mecânica. Além desses certificados são necessários, pela equipe de comissionamento, documentos fornecidos pelas equipes de engenharia e fornecedores, tais como:

- a) P&ID's ou fluxograma de engenharia;
- b) Diagramas de interligação;
- c) Diagramas lógicos;
- d) Diagramas de malhas;
- e) Diagramas elétricos unifilares;
- f) Folha de dados dos motores elétricos;
- g) Folha de dados de Instrumentos, válvulas e dispositivos elétricos;
- h) Relação de entrada e saídas do controlador;
- i) Diagramas das unidades hidráulicas ou lubrificação;
- j) Memorial descritivo de intertravamentos;
- k) Lista de parâmetros de ajustes;
- l) Diagramas de configuração dos sistemas de automação;
- m) Manuais dos Equipamentos e etc.

As modificações realizadas nessa documentação devem ser devidamente registradas e encaminhadas para atualização dos projetos, bem como as listas de eventuais pendências da fase de completção mecânica ou da fase de pre-comissionamento. Pendências essas que devem ser registradas e sanadas de acordo com as prioridades. Só assim poderá ser feito o certificado de pré-comissionamento e dado continuidade ao comissionamento.

3.3.4 Testes de Comissionamento

A etapa de testes de comissionamento compreende a execução dos testes sem carga, com carga e verificações dinâmicas de funcionamento das instalações do empreendimento por sistemas e respectivos subsistemas de comissionamento integrados. Essa etapa é iniciada pela emissão do certificado de pré-comissionamento de todos os subsistemas do sistema a ser comissionado.

Os testes sem carga e com carga deverão ser descritos passo a passo, detalhando os testes em cada subsistema de comissionamento, seja ele de processo ou utilidades. Devem ser relacionados os protocolos, gerados no planejamento do comissionamento, a serem aplicados para registro de testes da etapa de comissionamento, correlacionando os subsistemas ou equipamentos com seus respectivos protocolos.

Nos protocolos de comissionamento devem constar os parâmetros elétricos (voltagem, corrente etc.) e mecânicos (vibração, ruído, pressão etc.) - recomendados pelos fabricantes dos diversos equipamentos, normas e melhores práticas - que serão utilizados para validação

dos testes. É importante que seja relacionada a origem destes parâmetros: documentos de engenharia, fabricante ou normas nacionais e internacionais adotadas e que seja apresentado o valor medido pela equipe para liberação no protocolo como já sugerido antes.

Os resultados esperados devem ser descritos no comissionamento dos sistemas a serem testados, contemplando os subsistemas e equipamentos que o compõem. Geralmente os resultados esperados são os parâmetros operacionais e condições ambientais, em atendimento às especificações de processo. Todos os resultados obtidos e os documentos necessários à comprovação destes resultados devem ser registrados nos protocolos de comissionamento.

As modificações realizadas nos documentos de engenharia decorrentes das atividades de comissionamento devem ser realizadas, registradas e encaminhadas para a elaboração dos desenhos *as built* conforme fluxo definido pelo projeto.

3.3.5 Relatório e documentação

Após realização dos testes de comissionamento, uma vez que todos os protocolos tenham sido preenchidos, validados e carregados no software ou planilha de comissionamento, deve ser emitido o certificado de comissionamento para cada sistema comissionado.

A emissão do Certificado de Comissionamento caracteriza o *handover* para operação visando início dos testes de desempenho. Neste momento não deverão existir pendências remanescentes graves que possam acarretar transtornos à operação.

No certificado de comissionamento, deverão estar relacionados todos os subsistemas de comissionamento integrantes. No anexo A podemos ver um modelo de certificado de comissionamento.

A documentação gerada durante a execução da etapa comissionamento deve ser registrada e guardada para a produção do relatório resultados de comissionamento.

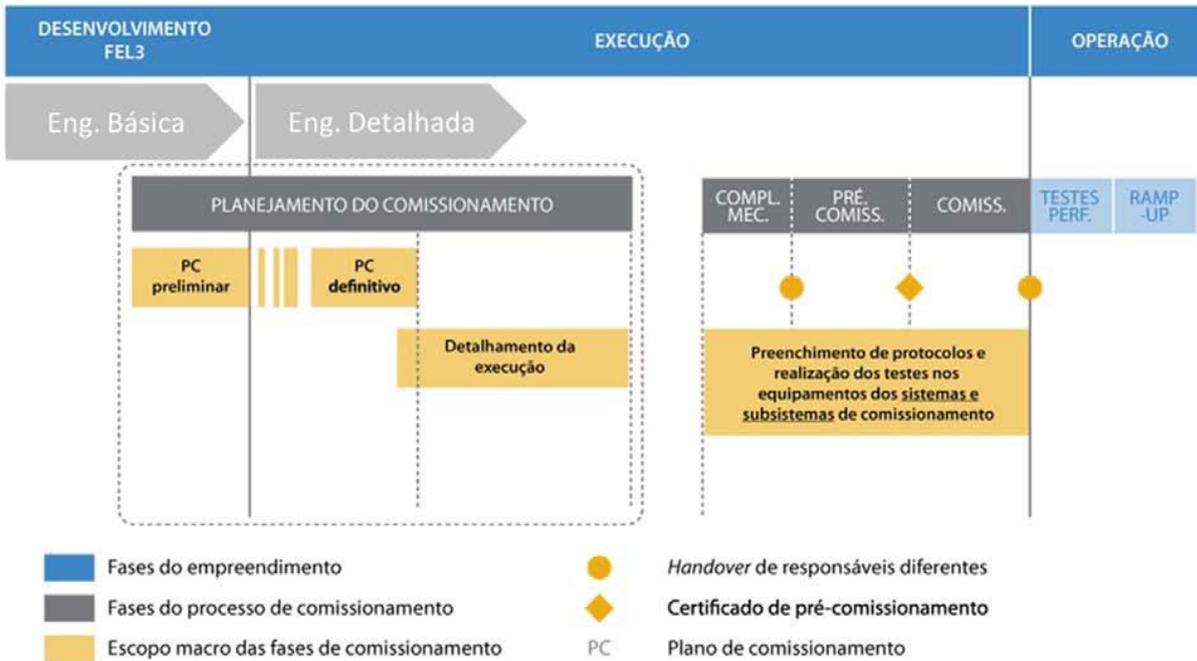


Figura 10 - Planejamento do comissionamento no ciclo de vida do projeto. Fonte: Vale (2014)

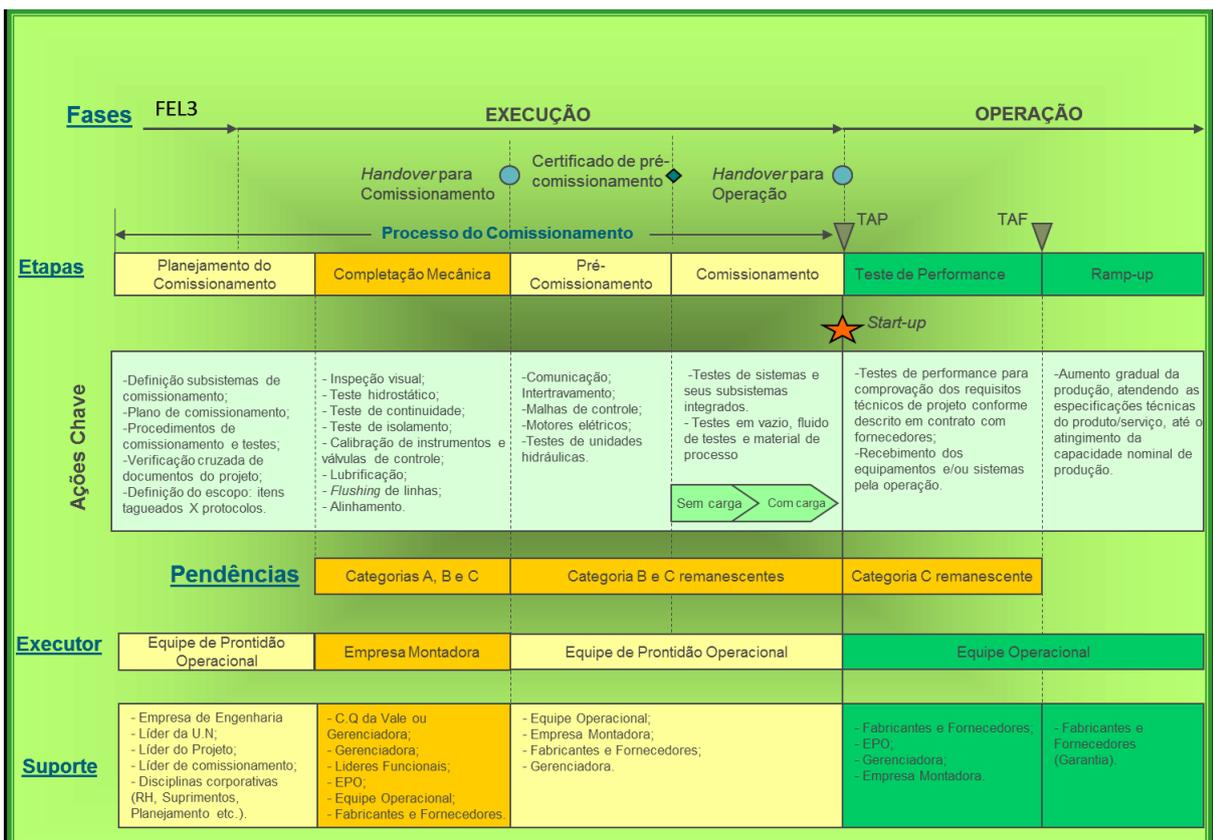


Figura 11 - Modelo do processo de comissionamento. Fonte: Vale (2014)

3.3.6 Transferência de custódia e aceite de empreendimento

Nas figuras 10 e 11 é visto um modelo que apresenta as ações-chave, transferências de custódia (*handover*), responsabilidades pela execução, classificação de pendências e suporte técnico, entre outros, padronizando uma terminologia única. Conforme em Vale (2014), os principais benefícios de se seguir um modelo deste tipo são:

- a) Disseminação de terminologia comum de comissionamento entre os projetos;
- b) Formação e capacitação de profissionais de comissionamento, no mesmo método de trabalho e padronização;
- c) Sistematização do monitoramento e controle de progresso do comissionamento;
- d) Padronização do escopo, responsabilidades e limites dos trabalhos de cada etapa, servindo como base para elaboração dos contratos de serviços de gerenciamento, montagem eletromecânica, comissionamento e fornecedores de pacotes.

Cada etapa com as atividades do processo de comissionamento, distribuídas ao longo das etapas do comissionamento, podem ser visualizadas no *road map*¹ da Vale apresentado no anexo B.

Após o comissionamento os sistemas são transferidos para equipe operacional que com suporte da equipe de comissionamento, construção e fornecedores, realiza os testes de desempenho do sistema, para confirmação do desempenho dos equipamentos, conforme definido nos contratos dos diferentes fornecedores.

Uma vez que os sistemas de comissionamento foram sucessivamente transferidos para a operação, é possível emitir o Termo de Aceite Provisório (TAP), permitindo o início dos testes de desempenho de forma integrada. O *startup* é tido como um marco na entrega ou início de operação de um sistema e é caracterizado pela emissão dos TAP's.

Como mencionado em Vale (2014), o *ramp-up* ocorre logo após o *startup*, sendo a fase de entrada em operação do sistema. O Termo de Aceite Final (TAF) deve ser emitido após a execução do teste de desempenho integrado, não indicando necessariamente que a capacidade nominal do empreendimento foi alcançada para alguns casos. Como exceção, podem-se

¹¹ Road map: mapa de micro processos dentro do processo de comissionamento (ou qualquer outro processo). É uma orientação para todas as macro atividades que precisam ser executadas em seus devidos momentos.

destacar as plantas de processo químico, unidades térmicas e de geração de energia, que por sua particularidade, possuem período de *ramp-up* relativamente curto. Nestes casos, a emissão do TAF deve ocorrer após atingir a capacidade nominal do empreendimento. O TAF representa a entrega e o aceite de todo o escopo do Projeto pela Operação (Unidade de Negócios). A data de emissão do TAF é a data de conclusão do Projeto. A figura 12 ilustra as curvas de *ramp-up* para alguns tipos de indústrias ligadas à mineração e os momentos de emissão do TAP e TAF.

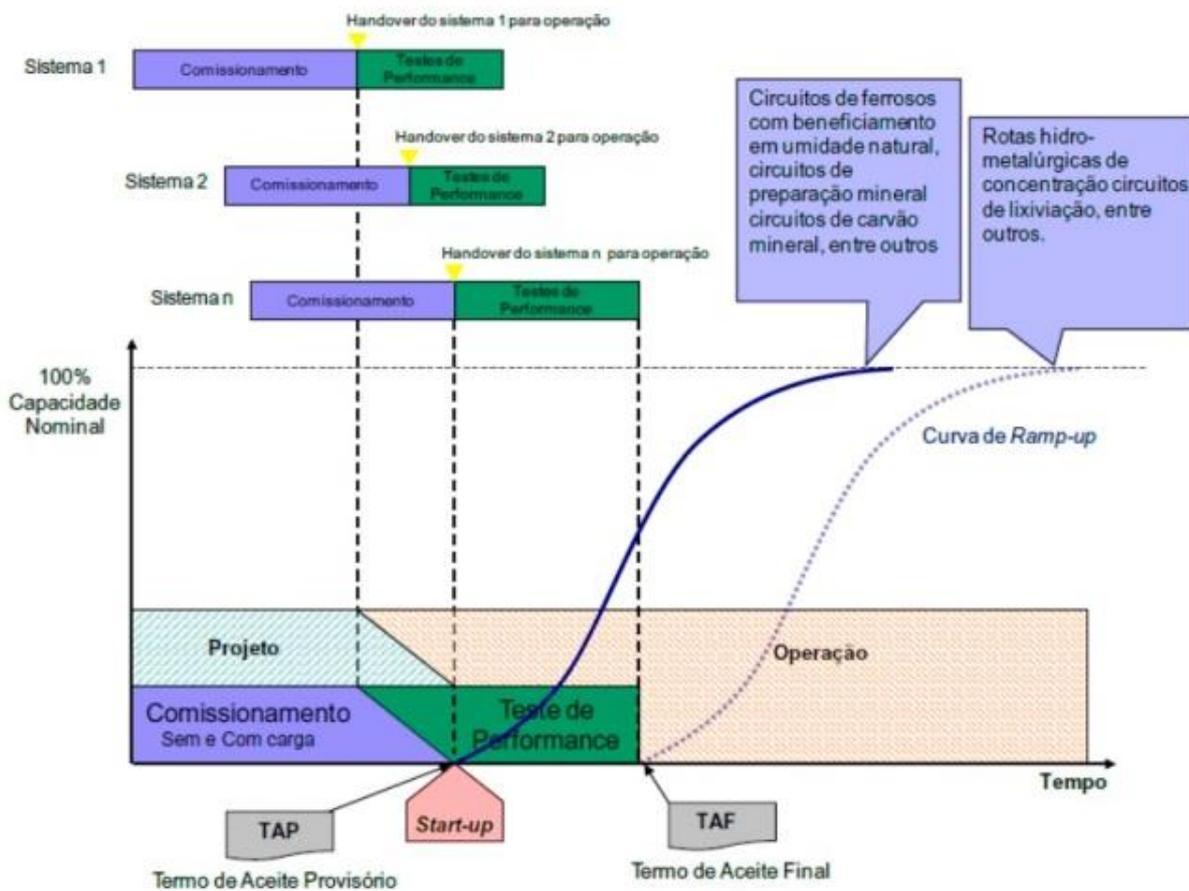


Figura 12 - Encerramento do comissionamento e *startup* para projetos da Vale. Fonte: Vale (2014)

4 PCH CABOCLO

4.1 Histórico

De acordo com registros em Alcan (2000), a PCH de Caboclo entrou em operação em 1944 com uma potência instalada de 4MW. Idealizada e construída para abastecer a antiga fábrica de alumínio em Saramenha, Elquisa, é fruto da idealização e pioneirismo de Américo Rene Giannetti e Simão Lacerda, fundadores da fábrica.

Projetada e construída em um período de guerra e com grande conturbação mundial a Usina de Caboclo pode ser considerada uma grande conquista mineira e brasileira da época, pois veio a dar suporte à primeira corrida do alumínio ao sul dos Estados Unidos. As dificuldades de aquisição de equipamentos e transporte dos mesmos ao local da usina foram bravamente vencidas pelos pioneiros colaboradores.

Inicialmente foi operada com equipamentos americanos, dois geradores General Electric (G.E.). Fornecia energia para o sistema para a *Redução da fábrica*², através da linha de transmissão da própria empresa, feita com torres de trilhos ferroviários usados e os cabos de cobre, como era costume na época. Na fábrica eram usados quatro grupo de motores geradores, também G.E. para realizarem a conversão da energia em corrente alternada para a corrente contínua usada nos fornos da Redução. Não muito convencional, o sistema de conversão da energia CA-CC, para alimentação de fornos para redução de alumina, continuou sendo usado até o encerramento da fabricação de alumínio pela Novelis, herdeira das instalações da Elquisa, na subestação de Saramenha no sistema de retificadores.

4.2 Localização

A PCH de Caboclo está localizada no município de Ouro Preto – MG, na zona rural do distrito de Santo Antônio do Salto. A usina faz parte do sistema de geração Maynard, um complexo formado por três casas de força, uma represa de armazenamento de água e três barragens de desvio de água para o canal das usinas. O sistema Maynard utiliza as águas da sub-bacia do Rio Doce, regionalmente conhecido como rio Maynard.

² A transformação da alumina em alumínio primário metálico é denominada Redução. Consiste na dissociação eletrolítica da alumina dissolvida num banho de criolita fundida a baixa tensão. A alumina se decompõe em oxigênio, que combina com o carvão do anodo, desprendendo-se sob a forma de gás, e em alumínio líquido, que se precipita no fundo da cuba de redução.



Figura 13 - Foto de satélite da localização da PCH. Fonte: Adaptado Google Earth

A usina encontra-se na latitude $20^{\circ}31' 04''\text{S}$ e longitude $43^{\circ}30' 36''$. É a primeira usina do sistema Maynard e possui captação de águas na barragem de desvio do Fojo, localizada no arraial de mesmo nome. Entre o desvio do rio e a tomada d'água do conduto forçado da usina são 4880m de canal e 217m de conduto forçado. A queda d'água líquida é de 89m.

A montante da usina encontra-se a Barragem do Ribeirão da Cachoeira – BRC, represa de um afluente do Maynard. Sua capacidade de armazenamento de água é de $31.200.000\text{m}^3$. No período chuvoso é feito o abastecimento do reservatório, já no período seco a água da represa é utilizada para abastecer o rio Maynard e manter a geração de energia nas usinas. A quantidade de água armazenada na barragem é regulada por uma válvula do tipo gaveta, que é constantemente monitorada e operada localmente, sendo as informações de abertura (em porcentagem), nível do lago e índice pluviométrico informado diariamente às usinas adiante do curso do rio.



Figura 14 - Válvula da BRC. Fonte: o autor

No local da casa de força da PCH de Caboclo encontra-se também a barragem de desvio que alimenta o canal de adução da PCH de Salto com 3600m de extensão. Esse, porém, só é utilizado quando não há fluxo de água passando pelas turbinas da usina de Caboclo, pois a água da usina é levada diretamente ao canal. A Usina de Salto foi a primeira a ser construída do complexo Maynard, datando o ano de 1940 com a primeira entrada em operação e é a mais próxima do distrito de Santo Antônio do Salto.

A jusante da usina do Salto há a barragem de desvio da PCH de Funil para o canal, que com seus 2900m alimenta as turbinadas desta usina. A casa de forças de Funil também serve de abrigo para os geradores da PCH Prazeres que usa água de outra fonte, a Barragem do Custódio no córrego dos Prazeres.



Figura 15 - Casa de força da usina de Salto. Fonte: o autor



Figura 16 - Casa de força da usina de Funil/Prazeres. Fonte: o autor

4.3 Descrição da casa de força

Caboclo é composta por uma casa de força abrigada convencionalmente, uma subestação elevadora de tensão e um conjunto de canal de adução, tomada d'água e conduto forçado. Na subestação contamos com a presença de dois transformadores elevadores, um para cada grupo gerador. Tagueados como o T77 e T78, os transformadores são responsáveis por elevar a

tensão de 6,6KV que sai do gerador para 34,5KV da barra da subestação. A tabela 1 apresenta mais informações a respeito dos transformadores.

TRANSFORMADOR DO GERADOR	T77 E T78
Fabricante	G.E. (USA)
Potência Nominal	2,6 kVA
Tensão Primária (Y)	36220 V
Tensão Secundária (D)	6300 V

Tabela 1 - Característica técnicas dos transformadores. Fonte: Placa de identificação dos transformadores

Além dos transformadores na subestação temos 12 chaves seccionadoras, 4 disjuntores de linha, 6 TC, 6 TP e 6 para-raios.



Figura 17 - Subestação de Caboclo. Fonte: o autor

O canal de caboclo possui um formato trapezoidal com 3m de base inferior, 4,4m de base superior e 2,2m de profundidade. Ao final do temos um vertedouro para caso de enchentes no canal, um areeiro para diminuir a quantidade de areia que passa para as turbinas e o castelo d'água que faz a junção do canal ao conduto forçado, de aproximadamente 1,8m de diâmetro. Anexo ao castelo d'água tem a casa do limpador de grade, que pode ser acionado localmente ou a partir do painel da usina.



Figura 18- Canal de Caboclo com a casa do limpador de grade ao fundo. Fonte: o autor



Figura 19 - Areeiro do canal. Fonte: o autor



Figura 20 - Vertedouro do canal. Fonte: o autor

Na casa de máquinas há dois conjuntos de unidades geradoras. Cada uma conta com 2 mancais guia-escora para a turbina, 3 mancais guias para os eixos do gerador/turbina, um disco de inércia, uma unidade hidráulica de acionamento da válvula de adução e demais atuadores, uma unidade hidráulica para refrigeração dos mancais, uma excitatriz rotativa, um

rotor de indução, um estator, um conjunto de turbina Francis dupla entre outros equipamentos auxiliares.

No quesito da instalação física da casa de forma ainda podemos enumerar um alçapão com os TP's e TC's dos geradores; duas galerias subterrâneas, uma para cada gerador; duas galerias de fuga de água; uma sala de comunicação; uma sala de painéis; uma copa, uma cozinha; uma depósito de limpeza e um depósito de materiais como pode ser visto no anexo C. Na tabela 2 podemos ver mais informações a respeito dos geradores.

SISTEMA DE REGULAÇÃO	EXCITATRIZ ROTATIVA CC-CC
Fabricante	GE
Potência Nominal	23,8 kVA
Tensão Primária	60 V
Refrigeração	Natural
GERADOR	
Fabricante	GE
Potência	2,6MVA
Tensão Terminal	6,6 kV
Corrente Terminal (Plena Carga)	228 A
Frequência	60 Hz
Tensão Nominal de Campo	47 V
Corrente Nominal de Campo	326 A

Tabela 2 - Característica técnicas do gerador e da excitatriz. Fonte: Reivax (2007)



Figura 21 - Casa de força da PCH Caboclo. Fonte: o autor



Figura 22 - Gerador da UG2. Fonte: o autor

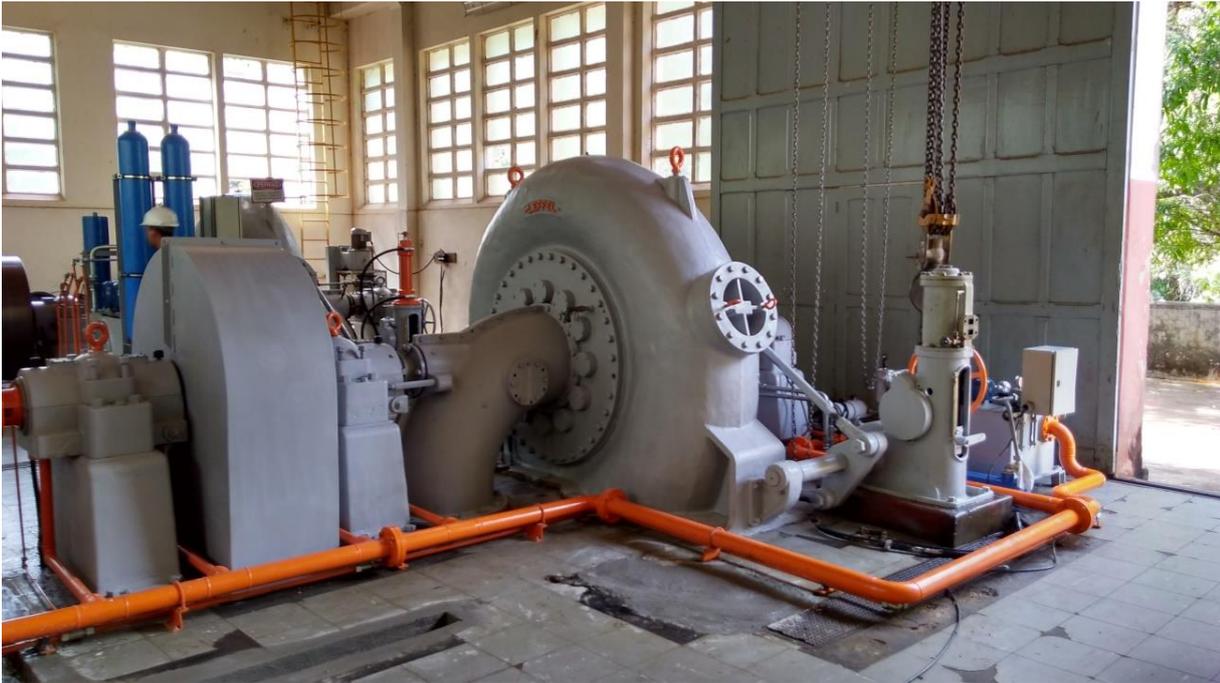


Figura 23 - Turbina da UG2. Fonte: o autor

4.4 *Holding CEI - Maynart*

Atualmente a PCH de Caboclo pertence a Maynart Energética Ltda, empresa do grupo Companhia energética Integrada – CEI. A CEI é um holding de empresas da área de energia e conta com empresas de geração, comercialização, consultoria e prestadoras de serviço na área energética como é ilustrado na figura 12.

A empresa responsável pela modernização da usina de Caboclo foi a Brasil Engenharia Inteligente – BEI, que é uma das empresas do grupo CEI. A BEI conta com um corpo estritamente técnico da área de engenharia e possui grandes parcerias com fornecedores de tecnologia do ramo energético brasileiro como a Reivax, Hine, entre outras.

Os painéis controladores das unidades geradoras da PCH Cacoclo foram adquiridos da Reivax, que é uma multinacional brasileira de automação e controle de centrais geradoras. Com uma larga experiência no setor a Reivax já foi parceira da BEI em outros projetos e tem se firmado como uma das principais fornecedoras de tecnologia das empresas do grupo CEI.



Figura 24 - Grupo de empresas do holding CEI. Fonte: o autor

5 RETROFIT PCH CABOCLO

Os métodos descritos no capítulo 3 são de ordem geral e completa, sendo adequados para qualquer tipo de comissionamento industrial. Na realidade, deve-se adota-los como referencia inicial, ou seja, como um norte para guiar o comissionamento, de forma que a demanda e necessidades de cada planta, equipamento e empresa sejam tratadas com suas particularidades. Dessa forma, veremos que no planejamento e execução do comissionamento da PCH Caboclo alguns conceitos e metodologias de trabalho foram adaptados à realidade da usina.

5.1 Projeto descritivo de automação e *retrofit*

O termo *retrofit*, do latim *retro*: movimentar-se para trás e do inglês *fit*: adaptar-se ou ajustar-se é um termo utilizado em engenharia para designar o processo de modernização de equipamentos já considerados ultrapassados ou fora de norma. É exatamente nessa vertente que se enquadra o caso da usina tratada neste trabalho. Como já visto, se trata de uma usina datada da década de quarenta e que apesar das reformas realizadas ainda estava aquém de sua capacidade se comparada com as tecnologias disponíveis no momento.

Dessa maneira, uma modernização foi idealizada para Caboclo, sendo a automação da usina o meio comum de integrar o *retrofit* à melhoria quanto à eficiência energética, redução de custo em médio prazo, segurança e de possibilitar uma operação totalmente remota através do Centro de Operação de Geração. A figura 25 retrata a diferença entre alguns equipamentos trocados com o *retrofit* da usina.



Figura 25 - TC antigo à esquerda e TC novo à direita. Fonte: o autor.

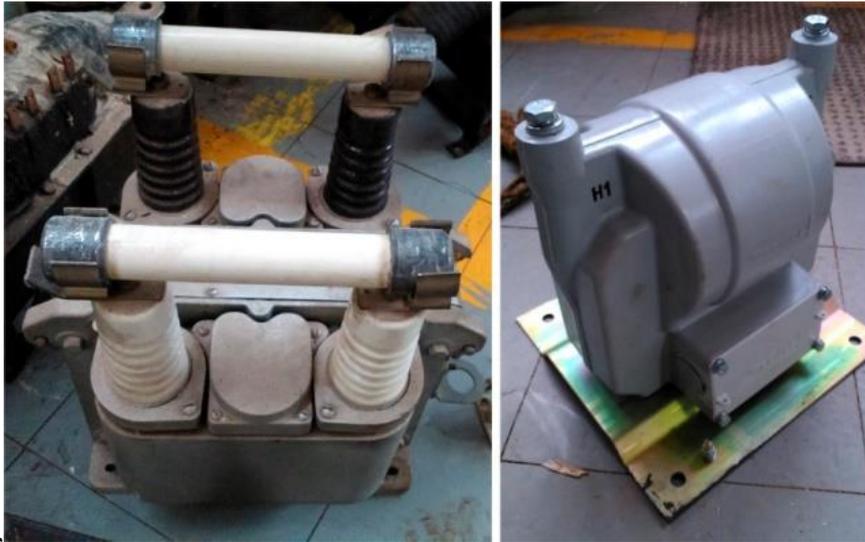


Figura 26 - TP antigo à esquerda e TP novo à direita. Fonte: o autor.

A elaboração e emissão do descritivo do projeto de automação e *retrofit* foi a primeira etapa do projeto da usina seguida das aprovações executivas e financeiras. Posteriormente dividiram-se os campos de atividades da implementação da automação em quatro fases:

- a) Engenharia;
- b) Suprimentos;
- c) Construção;
- d) Comissionamento.

5.1.1 Engenharia

Em consonância com a resolução nº 1048 do Confea/Crea, coube à equipe de engenharia as atividades técnicas de planejamento, inspeção, coordenação, contratação de serviços técnicos terceirizados, documentação entre outras.

De forma mais próxima à realidade do projeto, foram desenvolvidas as atividades de elaboração, emissão, avaliação e aprovação dos seguintes documentos equipamentos:

- a) Diagramas hidráulicos das unidades hidráulicas da UG 1 e UG2 (anexo D);
- b) Projetos mecânicos dos cilindros hidráulicos para distribuidores da UG 1 e UG2;
- c) Projetos mecânicos dos cilindros hidráulicos para válvula borboleta da UG 1 e UG2;
- d) Projetos mecânicos dos cilindros hidráulicos para válvula by-pass da UG 1 e UG2;

- e) Projetos mecânicos dos freios da UG 1 e UG2 (anexo E);
- f) Escopo de fornecimento de materiais e serviços de retrofit mecânico;
- g) Arranjo eletromecânico da casa de força;
- h) Diagramas elétricos dos painéis de automação da UG 1 e UG2;
- i) Diagramas elétricos dos painéis de serviços comuns;
- j) Diagramas construtivos dos painéis de automação da UG 1 e UG2;
- k) Diagramas construtivos dos painéis de serviços comuns;
- l) Diagramas elétricos dos painéis da UH da UG 1 e UH da UG2;
- m) Diagramas construtivos dos painéis da UH da UG 1 e UH da UG2 ;
- n) Projetos de vias e cabos;
- o) Diagramas de interligação;
- p) Especificação do PLC de serviços comum;
- q) Especificação do desktop e no-break;
- r) Lista de material, equipamentos, instrumentos, cabos e miscelâneas elétricas;
- s) Projetos do quadro de comando dos limpadores de grades;
- t) Lista de material, equipamentos, instrumentos, cabos e miscelâneas elétricas dos limpadores de grades;
- u) Projeto de adaptação do conjunto de acionamento da comporta desarenadora;
- v) Lista de material, equipamentos, instrumentos, cabos e miscelâneas elétricas da comporta desarenadora;
- w) Projeto de quadro de comando das comportas de entrada;
- x) Lista de material, equipamentos, instrumentos, cabos e miscelâneas elétricas da das comportas de entrada;

5.1.2 Suprimentos

A equipe de suprimentos tem como principais funções o elaboração de cotações, orçamentos, negociações de compras, contratação de serviços, identificando alternativas que melhorem a relação de custo benefício, negociando as aquisições mais complexas e também cláusulas contratuais junto aos fornecedores, de forma a obter sempre melhores condições em termos de qualidade, preço e prazos de entrega dos materiais, sintetizando a melhor estratégia de mercado. Coube, portanto, à equipe de suprimentos as atividades de contratação de serviços especializados e compra de materiais listados pela equipe de engenharia.

5.1.3 Construção

A equipe de construção, de forma já esperada, ficou responsável pela execução dos planos feito pela engenharia e ainda pela organização administrativa, como treinamentos, mobilização de equipes, avaliações de segurança. As principais atividades podem ser listadas como:

- a) Mobilização de mão de obra civil para demolições;
- b) Avaliação de riscos de segurança;
- c) Treinamento de segurança dos profissionais envolvidos;
- d) Conferência topográfica e marcação do piso para corte no piso para troca das válvulas de adução;
- e) Corte do piso para troca das válvulas de adução;

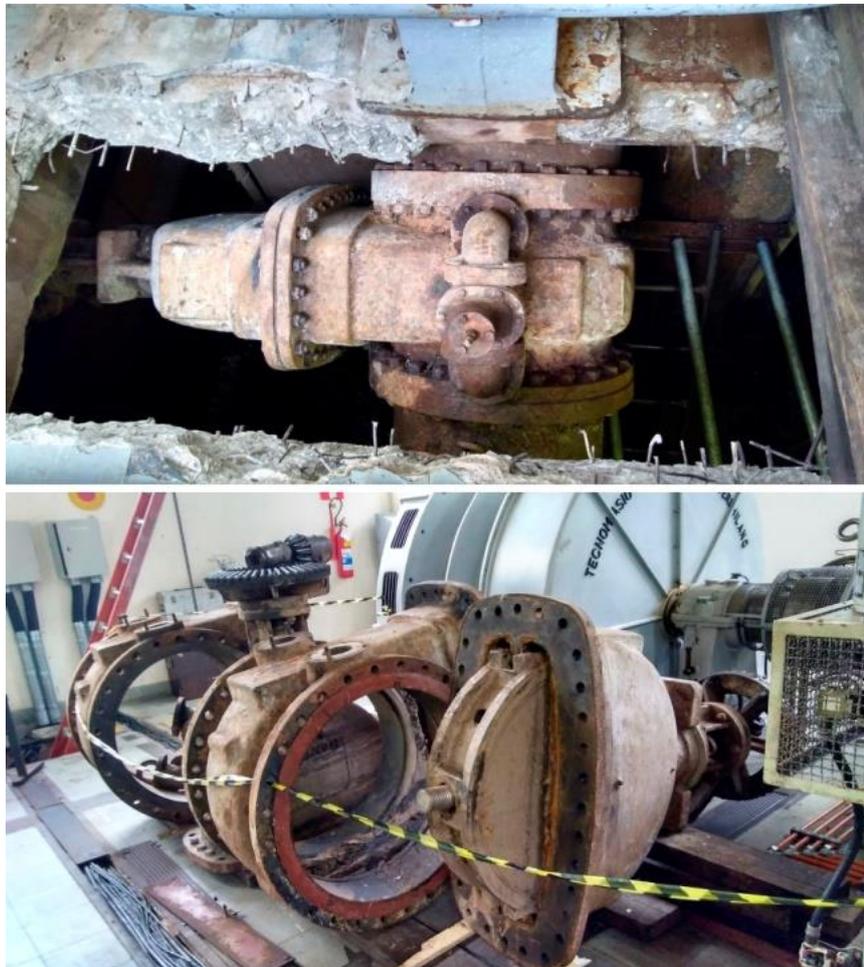


Figura 27 - Piso recortado para acesso e troca da válvula de adução acima; abaixo válvulas gaveta antigas retiradas do conduto. Fonte: o autor.

1. Demolição dos ressaltos civis das UH existentes;

2. Remoção de Entulhos;
3. Conferência topográfica e marcação do piso para locação dos outros equipamentos a montar;
4. Desmontagem dos acumuladores da UH existentes (alimentação do distribuidor);
5. Conferência topográfica e marcação do piso para instalação das UH novas;
6. Instalação dos chumbadores para montagem dos skids das UH;
7. Montagem das UH;
8. Grout dos skid;
9. Desmontagem dos cilindros hidráulicos existentes dos distribuidores;
10. Montagem dos novos cilindros hidráulicos dos distribuidores;
11. Furação e Adaptação dos pinos graxeiros;
12. Pré montagem do freio;
13. Montagem dos skids dos freios;
14. Adequação das pistas de frenagem nos volantes de inércia;
15. Montagem dos freios nos skids;
16. Alinhamento e nivelamento dos freios;
17. Grout dos skid;
18. Preparação para montagem das novas válvulas borboleta;
19. Desmontagem do acionamento das válvulas gavetas existentes;
20. Desmontagem das válvulas gavetas e by-pass existentes;
21. Medição e corte das seções de tubulação com flange;
22. Preparação dos flanges existentes para montagem das novas válvulas borboleta;
23. Posicionamento e ajuste do complementos com flange;
24. Solda do complemento lados com flanges existentes;
25. Posicionamento e ajuste das válvulas e flanges lado adução;
26. Fixação das válvulas nos flanges;
27. Ajuste e ponteamento do complemento nos flanges lado adução;
28. Solda do complemento lado adução;
29. Montagem dos cilindro hidráulico das novas válvulas borboleta;
30. Tratamento com pintura anti corrosiva nos pontos de solda;
31. Preparação para montagem das novas válvulas de by-pass;
32. Preparação das celas para montagem das novas válvulas de by-pass;
33. Solda dos flanges nos trechos retos;
34. Montagem das novas válvulas de by-pass;

35. Tratamento com pintura anti-corrosiva nos pontos de solda;
36. Conferência topográfica e marcação dos pontos de suportação das tubulações;
37. Fabricação e montagem dos suportes de tubulações dos trechos da UH até os distribuidores;
38. Fabricação e montagem dos suportes de tubulação do trecho do distribuidor até as válvulas borboleta e by-pass;
39. Fabricação e montagem dos suportes de tubulação do trecho da UH até os freios;
40. Montagem da tubulação e acessórios dos cilindros do distribuidores;
41. Montagem da tubulação e acessórios dos cilindros dos sistemas de freio;
42. Montagem da tubulação e acessórios dos cilindros das válvulas de by-pass;



Figura 28 - Acima visão da válvula borboleta nova instalada e adaptações para a válvula by-pass abaixo cilindro de atuação na válvula borboleta e flange de adaptação soldado. Fonte: o autor.

43. Montagem da tubulação e acessórios dos cilindros das válvulas borboletas;

44. Montagem de infraestrutura elétrica como fabricação dos suportes da infraestrutura no trecho de canaleta existente;
45. Identificação dos cabos a serem desconectados dos painéis de comando existente PC2 e PC4;
46. Conferência de medidas dos novos painéis de comando PC2 e PC4, com as medidas de campo;
47. Conferência de calibração os instrumentos a serem instalados;
48. Fabricação e montagem dos suportes da infraestrutura dos painéis das UH para os equipamentos e instrumentos;
49. Montagem de eletrodutos no trecho de canaleta existente;
50. Montagem de eletrodutos no trecho novo de infraestrutura;
51. Montagem dos eletrodutos e acessórios no trecho dos painéis das UH para os equipamentos e instrumentos;
52. Desconexão e isolamento dos cabos dos painéis de comando existentes;
53. Retirada dos painéis de comando existentes;
54. Montagem dos painéis de comando novos;
55. Fixação dos painéis de comando novos;
56. Montagem dos sensores de posição dos distribuidores;
57. Montagem dos sensor de velocidade (Pick Up);
58. Montagem dos transdutores de pressão;
59. Montagem dos sensores de temperatura dos mancais;
60. Montagem dos sensores de temperatura dos estatores;
61. Montagem dos sensores de quebra de links;
62. Lançamento de cabos do campo para o QDI;
63. Lançamento de cabos dos painéis de comando para o QDI e para os painéis da UH;
64. Lançamento de cabos dos painéis da UH para os equipamentos e instrumentos;
65. Ligação de cabos no QDI e no campo;
66. Ligação de cabos no painel de comando (PC02 e PC4) e no QDI;
67. Instalação e montagem dos TC's e TP's de medição e de proteção;



Figura 29 - TC's e TP's de proteção e medição novos instalados. Fonte: o autor.

68. Ligação de cabos nos painéis das UH e nos equipamentos e instrumentos;
69. Fabricação e montagem da suportação do painel de serviços comuns;
70. Montagem do painel de serviços comuns;
71. Montagem do painel de controle do limpa grades;
72. Lançamento de cabos de controle do painel do limpa grades;
73. Ligação dos cabos do painel do limpa grades;
74. Ligação dos cabos das comportas;
75. Adaptações no conjunto motoredutor das comportas;
76. Montagem dos sensores de posição da comporta;
77. Fabricação de suportes para o painel de controle e UPS;
78. Montagem dos suportes para o painel de controle e UPS;
79. Montagem do painel de controle e UPS da comporta desarenadora;
80. Lançamento de cabos de força e controle da comporta desarenadora;
81. Ligação dos cabos da comporta desarenadora;

82. Preparação de materiais para adequação da estrutura da comporta;
83. Montagem das estruturas de fechamento da comporta;
84. Pré montagem do conjunto moto-reductor da comporta desarenadora;
85. Fabricação e montagem de suportes da comporta desarenadora;
86. Montagem do conjunto moto reductor da comporta desarenadora;
87. Montagem do componentes para retrofit do painel de controle;
88. Montagem dos equipamentos de comunicação;
89. Lançamento de cabos de controle e comunicação;
90. Montagem de conversor 485/Ethernet no painel de serviços comuns;
91. Lançamento dos cabos do painel de serviços comuns para o campo;
92. Ligação dos cabos no painel de serviços comuns e no campo;
93. Configurações dos sistemas de automação;
94. Programação PLC AUX / PLC'S UG1 E UG2 / IHM;
95. Configuração da VPN com o COG;



Figura 30 - Painel de controle PC02 antigo à esquerda e PC02 novo à direita. Fonte: o autor.

5.1.4 Comissionamento

Para conduzir a etapa de comissionamento foi seguido o proposto de subdivisões em:

- a) Planejamento do comissionamento;
- b) Completação mecânica;

- c) Pré-comissionamento;
- d) Testes de comissionamento;
- e) Elaboração do relatório de comissionamento;
- f) Transferência de custódia e aceite de empreendimento/projeto.

Os sistemas, subsistemas e itens comissionáveis da usina elaborada no plano específico durante o pré-comissionamento foram definidos da seguinte forma:

a) Sistemas Comuns

a.1. Subsistema – Painel de serviços comuns

a.1.1. Itens comissionáveis:

- a.1.1.1. PLC;
- a.1.1.2. Cabos de força;
- a.1.1.3. Cabos de controle;
- a.1.1.4. Aterramento.

b) Sistema UG1

b.1. Subsistema – Turbina

b.1.1. Itens comissionáveis:

- b.1.1.1. Instrumentação;
- b.1.1.2. Mancais.

b.2. Subsistema – Gerador

b.2.1. Itens comissionáveis:

- b.2.1.1. Instrumentação;
- b.2.1.2. Cabos;
- b.2.1.3. Excitatriz;
- b.2.1.4. Mancais.

b.3. Subsistema – UH

b.3.1. Itens comissionáveis:

- b.3.1.1. Instrumentação;
- b.3.1.2. Cabos de força;
- b.3.1.3. Cabos de controle;
- b.3.1.4. Cabos de instrumentação;
- b.3.1.5. Motores;
- b.3.1.6. Válvulas de controle;
- b.3.1.7. Painel de comando;

- b.4. Subsistema – Válvulas de adução
 - b.4.1. Itens comissionáveis:
 - b.4.1.1. Válvula by-pass;
 - b.4.1.2. Cilindro hidráulico;
 - b.4.1.3. Cabos de controle;
 - b.4.1.4. Instrumento;
 - b.4.1.5. Válvulas borboleta;
 - b.5. Subsistema – Painel de controle - PC2
 - b.5.1. Itens comissionáveis:
 - b.5.1.1. Cabos de força;
 - b.5.1.2. Cabos de controle;
 - b.5.1.3. Cabos de instrumentação;
 - b.5.1.4. PLC;
 - b.5.1.5. Relés;
 - b.5.1.6. Regulador de velocidade;
 - b.5.1.7. Regulador de tensão;
 - b.5.1.8. Comunicação dos sistema;
 - b.5.1.9. Parametrização das malhas de controle;
- c) Sistema UG2
 - c.1. Subsistema – Turbina
 - c.1.1. Itens comissionáveis:
 - c.1.1.1. Instrumentação;
 - c.1.1.2. Mancais.
 - c.2. Subsistema – Gerador
 - c.2.1. Itens comissionáveis:
 - c.2.1.1. Instrumentação;
 - c.2.1.2. Cabos;
 - c.2.1.3. Excitatriz;
 - c.2.1.4. Mancais.
 - c.3. Subsistema – UH
 - c.3.1. Itens comissionáveis:
 - c.3.1.1. Instrumentação;
 - c.3.1.2. Cabos de força;
 - c.3.1.3. Cabos de controle;

- c.3.1.4.Cabos de instrumentação;
 - c.3.1.5.Motores;
 - c.3.1.6.Válvulas de controle;
 - c.3.1.7.Painel de comando;
 - c.4. Subsistema – Válvulas de adução
 - c.4.1. Itens comissionáveis:
 - c.4.1.1.Válvula by-pass;
 - c.4.1.2.Cilindro hidráulico;
 - c.4.1.3.Cabos de controle;
 - c.4.1.4.Instrumento;
 - c.4.1.5.Válvulas borboleta;
 - c.5. Subsistema – Painel de controle – PC4
 - c.5.1. Itens comissionáveis:
 - c.5.1.1.Cabos de força;
 - c.5.1.2.Cabos de controle;
 - c.5.1.3.Cabos de instrumentação;
 - c.5.1.4.PLC;
 - c.5.1.5.Relés;
 - c.5.1.6.Regulador de velocidade;
 - c.5.1.7.Regulador de tensão;
 - c.5.1.8.Comunicação dos sistema;
 - c.5.1.9.Parametrização das malhas de controle;
- d) Sistemas comportas de entrada
 - d.1. Subsistema comporta 1
 - d.1.1. Itens comissionáveis:
 - d.1.1.1. Painel de comando;
 - d.1.1.2. Cabos de força;
 - d.1.1.3. Cabos de controle;
 - d.1.1.4. Instrumentos de fim de curso e chave de posição;
 - d.1.1.5. Motor redutor.
 - d.2. Subsistema comporta 2
 - d.2.1. Itens comissionáveis:
 - d.2.1.1. Painel de comando;
 - d.2.1.2. Cabos de força;

- d.2.1.3. Cabos de controle;
- d.2.1.4. Instrumentos de fim de curso e chave de posição;
- d.2.1.5. Motor redutor.

5.2 O painel RTVAX

Um dos itens comissionáveis instalados na PCH de Caboclo foi o painel integrado de regulação de tensão, velocidade, excitação e automação – RTVAX da Reivax.

O RTVAX faz parte da linha POWER da Reivax que tem como objetivo fornecer soluções customizadas para centrais elétricas de médio e de grande porte. Este sistema foi desenvolvido e baseado na integração dos sistemas de regulação de tensão RTX, regulação de velocidade RVX também da Reivax, para otimizar todos os sinais e recursos em um único sistema automatizado. Além disto, o processador e a arquitetura de software podem também incorporar funcionalidades adicionais como a supervisão e a automação da unidade geradora.

O hardware de controle usado RTVAX POWER. foi desenhado para permitir a implementação de mais funcionalidades sem sacrificar a velocidade do processador e sua capacidade de memória, possibilitando assim combinar ambas as funções de regulação de tensão e regulação de velocidade e a automação da unidade geradora em um único hardware de controle.

As principais características desse sistema são:

1. Sistema Integrado de excitação, regulação e automação da UG;
2. Hardware expandido para automatismo de partida|parada e para supervisão e controle dos subsistemas da Unidade;
3. Automação pode ser implementada com CLP de mercado
4. Redundância dos canais de regulação e potência;
5. IHM Gráfica amigável;
6. Comunicação RS232, RS485, ETHERNET, IRIG-B;
7. Protocolos MODBUS RTU, MODBUS TCP, DNP3.0, IEC 60870, IEC 104, IEC 61850 e Protocolo MMS;
8. Funções e recursos avançados para diagnóstico, como Sequência de Eventos, Tendências, Data Logging, Simulador, entre outros;
9. Programabilidade IEC61131-3, Compatibilidade EMI IEC61000;
10. Normas IEEE 421, IEC 60308, recomendações do ONS e submódulos 3.6.

As funções de controle e proteção são:

1. Regulação Automática de tensão terminal do gerador (Automático);
2. Regulação de Corrente de Campo (Manual);
3. Controle de Potência Reativa;
4. Controle de Fator de Potência;
5. Excitação inicial em rampa ajustável;
6. Compensação de Reativo (droop);
7. Limitador de Sobrexitação (OEL, conforme IEE421);
8. Limitador de Subexcitação (UEL, conforme IEE421);
9. Limitador de Volts/Hertz;
10. Estabilizador de Sistema de Potência (PSS2A/B, conforme IEE421);
11. Proteções de sobrecorrente e sobretensão;
12. Proteção de falha para terra no rotor;
13. Monitoramento de condução dos tiristores;
14. Proteção do limite de tempo da excitação inicial;
15. Monitoramento por watchdog;
16. Proteção de sobrecorrente e monitoramento de temperatura do transformador de excitação.
17. Regulação Automática de velocidade da turbina (Automático);
18. Controle automático de Potência ativa, com estatismo de potência;
19. Ajustes de ganhos para condições on-line e o-line;
20. Controle manual de posição do servomotor (Manual);
21. Controle automático de nível;
22. Controle automático de vazão;
23. Transferência entre modos de controle e canais redundantes de regulação;
24. Automatismo de partida e parada;
25. Sincronismo automático e carregamento automático de carga até valor pré definido;
26. Partida e parada em controle manual;
27. Realimentação de posição dos atuadores e servomotores (LVDT);
28. Seleção de controle Local / Remoto
29. Partida e parada com ajuste da taxa de variação da rotação;
30. Prevenção contra potência reversa;

31. Limitadores de abertura e de potência;
32. Supervisão de Medição de Velocidade, de Potência, de Posição do Servomotor e da Válvula e de Comunicação.

As principais vantagens desse sistema são:

- a) Confiabilidade aumentada pela redução de componentes;
- b) Hardware é expandido para automatismo de partida/parada e para supervisão e controle dos subsistemas da Unidade Geradora.
- c) Economia nos custos e redução de espaço físico;
- d) Diminuição das interfaces de engenharia e de comissionamento;
- e) Fácil instalação, comissionamento e manutenção.

6 MANUAL DE COMISSIONAMENTO DO PAINEL RTVAX

Em Reivax (2007), o comissionamento dos sistemas integrados de regulação da Reivax devem seguir os manuais internos da empresa e podem ser feitos de plantas inteiras de uma usina (nova) ou numa modernização de equipamentos específicos. Ainda em Reivax (2007), temos:

O Comissionamento é a colocação em operação de um gerador e/ou turbina, não se trata somente da instalação mas sim de toda a parametrização das malhas de controle e do sistema de potência encontrados nos sistemas de regulação, tais como os Reguladores de Tensão, Reguladores de Velocidade e Reguladores de Tensão Velocidade. (REIVAX, AUTOMAÇÃO E CONTROLE, 2007)

O comissionamento deve ser pautado em normas de segurança, procedimentos e precauções, visto que, os reguladores, o gerador, a turbina e seus periféricos são de elevado valor e ainda por se tratar da segurança daqueles envolvidos nos testes principalmente com equipamentos energizados.

No manual da Reivax (2007) é recomendado que o comissionamento começasse a partir de uma reunião com os envolvidos e interessados, a fim de discutir o escopo do trabalho, cronograma e viabilização do trabalho de outras equipes simultaneamente. Assim, pode-se entender que dessa reunião seja aprovado o plano definitivo e o detalhamento de execução do comissionamento do subsistema/item discutido no capítulo 3.

Após o comissionamento, a empresa Reivax é responsável por emitir um relatório de comissionamento que deve constar, se possível em ordem cronológica, procedimentos de instalação adotados, os testes realizados, os dados obtidos, tabelas, registros de ajustes, fotos, gráficos, desenhos funcionais, informações diversas e, por fim, confirmar o desempenho do equipamento em diversas condições operativas.

Ainda, conforme sugere Reivax (2007), os seguintes procedimentos devem ser adotados para um bom comissionamento:

- a) Informações gerais;
- b) Verificações iniciais;
- c) Ensaios em água morta do regulador de velocidade;
- d) Ensaios dinâmicos a vazio do RV e do RT;
- e) Sincronismo;
- f) Ensaios dinâmicos em carga dos reguladores de velocidade e tensão;
- g) Ensaios de rejeição de carga;

- h) Tabelas de parâmetros;
- i) Conclusão.

6.1 Informações gerais

Nessa secção devem conter algumas informações básicas do comissionamento como:

- a) Nomes dos envolvidos;
- b) Tempo previsto do comissionamento;
- c) Informações gerais do equipamento;
- d) Treinamentos.

6.1.1 Nomes dos envolvidos

Na obtenção dos nomes e as atividades pelos quais são responsáveis dos principais envolvidos durante o processo de comissionamento, tais informações devem estar contidas no relatório de resultados de comissionamento, este item tem por objetivo localizar o nome de qualquer um dos participantes, após o comissionamento, para uma eventual assistência técnica.

Para isso, deve ser preenchida uma tabela referente a este item, com os nomes o telefone e principalmente o equipamento que a pessoa é responsável.

6.1.2 Tempo previsto do comissionamento

A partir do cronograma e da reunião inicial do planejamento de comissionamento é possível fazer apenas uma estimativa do tempo que este levará, pois tais atividades podem implicar na liberação da unidade geradora.

6.1.3 Informações gerais do equipamento

A obtenção das informações principais relativas aos produtos fornecidos pela Reivax, como reguladores e seus subsistemas, bem como as informações do gerador também devem ser registradas no relatório de resultados de comissionamento.

Para isso deve ser preenchida uma tabela referente aos dados dos equipamentos, tais como o gerador, excitatriz, transformadores e etc.

6.1.4 Treinamentos

O Manual de Testes e Comissionamento recomenda que seja ministrado um treinamento pela Revaix para os operadores e para a equipe de manutenção, objetivando uma orientação quanto

a operação e manutenção do equipamento, visando o atendimento das expectativas do cliente em relação ao equipamento.

6.2 Verificações iniciais

O comissionamento propriamente dito é iniciado neste ponto, aqui são feitas diversas verificações relacionadas ao transporte do equipamento, sua instalação, interligação do mesmo com seus periféricos e a planta e suas alimentações.

6.2.1 Inspeções dos equipamentos

A inspeção deve ser realizada verificando a existência de danos no equipamento causados pelo transporte ou instalação, tanto nas partes externas como nas partes internas. Em caso de avaria grave ou instalação inadequada, a Reivax deve ser comunicada imediatamente para possível substituição e/ou reparação do componente e anotado no relatório de resultados de comissionamento. Os resultados dessa inspeção devem-se ser preenchidos numa tabela referente a este item.

6.2.2 Reaperto dos componentes

O equipamento, durante o transporte ou instalação, pode sofrer vibração e solavancos, assim, alguns componentes podem se soltar, ou afrouxar, como por exemplo os bornes de cabos e fios, os barramentos de potência, os racks, sensores do painel, os ventiladores, elementos da ponte, etc. Portanto é necessário o reaperto dos componentes, sendo isso de fundamental importância para o comissionamento e para a durabilidade do equipamento aumentando o MTBF³ do mesmo.

6.2.3 Verificação das alimentações

No momento da verificação deve-se medir as tensões de alimentação do equipamento bem como as geradas pelo mesmo. Nesse processo, é importante ter atenção especial para os sinais de alimentação que saem do painel para outros subsistemas, observando assim que os mesmos estejam corretos. É importante também desconectar os cabos de componentes externos que são alimentados pelo painel e não deva ser alimentado nesta etapa, essa verificação do projeto elétrico é essencial nessa etapa.

³ MTBF: *Mean Time Between Failures*, tempo médio entre falhas.

Ao final, devem ser preenchidas tabelas de verificação das alimentações e observar as tolerâncias, calculando e confirmando as mesmas para que todas se encontrem dentro da tolerância aceitável e previstas no projeto.

6.2.4 Verificação de entradas digitais

A validação das interfaces não se restringe a validar o projeto de interface e sim a validar também toda a integração do equipamento à filosofia de funcionamento, operação e às proteções, para plantas novas e modernizadas, ou seja, testar-se ponto a ponto.

A primeira interface a ser testada são as entradas digitais do sistema de regulação, que são os estados e comandos recebidos, Estes estados e comandos geralmente chegam pela régua B do equipamento e depois passam pelos acopladores de entrada (AE), onde os sinais serão convertidos de 125Vcc (tensão de interface com a usina) para 5Vcc (tensão de trabalho da CPU/CPX) chegando então até a unidade de processamento do equipamento. Todos os sinais do diagrama elétrico devem ser testados, e confirmados na tabela de entradas digitais do Relatório de Resultados de Comissionamento.

6.2.5 Verificação de saídas digitais

Assim como efetuado no caso das entradas digitais, são testados também as saídas e é preenchido a tabela de comandos e estados enviados do relatório de resultados de comissionamento, indicando também os elementos simulados.

6.2.6 Verificação da interface com a usina e proteções

Nessa etapa devem-se testar todos os estados, proteções e comandos externos ao painel, oriundos da planta (usina), como por exemplo, a desexcitação, a parada do grupo gerador validando a lógica implementada bem como o projeto de interligação do painel com o sistema implantado na planta (usina).

O procedimento utilizado é o mesmo das entradas e saídas digitais do painel, somente agora terá que acionar os sensores e estados remotos de forma a comprovar que os mesmos estejam sinalizando corretamente no painel de regulação da Reivax.

6.2.7 Verificação da interface de comunicação

É comum a troca de sinais analógicos e digitais entre os sistemas de regulação e o automatismo empregado na planta (usina), da mesma forma que os sinais físicos são testados os sinais que veem na forma de comunicação devem ser testados e comprovados. Para isso

será necessário que exista pessoa especializada para “forçar” os sinais no sistema supervisório, e enviar valores analógicos para o sistema de regulação. Os sinais enviados pelo painel de regulação também podem ser simulados. Para isso também é importante ter em mãos a tabela de conversão do regulador com o endereçamento de cada variável para que o pessoal da automação possa enviar os sinais nos endereços certos.

6.3 Ensaios de água morta

Nessa etapa serão realizados os testes que necessitem da unidade geradora parada, ou seja, a caixa espiral e o conduto forçado devem estar totalmente drenados e as conexões entre a saída da excitatriz e o campo do gerador devem estar desconectadas. Nessa parte dos testes as correntes e tensões geradas e a movimentação das partes mecânicas podem ser letais, portanto os devidos cuidados com segurança devem ser tomados.

Este procedimento visa à viabilidade da execução dos ensaios, garantindo a segurança para o conjunto e pessoas envolvidas. Em toda esta etapa, é trabalhado em malha aberta para o sistema de excitação, e em malha aberta (seguida de controle de posição) para o sistema de regulação de velocidade.

6.3.1 Disparo da ponte e pré-excitação

O Módulo DRV é o componente retificador que excita o campo da excitatriz, nele está a ponte trifásica de diodo com saída controlada a IGBT⁴. Este ensaio visa a verificação quanto a confirmação do correto funcionamento do módulo DRV para excitação do campo do gerador e deve ser realizado utilizando um osciloscópio conectado diretamente no barramento CC de saída e uma fonte externa de 220V conectada á entrada do DRV, buscando-se a confirmação de que todos os pulsos gerados no disparo dos transistores IGBT.

Deve-se obter a retificação máxima com disparo de 100% evidenciando a máxima retificação garantindo que o Driver DRV está operacional. Os testes dos Driver's devem ser executados utilizando o modo de teste disponível como “comando em malha aberta ou controle direto” em que o disparo é definido pelo operador, o que garante exatidão no comando.

⁴ IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor - semicondutor de potência que alia as características de chaveamento dos transistores bipolares com a alta impedância dos MOSFETs apresentando baixa tensão de saturação e alta capacidade de corrente.

O circuito de pré-excitação tem como função propiciar corrente de campo a unidade geradora, de modo a promover uma excitação parcial suficiente para sustentar o ponto de operação da unidade geradora e elevar a tensão terminal até seu valor nominal.

A pré-excitação é proveniente da alimentação trifásica auxiliar da usina, quando desta forma convencionou-se chama-la de pré-excitação CA, a tensão auxiliar é adequada a níveis usuais através do transformador da pré-excitação sendo então retificado pela ponte de diodos da pré-excitação. A corrente é aplicada diretamente no campo da máquina no momento de fechamento do contator de campo.

A retirada da pré-excitação é realizada após a tensão terminal alcançar um valor de tensão terminal setado via IHM. Ao final, devem ser preenchidas tabelas referentes a este item com os resultados de disparo de ponte e polaridade de pré-excitação.

6.3.2 Verificação da isolação da cablagem do transformador de excitação da excitatriz e gerador

Antes da excitação do gerador é fundamental a verificação do nível de isolação do estator, do rotor, da cablagem, bem como verificar se a umidade ambiente afetou o mesmo, durante o tempo de parada ou durante a instalação. Se existir dúvidas com relação a estes dados a Reivax não autoriza a excitação do gerador uma vez que pode vir a comprometer o mesmo caso esteja com baixa isolação causando um curto ou até mesmo um incêndio durante a excitação do mesmo. Basicamente o ensaio é realizado utilizando um megôhmetro verificando através deste instrumento o nível de isolação do gerador. Os resultados de resistência de isolamento devem ser registrados em tabela no relatório de resultados de comissionamento.

6.3.3 Pressurização do sistema de óleo

Estando o circuito hidráulico montado ou realizado as alterações no sistema hidráulico deve ser feita a pressurização do sistema para verificar possíveis vazamentos, alterações no funcionamento, agarramentos, etc. Para a realização é importante a presença do responsável pela unidade hidráulica.

Nesse momento a atenção deve ser elevada, pois uma vez que uma linha de pressão com vazamento é um ponto de risco de acidente, bem como o comando indevido de abertura ou fechamento de uma válvula ou atuador pode ser perigoso ou causar danos aos equipamentos.

A avaliação da capacidade da unidade hidráulica é realizada para comprovação do dimensionamento da capacidade de movimentação da unidade hidráulica sem reposição da pressão pelas bombas. Ao final, deve ser preenchida uma tabela referente a este item para o Relatório de Resultados de Comissionamento.

6.3.4 Teste dos sensores

6.3.4.1 Sensor de deslocamento do distribuidor

Este sensor é utilizado para o deslocamento do servo do distribuidor. Este processo é realizado utilizando alimentação de 15VCC proveniente do regulador, o sinal de retorno varia de 0 a 10VCC indo da abertura ao fechamento respectivamente.

6.3.4.2 Sensor de rotação (Pickup) – Medição de Frequência

Os sensores de pickup são sensores de proximidade ópticos, que geram sinais em forma de onda quadrada. O sensor de medição de frequência por pick, junto a uma roda dentada com uma variação de 1,5 a 2mm. Serão instalados 2 sensores colocados 180° um do outro enviando assim 2 sinais de medição por pickup a CPU. O nível de sinal que o sensor é alimentado deve ser da ordem de 15V, nunca superior, uma vez que a entrada correspondente a medição destes sinais na unidade de processamento do sistema de regulação aceita até este nível de sinal. O Ajuste na IHM deste sensor para a transdução da frequência leva em conta o número de dentes da roda e a velocidade em rpm da turbina.

6.3.4.3 Medição de Frequência por sinal de TP

É a medição da rotação da máquina a partir do sinal de tensão oriundo do TP de uma das tensões de saída do gerador, normalmente da fase A, utiliza um conversor de sinais que converte a onda senoidal em uma onda quadrada de tensão compatível com a entrada de medição de frequência da unidade de processamento do sistema de regulação.

6.3.4.4 Esmagamento do atuador para ajuste mecânico

O esmagamento serve para ajustar o atuador de forma a obter o máximo fechamento do mesmo, que reflete no menor vazamento entre os elementos do atuador, dentro da turbina. O esmagamento do atuador, ou esmagamento das palhetas é um ajuste mecânico realizado pelo pessoal especializado na turbina, o regulador de velocidade somente tem a função de comandar o atuador neste ajuste, podendo não ser necessário caso existam comandos manuais na unidade hidráulica.

6.3.5 Avaliação da capacidade da unidade hidráulica

É realizada para comprovação do dimensionamento da capacidade de movimentação da unidade hidráulica sem reposição da pressão pelas bombas. Os dados obtidos de número de aberturas e fechamentos, bem como as pressões a cada iteração na unidade hidráulica, na tabela de avaliação de capacidade da UH.

6.3.6 Movimentação das válvulas e servomotores através do controle

A movimentação da válvula proporcional dos atuadores e válvula distribuidora (borboleta) é um dos primeiros ajustes em água morta. Para isso deve-se, através da IHM, aplicar os devidos valores de abertura e fechamento (10V e -10V) para acionar o servo desejado e verificar a atuação do mesmo bem como os seus respectivos sensores de atuação.

6.3.7 Ajuste de transdutores de posição

Para ajustar os transdutores de posição de válvulas, é necessário movimentar a válvula e conseqüentemente os atuadores. Comandar o valor máximo de abertura da válvula proporcional e depois o comando de máximo fechamento. O ajuste do transdutor é realizado verificando os extremos das excursões dos atuadores e válvulas quando em abertura e fechamento.

Os sinais provenientes do transdutor de posição do servomotor precisam ser condicionado de forma que a CPU interprete tais valores de tensão como sendo a posição correta dos mesmos. O objetivo destes ajustes é garantir a perfeita realimentação dos componentes mecânicos garantindo a boa qualidade da regulação. Os valores correspondentes para cada sensor de posição devem ser anotados nas tabelas correspondentes.

6.3.8 Máxima velocidade de abertura e fechamento do distribuidor

O ajuste de máxima velocidade de abertura e fechamento dos servos-motores é realizado através do comando de abertura e fechamento das válvulas reguladoras de vazão na saída da unidade hidráulica, caso não exista válvulas para este ajuste é necessário a colocação de giclês na linha de pressão nos comandos de abertura e fechamento de cada servo.

6.3.9 Ajustes das malhas de controle do atuador (distribuidor)

O posicionamento do servo-motor é realizado apenas pela malha da figura 31, a qual possui apenas a realimentação do servomotor, já que a válvula proporcional não necessita de realimentação, pois o seu posicionamento é feito pela eletrônica da mesma (*Onboard*

Electronic). Esta malha constitui-se em um controlador PID, combinado com um compensador de zona morta e/ou *dither*.

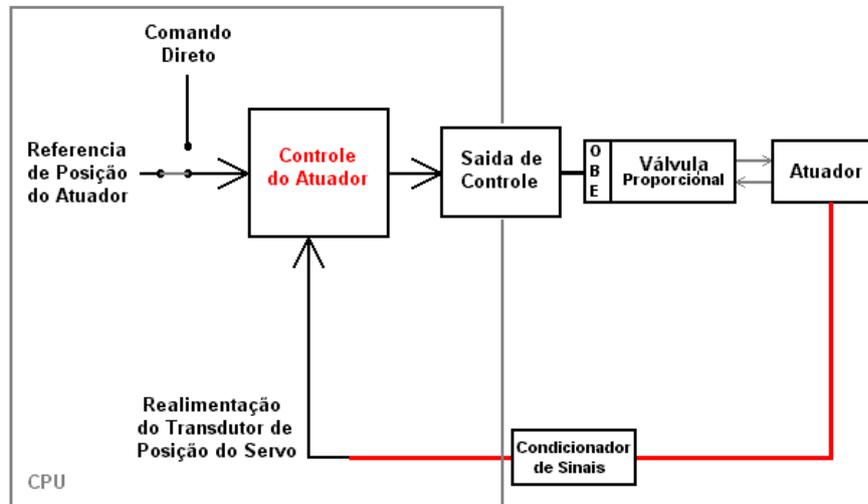


Figura 31 - Malha de controle do regulador de velocidade. Fonte: Reivax (2007)

Existe a opção de selecionar um comando direto da malha, este é utilizado em cada etapa de ajuste da dinâmica da malha. A saída de controle é que faz a conversão do controle em tensão para comandar a válvula proporcional e conseqüentemente pilotar a válvula distribuidora e o atuador. Na figura 32 temos a representação do controlador PID do atuador com os seus parâmetros que devem ser ajustados e preenchidos na devida tabela.

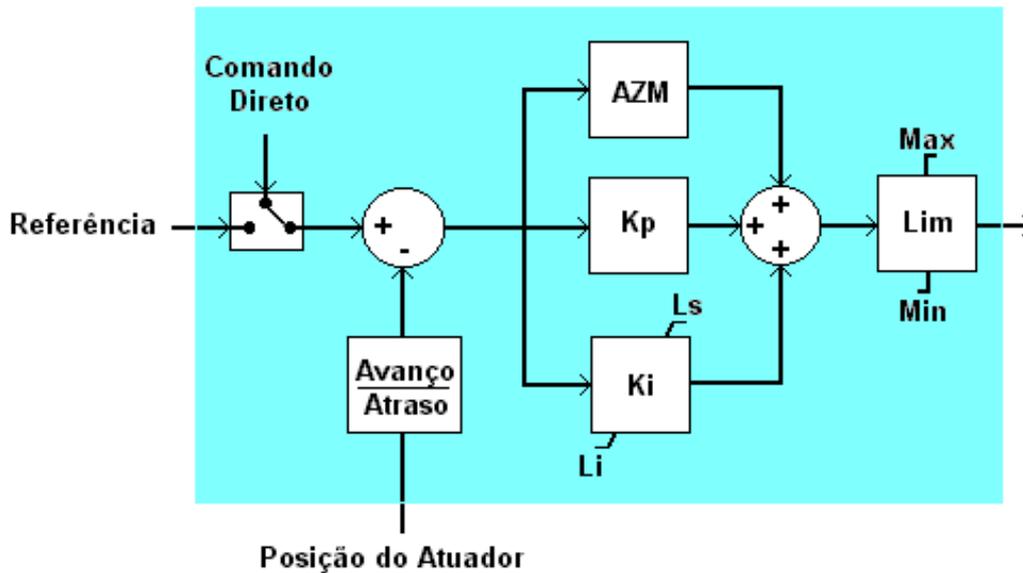


Figura 32 - Parâmetros da Malha de Controle do Atuador. Fonte: Reivax (2007)

Para se obter os parâmetros na forma de tentativa e erro deve-se (via software):

1. Zerar os ganhos integral K_i , como o ganho integral está zerado os limites da integração estão sem função, não sendo necessário modificar os valores, recomenda-se apenas que fique com valores em $L_s=1$ e $L_i=-1$ pu para etapas mais adiante.
2. Não é muito usual a malha de atuadores possuir o ganho derivativo na realimentação de posição (Avanço-Atraso ou K_d). Para isso ajuste o valor do avanço igual ao valor do atraso, no caso de K_d , zere o valor do mesmo.
3. Zerar a Anti Zona Morta, AZM
4. Mantenha os limitadores de saída da malha nos valores máximos de $LimMax=1$ e $LimMin=-1$ pu
5. Habilite o Comando Direto da referida malha de controle.
6. Comande o atuador para uma área de atuação em que o mesmo tenha uma resposta linear, por exemplo em torno de 0,5pu. Ao comandar um atuador pelo comando direto para verificar a dinâmica da malha deve-se levar em conta a máxima abertura ou máximo fechamento do atuador, pois estes dados acabam sendo limitantes para o processo de ajuste, sendo assim, procure dar comandos de degrau de amplitude que não atinja estes valores limitantes, em torno de 0,1 pu de movimentação.
7. Verifique a resposta do atuador apenas com o ganho proporcional, se possui muito *OVERSHOOT*, diminua o ganho proporcional K_p até que o mesmo não apresente *OVERSHOOT*, mesmo que o erro em regime fique acentuado.

8. Comece a Aumentar o ganho Ki de forma que corrija o erro em regime sem causar *OVERSHOOT*.
9. Ajustado o Ganho Ki, feche os valores dos limites de integração Ls e Li, verificando que a resposta da malha não se modifique, procure manter a simetria entre estes parâmetros, mantendo os valores iguais para Ls e Li.
10. Para ajustar o valor de AZM, somente no caso de haver não linearidades que leve a malha de controle a ciclos limites, isto é, pode se observar uma oscilação de baixa amplitude e baixa frequência.
11. Registre a dinâmica da malha de controle através de degrau de $\pm 0,4pu$, $\pm 0,2pu$ e $\pm 0,8pu$, na posição do atuador, com os sinais da(s) válvula(s), sinal da saída de controle e atuador e sinal de controle já devidamente convertido para pu.

6.3.10 Partida e parada em água morta

Agora é necessário confirmar que os requisitos que permitem a partida e parada da turbina, estejam em perfeito funcionamento e bem ajustados mecanicamente. Estes elementos são:

- a) Trava do Atuador Principal;
- b) Freio Mecânico;
- c) Válvula de Bloqueio;
- d) Comporta da Tomada d'água;
- e) Comporta de Emergência.

6.3.10.1 Trava do Atuador Principal

A trava do atuador (distribuidor) normalmente é empregada quando a UG estiver parada, então a trava é inserida bloqueando o movimento do atuador principal. A trava está inserida na lógica de Partida/Parada e é comandado pelo PCL, ela deve ser testada forçando o acionamento delas e confirmando o seu comando no distribuidor. Em seguida, deve-se desativar o comando e verificar a atuação em campo.

6.3.10.2 Freio Mecânico

O freio, assim como a trava, é um atuador periférico da UG e deve ser atuado durante a parada da máquina à baixas velocidades. Ensaiar o comando do freio mecânico é fundamental antes do giro, testando assim o acionamento das sapatas para garantir a parada do conjunto ao realizar o primeiro giro mecânico.

6.3.10.3 Válvulas ByPass e principal (Borboleta/Gaveta)

Antes dos ensaios da válvula ByPass e válvula principal, deve-se verificar se o conduto forçado está com água ou não. Caso esteja vazio o ensaio é mais tranquilo por não implicar em movimentar água. Porém na maioria das vezes estará pressurizado, logo a presença do especialista da TH deve ser requerida, inclusive para verificar vazamentos no conduto e na TH.

Durante os ensaios dessas válvulas a trava e os freios devem estar acionados, e o distribuidor deve estar fechado. Dessa etapa, deve-se registrar os tempos de enchimento da caixa espiral até a equalização da pressão, acionamento do relê indicador de equalização do conduto, os tempos de abertura e fechamento da válvula principal. Registrado as informações mencionadas deve-se ensaiar o bloqueio por emergência.

6.3.10.4 Comporta de Tomada D'água

O ensaio da comporta de tomada d'água como no caso das válvulas gavetas, deve levar em conta a presença de água ou não, caso a abertura desta comporta inicie o enchimento do conduto são necessários algumas precauções. A comporta de tomada d'água, normalmente possui um dispositivo chamado CRAK, isto é, a comporta abre poucos centímetros para fazer o enchimento da caixa espiral lentamente, sem comprometimento dos elementos das turbinas com golpes causados pela entrada da água. Durante este ensaio deve-se confirmar o acionamento do relê ou sensor que indica a equalização do conduto. Por fim novamente deve-se testar o bloqueio por emergência.

6.4 Ensaios dinâmicos à vazio do regulador de tensão/corrente;

Nesta etapa serão ajustados o RV para partida automática da turbina e operação em rotação nominal a vazio. Sendo também ajustado o RT para garantir a excitação da máquina e sincronismo nas próximas etapas.

Para realizar os ensaios à vazio são necessários que todos mecânicos, elétricos e hidráulicos, estejam prontos para a realização dos mesmos, bem como água em quantidade suficiente para pressurização do sistema, que deve ser feita pelos responsáveis da usina.

É importante salientar que as proteções relativas ao gerador devem estar ativas mesmo que com valores de ajuste mais abertos, bem com todo o intertravamento esteja satisfatoriamente testado para que se possa comandar o processo de partida da unidade geradora com segurança.

Os ensaios à vazio compreendem:

- a) Giro mecânico da máquina;
- b) Partida gradativa;
- c) Medição da velocidade / frequência usando Pickup e TP;
- d) Partida automática e parada normal;
- e) Ajuste da malha de controle de velocidade;
- f) Ajuste do dispositivo de sobrevelocidade mecânico;
- g) Ensaio do regulador de tensão à vazio;
- h) Excitação automática;
- i) Desexcitação normal;
- j) Ajuste da malha de regulação de tensão/corrente;
- k) Ajuste do limitador V/Hertz;
- l) Verificação da dupla alimentação do regulador;
- m) Ensaio de levantamento da curva de saturação de tensão e
- n) Ensaio de estabilidade em regime de regulação a vazio.

6.4.1 Giro Mecânico

O giro mecânico consiste em abrir levemente o distribuidor durante um pequeno intervalo de tempo, de maneira a girar a turbina em baixa velocidade. Este procedimento serve para verificar se há obstruções ao movimento de giro da turbina. Para efetuar o giro mecânico é de fundamental importância o aviso a todos os participantes do comissionamento para seu posicionamento estratégico.

6.4.2 Partida Gradativa

Neste ensaio é feita a elevação gradativa da velocidade de giro da turbina através do comando direto do limitador de abertura. Normalmente, inicia-se o ensaio elevando a rotação para 25%, logo após 50%, seguindo com 75% e finalmente rotação nominal, permanecendo a turbina em cada velocidade aproximadamente 10 minutos. A curva de aquecimento dos mancais é verificada em cada patamar de velocidade. O teste só prossegue quando houver estabilização da temperatura dos mancais. Outro ponto importante deste ensaio é a determinação dos parâmetros de abertura do limitador para Partida 1 e abertura do limitador para Partida 2.

6.4.2.1 Determinação dos limites de Partida 1 e Partida 2

O valor setado para o limitador de partida 1 fará com que durante o processo de partida o atuador abra até este valor (em percentual de unidade – pu), chegado até uma determinada rotação o regulador comuta o limitador do atuador para partida 2 (que deve ser inferior à

partida 1) fazendo com que a rotação aumente em um ritmo menor, isto é feito para impedir grandes *overshoots* de frequência. Nas figuras 33 e 34 tem-se a representação gráfica desses valores.

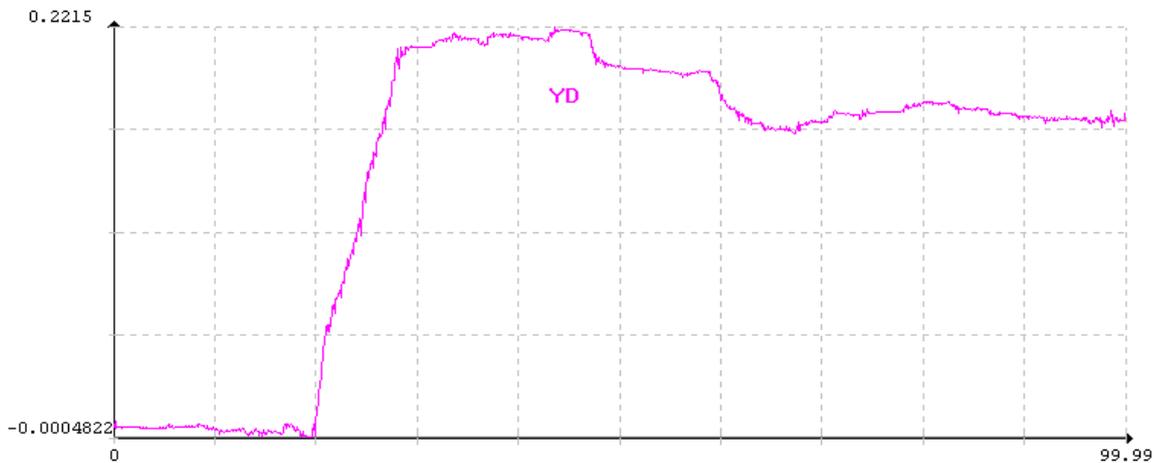


Figura 33 - Partida Automática – Posição de abertura do atuador. Fonte: Reivax (2007)

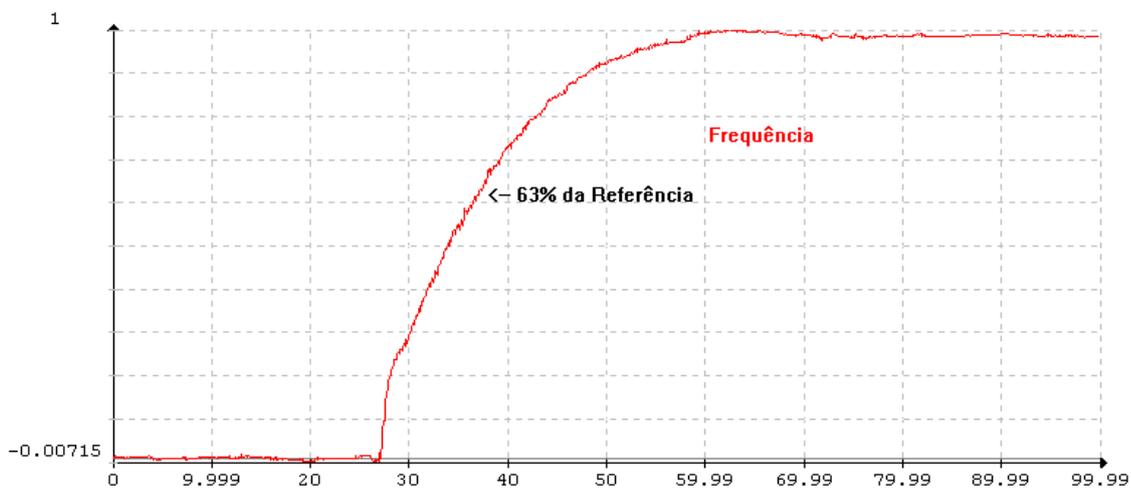


Figura 34 - Partida Automática - Evolução da rotação em frequência. Fonte: Reivax (2007)

Até 95% da rotação nominal o distribuidor encontra-se em 0,22 pu, este é o valor setado para Partida 1, após 95% da rotação o distribuidor fecha para uma posição de 0,19 pu (valor de Partida 2) e após atingida a velocidade nominal o sistema entra em modo de regulação fazendo com que o distribuidor vá para o valor que mantenha o sistema em 1pu de rotação a vazio.

Para alguns conjuntos de UG, uma determinada abertura (0,22pu para partida 1) não move o conjunto sendo necessário um valor maior apenas para vencer a inércia do conjunto. Ao atingir a velocidade de 100%, anote o valor de abertura do atuador. Para obter o valor do limitador de Partida 2 subtraia aproximadamente 0,03pu.

6.4.3 Medição da velocidade / frequência usando Pickup e TP

À medida que o ensaio de partida limitada vai transcorrendo é necessária a verificação da medição de frequência para o próximo ensaio que é de partida automática, para isso, é necessário a precisão das medições de frequência para o controle de velocidade nos dois modos possíveis que são:

- a) Através do TP que está ligado a saída de uma das fases do gerador, este sinal no painel do regulador é condicionado de forma a se obter uma onda quadrada que é medida pela unidade de processamento e transformada em velocidade. Para o gerador, ainda não excitado, a tensão remanente permitem a medição de velocidade.
- b) Sensor de pickup que mede a velocidade através de uma roda dentada que aproxima e afasta do sensor, fazendo com que o mesmo gere um onda quadrada que é medida pela unidade de processamento.

6.4.4 Partida Automática

Este ensaio se propõe a confirmar os valores do limitador de Partida 1, Partida 2 e velocidade de comutação de Partida 1 para Partida 2, de forma a obter a rapidez na sua partida, pouco *overshoot*, ausência de oscilações e nenhum erro em regime no controle de velocidade.

Durante este ensaio deve-se observar que a indicação de velocidade da máquina está aumentando. Caso isso não ocorra, comande parada imediatamente. Observe a estabilização da velocidade no seu valor nominal, ou seja, 1 pu, com pequeno *overshoot* (abaixo de 5%) e ausência de oscilações e erro em regime permanente. Registre a partida automática no relatório de resultados de comissionamento a fim de comparar o desempenho do regulador em futuros ensaios. Com os seguintes sinais: velocidade, posição do atuador (distribuidor), posição do limitador de abertura, posição da válvula (distribuidoras).

Após a partida automática comande a parada normal, verificando que todos os procedimentos da Parada foram executados. Meça os tempos para ajustar os valores de falhas e lógicas associadas a paradas, principalmente aplicação de freios e travas.

6.4.5 Ajuste da malha de controle de velocidade

A malha de controle de velocidade adotada pela Reivax pode ser descrita de uma forma simplificada em um controle PID. As diferenças básicas em relação ao PID clássico são as seguintes:

- a) PID é composto pela cascata de um controle PI com um D;
- b) D (T_n) processa apenas a variável desvio de frequência;
- c) PI é sintetizado por um bloco de ação derivativa (B_t, T_d) na realimentação o que é semelhante à um PI (cuja saída é *set-point* para o servomotor)
- d) Há uma ação adicional de *feed-forward* (Para rampeamento de potência, que veremos mais adiante).

Para obter-se um bom controle de velocidade é necessário basicamente:

- a) Ajustar a malha do atuador (servomotor) de modo a obter uma boa característica estática (rastreamento), com uma boa resposta dinâmica tanto para degraus positivos, quanto degraus negativos, em toda a faixa operativa, isto é obtido ajustando adequadamente as malhas de controle da válvula proporcional distribuidora e do próprio servo, nesta sequência;
- b) Ajustar os parâmetros T_n , B_t e T_d para o caso de máxima carga em operação isolada, na maior parte dos casos não é factível em comissionamentos, utilizam-se os parâmetros T_w (reação da coluna de água no conduto forçado) e $2H$ (constante de inércia da máquina, incluindo gerador e turbina) para pré-calibrar T_n , B_t e T_d ;

$$T_n = 0,5 T_w$$

$$B_t = 1,25 T_w / 2H$$

$$T_d = 3 T_w$$

No caso de não se utilizar ação derivativa os parâmetros ficam:

$$B_t = 2,5 T_w / 2H$$

$$T_d = 6 T_w$$

Calcule T_w e $2H$ através dos seguintes parâmetros:

$$T_w = Q_o \cdot \sum L / H_o g \sum A$$

$$2H = 5,48 \cdot 10^{-9} J (\text{RPM})^2 / \text{MVA}$$

Onde:

Q_o – Vazão em (m³/seg)

H_o – Queda em (m)

- $\sum L / \sum A$ – Somatório dos comprimentos pelas suas áreas transversais individualmente calculados. Para o caso de diferentes bitolas calcular cada relação e depois somar.
- g – Constante da aceleração da gravidade. 9,8 m/s².
- J – Inércia Total do Conjunto (Kg m³)
- RPM – Velocidade da TH
- MVA – Potência total em mega Volt-Amper
- Parâmetros desta ordem de grandeza geram bons controles, desde que haja pouco atraso na parte hidráulica e T_w e $2H$ encontrem-se nas faixas “normais”.

Na figura 35 está representado o diagrama de blocos básico da malha de controle de velocidade. As faixas de valores típicos para a malha de controle de velocidade da Reivax se encontram na tabela 3.

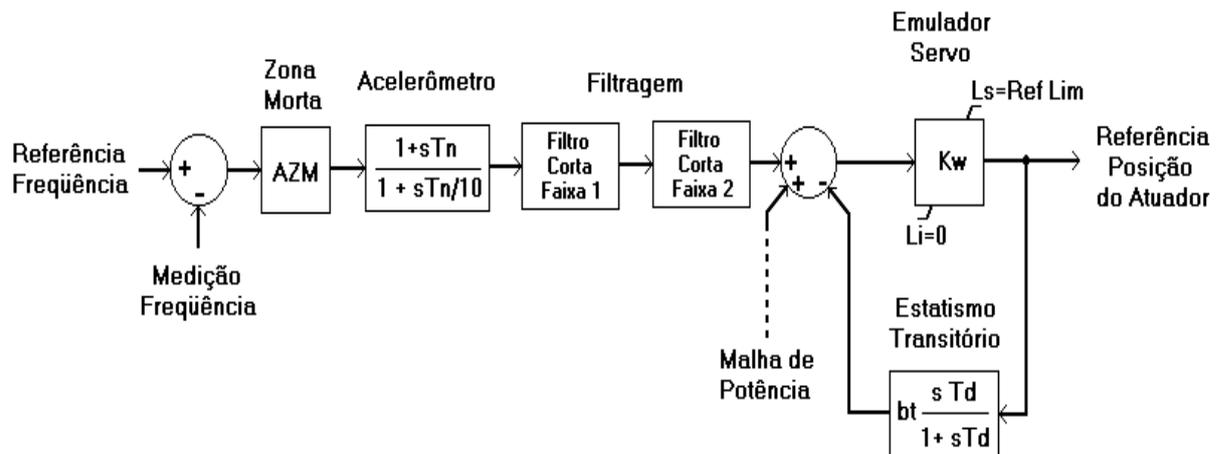


Figura 35 - Malha de Controle de Velocidade. Fonte: Reivax (2007)

PARÂMETRO	FAIXA DE VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
AZMP	0 a 0,02	0.0	Zona Morta Positiva de frequência
AZMN	0 a 0,02	0.0	Zona Morta Negativa de frequência
Tn	0 a 1,0	0,00	Constante Acelerométrica
Corta Faixa 1	10 – 120Hz	60Hz	Filtro Corta Faixa em Hertz na Frequência Setada
Corta Faixa 2	30 – 150Hz	120Hz	Filtro Corta Faixa em Hertz na Frequência Setada
Bt	0.1 a 1	Faixa	Estatismo transitório, Constante de amortecimento
Td	6,0 a 10,0	Faixa	Estatismo transitório
Kw	10 a 50	20	Ganho da malha de Controle de Velocidade e Potência

Tabela 3 - Valores típicos para a malha de controle de velocidade. Fonte: Reivax (2007)

A dinâmica da malha de controle de velocidade pode ser observada através da resposta a um degrau na referência de velocidade, observa-se assim a resposta do sistema com o menor *overshoot* e sem gerar oscilação. Recomenda-se um degrau de aproximadamente 5% (0,05 pu), para analisar a dinâmica da retomada da frequência. Antes de ajustar a dinâmica através da resposta a um degrau, o controle de velocidade deve ser ajustado para que não tenha oscilação em regime.

Para isso, pré ajuste os valores de Kw, Bt, Td, Tn, AZM Positiva, AZM Negativa e a Filtragens Corta Faixa 1 e Corta Faixa 2 conforme as fórmulas, tabelas e considerações descritas anteriormente na IHM. O ganho da malha de controle de velocidade Kw, também é o ganho quando em controle de potência, assim sendo, o ajuste da malha de potência também deve contemplar o mesmo ganho, recomenda-se utilizar como valor inicial 20.

Ao finalizar os ajustes deve-se observar as respostas ao degrau de 5% e 3% positivos e negativos na referência de frequência de cada registro, com os sinais de posição, das válvulas, atuador, referência de velocidade e frequência. Os dados obtidos devem ser registrados no Relatório de Resultados de Comissionamento.

6.4.6 Ajuste do dispositivo de sobrevelocidade mecânico

O ensaio de ajuste do dispositivo de sobrevelocidade mecânico consiste em elevar a rotação da turbina até o nível ajustado nas proteções contra sobrevelocidade de maneira a comprovar suas atuações. Toda UG, possui uma resistência a sobrevelocidade por um determinado tempo, normalmente pequeno, da ordem de segundos. Recomenda-se realizar o ensaio de sobrevelocidade mecânica com o sistema desexcitado. Este ensaio por ser danoso a TH e ao gerador, portanto, devem ser realizado com rapidez sem submeter os equipamentos a esforços

desnecessários. A distância entre o pêndulo e o batente da válvula do dispositivo de sobrevelocidade varia para cada unidade geradora.

6.4.7 Ensaios da Regulação de Tensão à vazio

Os ensaios da regulação de tensão compreendem no ajuste dos transdutores, que é realizado com o conjunto turbina gerador girando e excitado através da excitatriz rotativa com uma alimentação auxiliar, tal qual foi realizado no ensaio de disparo da ponte. A diferença neste caso é que o campo do gerador estará conectado na ponte do regulador de tensão.

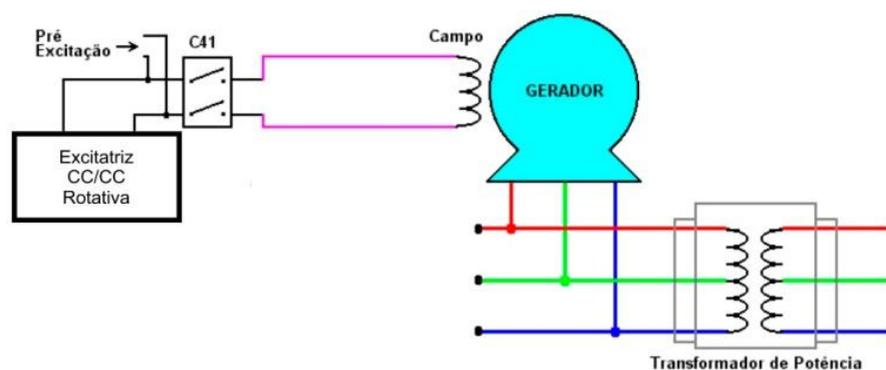


Figura 36 - Circuito de Potência da Regulação de Tensão. Fonte: Adaptado Reivax (2007)

O pré-ajuste da transdução do regulador de tensão é feito em malha aberta. Todas as considerações feitas para o ensaio de disparo da ponte continuam valendo para estes ensaio, sendo agora, com atenção redobrada uma vez que o gerador passa a ser energizado.

Recomenda-se a mesma instrumentação utilizada no ensaio de disparo da ponte, isto é, osciloscópio no barramento de campo Vcc da ponte (campo do gerador), bem como multímetro com leituras em milivolts para ajustar a corrente de campo no shunt. O primeiro ensaio desta etapa a ser realizado é o de curto circuito

6.4.7.1 Ensaio de curto circuito do gerador com alimentação externa

O ensaio de curto circuito do gerador consiste em curto circuitar a saída do mesmo para a circulação de correntes, sendo que também pode ser realizado através de um curto na saída do transformador elevador.

O objetivo principal deste ensaio é a verificação e circulação de corrente pelos componentes do sistema de geração, tais como: transformador de saída, transformador de excitação e os TC's de proteção e medição.

6.4.7.2 Ajuste da transdução de tensão terminal

O ensaio de ajuste da transdução de tensão terminal é realizado com o conjunto turbina gerador girando e a excitação no campo do gerador, obtendo assim na saída do gerador tensão terminal suficiente para sensibilizar os instrumentos. É importante antes de realizar o ensaio fazer o cálculo de qual o valor de tensão esperado na entrada da régua B, uma vez que existem normalmente duas sequência de transformadores de potencial, o primeiro junto a saída do gerador e o segundo dentro do painel do regulador de tensão para adequar e isolar a unidade de processamento.

6.4.7.3 Ajuste da transdução de corrente e tensão de campo

A corrente de campo em geral é obtida através de um shunt conectado ao barramento de saída da excitatriz, ligado ao campo do gerador. Sendo assim é importante saber a relação de corrente/tensão do shunt, para ajustar o valor de tensão que está sendo observado junto ao regulador.

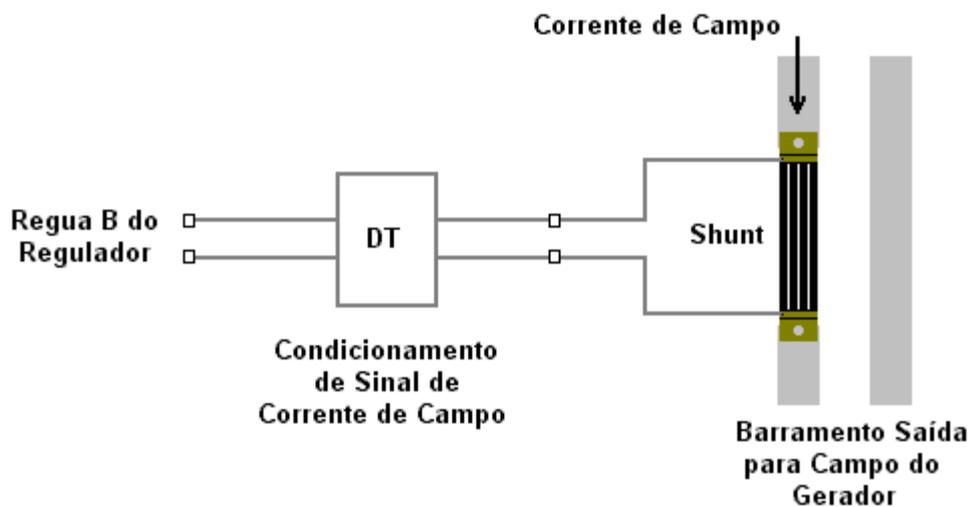


Figura 37 - Medição da Corrente de Campo. Fonte: Reivax (2007)

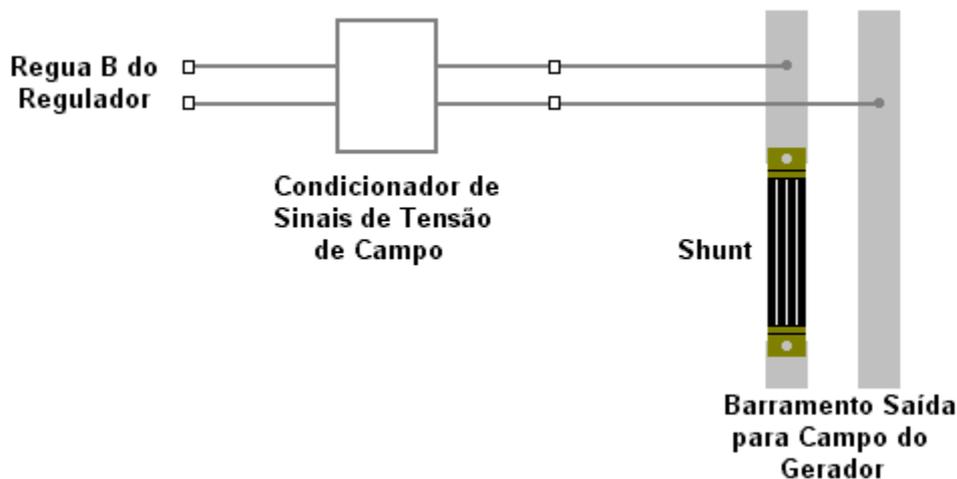


Figura 38 - Medição da tensão de Campo. Fonte: Reivax (2007)

Para o ajuste da transdução de tensão terminal, deve-se ajustar a corrente de campo para o valor de tensão terminal próximo a nominal. Medir o valor de saída do shunt em milivolts, observando a relação do shunt. Esta medida também pode ser feita na régua intermediária entre o condicionamento de sinais e o shunt, verificando junto aos diagramas elétricos do projeto da usina.

Em seguida, medir o valor da saída do condicionamento de sinais de corrente de campo. Confirme que o valor medido na saída do condicionador esteja chegando à régua B do regulador (conforme borne do projeto). Calcule o valor da corrente de campo através da relação do shunt com a medida obtida. Considere que o valor da tensão de campo para tensão terminal nominal a vazio = 1pu. Anote os dados deste ensaio na tabela do Relatório de Resultados de Comissionamento.

Ao conectar/desconectar a realimentação de tensão da saída do gerador procure verificar se a sequência de fases está de acordo com o projeto. Para o ensaio de ajuste de transdutores será necessário desconectar a realimentação, conectando a fonte auxiliar de alimentação, sendo importante que seja verificado a sequência de fase desta alimentação.

6.4.8 Excitação Automática

Na excitação automática auto-realimentada é realizada normalizando todas as conexões modificadas anteriormente para os ensaios de ajustes de transdutores, fechando assim a malha de potência conforme a figura 36.

Agora serão ensaiados todos os componentes de potência da malha fechada de regulação de tensão, sendo importante que o ensaio seja feito com cautela e segurança. Até este momento

foram ensaiados os componentes individualmente, e apesar de funcionarem nesta condição, as conexões entre os mesmos devem ser verificadas e confirmadas a fim de evitar danos a qualquer componente.

Antes da excitação automática completa, levando o gerador à tensão nominal, verifica-se a pré excitação do gerador elétrico. Depois, deve-se realizar uma excitação gradativa até a nominal levando a tensão de forma a atingir a nominal ao poucos.

6.4.8.1 Verificação do controle do sistema de excitação inicial

Antes de auto excitar o gerador elétrico, é importante comprovar o correto funcionamento do circuito de pré excitação de forma a garantir um boa excitação do gerador. Os parâmetros de ajuste podem ser vistos na tabela 4.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Vt pré	0,1 a 0,6pu	0,3	Tensão sai pré excitação, desabilitando o Relé RP (Regulador Pronto)
Ic pré	0,1 a 0,6pu	0,3	Corrente sai pré excitação, desabilitando o Relé RP (Regulador Pronto)

Tabela 4 - Parâmetros que ajustam a pré-excitação. Fonte: Reivax (2007)

Nessa etapa os sinais de tensão terminal, sinal de controle do regulador de tensão, frequência, referência do regulador de tensão são colhidos pela IHM e armazenada durante a pré excitação. Esses sinais são armazenados em forma de gráfico e devem ser registrados no Relatório de Resultados de Comissionamento juntamente com os reajustes necessários dos valores de Vt sai pré excitação e Ic sai pré excitação.

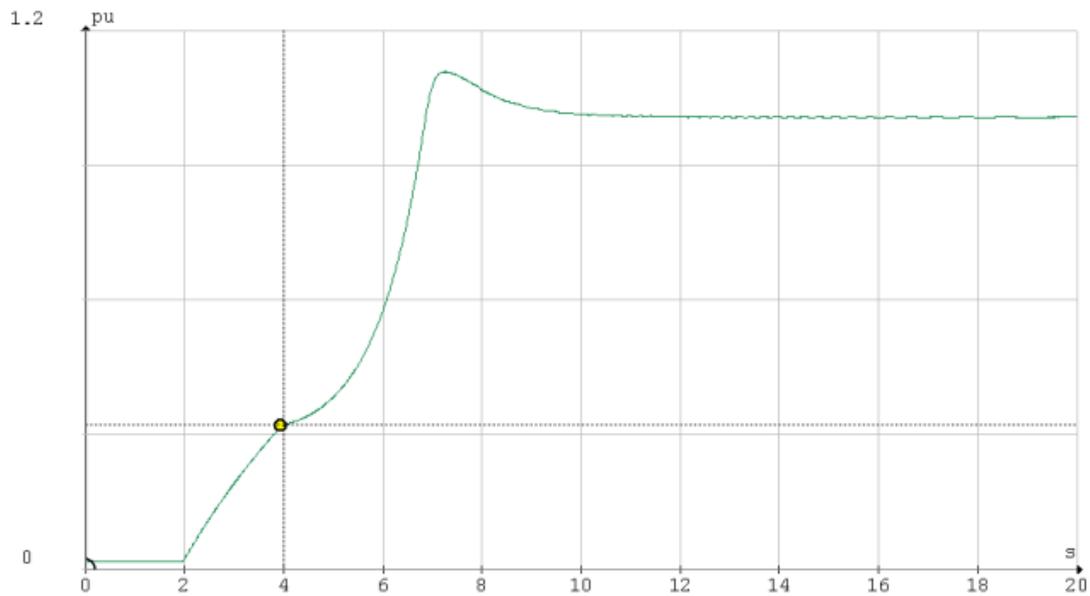


Figura 39 - Saída da pré-excitação. Fonte: Reivax (2007)

6.4.8.2 Excitação gradativa da UG

O sistema de regulação de tensão da Reivax permite ao operador realizar uma excitação parcial da unidade geradora. Essa funcionalidade é utilizada para energização gradual tanto do gerador como do transformador elevador e transformador de excitação, sendo útil em testes e ensaios de rotina.

A excitação gradativa pode ser realizada tanto através do controle de tensão como do modo controle de corrente, permitindo assim ajustar as duas malhas de controle. Os parâmetros para esta excitação são dados na tabela 5.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Vt Final	0,1 a 1,2	0,48	Indicação de Final de Excitação, no caso o valor típico reduzido
Ref Vt Final	0,1 a 1,2	0,50	Referência Final de Excitação, no caso o valor típico reduzido
Ic Final	0,1 a 1,2	0,48	Indicação de Final de Excitação, no caso o valor típico reduzido
Ref Ic Final	0,1 a 1,2	0,50	Referência Final de Excitação, no caso o valor típico reduzido
Taxa Assumir Ref Vt	8 a 20	12	Taxa inicial da Referência de Tensão, esta taxa deve ser maior que a inclinação dada pela Excitação inicial.
Taxa Assumir Ref Ic	8 a 20	12	Taxa inicial da Referência de Tensão, esta taxa deve ser maior que a inclinação dada pela Excitação inicial.

Tabela 5 - Parâmetros para esta excitação gradativa. Fonte: Reivax (2007)

Assim, como os sinais de controle da excitação inicial, os sinais de controle, tensão terminal, corrente de campo, tensão de campo e referência do regulador são colhidos pela IHM e armazenada durante a excitação gradativa. Esses sinais armazenado em forma de gráfico deve ser registrados no relatório de resultados de comissionamento juntamente com os reajustes necessário dos valor(es) de Vt sai pré excitação e Ic sai pré excitação.

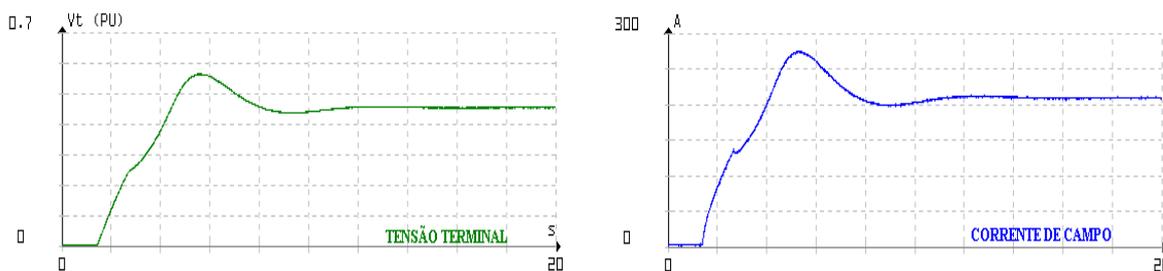


Figura 40- Excitação parcial para Vt=0,45pu. Fonte: Reivax (2007)

6.4.8.3 Excitação automática da UG

Após realizar o ensaio de excitação gradativa, deve-se excitar o gerador automaticamente até seu valor de tensão terminal atingir 100% (1 pu) e registrar seu comportamento modificando se necessário os parâmetros da excitação obtendo valores próximos ao da tabela 6 e figura 41.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Vt Final	0.1 a 1.2	0.98	Indicação de Final de Excitação
Ref Vt Final	0.1 a 1.2	1.00	Referência Final de Excitação
Ic Final	0.1 a 1.2	0.98	Indicação de Final de Excitação
Ref Ic Final	0.1 a 1.2	1.00	Referência Final de Excitação
Taxa Assumir Ref Vt	8 a 20	12	Taxa inicial da Referência de Tensão, esta taxa deve ser maior que a inclinação dada pela Excitação inicial.
Taxa Assumir Ref Ic	8 a 20	12	Taxa inicial da Referência de Tensão, esta taxa deve ser maior que a inclinação dada pela Excitação inicial.

Tabela 6 - Parâmetros para esta automática total. Fonte: Reivax (2007)

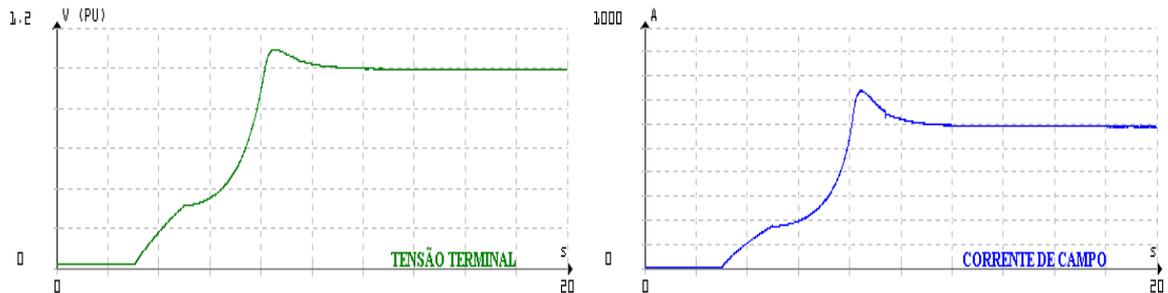


Figura 41 - Excitação automático. Fonte: Reivax (2007)

6.4.9 Desexcitação normal (forçamento negativo)

A desexcitação controlada ocorre via comando, isto é, aquela onde ocorre o forçamento negativo do campo do gerador fazendo o ângulo de disparo ir para seu valor máximo e reduzindo a corrente de forma brusca forçando a queda de tensão terminal.

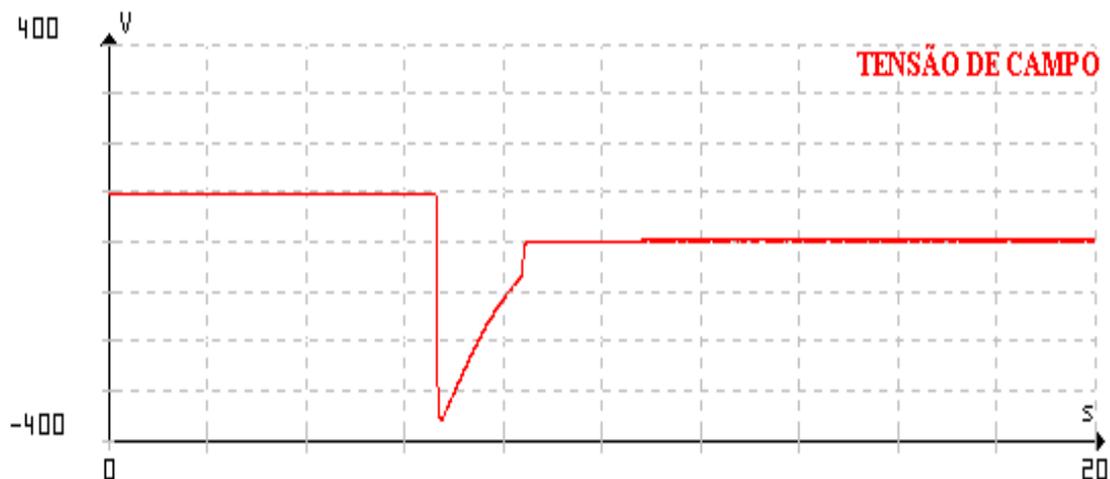


Figura 42 - Registros de tensão de uma desexcitação. Fonte: Reivax (2007)

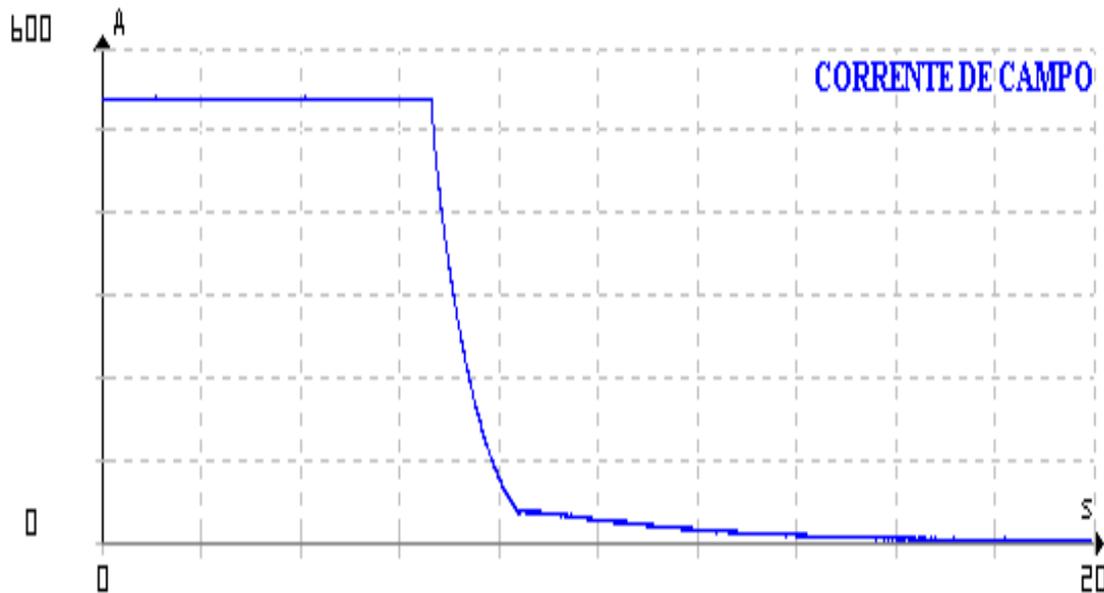


Figura 43 - Registros de corrente de campo de uma desexcitação. Fonte: Reivax (2007)

6.4.9.1 Ajuste dos tempos para excitação e desexcitação

Após a excitação e desexcitação, evidenciando o bom comportamento da mesma, é necessário ajustar os tempos para falhas de tempo excessivo de excitação e tempo excessivo de desexcitação. Compreendendo tempo de excitação a partir do momento que se fecha o contator de campo até o momento de atingir a tensão terminal ajustada e tempo de desexcitação a partir do momento em que o valor de tensão terminal estiver em regime até a abertura da chave de campo.

6.4.10 Ajuste da malha de regulação de tensão/corrente

O controle de tensão, corrente e de potência reativa deve ser realizado por um conjunto de dispositivos do sistema de excitação. Destes componentes fazem parte o conversor, elementos de potência tais como a ponte de tiristores, excitatriz rotativa, regulador de tensão (RT), compensador de corrente reativa (CCR), estabilizador de sistemas de potência (ESP), limitador de subexcitação (LSE), limitador de máxima corrente de campo (LCC), limitador de máxima corrente estática (LCE), limitador V/Hertz (LVHz.) e outras funções como sinalização, alarmes e proteção.

Os componentes do sistema de excitação devem ser capazes de executar as seguintes tarefas:

1. Manter a tensão terminal da máquina no valor definido pelo operador, ou deve ser capaz de manter uma determinada relação entre tensão e carga reativa em toda região de operação;
2. Manter a tensão terminal dentro dos limites aceitáveis de trabalho mesmo em rejeições de plena carga, ou outros distúrbios severos no sistema de potência;
3. Ser capaz de propiciar excitação rápida na partida do grupo sem sobrelevação da tensão terminal;
4. Ser capaz de responder, com desempenho adequado, aos comandos do operador ou sincronizador automático, quando da sincronização da unidade com o sistema;
5. Ser provido de elevada velocidade de resposta, de maneira a corrigir as variações de tensão impostas por variação de carga, geração ou por chaveamentos no sistema;
6. Poder manter valores de tensão de campo superiores ao valor nominal à plena carga, mesmo na presença de curto-circuito trifásico no barramento de alta tensão da unidade;
7. Ser capaz de aplicar tensões positivas e negativas ao campo, em valores bem superiores ao valor básico de excitação, visando influenciar o torque de aceleração de maneira a manter a máquina em sincronismo com o sistema de potência, mesmo na presença de distúrbios severos no mesmo;
8. Em caso de paralelo de unidades no barramento de alta tensão, o sistema de excitação deve ser capaz de compensar parte da queda na reatância do transformador elevador, ou deve ser provido de característica adequada da tensão em função da carga reativa, de maneira a propiciar o paralelo de outros geradores no próprio barramento terminal;
9. Ser capaz de limitar dinamicamente a corrente de excitação, de acordo com a característica de capacidade do próprio campo independentemente da eventual necessidade de aumento de excitação que a malha de controle da tensão terminal impuser;
10. Ser capaz de limitar dinamicamente a operação da máquina em regiões próximas ao limite de estabilidade, independentemente da necessidade de decréscimo da excitação que a malha de controle da tensão terminal impuser;
11. Ser capaz de contribuir de maneira efetiva para o amortecimento de oscilações eletromecânicas que o sistema de potência ou a própria unidade apresentar;
12. Propiciar a limitação da relação V/Hertz;

13. Ser capaz de limitar a corrente de armadura, no tocante à carga reativa, independentemente da necessidade de aumento ou decréscimo de excitação que o controle de tensão impuser;
14. Ainda, como requisito opcional, pode-se exigir que o sistema de excitação seja capaz de manter a tensão no barramento de alta tensão dentro de uma faixa especificada, provendo, ainda, divisão equitativa da carga reativa das unidades em paralelo.

Podemos observar que algumas das funções estão ligadas ao regulador em carga e outras consideram o regulador a vazio. Os sistemas de excitação básicos possuem duas malhas de controle, controle de tensão terminal e o controle de corrente de campo que atuam tanto em carga quanto à vazio. Sistemas mais complexos apresentam uma malha de controle de reativo ou fator de potência que opera somente quando o regulador está em carga. O diagrama apresentado na figura 44 ilustra, de forma reduzida, a malha de controle do sistema de excitação completo com controle de tensão, corrente e reativo. O caminho apresentado em cor mais clara (azul) representa o controle do gerador a vazio.

Para ajustar o desempenho dinâmico da malha de regulação de tensão/corrente a vazio, são aplicados degraus na referência do regulador, observando se o tempo de resposta, sobre sinal (*overshoot*) e amortecimento, buscando-se uma boa relação entre tempo de resposta e estabilidade.

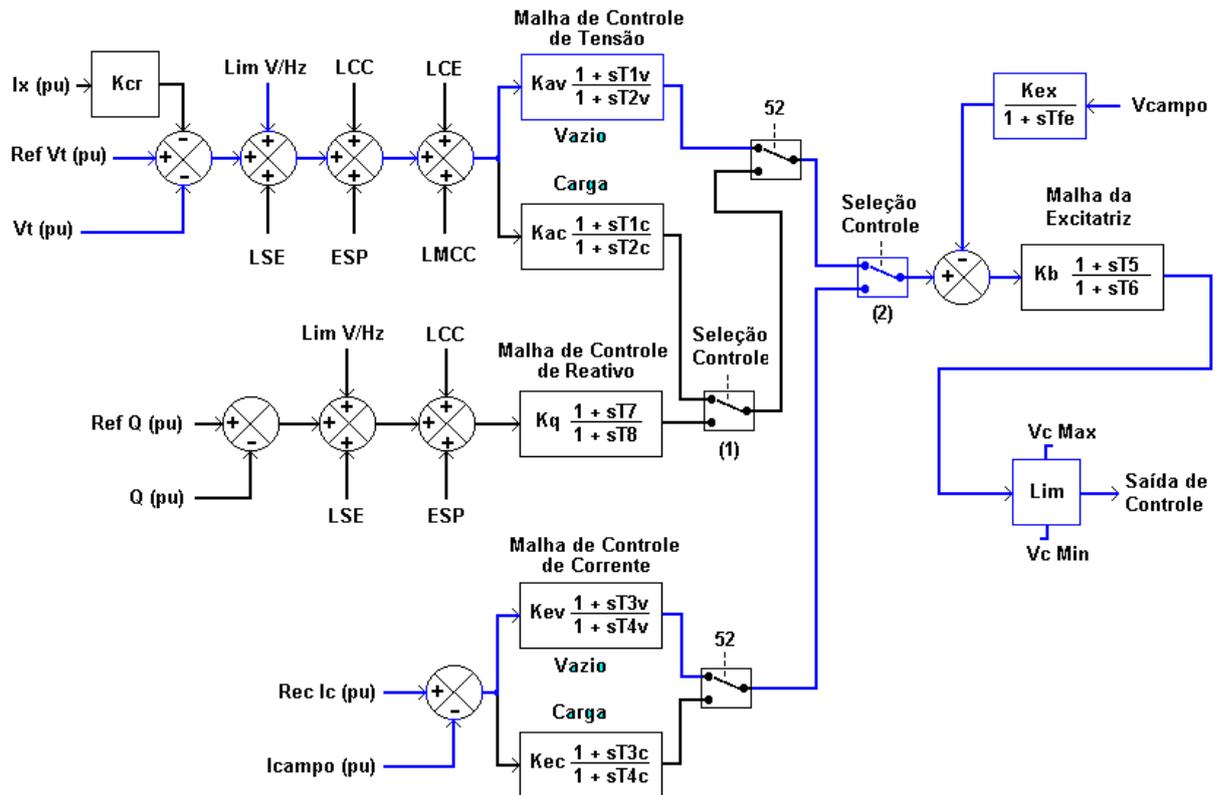


Figura 44 - Malha de Controle de Tensão e Controle de Corrente. Fonte: Reivax (2007)

Complementando, na figura 44 também pode-se observar as malha de controle de tensão e malha de controle de corrente, selecionáveis através da chave 52, seguidas da malha de compensação da excitatriz. A malha de compensação da excitatriz é utilizada para compensar os atrasos causados por um sistema que possua excitatriz rotativa. Após a malha da excitatriz observa-se a limitação de tensão na saída, que serve para limitar o gerador à tensão de teto (*celling*). Na tabela 7, a partir da malha apresentada na figura 44, podemos observar os valores típicos de parâmetros para ajustar a dinâmica do controle de tensão e controle de corrente a vazio.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
K_b	1 a 2	1	Ganho Proporcional da malha de controle de Tensão a vazio
T_5	0,1 a 10	0.01	Avanço da malha de controle de tensão a vazio
T_6	10 a 30	0.01	Atraso da malha de controle de tensão a vazio
K_{av}	100 a 250	200	Ganho Proporcional da malha de controle de Tensão a vazio
T_{1v}	0,1 a 10	1	Avanço da malha de controle de tensão a vazio
T_{2v}	10 a 30	20	Atraso da malha de controle de tensão a vazio
K_{ev}	100 a 250	200	Ganho Proporcional da malha de Controle de Corrente a vazio
T_{3v}	0,1 a 10	1	Avanço da malha de controle de Corrente a vazio
T_{4v}	10 a 30	20	Atraso da malha de controle de Corrente a vazio

Tabela 7 - Parâmetros para ajuste da Malha de Excitatriz Rotativa. Fonte: Reivax (2007)

6.4.10.1 Comutação de controles do regulador de tensão

Na regulação de tensão, podemos ter o controle de tensão, que é conhecido como controle automático, e o controle de corrente conhecido como controle manual. As palavras automático e manual, na verdade, fazem alusão aos controladores antigos. Na verdade, os dois modos de controle atuam de forma automática e digital. Normalmente, o regulador de tensão está selecionado para controle de tensão, sendo comutado para controle de corrente quando há uma impossibilidade da medição de tensão ou necessita, por algum motivo extraordinário, do controle através da corrente de campo.

Observe que a malha de corrente está em paralelo (azul) com a malha de tensão, sendo selecionada apenas sua saída, sendo assim, as duas malhas se encontram no mesmo ponto de operação, uma vez selecionado o controle para tensão (automático) ou corrente (manual), não deve haver uma perturbação nesta comutação.

A operação de comutação de controle, por falha de tensão, ocorre automaticamente a fim de manter o regulador em operação. Em alguns reguladores pode-se configurar o retorno automático do controle de corrente para o controle de tensão. É importante que esta comutação de controle seja registrada no Relatório de Resultados de Comissionamento.

6.4.11 Ajuste do Limitador V/Hertz

O limitador V/Hertz, tem a função de limitar a tensão terminal do gerador em função de variações da relação V/Hertz (V/Hz). Sendo assim, é construído a partir das medidas da tensão terminal e frequência, atuando tanto em sobretensões quanto em sobrevelocidades, diminuindo a tensão do gerador elétrico.

O sinal de erro da relação V/Hz máxima passa por um compensador PI que age no sentido de diminuir a tensão, a saída do limitador é então somada à referência do regulador de tensão. O ajuste do limitador de V/Hertz é feito pelo “*setpoint*” Ref V/Hz e sua dinâmica dada pelos ganhos K_p e K_i . A figura 45 apresenta a malha de controle do limitador.

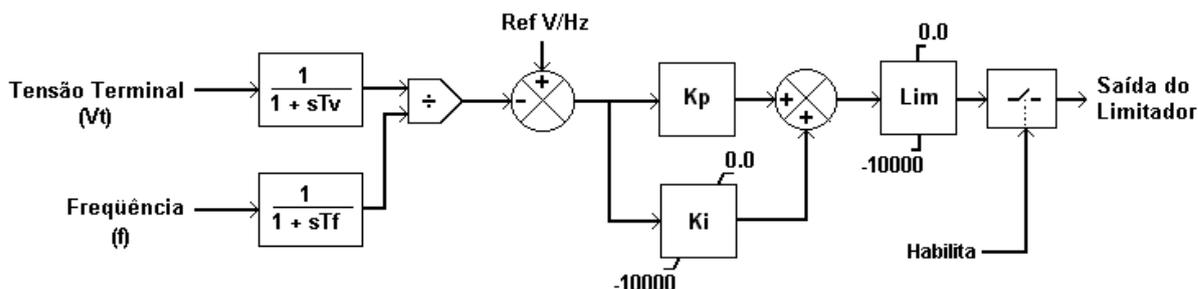


Figura 45 - Malha de Controle do Limitador de V / Hertz. Fonte: Reivax (2007)

As filtragens apresentadas no diagrama de V/Hertz para o sinal de tensão terminal e frequência são parametrizadas junto às transduções destes sinais, mas devem ser levadas em conta para a malha do limitador. Para sinais muito ruidosos, é importante que seja eliminado os distúrbios antes de habilitar o limitador de V/Hertz. A tabela 8 apresenta os parâmetros ajustáveis do limitador de V/Hertz.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Ref V/Hz	1.05 a 1.5 pu	1.10	Valor do ajuste do Limitador deV/Hertz
Kp	0.1 a 10	0,1	Ganho Proporcional do Limitador deV/Hertz
Ki	0.1 a 10	0,2	Ganho Integral do Limitador deV/Hertz

Tabela 8 - Parâmetros ajustáveis do Limitador de V / Hertz. Reivax (2007)

A confirmação do ajuste do limitador de V/Hz é realizada através de um degrau na referência do regulador próxima ao ponto de atuação do limitador. Como muitas vezes o ponto de operação com o gerador à vazio está próximo dos fins de curso das referências então, para efeito de confirmação, altera-se o ponto de atuação do limitador para valores dentro da faixa possível das referências, por exemplo, Ref V/Hz=1,02 pu, e aplica-se um valor de degrau igual a 0.05 pu, observando a limitação da tensão em 1,02 pu uma vez que a frequência esteja fixa em 1 pu.

6.4.12 Verificação da dupla alimentação do regulador

Os reguladores da Reivax possuem 2 alimentações distintas. A alimentação principal do regulador, em corrente contínua, é proveniente do serviço auxiliar de corrente contínua da usina. A segunda alimentação do painel é alternada e é proveniente do serviço auxiliar de corrente alternada da usina. Esta alimentação é retificada, e garante a duplicidade da alimentação para o regulador em Vcc, ou seja, em caso de desligamento de um dos alimentadores o outro assume automaticamente sem nenhuma descontinuidade.

A verificação da redundância destes alimentadores no regulador é realizada desligando uma das alimentações com o regulador em controle e verificando se existe alguma perturbação no sistema.

6.4.13 Ensaio de levantamento da curva de saturação de tensão

Durante o comissionamento um dos testes mais comum trata-se da obtenção das curvas de saturação a vazio e curto-circuito. Objetiva determinar a reatância síncrona de eixo direto, x_d , os valores base de campo e a função que representa a saturação. Tal ensaio gera curvas como a apresentada na figura 46.

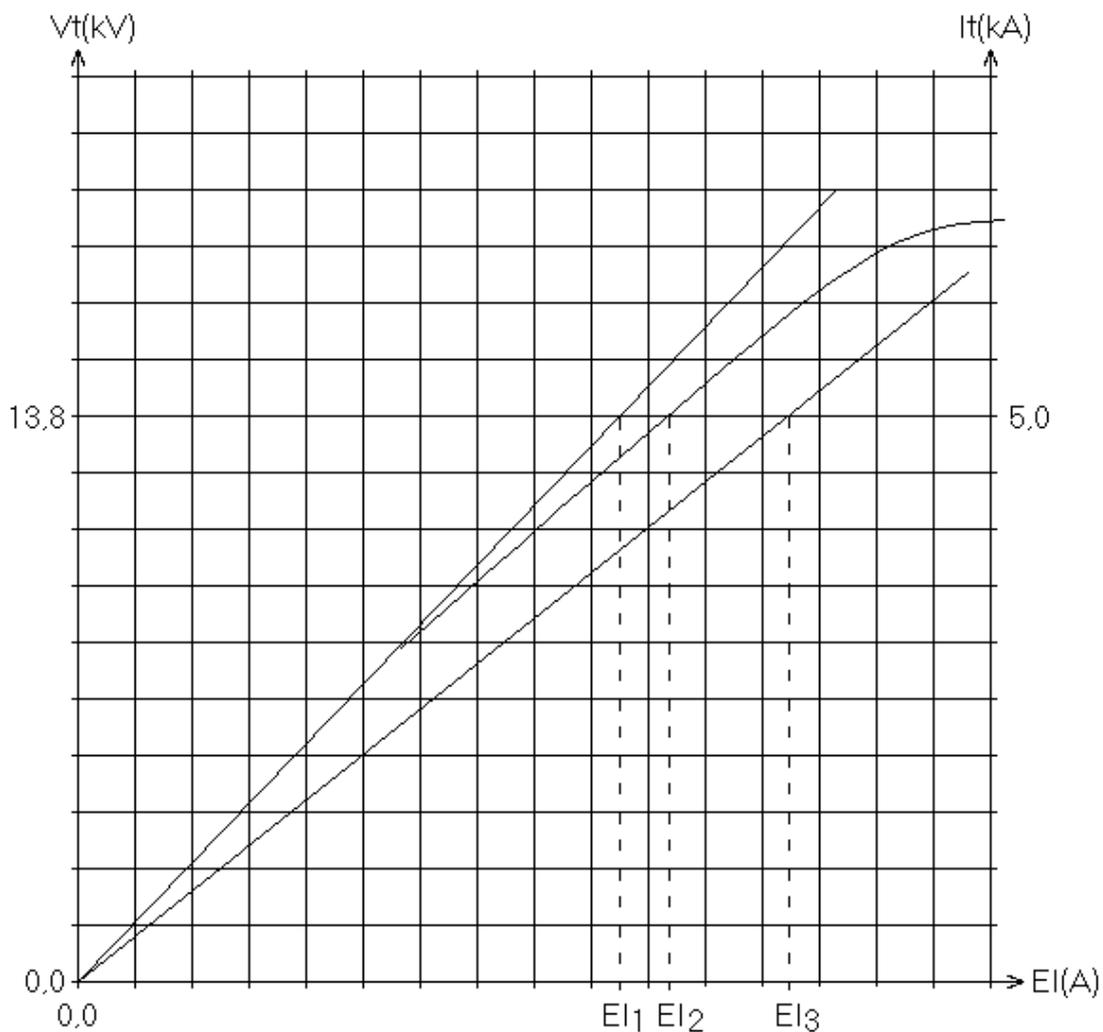


Figura 46 - Curvas de excitação de geradores. Fonte: Reivax (2007)

No gráfico, da figura 46, pode-se observar uma linha reta cuja inclinação corresponde à curva de saturação para valores baixos de excitação. Tal linha corresponde ao entreferro (*air-gap line*) e permite estabelecer uma relação linear entre tensão da máquina e corrente de excitação. O valor da corrente de campo que corresponde à tensão nominal da máquina e uma

determinada tensão de campo a 75°C , se convencionou chamar de valor base (EI base e, para a tensão de campo, Efd base). Na figura 46 tal grandeza é chamada de EI1. Quando se trabalha com valores percentuais - ou por unidade - diz-se que, para 100% de tensão de campo, obtém-se, na linha do entreferro, 100% de tensão da máquina. No entanto, para excitar, é preciso mais do que isto, pois já nota-se, em torno do valor nominal, a saturação do ferro. A corrente que leva a máquina para a tensão nominal está representada na figura 46 por EI2.

Executa-se também durante o comissionamento a curva de saturação em curto-circuito. Esta, como também mostra a figura 46, é linear, pois a tensão atrás da reatância de dispersão (parcela da reatância da armadura cujo fluxo não se concatena ao ferro), pelo fato da máquina encontrar-se em curto-circuito, é muito pequena e a densidade de fluxo, assim, fica longe dos valores de saturação. Desta curva, quando a corrente de armadura atinge o valor nominal, registra-se o valor percentual de corrente de campo (na figura 46 corresponde a EI3). O valor desta corrente corresponde à reatância síncrona de eixo direto, não saturado para a corrente de campo na linha do entreferro e saturado para o caso de se utilizar a curva real de saturação a vazio. O recíproco desta relação é conhecido como relação de curto-circuito.

A reatância síncrona de eixo direto possui um valor em torno de 100%, para geradores de pólos salientes, e em torno de 200% para geradores de pólos lisos. Desta forma, a tensão de campo assume valores muito diferentes do nominal a vazio, quando em operação, para compensar as quedas de tensão nesta reatância. Para se ter uma idéia, uma máquina com $x_d=100\%$, operando com potência ativa nula na tensão nominal, precisa que o regulador de tensão varie a tensão de campo de 50% para mais de 150% para que a carga reativa varie de -50% para +50%. Do ponto de vista estático torna-se fácil entender a necessidade do controle de tensão. Se for levado em conta, ainda, que existe uma grande constante de tempo no enrolamento de campo (de 5 a 10s), mas se justifica o controle da excitação.

6.4.14 Ensaio de estabilidade em regime de regulação a vazio

O ensaio que verifica a estabilidade em regime de regulação é simples, basta colocar a UG girando e excitada e registrar seu comportamento em regime. Observe que neste ensaio a busca da estabilidade dos atuadores e das leituras de frequência, tensão terminal e corrente de campo não devem estar oscilando como se fosse uma “navegação”; devem estar estáveis.

6.5 Ensaios em carga

6.5.1 Ajustes da Dinâmica da Malha de Potência

Um Regulador de Velocidade/Potência deve ser capaz de executar tarefas como:

- a) Manter a frequência da máquina no valor definido pelo operador, ou manter uma determinada relação entre frequência e potência ativa (estatismo) em toda região de operação;
- b) Manter a velocidade dentro dos limites aceitáveis de trabalho mesmo em rejeições de plena carga ou outros distúrbios severos no sistema de potência;
- c) Ser capaz de propiciar uma partida rápida e sem sobrelevações na rotação;
- d) Ser capaz de responder, com desempenho adequado, aos comandos do operador ou sincronizador automático quando da sincronização da unidade com o sistema;
- e) Ser provido de razoável velocidade de resposta de maneira a corrigir as variações de frequência impostas por variação de carga, geração ou por chaveamentos no sistema;
- f) Ser capaz de tomar carga de maneira linear e rápida de acordo com o comando do operador, controlador conjunto ou controle de carga e frequência, sem que para isto seja necessário degradar a regulação da malha de controle de velocidade;
- g) Ser capaz de limitar dinamicamente a máxima abertura do distribuidor, independentemente da eventual necessidade de aumento de potência mecânica que a malha de controle de velocidade impuser;
- h) Ser capaz de conjugar abertura do distribuidor e roda, em função da queda bruta, em turbinas Kaplan, de modo a maximizar o rendimento;
- i) Ser capaz de conjugar agulha e defletor de forma a que o defletor seja inserido no menor tempo possível durante rejeições de carga em turbinas do tipo Pelton;

Estas funções são as mais importantes, mas existem outras funções com as quais o regulador de Velocidade/Potência deve ser dotado, como proteção, alarme e sinalização. Para efetuar todas as funções citadas acima o regulador é composto pelas diversas malhas de controle ajustadas anteriormente, tais como, malha da válvula, malha do posicionador do atuador, malha de controle de velocidade, limitador de abertura, e rampeador de potência.

Nesta etapa, ajusta-se a malha de controle de potência ativa e rampeamento de carga. De maneira similar a malha de velocidade, os parâmetros de controle referem-se ao estatismo transitório. A diferença é que em condição de carga, os parâmetros do estatismo transitório atuam no sentido de diminuir o efeito do estatismo permanente (normalizado em 5%) durante as perturbações. Isto é realizado principalmente através dos parâmetros: b_t carga, t_d carga e t_n carga.

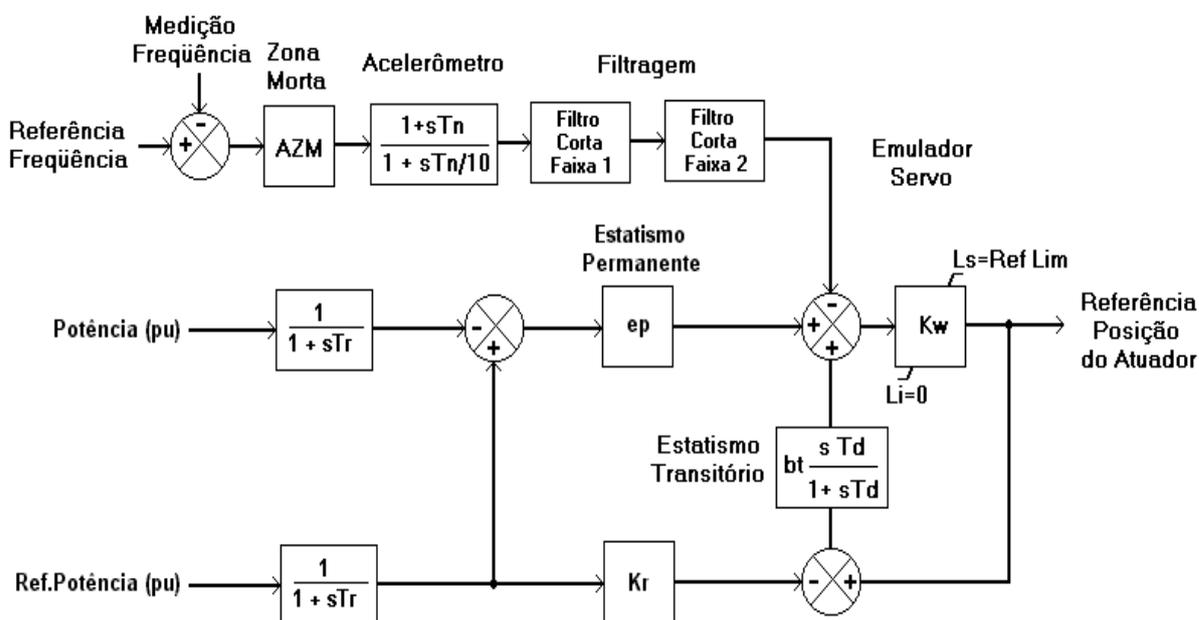


Figura 47 - Malha de Controle de Velocidade / Potência. Fonte: Reivax (2007)

A dinâmica da malha de controle de potência, tal qual a malha de controle de velocidade deve ser observada através da resposta a um degrau na referência de potência, observa-se assim a resposta do sistema com o menor *overshoot* e sem gerar oscilação.

Recomenda-se um degrau de aproximadamente 3% (0,03 pu), para analisar a dinâmica do rampeamento de potência. Antes de ajustar a dinâmica através da resposta a um degrau é importante observar se existe oscilação de potência em regime.

PARÂMETRO	FAIXA DE VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Bt Carga	0.1 a 0.8	Faixa	Estatismo transitório, Constante de amortecimento
Td Carga	6.0 a 10.0	Faixa	Estatismo transitório
Kw	10 a 30	20	Ganho da malha de Controle de Velocidade e Potência, pode ser reajustado para atender a malha de potência
Ep	0 a 0.05	0.05	Estatismo Permanente
Kr			

Tabela 9 - Faixas de valores típicos para a malha de controle de velocidade. Fonte: Reivax (2007)

6.5.2 Ajustes da Dinâmica da Malha de Tensão/Reativo

A sessão sobre o ajuste da malha de regulação de tensão/corrente, permitiu o ajuste dos componentes do sistema de excitação à vazio, agora é necessário fazer os ajuste dos componentes do regulador de tensão em carga. Os principais componentes ajustados em carga são:

- a) Ajuste da Malha de Controle de tensão em carga;
- b) Ajuste da Malha de Controle de Corrente em Carga;
- c) Ajuste da Malha de Controle de Reativo;
- d) Compensação de Reativo CCR;
- e) Limitador de Mínima Excitação LSE;
- f) Limitador de Corrente de Campo LCC;
- g) Limitador de Corrente Estatística LCE;
- h) Estabilizador de Sistema de Potência ESP.

O compensador de corrente reativa, CCR, permite que seja possível a colocação de várias unidades em paralelo no barramento de baixa tensão do transformador elevador, ou para que se possa compensar a queda de tensão no mesmo, no caso de usinas com paralelo em alta tensão. O compensador pode ser derivado da corrente ativa e reativa, porém o usual é que se utilize apenas a corrente reativa. O compensador de corrente reativa consiste, basicamente, de um transdutor de corrente reativa que influencia a referência do regulador de tensão de maneira subtrativa (paralelo em baixa tensão) ou aditiva (paralelo em alta tensão).

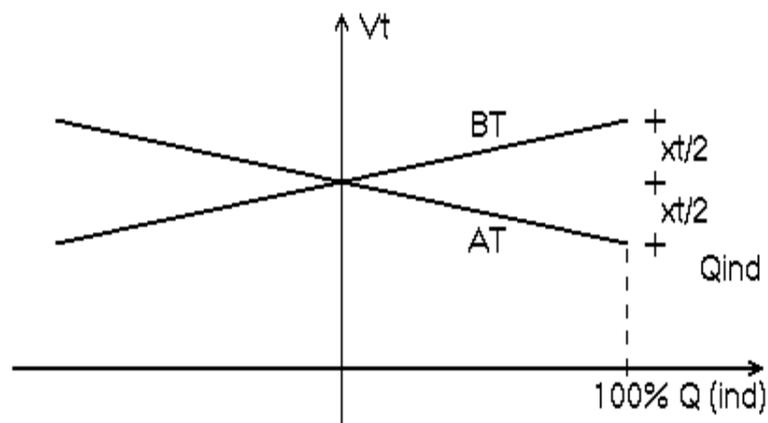


Figura 48- Regulação das barras de alta e baixa. Fonte: Reivax (2007)

O critério para ajuste do CCR é o de compensar 50% da reatância do transformador elevador (compensação positiva) ou um mínimo de 3% (compensação negativa). Em caso de centrais cuja reatância dos transformadores elevadores é diferente, máquina a máquina, é conveniente manter a barra de alta com características iguais (resultando em compensações diferentes).

Observar, em usinas com paralelo em alta, que reste um mínimo de queda de 3% na barra de alta. Em usinas alimentando cargas radiais e que possuam somente uma máquina, a compensação positiva pode ser aumentada. Deve-se ter o cuidado de não compensar em excesso, principalmente em usinas desassistidas, para não sacrificar os auxiliares da máquina. O ajuste da compensação de corrente reativa é dado pelo parâmetro K_{cr} observado no diagrama.

Para que o RT apresente boa regulação estática de tensão, é necessário que tenha um ganho elevado no canal direto, de maneira a minimizar o erro de regulação. A velocidade de resposta elevada é obtida com o ajuste adequado dos compensadores da malha, o ajuste do ganho para a malha de tensão em carga é feito em K_{ac} e para as demais malhas em K_{ec} e K_q .

A análise do desempenho dinâmico da malha de regulação de tensão, regulação de corrente e regulação reativo é realizado através da aplicação de degraus na referência de cada malha de regulação, observando o tempo de resposta, sobre sinal (*overshoot*) e amortecimento. Logo após as malhas desses reguladores, temos a malha de compensação da excitatriz, que é utilizada somente para compensar os atrasos causados pela excitatriz rotativa. A limitação de tensão na saída serve para limitar o gerador à tensão de teto (*celling*).

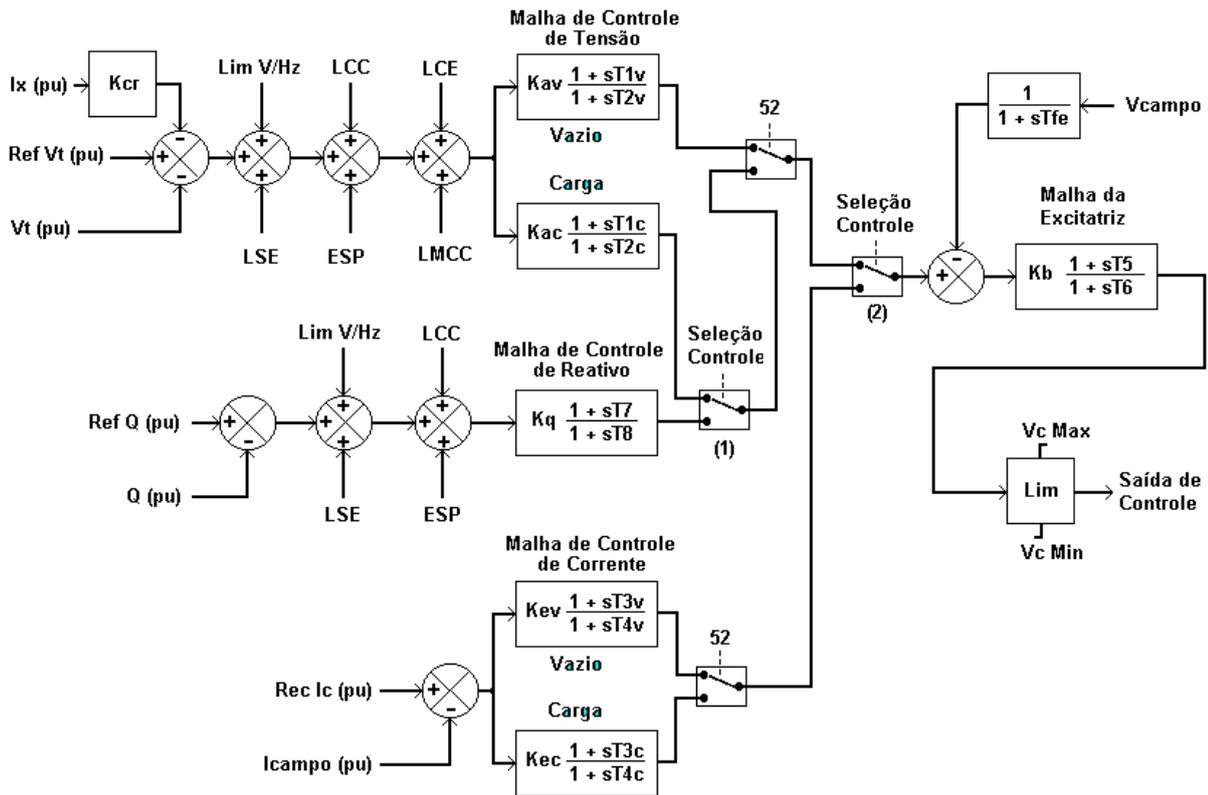


Figura 49 - Malha de Controle de Tensão, Controle de Corrente e Reativo. Fonte: Reivax (2007)

Observando a malha de controle da figura 49 podemos obter parâmetros para ajustar a dinâmica do controle de tensão e o controle de corrente. Vamos trabalhar apenas com os parâmetros à vazio, deixando para mais adiante os parâmetros em carga:

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
K_{cr}			Compensação de Reativo
K_{ac}	150 a 250	200	Ganho Proporcional da malha de controle de tensão
$T1c$	0,1 a 10	1	Avanço da malha de controle de tensão
$T2c$	10 a 30	20	Atraso da malha de controle de tensão
K_{ec}	150 a 250	200	Ganho Proporcional da malha de Controle de Corrente
$T3c$	0,1 a 10	1	Avanço da malha de controle de Corrente
$T4c$	10 a 30	20	Atraso da malha de controle de Corrente
K_q	150 a 250	200	Ganho Proporcional da Malha de controle de Reativo
$T7$	0,1 a 10	1	Avanço da malha de controle de Reativo
$T8$	10 a 30	20	Atraso da malha de controle de Reativo

Tabela 10 - Parâmetros para ajuste da dinâmica do controle de Tensão e o Controle de Corrente. Fonte: Reivax (2007)

Observe que a malha de controle de reativo está em paralelo com a malha de tensão, e a malha de controle de corrente em paralelo com as duas, sendo selecionadas apenas suas saídas, na

chave (2) e na chave (1) para seleção de controle de tensão ou reativo, todas as malhas devem se encontrar no mesmo ponto de operação, uma vez selecionado o controle desejado, não deve haver uma perturbação nesta comutação. O ajuste de sistemas de excitação com excitatriz rotativa deve levar em conta também os parâmetros da tabela 11.

PARÂMETRO	VALORES TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Kb	1 a 2	Ganho Proporcional da malha de controle de Tensão a vazio
T5	0,1 a 10	Avanço da malha de controle de tensão a vazio
T6	10 a 30	Atraso da malha de controle de tensão a vazio

Tabela 11 - Parâmetros para ajuste da dinâmica do controle de Tensão e o Controle de Corrente com excitatriz rotativa.
Fonte: Reivax (2007)

6.5.3 Curva de Capabilidade do Gerador

Os vários segmentos de curva apresentados na figura 50, representam as limitações da máquina. Estas limitações podem ser do gerador ou da turbina. Nas limitações associadas ao gerador existem dispositivos do sistema de excitação que têm por função evitar a operação naquelas zonas. Os dispositivos associados ao gerador, mais precisamente associados ao sistema de excitação são conhecidos como limitadores, eles atuam na excitação do gerador evitando que o mesmo entre em faixas operativas indesejáveis.

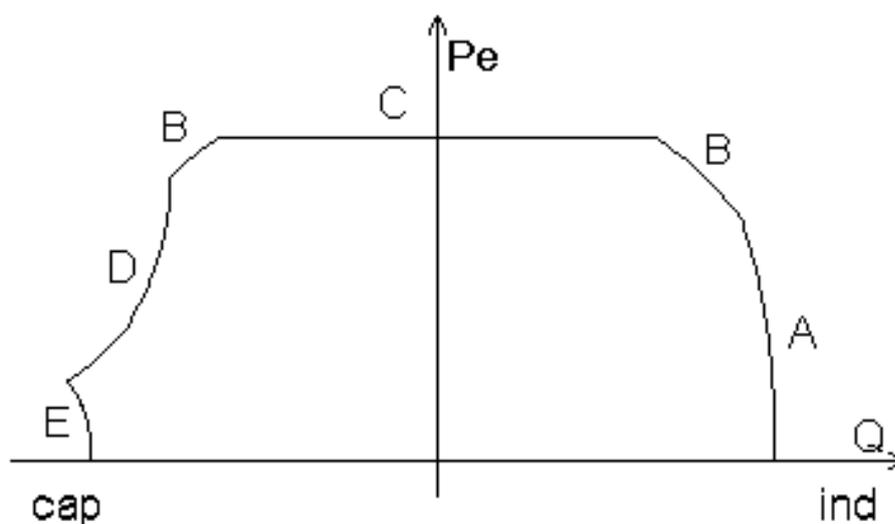


Figura 50 - Curva de Capabilidade de um Gerador. Fonte: Reivax (2007)

- a) Segmento A: O segmento de curva representado por A na Figura 50 é estabelecido pela máxima corrente rotórica de operação permanente. Para

evitar a operação nesta região, o sistema de excitação possui um dispositivo chamado limitador de corrente de campo, LCC. Tal dispositivo mede a corrente do rotor e a compara com a máxima permitida. Caso haja violação da máxima corrente este dispositivo intervém, agindo dinamicamente no sentido de diminuir a excitação. A proteção de sobrecorrente vislumbra os possíveis problemas de sobreaquecimento. A temperatura é uma grandeza que apresenta um comportamento dinâmico bastante lento. Desta forma, este dispositivo tem a sua atuação retardada e, assim, aumenta-se a capacidade da máquina em transitórios de curta duração, pois, nestes o limitador não chega a intervir.

- b) Segmento B – O segmento de curva representado por B representa o limite de corrente estatórica, que tanto pode se dar para a máquina sobreexcitada quanto subexcitada. Tal limite, nos projetos atuais de geradores, raramente acontece pois as máquinas têm sido projetadas para que o segmento A una-se ao C, ou seja, os geradores são limitados pelo rotor. No entanto, em máquinas nas quais este limite efetivamente existe, há necessidade de prover o sistema de excitação com um limitador dinâmico similar ao anterior. Este dispositivo é denominado de limitador de corrente estatórica, LCE. Se a máquina está operando em B a direita do gráfico - carga reativa indutiva - este limitador agirá no sentido de diminuir a excitação. Caso a operação se dê em B a esquerda do gráfico - caso da carga reativa capacitiva - o limitador agirá no sentido de aumentar a excitação.
- c) Segmento C – A máxima Potência Ativa disponível para geração é uma limitação da máquina primária. Desta forma, o segmento de curva definido por C não pode ser evitado por ação sobre a excitação da máquina.
- d) Segmento D – O segmento de curva definido por D representa o limite "prático" de estabilidade. A necessidade deste limite prende-se ao fato de que, se a máquina síncrona está operando com um ângulo de carga muito grande, a relação entre variação de ângulo e a variação da potência gerada (relação esta conhecida como coeficiente de torque sincronizante) pode estar em um valor muito baixo, ou seja, a máquina praticamente não ganha potência se for transitoriamente acelerada. Desta forma, o risco de perda de sincronismo torna-se grande. No entanto, com os recursos atuais de simulação e com as novas técnicas que têm surgido para avaliação da estabilidade, tem sido verificado que este limite é excessivamente conservativo. Na verdade, nem

poderia ser deterministicamente definido, pois a característica intrínseca ao sistema de potência de variabilidade topológica (mudanças na configuração da rede, na geração, etc.) aliada ao caráter não linear do problema não permitem que se estabeleça um limite de estabilidade invariável. No entanto, o limite representado por D tem sido tradicionalmente utilizado, embora conservativo, mesmo porque não apareceu nada melhor para substituí-lo. Para evitar a operação naquela região, o sistema de excitação é provido de um dispositivo. Este pode ser ou um limitador de ângulo polar ou um limitador de subexcitação, LSE. O primeiro, através da medida estimada do ângulo polar, age, se um limite máximo for violado, no sentido de aumentar a tensão da máquina. O segundo tem seu ponto de atuação definido pela violação de uma reta sobre a curva de capacidade, reta esta definida por uma combinação linear da tensão da máquina, da corrente ativa e da corrente reativa.

- e) Segmento E – A operação da máquina além do segmento de curva E, é evitada ou pelo limitador de ângulo polar ou pelo limitador de subexcitação. O segmento E pode existir por incapacidade da excitatriz de diminuir a sua tensão - caso de excitatrizes rotativas, que possuam razoável remanência e incapacidade de aplicar corrente negativa em seu enrolamento de excitação - ou pela corrente mínima de manutenção dos tiristores em condução, em excitatrizes estáticas ou, ainda, pelo fato de que a operação da máquina nesta região provoca aquecimento nas cabeças das bobinas estatóricas. Em pontes de tiristores que possuam a capacidade de suprir tensões e correntes tanto positivas quanto negativas (pontes de quatro quadrantes), este limite pode ser estendido à esquerda do segmento E. Nesta situação há, obviamente, a necessidade de reajustar o limitador de mínima excitação ou de ângulo polar.

6.5.4 Ajustes do Limitador de Mínima Excitação (LSE)

O objetivo do limitador de mínima excitação é o de prevenir a perda do sincronismo da unidade geradora principalmente em variações impostas pelo sistema e proteger as cabeças de bobinas quanto ao sobreaquecimento. Nestes casos, ou até mesmo através de comandos voluntários para diminuir a excitação, o limitador de mínima excitação garante que o ponto de operação do gerador fique dentro de sua curva de capacidade. O limitador de mínima utiliza a informação da tensão terminal, da corrente ativa e da corrente reativa para gerar uma linha limite de atuação. O limitador de subexcitação, LSE, é construído, usualmente da mistura

ponderada dos sinais de três transdutores: de tensão terminal, corrente reativa e corrente ativa. A variável resultante da soma é filtrada e estimula um bloco não-linear que amplifica apenas sinais positivos. O sinal resultante passa por um compensador e age no sentido de aumentar a tensão, sendo somado à referência do regulador de tensão. A figura 51 apresenta uma curva de capacidade ilustrando a linha de atuação do dispositivo.

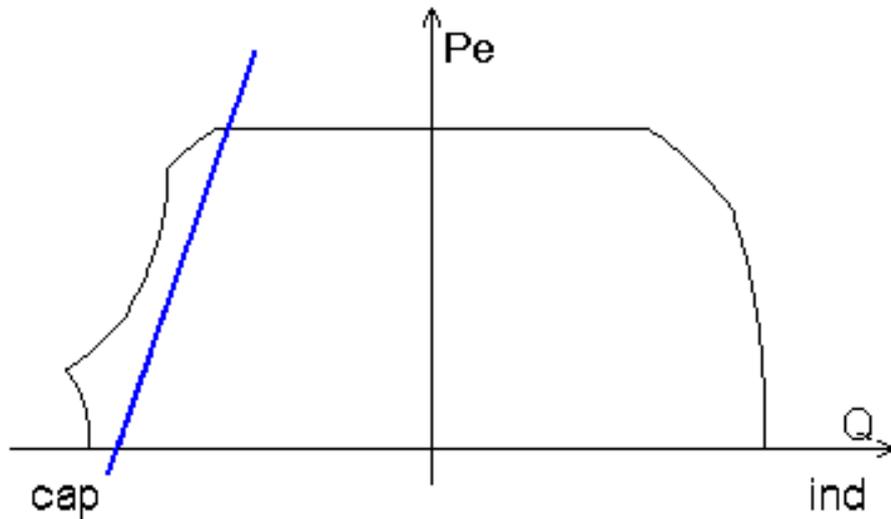


Figura 51 - Curva de capacidade mostrando a linha de atuação do LSE. Fonte: Reivax (2007)

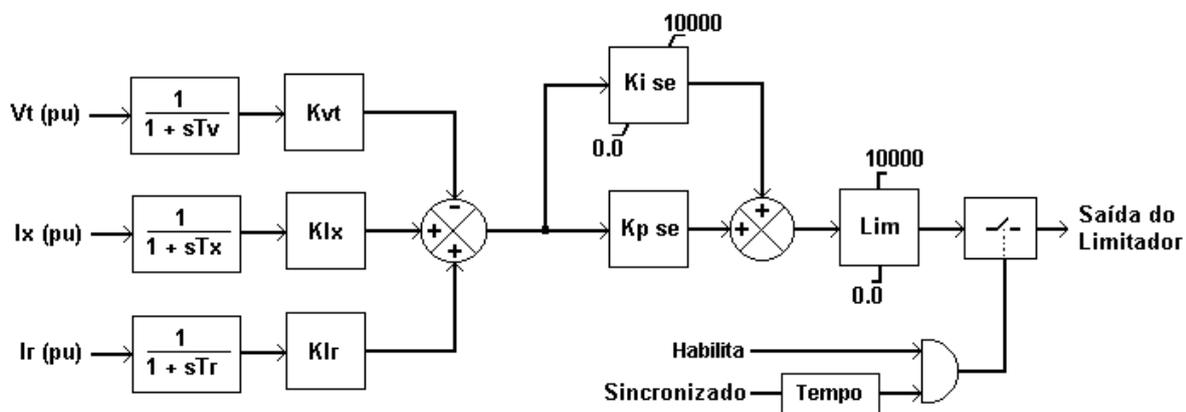


Figura 52 - Diagrama de blocos do LSE. Fonte: Reivax (2007)

Os sinais de corrente ativa, reativa e tensão passam por filtros passa-baixa antes de serem misturados de forma a gerar a linha de atuação. O sinal de corrente ativa recebe uma filtragem adicional visando minimizar oscilações eletromecânicas. O estágio de saída é um PI, cuja saída é limitada, somente permite a passagem de sinais positivos. Outras configurações de LSE são utilizadas de maneira alternativa, sendo uma delas o limitador de ângulo de carga. O limitador de mínima pode ser habilitado/desabilitado pelo operador (sinal habilita do diagrama de blocos), quando habilitado somente atua quando o gerador estiver sincronizado

no sistema, isto é, com carga (sinal sincronizado do diagrama). O ajuste do limitador de mínima é dado pelo pessoal de operação do gerador elétrico, marcando os pontos da reta de limitação sobre a curva de capacidade.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
KVt	0 a 2	1	Ganho / Ajuste para Tensão Terminal
KIx	0 a 3	Faixa	Ganho / ajuste para Corrente Reativa
Kir	0 a 3	Faixa	Ganho / ajuste para Corrente Real
Ki se	0.1 a 10	1	Ganho Integral da malha de Controle
Kp se	0.1 a 10	2	Ganho Proporcional da Malha de Controle

Tabela 12 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Mínima. Fonte: Reivax (2007)

A confirmação do ajuste do limitador de mínima é realizado através de um degrau na referência do regulador, próxima ao ponto de atuação do limitador.

6.5.5 Ajustes do Limitador de Corrente de Campo (LCC)

O limitador de corrente de campo (LCC) ou limitador de máxima excitação mede a corrente do rotor e a compara com a máxima permitida à vazio e em carga, garantindo a proteção para o rotor da máquina mantendo a corrente de excitação dentro dos limites admitidos pelo gerador. Caso haja violação da máxima corrente este dispositivo intervém, agindo dinamicamente no sentido de diminuir a excitação. A proteção de sobrecorrente vislumbra os possíveis problemas de sobreaquecimento. A temperatura é uma grandeza que apresenta um comportamento dinâmico bastante lento. Desta forma, este dispositivo tem a sua atuação retardada e, assim, aumenta-se a capacidade da máquina em transitórios de curta duração, pois nestes o limitador não chega a intervir.

É construído, usualmente, através de um regulador não-linear de corrente. Tal regulador consiste, basicamente, de um transdutor de corrente, de um comparador linear da corrente com a referência de máxima corrente, de um dispositivo não-linear que amplifica apenas sinais de erro de comparação negativos, de um estágio de compensação e de um somador com o sinal de regulação. A figura 53 apresenta o diagrama do LCC. O filtro de entrada é um passa-baixa destinado a “limpar” o sinal de corrente de campo. O integrador, seletor de mínimo e os dois somadores na entrada destinam-se a formar o sinal de referência (curva de tempo inverso). O estágio de saída é um PI com um limitador que permite apenas a passagem de sinais negativos. O sinal de corrente de campo possui uma filtragem passa-baixa que é configurada junto a transdução deste sinal.

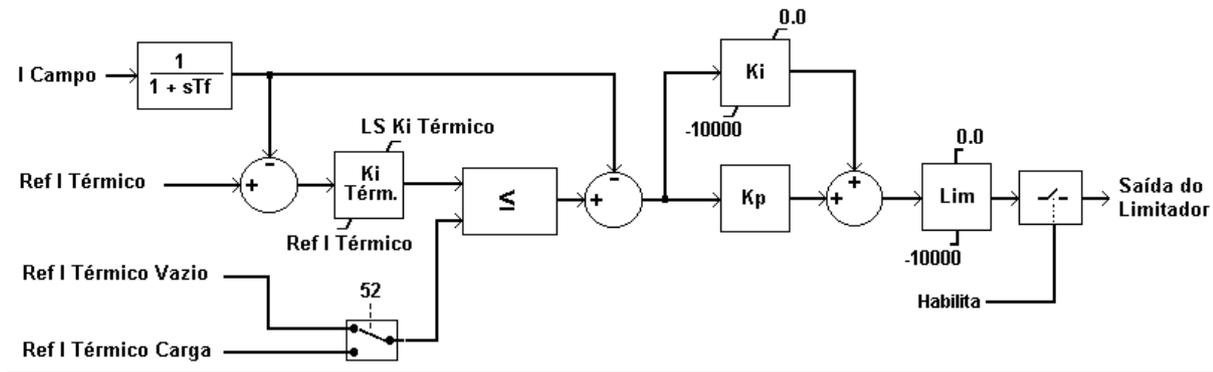


Figura 53 - Diagrama de blocos do Limitador de Corrente de Campo. Fonte: Reivax (2007)

O limitador de corrente de campo pode ser habilitado/desabilitado pelo operador (sinal habilita do diagrama de blocos). Importante observar que o limite superior de K_i térmico é selecionado para limite de K_i térmico a vazio e limite de K_i térmico em carga, através da indicação de sincronismo na entrada do limitador.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Ref I Térmico	0 a 4	1,8	Referência de Corrente Térmica
Ref_IpicoCarga	0 a 4	1,8	Referência para Corrente de Pico a vazio
Ref_Ipicovazio	0 a 2	1,2	Referência para Corrente de Pico em Carga
K_i Térmico	0 a 10	1	Ganho Integral K_i Térmico
LimSupltérmico	0 a 4	1,8	Limite Superior para K_i Térmico
K_p	0 a 10	0,1	Ganho Proporcional da Malha da Malha do Limitador
K_i	0 a 20	0,2	Ganho Integral da Malha do Limitador

Tabela 13 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Corrente de Campo. Fonte: Reivax (2007)

A confirmação do ajuste do limitador de máxima é realizado através de um degrau na referência do regulador, próxima ao ponto de atuação do limitador. Como muitas vezes o ponto de operação com o gerador à vazio está próximo dos fins de curso das referências, então para efeito de confirmação altera-se o ponto de atuação do limitador para valores dentro da faixa possível das referências, por exemplo, Ref Itérmico = 1,02 pu, e aplica-se um valor de degrau igual a 0.05 pu, observando a limitação da tensão em 1,02 pu.

6.5.6 Ajustes do Limitador de Mínima Corrente de Campo

O limitador de mínima corrente de campo também mede a corrente do rotor e a compara com a mínima permitida em carga, garantindo a proteção para o rotor da máquina mantendo a corrente de excitação dentro dos limites admitidos pelo gerador. Caso haja violação da

mínima corrente este dispositivo intervém, agindo dinamicamente no sentido de aumentar a excitação.

Tal limitador consiste, basicamente, de um transdutor de corrente, de um comparador linear da corrente com a referência de mínima de corrente, de um dispositivo não-linear que amplifica apenas sinais de erro de comparação negativos, de um estágio de compensação e de um somador com o sinal de regulação. A Figura 54 apresenta o diagrama do limitador de mínima corrente de campo.

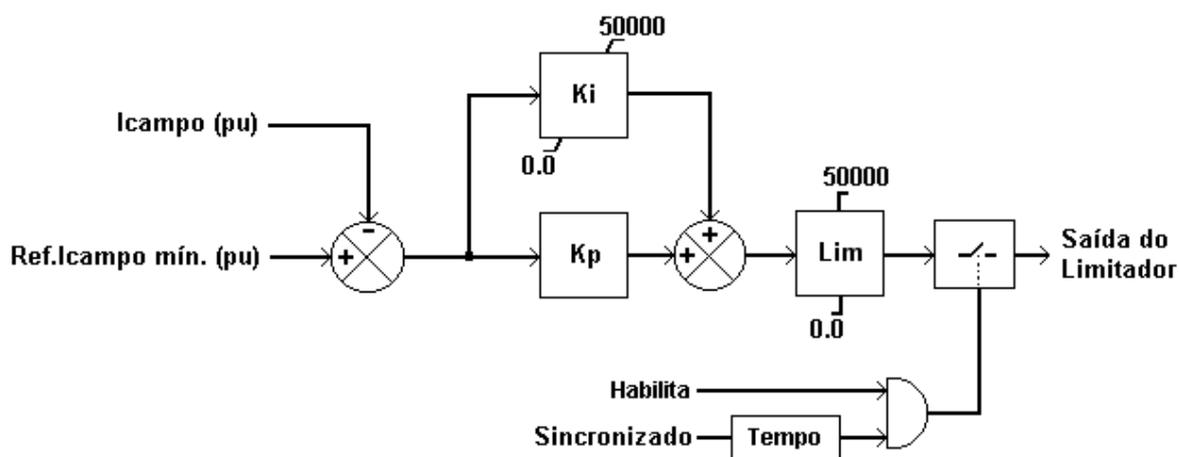


Figura 54 - Limitador de Mínima Corrente de Campo. Fonte: Reivax (2007)

O limitador de mínima corrente de campo somente opera quando o gerador estiver com carga (sinal sincronizado do diagrama) e pode ser habilitado/desabilitado pelo operador (sinal habilita do diagrama de blocos).

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Ref Icampo Min			Referência de Corrente Térmica
Kp	0 a 10	0,1	Ganho Proporcional da Malha da Malha do Limitador
Ki	0 a 20	0,2	Ganho Integral da Malha do Limitador

Tabela 14 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Mínima. Fonte: Reivax (2007)

A confirmação do ajuste do limitador de mínima é realizado através de um degrau na referência do regulador, próxima ao ponto de atuação do limitador.

6.5.7 Ajustes do Limitador de Corrente Estatórica (LCE)

O limitador de máxima corrente estática, LCE, é construído a partir das medidas das correntes ativa e reativa. A variável resultante da diferença fasorial entre a corrente máxima

estatórica e a corrente ativa define a máxima corrente reativa. Esta variável serve como referência de máxima corrente reativa. O detector de erro tem sua polaridade controlada pela corrente reativa de modo que se a máquina está subexcitada o limitador vai agir no sentido de aumentar a tensão e baixá-la se a máquina está sobexcitada. O sinal resultante passa por um compensador e age no sentido de aumentar a tensão, sendo somado à referência do RT. A linha de atuação do dispositivo, plotada sobre a curva de capacidade, representa um semicírculo cujo raio é a corrente máxima. Pode ser implementada uma característica de tempo inverso na referência de modo a evitar a sua ação durante transitórios.

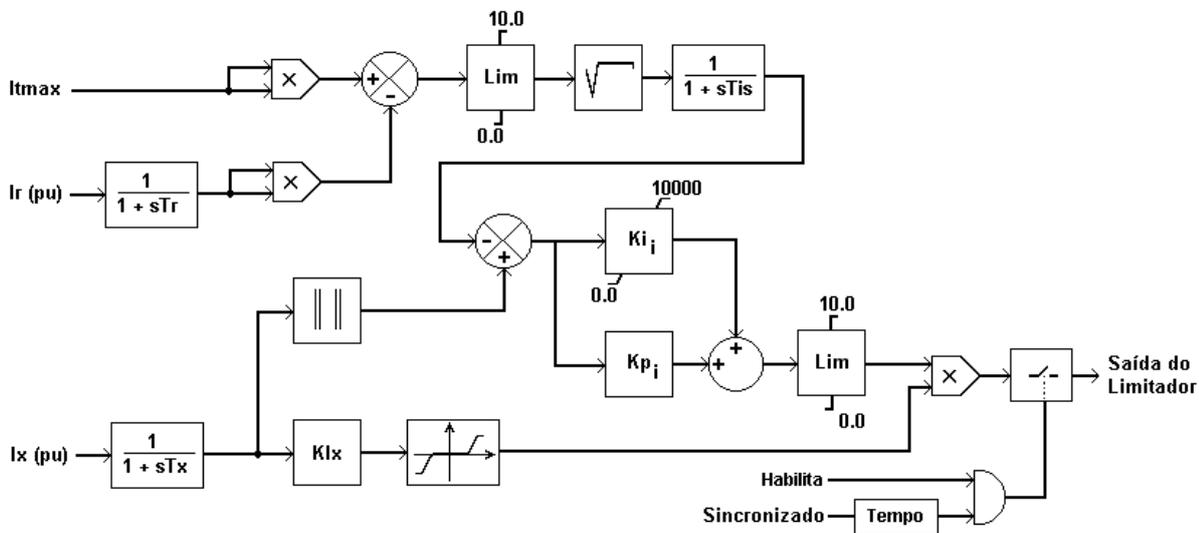


Figura 55- Limitador de Corrente Estática. Fonte: Reivax (2007)

A máxima corrente reativa admitida para a máquina é calculada pela diferença fasorial entre a corrente máxima de estator e corrente ativa atual. O sinal resultante é comparado com o módulo da corrente reativa sendo o erro processado por um compensador do tipo PI. O sinal é limitado, sendo só permitida a passagem de sinais positivos. O sinal que é efetivamente enviado ao regulador de tensão está com a magnitude e polaridade definidas pela corrente reativa. Ou seja, se a corrente reativa é de pequena monta o dispositivo intervém de maneira suave. Se a violação de corrente é no sentido da sobexcitação, ele age no sentido de baixar a excitação e vice-versa.

PARÂMETRO	VALORES	TÍPICO	OBSERVAÇÃO
Ref. I _{max} .	0 a 2 (pu)		Referência da Corrente Estatórica para atuação do Limitador
K _{ix}			Ganho de Correção da ação da Corrente Reativa
K _{i i}	0 a 10	0,1	Ganho Integral do Limitador de Corrente Estatórica
K _{p i}	0 a 20	0,2	Ganho Proporcional do Limitador de Corrente Estatórica

Tabela 15 - Parâmetros para ajuste do Limitador de Corrente Estatórica. Fonte: Reivax (2007)

A confirmação do ajuste do limitador de máxima corrente estática é realizado através de um degrau na referência do regulador, próxima ao ponto de atuação do limitador.

6.5.8 Máquina em Regime de Estabilidade em Carga

O Ensaio que verifica a estabilidade em regime de regulação é simples, basta colocar o conjunto turbina gerador em carga e registrar seu comportamento em regime. Observe que neste ensaio a busca da estabilidade e que atuadores, frequência, potência, tensão terminal e corrente de campo, não devem estar oscilando como se fosse uma “navegação”; devem estar estáveis.

6.5.9 Ajustes do Estabilizador de Sistemas de Potência

Para a implementação de tal dispositivo utilizasse uma grandeza elétrica que esteja associada à parte mecânica do conjunto gerador turbina. O sinal é processado por um compensador de característica derivativa e somado à referência do RT, modulando a tensão terminal no sentido de provocar torque elétrico em fase com o desvio de velocidade, em uma determinada faixa de frequências. O torque em fase com o desvio de velocidade é torque de amortecimento. Desta forma, garante-se o amortecimento de oscilações eletro-mecânicas. A saída do estabilizador é limitada para evitar sobremodulação da tensão terminal. Um esquema de bloqueio e reconexão é usualmente necessário para evitar a atuação do dispositivo em certas condições operacionais.

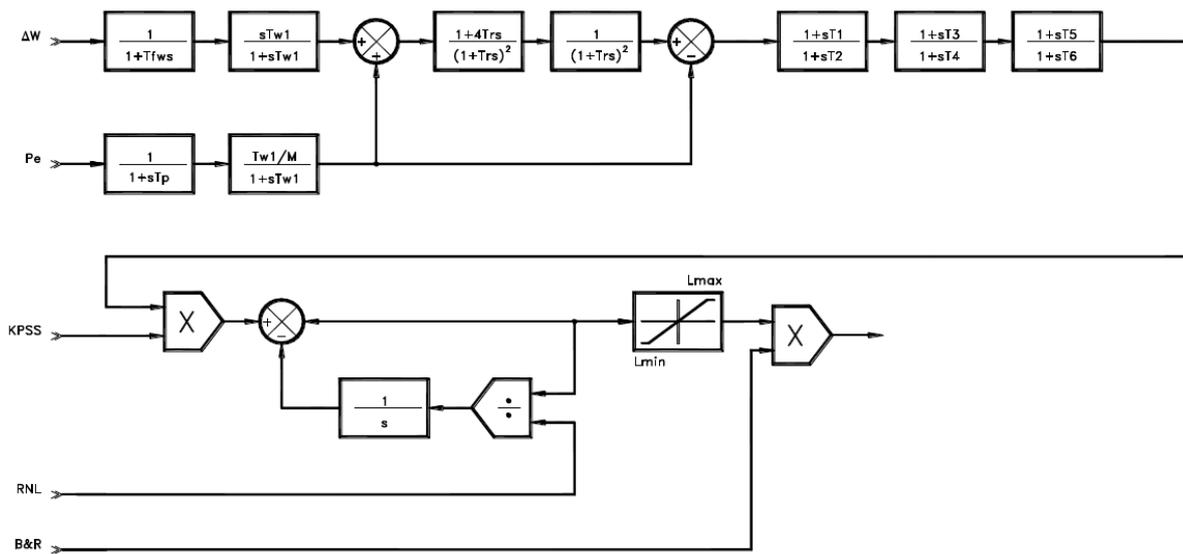


Figura 56 - Malha de Controle do ESP. Fonte: Reivax (2007)

Os sinais de potência elétrica e frequência são processados por filtros passa-baixa e dinamicamente combinados para gerar a integral da potência de aceleração. O sinal resultante, passa por compensadores de avanço e atraso e é amplificado para estimular o RT, sendo previamente limitado. No ESP da Reivax há funcionalidades do tipo não-linear que são a lógica de bloqueio e reconexão, o reset não-linear e o redutor de ganho por nível de potência.

A parte linear do ESP tem os seguintes parâmetros à ajustar:

- xq : reatância de eixo em quadratura da máquina;
- H : constante de inércia tomada na base da máquina (MVA);
- T : constante de tempo do filtro rastreador de rampa;
- $T1$: constante de tempo do primeiro "reset";
- $T2$: constante de tempo do segundo "reset";
- $T3$: constante de tempo de avanço do primeiro compensador;
- $T4$: constante de tempo de atraso do primeiro compensador;
- $T5$: constante de tempo de avanço do segundo compensador;
- $T6$: constante de tempo de atraso do segundo compensador;
- $T7$: constante de tempo de avanço do terceiro compensador;
- $T8$: constante de tempo de atraso do terceiro compensador;
- K : ganho do dispositivo.

O ensaio mais importante, realizado em campo, é o da obtenção da curva $Gep(j\omega)$, que corresponde à função de transferência $\Delta V_t/\Delta V_{ref}$. Com a máquina operando a plena carga e

sem PWX, aplica-se um degrau na referência do AVR, normalmente da ordem de 2%, cuidando para que a tensão de teto não seja atingida (degrau < teto/ganho transitório). O AQX, software para aquisição e tratamento de dados da Reivax, possui como funcionalidade o algoritmo de Levy-Sanathanan que permite a transformação da resposta ao degrau em uma resposta frequencial cujos valores serão utilizados para a calibração do PWX.

Desta forma, para ajustar os parâmetros, usam-se os seguintes critérios:

- a) xq: A partir dos sinais provenientes dos TPs e TCs, emula-se a rotação. Normalmente usa-se o valor disponível na base de dados da máquina. No entanto, se o cliente desejar, a Reivax pode identificar tal parâmetro através de ensaios de campo. Pode-se utilizar a frequência terminal como sinal de estímulo, bastando para isto levar xq a zero. De modo geral, tem sido dada preferência ao uso da rotação emulada ao invés da frequência da barra terminal, salvo no caso de turbo-alternadores com excitatrizes mais lentas nos quais o uso da frequência, por necessitar de menores avanços de fase, permite ajustar mais facilmente o PWX;
- b) H: Novamente utiliza-se o valor disponível na base de dados da máquina. No entanto, se o cliente desejar, a Reivax pode identificar tal parâmetro através de ensaios de campo;
- c) T: Normalmente esta constante é ajustada como sendo o inverso da frequência de oscilação do modo intra-planta tomada em rad/s. Para um modo de 1,6Hz, resulta em 0,1s. Em sistemas que apresentam componentes de alta frequência e amplitude, no canal da frequência, esta constante é aumentada. O preço que se paga com tal aumento é a maior sensibilização da potência reativa às tomadas de carga ativa. Valores até 0,2s são perfeitamente aceitáveis sendo 0,1s o usual;
- d) T1: O ajuste desta constante de tempo está associado à banda inferior de frequências de atuação do ESP. Usualmente ajustada em 3s pode ser levada a 2s em sistemas cuja regulação de frequência é muito pobre. Em sistemas com boa regulação de frequência e que apresentem modos inter-áreas de frequência muito baixa, pode ser bem maior, havendo casos do uso de constantes da ordem de 6s.
- e) T2: As mesmas observações efetuadas para o primeiro "reset". É setada no mesmo valor;
- f) T3-T8: Para o ajuste das constantes de tempo lança-se mão da curva Gep(jw). Descontados os avanços associados aos "resets", ajustam-se estas constantes de forma

a compensar os atrasos de fase do sistema de excitação em um larga banda de frequências, contemplando desde os modos inter-áreas até o modo intra-planta;

- g) K: O ganho é aumentado até que as oscilações associadas ao modo da excitatriz apresentem uma degradação significativa de amortecimento. Uma boa política é a de manter uma margem de ganho de, no mínimo 6dB.

Embora nem sempre seja possível, é conveniente tentar ajustar o ESP em uma condição desfavorável de sistema (elevada reatância externa) para melhorar a robustez. Ajustados os parâmetros a máquina deve ser operada nos entornos de sua curva de capacidade de modo a verificar se os ajustes são igualmente robustos com a carga. Também é conveniente realizar um ensaio de tomada de carga ativa, à máxima velocidade, usando o limitador de carga, para verificar se as variações transitórias observadas na potência reativa estão dentro de valores aceitáveis.

6.5.10 Ensaio de Rejeições de Carga

Os ensaios de rejeição de carga visam avaliar o comportamento do regulador de velocidade a uma retirada brusca de carga. Esses ensaios realizam-se progressivamente a 25, 50, 75 e 100% de rejeição.

A partir destas curvas podemos obter a sobrevelocidade atingida (S) em cada rejeição, o tempo de restabelecimento da velocidade nominal do grupo (T_{rv}), o tempo total de fechamento do servomotor (T_f) e o tempo morto do regulador de velocidade (T_r). Veja na ilustração da figura 57 como identificar cada parâmetro mencionado.

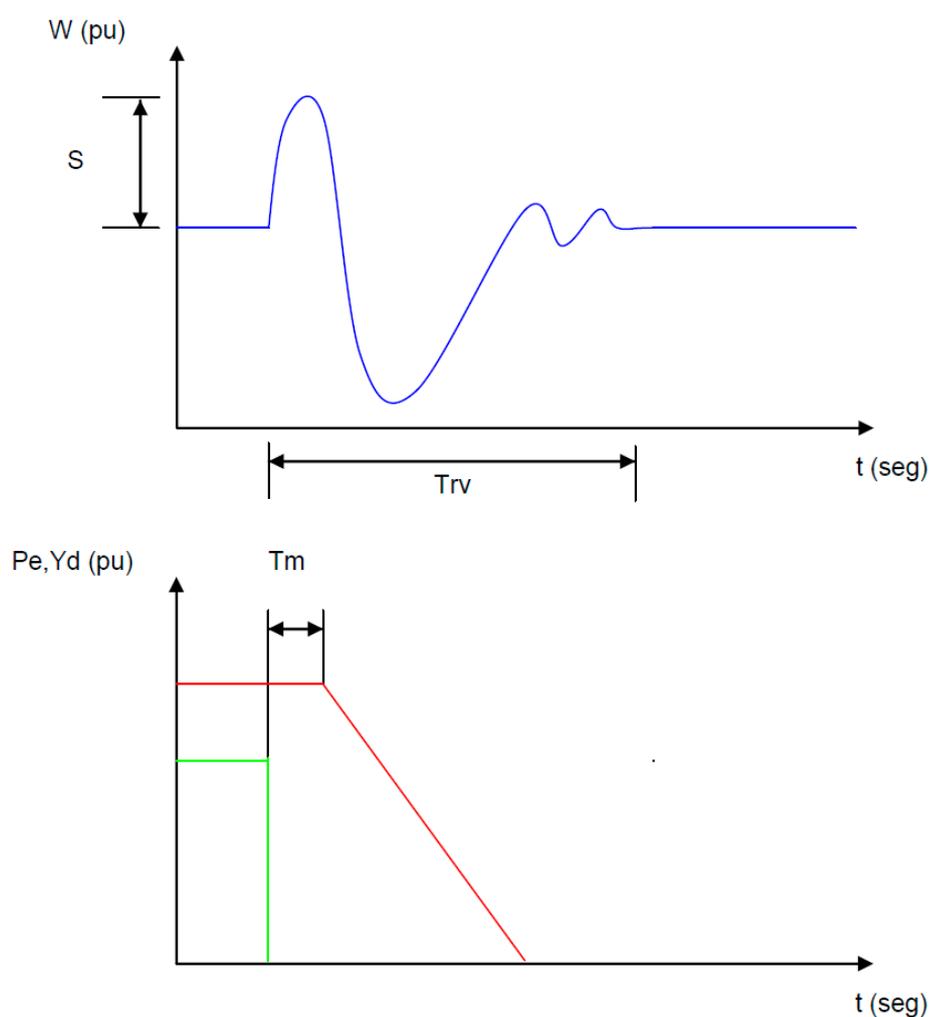


Figura 57 - Análise de Rejeição de Carga. Fonte: Reivax (2007)

- Sobrevelocidade: $S = 24,5\%$
- Tempo para reestabelecimento: $Trv = 50s$
- Tempo de fechamento do servomotor: $Tf = 4.79s$
- Tempo morto do regulador de velocidade: $Tmrv = 0,27s$
- Sobrepressão do conduto = 31%

6.5.11 Tabela de Ajustes de Regulador Reivax

Ao final de todo comissionamento deve-se obter a tabela de todos os parâmetros ajustados no regulador, isto se faz obtendo um arquivo de dados através de comunicação serial com o regulador ou mesmo através da IHM, anotando parâmetro por parâmetro, apesar desta última forma ser muito trabalhosa é de fundamental importância a obtenção desta tabela.

7 RELATORIO DE RESULTADOS DE COMISSIONAMENTO DO RTVAX

Um relatório de comissionamento visa documentar os testes envolvidos durante o comissionamento e assegurar o correto funcionamento do equipamento de acordo com as especificações do cliente. Dessa forma, o relatório de testes de comissionamento do RTVAX da UG 1 da PCH Caboclo garante o desempenho do equipamento sob condições diversas de operação.

7.1 Responsáveis

O comissionamento do RTVAX da UG 1 da PCH Caboclo foi executado por engenheiros da Reivax, de forma a seguir o escopo de contratação de equipamentos e serviços elaborado pela BEI.

Ademais, durante o comissionamento houve envolvimento de pessoal técnico da BEI, CEI e Maynard, de forma que os responsáveis diretos pelo comissionamento foram Marcio Augusto Ferreira e Júlio Cesar Baptista, o último o engenheiro responsável pela emissão do relatório de comissionamento.

7.2 Período

O comissionamento da unidade foi realizado basicamente em 3 etapas pelos técnicos responsáveis da Reivax mencionados acima durante o período de 17 de outubro de 2016 à 29 de dezembro de 2016. Período esse compreendido pela presença em campo dos técnicos e realização dos testes de comissionamento.

7.3 Relatório de Resultados de Comissionamento

O relatório de comissionamento seguiu em partes os testes descritos no capítulo anterior, sendo que procedimentos e rotinas foram adequados ao caso da PCH Caboclo. Por se tratar de um documento confidencial de propriedade da contratante serão abordados nessa sessão apenas os comentários de cada teste realizado e particularidades dos mesmos, sendo apresentado, em partes, os resultados reais obtidos com os testes e parametrizações.

7.3.1 Informações gerais

O relatório fornecido pela Reivax, como mencionado anteriormente, traz primeiro as informações gerais sobre o relatório, como data de realização do comissionamento, pessoal

envolvido e especificações técnicas do sistema regulador (RTVAX), valores adotados como base, dados da excitatriz e dados do gerador como pode ser visto nas tabelas 1 e 2 do capítulo 3.

7.3.2 Sessão de verificações iniciais

Nas sessões de verificações iniciais foram seguidos todos os padrões sugerido no capítulo anterior, desde a verificação ponto a ponto à verificação visual do equipamento.

Neste ponto foi gerado uma tabela com todos os itens testados e verificados com a marcação de OK e NOK quanto a integridade e ligação da parte. Na tabela 16 podemos ver o exemplo do material gerado para saídas analógicas do painel.

INFORMAÇÃO	SAÍDA ANALÓGICA	RESULTADO
O_IND_W – FREQUENCIA	AO1	OK
O_IND_VT – TENSÃO TERMINAL	AO2	OK
O_IND_IFD1 – CORRENTE DE CAMPO	AO3	OK
O_IND_EFD1 – TENSÃO DE CAMPO	AO4	OK
O_IND_P – POTÊNCIA ATIVA	AO5	OK
O_IND_Q – POTÊNCIA REATIVA	AO6	OK
RESERVA	AO7	OK
RESERVA	AO8	OK
CTR1 – SINAL CONTROLE VÁLVULA PROPORCIONAL DISTRIBUIDOR	AO9	OK
RESERVA	AO10	OK
RESERVA	AO11	OK
O_IND_YGA – POSIÇÃO DISTRIBUIDOR	AO12	OK
RESERVA	AO13	OK
RESERVA	AO14	OK
RESERVA	AO15	OK
RESERVA	AO16	OK

Tabela 16 - Status da saída analógicas gerado no relatório de comissionamento. Fonte: Reivax (2017)

7.3.3 Ajuste de parâmetros do distribuidor

Nos ensaios de água morta o primeiro teste realizado foi o teste da ponte (circuito CC aberto) e pré-ajuste. Para isto utilizou-se a tensão 220Vca do serviço auxiliar da usina conectada a régua de bornes de entrada da DRV (drive de potência) e abriu-se os cabos de alimentação do campo da excitatriz conforme recomendado no manual de comissionamento da Reivax.

Em seguida, foram realizados os testes a fim de determinar os tempos de abertura e fechamento do distribuidor, que ficaram estabelecidos em 9,13s e 6,98s até o início do amortecimento respectivamente.

Em água morta também foram feitos os ensaios de fechamento pela emergência, ajustes da dinâmica do atuador com degrau de 5% e outro com degraus consecutivos de 10%. Nas

figuras 58 e 59 podemos ver as respostas da posição de abertura do distribuidor e resposta dos sinais de controle do mesmo.

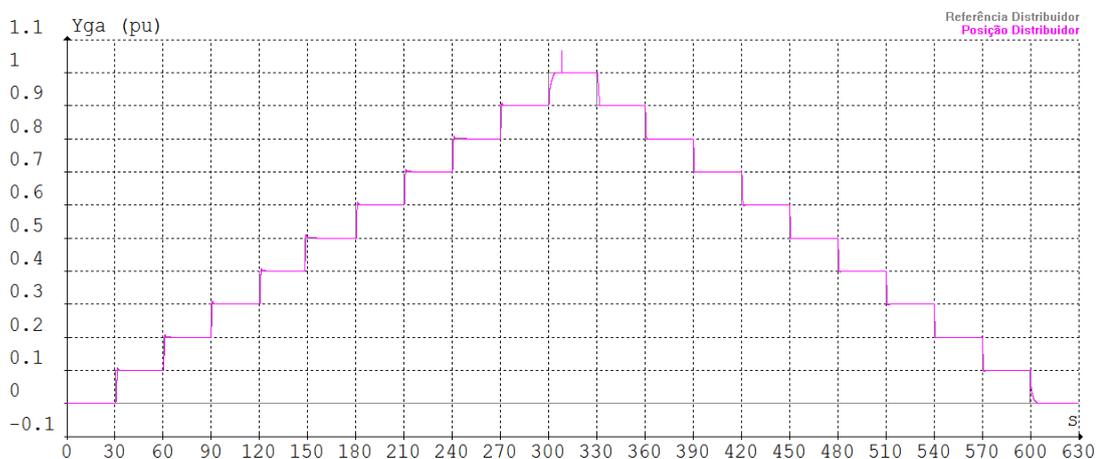


Figura 58 - Resposta da posição do distribuidor à sequência degraus 10%. Fonte: Reivax (2017)

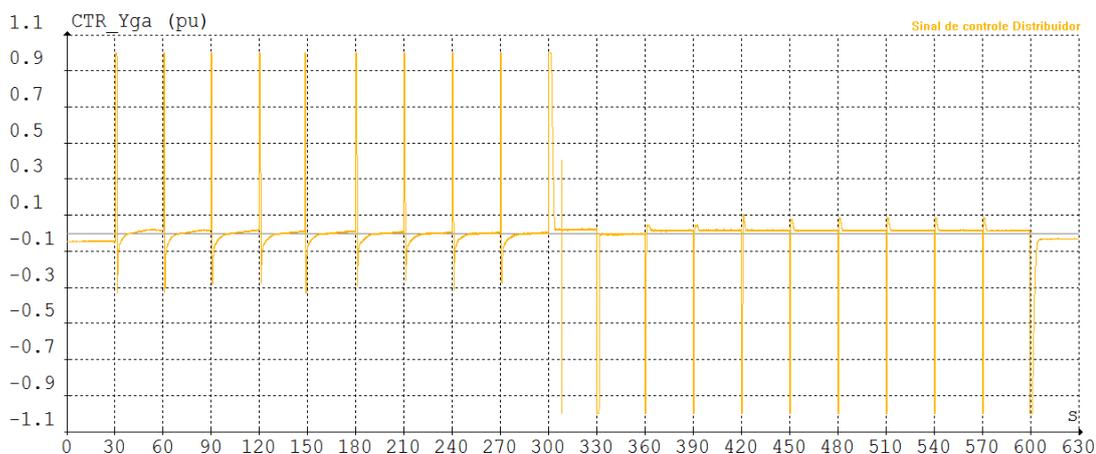


Figura 59 - Resposta do sinal de controle do distribuidor à sequência degraus 10%. Fonte: Reivax (2017)

7.3.4 Testes dinâmicos do regulador de velocidade à vazio

A etapa de ensaios a vazio visa ajustar o regulador de velocidade para partida automática da turbina e sua operação em rotação nominal a vazio (*speed no load*) e o regulador de tensão para garantir a excitação da máquina deixando o conjunto apto para o sincronismo.

Para este ensaio o conduto forçado e o caracol foram equalizados, com comporta de emergência levantada, todas as proteções habilitadas e todo o inter-travamento efetuado.

Inicialmente todos os comandos são feitos localmente e inclui o giro mecânico da máquina, partida gradativa, partida automática, ajustes da malha de frequência, excitação gradativa, ajustes da malha de tensão e corrente, desexcitação e parada do grupo. Ainda neste ensaio são realizadas a excitação automática e atuação das proteções.

Durante os ensaios dinâmicos, vários registros foram feitos, a fim de verificar e ajustar a malha de controle do sistema de regulação, estando os mesmos ajustados para as grandezas expressas em pu. As figuras 60 à 62 ilustram alguns dos gráficos obtidos nos testes de partida automática, ajuste da malha de velocidade e comutação entre as leitura de velocidade de Pickup e TP respectivamente.

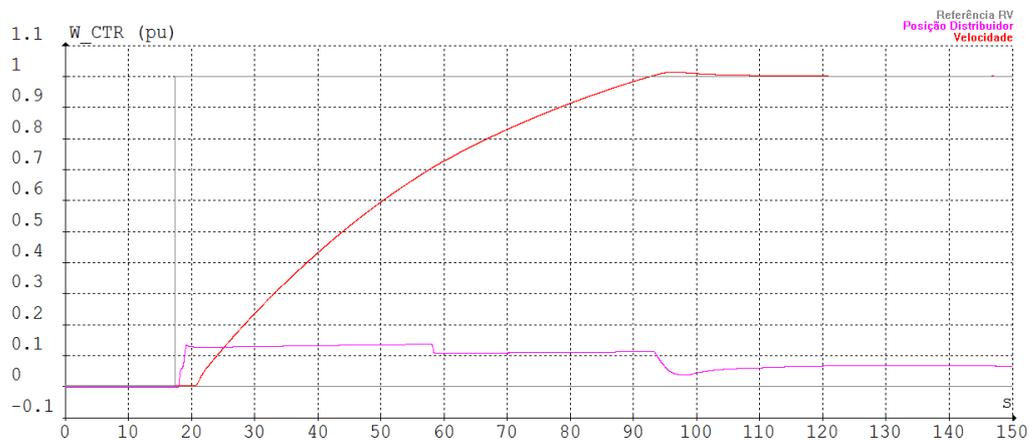


Figura 60 - Partida automática. Fonte: Reivax (2017)

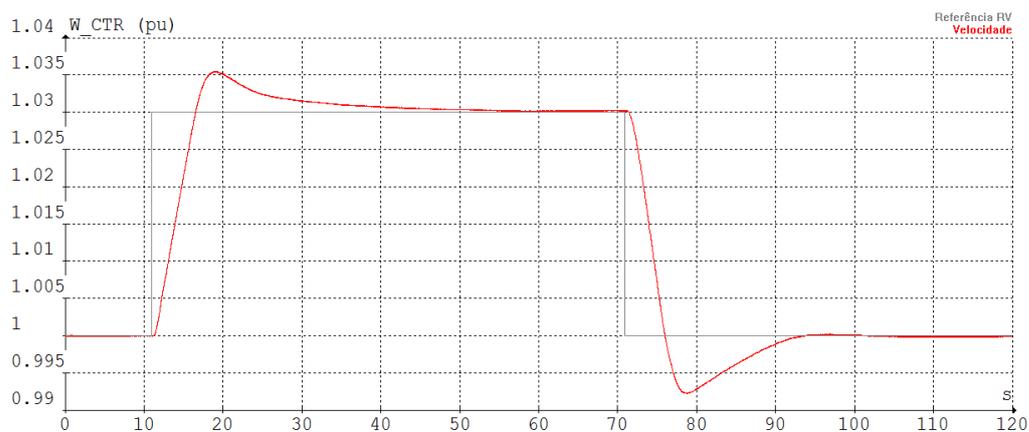


Figura 61 - Ajuste da malha de velocidade – Resposta ao degrau de 3%. Fonte: Reivax (2017)

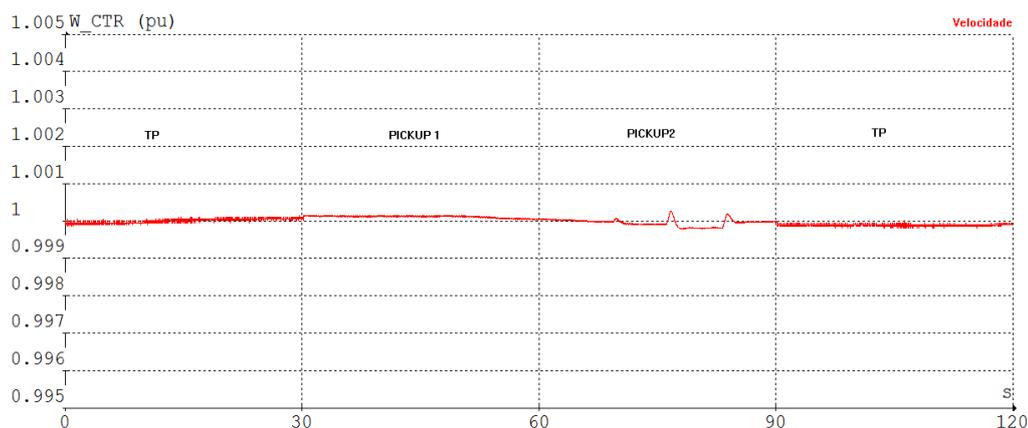


Figura 62 - Comutação de medição de velocidade TP – Pickup1- Pickup2-TP. Fonte: Reivax (2017)

7.3.5 Testes dinâmicos do regulador de tensão à vazio

Os testes do regulador de tensão à vazio são realizados com a UG girando em velocidade nominal de forma que foi efetuado o ajuste da transdução de tensão terminal, da tensão e da corrente de campo do gerador elétrico.

Com a máquina excitada em tensão terminal em 50%, foram ajustadas as transduções de tensão e corrente de excitação da excitatriz. A aquisição dessas medições é realizada pelo módulo DRV01 e pelo shunt respectivamente. Sua transdução é realizada pelo cartão ISO02 enviando o sinal de corrente para o módulo MAC01.

7.3.5.1 Parâmetros da lógica de excitação no modo de controle manual

A excitação manual (controle por corrente de campo) é iniciada ao ser dado o comando de fechamento do disjuntor de campo. A transição do estado do mesmo inicializa o processo de rampeamento da referência em controle (proporcional ao disparo da ponte de tiristores) de modo controlado, elevando a corrente de campo até 1,0 pu.

O modo de controle “manual” tem como objetivo a excitação gradativa da unidade geradora. É particularmente interessante para a excitação gradativa do transformador elevador ou levantamento da curva de saturação a vazio.

A variável de controle selecionada é a corrente de campo (I_{fd}). Dessa forma, o modo de controle “manual” pode ser utilizado na eventual perda da informação de tensão terminal da unidade.

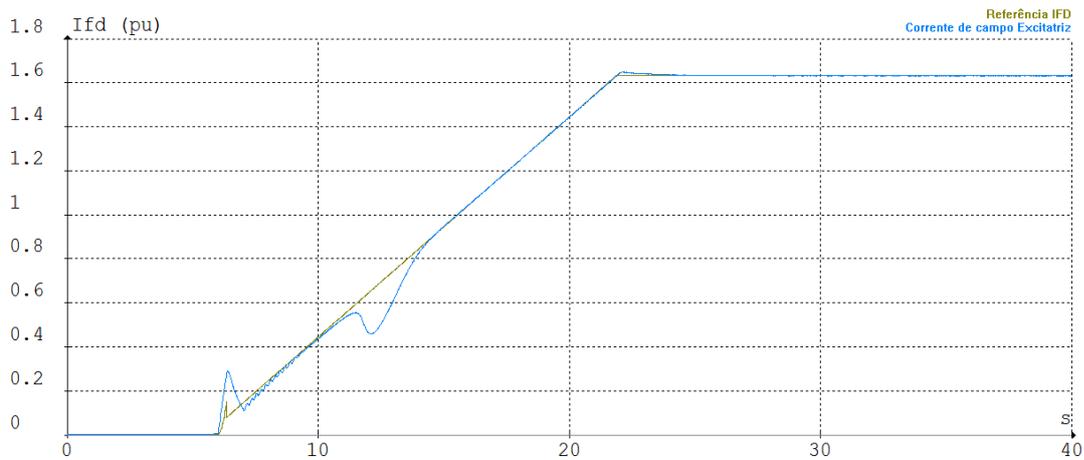


Figura 63 - Rampeamento da corrente de campo da Excitação em modo manual. Fonte: Reivax (2017)

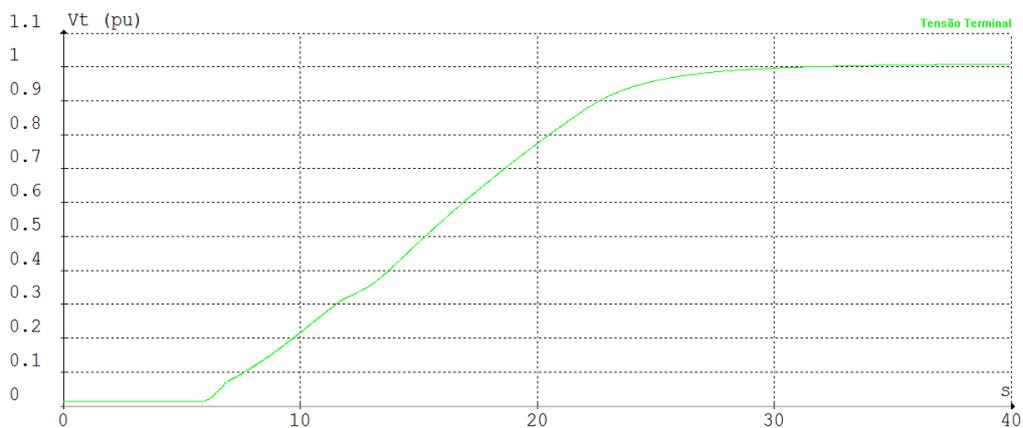


Figura 64 - Rampeamento da tensão terminal da Excitação em modo manual. Fonte: Reivax (2017)

7.3.5.2 Desexcitação normal (forçamento negativo)

A desexcitação controlada ocorre via abertura do contator de campo, reduzindo a corrente de campo da excitatriz de forma brusca forçando a queda de tensão terminal. O correto funcionamento deste processo prolonga a vida útil do contator de campo e de todo o sistema de excitação.

A desexcitação em modo de controle de tensão não difere da desexcitação em controle de corrente, pois os parâmetros ajustáveis são os mesmos.

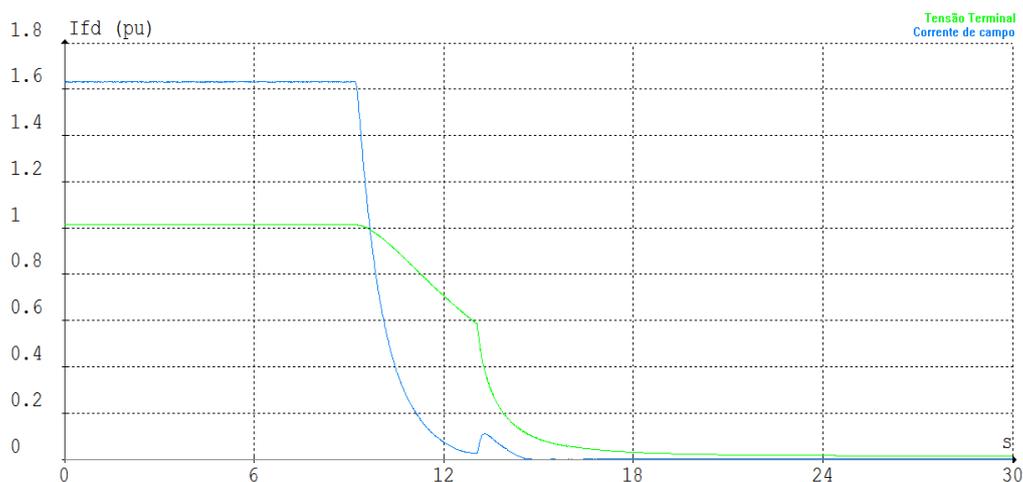


Figura 65 - Desexcitação em controle manual. Fonte: Reivax (2017)

7.3.5.3 Ajuste do modo de controle automático (tensão terminal)

O ajuste do desempenho dinâmico da malha de regulação foi feito através da aplicação de degraus na referência do regulador, observando parâmetros como tempo de resposta, sobressinal e amortecimento, procurando-se um compromisso entre tempo de resposta e estabilidade. Nas figuras 66 e 67 podem ser visto as respostas da tensão terminal e corrente de campo ao degrau de 3%, obtendo um overshoot de 3,5%, um tempo de subida de 260ms e 0,2% de erro em regime permanente.

A aplicação de degraus na referência do sistema de excitação é habilitada através da “Tela ajuste da malha de controle” disponível na IHM.



Figura 66 - Controle de tensão terminal resposta ao degrau de 3%. Fonte: Reivax (2017)

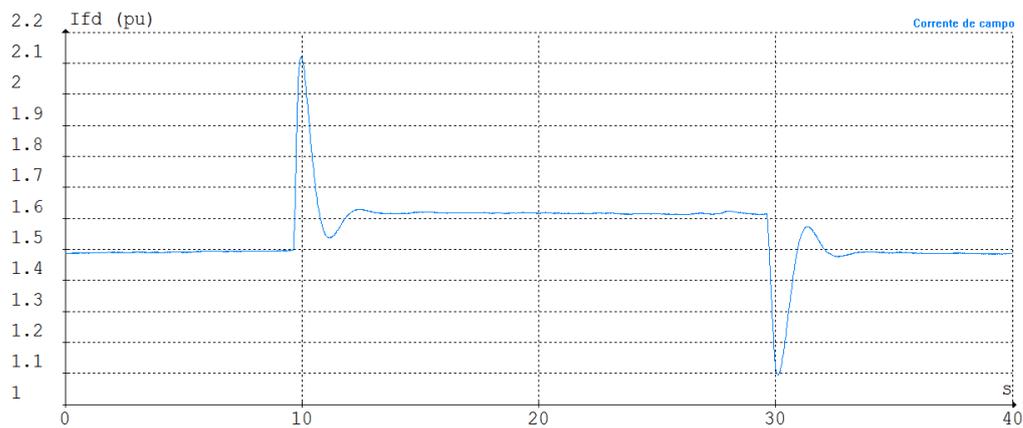


Figura 67 - Controle de corrente de campo em resposta ao degrau de 3%. Fonte: Reivax (2017)

7.3.5.4 Ajuste do limitador V/Hertz

O ajuste do limitador V/Hz seguiu além do recomendado nesse material a seguinte ordem de ensaios realizados:

- Leitura do atual ponto de operação da unidade;
- Aplicação de degrau com verificação da variação da corrente de campo;
- Ajuste do setpoint do limitador de máxima excitação, de modo que na aplicação do degrau ocorresse a ativação do limitador;
- Registro do desempenho dinâmico abaixo, relativo a um degrau de 0,04pu na referência de tensão terminal, estando o setpoint do limitador ajustado em 1,03 pu de tensão terminal.

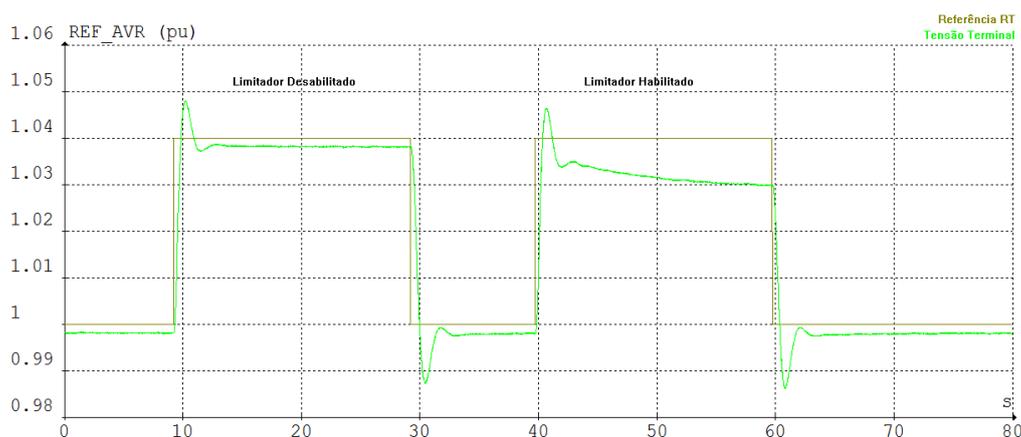


Figura 68 - Atuação do limitador V/Hertz. Fonte: Reivax (2017)

7.3.5.5 Ajuste do Limitador de Sobreexcitação (LCC)

O ajuste do limitador V/Hz seguiu além do recomendado nesse material a seguinte ordem de ensaios realizados: O limitador de corrente de campo (LCC) ou limitador de máxima excitação mede a corrente do rotor e a compara com a máxima permitida a vazio e em carga, garantindo a proteção para o rotor da máquina, mantendo a corrente de excitação dentro dos limites admitidos pelo gerador. Caso haja violação da máxima corrente, este dispositivo intervém agindo dinamicamente no sentido de diminuir a excitação. A proteção de sobrecorrente vislumbra os possíveis problemas de superaquecimento.

Os ajustes de desempenho do limitador de máxima excitação são análogos ao limitador V/Hz, ou seja, aplicação de degraus na referência, com o ponto de operação próximo ao ajuste do *setpoint*, observando seu comportamento dinâmico.

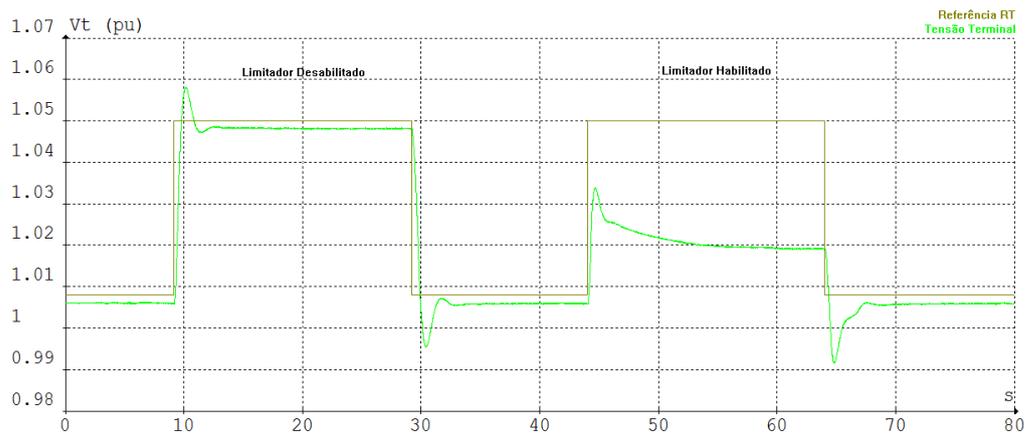


Figura 69 - Atuação do Limitador LCC. Fonte: Reivax (2017)

7.3.5.6 Comutação de modo de controle (Automático – Manual)

A variável de controle selecionada é a tensão terminal, com transferência para corrente de campo e retorno para controle de tensão terminal.

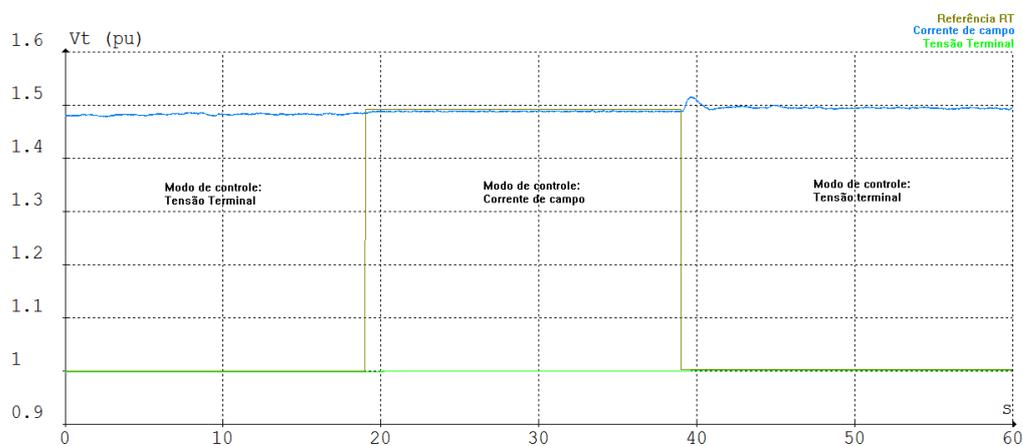


Figura 70 - Comutações dos modos de controle. Fonte: Reivax (2017)

7.3.6 Testes dinâmicos em carga do regulador de velocidade

Por se tratar de testes já mencionados anteriormente os ensaios do regulador de velocidade em carga são resumidos em gráficos no Relatório de Resultados de Comissionamento. Mostraremos aqui os mais relevantes apresentados no relatório.

7.3.6.1 Sincronismo

Observamos uma sincronização sem grandes perturbações nos sinais controlados pelo regulador.

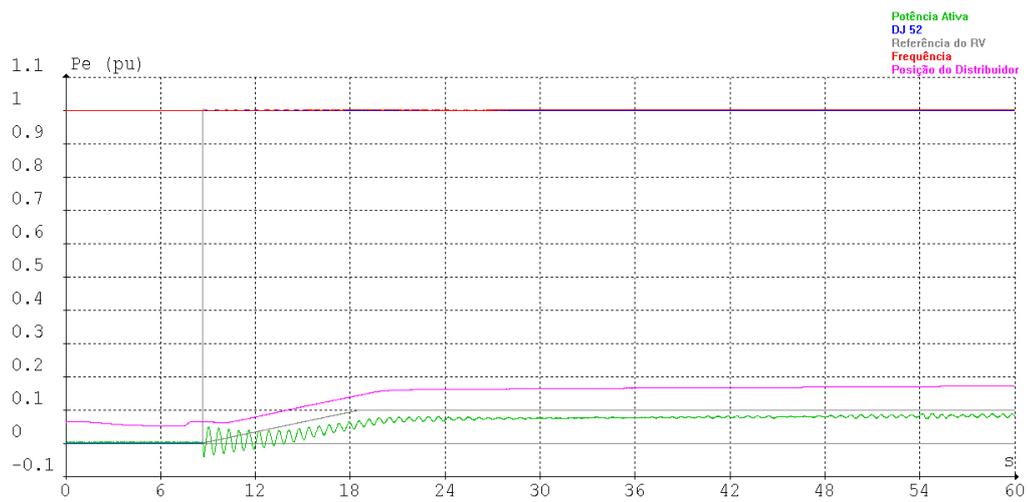


Figura 71 – Sincronismo. Fonte: Reivax (2017)

7.3.6.2 Rejeição de carga

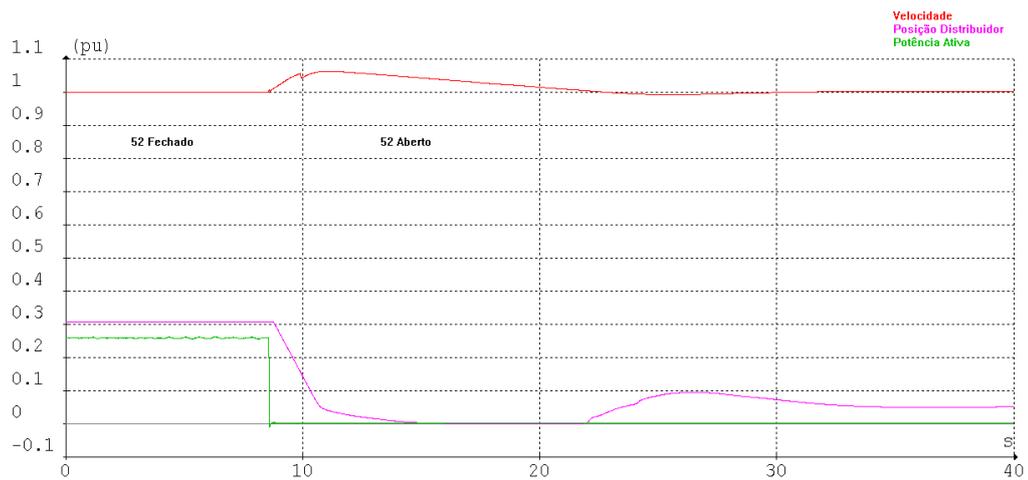


Figura 72 - Rejeição de carga com 25% de potência, 6,2% de sobrevelocidade e 19,59s de tempo de reestabelecimento. Fonte: Reivax (2017)

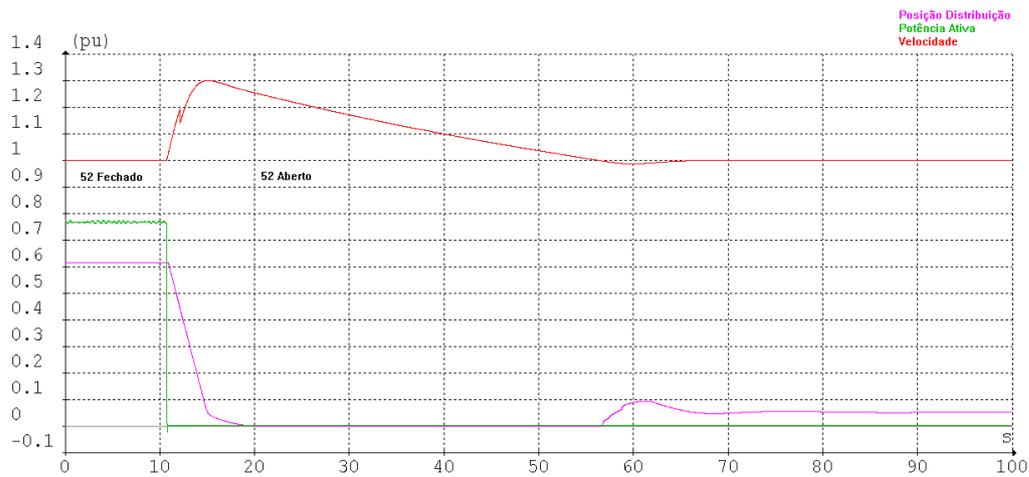


Figura 73 - Rejeição de carga com 75% de potência, 29,9% de sobrevelocidade e 53,8s de tempo de reestabelecimento.
Fonte: Reivax (2017)

7.3.6.3 Ajuste da dinâmica do controle de potência – Degrau 5%

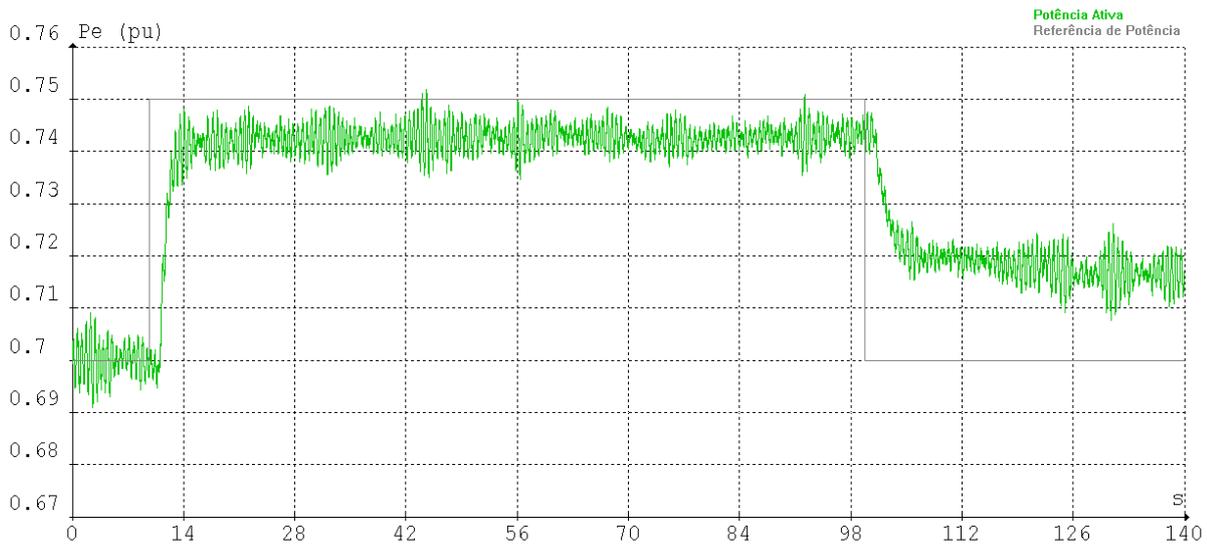


Figura 74 - Ajuste dinâmico, resposta ao degrau 5%, tempo de subida de 3,05s, referência inicial 0,7 e final 0,75. Fonte: Reivax (2017)

7.3.6.4 Ajuste da dinâmica do controle de potência – rampa modo potência

Na tomada de carga é possível verificar que o distribuidor não sofre oscilações bruscas.

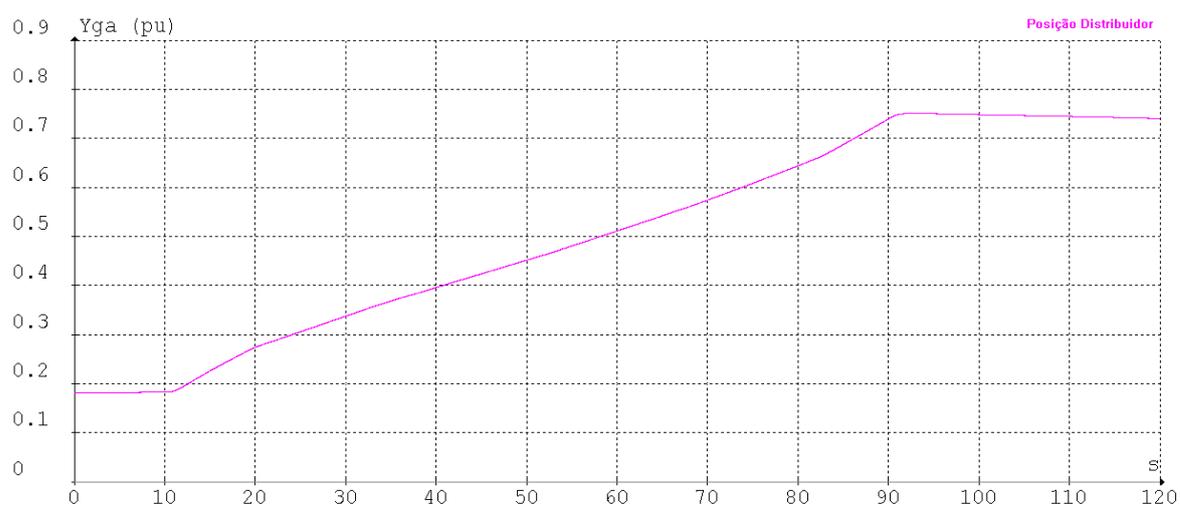


Figura 75 - Ajuste da dinâmica do controle de potência – Rampa de tomada de carga (posição do distribuidor). Fonte: Reivax (2017)

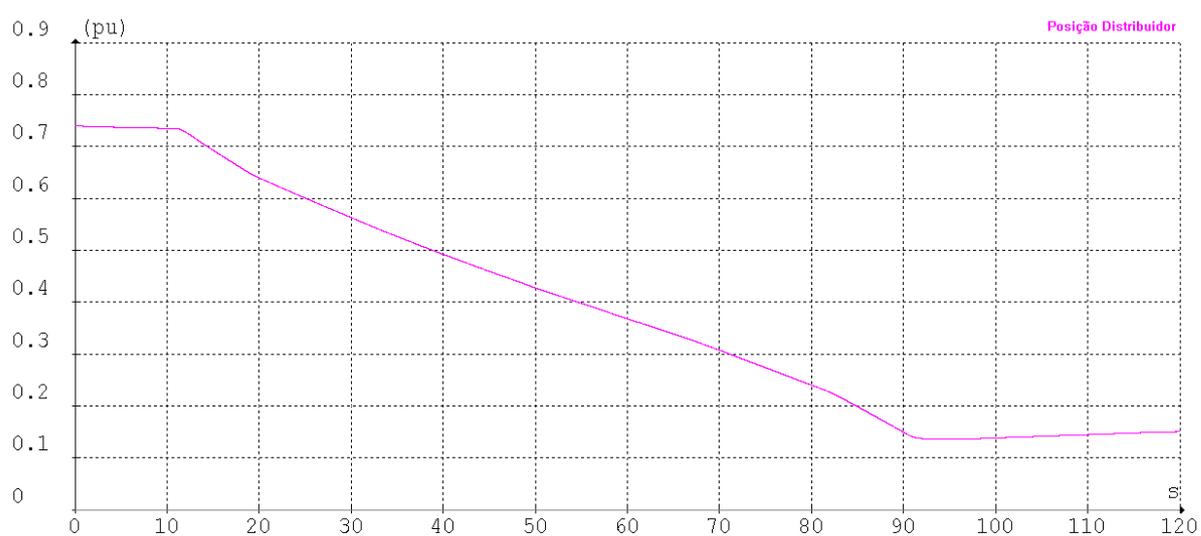


Figura 76 - Ajuste da dinâmica do controle de potência – Rampa de retirada de carga (posição do distribuidor). Fonte: Reivax (2017)

7.3.7 Testes dinâmicos em carga do regulador de tensão

7.3.7.1 Ajuste do modo de controle automático (tensão terminal)

Com o grupo sincronizado, efetuou-se o ajuste da malha de controle em carga no modo de controle de tensão.

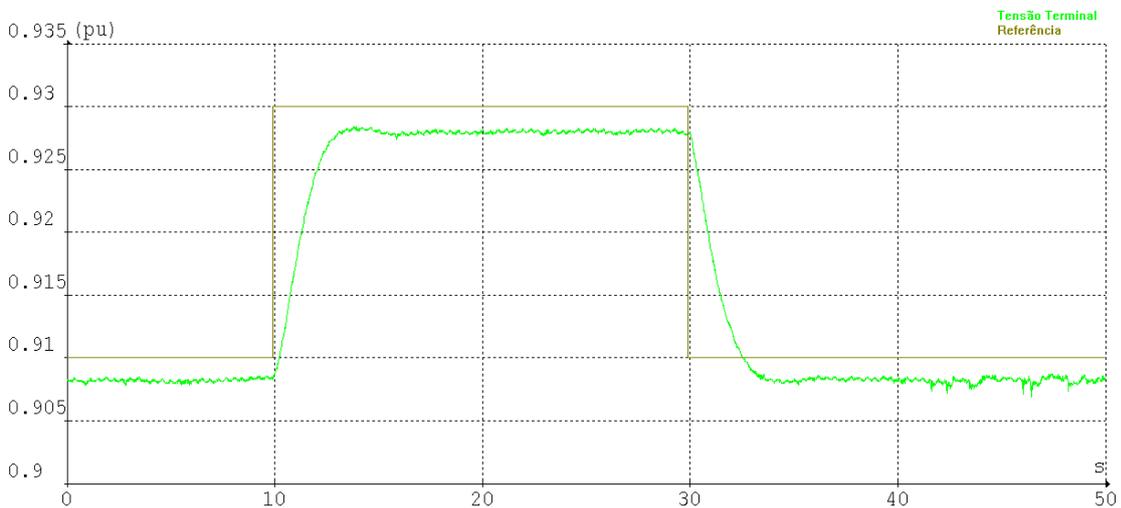
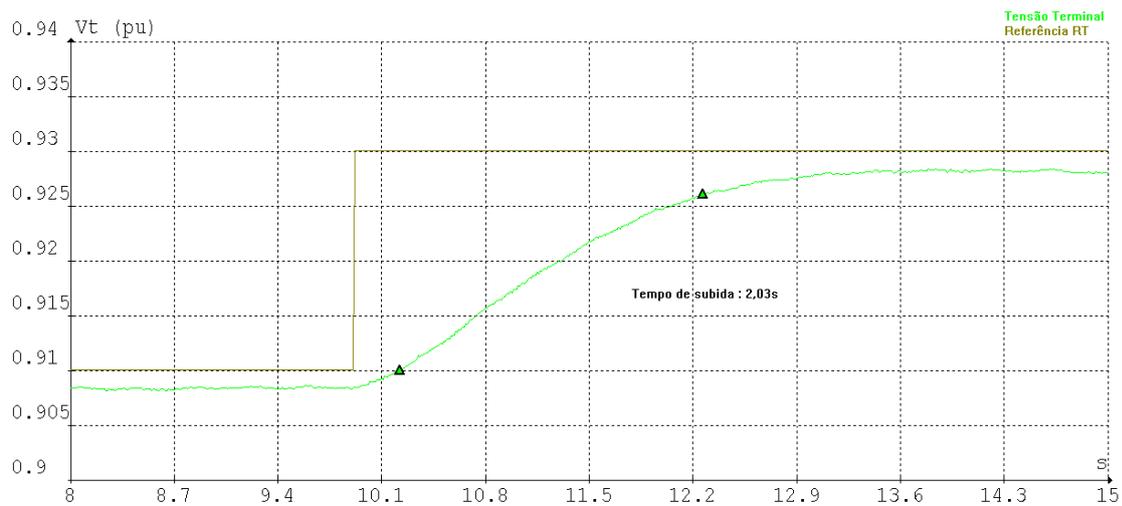


Figura 77 - Controle de tensão terminal: resposta ao degrau de 2%, referência inicial 90,7%, overshoot 0%, tempo de subida 2,03s e erro em regime 0,21%. Fonte: Reivax (2017)

7.3.7.2 Ajuste do modo de controle manual (corrente de campo)

A variável de controle selecionada é a corrente de excitação. Este modo de controle pode ser utilizado na eventual perda da informação de tensão terminal da unidade.

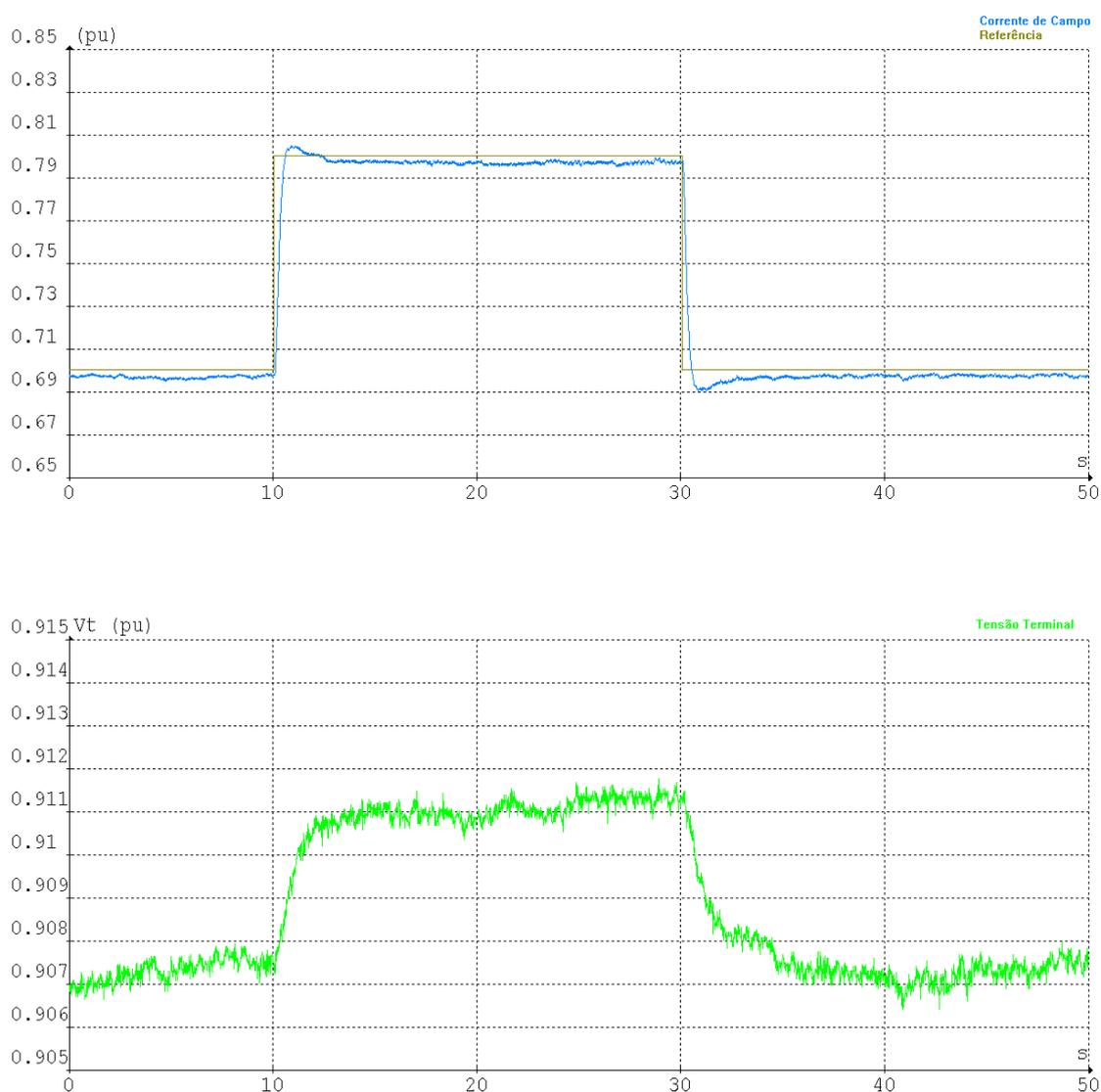


Figura 78 - Controle de corrente de campo resposta ao degrau de 10%, referência inicial 70%, overshoot 10,63%, tempo de subida de 509ms, e erro em regime 0,25%. Fonte: Reivax (2017).

7.3.7.3 Ajuste do Limitador de Corrente Estática (LCE)

Este ensaio visa validar a atuação correta do limitador de máxima corrente estática, garantindo a proteção do estator da máquina, mantendo a corrente do estator dentro dos limites admitidos pelo gerador.

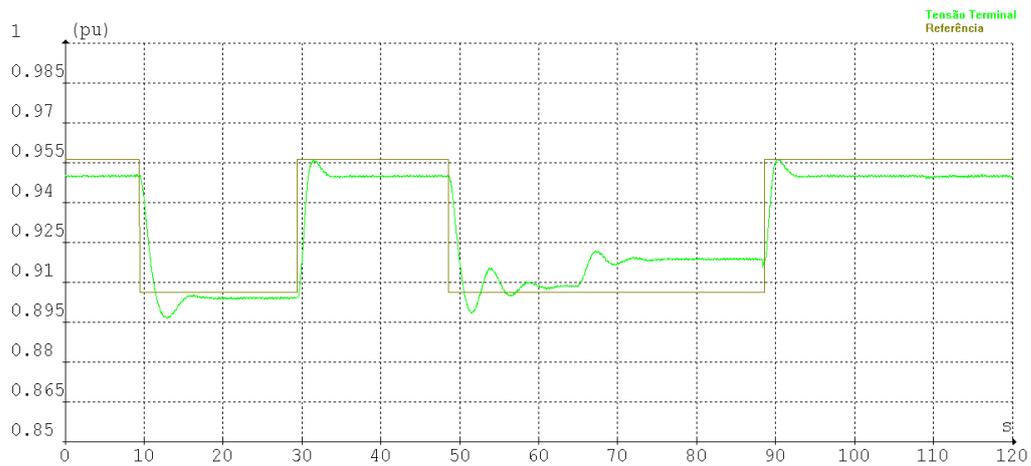


Figura 79 - Atuação do limitador LCE. Fonte: Reivax (2017)

7.3.7.4 Ajuste do Limitador de Subexcitação (LSE)

O objetivo deste limitador é o de prevenir a perda do sincronismo da unidade geradora principalmente em variações impostas pelo sistema. Nestes casos, ou até mesmo através de comandos voluntários para diminuir a excitação, o limitador de mínima excitação garante que o ponto de operação do gerador elétrico fique dentro dos valores pré-estabelecidos pela curva de capacidade e a proteção da unidade.

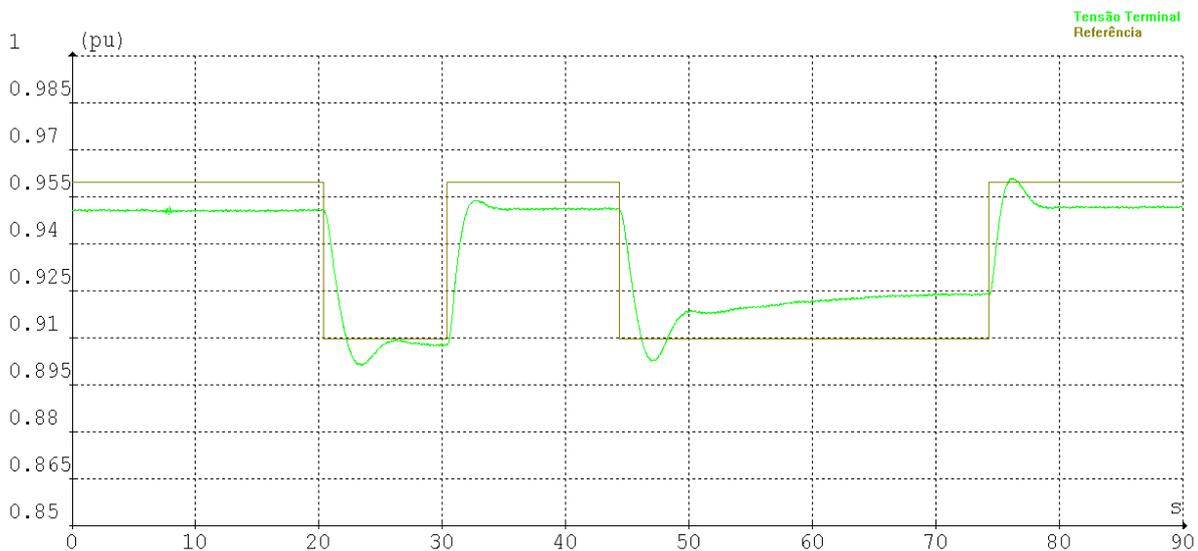


Figura 80 - Atuação do limitador LSE. Fonte: Reivax (2017)

7.3.7.5 Comutação entre modos de controle (Tensão Terminal – Corrente de Campo – Potência Reativa - Tensão Terminal)

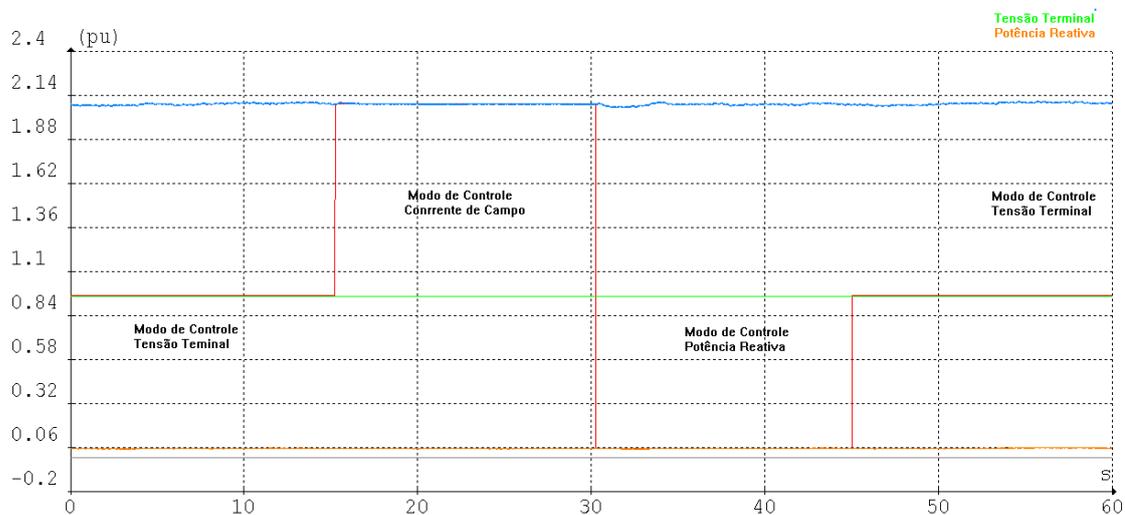


Figura 81 - Comutação de modo de controle. Fonte: Reivax (2017)

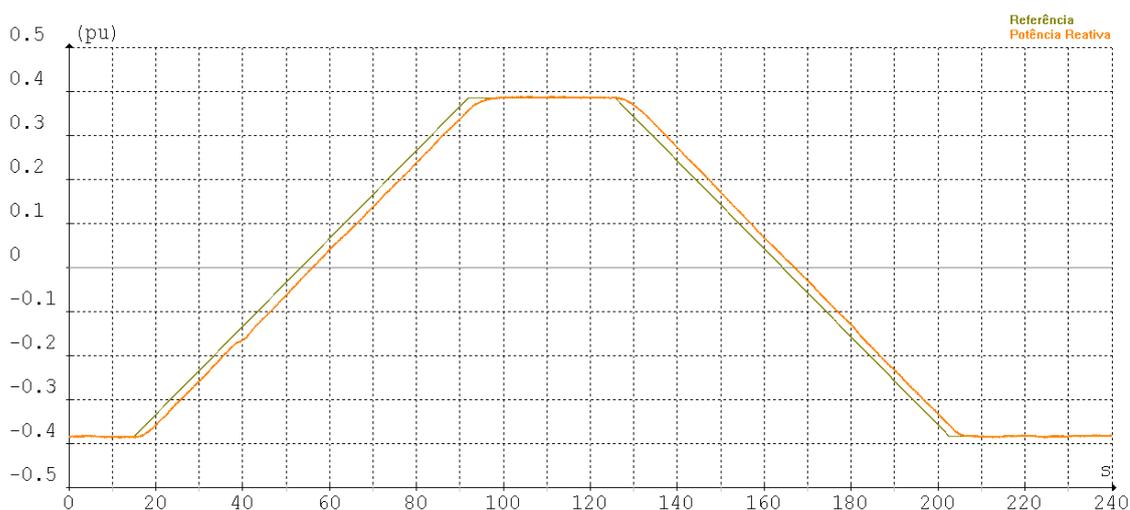


Figura 82 - Ajuste dinâmica reativo. Fonte: Reivax (2017)

7.3.7.6 Tabela de parâmetros

Uma das últimas partes do relatório de comissionamento é o capítulo destinado a apresentação de todas as tabelas geradas durante os testes e ensaios, contendo valores de referência, parâmetros e resultados de ajustes. Na tabela 17 temos um exemplo da tabela do controle de posição do distribuidor.

Distribuidor				
IHM		DESCRIÇÃO	VALOR	UNIDADE
Controlador		T1	0,020	s
		T2	0,004	s
		Max	1,000	pu
		Min	-1,000	pu
		Kp	37,00	-
		Ki	1,0	-
		Kc	0,00	-
		a	0,00	pu
		Max Integ	0,500	pu
		Min Integ	-0,500	pu
		Saída de Controle	Escala da saída de controle	Ganho
Offset	12,00			mA
Sinal em Repouso	19,00			mA
Dither	Ganho		0,00	-
	Frequência		50,0	Hz
Comando Ynz1		Ynz1	0,00	%
		Habilitado / Desabilitado	Desabilitado	-

Tabela 17 - Controle de Posição do Distribuidor. Fonte: Reivax (2017)

7.3.8 Considerações finais do Relatório de Resultados de Comissionamento

O relatório de comissionamento fornecido pela Reivax em (REIVAX, AUTOMAÇÃO E CONTROLE, 2017) é completo em termos de resultados de testes e parametrizações. Apresenta todos os gráficos obtidos e tabelas com valores configurados nos testes de comissionamento. A conclusão do relatório foi que a integração do sistema RTVAX com os outros equipamentos da usina foi bem sucedida e o equipamento está operando com segurança. Sendo que a oscilografia mostrou boa dinâmica de desempenho em todos os modos de controle com tempos de resposta compatíveis com a resposta proposta pelo equipamento.

8 CONCLUSÃO

Durante a elaboração do presente trabalho foi possível solidificar os conceitos de comissionamento industrial. Aqui foi concebida uma abordagem histórica e conceitual, desde as origens do termo comissionamento aos conceitos atuais. As aplicações práticas e reais, aqui demonstradas, permitiu ampliar o conhecimento teórico adquirido com as pesquisas a respeito do tema, assim levando a uma visão crítica dos processos industriais como um todo.

Como visto anteriormente, o comissionamento é uma atividade complexa, geralmente terceirizada pelas empresas, o que envolve compromisso, responsabilidade e confiança entre as partes. De forma, que para uma eficaz transição da parte de construção/modernização, de uma planta, para a parte de operação é necessário uma boa relação contratada e contratante, sendo necessário extrema experiência e competência por parte da contratada e responsabilidade operacional por parte da contratante.

Durante o período de acompanhamento do retrofit da PCH Caboclo foi possível se ambientar com a rotina de trabalho industrial, principalmente com o acompanhamento dos trabalhos de comissionamento do painel integrado RVTAX.

Muitos dos prazos contidos no cronograma de comissionamento elaborado pela CEI não foram cumpridos, o que gerou atrasos na execução do projeto e retrabalho de todas as equipes envolvidas. Ademais, alguns erros de projeto causaram retrabalho e prejuízos financeiros, como a queima de TP's da UG estudada.

Assim, foi possível perceber uma excelente atuação da equipe Reivax, ao se disponibilizar para trabalhos fora do escopo de fornecimento de serviço de comissionamento. Pode-se notar nas leituras dos diários de atividades da equipe Reivax que sempre houve uma grande demanda de retrabalho, causada principalmente pela contratante BEI.

O pouco tempo de mercado e inexperiência de algumas empresas envolvidas podem ter afetado a qualidade de todo o processo de modernização proposto. Todavia, sem sombra de dúvidas, o fator planejamento na execução do projeto foi significativamente determinante para tal. Entre todas as atividades listadas no cronograma inicial, poucas foram executadas no prazo, sendo que o próprio retrofit da PCH Caboclo ainda não foi concluído, de forma que o projeto de retrofit de outras usinas provavelmente será prejudicado por esse atraso.

Em síntese, o processo de comissionamento está entrelaçado às fases de projeto e execução, sendo totalmente errado tratá-lo como uma relés fase final de montagem e sobrecarrega-la

com a demanda de resolver todos os problemas acumulados durante as fases anteriores. Isso demonstra o quanto precisamos avançar em pesquisas e estudos dos casos de comissionamento, para de fato melhorar a qualidade desse serviço essencial para indústria moderna e competitiva.

9 BIBLIOGRAFIA

ALCAN. **Memória Viva - 50 Anos da Alcan Alumínio do Brasil**. Ouro Preto. 2000.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 673 de 04 de agosto de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>>. Acesso em: 2017 janeiro 12.

BRITO, M. E. **Comissionamento de instalações industriais - Importância e Conceitos**, 2008. Disponível em: <http://www.tbspatinga.com.br/90artigos_Maurini.asp>. Acesso em: 03 janeiro 2017.

CONFEA. Conselho Federal de Engenharia e Agronomia. **Resolução nº 1048**. Disponível em: <<http://normativos.confesab.org.br/ementas/visualiza.asp?idEmenta=52470>>. Acesso em: 2017 janeiro 22.

HOUAISS, A. **Minidicionário Houaiss da língua portuguesa**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 2010.

MUZY, G. L. C. D. O. **Subestações Elétricas**. Rio de Janeiro: UFRJ - Escola Politécnica - Departamento de Engenharia Elétrica, 2012. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005233.pdf>>. Acesso em: 03 fevereiro 2017.

NASCIMENTO, W. C. **Processo de comissionamento para projetos industriais**. Belo Horizonte: Faculdade Internacional Signorelli, 2014. Disponível em: <<http://pmkb.com.br/uploads/18435/processo-de-comissionamento-para-projetos-industriais.pdf>>. Acesso em: 07 fevereiro 2017.

REIVAX, AUTOMAÇÃO E CONTROLE. **Regulador de Tensão e Velocidade (RTVX100) - Manual de Testes e Comissionamento**. Florianópolis. 2007.

REIVAX, AUTOMAÇÃO E CONTROLE. **Relatório de Comissionamento UG01 - RTVAX POWER**. Florianópolis. 2017.

ROCHA, D. C. D.; OLIVEIRA, F. M. B.; NARDI, M. **Simulador de regulador de velocidade para turbinas hidráulicas de usinas hidrelétricas**. Curitiba: UTFPR - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, 2013. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1913/1/CT_COEAU_2013_1_06.pdf>. Acesso em: 02 fevereiro 2017.

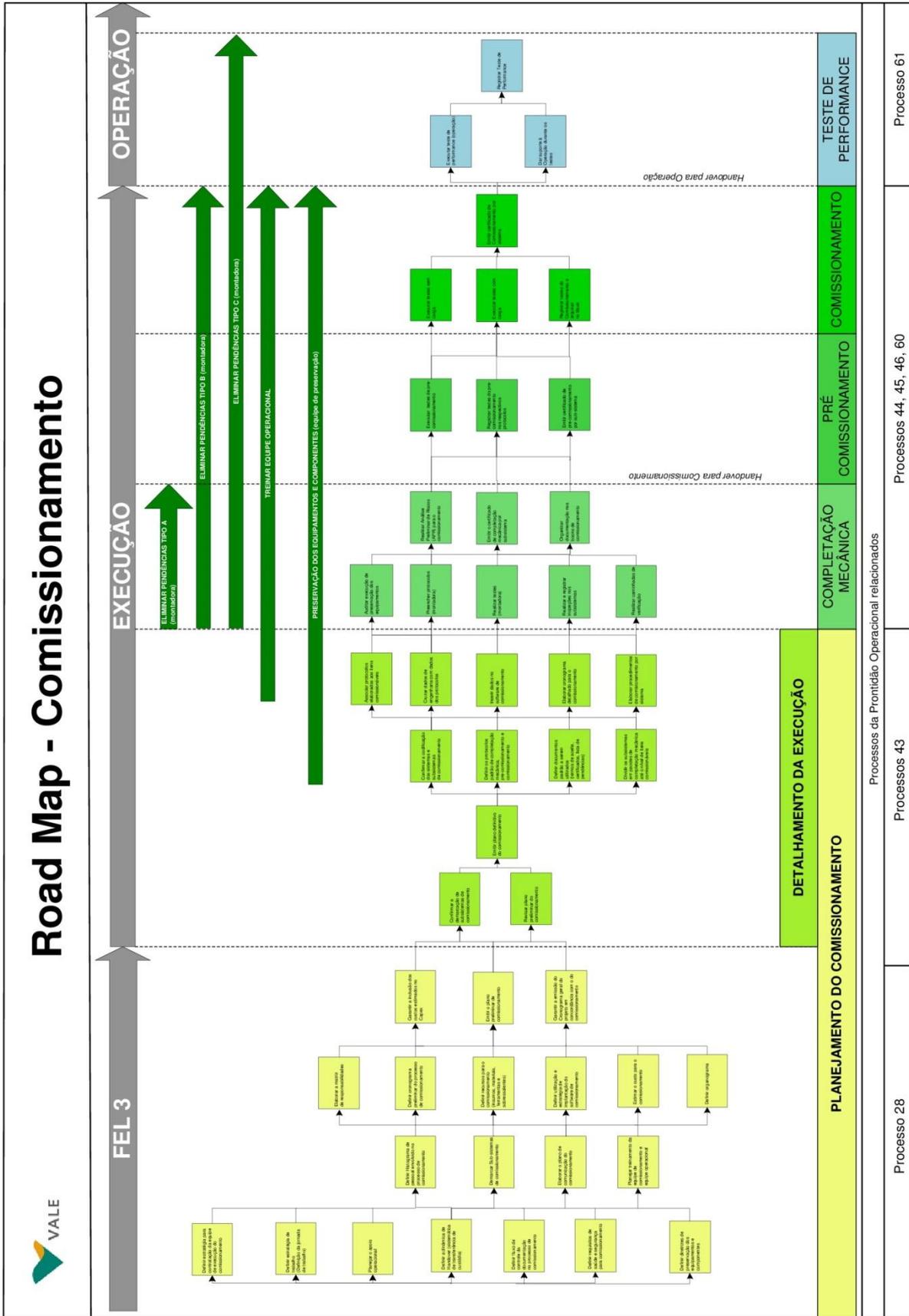
SOUZA, Z. D.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. D. C. **Centrais Hidrelétricas - Implantação e Comissionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

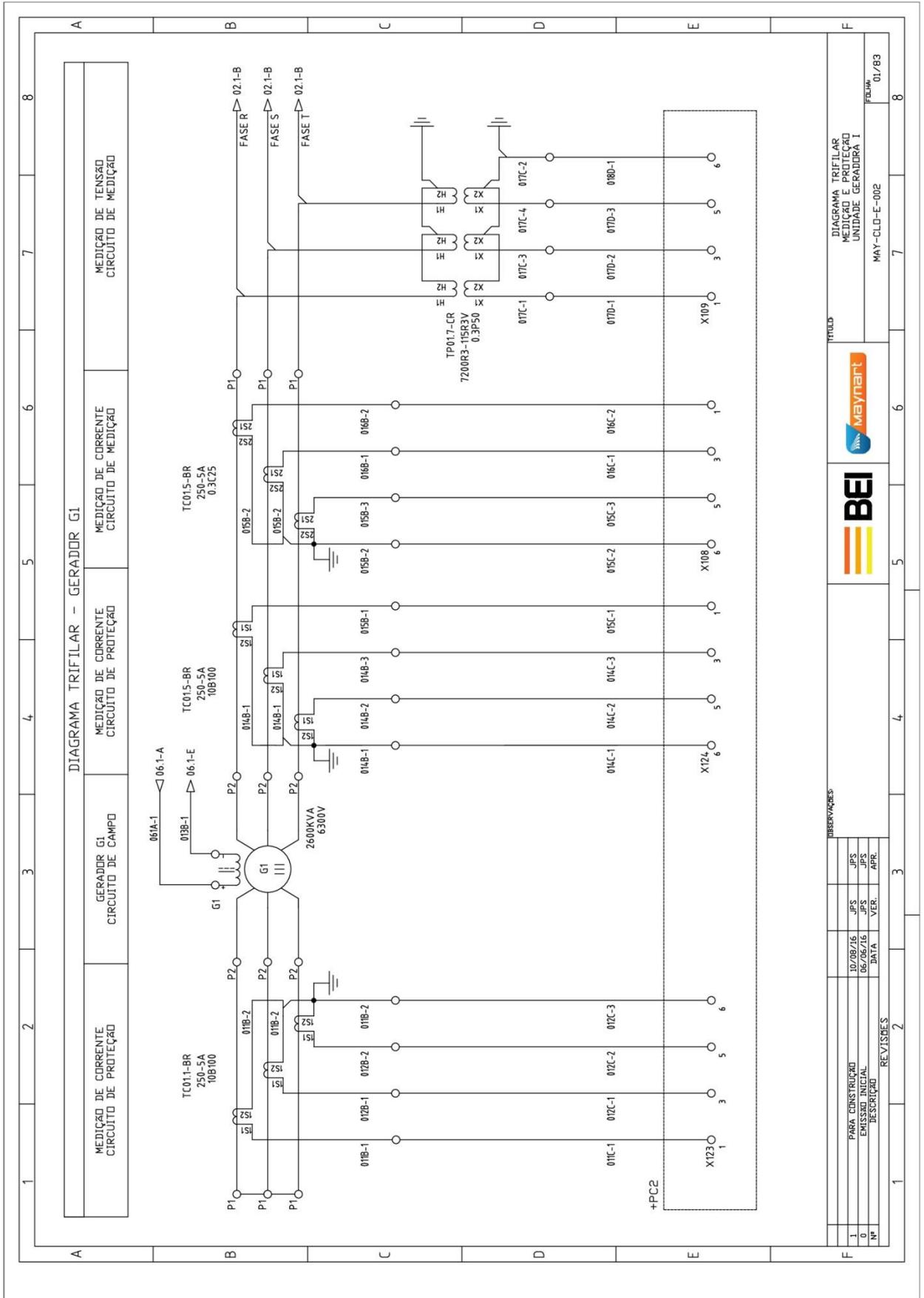
VALE. **Planejamento do Comissionamento - PR-C-002 - Procedimento de Construção**. Minas gerais. 2011.

VALE. **Processo de comissionamento - PR-G-009 - Sistema de padronização de engenharia**. Minas Gerais. 2014.

ANEXO B – ROAD MAP



ANEXO C – DIAGRAMA ELÉTRICO DA UG1



ANEXO D – DIAGRAMA FUNCIONAL E CONTRUTIVO DA UH REGULAÇÃO

