





# **Guia para Especificação de Sistemas de Excitação de Máquinas Síncronas**

## **Força Tarefa C2.11**

Zeni Junior, N. (*Coordenador*), Valgas, H. (*Secretário*), Martins, N., Pinheiro de Paiva, P. M., Fassina Jr., M., Adur, R., Peixoto, C. A. O., Badra, A. A., Cavalcanti L., D., Macedo, N. J. P., Lombardi, F., Ferreira V., F. C., N., Pinto, H. J., Baran, I. S., Ferreira, S. T., Ura, S.



## ÍNDICE

1	ESCOPO.....	11
2	INTRODUÇÃO.....	12
3	A TRANSIÇÃO DA TECNOLOGIA ANALÓGICA PARA DIGITAL.....	15
3.1	Histórico .....	15
3.2	Evolução .....	16
4	TIPOS DE ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA.....	21
4.1	Conceituação Geral .....	21
4.2	Especificação Técnica Funcional e Detalhada .....	21
4.2.1	Especificação Técnica Funcional .....	21
4.2.2	Especificação Técnica Detalhada.....	22
4.3	Escolha do Tipo de Especificação.....	22
4.3.1	Especificação Técnica Funcional .....	22
4.3.2	Especificação Técnica Detalhada.....	23
5	DEFINIÇÕES.....	25
5.1	Excitação .....	25
5.2	Sistema de Excitação.....	25
5.3	Serviço.....	25
5.4	Ciclo de Serviço .....	25
5.5	Resposta do Sistema de Excitação .....	25
5.6	Alta Resposta Inicial.....	25
5.7	Relação de Resposta de Tensão (RR).....	25
5.8	Tempo de Resposta de Tensão .....	26
5.9	Resposta no Tempo da Tensão .....	26
5.10	Constantes de Tempo na Digitalização .....	26
5.11	Tempo de Amostragem.....	26
5.12	Ciclo de Processamento.....	26
5.13	Tensão de Teto com Carga .....	27
5.14	Tensão de Teto em Condições Nominais .....	27
5.15	Tensão de Teto em Vazio .....	27
5.16	Tensão Base de Campo .....	27
5.17	Tensão de Campo em Vazio.....	27
5.18	Tensão de Campo com Carga Nominal .....	27
5.19	Tensão de Excitação com Máxima Carga .....	27
5.20	Tensão Terminal do Gerador.....	27
5.21	Linha do Entreferro .....	27
5.22	Corrente de Campo na Linha do Entreferro .....	28

5.23 Corrente de Excitação à Plena Carga .....	28
5.24 Corrente de Excitação Máxima .....	28
5.25 Corrente Nominal do Sistema de Excitação.....	28
5.26 Corrente de Teto .....	28
5.27 Precisão do Sistema de Excitação .....	28
5.28 Modo de Controle Manual .....	28
5.29 Modo de Controle Automático.....	28
5.30 Faixa de Regulação de Tensão .....	28
5.31 Faixa Nominal de Regulação de Tensão .....	28
5.32 Sinal de Referência.....	29
5.33 Sinal de Erro.....	29
5.34 Sinal de Realimentação .....	29
5.35 Sinal de Entrada.....	29
5.36 Sinal de Saída .....	29
5.37 Elemento de Detecção Primário .....	29
5.38 Elementos de Realimentação.....	29
5.39 Elementos de Controle Direto .....	29
5.40 Sistema de Controle de Excitação .....	29
5.41 Erro do Sistema .....	29
5.42 Erro Transitório .....	29
5.43 Perturbação .....	29
5.44 Desvio (Drift) .....	30
5.45 Condições Dinâmicas .....	30
5.46 Regime Permanente .....	30
5.47 Transitórios.....	30
5.48 Taxa de Variação de Sinal.....	30
5.49 Estabilidade .....	30
5.50 Margens de Estabilidade .....	30
5.51 Controlador.....	30
5.52 Estabilizador do Sistema de Potência (ou Sinal Estabilizador).....	30
5.53 Limitação.....	30
5.54 Limitador (ou Malha de Controle do Limitador) .....	31
5.55 Ganho .....	31
5.56 Compensação.....	31
5.57 Compensador.....	31
5.58 Conversor de Potência.....	31
5.59 Crowbar .....	31

5.60 Circuitos de Amortecimento (Snubbers) .....	31
5.61 Controle de Fase .....	31
5.62 Regulador de Tensão Microprocessado .....	31
5.63 Excitatriz Rotativa CA .....	31
5.64 Excitatriz Rotativa CC.....	32
5.65 Excitatriz Principal .....	32
5.66 Excitatriz Piloto.....	32
5.67 Excitatriz Estática Composta.....	32
5.68 Excitatriz Estática Alimentada por Fonte de Tensão .....	32
<b>6 TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO.....</b>	<b>33</b>
6.1 Introdução.....	33
6.2 Tipos de Excitatrizes .....	33
6.2.1 Excitatrizes Rotativas CC.....	33
6.2.2 Excitatrizes Rotativas CA .....	33
6.2.3 Excitatrizes Estáticas e Mistas .....	34
6.2.3.1 Autoexcitação Direta Simples (Estática Alimentada por Fonte de Tensão).....	34
6.2.3.2 Autoexcitação Direta Mista (Estática Composta).....	34
6.2.3.3 Autoexcitação Indireta .....	35
6.2.3.4 Sistema de Excitação Independente Direta .....	35
6.2.3.5 Excitação Independente Indireta .....	35
6.3 Escolha do Tipo de Excitatriz .....	35
6.4 Reguladores de Tensão.....	37
6.4.1 Tipos.....	37
6.4.1.1 Analógicos.....	37
6.4.1.2 Digitais .....	37
6.4.2 Modos de Operação.....	38
6.4.2.1 Automático .....	38
6.4.2.2 Manual.....	38
<b>7 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO .....</b>	<b>49</b>
7.1 Introdução.....	49
7.2 Comparação dos Sistemas .....	49
7.3 Subdivisão do Sistema de Excitação .....	50
7.3.1 Transformador de Excitação .....	50
7.3.2 Conversor de Potência.....	51
7.3.3 Desexcitação.....	51
7.3.4 Pré-Excitação (Field Flashing).....	52
7.3.5 Regulador Automático de Tensão (RAT) .....	52

7.3.6	Regulador Manual de Tensão.....	53
7.3.7	Seguidores (Follow-up).....	53
7.3.8	Limitador de Subexcitação.....	53
7.3.9	Falha a Terra do Rotor.....	54
7.3.10	Proteção de Tiristores.....	54
7.3.11	Sistema de Desexcitação.....	54
7.3.11.1	Resistor Linear.....	54
7.3.11.2	Resistor Não Linear.....	54
7.3.11.3	Acionamento da Desexcitação.....	54
<b>8</b>	<b>VALORES NOMINAIS E REQUISITOS FUNCIONAIS.....</b>	<b>56</b>
8.1	Introdução.....	56
8.2	Interação Sistema de Excitação/Sistema de Potência.....	56
8.2.1	Introdução.....	56
8.2.2	Desempenho para Grandes Perturbações.....	57
8.2.2.1	Tensão de Teto.....	57
8.2.2.2	Velocidade de Resposta do Sistema de Excitação.....	59
8.2.3	Desempenho Sob Pequenas Perturbações.....	60
8.3	Valores Nominais.....	62
8.3.1	Sistema de Excitação com Compoundagem.....	64
8.4	Considerações sobre os Itens da Tabela 8.4.....	64
8.4.1	Tensão de Campo na Linha de Entreferro.....	64
8.4.2	Tensão de Excitação Máxima.....	64
8.4.3	Frequência de Corte e Margens de Ganho e de Fase.....	65
8.4.4	Corrente de Excitação Negativa.....	65
8.4.5	Sobreoscilação, Tempo de Subida e Tempo de Acomodação.....	65
8.5	Obtenção dos Valores.....	65
8.6	Implicações dos Valores Nominais no Projeto.....	66
<b>9</b>	<b>CONTROLE, PROTEÇÃO E MEDIÇÃO.....</b>	<b>67</b>
9.1	Introdução.....	67
9.2	Controle.....	67
9.2.1	Regulação Automática de Tensão.....	67
9.2.2	Regulação Manual de Tensão.....	67
9.2.3	Seguidores (Follow-up).....	67
9.2.4	Controle conjunto de corrente reativa e de tensão.....	67
9.2.5	Estatismo (Droop) ou Compensação de Corrente Reativa.....	68
9.2.6	Regulação de Fator de Potência ou de Potência Reativa.....	68
9.2.7	Sinal Estabilizador de Potência (PSS).....	68

9.2.8	Malha de Controle do Limitador de Subexcitação.....	69
9.2.9	Malha de Controle do Limitador de Corrente de Excitação.....	69
9.2.10	Malha de Controle do Limitador de Corrente do Estator.....	70
9.2.11	Malha de Controle do Limitador Volt/Hertz.....	70
9.3	Proteção .....	<b>70</b>
9.3.1	Sobrecorrente CA .....	70
9.3.2	Sobretensão CC (Crowbar) .....	70
9.3.3	Falha a Terra do Rotor .....	70
9.3.4	Proteção de Tiristores.....	70
9.3.5	Sistema de Desexcitação .....	71
9.4	Tabela de Escolha.....	<b>71</b>
10	TESTES.....	<b>72</b>
10.1	Introdução.....	<b>72</b>
10.1.1	Ensaios de Tipos.....	72
10.1.2	Ensaios de Rotina .....	72
10.1.3	Ensaios Especiais .....	72
10.2	Ensaios na Fábrica.....	<b>73</b>
10.2.1	Ensaios de Tipo .....	73
10.2.1.1	Reguladores Microprocessados.....	73
10.2.1.2	Cubículo do Sistema de Excitação.....	73
10.2.1.3	Transformador de Excitação .....	73
10.2.1.4	Conversores a Tiristores.....	74
10.2.1.5	Contatores de campo sobre barras.....	74
10.2.1.6	Dispositivos e Subconjuntos .....	74
10.2.2	Ensaios de Rotina .....	74
10.2.2.1	Equipamentos de Controle de Excitação.....	74
10.2.2.2	Transformador de Excitação .....	75
10.2.2.3	Conversores .....	75
10.2.2.4	Reatores .....	76
10.2.2.5	Equipamento de Pré-Excitação (Field Flashing) e Crowbar .....	76
10.2.2.6	Contator de campo sobre barras.....	76
10.2.2.7	Fiação dos Painéis .....	76
10.2.2.8	Cubículos.....	77
10.2.2.9	Ensaio Funcional .....	77
10.2.3	Ensaios Especiais .....	77
10.2.3.1	Operação em Condições Especiais.....	77
10.2.3.2	Regulador de Tensão Digital.....	78



10.2.3.3	Equipamento de Controle.....	78
10.2.3.4	Conversores .....	79
10.2.3.5	Tiristores .....	79
10.2.3.6	Transformador de Excitação .....	79
10.2.3.7	Reatores .....	80
10.3	Testes de Comissionamento .....	<b>80</b>
10.3.1	Testes com o Gerador Parado.....	80
10.3.2	Sistema de Excitação com o Gerador Excitado a Vazio e Teste do Gerador.....	81
10.3.2.1	Transformador Alimentado por Fonte Auxiliar .....	81
10.3.2.2	Transformador Alimentado dos Terminais do Gerador na Rotação Nominal .....	81
10.3.2.3	Grandezas a serem Monitoradas .....	82
10.3.3	Testes com o Gerador em Carga .....	82
10.3.3.1	Grandezas a serem Monitoradas .....	83
10.3.4	Parâmetros do Gerador e Modelo do Sistema de Excitação .....	83
10.3.4.1	Grandezas a serem Monitoradas .....	84
11	ESTRUTURA DE UMA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA.....	<b>85</b>
11.1	Introdução.....	<b>85</b>
11.2	Partes Principais da Especificação Técnica .....	<b>85</b>
11.3	Observações Adicionais .....	<b>85</b>
11.4	Anexo 11.1 .....	<b>86</b>
Parte A	–Condições Técnicas Gerais .....	86
Parte B	–Condições Técnicas Específicas.....	86
Parte C	–Desenhos e Informações .....	87
Parte D	–Lista de Características Garantidas .....	87
Parte E	–Dados e Informações.....	88
12	ESTUDOS.....	<b>93</b>
12.1	Interação entre Sistemas de Excitação, Gerador e Sistema de Transmissão.....	<b>93</b>
12.2	Elementos Básicos para Especificação.....	<b>94</b>
12.2.1	Capacidade do Sistema de Excitação .....	94
12.2.2	Estrutura do Sistema de Excitação .....	94
12.2.2.1	Excitatriz.....	94
12.2.2.2	Regulador de tensão e circuitos associados.....	94
12.2.3	Desempenho do Sistema de Excitação .....	94
12.3	Definição dos Parâmetros e Faixas de Ajustes.....	<b>95</b>
12.3.1	Requisitos Funcionais do Sistema de Excitação .....	95
12.3.2	Procedimentos para Definição das Características .....	96
12.3.2.1	Modelagem.....	96

12.3.2.2 Simulações.....	97
12.4 Anexo 12.1 – Representação dos Sistemas de Excitação nos Estudos .....	<b>98</b>
1. Introdução.....	98
2. Diagramas de Blocos.....	99
12.5 Anexo 12.2 – Dados e Parâmetros .....	<b>104</b>
1. Dados Gerais .....	104
2. Dados Complementares.....	105
3. Diagramas.....	105
4. Parâmetros Específicos de Máquinas Síncronas .....	105
5. Parâmetros de Máquinas Síncronas para Estudos .....	106
13 CONECTIVIDADE, INTERFACES DE PROGRAMAÇÃO, PARAMETRIZAÇÃO, ENSAIO, OPERAÇÃO E DE APOIO .....	<b>109</b>
13.1 Generalidades .....	<b>109</b>
13.2 Conectividade .....	<b>109</b>
13.3 Parametrização .....	<b>109</b>
13.4 Recursos para Ensaios .....	<b>109</b>
13.5 Programabilidade.....	<b>111</b>
14 CONFIABILIDADE .....	<b>112</b>
15 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS: FUNCIONAL E DETALHADA.....	<b>116</b>
15.1 Exemplo Parcial de uma "Especificação Técnica Detalhada" .....	<b>116</b>
1. Requisitos Gerais.....	116
2. Transformador de Excitação .....	117
3. Transformadores de Corrente.....	118
4. Pré-excitação .....	118
5. Ponte Conversora .....	119
6. Alimentação do Transformador de Excitação.....	120
7. Disjuntor ou Contator de Campo e Resistor de Descarga.....	120
8. Requisitos de Desempenho do Sistema de Excitação .....	120
9. Regulador de Tensão.....	122
10.Requisitos de Instrumentos e Dispositivos.....	124
11.Dispositivos de Proteção e Supervisão.....	125
12.Interfaces com o Sistema de Supervisão e Controle da e Proteções .....	126
13.Operação remota do regulador de tensão .....	127
14.Controle Conjunto de Potência Reativa .....	127
15.Testes.....	128
15.2 Exemplo de uma “Especificação Técnica Funcional” .....	<b>133</b>
1. OBJETIVO.....	133

2. EXTENSÃO DO FORNECIMENTO .....	133
3. CONDIÇÕES DE PROJETO .....	137
4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS .....	139
5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS .....	139
6. MONTAGEM E ENSAIOS NA FÁBRICA .....	148
7. MONTAGEM E ENSAIOS NA OBRA .....	151
8. DESENHOS DE REFERÊNCIA .....	153
16 NORMAS E REFERÊNCIAS .....	<b>155</b>

## **CE C2 – Operação e Controle de Sistemas Elétricos**

**Coordenador – Paulo Gomes**  
**Secretário – Antonio Carlos Barbosa Martins**

### **Componentes da FT que participaram ativamente da elaboração do documento:**

<b>Carlos Augusto de Oliveira Peixoto (Coordenador)</b>	Consultor Independente
<b>Antônio Ângelo Badra</b>	SIEMENS Ltda. KWU HV4
<b>Décio Cavalcanti Lima</b>	CHESF – Cia. Hidroelétrica do São Francisco
<b>Flávio Lombardi</b>	ABB – ASEA BROWN BOVERI
<b>Francisco Carlos Ferreira Viégas</b>	CHESF – Cia. Hidroelétrica do São Francisco
<b>Herminio José da Cunha Pereira Pinto (Secretário)</b>	CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
<b>Ivo Sérgio Baran</b>	Furnas Centrais Elétricas S/A
<b>Nilo José Pereira de Macedo</b>	Furnas Centrais Elétricas S/A
<b>Sebastião Tarciso Ferreira</b>	Furnas Centrais Elétricas S/A
<b>Soken Ura</b>	Engenharia Sade Vigesa

### **Componentes da FT que participaram da atualização do documento:**

<b>Nelson Zeni Junior (Coordenador)</b>	REIVAX S/A Automação e Controle
<b>Hélio Valgas</b>	Energy Choice
<b>Nelson Martins</b>	CEPEL
<b>Paulo Marcos Pinheiro de Paiva</b>	REIVAX S/A Automação e Controle
<b>Moacir Fassina Junior</b>	REIVAX S/A Automação e Controle
<b>Robson Adur</b>	REIVAX S/A Automação e Controle



## **1. ESCOPO**

O escopo básico do Guia é dar orientação para a elaboração da especificação técnica de sistemas de excitação digital de geradores síncronos, de tal maneira que o sistema de excitação a ser adquirido seja efetivo e econômico, sem ser sub ou superdimensionado.

Este escopo básico é expandido no desenvolvimento de cada Seção do Guia, a fim de incluir considerações diferentes ou adicionais necessárias para especificação de sistema de excitação de condensadores síncronos, geradores para acoplamento a turbinas a vapor ou semelhantes, bem como recapacitação de sistemas de excitação para os diversos tipos de máquinas consideradas.

## 2. INTRODUÇÃO

Os termos “especificação técnica funcional” ou “especificação técnica detalhada” usados neste Guia devem ser entendidos como um documento que define os requisitos de um sistema de excitação e regulação de tensão e sua interação com o gerador ao qual será acoplado, além do respectivo sistema de transmissão, quando for o caso. Assim, essas especificações não entram nos detalhes necessários à fabricação dos equipamentos do sistema de excitação e regulação de tensão, que são incluídos nos documentos para a fabricação produzidos pelos fornecedores com base nessas especificações.

Tendo em vista tornar exequível a formulação do Guia, facilitar o seu uso e torná-lo abrangente, o mesmo foi desenvolvido considerando uma especificação básica para um sistema de excitação estático novo, a ser comprado em separado do respectivo gerador, típico de centrais hidroelétricas ou termoelétricas. Deve ser observado, entretanto, que neste documento não está recomendando o método de compra indicado, que deve ser objeto de escolha do comprador. Ele é, em geral, adotado na compra de um sistema para recapacitação, não sendo usual para aquisição de um gerador novo. Em qualquer aplicação, para a qual se decida pelo processo de compra em separado, há de se estudar as diferentes dificuldades e implicações que o mesmo pode apresentar com relação às especificações, coordenação das características do gerador e do sistema de excitação, divisão de responsabilidade quanto ao desempenho gerador-excitação, integração dos dois sistemas etc.

O Guia inclui, entretanto, subsídios para definição dos requisitos de especificações pertinentes a:

Sistema de excitação e regulação de tensão a ser comprado juntamente com o respectivo gerador, recapacitação de um sistema de excitação em separado ou em conjunto com o respectivo gerador, sistemas de excitação de geradores para usinas térmicas, condensadores síncronos, grandes geradores para usinas hidráulicas e térmicas, geradores/motores síncronos para centrais de bombeamento.

Para todas as aplicações são considerados sistemas de excitação rotativa CA e CC, além do sistema de excitação estático e excitarizes compostas.

A especificação técnica para um sistema de excitação pode ser feita definindo-se em detalhe os diversos aspectos do sistema ou restringindo-se a uma descrição geral do sistema a ser comprado, as restrições sob as quais o equipamento deve funcionar e o desempenho requerido. No primeiro caso, temos uma “especificação técnica detalhada” e no outro, uma “especificação técnica funcional”. O usuário do Guia poderá usar o mesmo para preparar qualquer dos dois tipos de especificação, cuja escolha poderá ser feita considerando a análise incluída na Seção 3.

O Guia foi preparado tendo em vista propiciar, ao usuário do mesmo, elementos para o preparo de uma especificação satisfatória evitando: sub ou superdimensionamento, diferentes interpretações por diferentes proponentes, perda de tempo em longas discussões que poderão acarretar atrasos, conflitos contratuais e legais etc.

O conteúdo de cada Seção é descrito a seguir, tendo em vista facilitar o uso do Guia.

- **Seção 3 – História dos Sistemas de Excitação** – A Seção apresenta a evolução destes sistemas, desde os sistemas eletromecânicos até os sistemas digitais atuais.
- **Seção 4 – Tipos de Especificação Técnica** – A Seção discute a filosofia geral dos dois tipos de especificações, indicando as diferenças entre as mesmas e suas implicações para o caso de sistemas de excitação e regulação de tensão, para permitir ao usuário do Guia a escolha de um ou outro tipo de especificação.

- **Seção 5 – Definições** – Nesta Seção, são formuladas as definições mais importantes para um entendimento correto dos diversos aspectos de um sistema de excitação discutidos no Guia e que deverão ser incluídas como uma das seções de uma especificação.
- **Seção 6 – Tipos de Sistemas de Excitação** – Discutem-se, aqui, os diversos tipos de sistemas de excitação e regulação de tensão, suas características e considerações para escolha, a fim de propiciar ao usuário a escolha do sistema que melhor satisfaça aos requisitos de sua aplicação.
- **Seção 7 – Equipamentos Componentes de um Sistema de Excitação – Considerações para Escolha** – Tanto para uma “Especificação Técnica Detalhada” como para uma “Especificação Técnica Funcional” são discutidos os diversos aspectos e requisitos de um sistema de excitação, do ponto de vista de equipamento, para cada aplicação específica.
- **Seção 8 – Valores Nominais e Requisitos Funcionais** – As especificações devem incluir um conjunto de requisitos funcionais e valores nominais para o sistema de excitação, específicos para cada aplicação. Nesta Seção, esses dados não somente são sugeridos, como se discutem seus significados, suas implicações no projeto do sistema e como defini-los a partir dos estudos analíticos do sistema ao qual o gerador será ligado. Com este objetivo, discute-se a problemática da interação do sistema de excitação e regulação com o sistema de potência ou outra carga a ser alimentada pelo gerador. São feitas considerações, por exemplo, sobre as implicações do valor do “ceiling” – tempo de resposta – dos requisitos para comportamento transitório e dinâmico (longa duração) do sistema de potência, considerando-se grandes e pequenos distúrbios, problemas de sobretensões provocados pelo sistema de potência etc. Indicam-se as ferramentas, os estudos e os critérios a serem utilizados para definir as características do sistema de excitação e regulação, bem como de seus acessórios, requerida por essas implicações. Nas aplicações para as quais tais estudos não sejam desenvolvidos, orienta-se como tais valores nominais podem ser definidos.
- **Seção 9 – Considerações Funcionais sobre Controle, Proteção e Medição** – Em função do tipo de sistema de excitação e regulação de tensão considerados, indicam-se as proteções, os modos de controles usuais e as medições sugeridas, bem como os critérios que devem ser usados para definição das mesmas.
- **Seção 10 - Testes** – Os ensaios a serem feitos nos sistemas de excitação e regulação de tensão são discutidos nesta Seção. São considerados tanto os ensaios de aceitação na fábrica, como os ensaios de campo, principalmente, os ensaios de comissionamento. Além dos ensaios usuais ou normalizados, são feitas considerações sobre ensaios especiais na fábrica e ensaios opcionais de comissionamento, que podem ser de interesse de alguns compradores, principalmente, empresas de energia elétrica.
- **Seção 11 – Estrutura de uma Especificação Técnica** – Esta Seção inclui um exemplo de uma estrutura básica que pode ser usada para uma especificação de um sistema de excitação e regulação de tensão. Essa estrutura cobre basicamente o caso de aplicação à especificação de sistema de excitação para geradores novos, devendo ser naturalmente adaptada, por exemplo, para o caso de recapacitação de sistema de excitação e regulação de tensão.
- **Seção 12 - Estudos** – Para sistemas de excitação destinados a geradores a serem ligados a um sistema de transmissão ou para aplicações industriais importantes, há necessidade de se desenvolver estudos para definição de suas características e desempenho. Esta Seção orienta o usuário do Guia sobre os estudos a serem desenvolvidos, indicando os dados e “ferramentas” necessárias, além de expandir as considerações da Seção 7 sobre interação e oferecer um roteiro para a determinação pelo usuário dos valores nominais e requisitos funcionais dos sistemas de excitação a serem especificados. Não são consideradas em detalhe as aplicações industriais, visto que os estudos diferem bastante em função da aplicação.



- **Seção 13 – Interface de Comunicação, Parametrização, Operação, Ensaios e Apoio** – Incluem-se nesta Seção as interfaces homem-máquina-processo, que permitem a operação local ou remota do equipamento, o suporte ao comissionamento e à manutenção, bem como às tarefas de apoio, como registro de eventos e curvas associados às eventuais falhas ou mudanças de estado operativo. Nesta seção, também estão descritos os recursos associados à programabilidade do equipamento, enfatizando o suporte avançado de *software* que a tecnologia atual permite.
- **Seção 14 – Confiabilidade** – Discorre-se nesta seção sobre as implementações que visam a aumentar a confiabilidade do Sistema de Excitação, notadamente os esquemas de redundância.
- **Seção 15 – Especificações Técnicas Funcional e Detalhada** – Incluem-se nesta Seção uma “Especificação Técnica Detalhada” e uma “Especificação Técnica Funcional” para um sistema de excitação estática para recapacitação – a fim de exemplificar como os dados e as considerações das demais seções do Guia são combinadas para compor a parte técnica do documento para compra em separado de um sistema de excitação estática e regulação de tensão. Incluem-se também considerações sobre aspectos nelas incluídos que devem ser modificados ou aspectos adicionais a serem considerados, para especificações de outros sistemas de excitação considerados no Guia.
- **Seção 16 – Normas e Referências** – Nesta Seção incluem-se as normas técnicas mais importantes sobre os assuntos tratados no Guia, bem como a literatura técnica pertinente para que seus usuários possam esclarecer dúvidas ou aprofundar seus conhecimentos sobre determinados aspectos considerados neste documento, quando da preparação de uma especificação técnica detalhada ou funcional.

Na última parte do Guia incluem-se dois Apêndices com sugestões para modelos de sistema de excitação e regulação de tensão e a listagem dos dados necessários para estudos, que podem ser usados nos trabalhos, objeto da Seção 12.

### 3. A TRANSIÇÃO DA TECNOLOGIA ANALÓGICA PARA DIGITAL

#### 3.1 HISTÓRICO

Na busca da produção de energia elétrica a custos cada vez mais competitivos, os requisitos de operação e manutenção, confiabilidade, disponibilidade, usabilidade, programabilidade e manutenibilidade dos equipamentos associados às unidades geradoras, notadamente dos sistemas de excitação e regulação da tensão, tornaram-se mais importantes, imprescindíveis e desafiantes, para especificar, projetar e modernizar.

Questões, como peças de reserva, vida útil e desempenho operativo afetados por aquecimento, vibrações, ruídos, poeira etc., contribuem para tornar obsoletos os sistemas de excitação com tecnologia analógica em particular.

Em um mundo de mudanças repentinas e surpreendentes, novas tecnologias substituem velhas tecnologias cada vez mais rapidamente. Muitos anos atrás, por volta dos anos 1950 e 1960, as mudanças ocorriam de forma lenta e gradual, na transição dos reguladores de tensão eletromecânicos, com reostatos motorizados, para excitatrizes rotativas com altos ganhos (por exemplo, tipo AMPLIDYNE, REGULEX, ROTOTROL) os quais introduziram melhorias significativas de desempenho no controle da tensão terminal das máquinas. Passados 30 anos, as mudanças evoluíram da tecnologia magnética para a analógica. Nos dias atuais, as mudanças processam-se da tecnologia analógica para a digital, na qual um sistema de excitação digital está compreendido em um projeto integrado que inclui:

- Regulador automático de Tensão;
- Limitadores da excitação;
- Proteção e Controle, Comando local e remoto;
- Funções de Oscilografia e Análise de Diagnósticos;
- Funções de Testes de Desempenho e Parametrização;
- Facilidades de alteração da estrutura de algumas funções de controle, por exemplo, compensação de fase, filtragem de modos de oscilação não eletromecânicos, entre outras.

A confiabilidade global e intrínseca é, então, conseguida quando múltiplos dispositivos são implementados em um único compartimento com microprocessadores multirefás.

A grande maioria dos sistemas de excitação analógicos, em particular, tem requerido parcial ou total “modernização” objetivando prover:

- Regulação de tensão mais confiável;
- Melhoria da estabilidade dos sistemas elétricos interligados (promoção suplementar de torques sincronizantes e amortecedores);
- Operação e manutenção a custos mais competitivos;
- Adequação para automação e controle de um centro ou estação remota.

A modernização de sistemas de excitação, para melhorar a estabilidade transitória e dinâmica do sistema de potência, tem sido a primeira e, talvez, a mais importante aplicação da eletrônica de potência para a confiabilidade das redes supridoras de energia. E, em períodos críticos de restrição dos custos do capital investido, faz-se mister tirar o máximo e melhor proveito das plantas existentes (referências 1a, 1b e 1c).

Paralelamente à modernização dos sistemas de excitação, opções de reisolamento e reenrolamento do estator e, algumas vezes, do rotor permitem maiores potências despachadas na busca da maximização da relação benefício/custo.

Nos anos 1990, com a crescente e consistente disponibilização da tecnologia digital, já se discutiam os níveis de obsolescência dos sistemas de excitação analógicos, conforme a revista ELECTRA (Cigré) publicou em outubro de 1995 (referência 2), os resultados de um censo realizado em várias Concessionárias de Energia Elétrica mundo afora.

A conclusão qualitativa foi que os sistemas de excitação analógicos das máquinas síncronas tornaram-se obsoletos muito mais rapidamente do que se imaginava.

## 3.2 EVOLUÇÃO

Antes de 1945, os sistemas de excitação típicos tinham como variável de controle a corrente direta do barramento do gerador controlado cuja ação, através de reostato próprio e individualizado, propiciava a excitação do campo principal da máquina.

Daí, surgiram as primeiras excitatrizes, a destacar:

- Geradores DC ou dínamos;
- Excitatriz piloto suprindo o campo da excitatriz principal.

Após 1945, o ambiente de transformação industrial e reconstrução “pós-guerra” facilitou, incentivou e desafiou a formação de acadêmicos e analistas de sistemas computacionais.

Novas técnicas de computação matricial substituíram os métodos analógicos de simulação. Computadores digitais, com tecnologia transistorizada, “entraram” em cena e sobressaíram-se no desempenho em relação aos analisadores de redes elétricas nas análises e estudos de fluxo de potência e estabilidade.

Em outra frente, engenheiros passaram a ser introduzidos no conhecimento e aplicação das ferramentas da análise clássica dos sistemas de controle.

Planejadores e projetistas de sistemas elétricos vislumbraram novas oportunidades e desafios de como a estabilidade do sistema de potência poderia ser melhorada em um cenário de restrição de investimentos de transmissão, com as vantagens de propiciar torques sincronizantes suplementares (adicionais) não mais pela expansão da transmissão, mas pelo correto ajuste dos sistemas de excitação.

Por volta dos anos 1950, funções de controle do regulador de tensão e excitatriz principal, de novas plantas de geração, passaram a ser executadas por amplificadores magnéticos ou rotativos.

Seguiram-se os Reguladores de Tensão Automáticos, estáticos com excitatriz principal, baseados em pontes tiristorizadas, as quais possibilitaram o desenvolvimento dos Compensadores Estáticos de Reativo de grandes potências (altas correntes e tensões).

Esquemas Automáticos de Controle de Tensão foram projetados, disponibilizados e viabilizados com o objetivo de aumentar a estabilidade e segurança operativa do sistema de potência.

Bem-sucedidos, os reguladores de tensão analógicos cumpriam o seu papel de manter os níveis de tensão nas respectivas estações geradoras, quando determinado distúrbio, tal como um curto-circuito em uma linha de transmissão ou uma súbita variação de carga, provocasse um desbalanço na potência transmitida. A manutenção dos níveis de tensão pós-contingência permitia que o sistema suportasse os distúrbios mantendo e até assegurando a potência transmitida nas interligações entre regiões ou estações geradoras e consumidoras. Na medida

em que o regulador de tensão estático provia altos valores de tensão de campo (tensão de teto) de forma muito veloz, a estabilidade transitória do sistema de potência era também assegurada.

Na contramão da promoção de altos torques sincronizantes adicionais, obtidos pelos altos ganhos e tempos de resposta da excitação, resultava o aparecimento de oscilações eletromecânicas de potência não amortecidas ou “pobrementemente” amortecidas entre diferentes nós elétricos do sistema de potência. Surgiram, então, os chamados:

- Modos de oscilação eletromecânica “intrapantans”;
- Modos de oscilação eletromecânica “locais”;
- Modos de oscilação eletromecânica “interáreas”.

Para contrapor ao efeito da performance da excitação estática e permitir o amortecimento das oscilações eletromecânicas foi necessário o desenvolvimento dos Sinais Estabilizadores Suplementares (PSS – Power System Stabilizer) para os reguladores de tensão. Daí, já se podia avistar algumas dificuldades da viabilização prática para a aplicação e otimização desses dispositivos, aplicados a sistemas de excitação analógicos, em vista da necessidade de promoção de torques amortecedores adicionais em ampla faixa de frequência de oscilação eletromecânica, qual seja 0,2 a 2,5 Hz.

A referência 3 é a que traduz, de forma mais clássica, a análise e a necessidade da utilização dos Sinais Estabilizadores Suplementares conquanto a estabilidade da máquina síncrona é afetada pela ação do controle da sua excitação.

Cronologicamente, a evolução prática dos Sinais Estabilizadores Suplementares pode ser resumida conforme a seguir:

- Anos 1960: a Ontário Hydro (Canadá) concebeu (referência 4) um PSS derivado da velocidade (aceleração) da máquina em sua planta de geração “Moose River”;
- Anos 1970: a Hydro-Quebec (Canadá) e parceiros (referência 5) optaram por um PSS derivado da potência ativa da máquina em sua planta de geração “Churchill Falls”;
- Anos 1980: outras estruturas de PSS, utilizando mais de uma variável de entrada, por exemplo, frequência e potência, a fim de sintetizar a integral da potência acelerante da unidade geradora, foram testadas e implementadas, com sucesso, pela REIVAX (Brasil) (referência 6) na planta de geração de Salto Osório (Eletrosul).

Nos anos seguintes à primeira aplicação do PSS, derivado da síntese da potência acelerante, o Brasil experimentou/identificou problemas de oscilação eletromecânica de baixa frequência – 0,5Hz – entre as plantas de geração das regiões Sudeste e Sul, em função de elevados intercâmbios de potência entre aquelas regiões via as linhas de transmissão em 750kV, que interligam a UHE de Itaipu-60Hz com o maior centro consumidor do Brasil (estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais). Na oportunidade, grandes avanços também se deram na fronteira das simulações *off-line* com o advento dos pacotes computacionais PACDYN (transitórios eletromecânicos a pequenas perturbações) e ANATEM (transitórios eletromecânicos a grandes perturbações), desenvolvidos pelo CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Além disso, o GTAD – Grupo de Trabalho de Análise Dinâmica do GCOI –, Grupo Coordenador para a Operação Interligada (ELETROBRÁS), reuniu os mais competentes técnicos do país que se envolveram, por pelo menos cinco anos, na identificação e otimização dos modelos dos sistemas de controle visando a encontrar as soluções que viessem propiciar o aumento dos intercâmbios entre as regiões sem colocar em risco a estabilidade do sistema interligado (referência 7).

Todos os trabalhos desenvolvidos identificaram a necessidade da substituição dos PSS existentes por outros derivados da síntese da potência acelerante, tendo em vista a necessidade da promoção de elevados torques amortecedores adicionais em ampla faixa de frequência de

oscilação eletromecânica, qual seja 0,2 a 2,5Hz. Porém, em muitas das grandes plantas de geração selecionadas (com capacidade instalada acima de 1.000MW), ainda persistiam sistemas de excitação analógicos com inerentes dificuldades para se ajustar amplas compensações de fase e ganhos elevados nos estabilizadores, sem excitar outros modos de oscilação não eletromecânicos ou mesmo introduzir ao sistema de excitação modos de oscilação específicos do funcionamento de determinada turbina hidráulica, ou seja, associados ao fenômeno da “cavitação”.

Do quadro acima exposto e da carência de torques amortecedores suplementares, via otimização dos sistemas de controle da excitação, tornou-se patente a necessidade de modernização dos sistemas de excitação usando-se a tecnologia digital, além dos requisitos já citados de Confiabilidade, Efetividade, Economia, e com as características de Usabilidade, Programabilidade, Manutenibilidade e Facilidade de Operação e Manutenção.

A seguir, são detalhadas algumas considerações que compelem as concessionárias de energia elétrica a investir na modernização dos sistemas de excitação de plantas de geração mais antigas:

- **Planejamento do Sistema:** melhoria da estabilidade transitória e dinâmica demandada por recomendações dos Procedimentos da Rede de Transmissão Interligada. Os sistemas de excitação mais rápidos podem, também, minimizar ou mitigar flutuações de tensão causadas por variações de carga industriais e, eventualmente, por outros consumidores da rede elétrica;
- **Confiabilidade:** as partes móveis, contatos e bobinas dos sistemas de excitação analógicos mais antigos tiveram sua vida útil esgotada. Isso resulta em frequente mau desempenho operativo e reduz os índices de confiabilidade e disponibilidade da unidade geradora;
- **Custo de Manutenção:** manutenção de sistemas de excitação mais antigos, tais como as excitatrizes rotativas convencionais, é onerosa, e peças de reposição tornam-se progressiva e permanentemente mais caras além da exigência de mão de obra muito especializada e em processo de envelhecimento e aposentadoria;
- **Controle Remoto e Automação:** a implantação, por exemplo, de sistemas “SCADA”, em plantas de geração mais antigas, obviamente requer a dependência da interface de captação e atualização dos dados da excitação com o centro de controle e comando remoto; recursos de comunicação e intercambialidade de dados e informações, somente disponíveis nas tecnologias digitais, são o que permitem a implantação desses recursos;
- **Usabilidade, Programabilidade, Manutenibilidade:** essas facilidades, que reduzem custos, agilizam procedimentos, permitem testes e diagnósticos *on-line* (identificação e análise) e reajustes de parâmetros, somente são factíveis em um ambiente com programação amigável dos ajustes e leitura de mensagens e alarmes através de Interface Homem-Máquina com recursos gráficos;
- **Garantia de Desempenho Operacional das Unidades Geradoras e Sistema Interligado:** facilidades de controle e comando remoto, proteção integrada, registro e armazenagem de distúrbios (aquisição de dados), com *trigger* dinamicamente programável para fins de reajuste, análise de ocorrências, modelagem e otimização do desempenho operativo, estudos de manutenção preditiva e preventiva e agilidade da manutenção corretiva quando for o caso.

A despeito do leque de vantagens que a tecnologia digital oferece, em relação à tecnologia analógica, há, ainda, que se considerar a inerente flexibilidade, agilidade e robustez de procedimentos e métodos mais eficientes para viabilizar a otimização do desempenho operativo do sistema de excitação respectivo.

Ajustar, satisfatoriamente, a resposta do gerador excitado por um sistema de excitação analógico continua sendo uma tarefa árdua, pois envolvem ajustes de potenciômetros, adição ou

retirada de capacitores e resistores nos *loops* de controle do circuito de estabilidade do regulador de tensão. Ajustes ótimos, quando obtidos, demandam muito tempo entre testes e análises, até porque as alterações envolvem o processo de desligar/ligar o sistema de excitação para processamento das modificações físicas dos componentes.

Em termos da comparação das facilidades para ajustes dos parâmetros das funções de transferência de ambos os sistemas de excitação (analogicos x digitais), pode-se exemplificar, abaixo, algumas diferenças analíticas entre os mesmos. Considerando os diagramas de blocos simplificados do Regulador Automático de Tensão de ambas as tecnologias:

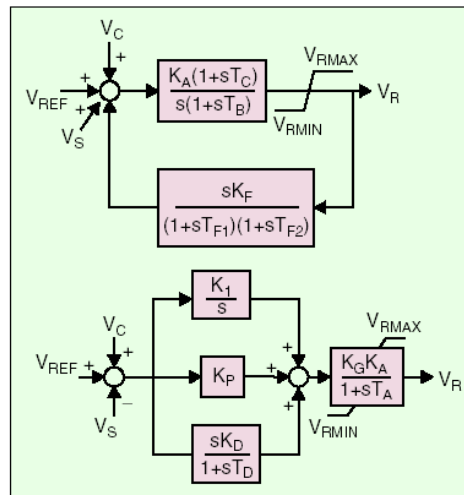


Figura 3.1 – Diagramas simplificados do RAT: analógico (*lead-lag*) e Digital (PID)

O ganho  $K_f$  do “AVR” analógico é ajustado por meio de um potenciômetro, e as constantes de tempo  $T_{f1}$  e  $T_{f2}$  são ajustadas por alterações de resistores e capacitores, com as imprecisões que esses dispositivos encerram em si mesmos.

No “AVR” digital, têm-se:

- “Ação Proporcional-P”: é o ganho proporcional, ajustado pelo parâmetro  $K_p$ , que afeta a taxa de variação da tensão terminal após um degrau na referência da mesma;
- “Ação Integral-I”: representa o ganho integral, ajustado pelo parâmetro  $K_1$ , que afeta o tempo de resposta (tempo de estabilização/amortecimento) da tensão terminal após a sobreoscilação (*overshoot*) inicial da mesma;
- “Ação Diferencial (Derivativa)-D”: representa o ganho derivativo, ajustado pelo parâmetro  $K_d$ , que afeta o percentual da sobreoscilação da tensão terminal ou a taxa de subida/descida após um distúrbio imposto ao sistema de controle.

O efeito combinado dos ganhos “PID” permite alcançar os ajustes desejados e necessários ao desempenho estável, rápido, sem elevada sobreoscilação e com pequena margem de erro, em regime permanente para o sistema de excitação por meio do ajuste apropriado do ganho  $K_g$ .

Esses ajustes (PID;  $K_g$ ), em uma ampla faixa, podem ser avaliados usando-se um PC através de “janelas de opções” ou em um *display* no painel de controle do sistema de excitação (ação local). Os mesmos ajustes podem até ser feitos remotamente, sem necessidade de desligar/ligar o sistema de excitação, desde que se tenham os recursos de comunicação mencionados anteriormente.

Outra vantagem incontestável da tecnologia digital refere-se à integração, em um mesmo cubículo, dos controles e comandos individualizados para operação, manutenção e ajustes tanto do sistema de excitação quanto do sistema de controle de velocidade da turbina.

Considerando-se, finalmente, que o sistema de excitação digital é dotado de:

- Ajuste dos parâmetros de forma integrada, otimizada e segura sem quaisquer influências devidas a ruído, trepidação, poeira, umidade e temperatura;
- Ajustes feitos via teclado, mesmo com o sistema em operação;
- Regulação “PID” com erro menor que 0,5%;
- Faixa de regulação ajustável via teclado;
- Compensação do retardo da excitatriz rotativa ou *brushless*;
- Limitadores de subexcitação, sobre-excitação, Volts/Hertz, corrente estatórica e mínima corrente de campo;
- Estabilizador de Sistema de Potência (PSS), derivado da Potência Acelerante;
- Função “Relé 40” de Perda de Excitação;
- Controle Conjunto de tensão das unidades geradoras;
- Terminais de testes com saídas analógicas 0 a 10VCC para medição e/ou registro das principais grandezas do gerador (tensão terminal, potências ativa e reativa, tensão e corrente de campo);
- Saídas por contatos para interface com circuitos de comando, alarme e proteção;
- Entradas para comandos remotos por contatos externos;
- Programação amigável dos ajustes e leitura de mensagens através de IHM alfanumérico, com menu auto-orientativo;
- Programabilidade dos blocos, dos parâmetros e das entradas/saídas através de interface amigável em ambiente PC e Windows/NT;
- Registro e armazenagem de distúrbios (aquisição de dados), com *trigger* dinamicamente programável para fins de reajuste, análise de ocorrências, modelagem e estudos de manutenção;
- Comunicação serial (RS232 ou RS485) com protocolo ModBus;
- Disponibilização das entradas e saídas programáveis;

Os Engenheiros de Planejamento da Operação, Operação em tempo real e Manutenção podem, seguramente, operar e manter o sistema de excitação tal qual as unidades geradoras sejam exploradas, sem riscos de defeitos e perda de vida útil adicional, muito mais próximas dos seus limites de projeto e fabricação, propiciando o fornecimento de energia elétrica com melhor qualidade, continuidade, disponibilidade e menor custo.

## 4. TIPOS DE ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

Para permitir o usuário do Guia decidir sobre o tipo de especificação a ser preparada para compra de sistema de excitação, seja para máquina nova, comprado ou não em conjunto com o respectivo gerador, ou para uma recapacitação, discutem-se a seguir os dois tipos básicos de especificação que devem ser considerados, isto é, “Especificação Técnica Funcional” e “Especificação Técnica Detalhada”.

### 4.1 CONCEITUAÇÃO GERAL

- Entende-se por “Especificação Técnica Funcional” um documento técnico em que se define um sistema ou equipamento por meio da descrição de sua funcionalidade, sem entrar em detalhes quanto à forma pela qual essa funcionalidade é conseguida;
- Entende-se por “Especificação Técnica Detalhada” um documento técnico em que se define um sistema ou equipamento por meio da descrição não apenas de sua funcionalidade, mas também de detalhes construtivos relativos à forma pela qual se espera que essa funcionalidade venha a ser conseguida;
- Na prática, as especificações nunca são estritamente funcionais ou totalmente detalhadas. As especificações funcionais incluem frequentemente indicações de tipos preferenciais de componentes ou princípios de funcionamento, enquanto muitas especificações detalhadas permitem ao projetista do equipamento ou sistema optar por um ou outro princípio de funcionamento;
- A diferença entre os dois tipos de especificação sugere uma atitude diferente do comprador em relação à divisão da responsabilidade pelo futuro desempenho do equipamento ou sistema em operação comercial. As especificações funcionais colocam essa responsabilidade quase inteiramente na área de atuação do projetista/fabricante do equipamento ou sistema que responde sozinho pela seleção de princípios de funcionamento, configurações sistêmicas e tipos de componentes. Nas especificações detalhadas, o comprador toma a si uma parcela maior da responsabilidade ao impor soluções que poderão não corresponder à prática mais típica do fabricante.

### 4.2 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA FUNCIONAL E DETALHADA

#### 4.2.1 Especificação Técnica Funcional

- Para os sistemas de excitação comprados em conjunto com a unidade geradora correspondente, cujas características são plenamente conhecidas devido ao fornecedor comum, a funcionalidade a ser especificada limita-se à que decorre da aplicação da máquina em questão, que, por sua vez, é definida pelo comprador do sistema de excitação. Para garantir o desempenho adequado da máquina na aplicação prevista, é essencial que se especifique no mínimo o que consta da “Especificação Técnica Funcional” incluída na Seção 15 do Guia;
- A “Especificação Técnica Funcional” para a compra separada de um sistema de excitação, quer seja para recapacitação ou não, é idêntica à discutida no item anterior. Neste caso, porém, os itens da especificação “a serem fornecidos pelo comprador”, tanto do gerador ao qual o sistema será acoplado, como da instalação existente, deverão ser bastante mais detalhados para permitir ao fabricante o desenvolvimento do projeto e a fabricação do sistema. A Seção de teste de comissionamento é também praticamente a



mesma para a compra em separado, devendo-se, entretanto, incluir definições específicas quanto às responsabilidades pela implementação dos testes, assim como pela análise e aceitação dos resultados, dadas a interação gerador/sistema de excitação e as responsabilidades do fabricante do sistema de excitação. As questões de responsabilidades citadas neste caso poderão ser resolvidas negociando-se com um dos fornecedores a aceitação da responsabilidade única e total;

- A Seção 12 do Guia inclui uma “Especificação Técnica Funcional” típica para um sistema de excitação estática para o caso de recapitação, que poderá ser usada a título de orientação para preparação de uma “Especificação Técnica Funcional”.

#### 4.2.2 Especificação Técnica Detalhada

- Os itens a serem incluídos em uma “Especificação Técnica Detalhada” dependem dos objetivos do detalhamento – exclusão de tipos de equipamentos e sistemas não desejados ou maior controle do projeto, fabricação e testes do sistema de excitação por parte do cliente etc. Normalmente, especifica-se, além da funcionalidade listada em 4.2.1.1, entre outros, o que consta da “Especificação Técnica Detalhada” incluída na Seção 15 do Guia;
- À “Especificação Técnica Detalhada” para compra separada de um sistema de excitação, aplicam-se as observações incluídas no Item 4.2.1.2;
- Na preparação da “Especificação Técnica Detalhada”, deve-se tomar cuidado com o grau de detalhamento a ser especificado, para evitar que a mesma venha tornar-se uma especificação com grau de detalhe dos documentos usados pelos fabricantes para a fabricação dos diversos componentes, pois isto poderá acarretar prejuízos para o comprador;
- Na Seção 16 deste Guia, inclui-se uma “Especificação Técnica Detalhada” para um sistema de excitação estática para recapitação, que poderá servir de orientação para preparação de um documento semelhante para uma aplicação específica.

### 4.3 ESCOLHA DO TIPO DE ESPECIFICAÇÃO

Conforme as discussões acima, as Especificações Técnicas Detalhada e Funcional apresentam diferentes graus de complexidades e, em consequência, requerem mais ou menos engenharia na sua preparação.

A escolha entre um tipo ou outro depende de muitos fatores, entre os quais podemos mencionar:

- a) Prática e preferência do comprador;
- b) Necessidade de adoção de padrões existentes na organização do comprador;
- c) Compra direta ou por meio de concorrência;
- d) Fornecimento ou não em *turn-key*.

#### 4.3.1 Especificação Técnica Funcional

- A “Especificação Técnica Funcional” apresenta algumas vantagens: é bem mais simples; de maior aceitação pelos fabricantes, por não lhes impor restrições a soluções e componentes padronizados; por conduzir geralmente a

um sistema de menor custo; necessitam de um menor controle e coordenação por parte do comprador e facilitam mudanças durante o processo; oportunidade para o fabricante usar sua tecnologia mais recente em benefício de um menor custo; menor custo na preparação da proposta etc;

- As principais desvantagens destas especificações são: a preocupação básica é a definição da “entrada” e “saída”, podendo o comprador receber qualquer elemento componente; em caso de concorrência, o comprador certamente estará comparando, durante a análise das propostas, diferentes escopos tanto quantitativos como ao que tange as características dos componentes, sendo difícil uma equalização técnica/comercial das propostas; possibilidades de discordâncias sobre detalhes técnicos que podem colocar em risco a conclusão do projeto no prazo; mudanças durante a fabricação para adaptação a padrões do comprador podem ser muito custosas para o comprador etc;
- A “Especificação Técnica Funcional” é particularmente interessante para ser usada na compra de máquinas para grandes indústrias, autoprodutores, pequenas empresas de energia elétrica etc., que não têm possibilidade de emitir uma “Especificação Técnica Detalhada” ou não querem arcar com os custos adicionais para prepará-las ou para o acompanhamento do contrato. Para as empresas de energia elétrica que desejem uma compra direta, esse tipo de especificação é aceitável, já que, neste caso, existe uma confiança mútua implícita entre as partes, que elimina importantes desvantagens apontadas. Para grandes empresas, há uma tendência no uso das especificações funcionais, face às mudanças gerenciais por quais passam essas empresas. Para os projetos *turn-key* de grandes instalações, essas especificações podem ser também as preferidas.

#### 4.3.2 Especificação Técnica Detalhada

- A “Especificação Técnica Detalhada” apresenta como principais desvantagens: preparação mais trabalhosa, cara e complexa; acarreta um possível custo adicional para o equipamento; inerentemente traz parte da responsabilidade para o comprador, por impor requisitos que podem não ser de conveniência do fabricante adotá-los e não permite o fabricante otimizar seu projeto ou fabricação;
- Essas especificações têm como principais vantagens a correção da maioria das desvantagens das especificações funcionais exceto o provável custo inicial mais alto do sistema, possibilitando ao comprador, ao definir mais exatamente o sistema, obter uma melhor operação e manutenção do mesmo, o que poderá conduzir a um *life cost* vantajoso;
- Até recentemente, as especificações detalhadas eram preponderantes nas concorrências promovidas pelas empresas de energia elétrica. Atualmente, essas entidades tendem a emitir especificações funcionais, mais ainda com um grau considerável de detalhes, dispensáveis para uma “Especificação Técnica Funcional”.

Sendo duvidosa a obtenção de uma relação *cost life*/benefício favorável para um sistema de excitação comprado com base em uma “Especificação Técnica Detalhada”, sugere-se que o usuário do Guia proceda a uma avaliação cuidadosa, com base nos elementos acima considerados para decidir sobre o uso de um ou outro tipo de especificação.

A Seção 11 do Guia apresenta a estrutura geral para uma “Especificação Técnica Detalhada” de um sistema de excitação, que poderá também ser usada na preparação de

uma “Especificação Técnica Funcional”, modificando-se o conteúdo das diversas partes com base nas considerações acima apresentadas.

## **5. DEFINIÇÕES**

Nesta Seção, são incluídas definições normalizadas ANSI, IEEE e IEC, bem como outras que facilitam o entendimento das considerações constantes do Guia. Essas definições devem ser usadas nos estudos e na preparação das especificações, tendo em vista estabelecer uma linguagem comum, que propiciará uma comparação equânime entre propostas para um sistema de excitação de diferentes fabricantes, servindo ainda de base para discussões com os mesmos.

### **5.1 EXCITAÇÃO**

Fonte da corrente de campo necessária para magnetizar um gerador elétrico.

### **5.2 SISTEMA DE EXCITAÇÃO**

Fonte de corrente de campo para excitação da máquina síncrona, incluindo a excitatriz e o regulador de tensão automático e/ou manual.

### **5.3 SERVIÇO**

São as tensões e correntes de carga solicitadas pela máquina síncrona ao sistema de excitação incluindo curto-circuitos e todas as condições de carga.

### **5.4 CICLO DE SERVIÇO**

Iniciando por determinada condição de carga seguindo de uma sequência de eventos com duração conhecida a que a excitatriz fica submetida, constitui um ciclo de serviço.

### **5.5 RESPOSTA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO**

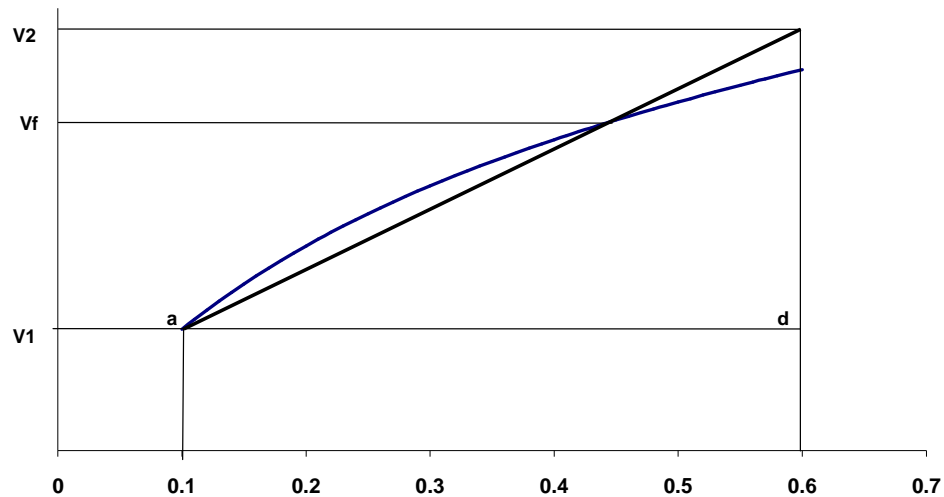
É a razão do acréscimo ou decréscimo da tensão de saída do sistema de excitação (terminais do campo do gerador), obtida da curva de resposta de tensão do sistema de excitação, que, com a tensão mantida constante, irá desenvolver a mesma área tensão em  $x$  tempo que seria obtida na curva real de resposta para o mesmo período. O ponto inicial para a determinação da resposta de tensão do sistema de excitação deve ser o valor inicial da tensão de operação.

### **5.6 ALTA RESPOSTA INICIAL**

Um sistema de excitação que tem um tempo de resposta menor ou igual a 0,1 segundo.

### **5.7 RELAÇÃO DE RESPOSTA DE TENSÃO (RR)**

É o valor numérico obtido quando a resposta do sistema de excitação, em V/s, medido no intervalo dos primeiros 500ms, é dividida pela tensão de campo nominal de uma máquina síncrona a plena carga (Figura 5.1).



1.  $V_1 =$  Tensão de campo a plena carga
2.  $V_f =$  Tensão de teto nominal
3.  $A_d = 0,5$  s
4. Relação de Resposta =  $RR = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times \frac{1}{ad}$
5.  $V_f - V_1 = 0.95 (V_2 - V_1)$

*Figura 5.1 – Relação de Resposta*

### 5.8 TEMPO DE RESPOSTA DE TENSÃO

É o tempo em segundos para a tensão de campo atingir 95% da diferença entre a tensão de teto e a tensão de campo à plena carga, após uma perturbação, a qual leve o sistema de excitação à tensão de teto no menor tempo possível.

### 5.9 RESPOSTA NO TEMPO DA TENSÃO

É a saída de tensão de campo em função do tempo e sob determinada condição.

### 5.10 CONSTANTES DE TEMPO NA DIGITALIZAÇÃO

São retardos introduzidos à realização da discretização de uma função contínua para processamento digital.

### 5.11 TEMPO DE AMOSTRAGEM

É um período cíclico em que os valores das grandezas analógicas provenientes do campo devem ser aquiritadas, de modo que seja o mais representativo possível da função original, com a finalidade de discretização para processamento digital.

### 5.12 CICLO DE PROCESSAMENTO

É o tempo alocado para que o sistema digital realize o processamento.

### **5.13 TENSÃO DE TETO COM CARGA**

É a máxima tensão de campo que um sistema de excitação pode suprir em seus terminais em condições operativas especificadas. Esta tensão de teto poderá ser positiva ou negativa.

### **5.14 TENSÃO DE TETO EM CONDIÇÕES NOMINAIS**

A tensão de teto de uma excitatriz carregada com uma resistência com um valor ôhmico igual à resistência do enrolamento de campo a ser excitado à temperatura nominal de projeto.

### **5.15 TENSÃO DE TETO EM VAZIO**

É a máxima tensão de saída que pode ser obtida por um sistema de excitação, com o gerador operando sem carga.

### **5.16 TENSÃO BASE DE CAMPO**

Tensão de campo de uma máquina síncrona, requerida para produzir a tensão nominal do gerador na linha do entreferro, com enrolamento de campo a 75°C, quando a mesma for projetada para elevação máxima de temperatura de até 60°C ou de 100°C quando o enrolamento de campo for projetado para operar com elevação de temperatura superior a 60°C. Esta tensão define o valor de 1 pu para a tensão do sistema de excitação a ser usado na representação digital dos sistemas de excitação.

### **5.17 TENSÃO DE CAMPO EM VAZIO**

É a tensão requerida nos terminais do campo, nas condições de rotação nominal, tensão nominal nos terminais do gerador e temperatura no campo de 25°C, estando a máquina síncrona sem carga.

### **5.18 TENSÃO DE CAMPO COM CARGA NOMINAL**

É a tensão requerida nos terminais do campo, estando a máquina com frequência, carga, fator de potência nominais e com enrolamento de campo a 75°C para os enrolamentos projetados para operar com uma elevação máxima de temperatura de até 60°C, ou a 100°C para enrolamentos projetados para operar com elevação de temperatura superior a 60°C a plena carga.

### **5.19 TENSÃO DE EXCITAÇÃO COM MÁXIMA CARGA**

É o valor de tensão de campo que o sistema de excitação pode fornecer continuamente, estando o enrolamento de campo a 75°C para as condições de sobrecarga especificadas para o gerador.

### **5.20 TENSÃO TERMINAL DO GERADOR**

É a tensão terminal de uma máquina síncrona que é considerada como variável de saída e é utilizada como sinal de realimentação do regulador de tensão durante a operação da máquina.

### **5.21 LINHA DO ENTREFERRO**

É uma linha reta, tangente à curva de saturação em vazio de uma máquina síncrona, cuja origem é o ponto zero de corrente excitação.

### **5.22 CORRENTE DE CAMPO NA LINHA DO ENTREFERRO**

É o valor da corrente de campo obtido na linha do entreferro da máquina síncrona correspondente à tensão nominal nos terminais do gerador, nas condições nominais de frequência.

### **5.23 CORRENTE DE EXCITAÇÃO À PLENA CARGA**

É o valor de corrente necessário para produzir a tensão nominal nos terminais do gerador, alimentando a carga nominal nas condições nominais de frequência e fator de potência.

### **5.24 CORRENTE DE EXCITAÇÃO MÁXIMA**

É a capacidade da excitatriz de fornecer um valor de corrente de campo superior à corrente de sobrecarga contínua aplicada ao campo da máquina síncrona.

### **5.25 CORRENTE NOMINAL DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO**

A corrente contínua nos terminais de saída do sistema de excitação (ponto de ligação aos terminais do circuito de campo da máquina síncrona) que o sistema de excitação pode suprir em condições especificadas para a sua operação. Esta corrente é, no mínimo, igual ao valor necessário para a máquina síncrona operar nas condições operativas mais severas, especificadas em regime contínuo.

### **5.26 CORRENTE DE TETO**

É a capacidade da excitatriz de fornecer a máxima corrente de campo durante 10s.

### **5.27 PRECISÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO**

É o grau de correspondência entre a variável controlada e o valor desejado sob condições específicas de variação de carga, temperatura ambiente, umidade, frequência e variações de tensão de alimentação. Quantitativamente, é expressa na relação entre a variável controlada e o valor desejado.

### **5.28 MODO DE CONTROLE MANUAL**

É o modo de controle da excitatriz em que o controle da tensão terminal da máquina síncrona é feito manualmente em malha aberta.

### **5.29 MODO DE CONTROLE AUTOMÁTICO**

É o modo de controle da excitatriz, em malha fechada, em que a tensão terminal da máquina síncrona é ajustada automaticamente no valor desejado ( $V_{ref}$ ).

### **5.30 FAIXA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO**

A faixa de regulação de tensão é expressa em porcentagem do valor nominal da tensão terminal, dentro da qual o sistema de excitação irá ajustar a tensão terminal durante as condições permanentes especificadas.

### **5.31 FAIXA NOMINAL DE REGULAÇÃO DE TENSÃO**

É a faixa de regulação de tensão para carga nominal, até o valor de tensão sem carga, desativado qualquer dispositivo de compensação.

### **5.32 SINAL DE REFERÊNCIA**

É o sinal de entrada da malha de regulação correspondente ao valor que se deseja atingir.

### **5.33 SINAL DE ERRO**

No controle de malha fechada, é o sinal de entrada menos o sinal de realimentação. Podendo também existir vários sinais de realimentação. Como existem vários sinais de entrada, o erro será a soma dos sinais de entrada menos a soma dos sinais de realimentação.

### **5.34 SINAL DE REALIMENTAÇÃO**

É o sinal que representa a medição da variável a ser controlada ou uma amostra processada de um sinal intermediário da malha de regulação.

### **5.35 SINAL DE ENTRADA**

É o sinal aplicado na entrada de um bloco ou de um sistema de controle.

### **5.36 SINAL DE SAÍDA**

É o sinal fornecido por um bloco de controle, ou pelo sistema de controle.

### **5.37 ELEMENTO DE DETECÇÃO PRIMÁRIO**

É um elemento de detecção que utiliza ou transforma o sinal recebido por meios controlados para gerar um sinal de saída que é função do valor do sinal de entrada.

### **5.38 ELEMENTOS DE REALIMENTAÇÃO**

São elementos do sistema de controle que utilizam ou transformam o sinal de saída para produzir um sinal que é uma função do valor da variável controlada.

### **5.39 ELEMENTOS DE CONTROLE DIRETO**

São os elementos situados entre o sinal de comando e a variável controlada em uma malha fechada.

### **5.40 SISTEMA DE CONTROLE DE EXCITAÇÃO**

Sistema de controle com realimentação que inclui a máquina síncrona e o sistema de excitação.

### **5.41 ERRO DO SISTEMA**

É o valor instantâneo da saída em regime da variável controlada menos o valor comandado.

### **5.42 ERRO TRANSITÓRIO**

É o valor instantâneo da variável controlada menos o seu valor no regime permanente.

### **5.43 PERTURBAÇÃO**

É uma variável indesejada aplicada ao sistema de excitação que produz um efeito adverso ao valor da variável controlada.



#### **5.44 DESVIO (*DRIFT*)**

Uma mudança indesejável na saída de um bloco de controle ou do sistema de excitação durante determinado período de tempo, que não está relacionada com a entrada, ambiente ou carga.

#### **5.45 CONDIÇÕES DINÂMICAS**

Estado em que uma ou mais variáveis exibem apreciáveis mudanças dentro de um pequeno e arbitrário intervalo de tempo.

#### **5.46 REGIME PERMANENTE**

Estado em que as variáveis e as condições operacionais exibem variações desprezíveis durante um apreciável intervalo de tempo. Essas variações podem ser amplitudes, rampas, periodicidade etc.

#### **5.47 TRANSITÓRIOS**

São variações observadas durante a passagem de uma condição estável para outra, sendo que parte dessas variações tende a desaparecer no tempo.

#### **5.48 TAXA DE VARIAÇÃO DE SINAL**

Também chamado de tempo de rampeamento, é a proporção no tempo de quanto varia o sinal de entrada, podendo ser em Volt por segundo, ou p.u. por segundo.

#### **5.49 ESTABILIDADE**

É a capacidade do regulador de tensão em controlar a corrente de campo da máquina síncrona, de tal forma que os transitórios são suprimidos, e as oscilações sustentadas não são produzidas ou amplificadas, durante as condições permanentes de carga, até atingir uma condição de estabilidade.

#### **5.50 MARGENS DE ESTABILIDADE**

Valores de ganho ou fase adicionais da malha de controle em laço aberto, para os quais o sistema pode se tornar instável.

#### **5.51 CONTROLADOR**

Dispositivo cuja saída é o resultado de um processamento do sinal de entrada.

#### **5.52 ESTABILIZADOR DO SISTEMA DE POTÊNCIA (OU SINAL ESTABILIZADOR)**

Fornece um sinal adicional ao regulador de tensão que possibilita a redução das oscilações de potência ativa, melhorando o desempenho dinâmico e aumentando a transferência desta potência ao sistema.

#### **5.53 LIMITAÇÃO**

Imposição intencional, ou existência inerente das condições limites do percurso de uma variável.

#### **5.54 LIMITADOR (OU MALHA DE CONTROLE DO LIMITADOR)**

Elemento de controle do sistema de excitação que atua limitando a variável de saída, quando o sinal de entrada atinge um valor pré-fixado.

#### **5.55 GANHO**

Relação entre a variação na grandeza de saída, devido à ação dos blocos de controle, em função da variação do sinal de entrada.

#### **5.56 COMPENSAÇÃO**

Significa modificação, suplementação de uma ação ou suplementação do efeito dessa ação, com intenção de melhorar a performance em relação a alguma característica específica.

#### **5.57 COMPENSADOR**

Um elemento de realimentação do regulador de tensão que atua para compensar o valor da variável, modificando a função do elemento de detecção primário.

#### **5.58 CONVERSOR DE POTÊNCIA**

São dispositivos que transformam a corrente alternada em corrente contínua por meio de retificação controlada ou não.

#### **5.59 CROWBAR**

Dispositivo de proteção do equipamento contra sobretensões no campo que reduz a tensão por meio da descarga de energia através de uma resistência.

#### **5.60 CIRCUITOS DE AMORTECIMENTO (*SNUBBERS*)**

Elementos que protegem os componentes semicondutores de elevados  $di/dt$  ou  $dv/dt$ . São, geralmente, colocados entre as linhas de alimentação de um sistema trifásico, ou entre anodo e catodo, para evitar a destruição dos semicondutores devido ao aparecimento de altas tensões reversas durante a operação das pontes. Tais dispositivos também dão suporte à comutação de estado dos tiristores.

#### **5.61 CONTROLE DE FASE**

É o controle de disparo dos tiristores, que é sincronizado com a frequência da fonte de potência que alimenta o conversor. Os ângulos de disparo podem ser adiantados ou atrasados de forma a fornecer o nível de tensão adequado.

#### **5.62 REGULADOR DE TENSÃO MICROPROCESSADO**

É constituído de módulos de controle que recebem sinais analógicos e digitais para serem processados e fornece um sinal de saída no valor desejado. Todo o algoritmo e as demais funções do regulador são realizados por um microprocessador.

#### **5.63 EXCITATRIZ ROTATIVA CA**

É uma excitatriz cuja energia é derivada de um alternador e transformada em corrente contínua através de retificadores. A excitatriz inclui um alternador e retificadores de potência que podem ser ou não controlados.

Esses retificadores podem ser estacionários ou rotativos, com velocidade igual ao eixo do rotor. No caso de retificadores rotativos, a excitatriz é denominada “sem escovas” (*Brushless*).

O alternador pode ser acionado por um motor ou pelo eixo da máquina síncrona.

#### **5.64 EXCITATRIZ ROTATIVA CC**

A energia da excitatriz é proveniente de um gerador CC, que possui comutadores, escovas e circuito de controle. Como a excitatriz CA, este tipo de excitatriz poderá ser acionado por motor ou pelo eixo do gerador síncrono.

#### **5.65 EXCITATRIZ PRINCIPAL**

No sistema com excitatriz rotativa, a excitatriz principal é fonte de toda ou parte da corrente de campo necessária à magnetização da máquina elétrica.

#### **5.66 EXCITATRIZ PILOTO**

No sistema com excitatriz rotativa, é a fonte da corrente de campo da excitatriz principal.

#### **5.67 EXCITATRIZ ESTÁTICA COMPOSTA**

Neste tipo de excitatriz, a energia é derivada das correntes e tensões da máquina síncrona ou fonte auxiliar e é convertida em corrente contínua através de transformadores ou diretamente pelos retificadores. Inclui, portanto, os transformadores de corrente e potencial, retificadores de potência, que podem ser controlados ou não, incluindo os respectivos circuitos de disparo.

#### **5.68 EXCITATRIZ ESTÁTICA ALIMENTADA POR FONTE DE TENSÃO**

É a excitatriz cuja fonte de energia é proveniente de uma fonte de tensão que é convertida em corrente contínua por retificadores. A excitatriz inclui um transformador de excitação e conversores de potência, controlados ou não, incluindo todo o circuito de disparo.

## 6. TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

### 6.1 INTRODUÇÃO

O sistema de excitação compreende todos os equipamentos e dispositivos necessários ao suprimento da corrente do campo do gerador principal. A Figura 5.1 mostra, esquematicamente, os diversos componentes deste sistema.

Os principais componentes do sistema são: a excitatriz, o regulador de tensão, as malhas de controle dos limitadores e o sinal estabilizador. Este último poderá ou não ser incluído na especificação do sistema de excitação, dependendo dos requisitos definidos pela interação do gerador com a carga a ser suprida e os requisitos de proteção do gerador. No caso de cargas industriais, o sinal estabilizador não é normalmente incluído. Além dos componentes principais indicados, qualquer tipo de sistema de excitação deve incluir os seguintes limitadores e funções:

- a) As malhas de controle dos limitadores são: de sobrecorrente de excitação, de sobrecorrente no estator do gerador, de Volts/Hertz, de subexcitação ou ângulo da roda polar.
- b) O compensador usual a ser especificado é o de compensação reativa, podendo ser incluída a compensação ativa também.

As características gerais essenciais a serem consideradas na escolha de um tipo de sistema de excitação são: confiabilidade em todas as condições operativas e de serviço, simplicidade de operação e facilidade de manutenção. O custo tem também importância na escolha, mas deve ficar subordinado àqueles requisitos mencionados, tendo em vista os prejuízos que podem advir de uma parada do gerador causada por uma falha no sistema de excitação.

### 6.2 TIPOS DE EXCITATRIZES

A classificação dos diversos tipos de excitatriz considera quatro grandes grupos: as excitatrizes rotativas de corrente alternada ou de corrente contínua, excitatrizes estáticas e sistemas mistos. Podem ser também classificadas quanto à instalação, isto é, montadas no próprio gerador ou em separado.

#### 6.2.1 Excitatrizes Rotativas CC

A Figura 6.2 mostra esquematicamente o sistema de excitação com este tipo de excitatriz. Duas variantes do mesmo são mostradas nas Figuras 6.3 e 6.4. No primeiro caso, temos um sistema de ação descontínua e, no segundo, um sistema de ação contínua, rotativo tipo amplidínamo.

No caso da excitação de ação descontínua, podemos ter a excitatriz autoexcitada ou excitada por uma fonte separada.

Outro tipo é aquele em que a excitatriz principal é um amplificador rotativo. Os sistemas acima podem ser encontrados em algumas máquinas antigas, mas não são sequer considerados para máquinas novas.

#### 6.2.2 Excitatrizes Rotativas CA

Neste tipo de excitação, a corrente é produzida por um gerador de corrente alternada associado a um retificador fixo (Figura 6.5) ou rotativo (Figura 6.6). Este último sistema é conhecido como excitatriz *brushless*.

Os retificadores usados podem ser controlados ou não controlados (diodos). No caso de retificadores não controlados, o controle é feito por meio de uma ou mais bobinas de campo da excitatriz CA.

No caso de retificador estático, este é alimentado pelo gerador CA excitador, fornecendo corrente contínua para o campo do gerador principal através de escova e anéis coletores. A ligação do campo rotativo do gerador excitador e o seu controle de excitação é realizada também através de anéis coletores.

No caso do retificador rotativo, este é montado no eixo comum ao gerador principal e à armadura rotativa da excitatriz CA. A saída do retificador é ligada através de anéis coletores ou escovas diretamente ao campo da máquina síncrona principal.

As Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 mostram possíveis diferentes arranjos usuais para o sistema com retificadores estáticos, e a Figura, 6.10 um arranjo para retificadores rotativos (*brushless*).

As excitatrizes CA com retificadores estáticos estão em desuso.

### 6.2.3 Excitatrizes Estáticas e Mistas

Os sistemas de excitação estáticos e mistos podem ser classificados conforme mostrado na Figura 6.11, segundo a origem do sistema de suprimento do mesmo.

#### 6.2.3.1 Autoexcitação Direta Simples (Estática Alimentada por Fonte de Tensão)

A Figura 6.12 ilustra a configuração básica do circuito. Nesse arranjo, a energia para a excitação do campo é drenada dos terminais do gerador através de um transformador (sistema *bus-fed*), retificada em uma ponte de tiristores (6 pulsos) e alimentada ao campo.

Em pequenos geradores, a tensão residual do gerador é suficiente para iniciar o processo de excitação. Entretanto, como a ponte conversora não é capaz de funcionar com valor reduzido de tensão terminal no gerador, conecta-se uma ponte de diodos em paralelo (circuito de pré-excitação) com a ponte de tiristores. A ponte de diodos é removida automaticamente tão logo a tensão terminal do gerador tenha alcançado um valor suficientemente alto para que a ponte possa operar com segurança. Para evitar o risco de não se conseguir elevar a excitação após um curto-circuito (efeito desmagnetizante), pode-se utilizar uma fonte de tensão separada (conversora CA, banco de baterias ou alimentação auxiliar) para alimentar o circuito de pré-excitação.

#### 6.2.3.2 Autoexcitação Direta Mista (Estática Composta)

- Nestes tipos de sistemas de excitação, o suprimento de energia é derivado da corrente e da tensão terminal da máquina síncrona. A Referência 36 descreve os tipos mais usuais;
- Nos sistemas de excitação estático, alimentado por fonte de tensão, usa-se uma modalidade de excitação composta, conhecida como *compoundagem*, mostrada na Figura 6.13;
- Neste circuito, ao sistema de excitação estático, é adicionada uma ponte de diodos alimentada por um transformador de corrente (transformador de *compoundagem*) com entreferro para controle da saturação. A corrente do gerador circula no primário deste TC,

e no secundário é produzida uma tensão proporcional a essa corrente. A tensão retificada é somada à tensão de saída do retificador controlado. Isso é realizado conectando as duas pontes retificadoras em série do lado de CC; por isso, é chamada de composição série (Figura 6.13). O retificador poderá ser monofásico ou trifásico, dependendo da sua potência;

- O propósito da composição, neste caso, é assegurar que na ocorrência de um curto-circuito na rede, a excitação e, por conseguinte, uma corrente de curto-circuito mínima seja mantida durante a falta, garantindo a atuação da respectiva proteção, isolando a falta sem obrigatoriamente desligamento da máquina. Este tipo de excitatriz faz sentido em cargas isoladas, com alimentadores de baixo nível de curto-circuito. Nesse caso, um curto-circuito em um dos alimentadores pode ser limpo pela proteção do próprio alimentador e, como a excitação da máquina não caiu a zero, esta, após a limpeza da falta, pode continuar alimentando as cargas remanescentes, algo que poderia ser difícil de obter com uma máquina cuja excitação fosse derivada apenas da tensão terminal. A contribuição do conversor de corrente é limitada pela saturação do entreferro. Essa saturação, que, em geral, é projetada para pelo menos duas vezes a corrente nominal de armadura, deve estabelecer um compromisso entre o desempenho em curto-circuito e o custo do transformador;
- Este tipo de sistema de excitação não é muito usado devido ao elevado custo e ao fato de que a alimentação de cargas de forma isolada está cada vez menos frequente.

#### 6.2.3.3 Autoexcitação Indireta

Neste caso, uma excitatriz separada é acoplada ao rotor do gerador. Com isso, o conversor é dimensionado para a excitatriz, sendo assim de menor potência. Esta excitatriz pode ser de corrente contínua (Figura 6.14a) ou corrente alternada (Figura 6.14b).

#### 6.2.3.4 Sistema de Excitação Independente Direta

Para se obter uma unidade autossuficiente, utiliza-se uma excitatriz rotativa acoplada ao eixo. Esta excitatriz pode ser um gerador de ímã permanente (Figura 6.15a) ou um gerador autoexcitado (Figura 6.15b).

#### 6.2.3.5 Excitação Independente Indireta

O arranjo com duas excitatrizes (piloto e principal) – Figura 6.16 – é uma solução mais econômica que a do item anterior. Neste caso, os geradores de alta potência podem ser controlados com um regulador de pequeno porte. A capacidade da excitatriz piloto também é bastante reduzida. O sistema é robusto e à prova de curto-circuito. Também neste caso, pode ser utilizada a excitação sem escovas.

### 6.3 ESCOLHA DO TIPO DE EXCITATRIZ

Além das considerações de ordem geral indicadas no Item 6.1, a escolha do sistema mais apropriado para uma dada aplicação deve considerar entre outras os seguintes pontos: aplicação em usinas novas hidráulicas ou a vapor, plantas industriais e recapacitações.

Os sistemas de excitação rotativos CC estão em desuso devido ao elevado número de paradas de máquinas para manutenção, pois há muitos desgastes mecânicos, principalmente nas escovas, ocasionando faiscamento. Além do mais, o sistema é limitado quanto ao mínimo tempo de resposta que se pode obter tensão de teto de no máximo 3 pu da tensão base de campo, o que pode ser prejudicial à estabilidade do sistema de potência, enquanto no sistema de excitação estático pode-se chegar, no mínimo, a 5 pu da tensão base de campo. Em alguns casos de recapacitação de geradores hidráulicos, porém, pode ser econômico manter-se a excitação rotativa, trocando-se o regulador de tensão por um microprocessado com uma excitatriz estática de pequena potência (excitatriz piloto) para alimentar o campo da excitatriz rotativa CC. Para qualquer tipo de planta nova, a vapor ou hidráulica, não se deve cogitar o uso desse tipo de excitação.

Os sistemas de excitação rotativa CA (*brushless*) devem ser considerados para turbogeradores, incluindo-se aplicações industriais e comparados economicamente com um sistema de excitação estático ou misto. São especificados também para uso em áreas classificadas, onde a possibilidade de faiscamento nas escovas é inaceitável. No caso de geradores hidráulicos, novos ou em recapacitação, o sistema *brushless* não é recomendado devido ao alto custo e o elevado peso do conjunto sistema de excitação e rotor.

Os sistemas de excitação estático ou misto apresentam inúmeras características favoráveis, como as seguintes:

- a) Possibilitam reduzir o tempo de resposta de recuperação da tensão do conjunto gerador e excitação, pois não há uma componente (excitatriz *brushless*) de retardo na malha de excitação;
- b) Possibilitam a medição de temperatura do rotor por meio da variação da resistência do campo, pois o sistema de excitação tem informações em tempo real da corrente e da tensão do rotor. Assim, é possível supervisionar a resistência do enrolamento do campo, que é diretamente proporcional à temperatura do rotor;
- c) A proteção de falha à terra do rotor somente é possível ser implementada com o acesso do enrolamento do rotor, que é o caso do sistema de excitação estática;
- d) Possibilitam um aumento de capacidade de controle de oscilações eletromecânicas via a introdução de sinal estabilizador;
- e) A manutenção pode ser feita com a máquina em operação, no caso do sistema de excitação com redundância em pontos críticos;
- f) Possibilitam alterar parâmetros que influenciam na resposta do sistema com o gerador em serviço, no caso de uso de regulador microprocessado;
- g) Propiciam maior facilidade de aquisição de dados para o sistema de proteção e supervisão, por exemplo, detecção de falha a terra no campo.

Ao se considerar o uso de um sistema de excitação estático, deve-se levar em consideração que a necessidade de corrente negativa de excitação, ditada por problemas do sistema de potência, aumentará seu custo devido à necessidade de uma ponte adicional.

O sistema de excitação independente indireta (*brushless*) para turbogeradores de grande porte (usinas térmicas e nucleares) tem sido especificado em razão da não exigência de resposta rápida desses sistemas, que, geralmente, são localizados próximos aos centros de carga, e da necessidade de corrente de excitação associada a uma rotação mais elevada.

O sistema de autoexcitação direta (estática alimentada por fonte de tensão), em virtude do baixo custo e bom desempenho, está predominando nas novas instalações.

Os sistemas com autoexcitação e composição série têm sido especificados para grupos de geradores que operem isolados e sujeitos a variações bruscas de tensão, como no acionamento de motores de indução de grande potência (plataformas *offshore*, embarcações).

A Tabela 6.1 mostra um quadro geral resumido das características dos diversos sistemas de excitação estática e mista, que devem também ser consideradas quando da escolha de um deles.

## 6.4 REGULADORES DE TENSÃO

### 6.4.1 Tipos

#### 6.4.1.1 Analógicos

Para máquinas de baixa potência, este sistema poderia ser mais econômico, porém, devido aos recursos disponíveis nos sistemas digitais, e levando em conta que a viabilidade econômica de centrais de pequeno porte implica operação desassistida, tal tecnologia está praticamente abandonada.

Os ajustes dinâmicos deste tipo de regulador dependem diretamente dos valores de componentes como resistores e capacitores, que sofrem com envelhecimento e drifts térmicos, motivo pelo qual, eventualmente, um reparo pode conduzir à necessidade de reajuste, o que não ocorre nos reguladores digitais.

O enorme conjunto de vantagens propiciado pelos reguladores digitais deixa em cheque o uso de sistemas analógicos mesmo em máquinas de pequeno porte. Além do mais, a grande maioria dos fabricantes já não produz reguladores analógicos atualmente. Dessa forma, este trabalho focará com mais intensidade os sistemas digitais.

#### 6.4.1.2 Digitais

Os reguladores com controle microprocessado têm a mais nova tecnologia para sistema de excitação. Estes reguladores têm vantagens em relação aos anteriores nos seguintes aspectos:

- Possibilidade de ajustes idênticos para várias unidades de uma mesma usina;
- Precisão e estabilidade nos ajustes;
- Maior facilidade para projeto, devido à lógica do sistema de regulação ser realizado por *software* amigável;
- Menor quantidade de componentes ativos diminuindo a possibilidade de falhas e a necessidade de ajustes, tais como, potenciômetros, botões de comando, medidores, reostatos etc;
- Menor tempo de entrega de equipamentos pelos fabricantes, devido à montagem do sistema de excitação ser facilitada pela menor quantidade de fiação e componentes;
- Menor tempo de teste, comissionamento e *start-up* devido ao *software* de detecção de defeitos utilizando autodiagnose (*watch-dog*) e a não necessidade de trocas de componentes para ajustes de parâmetros;
- Interfaces de comunicação bastante poderosas, no sentido de suportar operação, ensaios, *help on-line* etc;
- Maior disponibilidade de recursos para atendimento pelo fabricante das funcionalidades colocadas na Especificação Técnica Funcional do cliente;



- Simplificação e maior confiabilidade nas operações de rastreamento e transferências entre os modos de operação do regulador.

#### 6.4.2 Modos de Operação

Os reguladores de tensão devem ser capazes de operar manualmente ou automaticamente, quer seja do local da planta ou remotamente.

##### 6.4.2.1 Automático

- O controle automático de tensão é efetuado através da realimentação de tensão vinda do estator da máquina. Assim, tem-se ajuste da tensão automaticamente para as variações de carga, que é controlado usualmente por uma malha de regulação PID ou de avanço-atraso;
- Para casos de redundância de controle, são necessários circuitos *follow-up* (seguidores) para que a transferência de controle, com a máquina em funcionamento, seja imperceptível ao sistema. Os seguidores devem também ser especificados para a transferência do regulador automático para o manual ou vice-versa. Quando da existência de vários controles automáticos, usa-se os seguidores também para a transferência entre canais;
- Nos reguladores analógicos, costumava-se especificar um voltímetro de balanço, para monitoramento dos desvios de seguimento, algo sem utilidade nos reguladores digitais, posto que o seguimento é efetuado em *software*. Neste caso, os mecanismos de *follow-up* podem utilizar comunicação dedicada entre canais e envolvem não apenas a atualização de saídas, mas também estados de controle.

##### 6.4.2.2 Manual

6.4.2.3 A provisão de controle manual, em geral, tem como finalidade dar continuidade à operação no caso de um defeito no regulador com controle automático. Cabe ressaltar que o modo de controle manual é empregado também no comissionamento e durante testes;

6.4.2.4 Normalmente, os reguladores são projetados com os circuitos eletrônicos das diversas unidades em cartões permutáveis. Por isso, esses cartões podem ser trocados com rapidez e facilidade;

6.4.2.5 O controle de tensão manual é efetuado por meio de um controle de malha aberta no valor desejável como referência em relação à tensão terminal do gerador, através da realimentação de corrente ou tensão do campo. Desta maneira, mantém-se somente a corrente ou tensão de campo constante. Entretanto, com as variações de carga ocorrem desvios de tensão no estator e é necessário que o operador ajuste manualmente a tensão nos terminais do gerador para corrigir os desvios em relação ao valor desejado. A malha de regulação é P ou PI, em casos de malha fechada com relação ao circuito de campo, pois, neste caso, não há preocupação em corrigir as variações rápidas de tensão;

6.4.2.6 Para o controle manual também é necessário que se tenha follow-up, a fim de proporcionar uma comutação sem alteração do ponto de operação do gerador;

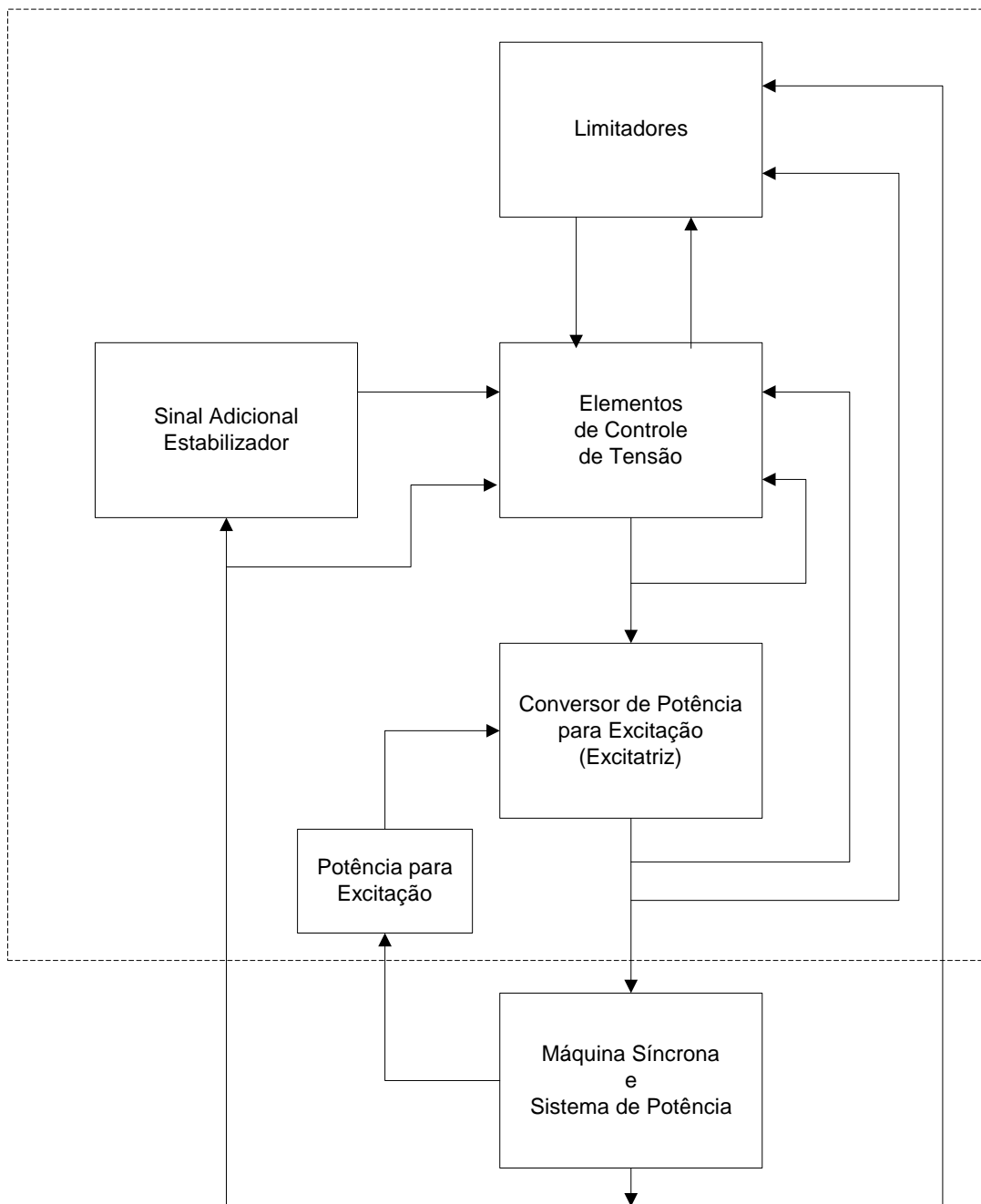
6.4.2.7 O controle manual não deve ser utilizado na operação da máquina, mas reservado para ensaios ou situações de emergência.

**Tabela 6.1 – Resumo das Características dos Sistemas de Excitação**

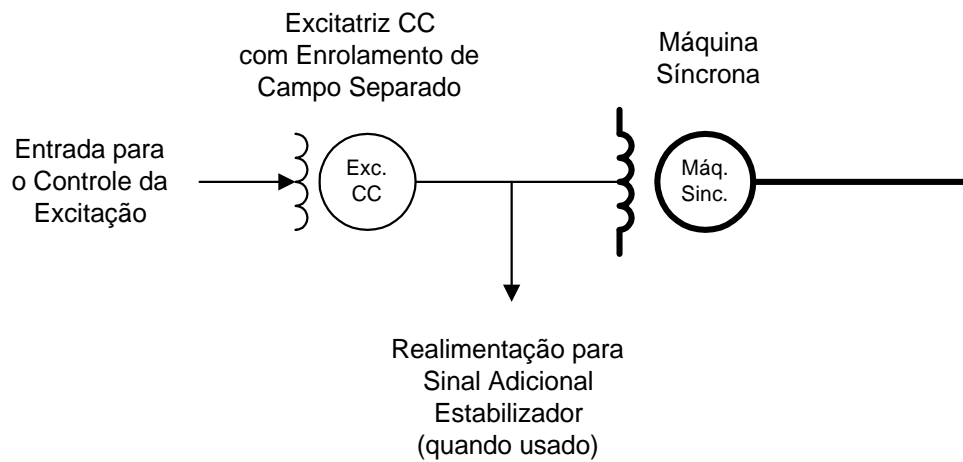
	Tipo de Sistema de Excitação		Excitatriz Rotativa	Componentes que Necessitam de Manutenção	Resposta do Sistema	Adequabilidade para Cargas Súbitas	Seletividade na Interrupção de Curto-Circuito em Consumidores
Autoexcitação	Excitatriz Estática	Direta Simples <sup>1</sup>	-	Anéis Coletores	Muito Boa	Muito Boa	Limitada
		Direta Composta <sup>2</sup>	-	Anéis Coletores	Muito Boa	Muito Boa	Boa
	Excitatriz Rotativa	Indireta Simples	CC	Anéis Coletores e Comutadores	Regular	Regular	Limitada
			CA	-	Boa	Boa	Limitada
		Indireta Composta	CC	Anéis Coletores e Comutadores	Regular	Regular	Boa
			CA	-	Boa	Boa	Boa
Excitação Independente	Rotativa	Direta	CA	Anéis Coletores	Muito Boa	Muito Boa	Muito Boa
		Indireta	CA	-	Boa	Boa	Muito Boa

<sup>1</sup> Alimentada por Fonte de Tensão

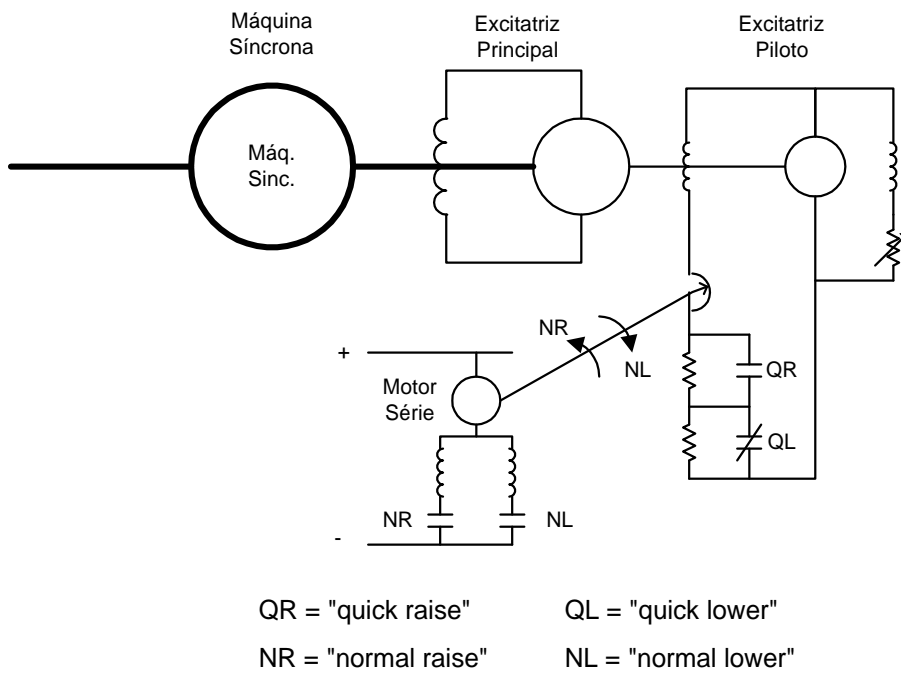
<sup>2</sup> Alimentada por Fonte de Tensão e de Corrente



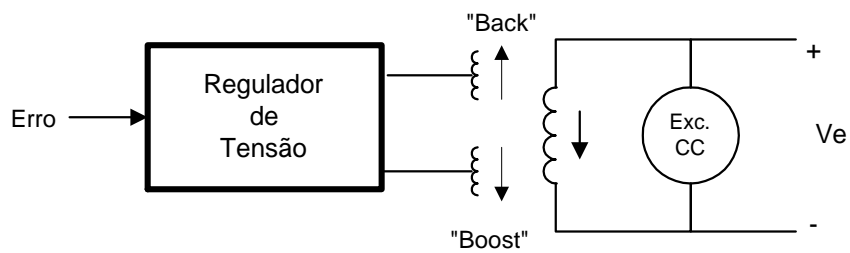
**Figura 6.1** – Diagrama de Bloco Funcional Geral de um Sistema de Excitação (dentro do quadro tracejado)



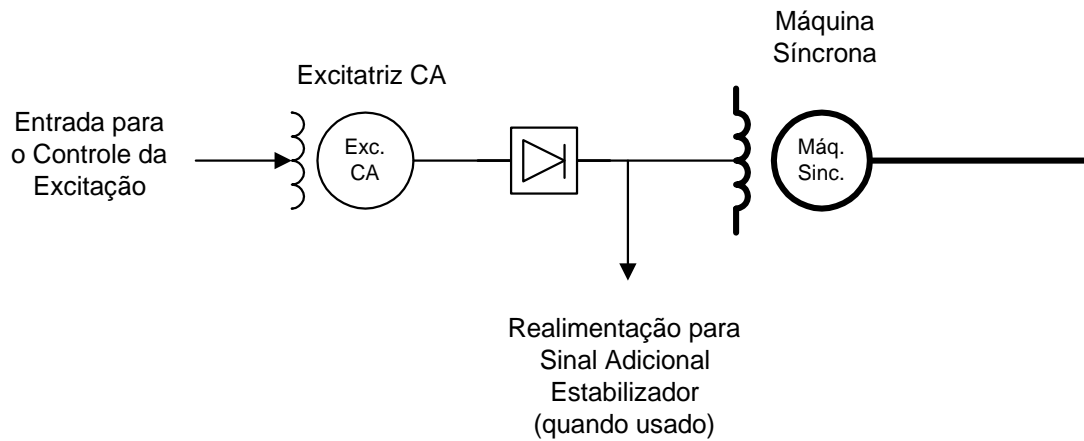
**Figura 6.2** – Sistema de Excitação com Excitatriz Rotativa CC



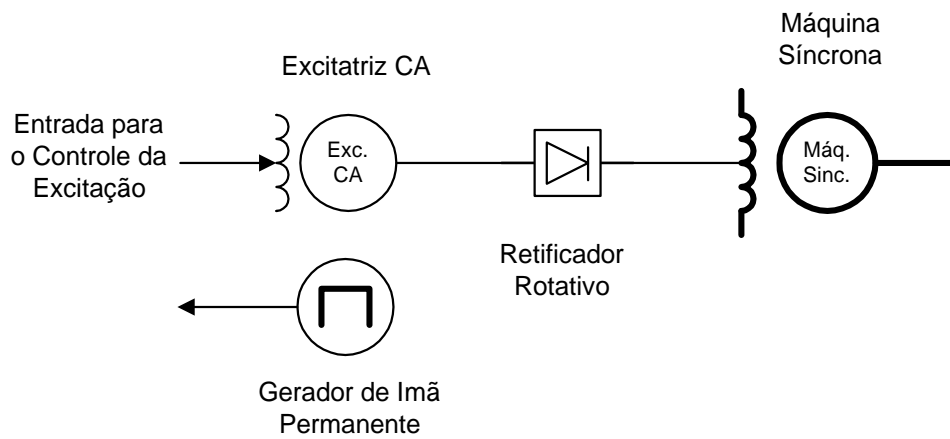
**Figura 6.3** – Sistema de Excitação de Ação Descontínua com Excitatriz Rotativa CC



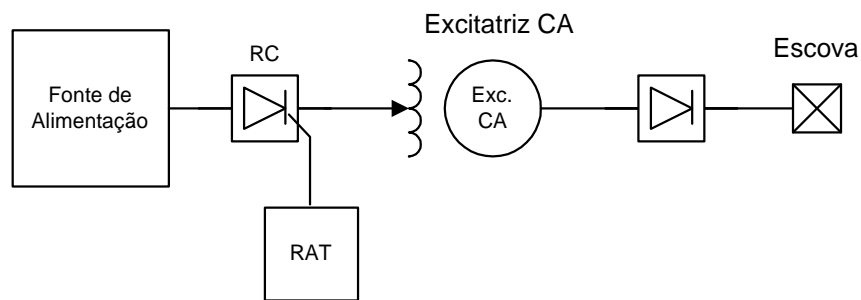
**Figura 6.4** – Sistema de Excitação de Ação Contínua com Excitatriz Rotativa CC



**Figura 6.5** – Sistema de Excitação com Excitatriz Rotativa CA e Retificador Fixo Não Controlado

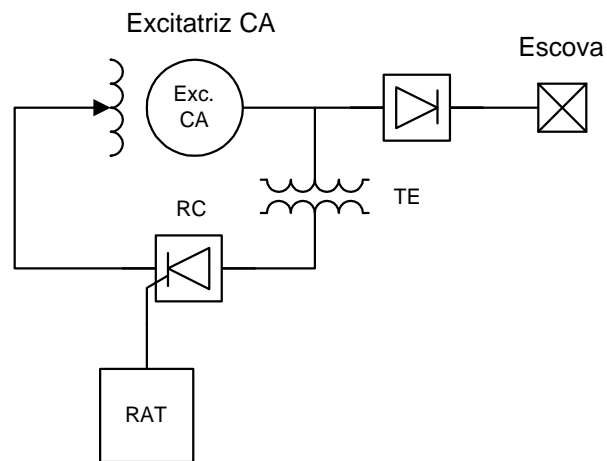


**Figura 6.6** – Sistema de Excitação com Excitatriz Rotativa CA e Retificador Rotativo Não Controlado (Excitatriz Brushless)



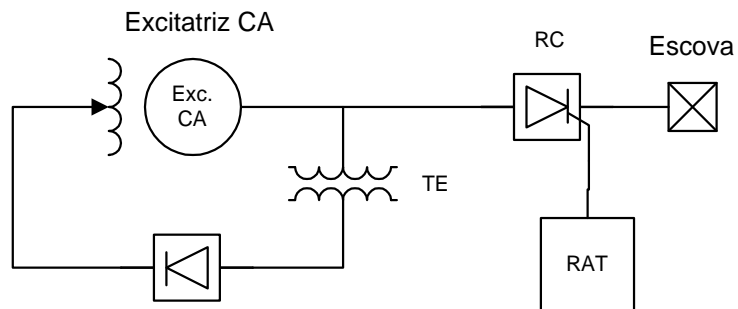
RC = Retificador Controlado Tiristorizado ou Transistorizado

**Figura 6.7** – Sistema de Excitação com Excitatriz CA, de Excitação Independente, com Campo Controlado e Retificadores Fixos na Saída (Field Controlled Alternator Rectifier Exciter)

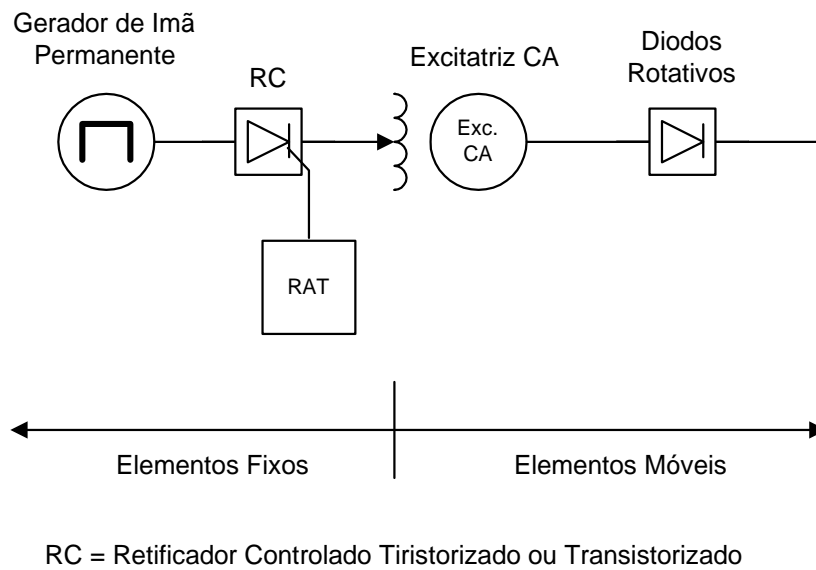


TE = Transformador de Excitação

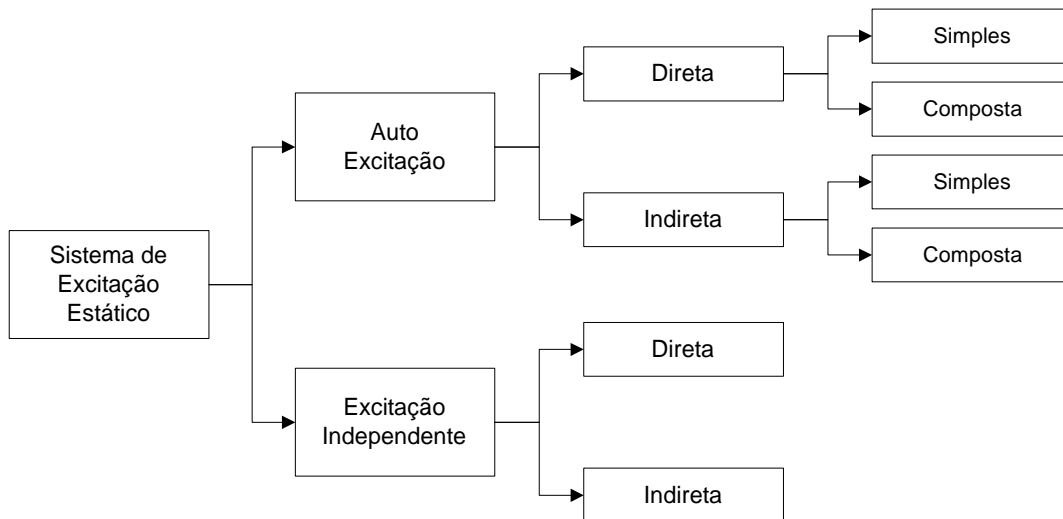
**Figura 6.8** – Sistema de Excitação com Excitatriz CA, Autoexcitada, com Campo Controlado e Retificadores Fixos na Saída (Field Controlled Alternator Excitation System)



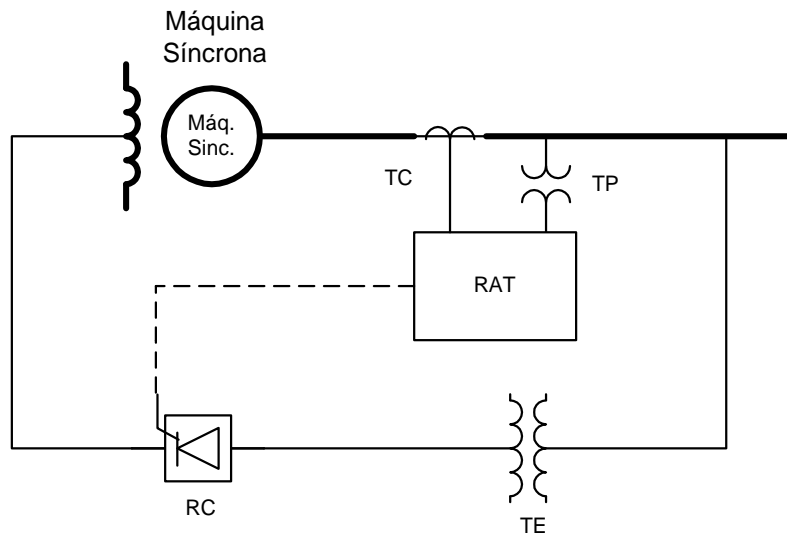
**Figura 6.9** – Sistema de Excitação com Excitatriz CA, Autoexcitada, com Controle de Tensão (Alternator Controlled Rectifier Exciter)



**Figura 6.10** – Sistema de Excitação com Excitatriz CA, de Excitação Independente, com Campo Controlado e Retificadores Rotativos na Saída  
(Field Controlled Alternator Rectifier Brushless Excitation System)

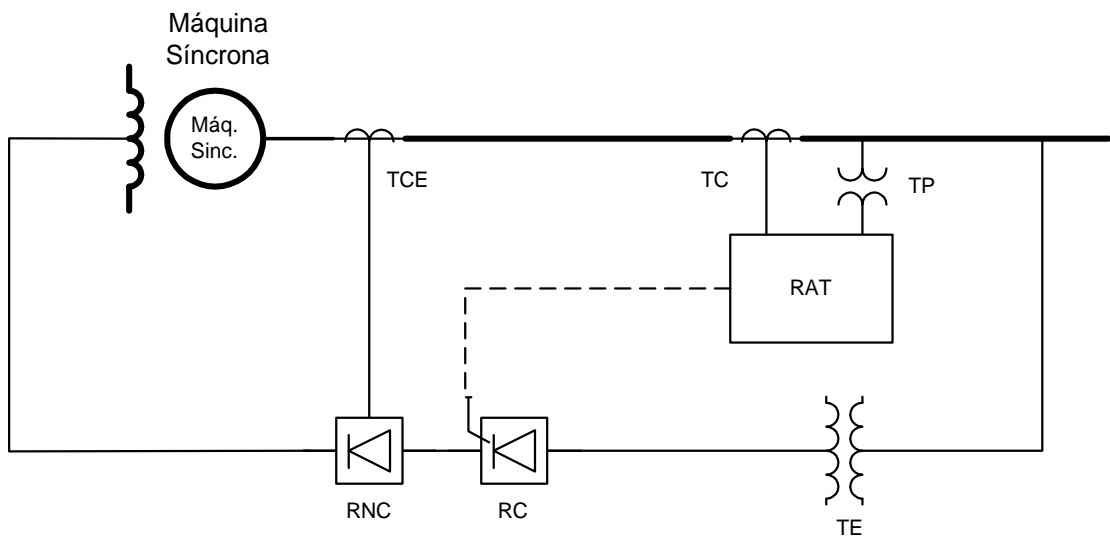


**Figura 6.11** – Classificação dos Sistemas de Excitação Estático Segundo a Origem da Energia Primária



TC = Transformador de Corrente para Medição  
 TP = Transformador de Tensão para Medição

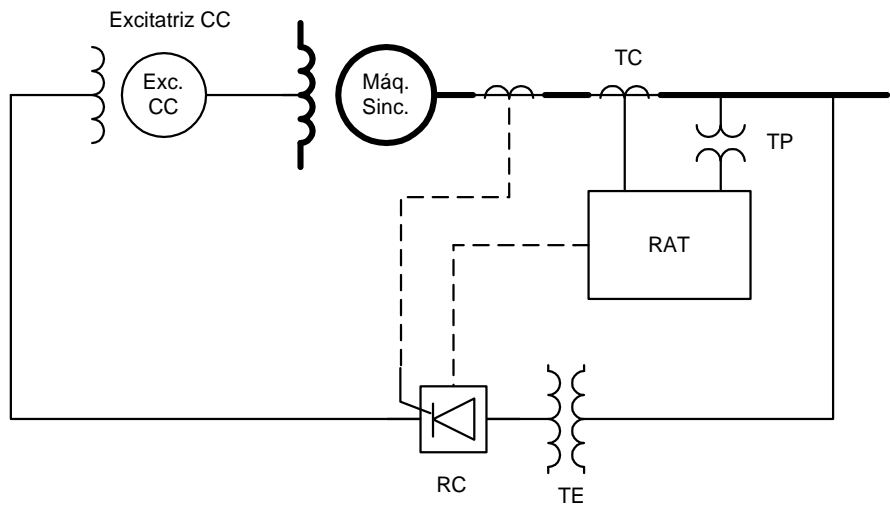
**Figura 6.12** – Sistema de Excitação com Autoexcitação Direta Simples (Estática Alimentada por Fonte de Tensão)



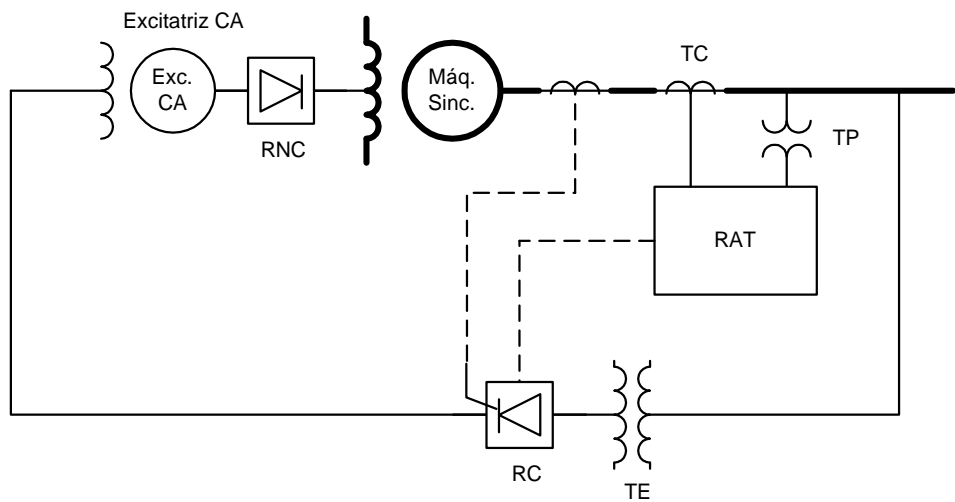
RNC = Retificador Não Controlado (Compoundagem)  
 TCE = Transformador de Corrente de Excitação (Compoundagem)

**Figura 6.13** – Sistema de Excitação Direta Composta (Direta Composta)





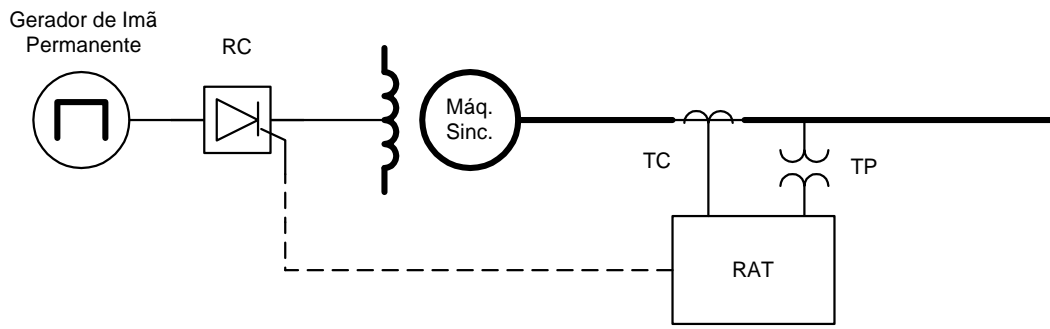
(a)



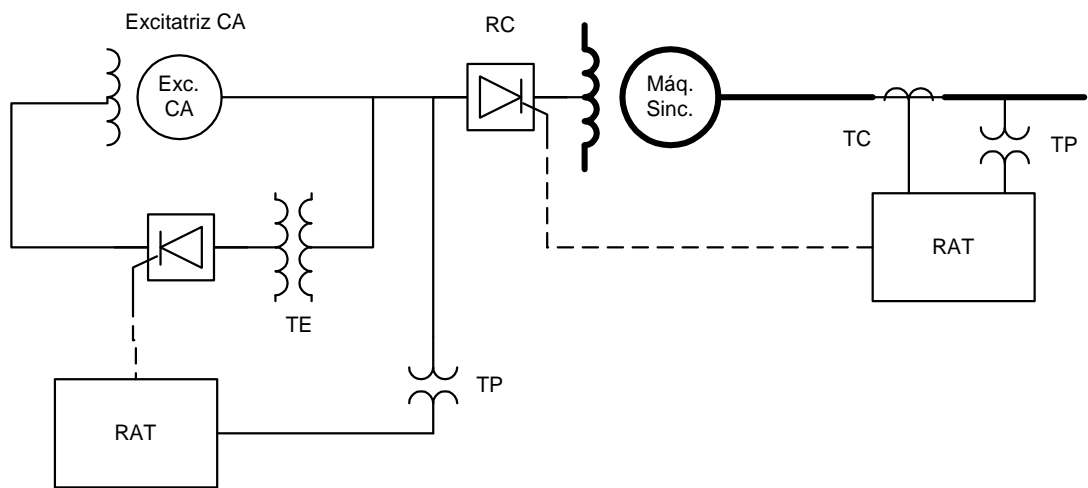
RC = Retificador Controlado Tiristorizado ou Transistorizado

(b)

**Figura 6.14 – Sistema de Excitação com Autoexcitação Indireta**

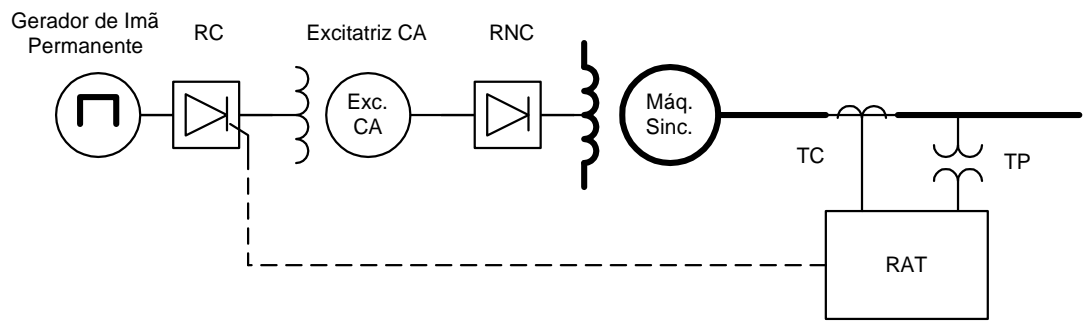


(a)



(b)

**Figura 6.15** – Sistema de Excitação com Excitação Independente Direta



RC = Retificador Controlado Tiristorizado ou Transistorizado

**Figura 6.16** – Sistema de Excitação Independente Indireta

## 7. COMPONENTES DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO

### 7.1 INTRODUÇÃO

Tanto na elaboração de uma “Especificação Técnica Funcional” como na elaboração de uma “Especificação Técnica Detalhada”, o usuário do Guia deverá considerar os aspectos abaixo relacionados para escolher os equipamentos componentes do sistema de excitação. Outros aspectos funcionais mais importantes dos mesmos serão discutidos nas Seções 8 e 9 do Guia.

### 7.2 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS

O sistema de excitação estático poderá ser utilizado tanto para geradores para usinas hidrelétricas como para usinas termoelétricas.

O sistema de excitação estático alimenta e controla diretamente a corrente do enrolamento de campo da máquina através de um retificador tiristorizado ou transistorizado controlado por um Regulador Automático de Tensão (RAT), sem dispositivos intermediários tais como excitatrizes CC ou CA presentes nos sistemas rotativos.

No caso de turbogeradores ou hidrogenadores de alta rotação, em que a corrente de campo não for muito elevada, é viável a fabricação de excitatriz *brushless*. Esta também é utilizada em casos de áreas classificadas. Podemos então eliminar os coletores e escovas presentes na excitatriz estática e também eliminar os comutadores presentes na excitatriz rotativa CC.

O sistema de excitação rotativo tem utilização e aplicação iguais ao sistema de excitação estático, porém o fornecimento da tensão de teto é menor, e o tempo de resposta é mais lento. Isso se deve ao fato de que a atuação se dá através do enrolamento de campo da excitatriz rotativa, o qual associa à malha uma constante de tempo adicional de valor significativo.

#### **Para sistema de excitação estático:**

Caso não seja possível realizar estudos de sistema para a determinação da tensão de teto, poderá ser adotada a tensão de teto positiva do sistema de excitação de no mínimo 1,6 da tensão de campo com carga nominal (tipicamente acima de 3 pu em relação à tensão de campo na linha de entreferro a vazio, se não for um turbo gerador ou uma máquina repotenciada somente com a mudança de classe de isolamento).

#### **Para sistema rotativo**

Aplicável em situações em que os requisitos da tensão de teto e corrente de teto não sejam elevados. Caso não seja possível realizar estudos de sistema para a determinação da tensão e corrente de teto, poderá ser adotada uma tensão de teto positiva do sistema de excitação de no máximo 1,6 da tensão de campo com carga nominal e uma corrente de teto de 1,4 da corrente nominal do sistema de excitação.

#### **Compensador síncrono ou motor síncrono**

Para o caso de um compensador síncrono ou de um motor síncrono poderá ser utilizado tanto o sistema excitação estático quanto o rotativo. Neste caso, funções de comando, controle e proteção deverão ser adaptadas para atender, entre outras, as condições de partida e parada de grandes motores efetuadas diretamente através da rede energizada.

### 7.3 SUBDIVISÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

O sistema de excitação estático é subdividido basicamente em sete subsistemas:

- 1) Transformador de excitação
- 2) Conversor de potência
- 3) Proteção contra sobretensão CC
- 4) Desexcitação
- 5) Pré-Excitação
- 6) Regulador automático de tensão (RAT)
- 7) Canal manual e seguidor

As proteções e os dispositivos são discutidos na Seção 8.

#### 7.3.1 Transformador de Excitação

Conectado aos terminais da máquina síncrona, funciona como fonte de alimentação de energia para a ponte retificadora, exceto em caso de motores e compensadores síncronos em que o sistema de excitação pode ser alimentado por um sistema independente.

O transformador de excitação pode ser construído em líquido isolante ou a seco, dependendo das condições da instalação.

Podem ser utilizados três transformadores monofásicos formando banco quando os condutores de saída do gerador forem individualmente blindados. Quanto à ligação poderá ser considerado qualquer tipo de ligação, entretanto a ligação Y- $\Delta$ ,  $\Delta$  do lado da ponte, apresenta vantagem de diminuir a propagação de harmônicos para o lado primário. Ainda com o objetivo de diminuir a propagação de ruídos de alta frequência, utiliza-se blindagem eletrostática entre primário e secundário.

A utilização de transformador de excitação trifásico ao invés de três transformadores monofásicos é preferível devido ao menor preço do transformador trifásico e da montagem e interligações elétricas serem mais simples e de menor custo.

No caso de grandes hidrogeradores, cujos condutores de saída são barramentos segregados por fase, com o objetivo de minimizar a possibilidade da ocorrência do curto-circuito envolvendo mais de uma fase, é usual a utilização de três transformadores monofásicos com seus respectivos cubículos e barramentos blindados de interligação.

O transformador de excitação necessita possuir uma reatância de dispersão baixa, da ordem de 5%, algo equivalente à metade da reatância de um transformador convencional, para diminuir os tempos de comutação entre tiristores do conversor de potência. Em seu dimensionamento, é necessária a compensação das Perdas associadas ao conteúdo harmônico.

#### **O transformador de excitação não é necessário quando:**

- 1) A fonte de alimentação da ponte conversora for uma máquina elétrica auxiliar trifásica com tensão de saída compatível com a tensão de excitação da máquina principal e nível de curto-circuito compatível com os requerimentos do conversor, haja vista o tempo de comutação entre tiristores ser diretamente proporcional à reatância de Thevenin do barramento que alimenta o conversor.

- 2) No caso de excitação *brushless*, cuja energia para a ponte retificadora é usualmente alimentada pelos serviços auxiliares CA, CC ou bateria.
- 3) Nos sistemas de excitação com excitatrizes rotativas CC (principal mais auxiliares)

### **Transformador de compoundagem**

Em geradores que são protegidos com relés de proteção de atuação lenta, o transformador de compoundagem tem como função principal alimentar o sistema de excitação (utilizando-se a própria corrente do curto-circuito no gerador) no tempo suficiente para garantir a atuação das proteções de sobrecorrente, pois, durante o curto-circuito, a tensão no primário do transformador de excitação é praticamente nula. Quando o sistema de excitação é alimentado por um sistema auxiliar, este transformador não é usado.

Nos casos de reforma ou modernização, deve-se reavaliar o sistema de proteção elétrica do gerador visando a não utilização do transformador de compoundagem.

Em grandes hidrogeradores, a utilização do transformador de compoundagem é muito cara e desnecessária, devido ao segregamento das fases em barramentos blindados e ao alojamento dos transformadores de excitação monofásicos em células, impedindo, dessa forma, a ocorrência de curtos-circuitos trifásicos.

No caso de a máquina ser ligada à rede sem o transformador elevador, deve-se avaliar a necessidade da utilização do transformador de compoundagem, principalmente no caso da utilização de proteções eletromecânicas lentas.

### **7.3.2 Conversor de Potência**

Constituído por pontes a semicondutores, em número adequado, ligadas em paralelo de modo a suprir a corrente de campo, com ou sem pontes redundantes.

A configuração com a mais ampla faixa de operação e padrão para a maioria das aplicações é a ponte retificadora trifásica de seis pulsos totalmente controlada, pois, no caso de uma desexcitação, há possibilidade de inverter a tensão da ponte de forma a reduzir rapidamente a corrente de excitação e impedir o surgimento de possíveis sobretensões no campo. Outra vantagem da ponte totalmente controlada é que ela viabiliza o uso de contator de campo ou disjuntor no lado CA em vez do disjuntor de campo.

Quando for necessária uma corrente de excitação negativa no caso de máquinas de polos salientes muito subexcitadas, utiliza-se dois conversores de conexão antiparalela: um provendo corrente positiva e outro provendo corrente negativa. Apesar de o conversor negativo ser de menor capacidade, tem-se um acréscimo razoável no custo do sistema.

A utilização de ponte utilizando IGBTs é indicada para correntes baixas, ao redor de 20A por razões econômicas.

### **7.3.3 Desexcitação**

O equipamento de desexcitação é composto basicamente pelo disjuntor de campo ou contator de campo e por uma resistência de descarga de campo (a mesma utilizada para a proteção de sobretensão *crowbar*).

A utilização de um disjuntor de campo trifásico instalado no lado CA da ponte retificadora tem algumas vantagens em relação ao tradicional disjuntor de campo CC, assim como uma menor manutenção, devido ao menor desgaste dos polos do disjuntor CA. O disjuntor CA é encontrado rotineiramente no mercado e garante

boa segurança operacional, pois o circuito de potência fica totalmente separado (livre de tensão) após a abertura do disjuntor CA. Deve-se, entretanto, dar especial atenção à capacidade de interrupção de curto-circuito deste disjuntor, tendo em vista o valor elevado da componente de corrente contínua na corrente de curto. Além do mais, deve existir uma ação de acionamento do resistor de descarga quando da abertura do disjuntor CA. Isso deve ser feito preferencialmente com *hardware* dedicado, pois uma abertura deste disjuntor, sem a inserção do resistor de descarga, provoca sobretensão capaz de danificar o isolamento de todo o circuito de campo.

No caso de geradores com excitação rotativa (*brushless* ou CC) e geradores de pequena potência ou correntes de campo no máximo de cerca de 50<sup>a</sup>, pode-se utilizar, devido ao baixo custo, contator em vez de disjuntor de campo sempre associado a uma resistência de descarga linear.

Sempre que for dado o comando de *abrir* para o disjuntor ou contator de campo, deve-se ter o retificador trifásico operando como *inversor* (atrasando o ângulo de disparo), de modo a obter no campo tensão negativa CC, reduzindo o mais rápido possível a corrente de excitação para zero. Sempre que possível, nas paradas normais, deve-se baixar a corrente de excitação previamente à abertura, pois isso aumenta a vida útil dos contatos.

#### 7.3.4 Pré-Excitação (*Field Flashing*)

No processo de partida da máquina, deve-se gerar corrente de excitação independente da tensão terminal da máquina e por um determinado tempo (de 10s a 30s) suficiente para que se garanta o disparo dos semicondutores.

Quando houver tensão suficiente no terminal da máquina, inicia-se o processo de disparo da ponte de tiristores, elevando-se, então, a tensão terminal para o valor da tensão nominal em vazio.

A fonte auxiliar para alimentar a partida pode ser tanto os serviços auxiliares CA como as baterias da usina, podendo, mesmo dependendo da qualidade das fontes, serem empregadas ambas as fontes de forma redundante.

No caso de utilização de bateria, a sua conexão deverá ser feita por um contator CC e diodo de bloqueio. Na utilização dos serviços auxiliares CA, a conexão deverá ser feita por um transformador de ajuste e uma ponte retificadora não controlada.

Para máquinas pequenas/médias, é viável a corrente de excitação inicial ser obtida da tensão remanente. O processo de excitação fica mais lento, o que não é um problema grave neste caso. Em situações de inversão das barras de campo, algo que se faz periodicamente, deve ser provida uma excitação independente na primeira excitação, haja vista a polaridade da remanência estará invertida.

Para o caso de motores ou de máquinas com sistema de excitação alimentado por fonte independente, este circuito não é necessário.

Deverá ser previsto um número mínimo de operações do circuito num intervalo de tempo de, por exemplo, uma hora.

#### 7.3.5 Regulador Automático de Tensão (RAT)

O principal objetivo do RAT é controlar a tensão nos terminais da máquina em relação a um valor de referência. Outra função do RAT é a distribuição de potência reativa na operação em paralelo de várias máquinas. Nesse caso, a

tensão deverá ser ajustada em função da corrente reativa de acordo com o estatismo. Em adição o RAT, poderá ter uma função para compensar a queda de tensão até um ponto desejado no sistema de potência ao qual a máquina está conectada.

A faixa usual de ajuste do valor de referência da tensão terminal é de  $\pm 10\%$ , podendo ser escolhida outra faixa. Dentro dessa faixa, o RAT deverá ter uma precisão de  $\pm 0,5\%$  do valor de referência desejado. Fora dessa faixa, poderá operar por curtos intervalos de tempo, onde também entrarão em ação as malhas de controle dos limitadores.

Para grandes geradores ou para casos em que a geração é prioritária, segundo o interesse do próprio cliente, deve-se utilizar pelo menos dois canais independentes e redundantes.

Para pequenos hidrogeradores ou mesmo médios (de 15 até 50 MVA) de baixa prioridade, pode-se utilizar sistema monocanal, isto é, utilizar-se um único *hardware* (controle e potência) para regulação manual e automática. Nesse caso, a precisão da regulação pode ser cerca de  $\pm 1\%$ .

Discussões sobre os dispositivos de proteção e controle são apresentadas na Seção 9.

### 7.3.6 Regulador Manual de Tensão

O objetivo do regulador manual de tensão é controlar a tensão nos terminais do gerador através de atuação direta do operador na corrente de excitação.

O regulador manual deve possibilitar uma operação totalmente independente do RAT e deve entrar em operação quando ocorrer falta no RAT, durante o comissionamento e testes.

### 7.3.7 Seguidores (*Follow-up*)

É o acompanhamento (*follow-up*) do regulador automático de tensão pelo de corrente de excitação (regulador manual) e vice-versa. Dessa forma, os dois reguladores estarão garantidamente sempre no mesmo estado, ou seja, sempre será possível passar de um regulador para o outro, sem quaisquer perturbações na grandeza controlada.

Nos reguladores que empregam eletrônica analógica, é utilizado um instrumento de balanço que indica a diferença de estado entre o regulador automático e regulador manual, o qual deve estar na posição zero na passagem de automático para manual ou vice-versa.

Nos reguladores que empregam eletrônica digital, este instrumento de balanço pode ser eliminado, pois a lógica de comparação entre os estados dos canais é feita via *software*.

Além das malhas de controle dos limitadores de subexcitação e de sobreexcitação necessários para a máquina operar dentro de sua curva capacidade, pode-se ter outros dispositivos:

### 7.3.8 Limitador de Subexcitação

Este limitador deverá simular o trecho da curva de capacidade do gerador correspondente à linha do limite de estabilidade prático (semieixo esquerdo da curva). Também pode ser sintetizada uma reta ou segmentos de retas para definir o limite de atuação.



### 7.3.9 Falha a Terra do Rotor

Esta proteção deverá ser empregada opcionalmente e com o emprego de um relé de proteção com *hardware* próprio, este relé deverá ser de duplo estágio (alarme e proteção ambos temporizados).

### 7.3.10 Proteção de Tiristores

A proteção dos tiristores deve ser efetuada com a utilização de fusíveis ultrarrápidos, sendo coordenados pelo parâmetro  $i^2t$ . Pode-se utilizar duas configurações básicas: um fusível por tiristor ou um fusível por ramo. As duas formas são efetivas quanto à proteção, porém a utilização de um fusível por tiristor utiliza elementos de menor valor nominal e, conseqüentemente, menor valor de  $i^2t$ , tornando a coordenação de proteção mais efetiva.

Circuitos *snubber* (supressores de transitórios) devem ser instalados em paralelo com cada tiristor. Seu valor deve ser calculado de modo a respeitar o limite de  $dv/dt$  do semiconductor.

Para conversores de maior potência, com utilização de tiristores do tipo disco, é recomendada a supervisão de temperatura no corpo dos dissipadores através de RTDs ou similares. As informações de temperatura obtidas devem fazer parte da rotina de proteção do conversor, com rotinas de alarme e desligamento, bloqueando o mesmo, caso a temperatura atinja o limite de junção recomendada pelo fabricante.

### 7.3.11 Sistema de Desexcitação

#### 7.3.11.1 Resistor Linear

Descarrega o campo assintoticamente, tendo, a princípio, um tempo de descarga maior que o resistor não linear.

Tem como atrativo seu baixo custo e robustez, bem como um maior número de fornecedores, sendo de fácil aquisição.

Um bom dimensionamento do seu valor ôhmico pode reduzir significativamente o tempo de desexcitação.

Esse componente deve ser especificado para determinado ciclo de serviço, sendo o mais usual 03 (três) descargas plenas por hora.

#### 7.3.11.2 Resistor Não Linear

Descarrega o campo quase que linearmente e em tempo menor que o resistor de característica linear.

Seu custo é elevado e exige inspeções periódicas para verificação geral de seu estado. Atualmente, existem poucos fabricantes desse componente, e os prazos de entrega são elevados. Não existem similares nacionais.

#### 7.3.11.3 Acionamento da Desexcitação

O processo de inserção do resistor de descarga, durante o processo de desexcitação, pode ser efetuado de duas formas:

- inserção através do contato NF do contator de campo, se esse for do tipo sobre barras (contator CC).

- inserção através de chave estática, formado por um conjunto de tiristores conectados em antiparalelo (*crowbar*).

Nos dois casos, o sistema de excitação deve inverter a tensão de campo (*phase-back*) invertendo, dessa forma, o sentido do fluxo de potência no sentido campo-transformador de excitação. No processo de desexcitação normal, é conveniente que a corrente de campo caia a níveis pré-ajustados para a emissão do comando de abertura do contator de campo.

Em processos de desexcitação por desligamento (trip), a abertura do contator de campo deve ser imediata.

## **8. VALORES NOMINAIS E REQUISITOS FUNCIONAIS**

### **8.1 INTRODUÇÃO**

Nesta Seção, são feitas considerações sobre os valores nominais e requisitos funcionais a serem especificados para o sistema de excitação pelo comprador. Discute-se, também, a interação do sistema de excitação com o sistema de potência, para orientar o usuário no desenvolvimento dos estudos necessários à determinação desses parâmetros (Seção 12).

Para permitir uma avaliação do impacto dos referidos parâmetros no custo e em outros aspectos do sistema de excitação, são feitas considerações sobre o assunto para permitir ao usuário do Guia cotejar técnica e economicamente a especificação desses valores nominais e requisitos funcionais com outras possíveis opções a serem adotadas no sistema de potência. Esse cotejamento poderá levar à especificação de parâmetros mais convenientes, de um ponto de vista global, do sistema de excitação.

### **8.2 INTERAÇÃO SISTEMA DE EXCITAÇÃO/SISTEMA DE POTÊNCIA**

#### **8.2.1 Introdução**

A qualidade de atendimento de um sistema elétrico está intimamente associada à possibilidade de manutenção da tensão e da frequência dentro de níveis adequados. Nesse sentido, os geradores síncronos com seus sistemas de controle correspondem aos elementos do sistema com participação mais significativa.

Especificamente, em relação ao controle de tensão, torna-se essencial um bom desempenho do sistema de excitação (excitatriz, regulador de tensão, sinal estabilizador etc.), no sentido de garantir a estabilidade do sistema, quando o mesmo é submetido a grandes ou pequenas perturbações, bem como para minimizar rapidamente os desvios de tensão provocados por variações no ponto de operação do sistema.

Assim, para o caso em que o gerador esteja inserido em uma malha de transmissão com características topológicas e de controle variáveis ao longo do dia, e especialmente ao longo dos anos, torna-se necessário um esforço analítico considerável para especificação das características que melhor atendam às solicitações do sistema de potência, durante as fases previsíveis de sua evolução. Já no caso de aplicações industriais, onde todo o processo seja à priori bem definido, a especificação do sistema de excitação pode ficar mais simplificada, devendo atender aos requisitos pré-definidos de operação das cargas da indústria.

Deve-se destacar que as diversas funções de controle do sistema de excitação, devem estar coordenadas com os ajustes dos sistemas de proteção de outros equipamentos da usina, no sentido de minimizar os riscos de danos e evitar o desligamento desnecessário de geradores.

Estão apresentados, a seguir, os aspectos mais significativos associados ao desempenho dos sistemas de excitação e regulação de tensão, bem como os requisitos de estudos e ferramentas normalmente empregados na definição das suas principais características.

## 8.2.2 Desempenho para Grandes Perturbações

O desempenho para grandes perturbações corresponde à resposta do sistema de excitação frente a distúrbios bastante severos como curto-circuitos em barras/linhas importantes, abertura de linhas etc.

A simples especificação dos parâmetros do regulador de tensão não é suficiente para garantir um desempenho desejado para o sistema de excitação. Outros parâmetros, tais como: tensão de teto, ganhos e constantes de tempo dos sinais estabilizadores, parâmetros das máquinas síncronas, impedância do sistema de transmissão e características da carga têm grande influência no desempenho do sistema de excitação. Além disso, se, por um lado, a função primária do regulador de tensão da máquina síncrona é manter a tensão terminal em regime permanente, por outro lado, ele também exerce forte influência no amortecimento das oscilações eletromecânicas do gerador, tanto do modo local quanto dos modos entre áreas. Portanto, o conhecimento das solicitações futuras do sistema de transmissão e das cargas, é de primordial importância na especificação do desempenho do sistema de excitação e regulação de tensão.

Convém aqui chamar a atenção sobre alguns parâmetros do sistema de excitação que desempenham papel importante no seu comportamento, especialmente no comportamento frente à aplicação de grandes perturbações:

### 8.2.2.1 Tensão de Teto.

Sob a ação do regulador de tensão, as modernas excitatrizes estáticas podem aplicar, temporariamente ao campo do gerador, tensões bem superiores àquela requerida para operar à plena carga. O valor dessa tensão fica limitado entre dois níveis denominados de **tensão de teto máxima** (Emáx. = teto positivo) e **tensão de teto mínima** (Emín.). Geralmente, a tensão de teto mínima apresenta polaridade inversa da tensão de teto máxima (Emín = teto negativo). Entretanto, convém ressaltar, que a possibilidade de aplicação de tensão negativa no campo da máquina, não significa a possibilidade de inversão da corrente de campo. Para isso, torna-se necessária outra ponte de tiristores, denominada ponte de corrente negativa.

A tensão de teto positiva tem grande influência na estabilidade transitória e a sua definição muitas vezes exige o emprego de programas digitais para simulação do comportamento dinâmico do sistema, quando submetido a distúrbios com grau elevado de severidade (normalmente aplicação de curto-circuito, seguido da abertura da linha de transmissão mais crítica). Nesses estudos, a rede de transmissão é considerada operando em diversos patamares de carga dentro de um horizonte previsível de evolução do sistema, de modo a garantir solução para uma ampla gama de condições operativas.

Considerações são feitas, também, em relação às características da carga do sistema, cuja modelagem pode ser bastante precisa, dependendo das informações disponíveis e da sua importância na definição da tensão de teto da excitatriz. Cargas, por exemplo, do tipo motor de indução, merecem normalmente considerações especiais, visto que podem exigir tensão de teto elevada, para permitir uma recuperação dos motores após a aplicação de defeito na rede, ou mesmo, para permitir a partida de grandes motores.

Atualmente, tensão de teto máxima da ordem de 3 p.u. a 5 p.u. (1,6 a 2,7 da tensão de campo com carga nominal) são consideradas normais para as excitatrizes estáticas e *brushless*. O Operador Nacional do Sistema Elétrico do Brasil nos especifica, para os geradores conectados à rede básica, um teto mínimo de 5/-4pu e acrescenta que um curto na alta, que leve a tensão terminal a 35% da nominal, ainda permitirá tensão de campo nominal. Isto tem levado a excitatrizes relativamente grandes, principalmente em máquinas cuja eventual repotenciação tenha se dado apenas por mudança de classe de isolamento.

A tensão de teto mínima tem especial significado na limitação das sobretensões aplicadas ao conjunto gerador/sistema de potência, dado que, muitas vezes, torna-se necessário uma rápida desexcitação dos geradores. Face aos requisitos de margem de ângulo de disparo dos tiristores, o valor da tensão de teto negativa corresponde normalmente a uma fração do valor da tensão de teto positiva, sendo comum encontrar a seguinte relação:  $E_{min} = -0,80 E_{max}$ .

Com relação às sobretensões, torna-se importante o exame de condições operativas associadas à rejeição de carga e energização de linhas. Situações podem ocorrer, inclusive, com riscos de superação da capacidade de absorção de energia de para-raios localizados no extremo remoto, aberto, de linhas de transmissão. Esses casos são ainda agravados, quando a abertura do terminal da linha vem associada a um curto-circuito fase-terra. No caso especial de rejeição de carga, cuidados também devem ser tomados na avaliação da possibilidade de ocorrência de autoexcitação do gerador, provocada pela sua operação alimentando linhas praticamente capacitivas, conectado a parte do sistema e submetido a sobrefrequência resultante da rejeição de carga. Situações potencialmente perigosas podem ocorrer em estágios intermediários de evolução da rede, podendo vir associadas ou não a falhas em equipamentos de proteção e manobra.

Nos estudos de sobretensão transitória e autoexcitação, são empregados programas computacionais de transitório eletromagnético (para exame das sobretensões durante um curto período imediatamente após a ocorrência do evento), e programas para exame do desempenho dinâmico do sistema (para análise do comportamento associado à operação do conjunto gerador/sistema de transmissão, sob condições de sobrefrequência). Nesse último caso, torna-se importante que se façam as devidas correções dos parâmetros dos equipamentos (gerador, transformador, reator, capacitor, linhas de transmissão) com relação à frequência a eles imposta. Na tabela 8.1 estão indicados os programas computacionais empregados com mais frequência pelas empresas brasileiras do setor de energia elétrica.

As sobretensões provocadas por rejeição de carga podem, algumas vezes, justificar o emprego de ponte de corrente negativa, para permitir a inversão da corrente de campo do gerador, e, com isso, eliminar ou atrasar o estabelecimento do processo de autoexcitação, dando tempo para atuação de outros esquemas de proteção. Quando houver necessidade de uso de ponte de corrente negativa, cuidado especial deve ser tomado em relação à confiabilidade do equipamento, principalmente no que se refere a evitar a operação simultânea da ponte de corrente positiva e negativa, a qual ocasiona um curto-circuito que provoca a ruptura dos fusíveis da ponte negativa, pois esta é de menor

porte. Além disso, a transferência do controle da ponte de corrente positiva para a ponte de corrente negativa, e vice-versa, deve ser efetuada suavemente.

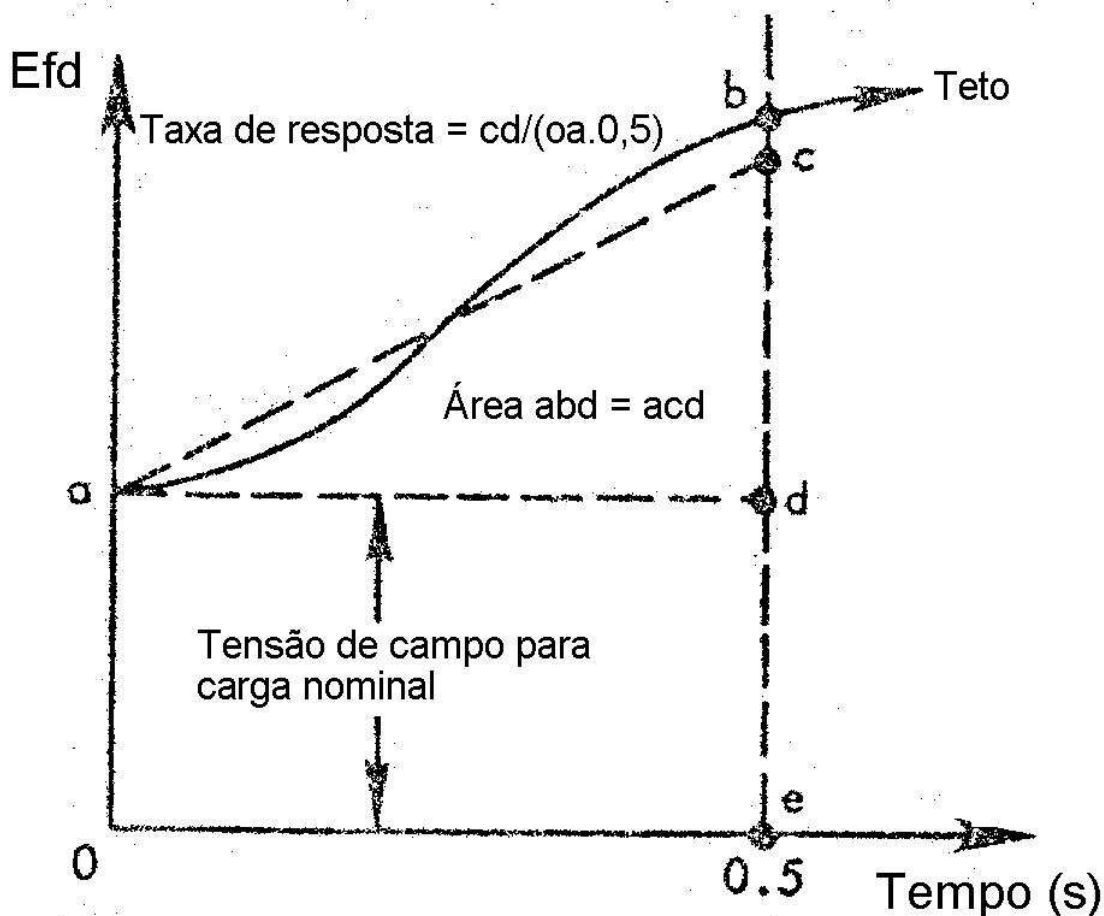
**Tabela 8.1 - Programas Computacionais para Análise de Sistemas Elétricos**

<b>Tipo de Estudo</b>	<b>Programa Utilizado</b>
Fluxo de Potência	PECO; FLOWINT; ANAREDE; PSS/E
Curto-circuito	DAGO; PECO; ANAFAS; PSS/E
Estabilidade	TRANSDIR; MICRODIN; PSS/E; ANATEM
Transitório eletromagnético	EMTP; ATP; PSCAD/EMTDC
Estabilidade no domínio da frequência	PacDyn; PSS/E; AUTOVAL

#### 8.2.2.2 Velocidade de Resposta do Sistema de Excitação

Para manutenção da estabilidade transitória do gerador, e para permitir um controle adequado das sobretensões, torna-se necessário dotar o sistema de excitação tanto de teto quanto de velocidade de resposta adequados.

Durante muito tempo, considerou-se como um bom índice para avaliação da rapidez de resposta do sistema de excitação, a taxa de resposta do sistema de excitação. Esse parâmetro mede a velocidade de crescimento da tensão de excitação, substituindo o comportamento real da tensão por uma variação linear, que apresente o mesmo valor médio, nos 0,50s após a aplicação de um distúrbio severo, que faça a excitatriz ir o mais rapidamente possível para o teto. A Figura 8.1 ilustra a definição da taxa de resposta do sistema de excitação.



**Figura 8.1 - Definição da Taxa de Resposta da Excitatriz**

Esse parâmetro, bastante útil na avaliação de desempenho das excitatrizes rotativas mais antigas, tem hoje pouco significado prático, visto que as modernas excitatrizes estáticas ou *brushless* permitem atingir o teto em um tempo muito curto. Em especial, as excitatrizes estáticas podem atingir o teto em questão de ciclos. Assim, por exemplo, um tempo de resposta menor ou igual a 0,1s é considerado satisfatório, desde que atenda as necessidades do sistema de potência. No caso das excitatrizes *brushless*, embora sejam mais lentas do que aquelas puramente estáticas, e, portanto, menos eficientes na eliminação de problemas relativos à estabilidade transitória, elas em geral são especificadas para turbogeradores, localizados próximos à carga, onde os referidos problemas são pouco expressivos. Assim, a escolha entre uma ou outra não está normalmente associada ao desempenho das mesmas, mas, sim, aos aspectos relacionados com custo e segurança da aplicação.

### 8.2.3 Desempenho Sob Pequenas Perturbações

O desempenho para pequenas perturbações corresponde à resposta do sistema de excitação frente a distúrbios de baixa amplitude, situação na qual o sistema se apresenta praticamente linear em torno daquele ponto de operação.

Relativamente ao desempenho do sistema de excitação sob o enfoque de pequenas perturbações, dois aspectos são considerados mais importantes:

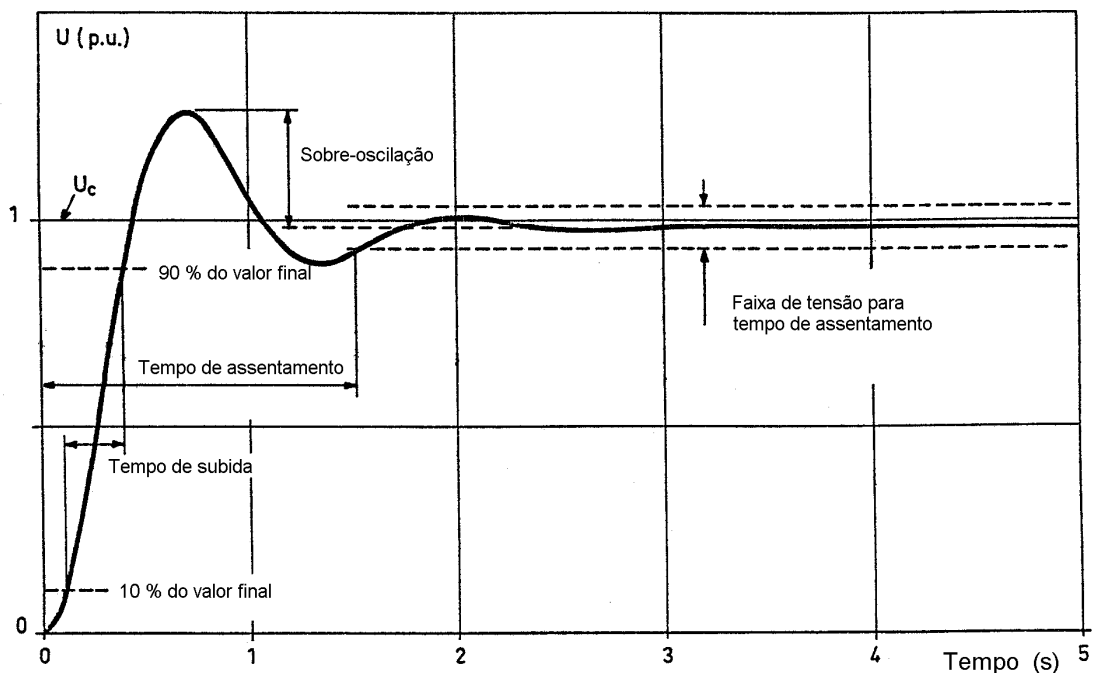
- Regulação da tensão terminal
- Estabilidade e bom amortecimento das oscilações quando operando acoplado a um sistema de transmissão

Para permitir uma boa regulação de tensão, torna-se aconselhável um ganho elevado para o regulador de tensão, de modo a reduzir o erro de regime permanente. Um erro da ordem de 0,5% na tensão terminal do gerador é considerado adequado para uma variação a partir da operação em vazio até a operação à plena carga e depois de transcorrido o transitório. Para isso, frequentemente se observam ganhos de regime permanente na faixa de 200 a 400 pu/pu.

Com relação à estabilidade e bom amortecimento das oscilações, o desempenho do sistema de excitação pode ser descrito em termos de sua resposta temporal, frente a um distúrbio tipo degrau na referência do regulador de tensão, pelos índices a seguir apresentados, e que são extraídos da teoria de controle:

- Sobreoscilação ou ultrapassagem máxima
- Tempo de acomodação ou assentamento
- Tempo de subida

A Figura 8.2 ilustra o significado de cada um desses índices, enquanto na Tabela 8.2 apresentam-se alguns valores usualmente encontrados.



$U_c$  - Valor do degrau aplicado à referência de tensão do regulador de tensão.

**Figura 8.2 - Definição dos Índices de Desempenho para Pequenas Perturbações**

**Tabela 8.2 – Definição dos Índices de Desempenho para Pequenas Perturbações**

Índice de Desempenho	Valores Usuais	Valores Recomendados
Sobreoscilação	0 a 80%	<10%
Tempo de subida	0,1 a 2,5s	<0,1s (estática) a 1s(rotativa)
Tempo de acomodação	0,2 a 10s	<0,15s (estática) a 1,5s (rotativa)



No que diz respeito à estabilidade, deve-se destacar, ainda, que a mesma deve ser mantida para todas as condições operativas da máquina, inclusive para a operação a vazio, bem como para todas as condições de conexão da máquina ao sistema. Entretanto, o fabricante do sistema de excitação não poderá ser responsabilizado pela correta operação das outras máquinas conectadas ao sistema. Ou seja, se por um lado o critério de desempenho deve estar baseado no conjunto sistema de excitação/máquina/sistema de transmissão, por outro lado, o fabricante só pode ser responsabilizado pelo desempenho do equipamento por ele fornecido, ou seja, sistema de excitação, ou mesmo do sistema de excitação/máquina, caso ele esteja fornecendo os dois equipamentos.

Outro aspecto importante a considerar, em especial quando a excitatriz é do tipo puramente estático, corresponde à conveniência de emprego de sinal estabilizador de potência, no sentido de permitir um amortecimento adequado das oscilações eletromecânicas. Nos sistemas de excitação atuais, a função de Estabilizador de Sistema de Potência está implementada em *software*, a custos mais acessíveis que no passado. Como é uma função de elevada relação benefício/custo, é aconselhável a sua compra, mesmo para máquinas de menor porte.

### 8.3 VALORES NOMINAIS

A Tabela 8.3 lista os parâmetros da máquina que precisam constar da especificação do sistema de excitação. Estes parâmetros devem ser fornecidos pelo comprador a partir dos seus estudos de sistema ou outras fontes, ou fornecidos pelo fabricante da máquina síncrona, tendo em vista a interface máquina/sistema de excitação.

Os valores nominais e demais parâmetros de um sistema de excitação são indicados na Tabela 8.4, sendo que alguns deles são definidos pelo comprador e os demais definidos pelo fabricante da máquina síncrona ou incluídos na especificação do sistema com base nos dados da máquina síncrona existente.

Os significados dos diversos parâmetros da Tabela 8.4 estão na Seção 5, em normas de máquinas síncronas ou são autoexplicativos.

**Tabela 8.3 - Conjunto de Valores Nominais da Máquina Síncrona e Alimentação Auxiliar**

Grandeza	Excitatriz Estática		Excitatriz Rotativa	
	Grande Porte ≥ 800 A	Pequeno Porte ≤ 400 A	CC	CA
Potência Nominal (MVA)	S	S	S	S
Potência Máxima (MVA)	S	S	O	S
Cos φ nominal	S	S	S	S
Tensão Terminal (kV)	S	S	S	S
Tensão de Campo em Vazio (V)	S	S	O	O
Tensão de Campo Nominal (V) <sup>3</sup>	S	S	S	S
Tensão de Campo Máxima (V)	S	O	S	S
Corrente de Campo em Vazio (A)	S	S	O	O
Corrente de Campo Nominal (A)	S	S	S	S

<sup>3</sup> Equivalente à tensão de excitação nominal.

Corrente de Campo Máxima (A)	S	O	O	S
Resistência de Campo a 25°C	S	S	S	S
Resistência de Campo a 100°C	O	O	O	O
Constante de Tempo da Máquina em Vazio T'do	S	S	S	S
Constante de Tempo da Máquina em Carga T'd	O	O	O	O
Frequência Nominal (Hz)	S	S	S	S
Elevação de Temperatura do Campo (°C)	S	S	S	S
Temperatura Ambiente (°C)	S	S	S	S
Rotação Nominal (RPM)	S	S	S	S
Sobrevelocidade (RPM)	O	O	O	O
Tensão de Serviço Auxiliar (Vca)	S	S	S	S
Nº de Fases	S	S	S	S
Tensão CC das Baterias (Vcc)	S	S	S	S
Tensão Secundária dos TP's da Máquina Síncrona (V)	S	S	S	S
Corrente Secundária dos. TC's da Máquina Síncrona (A)	S	S	O	O
Suportabilidade de Tensão do Circuito de Campo	O	O	O	O

**Nota:** S = Necessário

O = Opcional

**Tabela 8.4 - Conjunto de Valores Nominais da Excitatriz**

Grandeza	Excitatriz Estática		Excitatriz Rotativa	
	Grande Porte ≥ 800 A	Pequeno Porte ≤ 400 A	CC	CA
Tensão de Teto Positiva (pu)	S	S	S	S
Tensão de Teto Negativa (pu)	S	S	S	S
Tensão de Campo na Linha de Entreferro (V)	S	S	O	O
Tensão de Campo Máxima (V)	S	O	S	S
Corrente de Campo na Linha de Entreferro (A)	S	S	O	O
Corrente de Excitação Nominal (A)	S	S	S	S
Corrente de Excitação Máxima (A)	S	O	O	S
Corrente de Excitação Negativa (A)	O	O	O	O
Potência do Conversor (kW)	S	S	NA	NA
Potência do Transformador de Excitação (kVA)	S	S	NA	NA
Frequência (Hz)	S	S	S	S
Temperatura Ambiente (°C)	S	S	S	S
Altitude (m)	S	S	S	S

Frequência de Corte (rad/s)	O	O	O	O
Tempo de Resposta (ms)	S	S	S	S
Margem de Ganho (dB)	O	O	O	O
Margem de Fase (°)	O	O	O	O
Precisão da Regulação de Tensão (%)	S	S	S	S
Ganho em Regime Transitório (pu/ou)	S	S	S	S
Faixa de Ajuste do Regulador (%)	S	S	S	S
Rotação (RPM)	O	O	S	S
Tensão Nominal Excitatriz Piloto (V)	NA	NA	S/O	O
Corrente Nominal Excitatriz Piloto (A)	NA	NA	S/O	O
Sobreoscilação (1)	O	O	O	O
Tempo de Acomodação (s) (1)	O	O	O	O
Tempo de Subida (s) (1)	O	O	O	O
Frequência do PMG ou da Excitatriz Piloto	N	N	S	S

**Nota:** S = Necessário  
O = Opcional  
N = Não necessário  
NA = Não aplicável  
(1) Ver Figura 7.2

### 8.3.1 Sistema de Excitação com Compoundagem

No caso de especificação de sistemas de excitação com compoundagem, deverão ser especificados os seguintes valores:

- Tabela 8.3 – reatância síncrona  $X_d$  (pu); reatância subtransitória  $X'_d$  (pu); relação da corrente de curto-circuito desejada  $K_1$ ; corrente de excitação na condição de curto-circuito (A) e tempo de manutenção do curto-circuito (s);
- Tabela 8.4 – potência do transformador de compoundagem (kVA) e potência do conversor não controlado de compoundagem (kW).

## 8.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ITENS DA TABELA 8.4

### 8.4.1 Tensão de Campo na Linha de Entreferro

A tensão de campo na linha de entreferro, para as excitatrizes estáticas, é necessária para a definição da tensão de teto, haja vista esta ser referenciada pelo ONS como um múltiplo daquela. A tensão de campo nominal é igualmente necessária, pois necessita-se de tal valor para atender o requisito de curto-circuito na alta definido pelo ONS.

### 8.4.2 Tensão de Excitação Máxima

Não é significativa em termos de custo para uma excitatriz estática de porte pequeno ou médio. Usualmente, é utilizado o valor de tensão de excitação nominal.

### 8.4.3 Frequência de Corte e Margens de Ganho e de Fase

A frequência de corte e as margens de ganho e de fase são uma maneira opcional de especificar o desempenho do sistema de excitação quando se dispõe de estudos detalhados. Esses parâmetros fornecem os requisitos de desempenho do sistema de excitação no que diz respeito à sua estabilidade e rapidez de resposta na faixa linear de atuação do sistema de excitação. Para sistemas de potência em que a estabilidade transitória não é um requisito fundamental, esta modalidade de especificação poderá ser usada. Para sistemas isolados são parâmetros importantes, pois a regulação de tensão depende significativamente do controle da máquina.

### 8.4.4 Corrente de Excitação Negativa

É necessária em casos de linhas muito longas e outras características definidas na seção de estudos. Em condições normais, não é necessária. Representa um grande impacto no custo do sistema de excitação. Em turbogeradores (polos lisos), não é aplicável devido à baixa saliência síncrona.

### 8.4.5 Sobreoscilação, Tempo de Subida e Tempo de Acomodação

Deve ser utilizada quando o sistema de potência apresenta problemas de estabilidade para pequenas perturbações e em sistemas isolados, ou em máquinas com capacidade de *black-start*. Via de regra, deve ser um índice de desempenho compatível com as boas práticas do controle clássico.

## 8.5 OBTENÇÃO DOS VALORES

Os valores e requisitos funcionais a serem especificados pelo comprador são aqueles que resultam da interação da máquina e seu sistema de excitação com o sistema elétrico, conforme definido no Item 8.2 e na Seção 12. Estes parâmetros são obtidos por meio dos estudos especificados na Seção 12. Caso não seja possível desenvolver os estudos necessários, e não havendo requisitos importantes com relação às interações citadas ou da carga a ser alimentada, poderá se adotar o que se prescreve no item 7.2.

No caso de compra em separado do sistema de excitação, o comprador deverá fornecer também os dados da máquina síncrona (Tabela 8.3) ao qual o sistema de excitação será acoplado.

No caso da compra de um sistema de excitação a ser acoplado a um gerador existente (recapacitação), poderá ser necessária a execução de testes para a obtenção dos dados do gerador necessários ao projeto do sistema de excitação. Neste caso, sugere-se proceder como se segue:

- a) Medições realizadas com a máquina operando em vazio, com carga, parada e, se necessário, com um curto do lado do secundário do transformador elevador;
- b) No ensaio em carga, o ideal, para máquina grande, é que seja executado com carga ativa, reativa indutiva, reativa capacitiva e para vários fatores de potência, no intuito de definir a curva de capacidade (caso não exista), para que a excitatriz limite a faixa operativa, evitando que o gerador ultrapasse os limites de estabilidade;
- c) Esta curva também pode ser calculada a partir das reatâncias e constantes de tempo da máquina síncrona;
- d) Para a identificação completa dos parâmetros do gerador, além dos ensaios de saturação a vazio e em carga, sugere-se a realização de ensaios de rejeição de carga.

Tais ensaios são de baixo risco, pouca complexidade, não necessitam de equipamentos especiais e permitem a identificação do eixo direto e em quadratura.

## **8.6 IMPLICAÇÕES DOS VALORES NOMINAIS NO PROJETO**

Requisitos especiais somente devem ser solicitados quando realmente são necessários, conforme demonstrado por estudos, e o cotejo técnico-econômico com outras soluções alternativas.

A solicitação de testes de grande severidade e em grande quantidade pode onerar desnecessariamente o produto.

Deve-se ter cuidado de que, ao colocar determinados requisitos, a especificação não se torne dirigida a determinado fornecedor.

Ao se exigir tempos de respostas muito baixos e, portanto, frequências de corte muito altas, o custo do sistema de excitação poderá ser grandemente aumentado, principalmente o do transformador de excitação, devido ao aumento da tensão de teto. Quando não houver exigência específica do sistema de potência, pode ser utilizado o tempo especificado por norma, que é de 100 ms.

As margens de ganho e fase, que definem o grau de estabilidade do regulador de tensão, definidas fora da faixa recomendada pelos modernos conceitos de controle, poderão acarretar num reprojeito dos módulos de controle e, portanto, baixa confiabilidade por ser um equipamento novo desenvolvido para uma só aplicação. É recomendado que a margem de ganho em malha aberta seja superior a 6 dB e a margem de fase superior a 60 graus.

O valor especificado da corrente máxima de excitação contínua, da tensão de teto e do seu tempo de permanência (além de 10s) são parâmetros fundamentais para o dimensionamento do conversor e do transformador de excitação de um sistema de excitação estático. O valor da tensão de teto, bem como seu tempo de permanência, também determina o dimensionamento do conversor de potência. A especificação destes valores nominais deve ser, portanto, objeto de cuidados específicos, pois o sobredimensionamento dos mesmos ou especificação além dos mínimos necessários acarretará custos elevados, associados ao uso de equipamentos fora da linha normal de fabricação, aumento de dimensões etc.

## 9. CONTROLE, PROTEÇÃO E MEDIÇÃO

### 9.1 INTRODUÇÃO

Para o funcionamento adequado dos sistemas de excitação, torna-se necessário dotar o mesmo de diversas funções de proteção e controle. Essas funções devem ser ajustadas e coordenadas com outras medidas de controle e proteção já existentes no sistema de potência, de modo a permitir uma operação segura dos equipamentos dentro de uma ampla gama de condições operativas. É importante ressaltar que, com o advento dos reguladores microprocessados dotados de elevada flexibilidade, abre-se um espaço ainda maior no que diz respeito às possibilidades de emprego de novas filosofias de controle e proteção. A seguir, estão apresentadas as funções de controle e proteção e as medições usuais nos sistemas de excitação. Os equipamentos para as funções indicadas mais relevantes são descritos na Seção 7.

### 9.2 CONTROLE

#### 9.2.1 Regulação Automática de Tensão

O principal objetivo da regulação automática de tensão é controlar a tensão nos terminais da máquina considerando um valor de referência. Assim, tem-se automaticamente o ajuste da tensão para as variações de carga, usualmente implementado por uma malha de regulação PI ou PID. O ajuste de tensão é influenciado pela corrente reativa, gerando uma característica de *droop* de reativos, que pode ser com pendente positiva (paralelo das máquinas na alta tensão) ou negativa (paralelo na baixa tensão).

#### 9.2.2 Regulação Manual de Tensão

O controle manual de tensão é efetuado em malha aberta em relação à tensão terminal do gerador. Internamente, a malha poderá ter realimentação de corrente ou tensão de campo. Dessa maneira, mantém-se a corrente ou tensão de campo constante. Entretanto, com as variações de carga, ocorrem desvios de tensão no estator, sendo necessário que o operador ajuste manualmente a tensão para corrigir os desvios em relação ao valor requerido. A malha de regulação pode ser P ou PI.

#### 9.2.3 Seguidores (*Follow-up*)

Para o caso de dois ou mais modos de controle são necessárias funcionalidades denominadas seguidores, para permitir que a transferência de controle, com a máquina em funcionamento, seja feita de maneira suave. Os seguidores são utilizados quando há transferência do regulador automático para o manual ou vice-versa, bem como do regulador de tensão para o regulador de potência reativa (ou de  $\cos \varphi$ ) e vice-versa. Quando da existência de vários controles automáticos, usam-se os seguidores também para a transferência entre canais.

#### 9.2.4 Controle conjunto de corrente reativa e de tensão

O controle conjunto de corrente reativa e de tensão deverá atuar nos reguladores de tensão de cada unidade, de modo a fazer com que haja uma divisão proporcional dos reativos gerados por cada máquina participante deste modo de controle. Além disso, permite o controle da tensão da barra de alta, astático ou

com *droop*. Para o gerador operar em controle conjunto, é necessário que o seu regulador de tensão esteja em modo automático. No caso de falha ou de manutenção no controle conjunto, os geradores irão operar no modo individual.

### 9.2.5 Estatismo (*Droop*) ou Compensação de Corrente Reativa

No caso de geradores que operam em paralelo, ligados ao sistema sem transformador elevador, ou no caso com transformador elevador com máquinas operando em paralelo do lado de baixa, há a necessidade de haver estatismo para uma equalização da corrente reativa e um paralelo estável. O estatismo pode ser invertido, no caso do paralelo em alta, visando a compensar uma fração da queda no transformador elevador.

### 9.2.6 Regulação de Fator de Potência ou de Potência Reativa

Uma função alternativa do RAT é regular a potência reativa ou o fator de potência ( $\cos \phi$ ) com que a máquina está operando e, conseqüentemente, nesta opção de controle, a tensão nos terminais não será mais regulada e assumirá valores impostos pelas condições de operação da rede.

Esta opção é muito utilizada em geradores que operam em indústria e tenha capacidade de potência reativa para controlar o fator de potência da entrada da concessionária na qual há requisitos de contrato de demanda. Com esta função, é possível manter constante a potência reativa, independente da carga. Esta função é opcional.

Para máquinas conectadas à rede básica, o ONS preconiza que o único modo aceitável de controle é o de tensão com *droop* ou compensação de corrente reativa.

### 9.2.7 Sinal Estabilizador de Potência (PSS)

O objetivo do PSS é produzir um torque amortecedor no eixo da máquina síncrona através do sistema de excitação.

O sinal estabilizador é um dispositivo de primordial importância para produzir amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema, tanto oscilações interáreas (0,2 a 0,8 Hz) como locais (0,8 a 1,2 Hz) e intraplantas (1,2 a 3,0 Hz), especialmente quando o mesmo é dotado de excitatriz estática. Em regime transitório, o PSS produz um sinal com a mesma frequência da oscilação do transitório que gera, por meio do sistema de excitação, um torque amortecedor de mesma frequência. Ao longo dos anos, diversas variáveis do sistema já foram empregadas como entrada para o sinal estabilizador, de modo a produzir o melhor efeito estabilizante em uma ampla faixa de condições operativas. Recentemente, o emprego de estabilização suplementar derivada da integral da potência acelerante tem produzido resultados mais satisfatórios para uma ampla faixa de frequências de oscilação. A atuação do sinal estabilizador não deverá provocar variação na tensão terminal do gerador durante operação em regime permanente e durante variação manual da potência ativa da máquina. Além disso, o equipamento deverá possuir os seguintes recursos:

- Possibilidade de desativação manual do sinal a partir do cubículo do regulador de tensão ou remotamente;
- Possibilidade de desativação automática do sinal quando ocorrer uma rejeição de carga;

- Possibilidade de utilização do sinal quando o gerador estiver operando como compensador síncrono;
- Possibilidade de desativação automática do sinal quando a tensão do gerador for superior a um valor ajustável na faixa de 100 a 130% e, inferior a um valor ajustável na faixa de 70 a 100%. Esta desativação deverá ser temporizada. Deverá ser previsto meios para permitir a modificação do valor de tempo ajustado;
- Possibilidade de desativação automática do sinal quando a potência do gerador for inferior a um valor ajustável;
- Possibilidade de limites ajustáveis e independentes para saída do sinal estabilizador;
- A reativação do sinal deverá ser realizada automaticamente quando a condição de desligamento deixar de existir, estando o sinal de saída baixo o suficiente para não provocar oscilações na tensão terminal do gerador;
- Além dessas estratégias de ação não linear, o uso de *reset* variável, com o objetivo de desaturar o estabilizador durante transientes severos, é uma funcionalidade desejável.

#### 9.2.8 Malha de Controle do Limitador de Subexcitação

Esta função garante que, durante a operação, não se ultrapasse a região de estabilidade do gerador, ocasionando a perda de sincronismo. A linha de intervenção deste limitador deverá ser ajustável de tal forma a manter uma distância segura da curva limite de sobreaquecimento do estator e da curva limite de estabilidade. A atuação do limitador deverá evitar a atuação do relé de perda de excitação (função 40).

Sua ação deve ser rápida e provocar um aumento da corrente de excitação até se atingir a linha do limite de estabilidade.

#### 9.2.9 Malha de Controle do Limitador de Corrente de Excitação

Esta função deverá limitar automaticamente a corrente de campo a um valor correspondente à capacidade térmica do sistema de excitação e do enrolamento de campo. Sua atuação deverá ser sempre temporizada, principalmente quando houver sobrecargas transitórias devido às condições de corrente de teto.

Praticamente todo sistema de excitação deve possuir este limitador para garantir que o sistema de excitação não forneça uma corrente de excitação superior à máxima corrente térmica do rotor da máquina síncrona. Com este limitador, garante-se o funcionamento da máquina em condições de sobrecarga reativa.

O limitador deve atuar com temporização para permitir que o próprio gerador supra temporariamente as necessidades da rede. Isso é importante para evitar que o comportamento do RAT, durante variações bruscas de carga, seja influenciado erroneamente e que a estabilidade transitória da máquina síncrona em perturbações temporárias da rede também não seja influenciada desvantajosamente.

O limitador deve operar quando:

- Devido às necessidades de rede (transitória ou permanente), a sobrecorrente de excitação permanece por tempo superior ao tempo de atraso admissível;



- Devido à corrente de teto ter atingido o máximo, e a tensão da rede ainda não ter atingido o valor desejado por tempo superior ao tempo de atraso admissível.

#### 9.2.10 Malha de Controle do Limitador de Corrente do Estator

A atuação do limitador deverá ser sempre temporizada. Este limitador é necessário para geradores que tenham potência inferior ao da turbina, e pode também ser usado como proteção de retaguarda para a proteção de sobrecorrente do estator.

O limitador deve operar quando, devido às necessidades da rede (transitória ou permanente), a sobrecorrente do estator permanece por tempo superior ao tempo de atraso admissível, e sua atuação deve se efetivar antes da atuação dos relés de proteção de sobrecorrente do estator.

#### 9.2.11 Malha de Controle do Limitador Volt/Hertz

Este limitador atua quando o valor da relação entre a tensão terminal da máquina síncrona e uma variação simultânea de frequência estiver acima de um valor especificado.

### 9.3 PROTEÇÃO

#### 9.3.1 Sobrecorrente CA

Usualmente, pode-se considerar a proteção CA instalada no ramal alimentador do primário do transformador de excitação, devendo ter característica instantânea e temporizada.

Em transformadores de pequeno porte ( $< 100$  kVA), é possível a utilização de fusíveis no primário do transformador de excitação, devido à melhor relação custo-benefício.

#### 9.3.2 Sobretensão CC (*Crowbar*)

É instalada diretamente no lado CC da ponte retificadora para proteger contra as sobretensões nos tiristores e também no enrolamento do rotor da máquina síncrona.

Esta proteção, denominada *crowbar*, é normalmente composta por uma resistência de descarga do campo e por uma chave estática bidirecional formada por dois tiristores em configuração antiparalela disparados por um módulo detector de sobretensão, pois, conforme a polaridade da sobretensão, é disparado um ou outro tiristor, descarregando toda energia do campo na resistência de descarga.

#### 9.3.3 Falha a Terra do Rotor

Tem, por finalidade, a proteção do campo contra falhas para a terra.

#### 9.3.4 Proteção de Tiristores

Tem por finalidade a proteção dos tiristores contra sobrecorrentes e sobretensões.

### 9.3.5 Sistema de Desexcitação

Tem, por finalidade, descarregar a energia armazenada no campo para evitar sobretensões.

## 9.4 TABELA DE ESCOLHA

As proteções elétricas, controles principais e as medições para diversos sistemas de excitação podem ser escolhidos conforme o tipo do sistema de excitação e regulação de tensão, de acordo com a Tabela 9.1

*Tabela 9.1 – Proteções e Medições*

Função	Excitatriz Rotativa		Excitatriz Estática	
	CA Brushless	CC Excitatriz Auxiliar	Pequeno Porte < 400 A	Médio/Grande porte ≥ 400 A
Proteção de sobretensão CC no campo – <i>Crowbar</i> <sup>(1)</sup>	S	S	S	S
Proteção de sobretensão CC no campo – Resistor não linear (para-raio) <sup>(1)</sup>	N	N	N-O	NA
Falha a terra do circuito de campo	N	S-O	S-O	S
Fusíveis e proteção das pontes retificadoras	S	S	S	S
Proteção de sobrecorrente no primário do transformador de excitação	S	S	S-O	S
Proteção de sobrecorrente no secundário do transformador de excitação	NA	NA	O	O
Proteção de temperatura dos enrolamentos do transformador de excitação	NA	NA	S	S
Proteção associada ao ar de refrigeração do retificador	N	N	S-O	S-O
Medição da temperatura do rotor	N	S-O	S-O	S
Medição da tensão do campo	N	S	S	S
Medição da corrente do campo	N	S	S	S
Medição da corrente do lado CA do retificador	N	NA	N-O	S
Medição de temperatura dos enrolamentos do transformador de excitação	NA	NA	S	S

**Nota:** S – Aplicável

N – Não necessário

NA – Não aplicável

O – Aplicação opcional

(1) – Campo auxiliar para excitatriz rotativa

## 10. TESTES

### 10.1 INTRODUÇÃO

O sistema de excitação e seus componentes deverão ser testados na fábrica e no campo de acordo com as prescrições constantes das especificações preparadas pelo cliente para demonstrar que o mesmo satisfaz às suas especificações.

Sugere-se que todos os ensaios de fábrica sejam acompanhados pelo comprador e/ou um seu preposto, devendo as especificações indicar claramente essa condição.

Os ensaios no campo (comissionamento) são considerados de rotina, mas alguns deles poderão não ser repetidos no caso de comissionamento de vários sistemas de excitação semelhantes. Os ensaios de comissionamento devem ser de responsabilidade do fabricante, devendo contar com a supervisão e/ou a participação do comprador.

O fabricante deverá fornecer ao comprador, com razoável antecedência ao início dos testes de fábrica e de campo, os dois programas de testes a serem realizados, assim como relatórios de ensaios, certificados etc. após a execução dos programas de ensaios.

O usuário do Guia poderá especificar as normas nele indicadas para os diversos ensaios outras similares.

Esses ensaios, em sua maioria, estão prescritos em normas, mas não são mandatórios, podendo o comprador modificá-los e/ou acrescentar ensaios não normalizados. Alerta-se, entretanto, que o exercício dessa opção poderá acarretar acréscimos de custos e nos prazos de entrega do sistema, resultantes dos custos adicionais dos ensaios e/ou das modificações dos componentes. Sugere-se que a especificação solicite aos proponentes informar as implicações de custo dos ensaios não normalizados especificados, para decisão final de sua adoção ou não, durante a análise das propostas.

Os ensaios na fábrica do sistema e seus componentes compreendem três categorias: ensaios de tipo, os ensaios de rotina e ensaios especiais.

#### 10.1.1 Ensaios de Tipos

Os ensaios de tipo são realizados, em geral, em protótipos para demonstrar a adequidade dos mesmos aos critérios de projetos. Os resultados dos ensaios de tipo são objetos de um certificado emitido pelo fabricante ou por laboratório independente, que, após análise e julgamento considerado satisfatório, poderá justificar a dispensa da execução do ensaio. Caso contrário, as especificações deverão exigir a execução destes testes.

#### 10.1.2 Ensaios de Rotina

Os ensaios de rotina na fábrica, em sua maioria são feitos em todas as unidades sendo fabricadas, em amostras estatisticamente representativas de componentes e subcomponentes para verificar, durante a produção, que o produto satisfaz as especificações e as normas aplicáveis.

#### 10.1.3 Ensaios Especiais

Os ensaios especiais são feitos em uma unidade do fornecimento e destinam-se a determinar características importantes e o desempenho do sistema de excitação e/ou seus componentes, que não são cobertos pelos testes de tipo ou de rotina.

É importante que, na especificação técnica, os ensaios especiais sejam claramente definidos junto ao fornecedor. O comprador deverá indicar os ensaios, as normas e/ou procedimentos que devem ser atendidos, bem como os resultados esperados.

## 10.2 ENSAIOS NA FÁBRICA

### 10.2.1 Ensaio de Tipo

#### 10.2.1.1 Reguladores Microprocessados

Deverão ser especificados os seguintes testes:

- a) Ensaio de Transitórios Rápidos, de acordo com a Norma IEC 61000-4-4, critério de aceitação nível B (2kV para fontes de alimentação e 1 kV para sinais de entrada/saída).
- b) Ensaio de Surto, de acordo com a Norma IEC 61000-4-5, critério de aceitação B. (Linha para terra  $\pm 1$  kV em IOs e  $\pm 2$  kV na alimentação. Linha para linha  $\pm 2$  kV na alimentação).
- c) Ensaio de Descarga Eletrostática de acordo com a Norma IEC 61000-4-2, 4kV por contato direto e 8kV por contato indireto. Critério de aceitação nível A.
- d) Ensaio de Imunidade a Radiofrequência Contínua de acordo com a Norma IEC 61000-4-3, com intensidade de campo igual a 10 V/m. Critério de aceitação nível A.
- e) Ensaio de Imunidade a campos magnéticos de acordo com a Norma IEC 61000-4-8, com intensidade de 30A/m 60Hz com critério de aceitação nível A.
- f) Ensaio de interrupção de tensão de acordo com a Norma IEC 61000-4-11. (0% de tensão residual por um ciclo com critério de aceitação nível B. 40% de tensão residual por 10/12 ciclos com critério de aceitação nível C. 70% de tensão residual por 25/30 ciclos com critério de aceitação nível C. Considerando ciclos na frequência de 50/60Hz).

#### 10.2.1.2 Cubículo do Sistema de Excitação

Os seguintes testes deverão ser aplicados a esses equipamentos:

- a) Elevação de Temperatura: deve ser feito na fábrica caso a capacidade dos equipamentos de teste o permita.
- b) Ruído: Poderá ser especificado, devendo, porém, ser considerado um teste dispendioso e de difícil execução. Uma alternativa viável é exigir que os dispositivos mais ruidosos, como ventiladores, tenham um nível máximo de ruído.
- c) Tempo de Resposta

#### 10.2.1.3 Transformador de Excitação

Os ensaios de tipo do transformador de excitação deverão ser realizados atendendo às prescrições constantes nas normas ABNT, NBR-10295 e NBR-5380, complementadas pelas prescrições constantes na publicação IEC 146, capítulo III.

O comprador deve especificar, na ordem de compra, os ensaios desejados e o número de unidades sobre as quais os mesmos devem ser executados.

Em uma especificação, é importante a definição clara dos ensaios de tipo desejados, pois os mesmos impactam diretamente nos custos dos transformadores.

Os seguintes ensaios de tipo são normatizados.

- a) Fator de potência do isolamento.
- b) Ensaio de elevação de temperatura.
- c) Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (NBI).
- d) Nível de ruído.
- e) Nível de tensão de radiointerferência.

#### 10.2.1.4 Conversores a Tiristores

Os dispositivos devem ser ensaiados e testados de acordo com a norma IEC 146-1-1.

- a) Corrente nominal.
- b) Elevação de temperatura para corrente nominal ou ciclo de serviço contratado.

#### 10.2.1.5 Contatores de campo sobre barras

Quando o contator de campo for um modelo padrão de linha, pode-se solicitar os resultados dos ensaios de tipo junto ao fornecedor, baseados na ANSI C37.18.

- a. Elevação de temperatura dos contatos sobre corrente nominal

#### 10.2.1.6 Dispositivos e Subconjuntos

Dispositivos e subconjuntos tais como transdutores, amplificadores, dispositivos amortecedores, limitadores, estabilizadores, deverão ser sujeitos a testes funcionais para verificar suas características.

### 10.2.2 Ensaios de Rotina

#### 10.2.2.1 Equipamentos de Controle de Excitação

- a) Exame visual para verificação da conformidade com os requisitos das especificações, identificação dos componentes, verificação de bornes, terminais e correta fixação de todos os dispositivos.
- b) Ensaios dielétricos, conforme NBR IEC 60439-1.
- c) Verificação da correta operação elétrica e mecânica de todas as chaves de controle; dos relés de controle, proteção e transferência; contatores e disjuntores.
- d) Verificação da continuidade da fiação elétrica de acordo com projeto funcional.

- e) Operação do(s) amplificador(es) do regulador, na tensão nominal de suprimento com o máximo possível de corrente em carga resistiva indutiva, para verificar as características de transferência estática entrada-saída, a tensão teto (*ceilling*), a estabilidade do controle e a divisão de tensão e corrente.
- f) Teste funcional dos módulos por injeção de tensão e corrente.
- g) Verificação da operação normal e transitória usando cargas e alimentações simuladas.
- h) Verificação dos circuitos de alimentação.
- i) Verificação do funcionamento correto de todos os circuitos e dispositivos de controle, supervisão e proteção.

#### 10.2.2.2 Transformador de Excitação

Os ensaios de rotina do transformador de excitação deverão ser realizados atendendo às prescrições constantes nas normas ABNT, NBR-10295 e NBR-5380.

Os ensaios de rotina devem ser efetuados em todas as unidades contratadas, devendo o fabricante emitir os resultados dos ensaios ao comprador, como parte da documentação mínima do transformador.

Os ensaios de rotina são:

- a) Resistência elétrica dos enrolamentos.
- b) Relação de tensões.
- c) Resistência de isolamento.
- d) Polaridade.
- e) Deslocamento angular e sequência de fases.
- f) Perdas a vazio e em carga.
- g) Corrente de Excitação.
- h) Impedância de curto-circuito.
- i) Ensaio dielétricos.
  - tensão suportável nominal a frequência industrial
  - tensão induzida
- j) Verificação de funcionamento de todos acessórios (onde aplicável).
  - comutadores de tensão
  - sistema de proteção térmica
  - sistema de proteção de sobrecorrente
  - ventiladores
  - manômetros
  - outros

#### 10.2.2.3 Conversores

Os conversores deverão ser testados de acordo com os testes de rotina prescritos na IEC 146-1-1.

- a) Ensaios dielétricos.
- b) Teste funcional com carga reduzida.
- c) Verificação dos dispositivos auxiliares associados ao conversor, como ventiladores etc.
- d) Verificação dos dispositivos de proteção.

#### 10.2.2.4 Reatores

Os ensaios de rotina deverão ser feitos de acordo com as normas IEEE C57.12.00 e incluirão, pelo menos, os seguintes testes:

- a) Resistência do enrolamento.
- b) Impedância, incluindo derivações se houver, e perdas.
- c) Linearidade até pelo menos 110% da tensão nominal ou até o valor especificado.
- d) Teste de tensão aplicada e induzida.

#### 10.2.2.5 Equipamento de Pré-Excitação (*Field Flashing*) e *Crowbar*

- a) Inspeção visual.
- b) Teste funcional, com verificação dos níveis de tensão e corrente aplicados ao campo.
- c) Testes dielétricos a frequência fundamental, por um minuto, de todos os circuitos ligados ao campo do gerador, com a mesma tensão de teste especificada para as bobinas do campo do gerador principal.

#### 10.2.2.6 Contator de campo sobre barras.

Os ensaios de rotina para o contator de campo sobre barras deve ser efetuado segundo a ANSI C37.18, sendo suficientes os ensaios abaixo:

- a) Ensaios dielétricos.  
Adicionalmente, devem ser verificados.
- b) Comando de fechamento e abertura do contator.
- c) Oscilografia, visando a comprovar a discordância entre os contatos NA e NF.

#### 10.2.2.7 Fiação dos Painéis

- a) Os ensaios dielétricos serão efetuados acordo com os valores indicados na NBR IEC 60439-1.
- b) Ensaio de Energização:
  - Todos os circuitos CA e CC deverão ser energizados com suas respectivas tensões nominais, com todos os equipamentos conectados para comprovar a integridade de todos os equipamentos. Todos os circuitos devem ser energizados e testados simultaneamente;

- Os circuitos secundários de transformadores de corrente e de potencial, com todos os instrumentos, relés e dispositivos conectados, deverão ser energizados com suas grandezas nominais para comprovar a integridade dos equipamentos a estes níveis de corrente e tensão.
- c) Ensaio de Continuidade – Verificação completa da fiação interna dos painéis, ponto a ponto, deverá ser efetuada para garantir que os diagramas de fiação representem com fidelidade a mesma.

#### 10.2.2.8 Cubículos

Os cubículos deverão ser totalmente montados e testados conforme a norma NBR IEC 60439-1. Conjunto de manobra e controle de baixa tensão.

#### 10.2.2.9 Ensaio Funcional

O sistema de excitação todo montado deverá ser testado para provar que o mesmo é capaz de executar suas funções de acordo com os requisitos definidos nas especificações e nos desenhos de projeto. No mínimo, os seguintes ensaios deverão ser executados:

- a) Ensaio das lógicas de comando conforme os modos de operação Local, Remoto, Automático e Manual.
- b) Ensaio das Lógicas de sinalização conforme projeto, simulando a atuação das proteções correspondentes e verificando as sinalizações e/ou sinais nos bornes terminais.
- c) Ensaio do equilíbrio de corrente em cada ponte.
- d) Ensaio para determinação das características de controle do ângulo de disparo (controle de fase).
- e) Chaveamento das fontes auxiliares do painel do regulador de tensão e geração dos pulsos de disparo.
- f) Ensaio para verificação das características da função de transferência do sistema de excitação.

Esses testes serão realizados com baixa corrente nas pontes, estando as mesmas e o regulador de tensão montados conforme o projeto. O enrolamento de campo será substituído por uma carga resistiva.

### 10.2.3 Ensaios Especiais

#### 10.2.3.1 Operação em Condições Especiais

Com o sistema de excitação completamente montado, deverão ser efetuados os seguintes testes no sistema:

- a) Resposta do sistema de excitação com todos os *feedbacks* normais no sistema. Para tanto, o sistema de excitação deverá estar integrado a um sistema de simulação emulando a máquina síncrona nas diversas condições operativas (em processo de excitação, a vazio, em carga e rejeições). O desempenho dinâmico deverá ser analisado pela resposta ao degrau na referência.



- b) Verificação do comportamento do conversor estático com a tensão de excitação reduzida a 35% da tensão nominal.

#### 10.2.3.2 Regulador de Tensão Digital

Em adição aos testes anteriormente especificados, o regulador digital deverá ser submetido a um conjunto de testes compreendendo: teste de equipamento (*hardware*) e teste dos programas (*software*), para demonstrar que o mesmo satisfaz aos requisitos especificados.

A demonstração de que os resultados satisfazem às especificações deverão incluir: observação da resposta esperada do sistema, produção de *printed-out* e, quando necessária, pausa no procedimento para verificar se o sistema satisfaz a um objetivo específico esperado.

Todos os procedimentos dos *displays* do operador, os pontos de saída e contato, deverão ser mostrados implementados. A confiabilidade do sistema será demonstrada, criando-se e exercitando-se condições de erro.

A eficiência do sistema deverá ser demonstrada por teste da interface “operador-máquina”.

##### a) Teste de Equipamento (*Hardware*)

Estes testes deverão ser feitos antes dos testes funcionais (*software*) em todos os equipamentos e incluirão pelo menos os seguintes itens:

- Inspeção visual para verificação de dimensões, acabamento, pintura etc.;
- Testes dielétricos;
- Teste na fonte auxiliar com aplicação da variação de tensão dentro dos limites especificados, para demonstrar que o equipamento opera corretamente nas condições especificadas;
- Ensaio de energização e desenergização.

##### b) Testes Funcionais (*Software*)

Em seguida aos testes de equipamento, pelo menos os seguintes testes deverão ser feitos:

- Verificar se todo o sistema está operando e tem o desempenho especificado;
- Demonstrar o funcionamento de todas as facilidades de pesquisa de defeitos (*trouble shooting*).

#### 10.2.3.3 Equipamento de Controle

Os seguintes ensaios deverão ser especificados em adição aos já recomendados anteriormente:

- a) Características da função de transferência entrada-saída de cada elemento do controle de excitação, na faixa especificada da tensão de suprimento, frequência e temperatura. Deverá ser verificado quais ganho, linearidade, saídas e estabilidade estão dentro das tolerâncias especificadas;

- b) Verificação das constantes de tempo de todos os elementos usando as técnicas de resposta em frequência, conforme o IEEE Std 421.2.1990;
- c) Teste de aquecimento (*heat-run*) para verificar a temperatura e o fluxo do ar de refrigeração;
- d) Verificação das características estáticas de transferência entrada-saída de cada elemento do controle de excitação;
- e) Verificação dos limitadores com operações simuladas;
- f) Verificação da transferência de controle automático para manual e do seguidor (*follow-up*) do dispositivo de *setting* manual;
- g) Verificação dos dispositivos para localização de defeitos e de testes.

#### 10.2.3.4 Conversores

A norma IEC 146-1-1 prevê os possíveis ensaios especiais:

- a) Medição do fator de potência;
- b) Regulação;
- c) Medição do ripple de tensão e corrente;
- d) Capacidade de sobrecarga, conforme ciclo de serviço contratado;
- e) Testes de imunidade;
- f) Ruído.

Adicionalmente, podem ser solicitados ao fabricante, os ensaios especiais abaixo relacionados:

- a) Verificação do balanceamento de corrente, para conversores em paralelo;
- b) Funcionamento por 48 horas com corrente nominal e tensão reduzida;
- c) Verificação da operação da supervisão de condução dos tiristores e/ou outras proteções existentes.

#### 10.2.3.5 Tiristores

Verificação do valor nominal da tensão de pico inverso dos tiristores pela aplicação de uma tensão de teste de pelo menos 2,5 vezes a máxima tensão (rms) de alimentação do conversor.

#### 10.2.3.6 Transformador de Excitação

Os ensaios especiais para transformador de excitação deverão ser realizados atendendo às prescrições constantes nas normas ABNT, NBR-10295 e NBR-5380. Deverão ser claramente definidos na especificação técnica, sendo que sua realização não é de caráter obrigatório.

- a) Tensão induzida com medição de descargas parciais;
- b) Ensaio de curto-circuito;

- c) Medição de potência absorvida pelos motores e ventiladores (quando aplicável);
- d) Medição da impedância de sequência zero;
- e) Medição de harmônicos na corrente de excitação.

Se forem exigidos ensaios especiais além dos acima mencionados, o método de ensaio deve constituir objeto de acordo entre fabricante e comprador, devendo os mesmos ser especificados no momento da compra.

#### 10.2.3.7 Reatores

- a) Teste de aquecimento para determinação da elevação de temperatura;
- b) Curva de saturação até a máxima tensão especificada;
- c) Teste de impulso;

### 10.3 TESTES DE COMISSIONAMENTO

Os testes de comissionamento a serem realizados servem para: verificar as diversas interfaces deste sistema, bem como colocar o sistema de excitação em operação, verificar se todos os elementos de controle e proteção apresentam um desempenho satisfatório e atendem às funções para as quais foram especificados e, caso necessário, fazer um refinamento dos ajustes preliminares definidos pelo fabricante ou determinados pelos estudos de sistema. Durante o comissionamento, pode ser verificado se houve alterações importantes no sistema que venham a influenciar o comportamento do gerador e do sistema de excitação. Assim, pode ocorrer que os ajustes finais sejam bastante diferentes dos inicialmente previstos. Todos os testes devem ser executados ou supervisionados por um responsável técnico do fabricante e acompanhados por um responsável técnico da contratante ou seu representante.

#### 10.3.1 Testes com o Gerador Parado

Seu objetivo é testar todas as ligações, interligações e simular as ações de controle e proteção para verificar a integridade dos componentes antes dos testes com a máquina excitada.

- a) Verificar se as ligações externas estão de acordo com os diagramas de projeto;
- b) Verificar o sequenciamento através da operação de todos os relés, contadores, disjuntores, fontes de alimentação etc.;
- c) Verificar a operação do regulador manual, dos amplificadores de potência e do sistema de disparo dos tiristores, utilizando uma fonte de alimentação auxiliar e carga simulada, de acordo com os manuais de comissionamento do fabricante;
- d) Verificar a operação de todo o sistema de controle e dos dispositivos de proteção da excitação, utilizando sinais de entrada simulados e fonte de alimentação auxiliar, de acordo com os manuais de instrução do fabricante;
- e) Operação satisfatória de todos os circuitos de alimentação (*power supplies*);

- f) Verificação do desempenho correto de todas as funções, ajustabilidade, sensibilidade, estabilidade e resposta;
- g) Calibração final dos relés e dos dispositivos com *setting* variáveis;
- h) Operação satisfatória de todos os circuitos de proteção e supervisão;
- i) Operação correta dos dispositivos do circuito de controle de disparo (*firing*);
- j) Teste a tensão industrial, 1,5 kV<sub>rms</sub> por um minuto, do isolamento da fiação dos circuitos de controle;
- k) Teste dielétrico a frequência fundamental por um minuto no barramento entre o equipamento de excitação e os anéis coletores. O valor da tensão a ser aplicada deverá ser o mesmo usado para os testes da bobina do campo do gerador.

### 10.3.2 Sistema de Excitação com o Gerador Excitado a Vazio e Teste do Gerador

O objetivo do teste é verificar o desempenho do sistema de excitação durante os procedimentos de excitação e desexcitação da máquina antes dos testes com a máquina sincronizada. Deve-se também verificar a resposta dinâmica do regulador de tensão para os ajustes preliminares e, caso necessário, ser efetuado um refinamento destes ajustes.

#### 10.3.2.1 Transformador Alimentado por Fonte Auxiliar

O transformador de excitação deve ser alimentado, provisoriamente, a partir de uma fonte auxiliar e do gerador em rotação nominal. Esta fonte deve ser capaz de suprir a corrente de campo em vazio.

- a) Preparação da excitação para permitir a execução dos ensaios com o gerador em curto-circuito;
- b) Preparação da excitação para o levantamento da característica em vazio do gerador.

#### 10.3.2.2 Transformador Alimentado dos Terminais do Gerador na Rotação Nominal

- a) Ajuste das realimentações e sequências de fase na excitação;
- b) Ajuste da proteção contra falha a terra no rotor;
- c) Partida com a excitação em controle manual;
- d) Partida com a excitação em controle automático;
- e) Resposta no tempo e em frequência da excitação em manual para um degrau – ajuste do filtro de estabilização, ganhos, dispositivos de entrada e saída, instrumentação;
- f) Resposta do regulador automático de tensão (RAT) no tempo e em frequência para um degrau – ajuste do RAT (ganho de regime e ganho transitório) e parâmetros de controle para o regulador automático;
- g) Desexcitação – comando desliga excitação;
- h) Desexcitação – abertura do disjuntor de campo;

- i) Transferência do modo de operação de automático para manual e vice-versa;
- j) Transferência de canal principal para retaguarda e vice-versa;
- k) Variações na tensão de referência, tanto no canal manual como no automático;
- l) Ensaio e ajuste controle do circuito de descarga de energia armazenada no campo;
- m) Capacidade do regulador de tensão para rapidamente desmagnetizar o campo do gerador.

#### 10.3.2.3 Grandezas a serem Monitoradas

Em geral, as seguintes grandezas devem ser monitoradas e registradas na forma digital ou através de oscilógrafos a papel para avaliação e aprovação do desempenho do sistema de excitação:

- a) Tensão terminal;
- b) Tensão de campo;
- c) Corrente de campo;
- d) Saída do regulador de tensão quando disponível.

#### 10.3.3 Testes com o Gerador em Carga

O objetivo do teste é verificar o desempenho do sistema de excitação durante os procedimentos de sincronização do gerador com o sistema e com o gerador em carga. Deve-se também verificar a resposta dinâmica do regulador de tensão para os ajustes preliminares durante variações na tensão de referência, variações de carga; durante a atuação dos limitadores etc., e, caso necessário, ser efetuado um refinamento destes ajustes.

- a) Ajuste da medição de temperatura do rotor;
- b) Ensaio de elevação de temperatura nos barramentos de interligação dos componentes (painéis; gerador; transformador de excitação);
- c) Verificação da compensação de reativo;
- d) Ensaio e ajuste do PSS;
- e) Ensaio e ajuste dos limitadores de subexcitação, de sobre-excitação, corrente estática e de V/Hz, para verificar a faixa operativa do gerador na sua curva de capacidade do gerador, e para a verificação da corrente máxima de excitação;
- f) Transferência do modo de operação de automático para manual e vice-versa;
- g) Transferência de canal automático principal para retaguarda e vice-versa;
- h) Variações na tensão de referência, tanto no canal manual como no automático;
- i) Variações de carga ativa e reativa;
- j) Rejeições de carga ativa na faixa de 25, 50, 75 e 100%;
- k) Ensaio e ajuste do circuito de descarga de energia armazenada no campo;
- l) Ensaio e ajuste do controle conjunto de tensão;

- m) Ensaio de resposta no tempo e em frequência, realizado aplicando-se um degrau na referência com a máquina em vazio ou em carga.

#### 10.3.3.1 Grandezas a serem Monitoradas

As seguintes grandezas devem ser monitoradas e registradas para avaliação e aprovação do desempenho do sistema de excitação e do controle conjunto:

- a) Tensão terminal;
- b) Tensão de campo;
- c) Corrente de campo;
- d) Potência ativa;
- e) Potência reativa
- f) Saída do regulador de tensão quando disponível.

#### 10.3.4 Parâmetros do Gerador e Modelo do Sistema de Excitação

Estes testes são opcionais e têm por objetivo aferir os modelos e parâmetros do gerador e do sistema de excitação, por meio de medição, durante a fase de comissionamento. A realização desses testes nesta etapa é vantajosa, pois pode evitar a necessidade de paradas da unidade geradora já em operação comercial, quando, em geral, ocorrem dificuldades na sua liberação para testes adicionais, e os horários e períodos para sua execução são bastante restritos.

Os testes para aferição dos parâmetros do gerador, utilizando técnicas mais modernas no domínio do tempo ou da frequência, tendem a substituir os antigos testes de curto-circuito que submetem a máquina a uma solicitação desnecessária. Particularmente interessante, pela facilidade de realização, uso de instrumentação convencional e baixo risco para as máquinas são os ensaios de identificação baseados em rejeição de carga, cada vez mais aceitos para identificação do gerador. Além disso, tais ensaios geram modelos representativos da máquina nas regiões usuais de operação, diferentemente dos ensaios frequenciais, feitos com a máquina parada.

No que se refere ao sistema de excitação, em geral, os modelos fornecidos pelos fabricantes necessitam de revisões para corresponder à realidade, principalmente para os reguladores de tensão analógicos e excitatrizes rotativas. Com uma maior utilização de excitatrizes estáticas e reguladores de tensão digitais, com funções de transferência bem conhecidas, esses testes tornam-se menos necessários.

Para a identificação do sistema de excitação, os seguintes processos podem ser utilizados:

- a) Resposta em frequência de cada bloco (módulo) ou conjunto de blocos do sistema de excitação e gerador a vazio, em malha aberta e em malha fechada;
- b) Resposta no tempo a um degrau do sistema de excitação e o gerador em vazio e em carga com PSS ligado e PSS desligado.

Para o gerador, os seguintes ensaios para sua identificação podem ser usados:

- a) Resposta no tempo a um degrau na tensão de campo com o gerador em vazio;

- b) Resposta no tempo a um degrau na tensão de campo com o gerador em carga;
- c) Variações de carga ativa e reativa.

Os dados obtidos podem ser processados, à posteriori, em programas de análise de resposta no tempo, programas de identificação pelo método em frequência – análise de Fourier, método de Levy para identificação etc. Caso possível, a realização de algumas simulações digitais no próprio campo propicia a obtenção de modelos mais confiáveis, além de reduzir o tempo global gasto para o processo de identificação e ajustes.

#### 10.3.4.1 Grandezas a serem Monitoradas

Para os testes no domínio do tempo, as seguintes grandezas devem ser monitoradas e registradas digitalmente para utilização nos programas digitais de identificação dos parâmetros do gerador e do sistema de excitação:

- a) Tensão terminal (fases A, B e C);
- b) Corrente terminal (fases A, B e C);
- c) Tensão de campo;
- d) Corrente de campo;
- e) Potência ativa;
- f) Potência reativa;
- g) Frequência.

Todos os sinais devem ser obtidos de forma simultânea.

## 11. ESTRUTURA DE UMA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

### 11.1 INTRODUÇÃO

A elaboração de uma especificação para compra de um equipamento deve considerar os requisitos e desempenho necessário do mesmo, bem como estabelecer as bases para regular as relações entre comprador e o fabricante. Ela deve conter duas grandes partes com algumas interdependências, uma tratando dos aspectos comerciais/contratuais e a outra essencialmente técnica, tratando dos requisitos necessários do equipamento, das informações necessárias para o desenvolvimento do projeto no qual o equipamento será instalado etc. Esta Seção do Guia, trata-se apenas da segunda parte mencionada, aqui chamada de “Especificação Técnica”.

A estrutura aqui sugerida é aquela aplicável à compra de um sistema novo de excitação completo a ser acoplado a um gerador novo ou sendo recapitado. Apesar de, na prática, este processo de compra ser estritamente aplicável à recapitação, esta estrutura foi adotada por ser a mais geral e abrangente, podendo ter o conteúdo de suas diversas partes facilmente adaptado, por exemplo, para o caso de compra conjunta gerador-sistema de excitação.

### 11.2 PARTES PRINCIPAIS DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

As Partes sugeridas para compor uma especificação técnica de sistema de excitação são as seguintes:

- a) Condições Técnicas Gerais;
- b) Condições Técnicas Específicas;
- c) Desenhos e Informações a Serem Supridos pelo Fornecedor;
- d) Lista de Características Garantidas;
- e) Dados e Informações a Serem Fornecidos com a Proposta.

O Anexo 11.1 lista os títulos dos principais itens que devem ser incluídos em cada uma dessas partes. O referido anexo é abrangente, incluindo o máximo de informações e deverá ser adaptado para a aquisição específica, considerando: tipo de especificação (funcional ou detalhada), o escopo do suprimento, o tipo de sistema sendo comprado, a compra do sistema em separado ou não do gerador principal, planta nova e/ou recapitação, importância do sistema, filosofia de análise de proposta, fornecimento *turn-key* ou não, tipo do equipamento principal (geradores, condensadores síncronos, motores síncronos, geradores/motores etc.). As considerações nas Seções 4 e 13 do Guia orientam quanto algumas das modificações que devem ser feitas no Anexo 11.1.

### 11.3 OBSERVAÇÕES ADICIONAIS

No Item 3.1 do Anexo 11.1 deve ser considerado o fornecimento dos seguintes desenhos e diagramas:

- Desenhos dimensionais de todos os equipamentos; detalhes de fundações dos equipamentos; desenhos de arranjo dos equipamentos para os diversos cubículos: *layout* interno, fiação e diagramas detalhados de interligação;
- Arranjos e detalhes dos barramentos de interligação entre o transformador de excitação e o equipamento de excitação;
- Idem para o barramento entre o cubículo de excitação e o gerador;



- Arranjo do sistema de refrigeração dos conversores;
- Diagramas esquemáticos e de fiação de todo o sistema de excitação;
- No mínimo, o *software* aplicativo;
- Diagrama funcional;
- Diagramas esquemáticos dos circuitos de controle, supervisão e proteção;
- Desenhos dos diversos cubículos com vista externa e interna, mostrando o arranjo e montagem dos componentes.

O conteúdo dos Itens 2.6 e 2.7 e parte do Item 2.8 (2.8.2 a 2.8.5) da Parte B são da maior importância para definição do sistema de excitação e seus componentes e resultam basicamente dos estudos discutidos na Seção 12 do Guia.

## **11.4 ANEXO 11.1**

### **Parte A – Condições Técnicas Gerais**

1. Clima.
2. Condições de Tropicalização.
3. Cooperação com Outros Fabricantes.
4. Controle, Inspeção e Ensaio Durante a Fabricação.
5. Procedimentos para Revisão e Aprovação de Desenhos, Relatórios e Informações.
6. Limpeza Superficial e Pintura.
7. Requisitos Elétricos Gerais:
  - 7.1. Características do Suprimento de Serviços Auxiliares CA e CC.
  - 7.2. Requisitos Gerais para: proteção de surto, fusíveis e disjuntores, blocos terminais e de testes, fiação interna etc.
  - 7.3. Requisitos Gerais Construtivos para caixas terminais, gabinetes, cubículos e quadros de controle.
  - 7.4. Placas de Identificação.
  - 7.5. Arranjo dos Equipamentos.
  - 7.6. Requisitos para relés auxiliares e dispositivos de controle e transdutores.
  - 7.7. Requisitos para instrumentos indicadores.
  - 7.8. Requisitos para motores.

### **Parte B – Condições Técnicas Específicas**

1. Geral.
2. Descrição da Instalação.
3. Escopo do Suprimento.
  - 3.1. Itens a Serem Fornecidos pelo Fabricante;
  - 3.2. Itens Fornecidos por Terceiros.
4. Normas e Publicações.

5. Dados Fornecidos pelo Comprador.
6. Requisitos de Desempenho.
7. Requisitos Operacionais.
8. Requisitos para Equipamentos e Componentes:
  - 8.1. Requisitos Gerais.
  - 8.2. Requisitos Específicos para os Equipamentos e Principais Componentes.
  - 8.3. Proteção do Sistema de Excitação e seus Componentes.
  - 8.4. Inspeção e Testes Durante a Fabricação.
  - 8.5. Testes de Comissionamento.
  - 8.6. Peças Sobressalentes.
  - 8.7. Treinamento.

### **Parte C – Desenhos e Informações**

1. Desenhos dimensionais de todos os equipamentos; detalhes de fundações dos equipamentos, desenho de arranjo dos equipamentos para os diversos cubículos: *layout* interno, fiação e diagrama detalhado de interligação. Arranjo e detalhes dos barramentos de interligação entre o transformador de excitação e o equipamento de excitação.
2. Manuais de comissionamento, instalação, manutenção e operação do sistema e dos equipamentos.
3. Relatórios e certificados de ensaio de fábrica e de comissionamento.
4. Modelos matemáticos para uso em estudos de sistema.
5. Desenho de placas de identificação.
6. Programa de testes na fábrica.
7. Planejamento e programação de ensaios de comissionamento.

### **Parte D – Lista de Características Garantidas**

1. Deverão ser solicitadas garantias para características importantes do sistema de excitação para assegurar que o sistema tenha desempenho de acordo com as especificações. Sugere-se considerar pelo menos as seguintes características:
  - 1.1. Sistema de Excitação
    - Tensão e corrente de excitação nominal positiva e negativa;
    - Tensão e corrente de teto (positiva e negativa);
    - Tempo de resposta do sistema de excitação;
    - Elevação de temperatura do sistema de excitação;
    - Tempo de duração máximo da tensão de teto positiva e negativa;
    - Precisão do regulador automático de tensão, em %;
    - Temperatura máxima permitida na junção dos tiristores;
    - Potência dissipada ao ambiente pelo sistema de excitação.

- 1.2. Transformador de Excitação
  - Potência nominal;
  - Elevação de temperatura;
  - Níveis de isolamento;
  - Método de resfriamento;
  - Perdas totais na potência nominal para 100% e 105% de tensão terminal do gerador;
  - Impedância.
- 1.3. Barramentos
  - Níveis de isolamento;
  - Corrente nominal;
  - Corrente de curta duração;
  - Elevação de temperatura do condutor e do invólucro.
- 1.4. Disjuntor de campo
  - Corrente nominal;
  - Corrente de curta duração;
  - Tensão máxima de interrupção dos contatos principais;
  - Corrente de interrupção dos contatos principais na tensão nominal, na tensão de curta duração e na tensão máxima de interrupção;
  - Número mínimo de operações dos contatos principais sem a necessidade de manutenção.
- 1.5. Excitatriz Rotativa
  - Elevação de temperatura do estator e do rotor;
  - Capacidade (kW) para as elevações de temperatura especificada para o estator e o rotor;
  - Eficiência.

## **Parte E – Dados e Informações**

1. Deverão ser solicitadas as seguintes informações, dependendo do equipamento especificado e da abrangência da especificação:
  - 1.1. Descrição geral do controle de qualidade para todo o processo de fabricação, incluindo as subcontratações.
  - 1.2. Informações sobre os testes de fábrica e comissionamento propostos para os componentes e o sistema completo.
  - 1.3. Descrição completa do sistema de excitação cobrindo: excitatrizes, controle automático e manual de tensão, sistema de proteção, limitadores, sinal estabilizador (PSS) etc., incluindo: sistema de refrigeração dos conversores; equipamentos e componentes; operação, desempenho, testes e características de projeto para assegurar confiabilidade, manutenção e sistema de localização de defeitos.
  - 1.4. Experiência em fornecimentos anteriores com o tipo de sistema proposto.
  - 1.5. Gráficos mostrando o comportamento do sistema sem e com sinal estabilizador.

- 1.6. As informações abaixo, usando as definições do IEEE Std. 421.1, ANSI C 37.18 e das especificações, considerando o sistema de excitação carregado com uma resistência com valor igual à resistência do rotor na máxima temperatura especificada para o circuito de campo, considerando 1 pu da tensão de excitação igual à base da tensão do circuito do campo e 50°C (ou o valor especificado) de temperatura do ar de entrada para refrigeração dos conversores:
- a) Base da tensão do campo (V).
  - b) Valores nominais para a ponte positiva:
    - Corrente (A);
    - Tensão (V).
  - c) Valores nominais para a ponte negativa (se houver):
    - Corrente (A);
    - Tensão (V).
  - d) Tensão de teto da ponte positiva para o gerador com 100% da tensão nominal:
    - positiva (pu);
    - negativa (pu).
  - e) Tensão de teto da ponte negativa para o gerador com 100% da tensão nominal (se houver):
    - positiva (pu);
    - negativa (pu).
  - f) Tempo no qual a tensão de teto pode permanecer aplicada (s).
  - g) Tensão de teto positiva quando a tensão nos terminais do gerador é de 35% do valor nominal (pu).
  - h) Tempo de resposta do sistema de excitação (s), na condição operativa especificada;
  - i) Ganho transitório do regulador de tensão (pu/pu).
  - j) Faixa de ajuste do valor de referência (%).
  - k) Precisão do ajuste da tensão de referência na faixa especificada (%).
  - l) Tiristores:
    - Fabricante e tipo (nº de referência);
    - Máxima temperatura da junção para operação segura em regime contínuo (°C);
    - Valor médio nominal de corrente na direção direta (A);
    - Valor de pico da tensão inversa (V);
    - Valor de pico da tensão direta (V).
  - m) Para o conversor positivo e negativo (se houver) indicar:
    - Nº de tiristores em série por cadeia (*string*);
    - Nº total de cadeias em paralelo em cada braço da ponte (*bridge arm*);
    - Nº de cadeias redundantes em cada braço da ponte.

- n) Perda total do sistema de excitação, para o gerador principal a plena carga e máxima temperatura no circuito do campo, incluindo harmônicos.
- o) Pré-excitação (*field flashing*):
  - Máxima corrente CC (A);
  - Duração (s);
  - Número máximo de acendimentos durante uma hora.
- p) Disjuntor do campo:
  - Corrente nominal em regime contínuo (A);
  - Tensão nominal (V);
  - Corrente máxima de integração na tensão nominal máxima de interrupção (A);
  - Tensão máxima de interrupção (V).
- q) Nível de ruído audível do cubículo de excitação operando com tensão e correntes nominais dB (A).
- r) Valor da resistência de descarga do campo a 75°C, correspondente a corrente nominal do conversor positivo (ohms) e características.
- s) Transformador de excitação para os conversores positivo e negativo:
  - Tensão nominal primária (V);
  - Tensão nominal secundária (V);
  - Potência máxima nominal em regime contínuo, (kVA) de saída na tensão e frequência nominais, sem exceder os limites de temperatura especificados.
  - Ruído audível na tensão e frequência nominais dB(A);
  - Nível básico de impulso (kV);
  - Elevação máxima de temperatura na potência máxima nominal contínua (°C);
  - Perdas totais a plena carga máxima nominal, incluindo harmônicos (kW).
- t) Descrição do circuito de compoundagem, incluindo as principais características do transformador e do conversor não controlado.
- u) Barramentos interligando o transformador de excitação e o cubículo dos conversores:
  - Tipo (isolado ou segregado ou de fases não segregadas);
  - Tensão nominal (V);
  - Corrente nominal (A);
  - Nível básico de isolamento (kV);
  - Máxima elevação de temperatura (°C);
  - Material dos condutores e dos dutos.
- v) As mesmas informações para o barramento que interliga o cubículo dos conversores e os terminais do gerador principal.
- w) Diagramas de bloco conforme padrão do proponente e diagrama de bloco de acordo com IEEE Std. 421.5 – 1992.

- x) Para o regulador de tensão digital:
  - i) Descrição sumária, incluindo diagramas de bloco;
  - ii) Suportabilidade às condições ambiente:
    - (1) Temperaturas limites:
      - Em serviço (°C);
      - Durante o armazenamento (°C a °C);
      - No transporte (°C a °C);
    - (2) Umidade relativa (% a °C);
    - (3) Vibração durante a operação (Hz com mm de amplitude pico a pico);
    - (4) Grau de proteção do cubículo, conforme IEC 144;
  - iii) Tensão de 60 Hz suportada – um minuto (kV);
  - iv) Classe de tensão de impulso, conforme IEC 255.4 (kV);
  - v) Faixas de ajuste do valor de referência (% da tensão nominal da máquina);
  - vi) Precisão em % do valor de referência desejado, para as faixas de ajuste indicadas acima;
  - vii) Tempo permitido de operação for a das faixas de ajuste indicada no item v acima;
  - viii) Tempo de resposta do regulador, em ciclos;
  - ix) Faixa de ajuste dos ganhos transitório e em regime permanente;
  - x) Classe de suportabilidade de tensão a alta frequência, conforme ANSI C 37.90 (kV);
  - xi) Tipo de microprocessador;
  - xii) Tipo de interface com o operador (*touch-screen*, *push-button* ou *keyboard*);
  - xiii) Tipo de memória;
  - xiv) Experiência em fornecimentos anteriores (lista de equipamentos similares em operação).
- y) Para o regulador de tensão analógico:
  - i) Descrição sumária, incluindo diagrama de blocos;
  - ii) Experiência em fornecimentos anteriores (lista de equipamentos similares em operação);
  - iii) Suportabilidade às condições ambientais:
    - (1) Temperaturas limites:
      - Em serviço (°C);
      - Durante o armazenamento (°C a °C);
      - No transporte (°C a °C);
    - (2) Umidade relativa (% a °C);
    - (3) Vibração durante a operação (Hz com mm de amplitude pico a pico);
    - (4) Grau de proteção do cubículo, conforme IEC 144;

- iv) Faixas de ajuste do valor de referência (% da tensão nominal da máquina);
- v) Precisão em % do valor de referência desejado, para as faixas de ajuste indicada acima;
- vi) Tempo permitido de operação fora das faixas de ajuste indicada no item v acima;
- vii) Tempo de resposta do regulador, em ciclos;
- viii) Faixa de ajuste dos ganhos transitório e em regime permanente.
- z) Capacidade das excitatrizes rotativas CC principal e piloto ou CA (kW);
- aa) Resistências das excitatrizes rotativas CC ou CA:
  - Armadura da excitatriz principal (ohms);
  - Campo da excitatriz principal (ohms);
  - Resistência da armadura da excitatriz piloto (ohms);
  - Resistência do campo da excitatriz piloto (ohms);
  - Resistência da armadura da excitatriz CA (ohms);
  - Resistência do campo da excitatriz CA (ohms).
- bb) Perdas das excitatrizes CC ou CA, para o gerador sem carga e plena carga com tensão terminal 95, 100 e 105% da tensão nominal e o fator de potência especificado (kW);
- cc) Informações sobre o sistema controle conjunto de excitação;
- dd) Informações sobre o isolamento do campo e da armadura das máquinas rotativas do sistema de excitação;
- ee) Descrição do sinal estabilizador e dos limitadores.

## 12. ESTUDOS

### 12.1 INTERAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO, GERADOR E SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Durante a fase de estudos, além da definição das características funcionais do sistema de excitação, os seguintes problemas devem ser analisados:

- a) Elevados ganhos transitórios do regulador de tensão, em geral, necessários para melhorar a estabilidade transitória e aumentar o torque de sincronismo entre o gerador e as demais máquinas do sistema podem piorar o amortecimento das oscilações eletromecânicas, devendo ser analisada a necessidade de introdução de sinais adicionais estabilizadores de potência.
- b) Os geradores de uma usina que possam operar como compensadores síncronos, com rebaixamento da água no tubo de sucção, devem ter os seus sinais estabilizadores desligados quando operando nesta condição. Em geral, os ajustes do sinal estabilizador não estão otimizados para este tipo de operação, podendo piorar o amortecimento das oscilações em vez de melhorá-lo. Além do mais, como a contribuição transitória das variações de tensão terminal à potência ativa (coeficiente  $K_2$  do modelo de Heffron Phillips) é proporcional ao seno do ângulo de carga, que, nesta condição, é nulo, a modulação da tensão terminal não gera modulação de potência. Uma alternativa é dotar o sinal estabilizador de dois ajustes distintos, que possam ser comutados automaticamente quando a máquina operar como gerador ou como compensador síncrono. Isto é particularmente simples de implementar em estabilizadores (ou sistemas de excitação) digitais. O mesmo se dá para máquinas capazes de operar como bombas.
- c) A atuação dos limitadores de sobreexcitação, necessários para evitar que o gerador fique operando fora de sua capacidade nominal de geração de reativo, pode acarretar colapsos de tensão no sistema, devendo ser analisada a necessidade de esquemas de emergência, elevação da capacidade de sobrecarga do sistema de excitação, esquemas especiais de controle etc., para evitar desligamentos em cascata no sistema de transmissão.
- d) A atuação das malhas de controle dos limitadores de subexcitação, ou limitadores P/Q, necessários para evitar a perda de sincronismo por violação do limite de estabilidade estática, pode causar uma elevação das sobretensões durante rejeições parciais ou totais de carga, devendo ser considerada a representação destes limitadores nos estudos de estabilidade em geral, principalmente quando se analisa rejeição de carga e autoexcitação do gerador.
- e) Rejeições de carga que possam deixar o gerador conectado a linhas de transmissão longas, com elevados valores de capacitância, podem submeter o gerador a um risco elevado de autoexcitação. Deve-se, nestes casos, avaliar a necessidade da ponte de corrente negativa em sistemas de excitação estáticos, de forma a garantir o controle da tensão durante mais tempo e possibilitar a atuação de proteções que abram os circuitos capacitivos e eliminem o risco de sobretensões muito elevadas causarem danos aos equipamentos.
- f) As diferenças entre os parâmetros de geradores e transformadores elevadores de uma usina podem provocar falta de equalização de potência reativa entre as unidades, devendo-se utilizar o controle conjunto de tensão para fazer uma distribuição adequada de reativo entre as unidades.



- g) Mais de uma unidade geradora controlando a tensão de uma mesma barra do sistema pode provocar uma instabilidade no controle da tensão, devendo-se utilizar um estatismo para a distribuição da participação de cada gerador.

## 12.2 ELEMENTOS BÁSICOS PARA ESPECIFICAÇÃO

As seguintes características básicas do sistema de excitação devem ser definidas durante os estudos:

### 12.2.1 Capacidade do Sistema de Excitação

Estabelecer os valores requeridos de máxima corrente de campo positiva e negativa, tensão de teto, tensão e corrente de campo nominais a vazio, capacidade de sobrecarga etc.

### 12.2.2 Estrutura do Sistema de Excitação

#### 12.2.2.1 Excitatriz

Estabelecer o tipo de excitatriz a ser usada (totalmente estática, rotativa, *brushless* etc.).

#### 12.2.2.2 Regulador de tensão e circuitos associados

O Regulador de Tensão deverá ser dotado das seguintes funcionalidades mínimas:

- a) redução de ganho transitório.
- b) compensação de reativo.
- c) estabilização suplementar.
- d) limitação de:
  - máxima excitação.
  - mínima excitação.
  - sobrefluxo (V/Hz) etc.
- e) dispositivos de proteção, tais como:
  - sobretensão.
  - máxima excitação.
  - deslizamento de pólos (operação assíncrona) etc.

### 12.2.3 Desempenho do Sistema de Excitação

Estabelecer valores e características de desempenho do sistema de excitação relacionadas à:

- a) Precisão do regulador de tensão (erro em regime), a qual deve ser mantida em qualquer faixa de carga, mesmo sob determinado desvio da frequência do sistema.
- b) Linearidade e tempo de resposta dos transdutores (de tensão de campo, corrente de campo, frequência etc.).
- c) Faixa de regulação da tensão terminal do gerador e da compensação de reativo.

- d) Desempenho transitório, relativo à:
- tempo de resposta (capacidade de atingir a tensão de teto para determinada queda de tensão terminal em determinado tempo);
  - rejeições de carga ativa e reativa (máximas variações de tensões e tempos de restabelecimento da tensão após rejeições de carga);
  - curto-circuito no terminal de alta do transformador elevador;
  - atuação dos limitadores, os quais devem permitir um comportamento estável, com bom amortecimento.

### 12.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E FAIXAS DE AJUSTES

Os valores de capacidade do sistema de excitação (corrente de campo máxima) são determinados pelas características do gerador (exceto tensão de teto).

Os valores da tensão de teto positiva e negativa, ganhos do regulador de tensão, necessidade de uso de estabilização suplementar e necessidade de corrente de excitação negativa são determinados por meio de estudos de planejamento, em que se avalia o comportamento transitório e em regime da máquina através de simulações de algumas situações, tais como curto-circuito na barra de alta com retirada de linha, aplicação de carga capacitiva, rejeições parciais e totais de carga, variação da potência mecânica aplicada ao eixo do gerador etc. Algumas dessas simulações podem ser realizadas considerando-se uma representação da máquina conectada a uma barra infinita através do transformador e linhas de transmissão, ou através de uma representação mais detalhada do sistema considerando diferentes condições operativas.

A fixação dos demais ajustes, relativo aos limitadores e dispositivos de proteção, é função das características dos equipamentos (gerador, transformador elevador, excitatriz etc.) e devem estar em concordância com a proteção do grupo gerador, além de atenderem os requisitos de desempenho (atuação estável) quando aplicável.

#### 12.3.1 Requisitos Funcionais do Sistema de Excitação

Um sistema de excitação deve satisfazer a três requisitos fundamentais de desempenho:

- a) proporcionar boa regulação de tensão em regime permanente.
- b) ter bom desempenho transitório para grandes distúrbios.
- c) apresentar bom desempenho para pequenos distúrbios.

Para atender o primeiro requisito é aconselhável um elevado ganho no regulador de tensão, de modo a reduzir o erro em regime permanente.

Um erro menor ou igual a 0,5% seria um valor aconselhável, sendo comumente especificado, o que implica num ganho em regime permanente de 200 pu/pu a 400 pu/pu, ou maior, para o sistema de excitação.

Para a segunda questão, relativa à estabilidade transitória, é conveniente um elevado ganho transitório para o sistema de excitação. Valores de 40-100 pu/pu podem ser considerados como típicos.

Sabe-se que a elevação desse ganho pode comprometer a estabilidade dinâmica. Há que se considerar, neste ponto, o emprego ou não de estabilização suplementar. Outra característica importante para a estabilidade transitória é a velocidade de resposta; é muito frequente dotar-se o sistema de excitação –

máquina em vazio, a malha aberta, de uma faixa de resposta de cerca de 10 rad/s, proporcionando um tempo de subida de cerca de 100ms.

Um bom desempenho do conjunto (sistema de excitação - gerador) para pequenas perturbações pode ser descrito em termos da resposta temporal frente a um distúrbio tipo degrau na referência, sobreoscilação ou ultrapassagem máxima, tempo de acomodação ou assentamento. Admitindo-se a presença de polos dominantes, esses elementos podem ser correlacionados com a margem de fase associada à resposta em frequência.

Ao elenco de requisitos antes apontados, é possível incorporar ainda outros, provenientes de situações especiais de rejeição de carga. Nestes casos, é importante garantir que o regulador atue rapidamente, procurando trazer a tensão terminal a valores pré-fixados. Convém ressaltar aqui que a probabilidade de ocorrência de situações especiais de rejeição de carga pode vir a exigir a adoção de capacidade de corrente de campo negativa, para evitar ou reduzir o risco de autoexcitação; corrente mínima positiva para energização de linhas ou limitadores de corrente mínima de campo ou de subexcitação, para evitar a perda de sincronismo por absorção de reativo além do limite de estabilidade estática da máquina.

### 12.3.2 Procedimentos para Definição das Características

A definição das principais características do sistema de excitação, considerando os aspectos abordados anteriormente, segue os seguintes passos:

- a) Modelagem matemática do sistema de excitação, gerador e sistema de potência.
- b) Simulação digital de diversas situações.

#### 12.3.2.1 Modelagem

Para a modelagem inicial do sistema de excitação e do gerador são utilizados dados fornecidos pelos fabricantes ou modelos típicos para cada tipo de excitação que se pretenda analisar. Alguns modelos típicos relacionados à representação de sistemas de excitação em estudos de estabilidade eletromecânica à frequência fundamental, podem ser obtidos em documentos do IEEE Power Engineering Society [IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies – IEEE Std. 421.5-1992]. Informações similares, ou complementares, também podem ser encontradas nos documentos do International Electrotechnical Commission – IEC 34-16-2 [Excitation Systems for Synchronous Machines – Chapter 2: Models for Power System Studies]. Em estudos que seja necessária a representação de limitadores de subexcitação ou sobre-excitação e não se disponha de dados fornecidos por fabricantes, ou dados de planta, pode-se recorrer a documentos da IEEE Task Force on Excitations Limiters: 95 WM 050-5 EC [Underexcitation Limiter Models for Power System Stability Studies] e 95 WM 049-7 EC [Recommended Models for Overexcitation Limiting Devices]. O Anexo 12.1 apresenta um resumo com os principais modelos de sistemas de excitação definidos pelo IEEE

Para o sistema de potência, recorre-se a banco de dados disponível (p.ex.: Eletrobrás), pois este deve estar atualizado para as modificações na estrutura ou ajustes dos sistemas de excitação, dados de geradores,

parâmetros de linhas etc., possibilitando representá-los de uma forma mais condizente com as condições dos equipamentos em operação.

Por outro lado, a questão relativa aos dados a considerar, nos diversos tipos de estudo para especificação de sistemas de excitação, depende do sistema onde o gerador estará inserido (sistema de potência interligado; sistema de potência isolado; sistema industrial; sistema para atendimento a plataformas submarinas; sistema para atendimento a mineração etc.). Cada um desses sistemas pode apresentar características de equipamentos que resultem em diferentes solicitações para os sistemas de excitação. No Anexo 12.2, estão apresentados os dados normalmente necessários para representar o gerador e o sistema de excitação nos diversos tipos de estudo (fluxo de potência; curto-circuito; estabilidade transitória e dinâmica; transitórios eletromagnéticos). Na tabela 7.1 do Item 7, estão apresentados os programas digitais mais empregados no Brasil nos estudos para especificação de sistemas de excitação.

#### 12.3.2.2 Simulações

De posse dos modelos iniciais do sistema de excitação, gerador e sistema de potência fazem-se diversas simulações de fluxo de potência e estabilidade no domínio do tempo utilizando programas de fluxo de potência e de estabilidade eletromecânica incluindo necessariamente também os seguintes casos:

- a) resposta ao degrau na referência do regulador de tensão para máquina em vazio.
- b) idem, em carga (diversas condições operativas).
- c) rejeições de carga ativa e reativa (diversas condições operativas);
- d) energização de linhas (diversas condições operativas).
- e) resposta ao degrau de carga (diversas condições operativas).
- f) curtos-circuitos monofásicos ou trifásicos, com a abertura de linhas com e sem religamento, para se avaliar a estabilidade transitória do sistema.

Em todos os casos, exceto para rejeição de carga e energização de linhas, deve-se considerar o uso ou não de estabilização suplementar. Os ajustes iniciais do sistema de excitação são obtidos dos melhores resultados destas simulações.

Para análise da influência do sistema de excitação nas oscilações eletromecânicas e definição da estrutura mais adequada para a estabilização suplementar, deve-se também recorrer a simulações no domínio da frequência, por meio de programas específicos para análise de pequenas perturbações. Através desses programas, é possível avaliar o amortecimento das principais frequências de oscilação que a máquina estará sujeita para diferentes condições operativas. Nessas simulações, pode-se considerar um modelo máquina x barra infinita para avaliar apenas o amortecimento das oscilações da máquina e/ou considerar uma representação mais detalhada dos controles de todo o sistema para uma avaliação das frequências de oscilação local, entre áreas ou entre usinas.

## 12.4 ANEXO REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO NOS ESTUDOS

### 1. Introdução

Este apêndice apresenta, de forma bastante resumida, alguns modelos típicos relacionados à representação de sistemas de excitação em estudos de estabilidade eletromecânica à frequência fundamental. A principal referência para a sua elaboração foi o documento “IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies” – IEEE Std 421.5-1992. Para a representação de sistemas de excitação existentes, essa referência relaciona os tipos de equipamentos de cada fabricante que se enquadram em cada modelo.

A Tabela 12.1 abaixo apresenta um resumo dos principais modelos utilizados para representar os sistemas de excitação descritos na Seção 5 do Guia. Na Tabela 12.3 do Anexo 12.2 são apresentados os dados necessários para cada modelo.

*Tabela 12.1*

Tipo de Excitatriz	Descrição Conforme Seção 5 do Guia	Diagrama de Blocos	Modelo IEEE Std. 421.5-1992
CC	Tipo ação descontínua (Fig. 5.3)	Figura 11.1	DC3A
CC	Tipo <i>amplidyne</i> (Fig. 5.4)	Figura 11.2	DC1A
CC	Tipo autoexcitada indireta – Fig. 5.14.a	Figura 11.3	DC2A
CA	Tipo independente indireta – Fig. 5.16	Figura 11.4	AC5A
CA	Tipo independente direta ( <i>Brushless</i> ) (Fig. 5.10 e 5.15.a)	Figura 11.5	AC1A
CA	Tipo independente direta de alta resposta inicial (Fig. 5.15.b)	Figura 11.6	AC2A
CA	Tipo autoexcitada com retificadores não controlados (Fig. 5.14.b)	Figura 11.7	AC3A
CA	Tipo autoexcitada com retificadores controlados (Fig. 5.8 e 5.9)	Figura 11.8	AC4A
Estática	Tipo alimentação independente <sup>(1)</sup>	Figura 11.8	AC4A
Estática	Tipo autoexcitada direta simples (Fig. 5.12)	Figura 11.9	ST1A
Composta	Tipo autoexcitada direta composta <sup>(1) (2)</sup>	Figura 11.10	ST2A
Composta	Tipo autoexcitada direta composta com realimentação da tensão de campo <sup>(1) (2)</sup>	Figura 11.11	ST3A

<sup>(1)</sup> Não estão detalhados na Seção 5 do Guia

<sup>(2)</sup> Figuras 11, 12 e 13 do IEEE Std. 421.1-1986

## 2. Diagramas de Blocos

### 2.1. Sistemas de Excitação com Excitatrizes de CC

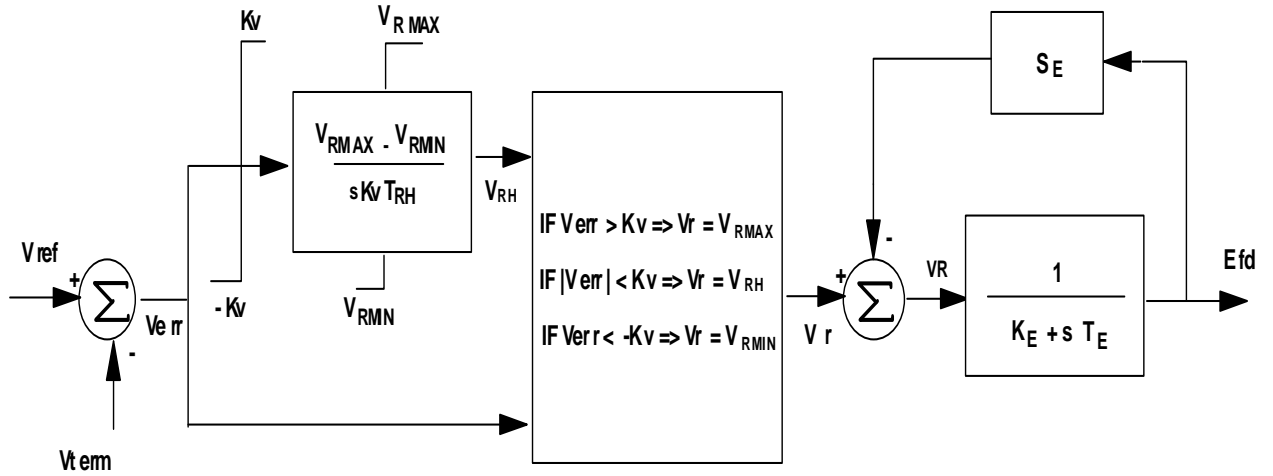


Figura 12.1 – Diagrama de Blocos do Modelo DC3A

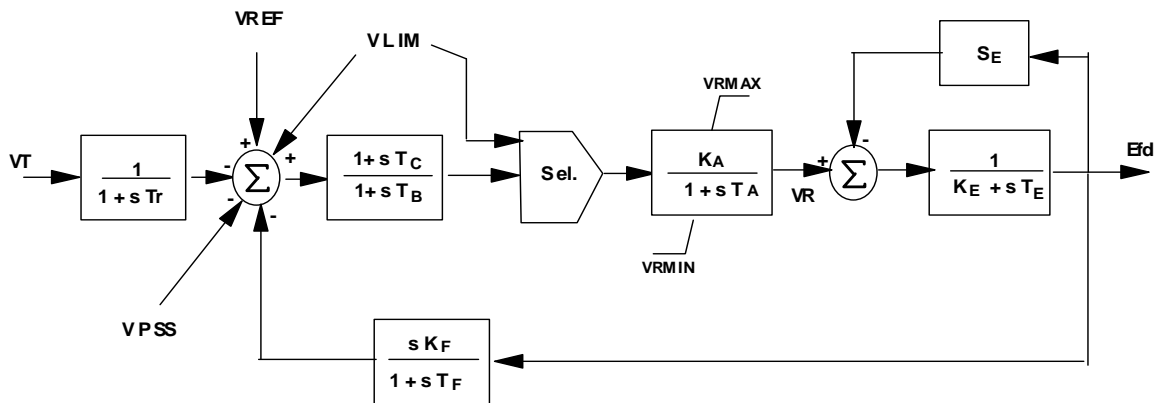


Figura 12.2 – Diagrama de Blocos do Modelo DC1A

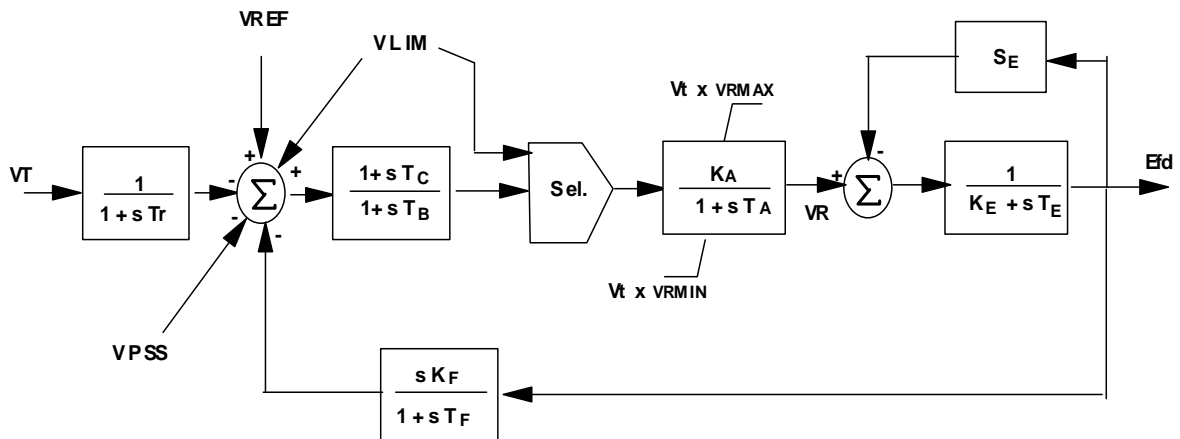


Figura 12.3 – Diagrama de Blocos do Modelo DC2A

## 2.2. Sistemas de Excitação com Excitatrizes de CA

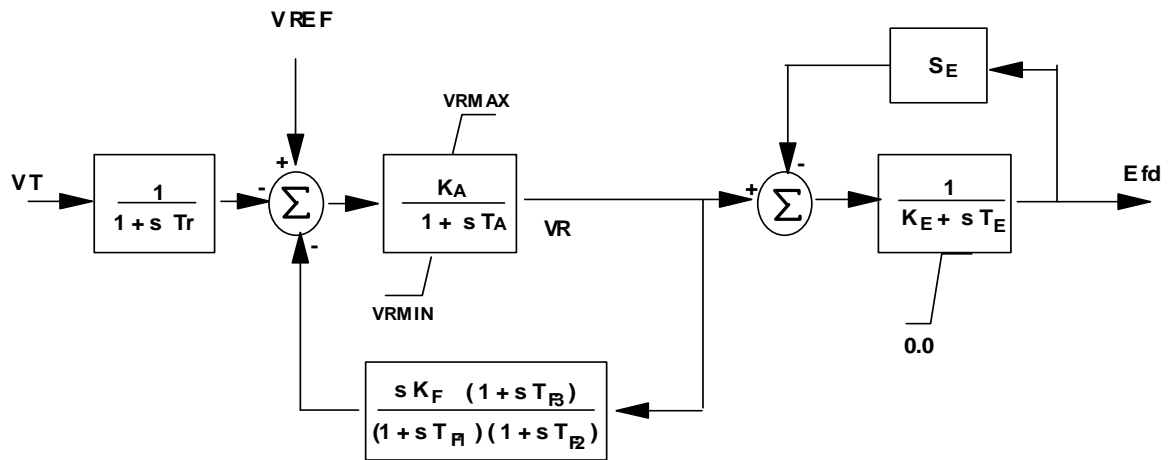


Figura 12.4 – Modelo AC5A (Representação simplificada de um sistema de excitação com retificadores rotativos)

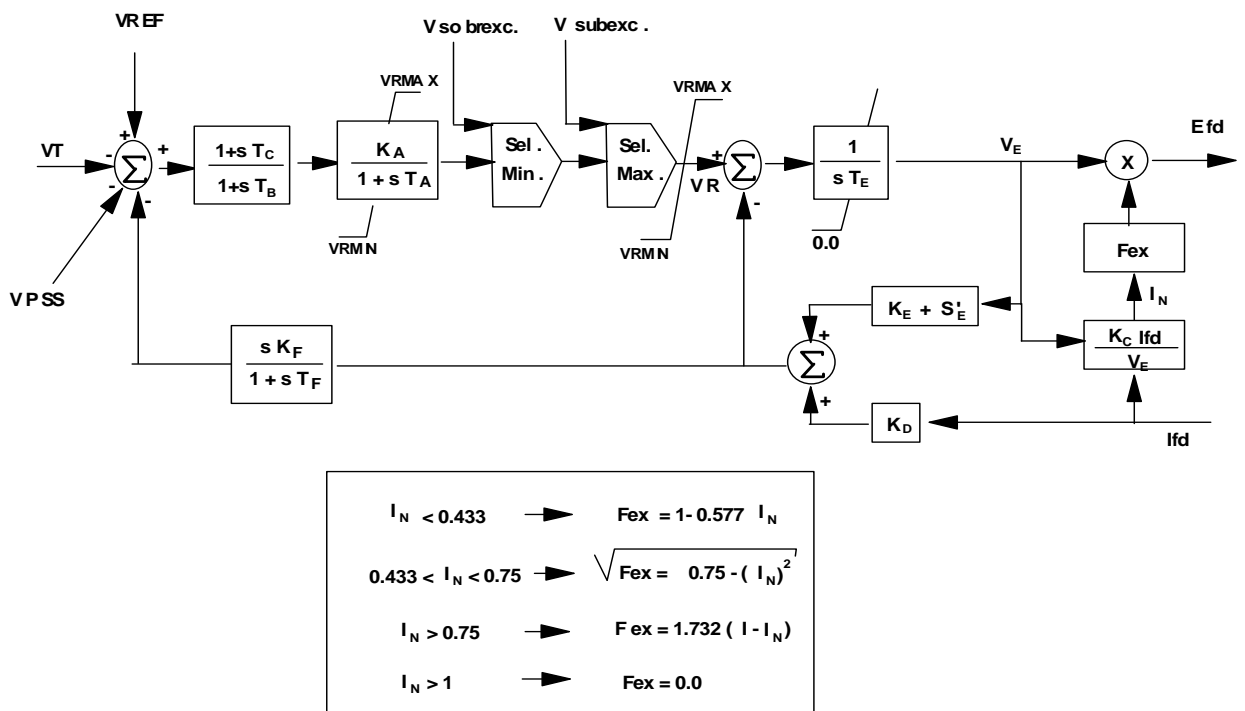
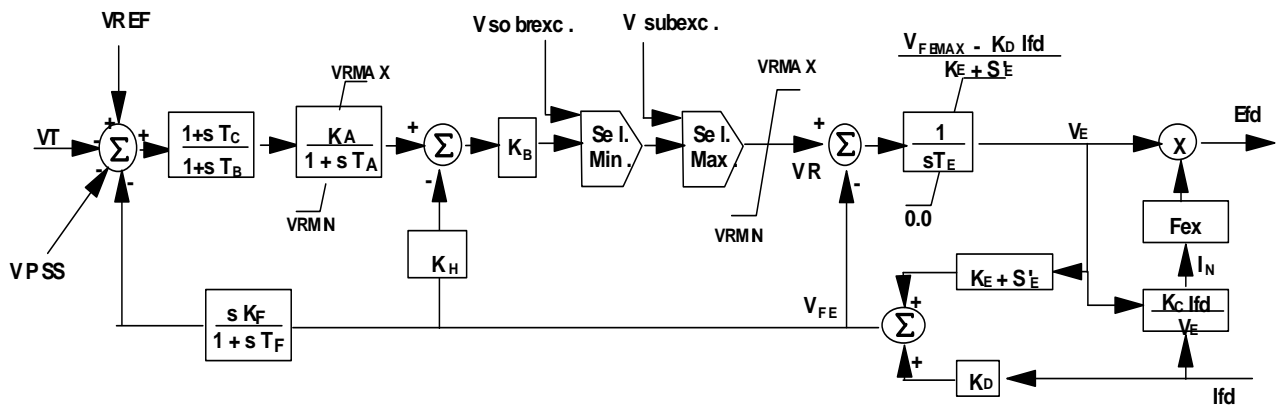
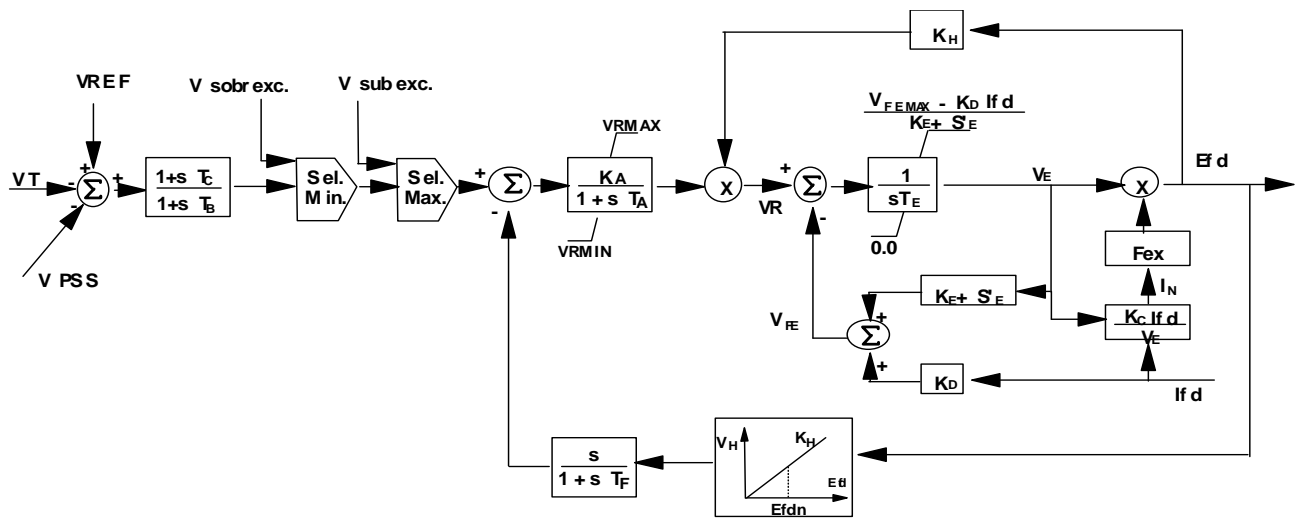


Figura 12.5 – Modelo AC1A



$I_N < 0.433$	$\rightarrow$	$F_{ex} = 1 - 0.577 I_N$
$0.433 < I_N < 0.75$	$\rightarrow$	$\sqrt{F_{ex} = 0.75 - (I_N)^2}$
$I_N > 0.75$	$\rightarrow$	$F_{ex} = 1.732 (1 - I_N)$
$I_N > 1$	$\rightarrow$	$F_{ex} = 0.0$

Figura 12.6 – Modelo AC2A



$I_N < 0.433$	$\rightarrow$	$F_{ex} = 1 - 0.577 I_N$
$0.433 < I_N < 0.75$	$\rightarrow$	$\sqrt{F_{ex} = 0.75 - (I_N)^2}$
$I_N > 0.75$	$\rightarrow$	$F_{ex} = 1.732 (1 - I_N)$
$I_N > 1$	$\rightarrow$	$F_{ex} = 0.0$

Figura 12.7 – Modelo AC3A



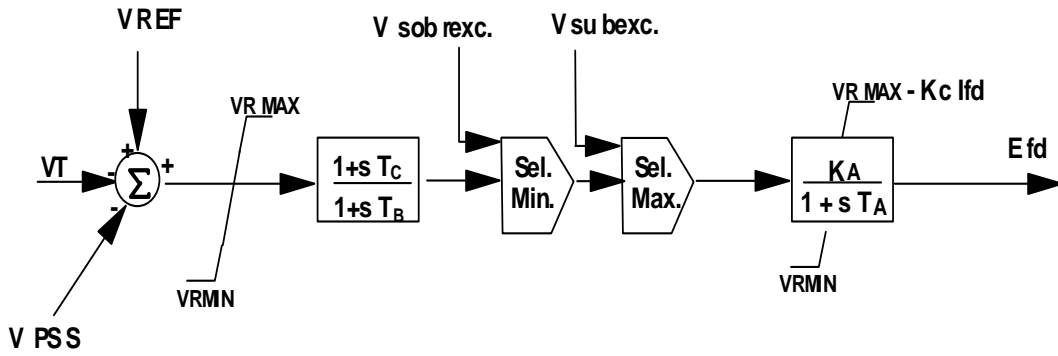


Figura 12.8 – Modelo AC4A

### 2.3. Sistemas de Excitação com Fontes Controladas por Tiristores

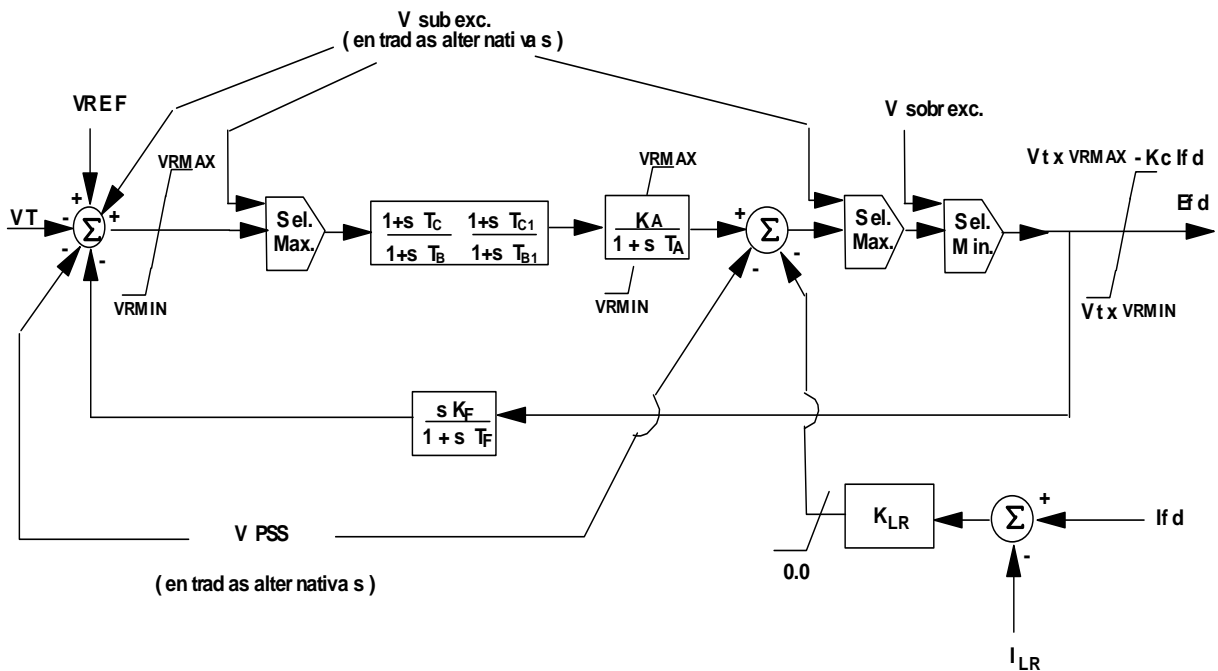


Figura 12.9 – Modelo ST1A

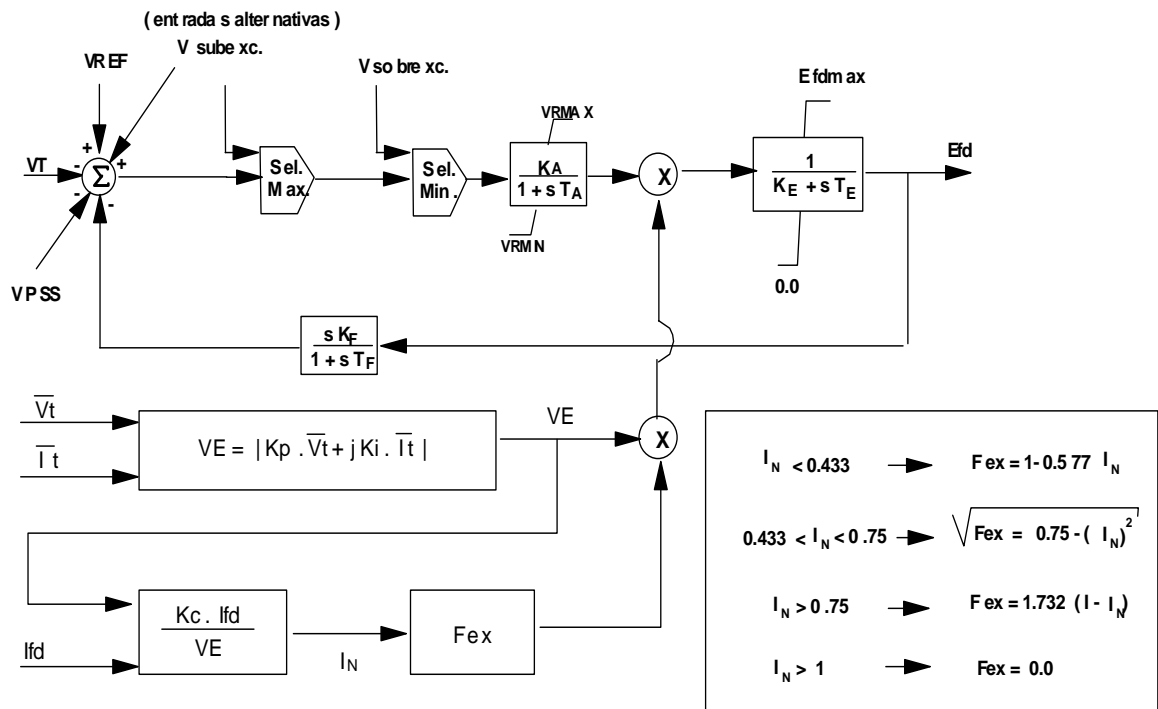


Figura 12.10 – Modelo ST2A

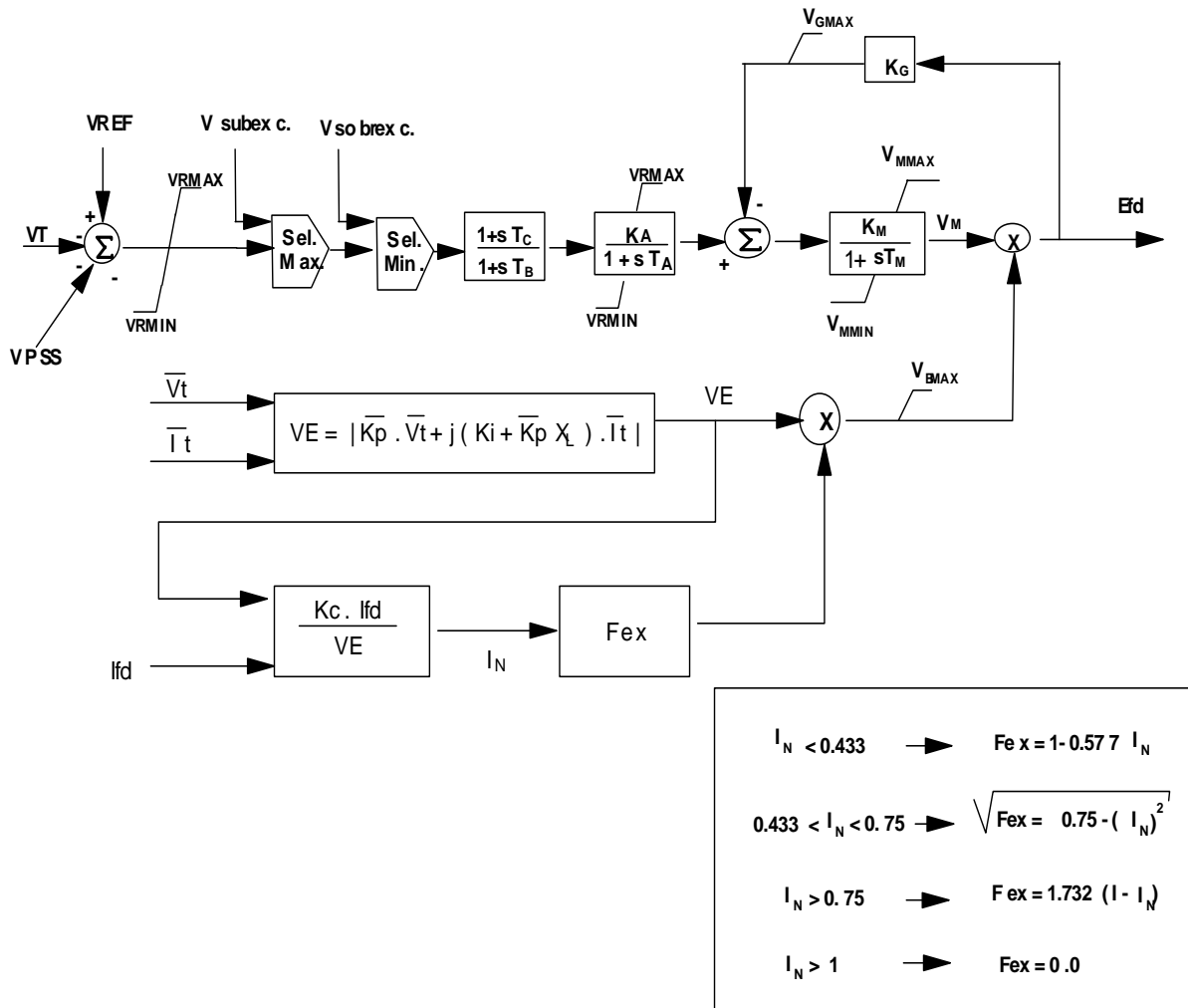


Figura 12.11 – Modelo ST3A

## 12.5 ANEXO DADOS E PARÂMETROS

### 1. Dados Gerais

- Número de unidades;
- Tipo: gerador, gerador/motor, compensador síncrono, motor etc.;
- Potência nominal, em MVA;
- Tensão nominal, em kV;
- Faixa operativa de tensão, em kV;
- Faixa operativa de potência ativa por unidade, em MW;
- Faixa operativa de potência reativa por unidade, em Mvar;
- Limitações;
- Curvas de capacidade para tensões mínima, 1.0 pu e máxima;
- Número de polos;
- Frequência.

## 2. Dados Complementares

### 2.1. Usinas Hidroelétricas

- Rendimento do conjunto turbina-gerador;
- Tipo de turbina.

### 2.2. Usinas Termoelétricas

- Tipo: a vapor, a gás, ciclo combinado, nuclear etc.;
- Fator de capacidade mínimo e máximo.

## 3. Diagramas

- Diagrama de blocos do modelo da máquina;
- Diagrama de blocos dos modelos dos reguladores, sistema de excitação e regulador de velocidade;
- Observações sobre esquemas especiais de controle e/ou proteção.

## 4. Parâmetros Específicos de Máquinas Síncronas

*Tabela 12.2 – Parâmetros Específicos de Máquinas Síncronas*

Parâmetros	Denom.	Unidade
Tipo: MS = M4 (gerador/compensador) MS = MI (motor de indução)		
Número de unidades	U	-
Potência nominal	S	MVA
Potência ativa nominal	P	MW
Potência ativa máxima	PM	MW
Fator de potência nominal	$\cos \Phi$	-
Tensão nominal	V	kV
Tensão máxima	V	kV
Tensão mínima	V	kV
Corrente nominal do estator	I	A
Corrente máxima do estator	IM	A
Corrente de campo nominal	IFD	A
Corrente de campo máxima	$I_{fd_{max}}$	A
Inércia (gerador + turbina)	$WR^2$	Lb - ft <sup>2</sup>
Velocidade síncrona	n	Rpm
Limite inferior de operação ou faixas de operação não permitidas	P P1-P2	MW
Capacitância fase-terra do estator	C	$\mu F$
Constante de tempo transitória em vazio de eixo direto	T'do	s
Constante de tempo subtransitória em vazio de eixo direto	T''do	s
Constante de tempo transitória em vazio de eixo em quadratura	T'qo	s

Constante de tempo subtransitória em vazio de eixo direto	$T''q_0$	s
Constante de tempo transitória de eixo direto em curto-circuito	$T'd$	s
Constante de tempo subtransitória de eixo direto em curto-circuito	$T''d$	s
Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em curto-circuito	$T'q$	s
Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em curto-circuito	$T''q$	s
Constante de tempo da armadura	$T_a$	s
Representação da saturação	$A_g / B_g$	-
Resistência de campo a 75°C	$R_{fd}$	$\Omega$
Constante de tempo subtransitória de campo	$T''f$	s

## 5. Parâmetros de Máquinas Síncronas para Estudos

*Tabela 12.3 – Parâmetros de Máquinas Síncronas para Estudos*

Parâmetros	Denom	Unidade	Valor nas Bases Tensão Nominal	
			Potência Nominal	Potência 100 MVA
Constante de inércia	H	s		
Reatância síncrona de eixo direto não saturada	$X_d$	pu		
Reatância síncrona de eixo direto saturada	$X_{ds}$	pu		
Reatância transitória de eixo direto não saturada	$X'_d$	pu		
Reatância transitória de eixo direto saturada	$X'_{ds}$	pu		
Reatância subtransitória de eixo direto não saturada	$X''_d$	pu		
Reatância subtransitória de eixo direto saturada	$X''_{ds}$	pu		
Reatância síncrona de eixo em quadratura não saturada	$X_q$	pu		
Reatância síncrona de eixo em quadratura saturada	$X_{qs}$	pu		
Reatância transitória de eixo em quadratura não saturada	$X'_q$	pu		
Reatância transitória de eixo em quadratura saturada	$X'_{qs}$	pu		
Reatância subtransitória de eixo em quadratura não saturada	$X''_q$	pu		
Reatância subtransitória de eixo em quadratura saturada	$X''_{qs}$	pu		
Reatância de Poitier	$X_p$	pu		
Reatância de dispersão não saturada	$X_L$	pu		
Reatância de dispersão saturada	$X_{Ls}$	pu		
Reatância de sequência negativa não saturada	$X_2$	pu		
Reatância de sequência negativa saturada	$X_{2s}$	pu		
Reatância de sequência zero não saturada	$X_0$	pu		
Reatância de sequência zero saturada	$X_{0s}$	pu		
Resistência da armadura a corrente contínua	$R_a$	pu		
Resistência da armadura a corrente alternada	$R_1$	pu		
Resistência da armadura de sequência negativa	$R_2$	pu		
Resistência da armadura de sequência zero	$R_0$	pu		

Resistência de aterramento	$R_t$	$\Omega$		
Reatância de aterramento	$X_t$	$\Omega$		
Relação de curto-circuito	$R_{cc}$			
Reatância de magnetização	$X_m$	pu		
Relação do transformador de aterramento	RTA	s		
Reatância do transformador de aterramento	$X_{TA}$	pu		

**Tabela 12.4 – Parâmetros do Sistema de Excitação para Estudos**

Parâmetros	Denom.	Unidade
Valor de Efd para o qual há troca do ganho de realimentação (AC3A) *	Efdn	Pu
Tensão de excitação para definir a saturação (excitatrizes CC e tipo AC5A) *	Efd1, Efd2	Pu
Referência para troca de velocidade (DEC1A) *	Esc	Pu
Fator de carregamento do retificador	Fex	
Corrente de campo da máquina síncrona	Ifd	Pu
Limite de corrente de saída da excitatriz	Ilr	Pu
Ganho do regulador de tensão	Ka	pu/pu
Ganho do controlador de ação descontínua (DEC1A) *	Kan	pu/pu
Ganho do segundo estágio do regulador	Kb	pu/pu
Fator de carregamento do retificador proporcional à reatância de comutação	Kc	
Fator de desmagnetização, função das reatâncias do alternador da excitatriz	Kd	
Constante da excitatriz relacionada com o campo autoexcitado	Ke	
Ganho do limitador da tensão terminal (DEC1A) *	Ketl	pu/pu
Ganhos do sistema estabilizador de controle da excitação	Kf, Kn	pu/pu
Ganho da realimentação do laço interno do regulador do campo (ST3A) *	Kg	pu/pu
Ganho da realimentação de corrente da excitatriz (AC2A) *	Kh	pu/pu
Ganho do limitador de corrente de campo da excitatriz (AC6A) *	Kh	pu/pu
Coefficiente de ganho do circuito de potencial	Ki	
Ganho do limitador de corrente de saída da excitatriz	Klr	pu/pu
Ganho do laço direto do ldo regulador do campo (ST3A) *	Km	
Coefficiente de ganho do circuito de potencial	Kp	
Constante associada com o regulador e suprimento de potência ao campo do alternador	Kr	
Ganho sinal estabilizador de potência (PSS1A) *	Ks	pu/pu
Ganhos do sinal estabilizador de potência (PSS2A) *	$K_{s1}, K_{s2}, K_{s3}$	pu/pu
Faixa do canal de ajuste rápido	Kv	pu
Constante do filtro (PSS2A) *	M	s
Constante do filtro (PSS2A) *	N	s
Componente resistiva de compensação da carga	Rc	pu
Função de saturação da excitatriz	Se	
Constante de Tempo do regulador de tensão	Ta, Tb, Tc,	s
Constante de tempo do regulador de tensão	Tb1, Tc1, Tk	s

Constante de tempo do controlador de ação descontínua (DEC1A) *	Tan	s
Constante de tempo do controlador de ação descontínua (DEC2A) *	Td1	s
Tempo de retardo (DEC3A) *	Tdr	s
Constante de tempo da excitatriz	Te	s
Constante de tempo do estabilizador do sistema de controle da excitação	Tf	s
Constantes de tempo do estabilizador do sistema de controle da excitação	Tf2,Tf3	s
Constante de tempo do limitador da corrente de campo da excitatriz	Th,Tj	s
Constante de tempo do avanço do regulador (AC6A) *	Tk	s
Constante de tempo do laço interno do regulador (ST3A) *	Tm	s
Constante de tempo do filtro de entrada do regulador	Tr	s
Tempo para atuação do reostato	Trh	s
Constante de tempo do <i>washout</i> do PSS	Tw1,Tw2,Tw3	s
Constante de tempo do <i>washout</i> do PSS	Tw4,Tw5	s
Constante de tempo do compensador de avanço do PSS	T1,T3	s
Constante de tempo do compensador de atraso do PSS	T2,T4	s
Constante de tempo do <i>washout</i> do PSS	T5	s
Constante de tempo do transdutor do PSS	T6,T7	s
Constante de tempo do filtro do PSS	T8	s

---

\* Conforme IEEE Std. 421.5-1992

## 13. CONECTIVIDADE, INTERFACES DE PROGRAMAÇÃO, PARAMETRIZAÇÃO, ENSAIO, OPERAÇÃO E APOIO

### 13.1 GENERALIDADES

O sistema de excitação deverá permitir a obtenção de informações, bem como sua operação remota por meio de protocolos de comunicação padronizados, trocando dados e informações pertinentes ao seu processo. Deverá permitir a parametrização em tempo real com a unidade em operação, bem como permitir ensaios em tempo real com a unidade geradora em operação e fora de operação.

### 13.2 CONECTIVIDADE

O sistema de excitação deverá possuir meios de comunicação que permitam uma conectividade a outros sistemas permitindo assim a troca de informações bem como a operação do mesmo através desta conectividade.

A interface de comunicação deverá resistir a ruídos inerentes do meio onde se encontra instalado o sistema de excitação. Para isso, o meio de comunicação e o protocolo de comunicação devem ser robustos e projetados para serem empregados em usinas de geração de energia, respeitando as características de isolamento e interferência eletromagnética deste tipo de ambiente.

A conectividade do Sistema de Excitação deverá utilizar Protocolos desenvolvidos para o segmento de geração de energia, tais como, IEC61870, DNP 3.0, Modbus TCP e Serial, IEC61850 e suas variações.

O meio de conectividade para troca de informações pode ser implementado através de rede de cabos blindados ou fibra óptica, em rede serial ou em rede ethernet.

### 13.3 PARAMETRIZAÇÃO

O sistema de excitação deverá permitir sua parametrização (ajuste de valores), mesmo com o equipamento em operação ou com o gerador sincronizado no sistema.

A parametrização do Sistema de Excitação deve possuir uma interface amigável, preferencialmente gráfica para facilitar o entendimento das malhas de controle do regulador de tensão.

### 13.4 RECURSOS PARA ENSAIOS

O sistema de excitação e regulação de tensão deverá possuir recursos que possibilitem a realização e facilitação de ensaios e teste de sua performance, dinâmica de operação, bem como confirmação de sua parametrização para qualquer situação de operação.

São recursos desejados:

**Degrau** – Aplicação de degrau nas referências de suas malhas de controle em qualquer condição operativa, propiciando, assim, a verificação da dinâmica da malha de controle;

**Comando direto** – Permitir o comando direto de malhas de controle intermediárias e de atuação direta do conversor de potência. A facilidade de abrir a malha de controle permite diagnosticar problemas intermediários e outras análises.

**Supervisão de Sinais** – Permitir a supervisão de sinais através de interface de conectividade, permitindo, desse modo, monitorar e supervisionar todos os sinais do



sistema de regulação e excitação, inclusive os sinais intermediários das malhas de controle.

**Forçamento de Sinais** – Permitir o forçamento de sinais de entrada e saída no controlador do sistema de excitação e regulação de tensão através de comandos lógicos.

**Registrador de Sinais Analógicos e Digitais** – Os sistemas de regulação de tensão deverão possuir a capacidade de gerar registros internos de sinais. Tais registros deverão ser programáveis e permitir uma série de combinações para o diagnóstico do sistema de excitação e regulação de tensão, da unidade geradora e do comportamento dinâmico do sistema.

O registrador interno de sinais deve permitir o registro de sinais analógicos (contínuos) ou sinais digitais (discretos) ou mesmo a combinação dos dois. Todos são programados através de *software* de Edição de Configurações e carregados na CPU para uso conforme cada necessidade. Deve ser possível programar o número de sinais que deseja registrar (analógicos ou digitais), o tempo de registro, a cor do sinal, dar nome ao registro, dar nome ao sinal registrado, converter o sinal para um valor absoluto ou percentual, o disparo do registro, o nome do disparo, o tempo de pré-disparo.

O registro de sinais deve ser compatível com o padrão Contrade, e possuir informações básicas para suporte a análise, tais como: Nome unidade de origem; Identificação da unidade de origem; Descrição do Registro; Condição/Motivo do disparo; Data e Hora do Registro; Desvios; Frequência da linha.

A estampa da base de tempo do controlador em cada registro deverá ser igualmente registrada, mesmo se a base de tempo for sincronizada por relógio externo.

O taxa de aquisição do registro deve ser a mesma do controle, uma vez que o sinal é obtido dentro do controlador.

Os registros devem possuir as seguintes características básicas:

- h) Tempo de pré-falta: configurável (em passos de 100ms) e menor que o tempo total do registro
- i) Taxa de amostragem: conforme taxa da tarefa em que o sinal estiver sendo processado (em geral ao redor de 10ms)
- j) Duração do registro: até que o parâmetro, usado como *trigger*, volte ao normal.
- k) Tempo de pós falta: configurável em passos de 100ms. O Ajuste típico é de 120 segundos.
- l) Estampa de Tempo: o relógio interno do Controlador (CPU) pode ser sincronizado a um sinal de externo de tempo, tal como GPS;
- m) Disparo de *Trigger*: o Disparo, em geral, deve ser programado para os seguintes sinais: Partida, Parada, Fechamento do Disjuntor, Abertura do Disjuntor, Falha do Regulador, Degrau Aplicado no Regulador, Disparo Manual. Contudo o disparo pode ser programado e utilizar qualquer sinal ou combinações de sinais;
- n) Armazenamento: os registros devem ser armazenados em memória não volátil, e a capacidade de armazenamento deve ser maior ou igual a 32 Mbytes;
- o) Deleção dos registros: os registros memorizados poderão ser apagados, quando for esgotada a capacidade de memória e haja a necessidade de memorizar novos dados. Nesse caso, os novos dados são gravados sobre os registros mais antigos.
- p) Capacidade: o regulador deverá permitir até 50 registros armazenados, sendo que, essa fila de registros, poderá ser circular ou limitada, configurada por escolha do usuário.

**Registrador de Eventos** – O regulador deverá ser capaz de gerar registros de eventos, tais como ações de comando, ações operativas e toda e qualquer sinalização discreta do equipamento, bem como suas entradas e saídas discretas associadas ao controle e proteção da unidade. Deve estar associada à base de tempo amostrada em ano, mês, dia, hora, minuto, segundo e milissegundo.

O regulador deverá ser capaz de registrar sinais e eventos simultaneamente a fim de fornecer dados para análise e manutenção do equipamento.

### **13.5 PROGRAMABILIDADE**

O sistema de excitação deverá permitir alterações de sua estrutura de controle e de suas lógicas discretas por meio de pontos de extensão que permitam a customização da aplicação.

Para a parte não customizável (algoritmos proprietários, itens críticos de segurança etc.), o fabricante deverá informar a função de transferência de modo a permitir adequadamente a realização dos estudos de simulação por parte dos usuários do sistema.

Recomenda-se a utilização de ambiente gráfico de programação para facilitar o entendimento. Neste aspecto, o uso da IEC61131-3, como referência de programabilidade, tem sido aceito pela maioria dos fabricantes.

## 14. CONFIABILIDADE

A principal função do sistema de excitação dentro do processo de geração de energia é prover o controle confiável da energia elétrica fornecida para o sistema de transmissão e seus consumidores. Nesse sentido, um sistema de excitação deve alcançar os mais elevados índices de confiabilidade e disponibilidade possíveis, dentro das limitações técnicas, econômicas e financeiras. Para tanto, o sistema de excitação deve considerar os seguintes aspectos:

- Estresse elétrico, térmico ou mecânico nos componentes, para garantir que os componentes não sofram desgaste prematuro. Nesse caso, o equipamento deve estar de acordo com as normas e limites aplicáveis constantes na Tabela 14.1:

*Tabela 14.1 – Normas e limites de aspectos climáticos e estabilidade mecânica*

Norma	Descrição	Limites
IEC 60068-2-1	Environmental testing Part 2-1: Tests – Test Ab: Cold	-40°C ± 3°C / 16 h ± 1 h / 1 ciclo Alimentação desconectada
IEC 60068-2-2	Environmental testing Part 2-2: Tests – Test Bb: Dry heat	70°C ± 2°C / 16 h ± 1 h / 1 ciclo Alimentação desconectada
IEC 60068-2-14	Basic Environmental Testing Procedures Part 2: Tests – Test N: Change of Temperature	Teste resistência, teste Na -40°C ± 3°C to 70°C ± 2°C 9 h / 5 ciclos Alimentação desconectada
		Teste de imunidade, teste Nb 5°C ± 2°C to 55°C ± 2°C Velocidade da variação de temperatura = 3°C/min / 2 ciclos Alimentação conectada
IEC 60068-2-30	Environmental testing Part 2: Tests - Test Db and guidance: Damp heat, cyclic (12 + 12-hour cycle)	55°C / 12+12 h / 2 ciclos Alimentação desconectada
IEC 60068-2-6	Environmental testing Part 2: Tests - Test Fc: <b>Vibration</b> (sinusoidal)	Movimento: <b>Senoidal</b>  5Hz ≤ f < 8,4Hz: <b>3,5mm<sub>pico</sub></b> deslocamento, amplitude constante  8,4Hz ≤ f < 150Hz: <b>1,0g<sub>pico</sub></b> aceleração, amplitude constante  Tipo de Vibração: Ondulatória, taxa de 1oitava/min (± 10%)  Vibração duração: 2 ciclos ondulatórios em cada eixo mutualmente perpendicular (X,Y,Z)
IEC 60068-2-27	Environmental testing Part 2-27: Tests - Test Ea and guidance: <b>Shock</b>	Tipo de impacto: <b>Meia senoide</b> Severidade do impacto: <b>15g<sub>pico</sub></b> Duração nominal do impacto: <b>11ms</b> Quantidade de planos de aplicação: <b>6 (± x, ± y, ± z)</b>  Número de impactos por plano: <b>3; 18 no total</b>

- Parâmetros de tolerância dos componentes eletrônicos, para garantir que os circuitos irão funcionar corretamente dentro do limites esperados;
- Facilidade de inspeção de funcionamento, manutenção e testes;
- Proteção contra sobretensão e sobrecorrente. Circuitos de interface (alimentação, entradas e saídas digitais e analógicas, portas de comunicação etc.) são suscetíveis a distúrbios de origens diversas (atmosférica, chaveamento de cargas, efeitos capacitivos e indutivos, descarga eletrostática etc). Para tanto, esses circuitos de interface devem possuir elementos de proteção rearmáveis para proteção do sistema. Desse modo, o equipamento deve estar de acordo com as normas e limites aplicáveis constantes na Tabela 14.2:

**Tabela 14.2** – Normas e limites de aspectos de imunidade a distúrbios eletromagnéticos

Norma	Descrição	Especificação	Critério
IEC 61000-4-4	Fast transients	±1 kV (IOs)	B
		±2 kV (alimentação)	
		5/50 Tr/Th ns	
		5 kHz frequência de repetição	
IEC 61000-4-5	Surges	1,2/50 (8/20) Tr/Th µs	B
		Linha para terra ±1 kV (IOs)	
		±2 kV (alimentação)	
		Linha para linha ±2 kV (alimentação)	

- Interferência e compatibilidade eletromagnética. Recomenda-se o uso de filtros para desacoplamento de ruídos e transientes nos circuitos de interface. Além da utilização de boas práticas de projeto, como a utilização de cabos blindados e trançados para tráfego de sinais analógicos e de comunicação. Nesse caso, o equipamento deve estar de acordo com as normas e limites aplicáveis constantes na Tabela 14.3:

**Tabela 14.3** – Normas e limites de interferência e compatibilidade eletromagnética

Norma	Descrição	Especificação	Critério/Limites
CISPR 11	Emission Enclosure port	30 MHz – 230 MHz	40 dB(µV/m) quasi-peak
		230 MHz – 1000 MHz	47 dB(µV/m) quasi-peak
	Emission Telecommunications/ network port	0,15 MHz – 0,5 MHz	97 dB(µV) – 87 dB(µV) quasi-peak 84 dB(µV) – 74 dB(µV) average 53 dB(µA) – 43 dB(µA) quasi-peak 40 dB(µA) – 30 dB(µA) average

		0,5 MHz – 30 MHz	87 dB(μV) quasi-peak 74 dB(μV) average  43 dB(μA) quasi-peak 30 dB(μA) average
	Emission	0,15 MHz – 0,5 MHz	79 dB(μV) quasi-peak 66 dB(μV) average
	Low voltage AC mains port	0,5 MHz – 30 MHz	73 dB(μV) quasi-peak 60 dB(μV) average
IEC 61000-4-2	Electrostatic discharge	4kV (contato)	A
		8kV (ar)	
IEC 61000-4-3	Radio-frequency electromagnetic field. Amplitude modulated	80 a 1000 MHz	A
		10 V/m	
		80% AM (1 kHz)	
IEC 61000-4-6	Radio-frequency common mode	0,15 to 80 MHz	A
		10 V	
		80% AM (1 kHz)	
IEC 61000-4-8	Power-frequency magnetic field	60 Hz	A
		30 A/m	
IEC 61000-4-11	Voltage dips	0% tensão residual	B
		1 ciclo	
		40% tensão residual (10/12 em 50/60Hz)	C
	70% tensão residual (25/30 em 50/60Hz)		
	Voltage interruptions	0% tensão residual	C
250/300 em 50/60Hz			

Aspectos de redução do número de componentes também devem ser considerados. Entretanto, a redução de componentes para o aumento da confiabilidade deve estar confrontada com o aumento/redução da disponibilidade total do sistema. A redundância de dispositivos eletrônicos, apesar de reduzir a confiabilidade total do sistema, dado que se aumenta a quantidade de componentes eletrônicos com probabilidade de falha, aumenta a disponibilidade do sistema.

Sistemas complexos, como é o caso de um sistema de excitação, requerem implementação modular. Projeto modular é indicado para sistemas complexos para garantir que falhas possam ser corrigidas com relativa facilidade a partir da troca da parte danificada ou com mau funcionamento. Com isso, aumenta-se a disponibilidade total do sistema, sendo esta função do tempo entre falhas e o tempo de reparo conforme equação abaixo:

$$A = \text{MTBF}/(\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

Em que:

A = Disponibilidade. Definido como a probabilidade de um item estar disponível quando for requisitado, ou proporção de tempo total que o componente está disponível para uso.

MTBF = *Mean Time Between Failure* (Tempo médio entre falhas)

MTTR = *Mean Time To Repair* (Tempo médio de reparo)

Por meio da equação, nota-se que a modularidade reduz o tempo MTTR, dado que as partes podem ser substituídas sem que todo o sistema entre em manutenção. Assim, melhora-se a disponibilidade do sistema.

## 15. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS: FUNCIONAL E DETALHADA

Nesta Seção, são incluídas uma “Especificação Técnica Funcional” e uma “Especificação Técnica Detalhada”. São especificações parciais, para um sistema de excitação estático, permitindo conhecer o uso dos aspectos abordados nas demais Seções, no detalhamento da preparação de uma especificação para uma aplicação específica.

Ambas as especificações foram preparadas para compra em separado de um novo sistema de excitação para a recapitação de geradores hidroelétricos de baixa velocidade e potência média, que eram equipadas originalmente com excitatrizes rotativas CC.

A “Especificação Técnica Funcional” inclui, praticamente, todas as partes da estrutura de uma especificação como discutidas na Seção 11, enquanto a “Especificação Técnica Detalhada” abrange apenas a parte B daquela estrutura.

Deve ser considerado, no uso destes dois exemplos de especificações, que as mesmas foram preparadas antes da disponibilidade do presente Guia, não considerando, portanto, muitas de suas sugestões e recomendações.

Comentários e aspectos que devem ser incluídos nos citados documentos para adaptá-los para a especificação de sistemas de excitação para compensadores síncronos, turbogeradores, grandes geradores hidroelétricos, motores síncronos e recapitação em geral são discutidos neste item. Incluem-se também as alterações que se fazem necessárias, caso se deseje especificar um sistema de excitação com excitatriz CA ou CC.

### 15.1 EXEMPLO PARCIAL DE UMA "ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DETALHADA"

#### 1. Requisitos Gerais

- 1.1. O Sistema de Excitação deverá ser estático, alimentado por meio de um transformador de excitação ligado diretamente aos terminais do gerador e capaz de funcionar sem distúrbios sob qualquer condição de carregamento do gerador e de operação do Sistema de Transmissão ao qual as unidades geradoras da UHE de CLIENTE estão interligadas.
  - 1.1.1. Normalmente, a alimentação do sistema de excitação para motores síncronos é feita por meio de uma rede auxiliar.
  - 1.1.2. Em alguns casos de recapitação, pode-se encontrar sistemas de excitação alimentados por máquinas auxiliares ou rede auxiliar.
- 1.2. O FABRICANTE deverá incluir no escopo do fornecimento o estudo e o projeto de interligação do transformador de excitação ao barramento blindado que alimenta os cubículos de surto e aterramento, bem como o projeto executivo e de instalação do Sistema de Excitação, objeto deste fornecimento, nas instalações existentes.
  - 1.2.1. O FABRICANTE poderá incluir este item no seu escopo de fornecimento.
  - 1.2.2. Em recapitação de sistemas de excitação, este item pode ser executado pelo cliente.
- 1.3. O projeto de instalação deverá contemplar, no mínimo, os seguintes pontos:
  - 1.3.1. Definição da localização do transformador de excitação;
  - 1.3.2. Em alguns casos de recapitação de sistema de excitação, deve-se tentar manter o mesmo *layout* do sistema existente.

- 1.3.3. Detalhes da localização e fixação dos demais cubículos do Sistema de Excitação. Estes cubículos deverão ser instalados no piso do gerador no local ocupado pelo regulador de tensão atual;
  - 1.3.4. Em alguns casos de recapacitação do sistema de excitação, o projeto de instalação (interligação) poderá ser executado pelo fabricante ou pelo cliente, se preferir.
  - 1.3.5. Detalhes da interligação do transformador de excitação com as pontes retificadoras. Esta interligação deverá ser efetuada por meio de cabos em leitos instalados no piso inferior, cujo percurso deverá ser definido pelo FABRICANTE em seu projeto de instalação;
  - 1.3.6. Detalhes da interligação do Sistema de Excitação com os anéis coletores. Esta interligação deverá ser efetuada por meio de cabos utilizando, preferencialmente, o percurso atual;
  - 1.3.7. Detalhes das alterações a serem efetuadas no barramento blindado do gerador;
  - 1.3.8. Projeto de integração do sistema de excitação com o sistema de supervisão, controle e proteção (já existentes) da Usina, revisando os atuais desenhos onde necessário.
- 1.4. O FABRICANTE deverá enviar para aprovação do CLIENTE um relatório técnico sobre o sistema de excitação, contendo os seguintes itens:
    - 1.4.1. solicitações de corrente e tensão que os diversos elementos (transformador de excitação, ponte conversora, sistema de desexcitação, disjuntor de campo etc.) estarão submetidos durante a operação do gerador (regimes permanente e transitório) e durante curto-circuito;
    - 1.4.2. características elétricas principais destes elementos;
    - 1.4.3. critérios de seleção do tiristor e do respectivo fusível.

## **2. Transformador de Excitação**

- 2.1. O transformador deverá ser conectado diretamente aos terminais do gerador, adequado para instalação abrigada dentro de cubículo, tipo seco, com resfriamento natural preferencialmente. Quando instalado fora da casa de máquinas, o transformador poderá ser a óleo, com todos os cuidados que tal tipo de refrigeração exige, como, por exemplo, a captação de óleo.
  - 2.1.1. Em casos em que o sistema de excitação for alimentado por uma rede auxiliar ou máquina auxiliar, o transformador de excitação deverá ser conectado a estes circuitos. Esse requisito não se faz necessário quando o sistema de excitação não tem exigência de tensão de teto.
- 2.2. O transformador deverá obedecer aos requisitos das normas IEC 146-1-3 (\*\*\*) e NBR 10295 (\*\*\*), no que se refere às características para transformadores de retificadores. O FABRICANTE deverá submeter à aprovação do CLIENTE os dados técnicos suficientes, demonstrando a adequação do projeto do transformador ao Sistema de Excitação proposto, bem como aos requisitos técnicos definidos nesta Especificação.
- 2.3. O transformador deverá possuir blindagem eletrostática entre os enrolamentos primário e secundário, com terminais acessíveis e adequados para cabos de cobre para conexão à malha de terra da Usina. Deverão ser previstos RTDs sensíveis a



temperatura no enrolamento de baixa tensão, para fazer a supervisão de temperatura do mesmo.

- 2.4. O cubículo do transformador de excitação deverá obedecer aos requisitos técnicos especificados e ser provido de buchas de passagem e flanges adequados para conexão ao barramento e ao barramento do cubículo de excitação, obedecendo a norma ANSI C37.20 – Switchgear Assemblies. Todos os elementos de fixação e conexões flexíveis para conexão ao barramento deverão ser incluídos no fornecimento.
- 2.5. O fechamento dos enrolamentos primários e secundários deverá ser feito internamente ao cubículo do transformador por meio de barras de cobre isoladas para a classe de tensão do cubículo.
- 2.6. Deverão ser previstos elos removíveis nos lados de alta tensão e baixa tensão do transformador.
- 2.7. Deverão ser previstos os meios necessários para retirada do transformador de excitação de dentro do cubículo.
- 2.8. A tensão do secundário dos transformadores deverá ser adequada para possibilitar o fornecimento da tensão de teto da excitatriz, com um curto-circuito trifásico nos terminais de alta tensão do transformador elevador da usina.
  - 2.8.1. No caso em que a alimentação do sistema de excitação for por meio de um gerador auxiliar ou rede auxiliar, deve-se considerar apenas a tensão nominal máxima para determinar a tensão do secundário do transformador de excitação.
- 2.9. A capacidade do transformador deverá ser a adequada para a presente aplicação e deverá considerar a presença das correntes harmônicas geradas pelas pontes conversoras. A impedância de curto-circuito do transformador deverá ser escolhida em conjunto com a capacidade de a ponte conversora suportar a corrente de curto-circuito no tiristor.
- 2.10. O transformador deverá ser capaz de suportar os requisitos de desempenho definidos nesta ESPECIFICAÇÃO, bem como deverá suportar um curto-circuito trifásico no seu lado secundário.
- 2.11. Dispositivos de supervisão e proteção deverão ser fornecidos de acordo com os requisitos definidos nesta ESPECIFICAÇÃO.

### **3. Transformadores de Corrente**

- 3.1. Os transformadores de corrente para conexão das proteções de sobrecorrente deverão ser adequados para uso interno, encapsulados em resina isolante à base de epoxi, corrente secundária nominal de 5A, frequência nominal de 60 Hz, classe de exatidão 10 para proteção e isolamento F. A corrente térmica nominal, a corrente dinâmica nominal e a carga deverão ser determinadas pelo FABRICANTE em função dos níveis de curto-circuito e dos tempos de atuação da proteção e comprovados por memória de cálculo.

### **4. Pré-excitação**

- 4.1. Caso seja solicitada uma pré-excitação CA, deverá ser previsto um transformador a seco, alimentado pelos Serviços Auxiliares CA da Usina, com capacidade suficiente para permitir a excitação inicial do gerador. Esse transformador deverá

ser dimensionado para permitir, no mínimo, quatro partidas consecutivas do gerador dentro do intervalo de tempo de uma hora.

- 4.2. Caso seja solicitada uma pré-excitação CC, deverá ser previsto uma alimentação pelos Serviços Auxiliares CC da Usina com capacidade suficiente para permitir a excitação inicial do gerador. Esse circuito deverá ser dimensionado para permitir, no mínimo, quatro partidas consecutivas do gerador dentro do intervalo de tempo de uma hora.
- 4.3. Também deverá ser previsto um circuito de pré-excitação alimentado a partir de fonte CC obtida dos serviços auxiliares da Usina.
- 4.4. O circuito de pré-excitação deverá ser ligado às barras CC através de diodos de bloqueio e contadores no caso de uma pré-excitação CC; e de ponte de diodos e contadores no caso de uma pré-excitação CA.
- 4.5. Deverá ser prevista a geração de sinal de alarme quando houver tempo excessivo na pré-excitação e relés auxiliares para indicar o estado "ligado-desligado".
- 4.6. Em sistemas de excitação para motores síncronos ou para máquinas síncronas com alimentação auxiliar ou gerador auxiliar não é necessário o circuito de pré-excitação.

## **5. Ponte Conversora**

- 5.1. As pontes tiristorizadas conversoras deverão ser compostas por pontes trifásicas, de seis pulsos, totalmente controladas.
- 5.2. Deverão ser previstas barreiras entre os módulos para impedir que falha em uma delas se propague para as demais. Poderá ser possível a execução de manutenção em uma ponte conversora estando o gerador em serviço. Tal funcionalidade é aplicável a máquinas térmicas, cujo tempo de recomposição após uma manutenção com a máquina fora do sistema pode ser muito grande.
- 5.3. Por norma de segurança considera-se adequada, mesmo com redundância, a solicitação de uma parada programada para reparos nas pontes tiristorizadas do sistema de excitação.
- 5.4. As pontes deverão ter projeto que facilite a sua remoção durante manutenção.
- 5.5. Deverá ser considerado um fator de segurança mínimo de 2,5 entre a tensão nominal de pico inversa ( $V_{RRM}$ ) do tiristor e a máxima tensão de pico inversa que aparece durante a operação da ponte.
- 5.6. A ponte deverá possuir um sistema próprio de geração de pulsos capaz de fazer o seu disparo durante as condições de regime permanente, transitório e de curto-circuito a que o gerador está submetido.
- 5.7. A ponte deverá ser dimensionada considerando a corrente de curto-circuito (prospectiva) devido à queima de um dos tiristores, sem considerar que o respectivo fusível irá operar, considerando a impedância do transformador de excitação. Esse dimensionamento deverá considerar a máxima tensão terminal da máquina e o mínimo ângulo de disparo (alfa) do tiristor.
- 5.8. Sistema de Ventilação
  - 5.8.1. As pontes conversoras poderão ser resfriadas por ventilação forçada ou natural. No caso de ventilação forçada, o resfriamento da ponte deverá ser efetuado por ventiladores, em circuito aberto.

- 5.8.2. Existem alguns casos em que o ar quente que sai dos cubículos das pontes tiristorizadas não pode ser lançado no ambiente. Nesses casos, devem ser utilizados sistema de resfriamento de ciclo fechado (trocadores de calor).
- 5.8.3. Em instalações onde o ambiente externo é agressivo, também pode ser necessária a utilização de um circuito fechado de resfriamento (trocador de calor).
- 5.8.4. Os ventiladores deverão proporcionar fluxo de ar suficiente ao pleno resfriamento da ponte para todas as condições de operação do Sistema de Excitação previstas nesta Especificação. As entradas de ar deverão ser providas de filtros.
- 5.8.5. O sistema de ventilação deverá ser fornecido completo com ventiladores, motores, contadores, equipamentos auxiliares de comando, sinalização e chaves de fluxo de ar.
- 5.8.6. O nível de ruído dos ventiladores, medido à distância de um metro do cubículo com as portas fechadas, não deverá exceder 75 dB (A).

## **6. Alimentação do Transformador de Excitação**

- 6.1. A alimentação do transformador de excitação deverá ser derivada do barramento blindado através de sangria efetuada logo após o cubículo de surtos.

## **7. Disjuntor ou Contator de Campo e Resistor de Descarga**

- 7.1. Deverá ser previsto um disjuntor (ou contator) de campo, montado em cubículo separado, operado eletricamente através de comando local ou remoto. O cubículo deverá conter todos os dispositivos necessários para operação do disjuntor, bem como os tiristores e a resistência de descarga para desexcitação rápida do campo. O disjuntor de campo deverá ser equipado com uma indicação local, junto ao equipamento, da sua posição (aberto-fechado).
- 7.2. Em caso de reforma de sistema de excitação, existe a possibilidade de se manter o mesmo disjuntor de campo e resistência de descarga. Nesse caso, deve ser considerada a interface do novo regulador com o disjuntor existente.
- 7.3. O disjuntor (ou contator) deverá ser provido de uma bobina de fechamento e uma bobina de abertura, todas alimentadas em CC por circuitos independentes. Cada circuito deverá ser supervisionado com contatos auxiliares NA e NF fornecidos livres.
- 7.4. Poderão ser previstos meios que permitam a abertura manual do disjuntor independentemente da tensão de controle.
- 7.5. As desexcitações em paradas normais deverão ser efetuadas pelo retardo nos pulsos de disparo (operação da ponte como inversor e bloqueio dos pulsos de disparo) seguindo-se abertura do disjuntor (ou contator) de campo, quando a corrente de campo atingir um valor baixo, de forma a preservar os contatos.

## **8. Requisitos de Desempenho do Sistema de Excitação**

- 8.1. Com a ponte de tiristores redundante fora de serviço, temperatura ambiente interna ao cubículo de 50°C, com corrente nominal máxima pré-falta e sem ultrapassar a temperatura de junção garantida para os tiristores, o sistema de excitação deverá possuir as seguintes características:

- 8.1.1. Tensão de teto referenciada a tensão nominal na linha do entreferro (gerador em vazio), com enrolamento de campo a 100°C, não inferior a +5,0 pu (positiva) ou -4,0 pu (negativa, sem que haja reversão de corrente). Esse critério poderá ser utilizado em caso de reforma do sistema de excitação. A tensão de teto depende basicamente do sistema a qual o gerador está interligado. Um estudo de estabilidade e resposta do gerador/sistema deve ser feito para determinar o valor adequado. Sistemas de excitação com alimentação através de rede auxiliar ou gerador auxiliar não necessitam deste estudo;
  - 8.1.2. As pontes deverão ser capazes de conduzir continuamente a corrente de campo necessária para operação contínua a 105% da tensão nominal e máxima potência aparente (MVA), com 100°C de temperatura do enrolamento de campo;
  - 8.1.3. Em máquinas grandes e médias com alta confiabilidade, a redundância de pontes tiristorizadas deve ser adotada. Para máquinas pequenas e motores síncronos, a redundância é opcional.
- 8.2. O sistema de excitação deverá ser capaz de desempenhar as funções abaixo relacionadas, com o regulador em modo automático e com a temperatura interna dos cubículos em 50°C:
- 8.3. Operação em Regime Permanente:
- Deverá ser capaz de manter a tensão média trifásica nos terminais do gerador dentro da faixa de 0,5% da tensão ajustada, levando-se em consideração a influência do compensador de corrente reativa, com a máquina operando como gerador ou compensador síncrono, nas seguintes condições de operação:
- 8.3.1. Qualquer carga dentro da faixa de operação do gerador;
  - 8.3.2. Qualquer tensão nos terminais do gerador dentro da faixa 80% a 110% do valor nominal;
  - 8.3.3. Qualquer frequência na faixa de  $\pm 5\%$  do valor nominal (60 Hz);
  - 8.3.4. Especificamente para operação em vazio, com qualquer velocidade na faixa de 90% a 150% da nominal.
- 8.4. Operação em Condições Transitórias
- 8.4.1. Rejeição de Carga Indutiva Máxima (com fator de potência nulo)  
A tensão máxima nos terminais do gerador não deverá ultrapassar a 110% da tensão terminal imediatamente após a rejeição. O tempo de retorno da tensão terminal para 105% do valor de regime pós-falta não deverá ser superior a 500ms. A tensão de regime permanente pós-falta deverá estabilizar dentro da faixa de 0,5% do valor de referência ajustado, considerando o *droop* de reativos (ou compensação de corrente reativa).
  - 8.4.2. Rejeição de Carga Nominal  
Mesmo considerando os efeitos da sobrevelocidade decorrente da rejeição de carga ativa, o regulador deverá manter o perfil de tensão dentro dos limites definidos no item anterior.
  - 8.4.3. Curto-Circuito no lado de AT do Transformador Elevador  
O sistema de excitação deverá ser capaz de manter 100% da tensão de excitação (campo) nominal quando a tensão terminal do gerador for

reduzida a 35% devido a um curto-circuito (critério definido pelo ONS). O FABRICANTE deverá considerar esse requisito na determinação da tensão secundária do transformador de excitação. Nesse caso, não deverá haver perda da tensão de sincronismo do sistema de disparo.

#### 8.4.4. Ciclo Térmico

O sistema de excitação deverá ser capaz de suportar o ciclo térmico abaixo, com ponte redundante fora de serviço, com a máxima corrente de campo pré-falta e sem ultrapassar a temperatura máxima do enrolamento de campo e a temperatura de junção garantida para os tiristores:

##### 8.4.4.1. Caso com reaplicação de tensão

- Operação do gerador com potência máxima, fator de potência nominal e tensão terminal máxima, por tempo suficiente para estabilização da temperatura (condição pré-falta);
- Uma falta trifásica externa, aplicada na barra de AT;
- Religamento trifásico (sem sucesso) após 500ms, seguido de uma segunda falta trifásica na barra de AT;
- Religamento trifásico (com sucesso) após 500ms;
- Operação subsequente nas condições pré-falta.

##### 8.4.4.2. Caso sem reaplicação de tensão

- O sistema de excitação deverá ser capaz de suportar, com ponte reserva fora de serviço, os efeitos decorrentes de um curto-circuito trifásico com duração de 100ms nos terminais do gerador, extinto por uma sequência de desligamento que inclua a abertura do disjuntor de campo.

## 9. Regulador de Tensão

- 9.1. O regulador de tensão deverá ser digital (microprocessado) com a possibilidade de operação automática ou manual, local ou remota, com interfaces de comunicação serial (RS 485) e *ethernet*, com protocolos de comunicação padronizados (MODBUS RTU, DNP3.0 ou IEC 870-101 para a interface serial e MODBUS TCP, IEC 870-104 sob *ethernet*).
- 9.2. A troca de informações entre o sistema de excitação e o sistema de supervisão poderá ser feita através de contatos secos e transdutores (sinais digitais e analógicos).
- 9.3. Os equipamentos necessários para o controle de tensão do gerador deverão ser montados no cubículo do regulador de tensão a ser instalado no piso do gerador ao lado dos cubículos das pontes de tiristores. Em caso de recapacitação do sistema de excitação, deve-se levar em consideração o *layout* existente.
- 9.4. O equipamento deverá ser composto por um modo automático, para regulação da tensão terminal do gerador, e um modo manual para controle da corrente de campo.
- 9.5. Em caso de redundância de canais (regulador eletrônico), estes deverão possibilitar o controle em modo automático ou manual.
- 9.6. A comutação de modo automático para manual deverá ser efetuada automaticamente em caso de falha do modo automático ou manualmente pelo

operador. Deverá ser previsto um circuito seguidor (*follow-up*) para manter o modo manual atualizado e permitir uma comutação sem perturbações na tensão terminal do gerador.

- 9.7. Deverá ser previsto o controle remoto do regulador de tensão a partir de comandos emitidos da Sala de Controle da Usina.
- 9.8. Deverá ser fornecido um console de operação que irá atender as máquinas 1 a 6, e com possibilidade de expansão para mais duas máquinas.
- 9.9. O regulador de tensão deverá ser do tipo de ação contínua, de resposta rápida, sem faixa morta, devidamente compensado e estabilizado. O controle deverá ser do tipo proporcional-integral-derivativo (PID), ou avanço-atraso, realizado numericamente. O regulador de tensão deverá ter uma realimentação com a corrente reativa gerada pela máquina (característica de *droop*), cujo ganho deverá ser ajustável no campo. O regulador deverá obter as informações de corrente e tensão terminais da máquina a partir dos transformadores de instrumentos (TCs e TPs) existentes.
- 9.10. O regulador deverá ser de construção modular. Variáveis importantes de medição deverão ser previstos na Interface de Operação para acompanhamento durante testes e comissionamento. Variáveis importantes internas ao controle poderão ser acessíveis externamente através de DACs para ensaios e comissionamento. O regulador deverá ter "interface" para outros controles em número suficiente. Essa interface será do tipo relé auxiliar (sinal digital) e transdutor 4 - 20mA (sinal analógico), cuja quantidade será determinada durante o projeto executivo.
- 9.11. O ajuste da tensão de referência deverá ser executado via *software*, o qual deverá ser capaz de ajustar a tensão terminal do gerador dentro da faixa de 80% a 110% da tensão nominal sob toda a faixa de operação do gerador.
- 9.12. O regulador de tensão deverá possuir as seguintes funções:
  - 9.12.1. Malha de Controle do Limitador Volt/Hertz

A curva de atuação deverá possuir limitação instantânea e temporizada, ajustável de acordo com as características de sobreexcitação do transformador de excitação, transformador elevador e do gerador.
  - 9.12.2. Malha de Controle do Limitador de Subexcitação

A linha de intervenção deste limitador deverá ser ajustável de modo a manter uma distância segura da curva limite de sobreaquecimento do estator e da curva limite de estabilidade. A atuação do limitador deverá evitar a atuação do relé de perda de excitação (40).
  - 9.12.3. Sinal Estabilizador de Potência

O sinal estabilizador deverá ser derivado da integral da potência acelerante e não deverá provocar variação na tensão terminal do gerador durante operação em regime permanente e durante variação manual da potência ativa da máquina. A função de Sinal Adicional de Estabilização não é usualmente utilizada em sistemas de excitação para motores síncronos, porém não há nada que impeça tal uso. A existência eventual de excitatrizes auxiliares pode dificultar a utilização desta função. Deverá possuir os seguintes recursos:

    - Possibilidade de desativação manual do sinal a partir do cubículo do regulador de tensão;

- Possibilidade de desativação automática do sinal quando ocorrer uma rejeição de carga;
- Possibilidade de utilização do sinal quando o gerador estiver operando como compensador síncrono;
- Possibilidade de desativação automática do sinal quando a tensão do gerador for superior a um valor ajustável na faixa de 100 a 130% e inferior a um valor ajustável na faixa de 70 a 100%. Essa desativação deverá ser temporizada. Deverá ser previsto meios para permitir a modificação por CLIENTE do valor de tempo ajustado;
- Possibilidade de desativação automática do sinal quando a potência do gerador for inferior a um valor ajustável;
- Possibilidade de limites ajustáveis e independentes para saída do sinal estabilizador;
- A reativação do sinal deverá ser realizada automaticamente, quando a condição de desligamento deixar de existir, e o sinal de saída estiver baixo o suficiente para não provocar oscilações na tensão terminal do gerador;
- Uma funcionalidade de *reset* não linear, necessária para evitar saturação da saída em tempo excessiva, deverá ser provida;
- A função de transferência do sinal estabilizador deverá ser enviada juntamente com a função de transferência do regulador, informando os ganhos, ajustes e limitadores para aprovação de CLIENTE.

#### 9.12.4. Malha de Controle do Limitador de Corrente Máxima de Campo

Esta função deverá limitar automaticamente a corrente de campo a um valor correspondente à capacidade térmica do sistema de excitação e do enrolamento de campo. Sua atuação deverá ser retardada quando houver sobrecargas transitórias devido à tensão de teto. O FABRICANTE deverá fornecer a curva de atuação do limitador juntamente com os estudos de ajustes propostos.

#### 9.12.5. Proteção contra falha a terra no rotor com dois níveis de atuação. Falta à terra é proteção utilizada principalmente em sistemas de excitação estática para geradores de médio e grande porte.

#### 9.12.6. Medição de temperatura do enrolamento de campo (para geradores de médio e grande porte).

#### 9.12.7. Redundância

O regulador de tensão deverá ser fornecido com um grau de redundância tal que uma falha (por exemplo: da sua CPU) não resulte no disparo do gerador. O regulador de tensão deverá ter alimentação de serviço auxiliar redundante, de modo a não haver desligamento do gerador na falta de um destes alimentadores.

## 10. Requisitos de Instrumentos e Dispositivos

### 10.1. Dispositivo de Interface Homem-Máquina com o Regulador de Tensão

Deverá ser fornecido um interface de comunicação, do tipo *touch-screen*, que permita operação, parametrização, ensaios e apoio em tempo real Os sinais

analógicos/digitais de interface com o Sistema de Excitação poderão ser transmitidos através de uma porta de comunicação serial ou *ethernet*.

Esta interface deverá ser acessível por *password* hierarquizado, de forma que o pessoal de operação não tenha acesso a toda parametrização.

Sinais analógicos e digitais de interface para máquinas pequenas e médias podem ser feitos por transdutores e contatos secos (relés auxiliares). Caso haja necessidade de redundância de informações, pode-se requerer outra interface via comunicação serial. A tendência atual é o uso de instrumentação inteligente, que permite comunicação em rede, havendo a tendência de desaparecimento da maior parte da instrumentação por cabo.

- 10.2. Deverão ser previstos, no mínimo, os seguintes comandos:
  - 10.2.1. Seleção de modo operação "Local/Remota".
  - 10.2.2. Seleção de modo controle "Automático/Manual".
  - 10.2.3. Comandos de "Aumentar/Diminuir" o valor da tensão de referência do modo automático ou manual.
  - 10.2.4. Comandos de "Aumentar/Diminuir" o valor da tensão de referência do modo manual.
  - 10.2.5. Comando de "Abrir/Fechar" o disjuntor de campo.
  - 10.2.6. Comando de ativação/desativação do sinal estabilizador (PSS).
  - 10.2.7. Comando de ativação/desativação dos limitadores.
  - 10.2.8. Bloqueio e Desbloqueio das pontes conversoras.
- 10.3. Deverão ser apresentados no *display*, no mínimo, as seguintes informações do regulador de tensão e campo da máquina:
  - 10.3.1. Corrente de Campo.
  - 10.3.2. Tensão de Campo.
  - 10.3.3. Valor de ajuste de  $V_{ref}$  no modo automático.
  - 10.3.4. Valor de ajuste de  $V_{ref}$  no modo manual.
  - 10.3.5. Temperatura do enrolamento de campo (em caso de excitação indireta a medição de temperatura do enrolamento de campo através do sistema de excitação não é possível).
  - 10.3.6. Potência ativa e reativa gerada pela máquina.
- 10.4. Deverão ser previstos os seguintes ensaios de aplicação de degrau:
  - 10.4.1. Referência de cada modo de controle.
  - 10.4.2. Referências dos limitadores.
- 10.5. Deverão ser apresentados os diagramas de blocos de cada função de transferência, associados a texto explicativo sobre seus ajustes (*help on-line*).

## 11. Dispositivos de Proteção e Supervisão

- 11.1. Sistema de Excitação proposto deverá ser provido com todos os dispositivos de supervisão e proteção.



- 11.2. Os dispositivos propostos deverão possuir, quando necessário, dois níveis de atuação: no primeiro nível é dado alarme, e no segundo é dado desligamento.
- 11.3. No mínimo, as seguintes supervisões/proteções deverão ser previstas:
- 11.3.1. Transformador de Excitação
- Função de proteção de sobrecorrente.
  - Detetores de temperatura para supervisão de temperatura dos enrolamentos de baixa tensão.
- 11.3.2. Ponte Conversora
- Deverão ser fornecidos dispositivos de proteção dos tiristores contra sobretensões.
  - Deverão ser fornecidos tiristores e resistores de proteção contra sobretensão (tipo *Crowbar*);
  - Os tiristores deverão ser protegidos, individualmente, por fusíveis de ação ultrarrápida, com dispositivos indicadores de ruptura e providos de contatos auxiliares para alarme e desligamento. O sistema deverá ser projetado de modo que se um tiristor entrar em curto-circuito, somente o fusível respectivo queime.
  - Deverá ser fornecido um circuito de Supervisão de Condução da Ponte com pelo menos as seguintes funções:
    - estado da ponte bloqueada/desbloqueada;
    - supervisão de corrente e da queima do fusível do tiristor, com dois níveis de atuação: alarme e desligamento da máquina.
  - Função de proteção de sobrecorrente de tempo reverso com unidade instantânea.
  - Supervisão de temperatura do conversor através do dissipador ou do ar de refrigeração.
  - Deverão ser fornecidas chaves de fluxo para detectar redução ou interrupção do fluxo de ar de resfriamento de cada ponte, com contatos para alarme
- 11.3.3. Para máquinas com excitatriz *brushless*, recomenda-se a utilização adicional de um relé de supervisão de falha de diodos rotativos.
- 11.3.4. Para sistema de excitação aplicado a motores síncronos, deve ser considerado um módulo adicional de supervisão de escorregamento para determinar o ponto em que a excitação deve ser aplicada ao rotor.
- 11.3.5. Perda de sincronismo e rotor bloqueado são proteções adicionais utilizadas em sistemas de excitação para motores síncronos.

## 12. Interfaces com o Sistema de Supervisão e Controle da e Proteções

- 12.1. O FABRICANTE deverá suprir todas as interfaces (comunicação serial ou *ethernet*, com seus respectivos protocolos, transdutores, relés auxiliares e de interposição, blocos terminais, fiação interna etc.) com o Sistema de Supervisão e Controle da Usina, bem como fazer uma verificação nas proteções do gerador com o intuito de confirmar a sua adequação, tendo em vista a troca do sistema de excitação.

- 12.2. Os registros oscilográficos gerados pelo Sistema de Excitação deverão estar acessíveis na porta do painel de controle, através de interface específica para isto, ou poderão ser enviados a um banco de dados via canal de comunicação específico.

### **13. Operação remota do regulador de tensão**

- 13.1. Deverão ser incluídos na proposta todos os dispositivos necessários para a operação remota a partir da Sala de Controle da Usina. A operação remota deverá contemplar, por exemplo, as seguintes funções:
  - 13.1.1. Seleção do modo de controle "Automático/Manual".
  - 13.1.2. Seleção de modo de controle "Principal/Retaguarda".
  - 13.1.3. Comandos de "Aumentar/Diminuir" o valor da tensão de referência do modo automático ou manual.
  - 13.1.4. Comandos de "Aumentar/Diminuir" o valor da tensão de referência do modo manual.
  - 13.1.5. Comando de "Abrir/Fechar" o disjuntor de campo.
  - 13.1.6. Ligar/desligar o sinal estabilizador (PSS).
  - 13.1.7. Ligar/Desligar os Limitadores.
  - 13.1.8. Indicar a tensão e corrente de campo.
- 13.2. Deverá ser prevista a possibilidade ter o *reset* remoto das proteções associadas ao sistema de excitação.
- 13.3. Os valores da tensão e corrente de campo, bem como o ajuste da tensão  $V_{ref}$  em ambos os modos de controle, deverão também estar disponíveis remotamente.
- 13.4. A operação remota deverá ser feita a partir de um console de operação.
- 13.5. No caso de recapacitação do sistema de excitação, a operação remota deverá ser feita a partir da mesa controle existente.

### **14. Controle Conjunto de Potência Reativa**

Deverá ser fornecido o controle conjunto de potência reativa para os geradores da usina incluídos no contrato.

O controle conjunto de potência reativa será controlado pelos operadores a partir da sala de controle da Usina, em console de operação a ser fornecido para este fim, devendo ser utilizado o mesmo console do regulador de tensão citado anteriormente.

O controle conjunto de potência reativa será do tipo PI e deverá atuar nos reguladores de tensão de cada unidade, de modo a fazer com que haja uma divisão igualitária dos reativos gerados por cada máquina participante desse modo de controle. Para o gerador operar em controle conjunto, é necessário que o seu regulador de tensão esteja em modo automático. No caso de falha ou de manutenção no controle conjunto, os geradores irão operar no modo individual.

O sistema de excitação deve estar apto a se comunicar com este controle. O controle conjunto de potência reativa normalmente faz parte do escopo de fornecimento do sistema de automação, embora nada impeça que ele seja incorporado a cada sistema de excitação, estando estes interconectados em rede e com um intetramento que defina quem será o controle ativo (por exemplo, a máquina de menor numeração).

## 15. Testes

### 15.1 Ensaios no Sistema de Excitação

#### 15.1.1. Ensaios de Distúrbio

15.1.1.1. O FABRICANTE deverá apresentar, em sua PROPOSTA, cópia dos Certificados dos Ensaios de Tipo realizados no regulador de tensão proposto de acordo com as normas indicadas abaixo:

- a. Ensaio de Transitórios Rápidos de acordo com a Norma IEC 61000-4-4, classe IV (4kV para fontes de alimentação e 2kV para sinais de entrada/saída);
- b. Ensaio de 1MHz (SWC) de acordo com a Norma IEC 255-22-1, classe III (1MHz, 2.5 kV modo comum, 1kV modo diferencial, 400 vezes/segundo);
- c. Ensaio de Isolamento de acordo com a Norma IEC 255-5, classe C (5kV, 1.2/50);
- d. Ensaio de Descarga Eletrostática de acordo com a Norma IEC 61000-4-2, ( $\pm 4$ KV para descarga por contato e  $\pm 8$ KV para descarga por ar) com critério de aceitação B;
- e. Ensaio de Imunidade a Radiofrequência Contínua de acordo com a Norma IEC 61000-4-3, com intensidade de campo igual a 10V/m (80MHz a 1GHz);
- f. Ensaio de Interrupção de Tensão de Alimentação de acordo com a Norma IEC 61000-4-11. (0%/trezentos ciclos (5000ms)/3x). Ensaio de afundamento de Tensão de Alimentação de acordo com a mesma norma com critério de aceitação A. Adicionalmente, as chaves de comando manual (*ON-OFF*) das fontes deverão ser operadas durante a realização do ensaio.

15.1.1.2. Se O FABRICANTE não apresentar qualquer um dos Certificados solicitados no item acima, o mesmo deverá ser executado durante o fornecimento, sem custos adicionais para o CLIENTE.

#### 15.1.2. Ensaio de Continuidade

Uma verificação completa da fiação interna dos painéis, ponto a ponto, deverá ser efetuada para garantir que os diagramas de fiação representem com fidelidade a mesma.

#### 15.1.3. Ensaio de Megger

Deverá ser aplicado o ensaio Megger 1.000V em cada circuito, e o valor de isolamento deverá exceder 10.000ohms por Volt de classe de isolamento.

#### 15.1.4. Ensaio de Isolamento

Deverá ser aplicada uma tensão de 1.500V para terra, 60Hz, durante um minuto, em todos os circuitos após retirar as conexões para terra. Toda a fiação deverá estar conectada aos bornes terminais.

### 15.1.5. Ensaio de Energização

- 15.1.5.1. Todos os circuitos CA e CC deverão ser energizados com suas respectivas tensões nominais, com todos os equipamentos conectados, e permanecer energizados por um período de 24 horas para comprovar a integridade de todos os equipamentos. Todos os circuitos devem ser energizados e testados simultaneamente.
- 15.1.5.2. Os circuitos secundários de transformadores de corrente e de potencial, com todos os instrumentos, relés e dispositivos conectados, deverão ser energizados com suas grandezas nominais por um período mínimo de 8 horas para comprovar a integridade dos equipamentos a estes níveis de corrente e tensão. Durante o ensaio, todos os circuitos CA e CC deverão permanecer energizados por um período mínimo de uma hora.
- 15.1.5.3. Os dispositivos e/ou fiação que apresentarem sobreaquecimento no final do ensaio de energização deverão ser substituídos se pelo menos uma das condições abaixo ocorrer:
  - a. Temperatura do invólucro maior do que a permitida pelas Normas ANSI;
  - b. Temperatura do isolamento ou do condutor superior à média permitida pelas Normas ANSI, NEMA, ou IPCEA;

### 15.1.6. Ensaio Funcional em Fábrica

- 15.1.6.1. O sistema de excitação deverá ser testado para provar que o mesmo é capaz de executar suas funções de acordo com os requisitos definidos por CLIENTE, bem como de acordo com os desenhos de projeto.
- 15.1.6.2. No mínimo, os seguintes ensaios deverão ser executados:
  - a. Ensaio das lógicas de comando conforme os modos de operação Local, Remoto, Automático e Manual;
  - b. Ensaio das lógicas de sinalização conforme projeto, simulando a atuação das proteções correspondentes e verificando as sinalizações e/ou sinais nos bornes terminais;
  - c. Ensaio do equilíbrio de corrente em cada ponte;
  - d. Ensaio para determinação das características de controle do ângulo de disparo;
  - e. Ensaio do controle de fase
  - f. Ensaio para medição de ruído
  - g. Ensaio para verificação do sentido de rotação dos ventiladores;
  - h. Chaveamento das fontes auxiliares do painel do regulador de tensão e geração dos pulsos de disparo.
- 15.1.6.3. Estes testes serão realizados com baixa corrente na ponte, estando as pontes conversoras e o regulador de tensão montados conforme o projeto. O enrolamento de campo será substituído por uma carga.

## 15.2 Ensaios de Comissionamento do Sistema de Excitação

Os testes realizados durante o comissionamento de campo servem para colocar o sistema de excitação em operação, verificar se todos os elementos de controle e proteção

apresentam um desempenho satisfatório e atendem as funções para as quais foram especificados e, caso necessário, fazer um refinamento dos ajustes preliminares definidos pelo fabricante ou determinados pelos estudos de sistema. Durante o comissionamento de campo, pode ser verificado se houve alterações importantes no sistema que venham a influenciar o comportamento do gerador e do sistema de excitação. Assim, pode ocorrer que os ajustes finais sejam bastante diferentes dos inicialmente previstos. Todos os testes devem ser executados ou supervisionados por um responsável técnico por parte do fabricante e inspecionado por um responsável técnico da contratante ou seu representante.

#### 15.2.1. Ensaio com o Gerador Parado

Seu objetivo é testar todas as ligações e interações e simular as ações de controle e proteção para verificar a integridade dos componentes, antes dos testes com a máquina excitada.

- 15.2.1.1. Verificar se as ligações externas estão de acordo com os diagramas de projeto.
- 15.2.1.2. Verificar a operação de todos os relés, contadores, disjuntores, fontes de alimentação etc.
- 15.2.1.3. Verificar a operação manual do controle principal e amplificadores de potência, utilizando uma fonte de alimentação auxiliar e carga simulada, de acordo com os manuais de comissionamento do fabricante.
- 15.2.1.4. Verificar a operação de todo o sistema de controle e dos dispositivos de proteção da excitação, utilizando sinais de entrada simulados e fonte de alimentação auxiliar, de acordo com os manuais de instrução do fabricante.

#### 15.2.2. Ensaio com a Máquina em Vazio e Ensaio do Gerador

Seu objetivo é verificar o desempenho do sistema de excitação durante os procedimentos de excitação e desexcitação da máquina, antes dos testes com a máquina sincronizada. Deve-se também verificar a resposta dinâmica do regulador de tensão para os ajustes preliminares e, caso necessário, ser efetuado um refinamento destes ajustes.

- 15.2.2.1. Transformador de excitação alimentado, provisoriamente, a partir de uma fonte auxiliar e gerador em rotação nominal:
  - a. Preparação da excitação para permitir os ensaios com o gerador em curto-circuito.
  - b. Preparação da excitação para o levantamento da característica em vazio do gerador.
- 15.2.2.2. Transformador de excitação alimentado normalmente e gerador em rotação nominal:
  - a. Ajuste das realimentações e sequências de fase na excitação.
  - b. Ajuste da proteção contra falha a terra no rotor.
  - c. Partida com a excitação em controle manual.
  - d. Partida com excitação em controle automático.
  - e. Resposta da excitação em manual para um degrau – ajuste do filtro de estabilização.

- f. Resposta do RAT para um degrau – ajuste do RAT (ganho de regime e ganho transitório).
  - g. Desexcitação – comando desliga excitação.
  - h. Desexcitação – abertura do disjuntor de campo.
- 15.2.2.3. Em geral, as seguintes grandezas devem ser monitoradas e registradas na forma digital ou através de oscilógrafos a papel para avaliação e aprovação do desempenho do sistema de excitação:
- a. Tensão terminal.
  - b. Tensão de campo.
  - c. Corrente de campo.

### 15.2.3. Testes com o Gerador Rodando em Carga

Seu objetivo é verificar o desempenho do sistema de excitação durante os procedimentos de sincronização do gerador com o sistema e com o gerador em carga. Se deve também verificar a resposta dinâmica do regulador de tensão para os ajustes preliminares durante variações na tensão de referência, variações de carga; durante a atuação dos limitadores etc., e, caso necessário, ser efetuado um refinamento destes ajustes.

- a. Ajuste da medição de temperatura do rotor.
  - b. Ensaio de elevação de temperatura nos barramentos de interligação dos componentes (painéis; gerador; transformador de excitação).
  - c. Verificação da compensação de reativo.
  - d. Ensaio e ajuste do PSS.
  - e. Ensaio e ajuste dos limitadores: P/Q, Corrente estatórica máxima capacitiva, corrente estatórica máxima indutiva, corrente máxima de excitação, V/Hz etc.
  - f. Transferência do modo de operação de automático para manual e vice-versa.
  - g. Transferência de canal automático principal para retaguarda e vice-versa.
  - h. Variações na tensão de referência.
  - i. Variações de carga.
  - j. Rejeições de carga
  - k. Ensaio e ajuste do circuito de descarga de potência reativa.
  - l. Ensaio e ajuste do controle conjunto de tensão.
- 15.2.3.1. As seguintes grandezas devem ser monitoradas e registradas para avaliação e aprovação do desempenho do sistema de excitação e do controle conjunto:
- a. Tensão terminal.
  - b. Tensão de campo.
  - c. Corrente de campo.
  - d. Potência ativa.
  - e. Potência reativa.

#### 15.2.4. Ensaio para Confirmação dos Parâmetros do Gerador e do Modelo e Parâmetros do Sistema de Excitação

O objetivo desses testes é aferir os modelos e parâmetros do gerador e do sistema de excitação por meio de testes não convencionais, durante a fase de comissionamento. Uma possível realização desses testes nesta etapa pode evitar a necessidade de uma futura parada da unidade geradora. Após a liberação para operação comercial, em geral, ocorrem dificuldades na sua liberação para testes adicionais, e os horários e períodos para sua execução são bastante restritos.

Os testes para aferição dos parâmetros do gerador, utilizando técnicas mais modernas no domínio do tempo ou da frequência, tendem a substituir os antigos testes de curto-circuito que submetem a máquina a um estresse desnecessário. Particularmente interessante pela facilidade de realização, uso de instrumentação convencional e baixo risco para as máquinas, são os ensaios de identificação baseados em rejeição de carga, cada vez mais aceitos para identificação do gerador. Além disso, tais ensaios geram modelos representativos da máquina nas regiões usuais de operação, diferentemente dos ensaios frequências, feitos com a máquina parada.

No que se refere ao sistema de excitação, ocorre que, em geral, os modelos fornecidos pelos fabricantes podem não corresponder à realidade, principalmente para os reguladores de tensão analógicos e excitatrizes rotativas. Com uma maior utilização de excitatrizes estáticas e reguladores de tensão digitais, com funções de transferência bem conhecidas, esses testes tornam-se menos necessários.

Para a identificação do sistema de excitação, os seguintes processos podem ser utilizados:

- a. resposta em frequência de cada bloco (módulo) ou conjunto de blocos do sistema de excitação e gerador a vazio, em malha aberta e em malha fechada;
- b. resposta no tempo a um degrau do sistema de excitação e gerador a vazio e em carga com PSS ligado e PSS desligado.

Para o gerador, os seguintes ensaios para sua identificação podem ser usados:

- a. resposta no tempo ao degrau na tensão de campo com gerador a vazio.
- b. resposta no tempo ao degrau na tensão de campo e gerador em carga.
- c. variações de carga ativa e reativa.

Os dados obtidos podem ser processados, à posteriori, em programas de análise de resposta no tempo, programas de identificação pelo método em frequência – análise de Fourier, método de Levy para identificação etc. Caso possível, a realização de algumas simulações digitais no próprio campo propicia a obtenção de modelos mais confiáveis, além de reduzir o tempo global gasto para o processo de identificação e ajustes.

Para os testes no domínio do tempo, as seguintes grandezas devem ser monitoradas e registradas digitalmente para utilização nos programas digitais de identificação dos parâmetros do gerador e do sistema de excitação:

- a. Tensão terminal (fases A, B e C).
- b. Corrente terminal (fases A, B e C).
- c. Tensão de campo.

- d. Corrente de campo.
- e. Potência ativa.
- f. Potência reativa.
- g. Frequência do rotor.

Obs.: Todos os sinais devem ser aquiritados simultaneamente

## **15.2 EXEMPLO DE UMA “ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA FUNCIONAL”**

### **1. Objetivo**

A presente Especificação fixa os requisitos técnicos básicos que deverão ser satisfeitos para fornecimento de 5 (cinco) sistemas completos de excitação estática direta e regulação de tensão digital incluindo acessórios, instrumentos e todos os dispositivos que se façam necessários à montagem, operação e manutenção, a serem instalados nos geradores síncronos trifásicos reformados da Usina Hidrelétrica de Ilha dos Pombos.

A Casa de Força da Usina Hidrelétrica de Ilha dos Pombos é do tipo abrigada, sendo dotada de 5 (cinco) geradores síncronos de eixos vertical acoplados diretamente às turbinas hidráulicas tipo “Francis”, os quais, após sua reforma, serão interligados aos respectivos transformadores elevadores através de barramentos de fases segregados.

Na configuração atual, a excitação do campo de cada gerador é obtida a partir de excitatriz rotativa diretamente conectada ao eixo da máquina acima do gerador e do mancal guia superior do gerador, sendo previstos reostatos operados a motor para controle da corrente de excitação e resistores para descarga do campo. As unidades 1, 2 e 3 são equipadas somente com excitatrizes principais, enquanto as unidades 4 e 5 possuem também excitatrizes piloto.

Por ocasião da reforma pretendida, serão retiradas todas as excitatrizes das unidades 1 a 5 e efetuadas todas as modificações e serviços necessários para instalação das novas excitatrizes estáticas.

As excitatrizes estáticas completas com os reguladores de tensão, equipamentos de desexcitação e demais acessórios, objeto desta Especificação serão utilizadas para excitação dos campos principais dos geradores.

Em função da reforma pretendida para os núcleos estatóricos das unidades 1 a 5, motivo das especificações dos capítulos 4E, 4F, 4G e 4H, o PROPONENTE deverá atentar para as características distintas dos campos das unidades e padronizar, na medida do possível, os conjuntos de excitatrizes estáticas e disjuntores de campo.

### **2. Extensão do Fornecimento**

#### **2.1. Geral**

A extensão do FORNECIMENTO, ora discriminada, é de caráter orientativo e o PROPONENTE, a seu critério, poderá ampliá-la, caso julgue necessário, para o bom funcionamento e desempenho dos equipamentos, pois o mesmo será de sua inteira responsabilidade.

Fazem parte do FORNECIMENTO, objeto da presente Especificação, o projeto dos equipamentos e a seguinte documentação mínima, conforme critérios pré-estabelecidos:

- a. cronograma. (\*)



- b. desenhos dimensionais de conjunto. (\*) (\*\*)
- c. desenhos de detalhes de fabricação e instalação. (\*\*)
- d. desenhos de montagem.
- e. descrição das características construtivas. (\*)
- f. fluxogramas.
- g. esquemas elétricos dos circuitos principais e dos auxiliares, inclusive, onde necessário, diagramas funcionais dos circuitos de comando, controle e proteção. (\*)
- h. diagramas trifilares, unifilares, diagramas de fiação interna indicando a vista dos dispositivos e suas conexões entre si e a blocos terminais.
- i. lista de inscrições e dimensões das plaquetas de identificação.
- j. topologia de todos circuitos eletrônicos de cada cartão, incluindo relação de componentes com respectivos fabricantes, códigos e características.
- k. tabelas de ajuste dos dispositivos limitadores ou de proteção, em que constem, no mínimo, as seguintes informações:
  - identificação conforme usado no projeto;
  - identificação do modelo (ou dos módulos) do dispositivo ou relé, conforme lista de material;
  - relações de TCs ou TPs principais ou auxiliares ligados ao dispositivo;
  - faixa de ajuste;
  - memória de cálculo, onde conste para cada função;
  - critérios de ajuste;
  - metodologia de cálculo;
  - curvas de condições limites de utilização de equipamentos versus dispositivos;
  - referências bibliográficas, artigos ou catálogos.

FORNECEDOR deverá solicitar ao CLIENTE, com a devida antecedência mínima de 45 dias, os eventuais dados do sistema elétrico necessário à determinação dos ajustes.

Não serão aceitos dispositivos cujos ajustes propostos caiam em extremo de faixa.

Caso durante os ensaios de comissionamento se verifique necessidade de modificação dos ajustes propostos, as mesmas deverão ser justificadas pelo FORNECEDOR e aprovadas pelo CLIENTE.

- l. desenhos de vistas e cortes de cubículos. (\*)
- m. desenhos de base de cubículos com detalhes de fixação.
- n. planos de ensaios.

- o. desenhos de transporte.
- p. listas de materiais.
- q. especificação técnica de pintura. (\*)
- r. memoriais de cálculo.
- s. desenhos de placas de características dos equipamentos.
- t. relação de ensaios na fábrica e na obra. (\*)

Notas:

(\*) Documentos que também deverão ser apresentados com a Proposta.

(\*\*) Deverão ser consideradas as características dimensionais físicas e/ou elétricas dos componentes e equipamentos existentes.

2.1.2. Fabricação e fornecimento dos equipamentos e componentes.

2.1.3. O PROPONENTE deverá incluir na Proposta um conjunto completo de ferramentas especiais, materiais, instrumentos ou dispositivos necessários para instalação, testes e manutenção dos equipamentos, em relação itemizada dos preços.

A aquisição parcial ou total do mesmo fica condicionada a critério de decisão exclusiva do CLIENTE.

Os itens não adquiridos pelo CLIENTE deverão ser fornecidos em caráter provisório para serem utilizados durante a montagem e os testes na OBRA.

2.1.4. O PROPONENTE deverá incluir na Proposta a seguinte quantidade mínima de peças sobressalentes:

- a. 01 (um) transformador de excitação completo. (\*)
- b. 01(um) disjuntor (ou contator) do campo completo e 01(um) resistor de descarga do campo do gerador. (\*)
- c. 01(um) conjunto de sobressalentes para cada disjuntor do campo. (\*)
- d. 01(um) contator para circuito de escorva do campo (não necessário para motores ou compensadores síncronos).
- e. 01(um) conjunto completo de ponte retificadora.
- f. 20% da quantidade de fusíveis de proteção dos tiristores.
- g. 01(um) transdutor de cada tipo utilizado.
- h. 01 (um) conjunto completo das unidades de controle (CPU principal, CPU *backup*, circuito gerador de pulsos e disparo).
- i. 10% da quantidade de fusíveis auxiliares utilizados.
- j. 01(um) conjunto de disjuntores miniaturas.
- k. 01(um) conjunto de lâmpadas.
- l. 01(um) módulo de alarme e sinalização.
- m. 20% de cada tipo de terminal usado (mínimo de 4 terminais) para interligação.

(\*)Nota: O quantitativo desse item ficará condicionado à definição dos conjuntos padronizados dos sistemas de excitação e disjuntores de campo.

PROPONENTE deverá ainda fornecer uma lista de todas as peças sobressalentes que, em sua opinião, e com base na experiência e em função do projeto, atendam quantitativa e qualitativamente as necessidades de manutenção e confiabilidade operativa do sistema de excitação e seus componentes por um período mínimo de 5 (cinco) anos.

Os preços dessas peças sobressalentes deverão ser fornecidos itemizados, cabendo ao CLIENTE a opção final pela compra ou não dos itens e quantidades discriminados na Proposta.

- 2.1.5. Fornecimento de manuais de instruções para transporte, armazenagem, montagem, operação e manutenção.
- 2.1.6. Tratamento de superfícies e pintura de proteção e acabamento na fábrica, bem como as tintas para eventuais retoques na OBRA (5% do total de cada tinta).
- 2.1.7. Pré-montagem e/ou montagem na fábrica.
- 2.1.8. Ensaio na fábrica.
- 2.1.9. Armazenagem na fábrica.
- 2.1.10. Embalagem para transporte.
- 2.1.11. Transporte e seguro de transporte dos equipamentos da fábrica até a OBRA e descarga na OBRA, observando o disposto no item 9.4 da parte I desta Especificação Técnica.
- 2.1.12. Supervisão da desmontagem de equipamentos existentes, da montagem dos novos equipamentos e dos ensaios de comissionamento;
- 2.1.13. Toda a engenharia e todos os materiais necessários à adaptação dos sistemas de excitação existentes aos novos sistemas fornecidos.
- 2.1.14. Memória de cálculo dos ajustes das proteções.

## 2.2. Sistema de Excitação e Regulação de Tensão

Deverão ser fornecidos 5 (cinco) sistemas de excitação estática e regulação de tensão digital para excitação direta dos campos dos geradores 1 a 5, com todos os componentes associados.

Para cada unidade geradora, deverão ser fornecidos, pelo menos, dois cubículos, contendo no mínimo os componentes seguintes:

### 2.2.1. Cubículo do Regulador de Tensão

Deverão ser instalados, pelo menos, a excitatriz estática completa, contator para a escorva do campo do gerador, regulador automático de tensão completo com todos os seus módulos, dispositivos para controle manual da excitação, transdutores, dispositivos para controle e proteção incluindo proteção contra surtos de tensão e todos os demais dispositivos necessários à correta operação do sistema fornecido.

### 2.2.2. Cubículo de Desexcitação

Deverão ser instalados, pelo menos, o disjuntor do campo do gerador e resistor de descarga do campo, dispositivos para medição de corrente e tensão do campo e todos os demais dispositivos necessários à correta operação do sistema.

### 2.3. Fiação

Para cada unidade geradora, deverá ser fornecida a fiação interna e externa conforme descrito a seguir.

- 2.3.1. Os cubículos integrantes do sistema de excitação de cada unidade deverão ser fornecidos com toda a fiação interna e fiação de interligação entre eles inteiramente executadas e testadas.
- 2.3.2. Todos os cabos e materiais necessários à ligação do transformador de excitação aos cubículos do sistema de excitação.
- 2.3.3. Todos os cabos e materiais necessários à ligação dos novos disjuntores de campo aos campos da excitatriz e da unidade geradora respectivas.

### 2.4. Itens Não Incluídos no Fornecimento

Não fazem parte do FORNECIMENTO objeto da presente Especificação os seguintes itens:

- 2.4.1. Sistema de aterramento.
- 2.4.2. Transporte interno na OBRA.
- 2.4.3. Armazenagem na OBRA.
- 2.4.4. Montagem, desmontagem e instalação dos equipamentos na OBRA.
- 2.4.5. Obras civis de qualquer natureza.

## 3. CONDIÇÕES DE PROJETO

### 3.1. Generalidades

Cada sistema de excitação deverá ser fabricado, segundo as mais modernas normas técnicas de engenharia, com materiais de primeira qualidade.

Todas as peças deverão apresentar acabamento condizente com sua importância, colocação e utilização, devendo estar isentas de defeitos que venham a afetar o funcionamento e bom aspecto das mesmas.

A montagem dos equipamentos deverá ser feita, considerando-se a técnica mais atualizada. O desempenho dos equipamentos deverá ser aferido nas condições de funcionamento a que serão submetidos pelo CLIENTE.

O CONTRATADO deverá conservar durante um prazo mínimo de 10 (dez) anos, a partir da data de entrega do equipamento completo, sem ônus para o CLIENTE, todos os projetos e dispositivos de fabricação e todas as informações de projeto que poderão ser utilizados na eventual execução de reparos ou em eventuais substituições de peças no referido equipamento.

### 3.2. Normas

Exceto quando especificado em contrário, o projeto, os materiais, a fabricação, os ensaios, a montagem e os testes dos equipamentos deverão estar de acordo com a

última revisão, na data de assinatura do contrato, das normas aplicáveis das seguintes organizações:

ABNT – “Associação Brasileira de Normas Técnicas”  
ISO – “International Organization for Standardization”  
ANSI – “American National Standards Institute”  
DIN – “Deutsches Institut für Normung”  
SAE – “Society of Automotive Engineers”  
ASTM – “American Society for Testing and Materials”  
ASME – “American Society for Mechanical Engineers”  
AISC – “American Institute of Steel Construction”  
NEMA – “National Electrical Manufacturers Association”  
AWS – “American Welding Society”  
FEM – “Fédération Européenne de la Manutention”  
AGMA – “American Gear Manufacturers Association”  
AFBMA – “Anti-Friction Bearing Manufacturers Association”  
IPCEA – “Insulated Power Cable Engineering Association”  
IEEE – “Institute of Electrical and Electronics Engineers”  
SSPC – “Steel Structure Painting Council”  
IEC – “International Electrotechnical Commission”  
AISI – “American Iron and Steel Institute”  
NFPA – “National Fire Protection Association”

Nos casos em que as normas deixem a critério do CONTRATADO a seleção ou projeto de um componente, a aplicação deste deverá ser submetida à aprovação do CLIENTE.

Em caso de divergência entre normas, a decisão final será tomada pelo CLIENTE, e, em caso de conflito entre as normas adotadas e as diretrizes destas Especificações, prevalecerão estas últimas.

### 3.3. Alimentação Elétrica para Controle e Serviços Auxiliares

Todos os equipamentos elétricos auxiliares deverão ser projetados considerando que, no local de instalação, as seguintes tensões de alimentação deverão ser disponíveis:

- trifásico, 220Vca +10%, 60Hz, 4 fios, para iluminação, tomadas, resistência de aquecimento de quadros e motores e motores das pontes rolantes, elevador e sistema de ar condicionado;
- 250Vcc + 10%, - 20%, 2 fios, não aterrado, para circuitos de supervisão e proteção e escorva do campo da excitatriz principal.

## 4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

### 4.1. Características Garantidas dos Sistemas de Excitação e Regulação de Tensão

4.1.1. PROPONENTE deverá garantir as seguintes tensões de teto do sistema de excitação, relativa à tensão base de campo igual a 60V, com enrolamento de campo a 100°C, como definido no Item 5 da IEEE Std.421.

- Positiva 4,17 p.u.
- Negativa 3,33 p.u.

## 5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

### 5.1. Generalidades

O sistema de excitação para controle individual da tensão no campo de cada unidade geradora, com redundância ativa de regulação, deverá ser do tipo estático, de alta resposta inicial, baseada no estabelecido nas Normas IEEE STD 421, 421A e 421B, quanto a definições, critérios de desempenho dinâmico e procedimentos para teste, incorporando:

- 1 (um) transformador de excitação trifásico, em epoxi, alimentado pelos terminais do gerador;
- 1 (uma) excitatriz estática composta de 02 (duas) pontes retificadoras constituídas exclusivamente de tiristores, com circuitos para geração e distribuição de pulsos de controle;
- 1 (um) regulador automático de tensão continuamente atuante;
- 1 (um) controle manual/retaguarda, independente do regulador manual;
- 1 (um) disjuntor (ou contator) de campo;
- 1 (uma) função de seguidor;
- 1 (uma) função pré-sincronizador.

O sistema de excitação deverá ser aquele em que o PROPONENTE tenha tido adequada experiência comprovada, relacionada com os requisitos necessários para geradores deste tipo e potência.

### 5.2. Recursos

O sistema de excitação deverá prover pelo menos os seguintes recursos:

- Controle automático da excitação dos geradores, individualmente;
- Controle manual da excitação dos geradores, individualmente;
- Limitação automática máxima e mínima da corrente de campo, através de uma malha de controle contínua;
- Limitação de corrente estatórica, através de uma malha de controle contínua;
- Limitação do sobrefluxo (V/Hz) no transformador a valores toleráveis, através de uma malha de controle contínua;

- Meios para polarização inicial do campo do gerador na partida (escorvamento), a partir de fonte externa (não necessário no caso de motores ou compensadores síncronos);
- Sinal adicional estabilizante;
- Transição suave de controle automático para manual;
- Rápida desexcitação do campo do gerador;
- Supervisão e proteção de todas as partes do equipamento;
- Rápida localização e substituição de componentes defeituosos;
- Capacidade de tensão negativa;

### 5.3. Características e Desempenho Solicitados

#### 5.3.1. Generalidades

Quando em operação sob controle automático, o sistema de excitação deverá prover operação estável e segura sob as condições especificadas abaixo, mantendo a tensão regulada dentro dos limites especificados.

#### 5.3.2. Operação em Condições Estáveis

A tensão nos terminais do gerador deverá ser mantida dentro de mais ou menos 0,5% do valor ajustado, sob condições estáveis de carga e de frequência como se segue:

- Qualquer carga ou excitação dentro da faixa de operação do gerador com tensão nos terminais do gerador na faixa de 90% a 110% do valor nominal;
- Qualquer frequência na faixa de 57Hz a 63Hz.

#### 5.3.3. Rejeição de Carga

Quando uma carga igual à potência do gerador for rejeitada nos terminais do gerador, a tensão nos terminais do gerador, mesmo considerando os efeitos da sobrevelocidade consequente, deverá satisfazer as seguintes condições:

- O máximo valor atingido não deverá exceder 110% da sobretensão inicial correspondente à queda na reatância subtransitória do gerador;
- A tensão deverá ser rapidamente restabelecida para, pelo menos, 110% do valor ajustado em não mais de 0,5s, a partir do momento da rejeição de carga;
- Uma vez restabelecida para a faixa de mais ou menos 5% do valor ajustado, a tensão deverá ser mantida dentro destes limites ao longo de todo o período de sobrevelocidade, com velocidade máxima de 160% da velocidade síncrona.

#### 5.3.4. Ciclo de Trabalho

O sistema de excitação deverá ser capaz de suportar a seguinte sequência sem danos ou operação indevida:

- Gerador operando na potência nominal contínua, com estabilidade das temperaturas do gerador e do equipamento de excitação;
- Um curto-circuito trifásico de duração de 10 ciclos, na barra da subestação de 138kV, com a aplicação de tensão teto durante este período;
- Retorno imediato à operação contínua na potência nominal.

#### 5.3.5. Pré-Sincronização

Durante a sincronização da unidade, o regulador de tensão atuará de acordo com modo estabelecido por chave de pré-sincronização instalada no quadro do regulador de tensão. A chave deverá possuir posições ligada e desligada e contatos reservas disponíveis. Na posição ligada, o regulador, sob comando de dispositivo pré-sincronizador, conforme Item 5.4.8, atuará da forma descrita a seguir:

- Durante o processo de partida da unidade, o regulador automático tomará como tensão de referência, através de um transformador de potencial para  $115V_{ca}$ , a tensão da barra de 138 kV. Após o fechamento do disjuntor principal, a tensão de referência comutará automaticamente para o dispositivo de ajuste de tensão de referência.

(Obs.: pré-sincronização em pequenas plantas, motores e compensadores síncronos não é utilizada.)

#### 5.3.6. Resfriamento da Excitatriz

Os tiristores deverão ser resfriados por um sistema de circulação forçada de ar que poderá ser, ou em circuito aberto ou fechado (ar-ar), de acordo com o padrão do Fabricante.

Deverão ser fornecidos dois ventiladores, ou dois grupos, com demarradores dos motores, cada um com capacidade suficiente para permitir operação contínua da excitatriz com sua capacidade nominal, quando o outro ventilador estiver fora de operação.

Normalmente, somente um ventilador estará em operação; entretanto, deverá ser possível selecionar qualquer um deles para principal ou reserva.

No caso de falha do ventilador principal, deverá ser feita a comutação automática para o reserva.

A falha de um ventilador deverá dar início a um alarme. A falha de ambos os ventiladores deverá iniciar o bloqueio de disparo dos tiristores e parar a unidade geradora.

#### 5.3.7. Escorvamento

Deverá ser incluído no FORNECIMENTO um sistema de excitação inicial.



Meios deverão ser providos para evitar que surtos de tensão sejam transferidos para o serviço auxiliar de 250Vcc durante o desligamento da excitação inicial.

Deverá haver conexão automática do equipamento de excitação inicial ao campo do gerador em aproximadamente 95% da velocidade síncrona, e transferência automática para o sistema de excitação principal quando a tensão de saída do gerador alcançar 15% do seu valor nominal.

O escorvamento não precisa ser considerado em sistemas de excitação para compensadores síncronos e motor síncrono.

#### 5.3.8. Controle Automático

O controle automático de tensão deverá ser do tipo continuamente atuante e sem zona morta.

Receberá por meio de transformadores de medição, informações de tensão e corrente do gerador e enviará ao gerador de pulso o sinal de controle para o disparo dos tiristores da unidade retificadora CA/CC de força.

Deverá ser fornecido um dispositivo de ajuste da tensão de referência.

A tensão de referência deverá ser ajustável na faixa de 90% a 110% da tensão nominal do gerador. O ajuste deverá ser efetuado do cubículo do regulador de tensão ou remotamente através do sistema digital de controle da unidade, sendo a seleção efetuada através de chave instalada no cubículo do regulador de tensão ou através da própria interface de operação.

A indicação de posição do dispositivo deverá ser feita por instrumento instalado no cubículo de regulador de tensão. O instrumento deverá ser graduado em porcentagem da tensão nominal do gerador.

Deverão ser fornecidos meios para permitir compensação ajustável de corrente reativa.

As correntes máximas e mínimas no campo e máxima no estator do gerador deverão ser restringidas por limitadores.

Para assegurar a continuidade de funcionamento do sistema de excitação durante curto-circuito do lado de alta tensão, os circuitos eletrônicos de regulação e controle deverão funcionar perfeitamente a partir de uma tensão de alimentação de 30% da tensão nominal do gerador.

Deverão ser dadas facilidades para acesso da medição, pelo menos das seguintes grandezas:

- Sinal do valor atual da tensão terminal;
- Sinal de saída do regulador;
- Sinal do valor atual da corrente de campo;
- Sinal de saída do sinal adicional estabilizante;
- Sinais de saída das malhas de controle dos limitadores.

A medição das grandezas acima não deve ser fonte de quaisquer distúrbios para o sistema de excitação.

### 5.3.9. Controle Manual/Retaguarda

(Obs.: Este controle é indicado quando se utilizam dois canais independentes de controle.)

O equipamento de controle manual ou retaguarda deverá permitir também o controle da tensão terminal do gerador, no caso de falha de qualquer parte do regulador automático de tensão.

Em casos de manutenções, testes ou perda da medição da tensão terminal, o sistema deverá passar a controlar a corrente de campo. Neste caso, deverá ser fornecido um meio de ajuste de corrente de campo do gerador através do qual se fará o ajuste manual de tensão.

A corrente de campo deverá ser ajustável na faixa de zero a 110% do seu valor máximo operacional exigido.

Os circuitos de controle manual deverão ser completamente independentes dos circuitos de controle automático, a fim de prover um eficaz meio alternativo de continuidade do sistema de excitação.

O dispositivo de ajuste deverá ser controlado do cubículo do regulador de tensão ou remotamente através do sistema digital de controle da unidade, sendo a transferência efetuada por meio de chave instalada no cubículo do regulador de tensão ou através da interface de operação.

No caso de controle convencional, o sinal de saída será por contato seco de relé, enquanto o sinal de saída do sistema digital será por pulso, cujo tempo de permanência é variável e determinado por código de duração recebido juntamente com o comando de saída.

A indicação de posição do dispositivo deverá ser feita por instrumento instalado no cubículo do regulador de tensão. O instrumento deverá ser graduado em porcentagem da corrente de campo nominal do gerador.

Para assegurar a continuidade de funcionamento do Sistema de Excitação durante curto-circuito do lado da alta tensão, os circuitos eletrônicos de regulação e controle deverão funcionar perfeitamente a partir de uma tensão de alimentação de 15% da tensão nominal do gerador.

### 5.3.10. Controle de Transferência Manual-Automático

A transferência manual de controle automático para manual (ou vice-versa) será realizada do cubículo do regulador de tensão, por chave seletora Manual-Automático ou através de sinal proveniente do sistema digital de controle da unidade (quando selecionado controle remoto) ou, ainda, através da interface de operação local.

A transferência de controle automático para manual deverá ser realizada automaticamente no evento de uma falha de qualquer parte do regulador automático de tensão, incluindo falha no suprimento do sinal de tensão.

Quando o regulador estiver em controle automático, deverá haver ajuste contínuo, executado por dispositivo seguidor, do controle manual, a fim de evitar variações bruscas na passagem de controle automático para manual, por falha no regulador ou manualmente pelo operador.

## 5.4. Requisitos Construtivos dos Componentes

### 5.4.1. Generalidades

Todos os equipamentos do sistema de excitação, juntamente com todas as fontes auxiliares associadas, dispositivos de comando e medição e circuitos de proteção, deverão ser localizados em cubículos desse fornecimento.

Todo equipamento deverá ser projetado para facilidade de manutenção e reparo.

Deverão ser usados componentes estáticos, funcionalmente arranjados em unidades extraíveis, em todas as partes.

### 5.4.2. Identificação dos Cubículos e seus Componentes

Deverão ser previstas as seguintes identificações:

- a) Identificação do cubículo;
- b) Identificação dos acessórios das vistas frontal e posterior;
- c) Identificação de todos os equipamentos (internos e externos), conforme a simbologia do projeto;
- d) Identificação da fiação interna;
- e) Identificação das réguas e bornes terminais.

### 5.4.3. Regulador de Tensão

O cubículo do regulador de tensão conterà os controles automático e manual bem como os demais dispositivos complementares, tais como: estabilizador de potência, Interface Homem Máquina para parametrização e ajustes dos módulos, pré-sincronizador, seguidor, detector de potência reativa nula, limitadores, ponte retificadora de tiristores, entrada para escorva do campo e demais acessórios. Na especificação de sistemas de excitação para motores síncronos, há a necessidade de se incluir o fornecimento de um circuito de partida de excitação associado ao escorregamento.

O cubículo deverá ser fornecido com todas as chaves de controle e instrumentos a seguir relacionados, necessários para supervisão e operação local. Tais instrumentos e chaves poderão ser integralmente substituídos pela implementação na Interface Gráfica de Operação:

- a) Chaves
  - Automático-Manual;
  - Local-Remoto;
  - Aumentar-Diminuir Tensão de Referência (automático);
  - Aumentar-Diminuir Tensão/corrente (backup/manual);
  - Ligar-Desligar Pré-Sincronização;
  - Ligar-Desligar o “SAE”.
- b) Instrumentos Indicadores

- Referência de Tensão (em automático);
- Referência de Tensão/Corrente (em manual);
- Temperatura do campo do gerador;
- Tensão do campo;
- Corrente de campo;
- Tensão do gerador.
- Transdutores:
  - Tensão de Campo;
  - Corrente de Campo;
  - Temperatura do Rotor.

Os instrumentos indicadores deverão ser instalados na parte frontal. As indicações analógicas deverão ser acessíveis para supervisão remota.

O indicador de desbalanço é utilizado apenas:

- a) com redundância de controle;
- b) em reguladores analógicos.

Por meio de uma chave seletora Local-Remoto, os comandos poderão ser transferidos para um controle remoto, com exceção do disjuntor de campo e do dispositivo de pré-sincronização. A fiação correspondente a esses comandos remotos deverá ser levada até blocos terminais.

Os sinais para indicação remota e a entrada para os comandos remotos deverão ser próprios para interligação ao Sistema Digital de Controle da Unidade conforme definido a seguir:

- sinais analógicos para indicação remota: de 4 a 20mA.

#### 5.4.4. Retificador de Força e Sistema de Controle dos Tiristores

A unidade retificadora CA/CC de força deverá ser capaz de operar continuamente com uma carga correspondente a 110% da demanda máxima do sistema de excitação.

Para assegurar que a operação do gerador não venha a ser prejudicada por falha em tiristor, deverá ser fornecido, pelo menos, um circuito paralelo adicional em cada braço da ponte retificadora. Assim, se em cada braço forem necessários N circuitos paralelos para fornecer a potência contínua de excitatriz e atender aos requisitos especificados, então (N+1) circuitos deverão ser fornecidos.

Deverá ser fornecido equipamento de proteção contra surtos, para limitar sobretensão que possa ser aplicada no lado de corrente alternada do equipamento de excitação, quando sobretensões ocorrerem nos terminais do gerador.

Deverá ser fornecido equipamento, para limitar a sobretensão que possa ser aplicada no lado de corrente contínua do equipamento de excitação, quando elevadas tensões transitórias ocorrerem nos terminais de campo do gerador.

Deverão ser dadas facilidades para acesso da medição, pelo menos, das seguintes grandezas:

- Tensão alternada de alimentação do retificador de força;
- Tensão retificada;
- Corrente alternada de alimentação do retificador de força;
- Corrente retificada;
- Sinal de saída dos disparos do gerador de pulsos para o *gate* dos tiristores.

A medição das grandezas acima não deve ser fonte de quaisquer distúrbios para o sistema de excitação.

#### 5.4.5. Estabilizador de Potência (Sinal Estabilizador)

Deverá ser fornecido um dispositivo estabilizador de potência com a finalidade de melhorar o desempenho dinâmico do sistema de potência e para amortecer positivamente as oscilações eletromecânicas resultantes de pequenas e grandes perturbações no sistema interligado. Deverão ser providos meios para:

- Desligar o sinal manualmente;
- Parametrizar o equipamento via Interface Homem-Máquina no próprio módulo ou remotamente;
- Desconectar e reconectar a funcionalidade para os casos de sobre e subtensão;
- Diminuir o *reset* para rápida desaturação da saída do estabilizador, retomando ao valor original de *reset* quando a saída do estabilizador estiver próxima de zero.

O FORNECEDOR deverá prever todos os transdutores e outros equipamentos necessários para formar o sinal estabilizador.

#### 5.4.6. Seguidor

Deverá ser fornecido um dispositivo seguidor que ajustará continuamente a posição do dispositivo de ajuste de controle manual, para seguir as variações na excitação do gerador executadas pelo controle automático de tensão. No caso de Sistemas de Excitação Digitais, tal funcionalidade não é necessária.

#### 5.4.7. Malhas de Controle dos Limitadores de Sobre-Excitação, Subexcitação, Corrente Estatórica e V/Hz

Deverão ser fornecidas as malhas de controle, com seus ajustes de referência, ganho e compensação próprios, para limitar as correntes máxima e mínima no campo e máxima no estator, e o valor da tensão de saída em relação à frequência, de forma a evitar instabilidade e/ou sobreaquecimento do estator e rotor, descritos a seguir:

##### a) Limitador de sobre-excitação:

Deverá impedir, em regime estável, o aumento da corrente de campo além dos valores dados pela curva de capacidade do gerador.

Em condições transitórias o limitador deve permitir aumentos transitórios da corrente de campo por um tempo ajustável e limitado a 60 ciclos.

O valor de regime permanente deverá ser atingido com transitório suficientemente amortecido para que não haja oscilações apreciáveis nas condições de operação do gerador.

b) Limitador de subexcitação:

Deverá impedir o decréscimo da corrente de campo abaixo do valor dado pelo limite de mínima excitação na curva de capacidade do gerador de forma a não comprometer a operação estável da unidade.

O valor de regime permanente deverá ser atingido com transitório suficientemente amortecido para que não haja oscilações apreciáveis nas condições de operação do gerador.

Em caso de rejeições de carga, a tensão teto negativa deverá ser sempre permitida sem interferência.

c) Limitadores da corrente estatórica:

Deverão ser fornecidos dois limitadores para impedir a ação do regulador no sentido de aumentar ou diminuir a excitação além dos valores correspondentes à corrente nominal do gerador na operação sobre a subexcitada. Os limitadores serão sensíveis à corrente total do gerador, sendo um sensível à parcela indutiva e outro à capacitiva. Devem apresentar margem mínima de ajuste entre 90 e 110% da corrente nominal do estator.

d) Limitadores de V/Hz:

Deverá ser fornecido dispositivo supervisor da relação V (tensão nos terminais do gerador) e Hz (frequência) para limitar possíveis sobrefluxos prolongados no transformador elevador e eventuais equipamentos que a máquina esteja alimentando dentro da própria central.

## 5.5. Sinalização de Eventos

No cubículo do regulador de tensão, deverá haver sinalização de defeitos no sistema de excitação. Deverão ser sinalizados, pelo menos, os seguintes eventos:

- a) Comutação automático-manual.
- b) Comutação principal-retaguarda
- c) Queima de fusível.
- d) Falta de alimentação – nos vários circuitos possíveis, transformadores de excitação etc.
- e) Funcionamento dos limitadores.
- f) Regulador em manual.
- g) Regulador em automático

Deverão ser previstos contatos auxiliares para transmissão destes sinais para supervisão remota.

Com o uso de uma IHM gráfica, a sinalização poderá ser bem ampliada, com os registros de eventos possuindo estampa de tempo, melhorando sobremaneira a

análise de eventuais defeitos. No caso de um sistema de excitação digital, as informações trafegarão pela rede de comunicação.

## 5.6. Diagrama de Blocos

O FORNECEDOR deverá enviar, juntamente com a proposta, os diagramas de blocos completos e simplificados, do regulador de tensão, com as funções de transferência e parâmetros, tais como as faixas de valores de ganhos, constantes de tempo etc., necessários para execução de simulações computacionais do regulador.

## 6. MONTAGEM E ENSAIOS NA FÁBRICA

### 6.1 Generalidades

O FORNECEDOR deverá demonstrar a qualidade de toda e qualquer matéria-prima, utilizada na fabricação dos componentes mediante a realização de ensaios mecânicos, químicos, elétricos, magnéticos, de ultrassom e outros, onde aplicáveis.

O FORNECEDOR deverá realizar, em sua fábrica, as montagens dos diversos componentes do FORNECIMENTO, bem como os ensaios necessários para demonstrar, de modo satisfatório, a qualidade das soldagens executadas, dos isolamentos de condutores, a precisão dimensional da fabricação, a resistência das peças, a estanqueidade à água, ao ar e ao óleo, a operação satisfatória e a facilidade de montagem na OBRA.

Os ensaios de todos os componentes do FORNECIMENTO deverão simular, na medida do possível, as condições reais de operação.

A extensão do programa de ensaios na fábrica, ora discriminada, é de caráter orientativa, e o PROPONENTE, a seu critério, poderá propor alterações, caso julgue necessário para uma perfeita avaliação dos equipamentos. Considerar nesta proposta que os ensaios de rotina serão detalhados pelo PROPONENTE e estão incluídos no preço; os ensaios de tipo serão detalhados pelo PROPONENTE, com custos expressos individualmente e cotados em separado.

Observar, ainda, que o programa final de ensaios na fábrica será o resultado de entendimentos entre o CLIENTE e o PROPONENTE vencedor.

### 6.2 Equipamentos de Excitação e Regulação de Tensão (Com Exceção do Transformador de Excitação)

#### 6.2.1. Ensaios de Tipo

##### a) Determinação das perdas

De acordo com a norma IEC-146, item 492.5.

##### b) Ensaio de carga nominal.

De acordo com a norma IEC-146, item 492.7.

Com os valores obtidos no ensaio de carga, o FABRICANTE deverá apresentar memória de cálculo mostrando que o sistema de excitação atende às exigências estabelecidas no item 5.4.6 (página 128) desta Especificação.

##### c) Ensaio de corrente.

De acordo com a norma IEC-146, item 492.3.

- d) Determinação da capacidade térmica dos conjuntos de tiristores durante sobrecargas de breve duração.

Deverá ser realizado ensaio de forma a estabelecer o valor da temperatura virtual de junção dos tiristores em função do ciclo de trabalho do sistema de excitação estabelecido no item 5.3.4 (página 123) desta Especificação.

- e) Determinação da tensão mínima de condução dos tiristores

Durante os ensaios acima, deverá ser determinada a tensão mínima (tensão mínima dos terminais do gerador), na qual a ponte de tiristores ainda conduz.

- f) Ensaios individuais nos tiristores

Deverão ser feitas as seguintes medições:

- Queda de tensão direta;
- Queda de tensão inversa;
- Características de disparo.

#### 6.2.2. Ensaios de Rotina

- a) Ensaios dielétricos

De acordo com a norma IEC-146, item 492.1.

- b) Ensaio de carga reduzida

De acordo com a norma IEC-146, item 492.2.

- c) Ensaios operacionais de dispositivos auxiliares

De acordo com a norma IEC-146, item 492.4.

### 6.3. Transformador de Excitação

#### 6.3.1. Normas Técnicas

Os ensaios deverão ser realizados atendendo às prescrições constantes nas normas ABNT, NBR-10295 e NBR-5380, complementadas pelas prescrições constantes na publicação IEC-146, capítulo III.

#### 6.3.2. Ensaios de Tipo

- Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico, no enrolamento de tensão superior;
- Ensaio de elevação de temperatura;
- Ensaio de suportabilidade dinâmica a curto-circuito.

#### 6.3.3. Ensaios de Rotina

- Medição da resistência ôhmica dos enrolamentos;
- Medição da resistência de isolamento;
- Medição da relação de transformação;



- Verificação do deslocamento angular;
- Medição da impedância de curto-circuito e das perdas em carga;
- Medição das perdas em vazio e da corrente de excitação;
- Ensaio de tensões suportáveis a frequência industrial para enrolamentos de tensão superior e inferior;
- Ensaio de tensão induzida.

## 6.4. Relés e Limitadores

### 6.4.1. Ensaio de Tipo

Deverão ser fornecidos para aprovação do CLIENTE os certificados de ensaios de tipo para cada equipamento. Na ocorrência de não aceitação desses certificados, os ensaios de tipo serão realizados na fábrica, somente em uma unidade de cada tipo de proteção.

Os certificados de ensaios de tipo, a serem apresentados, deverão conter, no mínimo, os seguintes ensaios:

- Ensaio de operação com tensão mínima.
- Determinação das características principais:
  - Curva características;
  - Tempos de operações com diferentes correntes ou tensões de atuação;
  - Relação rearme/atuação (*drop out/pick-up*);
  - Tempo de rearme (*reset*);
  - Consumo para circuitos de corrente e potencial;
  - Consumo em circuitos de corrente contínua, em operação normal e durante curto-circuito;
  - Capacidade de contatos no fechamento (*making*) e abertura (*breaking*).
- Ensaio de tensão aplicada;
- Ensaio de resistência de isolamento;
- Ensaio de aquecimento;
- Ensaio de impulso;
- Ensaio de capacidade de suportar surtos.

### 6.4.2. Ensaio de Rotina

Ensaio de Rotina deverão ser executados em todos os dispositivos:

- Verificação dos terminais e conexões;
- Verificação de soldas, fiação interna e distâncias de isolamento;
- Verificação da operação dos contatos;
- Teste de operação elétrica;

- Verificação das graduações de escalas

## 6.5. Cubículos

### 6.5.1. Ensaios de Rotina

- a) Inspeção de fiação.
- b) Ensaio de operação elétrica
- c) Verificação das medidas de proteção.
- d) Verificação da continuidade elétrica.
- e) Resistência de isolamento.
- f) Tensão aplicada.

## 6.6. Transdutores

### 6.6.1. Ensaios de Rotina

- a) Dielétrico conforme ABNT NBR 7116.
- b) Resistência de isolamento conforme ABNT NBR 7116.
- c) Exatidão/linearidade em pontos na faixa de indicação.
- d) Idem em variação de carga.
- e) Idem com variação de tensão auxiliar.
- f) Verificação da atuação dos dispositivos de curto-circuito das entradas de corrente (onde aplicável).

### 6.6.2. Ensaios de Tipo

- a) Impulsos conforme ABNT NBR 7116.
- b) Perturbação de alta frequência conforme IEEE std 472.
- c) Exatidão/linearidade em pontos na faixa de indicação sob a influência de campos magnéticos externos.
- d) Idem sob influência de temperatura e de umidade.
- e) Medida dos circuitos de entrada e dos circuitos de alimentação auxiliar.
- f) Medida da ondulação do sinal de saída.
- g) Medida do tempo de resposta.

## 7. MONTAGEM E ENSAIOS NA OBRA

### 7.1. Generalidades

Os COMPONENTES dos sistemas de excitação e regulação de tensão deverão ser submetidos aos ensaios e verificações relacionados neste item, para verificar se as garantias contratuais e os requisitos contidos nesta Especificação são plenamente satisfeitos e, ainda, obter uma listagem completa das características do equipamento.

Os ensaios deverão ser feitos conforme os procedimentos descritos ou conforme as normas aplicáveis.

A extensão do programa de ensaios na obra, ora discriminada, é de caráter orientativo, e o PROPONENTE, a seu critério, poderá propor alterações, caso julgue necessário para uma perfeita avaliação dos equipamentos.

Considerar nesta proposta que os ensaios de rotina serão detalhados pelo PROPONENTE e estão incluídos no preço. Os ensaios de tipo serão detalhados pelo PROPONENTE, com custos expressos individualmente e cotados em separado.

Observar ainda que o programa final de ensaios na obra será o resultado de entendimento entre o CLIENTE e o PROPONENTE vencedor.

Peças e acessórios, tais como parafusos, chumbadores, hastes, porcas, arruelas, tensores etc., necessários nas montagens e instalações na OBRA, dos equipamentos, componentes e das peças fixas incluídos no fornecimento deverão ser fornecidos com 10% (dez por cento) em excesso.

## 7.2. Verificações e Ensaios de Rotina Durante a Montagem

Nos vários estágios de montagem, antes da ligação ao sistema elétrico, deverão ser executados, no mínimo, os ensaios de rotina a seguir discriminados, para comprovar que todas as partes foram instaladas com precisão, para um funcionamento correto do Sistema de Excitação e Regulação de Tensão.

- a) Verificação do funcionamento de todos os circuitos de alimentação auxiliares.
- b) Verificação do funcionamento de todos os dispositivos e circuitos de controle e posicionamento final de ajustes variáveis.
- c) Verificação do funcionamento de todos os dispositivos e circuitos de supervisão e proteção, calibração final de relés e outros ajustes variáveis.
- d) Verificação do funcionamento do equipamento de excitação de partida.
- e) Medição da resistência de isolamento dos enrolamentos dos transformadores de excitação.
- f) Verificação de todas as ligações elétricas efetuadas na obra, para interligação dos diversos componentes do fornecimento, de acordo com os diagramas correspondentes, de sua continuidade e resistência de isolamento, em todos os circuitos de força, comando, controle e supervisão.
- g) Verificação do bom aspecto dos componentes, procedendo a retoques de pintura, se necessário.

## 7.3. Verificações e Ensaios Durante o Comissionamento

Esses ensaios versam sobre a colocação em serviço dos cubículos constantes desta Especificação.

### 7.3.1. Ensaios no Sistema de Excitação e Regulação de Tensão

Os ensaios consistirão principalmente na verificação do desempenho do sistema de excitação, respeitada a ação dos limitadores e os limites máximos de temperatura de todos os componentes.

O regulador deverá ser testado inicialmente com o gerador operando à velocidade síncrona, à tensão nominal e em vazio, desligado do sistema.

Uma estabilidade satisfatória deverá ser garantida, antes da realização dos seguintes ensaios adicionais:

- a) Ensaio de regulação manual de tensão.
- b) Ensaio de regulação automática de tensão.
- c) Ensaio de verificação das sobretensões com rejeições de carga.
- d) Tensões de teto e resposta ao degrau.
- e) Operação a frequências diferentes da frequência nominal.
- f) Ensaio dos limitadores (ponto de atuação e desempenho).
- g) Ensaio de desempenho do Sinal Adicional Estabilizante.

### 7.3.2. Ensaio em Cubículos

Cada cubículo deverá ser testado individualmente, conforme os procedimentos a seguir descritos ou conforme as normas aplicáveis:

- a) Verificação do funcionamento de todos os circuitos de alimentação auxiliar.
- b) Verificação de todos os dispositivos, funcionalidade dos circuitos de controle, supervisão e proteção.
- c) Calibração final dos dispositivos ajustáveis.
- d) Verificação de todas as ligações elétricas efetuadas na OBRA, de acordo com os diagramas correspondentes.
- e) Ensaio de resistência de isolamento.
- f) Ensaio de tensão aplicada.

## 8. DESENHOS DE REFERÊNCIA

### 8.1. Desenhos do CLIENTE

- RIP-300-001 GERAL – LOCALIZAÇÃO E ACESSOS;
- IP-U00-3201/2 ACESSO À CASA DE FORÇA FLS. 1 E 2;
- IP-U20-3308 CASA DE FORÇA E SUBESTAÇÃO – REABILITAÇÃO PISO DAS UNIDADES PLANTA FOLHAS 1/2;
- IP-U20-3335 CASA DE FORÇA E SUBESTAÇÃO – REABILITAÇÃO – SEÇÕES TRANSVERSAIS PELOS EIXOS DAS UNIDADES FOLHA 1/5;
- IP-U20-3336 CASA DE FORÇA E SUBESTAÇÃO – REABILITAÇÃO – SEÇÕES TRANSVERSAIS PELOS EIXOS DAS UNIDADES FOLHA 2/5;
- IP-U00-4001 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 1 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – PLANTA;
- IP-U00-4002 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 1 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES;
- IP-U00-4003 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 2 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – PLANTA;
- IP-U00-4004 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 2 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES;

- IP-U00-4005 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 3 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES;
- IP-U00-4006 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 3 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES;
- IP-U00-4007 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 4 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES;
- IP-U00-4008 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 4 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES;
- IP-U00-4009 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 5 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES;
- IP-U00-4010 DETALHES PARA REFORMA DO GERADOR 5 E EQUIPAMENTOS ASSOCIADOS – CORTES
- IP-U00-4030 DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO;
- IP-U00-4031 DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTEÇÃO E MEDIÇÃO DAS UNIDADES GERADORAS 1 E 2;
- IP-U00-4032 DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTEÇÃO E MEDIÇÃO DA UNIDADE GERADORA 3;
- IP-U00-4033 DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTEÇÃO E MEDIÇÃO DA UNIDADE GERADORA 4;
- IP-U00-4034 DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTEÇÃO E MEDIÇÃO DA UNIDADE GERADORA 5;
- IP-U00-4036 DIAGRAMA DE INSTRUMENTAÇÃO DAS UNIDADES 1 E 2;
- IP-U00-4037 DIAGRAMA DE INSTRUMENTAÇÃO DA UNIDADE 3;
- IP-U00-4038 DIAGRAMA DE INSTRUMENTAÇÃO DA UNIDADE 4;
- IP-U00-4039 DIAGRAMA DE INSTRUMENTAÇÃO DA UNIDADE 5;

## 16. NORMAS E REFERÊNCIAS

Várias das referências listadas a seguir, foram utilizadas na preparação do Guia, principalmente as Normas, muitas das quais deverão ser também consideradas quando da preparação das especificações. Artigos técnicos específicos pertinentes a sistemas de excitação foram também incluídos para permitir ao usuário do Guia se aprofundar mais sobre os temas do documento. As referências assinaladas na referida lista são sugeridas como aquelas que, pelo menos, deverão constar das especificações e/ou usadas na preparação das mesmas.

A escolha entre as normas ABNT, IEC e/ou ANSI/IEEE daquelas a serem adotadas na preparação de uma especificação é, em geral, uma decisão do comprador, baseada em sua experiência e preferência. No caso do sistema de excitação para máquinas síncronas, não existe uma norma específica cobrindo todos os aspectos dos diversos componentes. Tanto a IEC como a ANSI/IEEE têm normas separadas para cada componente. A IEC34-Part 16, referências 35, 36 e 37 cobre os aspectos de desempenho e nominais, podendo ser tomada como base, ficando os componentes para serem especificados de acordo com a IEC e/ou ANSI, conforme preferência do comprador. Em qualquer caso, entretanto, será preferível, sempre que possível, a adoção de uma das duas normas para todo o sistema.

IEEE C57.12.01 - 2005 - IEEE Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers Including Those with Solid-Cast and/or Resin Encapsulated Windings

C57.13.1993 - IEEE Standard Requirements for Instruments Transformers.

IEEE 421.1 - 2007 - IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines

IEEE 421.2 - 1990 - IEEE Guide for Identification, Testing and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems.

IEEE 421.4 - 2004 - IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications

IEEE 421.5 - 2005 - IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies

IEEE C37.18-1979, IEEE Standard Enclosed Field Discharge Circuit Breakers for Rotating Electric Machinery (ANSI).

IEEE C57.12.00-2006 - IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution Power & Regulating Transformers.

IEEE C57.12.91-2001 - IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers.

IEEE Std 421 B-1979 (Reaff. 1984), IEEE Standard for High-Potential Test Requirements for Excitation Systems.

C37.18-1979 – IEEE Standard Enclosed Field Discharge Circuit Breakers for Rotating Electric Machinery.

IEC.726-1982 - Dry-Type Power Transformers

NEMA TR 1.1974 - Transformers, Regulators and Reactors.

IEC 76 - Power Transformers.

C157.110-1989-IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.

IEC 146-1-1-1991 Semiconductor Convertors - Part 1.1: General Requirements and Line Commutated Converters.

IEC 146-1-2-1992 Semiconductor Converters - part 1-2: .Application Guide.

IEC 146-1-3-1991 - Semiconductor Converters Transformers and Reactors.

IEC Multilingual Dictionary of Electricity, Electronics and Telecommunications - Vol. 2.

IEEE Std 100-1996 - IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms.

IEC 60439-1-2004-04 – Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 1: Type-tested and partially type-tested assemblies

IEC 60204-1-2005-10 – Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements.

IEC 60255-5-200-12 – Electrical Relays – Insulation coordination for measuring relays and protection equipment – Requirements and Tests.

IEC 61000-6-2-2005-01 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-2: Generic standards – Immunity for industrial environments.

IEC 61000-6-4-2006-07 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-4: Generic standards – Emission standard industrial environments.

IEC 61000-4-2 Ed. 1.2 b: 2001 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test

IEC 61000-4-3 Ed. 3.0 b:2006 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test.

IEC 61000-4-4 Ed. 2.0 b:2004 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test.

IEC 61000-4-5 Ed. 2.0 b:2005 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Surge immunity test.

IEC 61000-4-6 Ed. 2.0 b:2003 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.

IEC 61000-4-8 Ed. 1.1 b:2001 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-8: Testing and measurement techniques – Power frequency magnetic field immunity test.

IEC 61000-4-11 Ed. 2.0 b:2004 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.

CISPR 11 Ed. 4.1 b:2004 – Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment – Electromagnetic disturbance characteristics – Limits and methods of measurement.

IEC 60417 – Graphical symbols for use on equipment.

IEC - 34-16-1-1991 - Rotating Electrical Machines - Excitation System for Synchronous Machines - Definitions.

IEC - 34-16-2 - 1991 - Rotating Electrical Machines - Excitation System for Synchronous Machines - Models for Power System Studies.

IEC - 34-16-3 - 1996 - Rotating Electrical Machines - Excitation System for Synchronous Machines - Dynamic Performance.

NBR 10295 - 1988 - Transformadores de Potência Secos.

NBR 5356-1 – 2007 – Transformadores de Potência – Parte 1: Generalidades

IEC 60144 -1963 Specification for degrees of protection of enclosures of switchgear and controlgear for voltages up to and including 1000 V a.c. and 1200 V d.c.

IEC 60529-2001-02 - Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).

MIL-HDBK-217F-1991 – Reliability prediction of electronic equipment.

A - J.L. Araújo Jardim - “Análise e Projeto de Excitatrizes Estáticas”, *Tese de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Fev. 1987.

IEEE Digital Excitation Task Force, “Computer Models for Representation of Digital-Based Excitation Systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, Nº 3, pp. 607-615, September 1996.

IEEE Excitation Limiters Task Force, “Recommended Models for Overexcitation Limiting Devices,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, Nº 4, pp. 706-712, December 1995.

IEEE Excitation Limiters Task Force, “Underexcitation Limiter Models for Power System Stability Studies,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, Nº 3, pp. 524-531, September 1995.

J.R. Ribeiro, “Minimum Excitation Limiter Effects on Generator Response to System Disturbances,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 6, Nº 1, pp. 29-38, March 1991.

F.P. de Mello, L.N. Hannett, and J. M. Undrill, “Practical Approaches to Supplementary Stabilizing from Accelerating Power,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, pp. 1515-1522, September/October 1978.

F.Peneder and H. Butz - Exciter Systems for Three Phase Generators in Industrial and Medium-Size Power Systems - Brown Boveri Review nº 1-74 - pg 41-50.

J. Griffin - Comparing Compounded and Brushless A.C. Generators - Electrical Review Vol. 199 - nº 9 - pg 23-26.

F. Peneder, H.F. Herzog and R. Bertschi - Static Systems for Positive and Negative Excitation Current - Brown Boveri Review - 1978.

K. Gamlesocter and F. Peneder - Large Synchronous Compensator with Static Excitation and Starting Systems - Brown Boveri Publication CH-T-130 153E.

J.W. Lincoln - Automatic Excitation Control of Large Synchronous Motors - Part I - Electrical Review nº 4 - December 4, 1964.

J.W. Lincoln - Automatic Excitation Control of Large Synchronous Motors - Part 2 - Error Actuated Systems - Electrical Review - December 11, 1964.

Stability of Synchronous Machines as Affected by Excitation Systems, Machine and System Parameters - F.P. de Mello, D.N. Ewart and M. Temoshok - American Power Conference - April 1965.

Ph. Barret - Proposals for Specifications Relating to Performances of Excitation Systems - ELECTRA nº 58.

J. Debernadi e outros - Excitation Systems of Large A.C. Generators - Arrangements, Test, Performance Criteria - CIGRE Paper 11-09-1970.

I.A.Erinmez - Generator Excitation System Performance Requirements Arising from Grid System Considerations - IEE Colloquium on Excitation and Stability of Generators - January 1992.

H. Glavitsch - On the Choice of Control Parameters of Excitation Systems for Large Imbgenerators -Brown Boveri Review - nº 5-74.



H.H. Roth - Applying Synchronous Condensers - Allis Chalmers Electrical Review - Fourth Quarter 76.

N. Knudsen - Overvoltages and Voltage Stability in the Operation of Long, Unload Lines - ASEA Journal 1952.

Excitation System Dynamic Characteristics - IEEE PAS-92 - January / February 1973 - pg 64-75.

CIGRE TF 38-01-09 - What is Changing in the Excitation Control Needs? - IEEE PES 1997 Summer Power Meeting in Berlin.

Anderson, P.M. and Fouad, A.A., Power System Control and Stability, The Iowa State University Press, Iowa, 1977.

Panis, L.M. and Proll, E., Rectifier Excitation of Large Turbo-Generators, BBC Rev. 54, pp. 69-75, 1967.

Peneder, F. and Herzog, H., Modern Excitation Equipment for Hidro Eletric Generators, BBC Rev. 2, pp. 141-151, 1980.

Mc Closkey, W.J. and Parker, E.L., Excitation Systems for Small Industrial AC Generators, IEEE, pp. 55-68, 1981.

Hurley, I.D. and Baldwin, M.S., "High-Response Excitation Systems on Turbine Generators: A Stability Assessment", IEEE - Power Engineering Society Winter Meeting, paper wmo 27-1, 1982.

Hurley, J.D., Comparative Transient Performance of Rotating and Static Excitation System, Proc. American Power Conference, 44, pp. 718-722, 1982.

Ellis, H.M., Hardy, J.E., Blythe, A.L. and Skooglund, J.W., Dynamic Stability of the Peace River Transmission System, IEEE Trans. PAS 85, pp. 586-600, 1966.

Nagy, I., Analisis of Minimum Excitation Limits of Synchronous Machines, IEEE Trans. PAS 89, pp. 1001-1008, 1970.

Canay, M. and Simond, J.J., Rotor Overvoltages and Interturn Voltages in the Field Winding of Synchronous Machines, BBC Rev. 9, pp. 516-523, 1980.

Peneder, F. and Bertschi, R., Static Excitation Systems with and Without a Compounding Ancillary, BBC Rev. 7, pp. 343-348, 1985.

Investigation of the Rotor Overvoltage in Synchronous Machines with Rectifier Excitation, Electric Machines and Electromechanics, Vol. 3, pp. 21-28, 1978.

Schonhlzer, E.T., "Fuse Protection for Power Thyristors", IEEE IGA Conference Record, Vol. 70-CI, 1970.

Lerstrup, K., Application of Fuses for the Protection of Diodes and Thyristors IEEE IGA Conference Record, Vol. 70-CI, 1970.

VOIPIO, E., Determination of the Excitation System Parameters for Small Variations, ELECTRA 17, pp. 123-134.

Westinghouse Electrical Transmission and Distribution Reference Book - 1950 - Capítulo 7.

Modern Power Station Practice - Vol. 4 - CECB.

Hydroelectric Engineering Practice - Vol. 2 - Mechanical and Electrical Engineering - J.G. Brown.

Hochstetter, W. - "Excitation and Control Systems for Synchronous Machines" - Siemens Elektrizitätswirtschaft" - Vol. 81-1982.

Badra, A.A. - “Digitalização e Modernização de Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos” - XIV SNPTEE - 1997.

Zeni Jr., N. Controle da Excitação de Geradores de Usinas Hidrelétricas: Modelagem, Identificação, Ajustes e Ensaio de Campo, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Outubro de 1987.

F.M. Corbett, Eng. LMIEEE, Upgrading of Hydrogenerator Excitation Systems, 0-7803-5957-7/00/\$10.00©2000 IEEE.

IEEE Industry Applications Magazine, Excitation Control of the Synchronous Generator, March/April 2001.

IEEE Industry Applications Magazine, Digital Excitation Enhances Performance and Improves Diagnostics, March/April 2001.

CIGRÉ – ELECTRA Publication, October 1995.

F.P. de Mello and C. Concórdia, Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, IEEE Transactions PA&S. Vol. 88, No. 4, April 1969, pp.316-329.

P.L. Dandeno, A.N. Karas, K.R. McClymont, W. Watson, Effect of High-Speed Rectifier Excitation Systems in Generator Stability Limits, IEEE PA&S – JAN, 1968.

R.H. Stuart, S.E. Gesh, C.H. Busby, Electrical Features of the Churchill Falls Development, RHP Thom ibid, Jan/Feb 1974.

PSS (Pac) UHE Salto Osório.

P.Gomes, N. Zeni, H.M. Valgas, Coordinated Application of Power System Stabilizers in Brazilian Interconnected System, CIGRÉ Bienal.