

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Francisco João Di Mase Galvão Junior**

**REGULADOR DE TENSÃO PARA SISTEMAS DE EXCITAÇÃO  
BRUSHLESS – DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de *Mestre em Engenharia Elétrica*

**Área de Concentração:** Sistemas Elétricos de Potência  
**Orientador:** Prof. Dr. Délvio Franco Bernardes

**Agosto de 2007**

**Itajubá - MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

G182r

Galvão Júnior, Francisco João Di Mase  
Regulador de tensão para sistemas de Excitação Brushless -  
desenvolvimento e aplicação / Francisco João Di Mase Galvão  
Júnior. -- Itajubá,(MG) : [s.n.], 2007.  
84 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Délvio Franco Bernardes.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Excitação. 2. Regulador. 3. Gerador. I. Bernardes, Délvio  
Franco, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 621.316.72 (043)

# DEDICATÓRIA

*À Minha Querida Mãe, Maria José,  
E A Minha Irmã, Adriana,  
Com Muito Amor e Carinho*

## AGRADECIMENTOS

- *A toda minha família, em especial, minha mãe, Maria José Fonseca Galvão, pelo apoio incondicional ao longo de toda minha vida acadêmica, lutando sempre para que eu concluísse com êxito os meus estudos.*
- *À minha irmã, Adriana Galvão de Carvalho, pelo carinho e apoio.*
- *Ao professor e amigo Délvio Franco Bernardes, pela orientação do meu trabalho.*
- *Ao professor Jocélio Souza de Sá pelo apoio incondicional.*
- *Ao professor Antônio Eduardo Hermeto pelo apoio e confiança a mim depositada.*
- *À Universidade Federal de Itajubá, pelo ensino de extrema qualidade.*
- *À Empresa ALSTOM Hydro Energia do Brasil pela confiança no trabalho da Universidade e pelo apoio financeiro.*
- *Aos colegas de trabalho, em especial, Fernando Augusto Leal e Felipe Costa Chagas pelo apoio.*
- *Aos amigos de Campinas pela sempre sincera amizade.*
- *Às pessoas especiais que encontrei em Itajubá, que elas sempre permaneçam em minha vida.*

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho de dissertação é apresentar o desenvolvimento de um regulador automático de tensão para sistemas de excitação *brushless*.

O gerador síncrono com sistema de excitação brushless é uma solução atrativa para problemas relacionados ao resfriamento dos anéis coletores. A excitação *brushless* elimina a necessidade de escovas, comutadores e anéis coletores. Para tal, um campo estático contínuo induz tensão trifásica alternada na armadura rotativa da excitatriz. A armadura está instalada no eixo do gerador e conectada a uma ponte retificadora trifásica rotativa. Deste modo, a tensão contínua de saída da ponte é aplicada ao campo do gerador síncrono.

O regulador automático foi desenvolvido com a mais avançada tecnologia de microcontrolador associado a um controlador lógico programável. A eletrônica de potência está fundamentada na tecnologia do semicondutor IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). O circuito de potência da excitação está explicado e o sinal PWM do circuito de controle está analisado.

A operação do sistema de excitação *brushless* de geradores síncronos conectados no sistema está apresentada. Todos os modos de operação do regulador estão criteriosamente explicados e analisados. Vários ensaios foram realizados no regulador e os resultados estão apresentados ao longo do trabalho.

Uma metodologia para monitoramento dos diodos também é apresentada neste trabalho de dissertação. Este monitoramento é necessário em excitatrizes brushless e somente pode ser realizado indiretamente, porque a ponte de diodos faz parte do rotor. Desta maneira, um *software* para a realização deste monitoramento é proposto.

# ABSTRACT

The main objective of this dissertation is to present the development of an automatic voltage regulator for brushless excitation system.

The brushless excitation of synchronous machine is an attractive solution for problems related to slip rings cooling. The brushless excitation eliminates the need for brushes, a commutator and slip rings. For this, exciter stationary DC field induces AC three-phase voltage into the rotating exciter armature. This armature is attached to generator shaft and connected to a rotating three-phase bridge rectifier. The DC voltage of the rotating rectifier is applied to the field of the synchronous generator.

The automatic regulator was developed with most advanced microcontroller technology together with Programmable Logical Controller (PLC). The power electronics part is fitted with an IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) semiconductor. The power circuit for the excitation is explained and the signal of the PWM chopper circuit is analyzed.

The operation of the brushless excitation system of synchronous generator is presented. All the operating modes of the regulator are carefully explained. Many tests were realized and the results are presented in this work.

A methodology for Diode Monitoring is also presented in this dissertation. This monitoring is needed in brushless excitation and can only be done indirectly, because the diode bridge is part of the rotor. In this way, a software for this monitoring is proposed.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>9</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Símbolos .....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	2
1.2 Contribuição .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Considerações Iniciais .....	6
2.2 Evolução do Sistema de Excitação .....	6
2.3 Regulador Automático de Tensão .....	7
2.4 Considerações Finais .....	9
<b>3. SISTEMA DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS.....</b>	<b>11</b>
3.1 Considerações Iniciais .....	11
3.2 Descrição do Sistema.....	11
3.3 Componentes Principais Do Sistema de Excitação Brushless .....	13
<b>3.3.1 Transformador de Excitação.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3.2 Ponte Retificadora Trifásica Não-Controlada.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3.3 Sistema de Medição .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3.4 Sistema de Regulação de Tensão.....</b>	<b>17</b>
3.4 Considerações Finais .....	18
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO REGULADOR DE TENSÃO.....</b>	<b>20</b>
4.1 Considerações Iniciais .....	20
4.2 Controle Direto da Corrente de Campo (CIE).....	21
4.3 Controle da Tensão do Terminal do Gerador (CV).....	25
4.4 Controle da Potência Reativa Trocada com a Rede (CAR).....	27
4.5 Atribuições do Controlador Lógico Programável .....	28
4.6 Atribuições do Microcontrolador Programável (MC).....	29
4.7 Driver de Gatilhamento .....	32
4.8 Lógica de Operação do Regulador .....	34
4.9 Controle PID.....	38
4.10 Considerações Finais .....	41
<b>5. ENSAIOS.....</b>	<b>44</b>
5.1 Ensaios Laboratoriais .....	44
<b>5.1.1 Resultados dos Ensaios no Modo de Operação CIE.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1.2 Resultados dos Ensaios no Modo de Operação CV .....</b>	<b>50</b>
<b>5.1.3 Resultados dos Ensaios no Modo de Operação CAR .....</b>	<b>54</b>
5.2 Ensaios de Campo .....	59
<b>5.2.1 Comissionamento do Sistema de Regulação de Tensão .....</b>	<b>63</b>
5.3 Considerações Finais .....	66
<b>6. MONITORAMENTO DOS DIODOS ROTATIVOS .....</b>	<b>68</b>
6.1 Metodologia Aplicada .....	68
6.2 Resultados das Simulações.....	70
Neste caso, a queima do seguinte diodo foi simulada: .....	73

6.3	Análise dos Resultados.....	76
6.4	Considerações Finais .....	78
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>81</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>



## Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de excitação brushless.....	12
Figura 2 - Sistema de alimentação do campo da excitatriz.....	14
Figura 3 - Sistema de realimentação de tensão.....	16
Figura 4 - Sistema de realimentação de potência reativa.....	17
Figura 5 - Faixa de valores de tensão na saída do Hall.....	21
Figura 6 - Circuito condicionador de sinal.....	22
Figura 7 – Sinal de realimentação de corrente.....	23
Figura 8 - Suportabilidade térmica da excitatriz.....	24
Figura 9 - Sinal de realimentação de tensão.....	26
Figura 10 - Sinal de realimentação de potência reativa.....	27
Figura 11 - Representação CLP / IHM.....	29
Figura 12 - Forma de onda da tensão de saída do IGBT – valor intermediário.....	30
Figura 13 - Forma de onda da tensão de saída do IGBT – valor mínimo.....	31
Figura 14 - Forma de onda da corrente no circuito indutivo.....	31
Figura 15 - Circuito de gatilhamento do IGBT.....	32
Figura 16 - Representação do IGBT.....	33
Figura 17 - Aplicação do diodo de free-wheeling.....	33
Figura 18 - Forma de onda da tensão anodo-catodo do diodo de free-wheeling.....	34
Figura 19 - Fluxograma de funcionamento do regulador de tensão.....	35
Figura 20 - Esquema de ligações do regulador de tensão.....	37
Figura 21 - Malha de controle.....	40
Figura 22 - Tela do programa de supervisão implementado.....	41
Figura 23 - Diagrama funcional.....	42
Figura 24 - Comportamento do sinal de controle de corrente.....	46
Figura 25 - Comportamento estável da corrente.....	47
Figura 26 - Comportamento do sinal de corrente frente a um degrau negativo no valor de referência.....	48
Figura 27 - Resposta mediante à elevação de 70% no valor do ganho proporcional.....	49
Figura 28 - Resposta mediante a elevação de 90% no valor do ganho proporcional.....	50
Figura 29 – Comportamento do sinal de tensão.....	51
Figura 30 - Comportamento da tensão na partida direta do MIT.....	52
Figura 31 - Comportamento do sinal de tensão mediante alteração do ganho.....	53
Figura 32 - Comportamento do sinal de tensão frente a um degrau negativo no valor de referência.....	54
Figura 33 - Comportamento da potência reativa indutiva mediante um degrau positivo da referência.....	55
Figura 34 - Comportamento da potência reativa indutiva mediante um degrau negativo da referência.....	56
Figura 35 - Passagem de potência reativa indutiva para capacitiva.....	57
Figura 36 - Comportamento da potência reativa indutiva mediante uma alteração na faixa de tolerância.....	58
Figura 37 - Unidade Geradora – PCH Luiz Dias.....	60
Figura 38 - Comportamento da potência reativa mediante um degrau negativo da referência.....	60

Figura 39 - Alteração da faixa de tolerância. ....	61
Figura 40 - Passagem de potência reativa indutiva para capacitiva. ....	62
Figura 41 – Análise da estabilidade da potência reativa.....	63
Figura 42 - Sistema modelado. ....	71
Figura 43 - Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 1.....	72
Figura 44 – Representação da condição de defeito da simulação 2.....	73
Figura 45 – Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 2.....	73
Figura 46 – Representação da condição de defeito da simulação 3.....	74
Figura 47 – Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 3.....	74
Figura 48 – Representação da condição de defeito da simulação 4.....	75
Figura 49 – Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 4.....	75
Figura 50 – Variação da corrente em função dos defeitos dos diodos. ....	77
Figura 51 – Representação do coeficiente de monitoramento dos diodos. ....	78

## **Lista de Tabelas**

Tabela 6.1 – Valores médios referentes à simulação 1.....	73
Tabela 6.2 – Valores médios referentes à simulação 2.....	74
Tabela 6.3 – Valores médios referentes à simulação 3.....	75
Tabela 6.4 – Valores médios referentes à simulação 4.....	76
Tabela 6.5 – Resultados das simulações.....	76

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

CLP	Controlador Lógico Programável.
PWM	Pulse Width Modulation.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
$L_E$	Campo da Excitatriz (parte estática).
$I_E$	Corrente no Campo da Excitatriz.
$B_{3F}$	Bobina Trifásica (parte rotativa).
$P_{RD}$	Ponte Trifásica Rotativa a Diodos.
$L_G$	Campo do Gerador Principal.
$V_T$	Tensão Terminal do Gerador.
$V_{CEIL}$	Tensão de <i>Ceiling</i> .
$V_d$	Tensão DC na Saída da Ponte Retificadora.
TP	Transformador de Potencial.
PD	Ponte de Diodos.
TC	Transformador de Corrente.
PID	Proporcional Integral Derivativo.
MC	Microcontrolador Programável.
CIE	Controle Direto da Corrente de Campo.
CV	Controle da Tensão do Terminal do Gerador.
CAR	Controle da Potência Reativa Trocada com a Rede.
UG	Unidade Geradora.
IHM	Interface Homem Máquina.
MIT	Motor de Indução Trifásico.

CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais.
$R_{QI}$	Relação entre a Potência Reativa e a Corrente de Campo da Excitatriz.
$R_{VI}$	Relação entre a Tensão do Gerador e a Corrente do Campo da Excitatriz.
ONS	Operador Nacional de Sistema.

# *Capítulo 1*

---

## *Introdução*

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Esta dissertação de mestrado, submetida ao Instituto de Sistemas Elétricos e Energia da Universidade Federal de Itajubá, tem por objetivo apresentar as etapas do desenvolvimento do protótipo de um regulador de tensão para geradores síncronos com sistemas de excitação *brushless*.

Inicialmente, de modo a facilitar o entendimento a respeito do funcionamento do regulador desenvolvido, serão apresentadas as principais características do sistema de excitação brushless, bem como as características operacionais dos equipamentos envolvidos no seu funcionamento.

Uma vez mostrado o funcionamento deste sistema de excitação, tanto com o sistema de geração hidrelétrica operando isoladamente quanto em paralelo com a rede, o trabalho passa a discorrer a respeito forma de operação do regulador automático de tensão, enfatizando as funções a ele atribuídas. É importante ressaltar que as funções não se limitam apenas ao controle da tensão elétrica no ponto de acoplamento da unidade geradora, uma vez que a comunicação com os dispositivos de proteção do gerador e o seu comportamento dinâmico frente à ocorrência de uma falha no sistema elétrico são aspectos que também devem ser devidamente considerados.

A tecnologia de controle implementada no regulador de tensão está apresentada, mostrando inclusive as equações matemáticas que regem o seu comportamento dinâmico. Um outro aspecto importante a ser considerado é a aplicação da tecnologia de MICROCONTROLADORES (MC) em conjunto com Controlador Lógico Programável (CLP). O sistema eletrônico empregado na atuação no regulador está fundamentado na modulação PWM da tensão de excitação através da ação do semi-condutor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Por se tratar de um desenvolvimento que irá resultar na construção de um protótipo, resultados de ensaios laboratoriais e de campo são apresentados, contribuindo para a validação do equipamento.

Este capítulo tem por finalidade apresentar uma metodologia para identificação de defeitos nos diodos da ponte retificadora (seis diodos) rotativa do sistema de excitação *brushless*. A principal motivação para o desenvolvimento desta metodologia está relacionada ao relato, por parte dos fabricantes de geradores síncronos, do crescente aumento na ocorrência de defeitos nestes dispositivos, que pode resultar em diversas adversidades operacionais no gerador, por exemplo, redução na eficiência do sistema de excitação.

Os ensaios foram realizados no laboratório do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia da Universidade Federal de Itajubá (ISEE / UNIFEI) e na Pequena Central Hidrelétrica Luiz Dias, localizada no município de Itajubá, MG.

## **1.2 Contribuição**

Ao se apresentar o desenvolvimento em questão, a abordagem detalhada do sistema de excitação brushless se fez necessária, apresentando desde as suas características elétricas até o seu comportamento frente a uma situação real de operação. Assim, naturalmente este trabalho expõe todas as particularidades deste sistema, proporcionando ao leitor a oportunidade de tomar conhecimento ou de fazer uma releitura a respeito deste assunto.

Dento deste contexto, vale ressaltar também que neste trabalho há uma grande diversidade de tópicos relacionados à Engenharia Elétrica, mostrando as características inerentes aos sistemas elétricos de potência, eletrônicos e de controle, envolvidos na regulação de tensão de centrais hidrelétricas de energia de pequeno porte.

Outra importante contribuição deste trabalho é a comprovação dos benefícios que são obtidos quando universidades trabalham em conjunto com indústrias do setor privado. O



desenvolvimento a ser apresentado nesta dissertação é resultado de uma parceria entre a Universidade Federal de Itajubá e a ALSTOM Hydro Energia Brasil. Este trabalho resultou no desenvolvimento de um protótipo de regulador de tensão para sistemas de excitação brushless, o qual foi testado e validado através de ensaios laboratoriais e de campo. Estas parcerias deveriam ser mais incentivadas, uma vez que a indústria pode fortalecer o seu desenvolvimento tecnológico através da mão de obra e da estrutura oferecidas pela universidade. Em contrapartida, a universidade pode aumentar a quantidade de alunos pesquisadores bolsistas de graduação e pós-graduação, bem como fortalecer o corpo de pesquisadores docentes.

Este trabalho englobou os diversos conceitos que fazem parte do projeto de um regulador de tensão para máquinas com sistema de excitação brushless, possibilitando ao leitor um entendimento completo a respeito do funcionamento deste sistema.

## *Capítulo 2*

---

### *Revisão Bibliográfica*

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Considerações Iniciais**

Neste capítulo será apresentado um breve histórico a respeito da evolução dos sistemas de excitação, permitindo o conhecimento dos fatores que levaram ao desenvolvimento do sistema de excitação *brushless*.

Além da evolução dos sistemas de excitação, o desenvolvimento das tecnologias inerentes aos circuitos eletrônicos de controle resultou no surgimento de reguladores automáticos de tensão. Assim, neste capítulo, também, serão apresentados os trabalhos científicos que mais contribuíram para implementação de um sistema de controle eficaz do protótipo do regulador automático apresentado nesta dissertação.

### **2.2 Evolução do Sistema de Excitação**

Antes da utilização dos sistemas de excitação atualmente empregados, a excitação era realizada por um gerador de corrente contínua acoplado no eixo do gerador principal. Com o avanço da tecnologia de projeto de geradores houve um aumento significativo na capacidade nominal de geração dos equipamentos, ocasionando algumas inconveniências na utilização das excitatrizes de corrente contínua, tais como:

- exigência de uma elevada quantidade de escovas;
- ocorrência de faiscamento nos comutadores durante variações abruptas de carga;
- dificuldade de se acoplar a máquina de corrente contínua no eixo do gerador.

Além destas inconveniências citadas, havia uma grande necessidade de se fazer manutenções periódicas nas escovas, o que obriga a interrupção da geração de energia elétrica.

Nos sistemas antigos, ou melhor, primitivos, o operador da usina tinha função de ajustar o reostato do campo da excitatriz de acordo com a tensão medida nos terminais do gerador. No entanto, com o advento dos sistemas eletrônicos de controle, os reguladores de tensão atuam automaticamente na tensão de excitação, controlando a tensão do gerador ou a potência reativa trocada com o sistema elétrico.

Devido aos inconvenientes citados, os quais são inerentes ao sistema de excitação com máquina de corrente contínua, por volta de 1950, houve uma intensificação nos estudos e pesquisas para a consolidação de um sistema de excitação de corrente alternada utilizando retificadores. Uma grande dificuldade encontrada para o avanço destes estudos era a máxima tensão reversa dos diodos, que era insuficiente para as aplicações. No entanto, esta dificuldade foi superada através da aplicação dos diodos de silício, fazendo com que as excitatrizes de corrente alternada começassem a surgir efetivamente. Assim, começaram a surgir os seguintes sistemas de excitação:

- excitatriz de campo rotativo com retificador estático a diodos;
- excitatriz estática com tiristores estáticos;
- excitatriz sem escovas (*brushless*).

Como poderá ser observado neste trabalho de dissertação, uma grande vantagem da excitatriz *brushless* é a eliminação definitiva dos anéis coletores e escovas. Por volta de 1960, os engenheiros da *Westinghouse Electric Corporation* conseguiram aplicar este sistema de excitação em geradores com potências maiores, favorecendo o início da sua aplicação em grande escala.

## **2.3 Regulador Automático de Tensão**

Atualmente, os reguladores de tensão operam automaticamente, controlando a tensão do gerador ou a potência reativa trocada com o sistema elétrico correspondente. Malhas de

controle fundamentadas na tecnologia de controle PID (Proporcional Integral Derivativa) são modeladas, seguindo critérios de análise de estabilidade dinâmica. Estes critérios, bem como a otimização dos parâmetros da malha são criteriosamente detalhados no seguinte livro: KUNDUR, Prabha. **Power System Stability and Control**. Electric Power Research Institute, Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc., 1994.

Diversos trabalhos publicados apresentam técnicas de otimização das malhas de controle através dos critérios de estabilidade dinâmica. Deste modo, o seguinte trabalho foi importante na modelagem do sistema de controle do regulador de tensão desenvolvido: CRENSHAW, M.L.; BOLLINGER, K. E.; BYERLY, R.T.. **Excitation System Models For Power System Stability Studies**, IEEE Trans. Power Appar. and System, PAS-100, no. 2, pp. 494-509, 1981. Além deste trabalho citado, as técnicas de modelagem propostas no seguinte livro, também, contribuíram para uma atribuição coerente de valores aos parâmetros da malha implementada: ANDERSON, P. M.; FOUAD A. A.. **Power System Control and Stability**, Ames, IA, USA, 1997.

Diante do fato que o conhecimento das características físicas do sistema a ser controlado é extremamente importante, técnicas para identificação de sistemas contribuíram para a definição do modelo da malha de controle do regulador. Esta técnica está apresentada no seguinte artigo publicado: SHANDE, Shen; SHOUZHEN, Zhu. **Identification of Parameters of Synchronous Machine**, IEEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991, Hong Kong.

Através da utilização das técnicas de modelagem de sistemas de controle e ajustes realizados durante ensaios laboratoriais e de campo, a malha PID do protótipo desenvolvido foi modelada. Os resultados dos ensaios estão apresentados no capítulo 5 da dissertação.

## **2.4 Considerações Finais**

Este capítulo apresentou um breve histórico a respeito da evolução dos sistemas de excitação, bem como as diretrizes tomadas na definição do modelo empregado do sistema de controle do protótipo do regulador desenvolvido. Assim, através do conteúdo apresentado neste capítulo é possível notar a importância do advento do sistema de excitação brushless e a mudança de filosofia da regulação, a partir do desenvolvimento dos reguladores automáticos, os quais empregam as mais avançadas tecnologias de controle, conforme será apresentado no decorrer deste trabalho.

## *Capítulo 3*

---

# *Sistema de Excitação Brushless*

## **3. SISTEMA DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS**

### **3.1 Considerações Iniciais**

O sistema de excitação brushless foi desenvolvido com o objetivo de eliminar a necessidade da utilização de anéis coletores e escovas para a alimentação do campo do gerador.

Neste tipo de excitação, os anéis e escovas perderam a sua finalidade devido ao fato do acoplamento entre a excitatriz e o campo do gerador ser eletromagnético. Assim, houve um progresso significativo no desenvolvimento e uso de geradores síncronos, haja vista que deixaram de existir os costumeiros problemas ligados ao resfriamento dos anéis coletores e a vida útil das escovas.

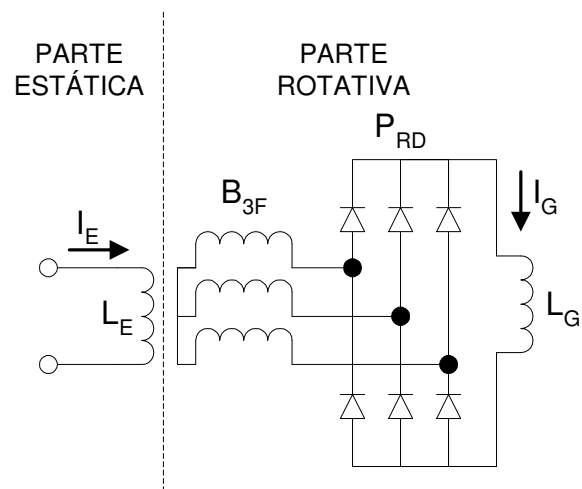
Deste modo, nesta seção, o princípio de funcionamento da excitatriz brushless será apresentado detalhadamente, enfatizando a particularidade do controle da tensão do gerador, o qual se faz através da atuação no valor de tensão contínua aplicada ao campo da excitatriz.

### **3.2 Descrição do Sistema**

De um modo geral, analogamente a um gerador síncrono, na excitatriz o fluxo magnético é produzido através da circulação de corrente contínua nas bobinas dos pólos, resultando na indução de três tensões defasadas eletricamente de  $120^\circ$ .

No entanto, a diferença preponderante com relação ao princípio de operação dos geradores síncronos consiste no fato de que na excitatriz brushless os pólos estão dispostos em uma estrutura estática, ao passo que as bobinas, onde serão induzidas as tensões, encontram-se na parte rotativa da máquina, conforme mostrado na figura a seguir.



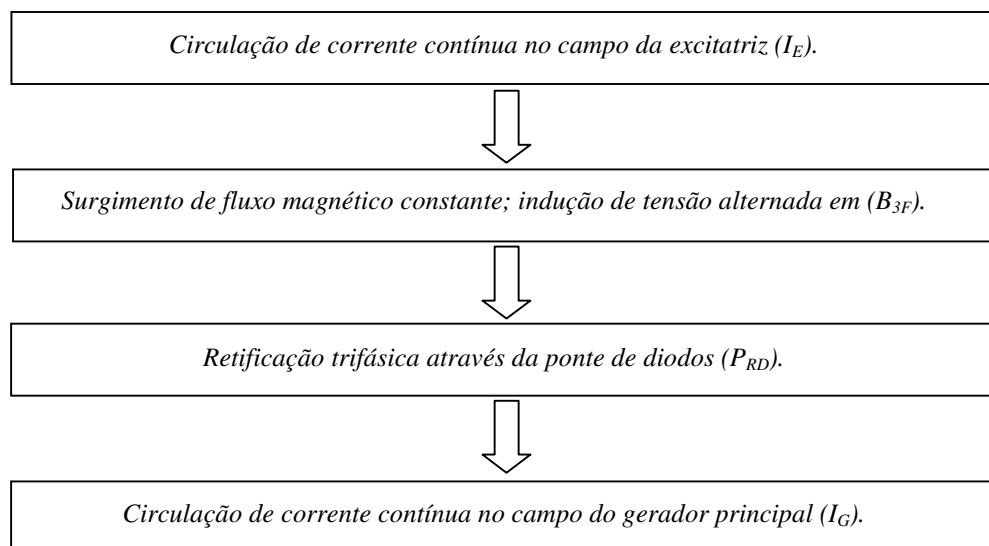


**Figura 1 - Sistema de excitação brushless.**

Onde:

- $L_E$  – campo da excitatriz (parte estática);
- $I_E$  – corrente no campo da excitatriz;
- $B_{3F}$  – conjunto trifásico de bobinas (parte rotativa);
- $P_{RD}$  – ponte trifásica rotativa a diodos;
- $L_G$  – campo do gerador principal.

Assim, o processo de excitação do campo do gerador principal ( $L_G$ ) pode ser entendido através do diagrama apresentado a seguir:



### 3.3 Componentes Principais Do Sistema de Excitação Brushless

Nesta seção serão apresentados os principais aspectos a serem considerados no projeto de especificação dos componentes envolvidos no sistema de regulação de tensão de excitação brushless.

Deste modo, os seguintes componentes serão estudados ao longo desta seção:

- transformador de excitação;
- ponte retificadora não-controlada trifásica;
- regulador de tensão.

#### 3.3.1 Transformador de Excitação

Usualmente, o transformador de alimentação do campo da excitatriz tem seu lado primário conectado aos terminais de saída do gerador, e os seus terminais secundários ligados à ponte retificadora trifásica não-controlada.

De um modo geral, o projeto deste transformador deve prever a possibilidade de atingir nos seus terminais secundários um nível de tensão compatível ao pré-estabelecido pelos estudos de estabilidade dinâmica do sistema. No caso das máquinas com excitatriz brushless, geralmente, frente à ocorrência de uma falta no sistema elétrico, a tensão deve atingir entre 150% e 160% do valor da tensão nominal do campo da excitatriz.

Este nível de tensão, denominado tensão de *ceiling*, pode ser aplicado ao campo durante um período de aproximadamente 10 segundos, mediante a ação automática do regulador de tensão empregado. É importante observar que esta condição é válida somente para os sistemas de excitação brushless.

### 3.3.2 Ponte Retificadora Trifásica Não-Controlada

Nos sistemas de excitação estática, o controle da tensão que é aplicada diretamente ao campo do gerador é feito através da variação do ângulo de disparo dos tiristores de uma ponte retificadora trifásica controlada. No caso da excitatriz brushless, o sinal trifásico do secundário do transformador de excitação é retificado por uma ponte trifásica a diodos, ou seja, não-controlada. Assim, a tensão contínua da saída do retificador é variada de acordo com as necessidades operacionais do sistema de excitação, através do circuito com modulação PWM empregado, o qual será apresentado ao longo do trabalho.

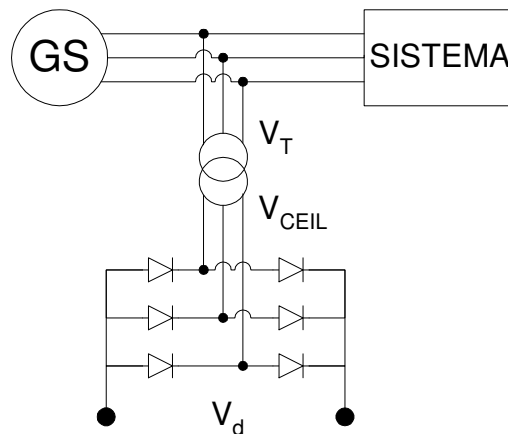


Figura 2 - Sistema de alimentação do campo da excitatriz.

Onde:

$V_T$  – tensão terminal do gerador;

$V_{CEIL}$  – tensão de *ceiling*;

$V_d$  – tensão dc na saída da ponte retificadora.

Tendo em vista o baixo valor da corrente  $I_E$ , na maioria dos casos, a ponte retificadora já se encontra integrada ao regulador automático de tensão.

### **3.3.3 Sistema de Medição**

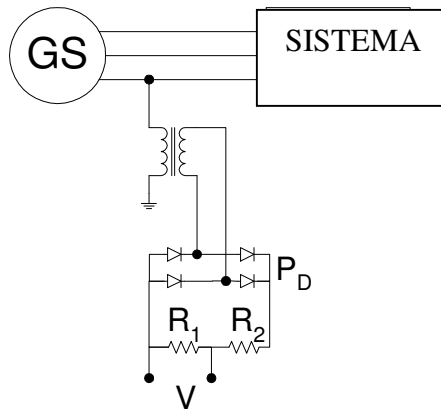
O sistema de medição envolvido na regulação de tensão tem por finalidade adequar os níveis dos sinais de tensão e corrente que são monitorados e controlados pelo regulador automático de tensão. Este regulador possui três modos operacionais, os quais permitem os controles da corrente do campo da excitatriz, da tensão no terminal do gerador e da potência reativa trocada com a rede elétrica. Desta maneira, o sistema de medição a ser projetado deve adequar os valores das grandezas de interesse, conforme será apresentado a seguir:

#### ***Sistema de Medição – Corrente de Campo da Excitatriz***

Além da inexistência dos problemas relacionados às escovas e aos anéis coletores, uma outra vantagem do sistema de excitação brushless é a necessidade de uma corrente de baixo valor no campo de excitatriz, o que permitiu a aplicação de dispositivos eletrônicos pequenos e de baixo custo para a leitura do valor desta corrente. No caso apresentado neste trabalho, a medição é feita através de um sensor Hall, cujas características de funcionamento serão mostradas no próximo capítulo.

#### ***Sistema de Medição – Tensão do Gerador***

Através de um Transformador de Potencial (TP) monofásico o sinal de tensão dos terminais do gerador é enviado ao regulador de tensão. Usualmente, o nível de tensão é de 115 V<sub>AC</sub>, implicando naturalmente na necessidade de se adequar este valor para o sistema eletrônico de controle, o qual trabalha no máximo em 10 V<sub>DC</sub>.



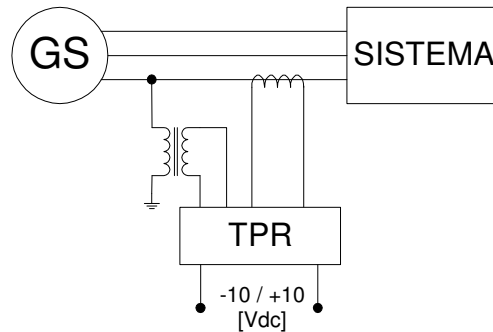
**Figura 3 - Sistema de realimentação de tensão.**

O sinal de tensão disponível no secundário do TP é retificado através de uma ponte monofásica de quatro diodos, representada por PD. A partir desta retificação, um circuito divisor de tensão é implementado, resultando nos terminais do resistor representado por R1 um valor de tensão de 5 [V], o qual realimenta o controlador lógico programável. Assim, é possível notar que 1 pu de tensão da rede, ou seja, 115 [V] no secundário do TP, equivale a 5 [V] na entrada do CLP.

### ***Sistema de Medição – Potência Reativa***

No caso do controle de potência reativa, fica evidente a necessidade da utilização de um TP e um Transformador de Corrente (TC), cuja corrente secundária é 5 [A]. Como poderá ser observado no capítulo subsequente, os sinais provenientes do TP e TC são aplicados a um transdutor de potência reativa, que fornece como saída um sinal proporcional de tensão compreendido entre  $-10 V_{DC}$  e  $+10 V_{DC}$ .

Diante do fato que o gerador pode fornecer ou absorver potência reativa, quando o transdutor estiver com uma tensão de saída de 0 a +10 [V], é um indício de fornecimento de potência reativa, ao passo que quando houver uma absorção de potência reativa a faixa de tensão da saída será de 0 a -10 [V].



**Figura 4 - Sistema de realimentação de potência reativa.**

### 3.3.4 Sistema de Regulação de Tensão

Neste subitem serão apresentados os princípios de funcionamento dos modos operacionais do regulador de tensão em questão.

Estando a unidade geradora conectada em um sistema isolado, o princípio de funcionamento do regulador de tensão consiste em manter os valores das tensões nos terminais do gerador dentro de uma faixa de tolerância estabelecida. O tempo de resposta do sistema de regulação deve ser suficientemente curto, para que as cargas supridas pelo sistema não sofram danos provocados pelas oscilações de tensões. Estas oscilações são, na maioria dos casos, ocasionadas pela aleatoriedade própria das cargas de um sistema.

Dentro deste contexto, é imprescindível a otimização dos ajustes da malha de controle, bem como do circuito eletrônico responsável pela atuação no valor da tensão de excitação. Basicamente, o controle da tensão parte do seguinte princípio operacional: o valor da tensão do secundário do TP é condicionado para um valor de projeto, para então ser comparado a um valor de referência definido durante a configuração do regulador. A partir do resultado desta comparação, a atuação se faz através da técnica inerente à tecnologia matemática de controle PID, associado a tecnologia do microcontrolador programável empregado.

Se a unidade geradora estiver conectada em paralelo com a rede, como comentado, o regulador tem por finalidade atuar no controle da potência reativa trocada entre o gerador e

a rede. Sendo assim, a diferença preponderante existente entre estes dois modos operacionais está na realimentação e na configuração do valor de referência. No entanto, as ações da malha de controle, do microcontrolador e do circuito eletrônico são semelhantes.

Um outro modo operacional do regulador de tensão é o controle da corrente de campo, que tem única e exclusivamente a função de manter a circulação de um determinado valor de corrente no campo da excitatriz. É importante enfatizar que devido ao fato deste modo não controlar a magnitude das grandezas relacionadas ao sistema (tensão e potência reativa), a sua aplicação deve ocorrer somente em situações especiais, tais como: teste de comissionamento do gerador ou falhas na realimentação de tensão e/ou corrente do estator da máquina.

### **3.4 Considerações Finais**

Neste capítulo foi analisado o princípio de funcionamento de uma excitatriz brushless, bem como os modos operacionais do regulador de tensão, dando uma visão geral do equipamento.

A partir desta visão geral, o item subsequente tem por objetivo apresentar detalhadamente o desenvolvimento do regulador para este tipo de sistema, mostrando as suas características e as tecnologias de controle e eletrônica de potência implementadas.

## *Capítulo 4*

---

### *Desenvolvimento do Regulador de Tensão*



## **4. DESENVOLVIMENTO DO REGULADOR DE TENSÃO**

### **4.1 Considerações Iniciais**

De modo a facilitar a compreensão das etapas percorridas durante o desenvolvimento do protótipo, inicialmente, será feita uma abordagem geral a respeito dos dispositivos envolvidos no regulador. Na seqüência, o funcionamento integrado destes dispositivos será detalhado, procurando sempre se estabelecer uma correlação com a filosofia de programação implementada.

Por se tratar do desenvolvimento de um equipamento que deve ser utilizado em um sistema elétrico onde existem, além do gerador, sistemas de proteção, comando e outros dispositivos essenciais para o funcionamento adequado da unidade de geração hidrelétrica, os princípios operacionais estabelecidos pelo operador do sistema (ONS) devem ser criteriosamente analisados para então iniciar o desenvolvimento do algoritmo a ser implementado.

Uma vez definido o algoritmo, a lógica operacional, neste caso especificamente, está desenvolvida e implementada nos programas escritos no Controlador Lógico Programável (CLP) e no Microcontrolador Programável (MC).

Como poderá ser observado ao longo deste capítulo, o CLP e o MC atuam de maneira conjunta, propiciando um excelente tempo de resposta que atende as necessidades do sistema, e uma modulação PWM eficaz e precisa.

Considerando que o controle do valor da corrente  $I_E$ , possui uma importância tão significativa quanto o algoritmo implementado, a atuação do IGBT mediante as diversas situações de operação do gerador será, também, um assunto abordado com ênfase no decorrer deste capítulo.

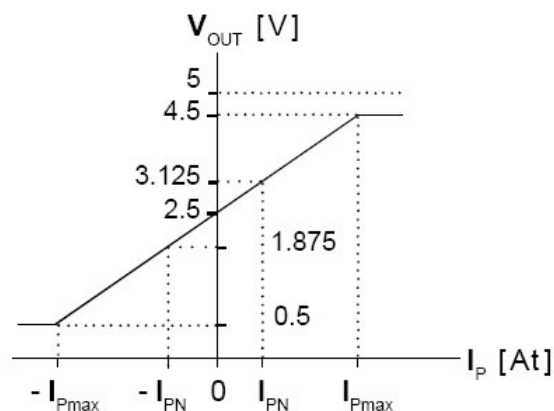
Com isso, o presente capítulo aborda o comportamento geral dos dispositivos frente aos modos operacionais do regulador de tensão, os quais são os seguintes: controle direto da corrente de campo (CIE), controle da tensão do terminal do gerador (CV) e controle da potência reativa trocada com a rede (CAR).

Após as análises do regulador frente aos modos de operação citados, o CLP, o MC, a tecnologia de controle PID e o algoritmo de programação serão abordados individualmente em suas respectivas seções.

## 4.2 Controle Direto da Corrente de Campo (CIE)

Como comentado anteriormente, o sistema de medição da corrente do campo da excitatriz é feito através de um sensor Hall. No entanto, como poderá ser observado na seqüência, um circuito eletrônico, que está definido como um “condicionador de sinal”, foi desenvolvido para melhorar a realimentação do sistema de controle. Este condicionador de sinal tem por finalidade aumentar a faixa de tensão da saída do sensor, contribuindo desta maneira para uma ação mais precisa e estável da malha de controle.

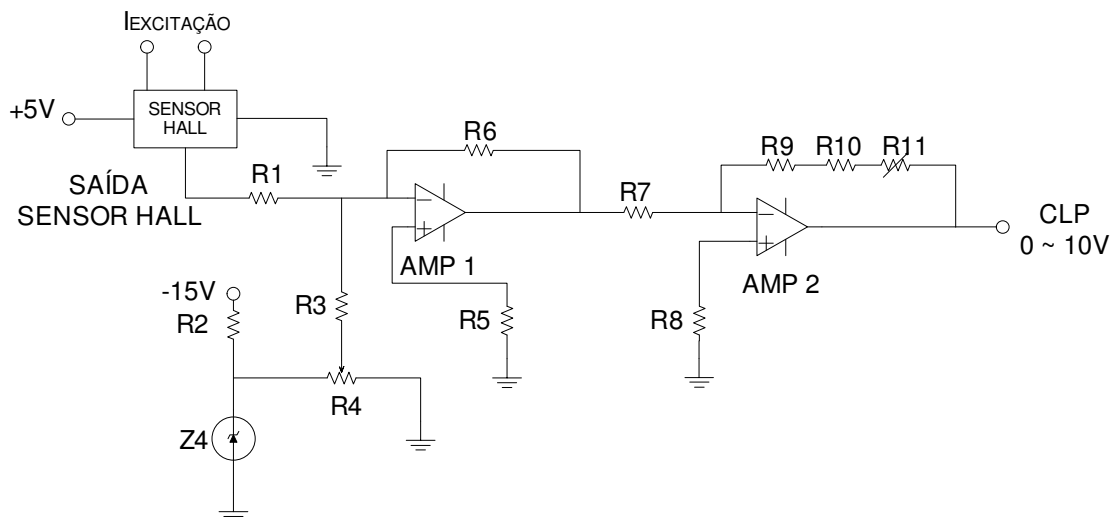
Originalmente, a faixa de tensão da saída do sensor Hall, definida pelo fabricante, possui a seguinte característica:



**Figura 5 - Faixa de valores de tensão na saída do Hall.**

Deste modo, ao se analisar o gráfico pode-se obter a confirmação que a faixa de tensão de saída do Hall, a qual retrata a corrente medida, é relativamente pequena se comparada à faixa de valores relativa à medição de corrente.

Sendo assim, o seguinte circuito condicionador de sinal foi desenvolvido.



**Figura 6 - Circuito condicionador de sinal.**

O princípio de funcionamento do circuito está relacionado a tecnologia de amplificadores operacionais, o que resultou na seguinte lógica de atuação:

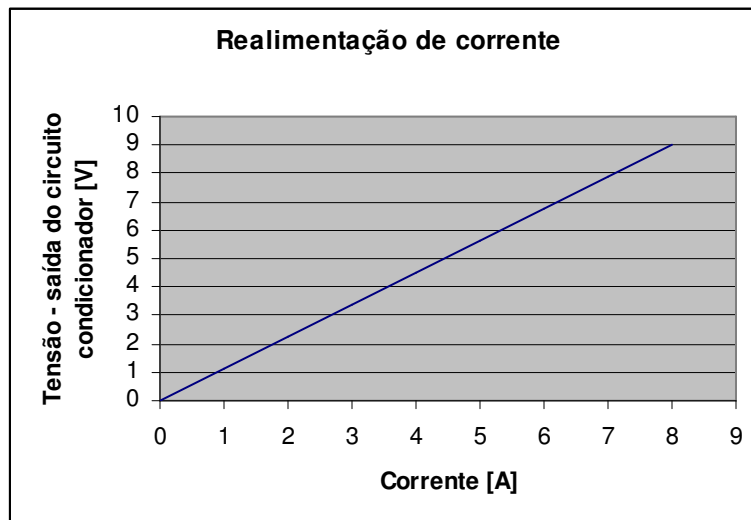
Através do resistor  $R_3$ , uma tensão de  $-2,5$  [V] é somada à tensão de saída do sensor Hall, definida pela relação:

$$V_{OUT} = 0,25 \cdot I_p + 2,5 \text{ [V]}$$

Isto faz com que a tensão de saída do amplificador operacional Amp1 seja zero quando a corrente  $I_p$  for nula. O amplificador operacional Amp2 amplifica e inverte o sinal de saída de Amp1 de modo que o sinal de tensão responsável pela realimentação de corrente de excitação passa a ser definido pela seguinte relação:

$$E_{Al} = 1,125 \cdot I_p \text{ [V]}$$

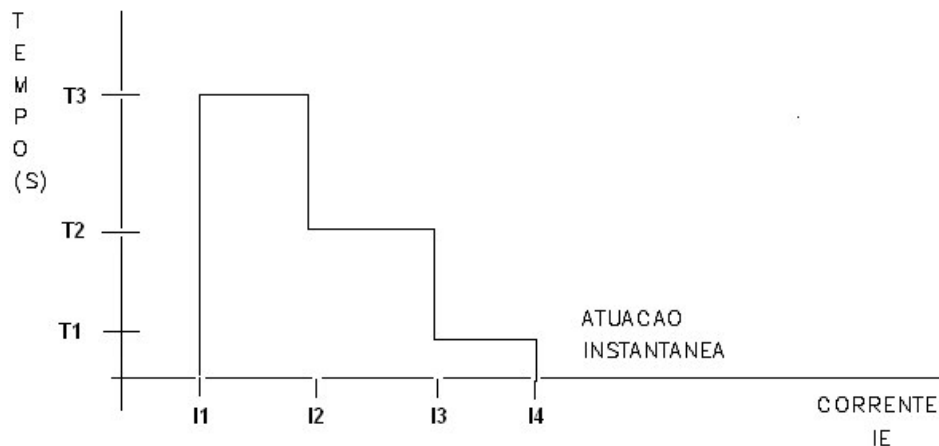
Então, o sinal de saída do circuito condicionador é o seguinte:



**Figura 7 – Sinal de realimentação de corrente.**

A realimentação de corrente é um parâmetro que deve ser continuamente monitorado, tendo em vista a necessidade de se evitar elevados valores de corrente no campo da excitatriz, fato que pode levar a uma ultrapassagem dos limites de suportabilidade térmica do material isolante utilizado em seus circuitos.

Deste modo, é importante que na configuração inicial do regulador seja prevista a entrada dos dados referentes à suportabilidade térmica do campo da excitatriz. Estes dados, que devem ser fornecidos pelo fabricante da excitatriz brushless, devem trazer informações que correlacionem o valor da corrente e o tempo permissível da sua circulação, resultando no seguinte gráfico apresentado a seguir:



**Figura 8 - Suportabilidade térmica da excitatriz.**

Uma vez excedida qualquer uma destas condições limites apresentadas, o regulador tem que interromper as ações da malha de controle, levando a corrente de excitação a um valor nulo, e simultaneamente deve transferir um comando digital para os reles dos contadores do campo e do circuito de desexcitação. Esta transferência do sinal digital está explicada em detalhes no capítulo subsequente.

Por exemplo, se um valor de corrente compreendido entre  $I1$  e  $I2$  exceder o tempo determinado por  $T3$ , há uma interrupção da circulação da corrente  $I_E$ .

Através da análise do gráfico anterior, a atuação da proteção passa a ser instantânea para valores de corrente superiores ao indicado por  $I4$ . Usualmente, este nível de corrente ( $I4$ ) é um dado de projeto importante, caracterizado na maioria dos casos de corrente de *ceiling*. Assim, fica evidente que em uma condição de defeito, onde haja a necessidade de se fortalecer o campo da excitatriz, a condição extrema de excitação não deve exceder o valor de corrente  $I4$ , podendo permanecer no máximo com um valor de corrente entre  $I3$  e  $I4$  durante o tempo  $T1$ , que na maioria das vezes é de aproximadamente 10 segundos. Este valor característico é válido somente para o sistema de excitação brushless.

Além de possibilitar o contínuo monitoramento da corrente do campo da excitatriz, tendo em vista a proteção deste circuito, a realimentação de corrente, também, é importante para a

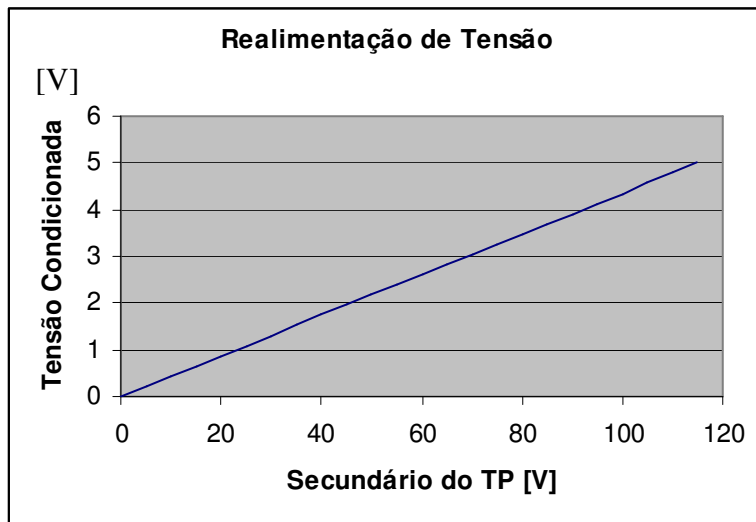
atuação da malha de controle, estando o equipamento configurado para operar no modo de controle direto da corrente de campo, ou seja, CIE. Este modo, também denominado Modo Manual de Operação, é utilizado em situações de teste do gerador ou na perda da realimentação de potência reativa, que pode ser, por exemplo, decorrente de um eventual defeito nos transformadores de medição que realimentam o regulador da unidade geradora.

### **4.3 Controle da Tensão do Terminal do Gerador (CV)**

Ao se conectar uma unidade geradora hidrelétrica em uma rede isolada, ou seja, sem a presença de outras unidades, para suprir a demanda de energia das cargas conectadas ao sistema, o regulador de tensão tem por finalidade garantir a manutenção do valor da tensão dentro de uma faixa aceitável. Em outras palavras, nesta condição operacional é realizado um controle direto da tensão do terminal do gerador.

Para tal finalidade, o sinal disponibilizado pelo transformador de potencial deve ser condicionado para valores compatíveis com os circuitos eletrônicos e de controle integrados ao regulador de tensão, conforme apresentado no item 3.3.3 do presente trabalho.

A relação existente entre o valor de tensão do secundário do TP e o sinal condicionado, que irá realimentar a malha de controle, pode ser observada através da análise do gráfico a seguir:



**Figura 9 - Sinal de realimentação de tensão.**

Uma vez selecionado este modo operacional, um valor de tensão de referência percentual deve ser atribuído na configuração do regulador. Por se tratar de um sistema isolado, durante os ensaios de validação do equipamento é importante que se analise o tempo de resposta do sistema de controle, analisando a atuação da malha PID, bem como o circuito eletrônico responsável pelo controle da condução do IGBT.

Além da aplicação em sistemas isolados, na filosofia de operação do regulador apresentado neste trabalho, o controle da tensão do terminal do gerador, também, é feito antes da colocação da unidade em paralelo com a rede, uma vez que as tensões do gerador e da rede devem estar compatíveis no instante do fechamento do disjuntor de sincronismo. Este procedimento de colocação em sincronismo está detalhado no item subsequente do trabalho.

Um outro aspecto importante a ser abordado é a utilização do controle de tensão nos procedimentos de comissionamento de uma central hidrelétrica, os quais visam verificar a atuação do regulador mediante variações no valor de referência de tensão. Para tal, o gerador em vazio é colocado em sua velocidade nominal, e um valor de referência é escolhido e o comportamento da tensão é analisado. Através desta análise é possível

verificar se houve a ocorrência de *overshoot*, e se necessário, deve-se realizar uma correção nos parâmetros da malha de controle ou até mesmo do circuito eletrônico.

Finalizando esta seção, é importante ressaltar que estando o gerador conectado em paralelo com uma rede elétrica, este modo operacional não pode em hipótese alguma ser selecionado, tendo em vista que o valor da tensão presente no terminal do gerador é resultado da ação das diversas unidades geradoras conectadas em paralelo.

#### 4.4 Controle da Potência Reativa Trocada com a Rede (CAR)

Como comentado, ao se colocar a Unidade Geradora (UG) em paralelo com a rede de suprimento de energia, o regulador necessariamente deve controlar a potência reativa trocada entre a UG e a rede. O sinal de realimentação de potência reativa está apresentado na Figura 10.

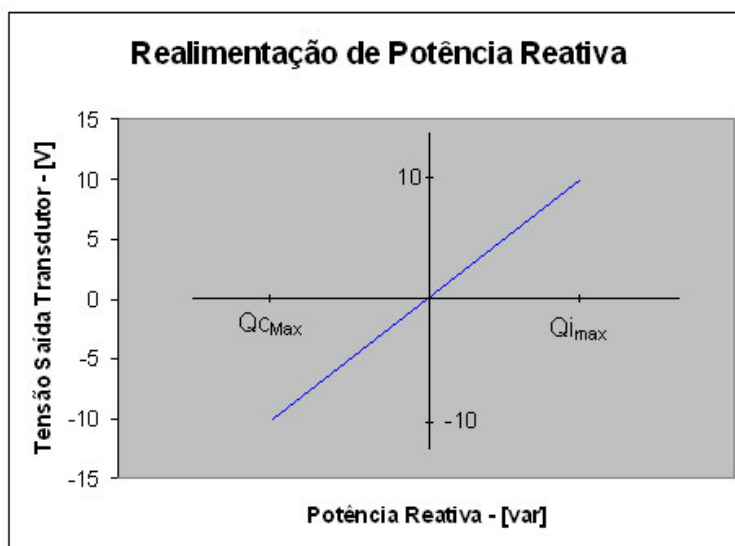


Figura 10 - Sinal de realimentação de potência reativa.

A potência reativa denominada  $Q_{c_{max}}$  representa a condição em que o gerador está fornecendo a máxima potência para rede, enquanto  $Q_{i_{max}}$  indica uma absorção máxima de



potência por parte da máquina. É importante comentar que os valores de  $Q_{c_{max}}$  e  $Q_{i_{min}}$  estão relacionados aos aspectos técnicos do gerador e devem ser fornecidos pelo fabricante. Estes valores estão representados na carta de capacidade da máquina.

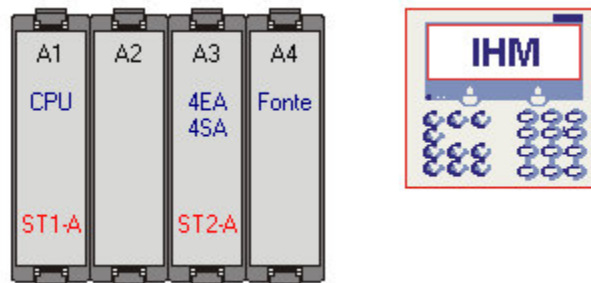
A atribuição do valor desejado de potência reativa ocorre de acordo com as necessidades operacionais da rede elétrica. Por exemplo, em situações de alta demanda de carga, o sistema de regulação deve atuar na corrente de campo de modo a fornecer potência reativa para o sistema, assim contribuindo para minimizar a queda de tensão da rede.

## **4.5 Atribuições do Controlador Lógico Programável**

De um modo geral, as funções atribuídas ao controlador lógico programável na aplicação em questão são as seguintes: leituras dos sinais de realimentação, implementação da função de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativa) e atuação através de uma saída analógica de corrente contínua na faixa entre 0 e 20 [mA].

Para cada modo operacional existe uma entrada analógica independente com uma faixa de operação permitida de 0 a 10 [Vcc]. Com o objetivo de tornar o sinal mais estável e numericamente confiável, através do software de programação do CLP, é realizado o cálculo do valor médio de cada sinal de entrada.

A respeito da configuração de Hardware, o CLP é composto pelas seguintes placas, ou melhor, módulos: interface homem-máquina (IHM), fonte, CPU e expansão analógica de quatro entradas e quatro saídas (4EA / 4SA), conforme ilustrado a seguir:



**Figura 11 - Representação CLP / IHM.**

Através da placa de expansão analógica, os sinais de realimentação são transmitidos para o software através das entradas e o sinal de saída é aplicado ao microcontrolador programável pela saída analógica.

Com relação aos sinais digitais, a própria placa da CPU possui oito entradas e oito saídas, para as quais foram designadas as seguintes atribuições:

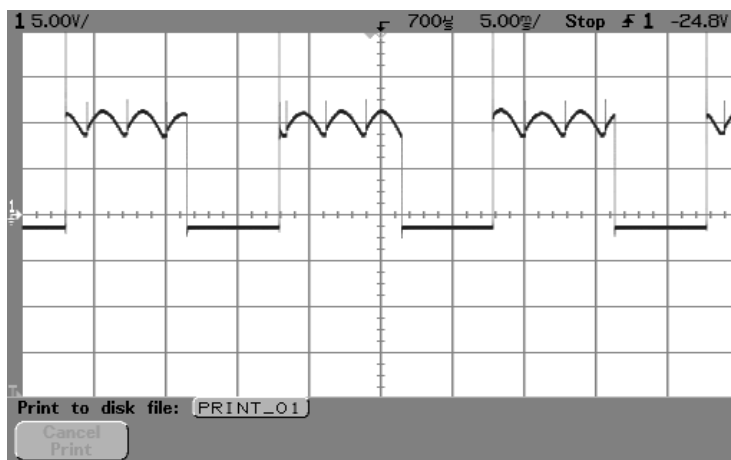
- saída 1 - acionamento do contator do campo da excitatriz;
- saída 2- alarmes;
- entrada 1 - identificação do status do disjuntor de sincronismo do sistema;
- entrada 2 - transferência do modo CAR para o modo CIE.

Tanto a filosofia de programação, bem como a função matemática PID empregada, serão apresentadas ao longo da dissertação.

## **4.6 Atribuições do Microcontrolador Programável (MC)**

Com o objetivo de obter um sinal com modulação PWM de alta precisão e baixo tempo de resposta, a lógica da modulação foi implementada no microcontrolador programável. Além destas vantagens, houve uma redução significativa na complexidade da programação do CLP, resultando em um processamento mais eficaz da CPU.

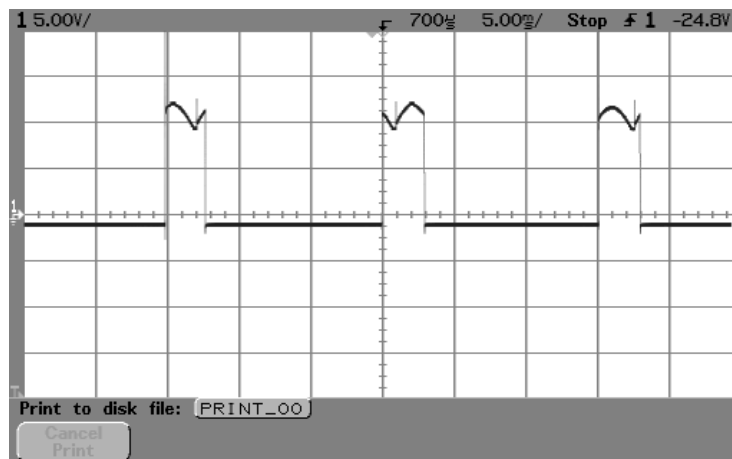
Através de um circuito eletrônico, o sinal de corrente da saída do CLP é transformado para um sinal de tensão de 0 a 5 [Vcc], o qual atua na entrada do microcontrolador. A lógica desenvolvida modula o sinal de saída com uma frequência de 120 [Hz], mas com um período de condução variável, cuja intensidade depende diretamente do valor de tensão disponibilizado na sua entrada. A figura a seguir ilustra os resultados dos ensaios realizados para a análise do funcionamento do MC na modulação PWM do sinal. Os ensaios foram realizados através da utilização de um osciloscópio digital de alta resolução.



**Figura 12 - Forma de onda da tensão de saída do IGBT – valor intermediário.**

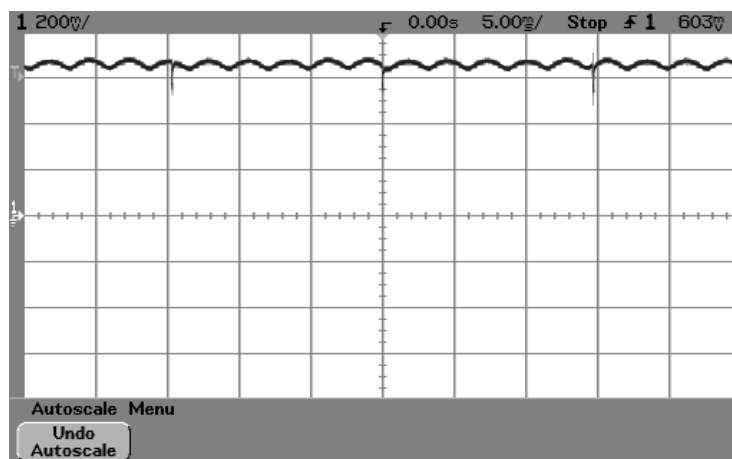
Este sinal é um resultado da ação do microcontrolador no gatilhamento do terminal Base-Emissor do IGBT. No entanto, como poderá ser observado no próximo item, o sinal PWM de saída do MC atua por intermédio de um circuito eletrônico denominado *Driver* de gatilhamento.

A próxima figura mostra uma outra condição de operação, onde o valor da tensão de saída do IGBT é mínimo.



**Figura 13 - Forma de onda da tensão de saída do IGBT – valor mínimo.**

Uma vez aplicada a máxima tensão no campo da excitatriz, que geralmente possui uma característica fortemente indutiva, a corrente assume a característica apresentada na figura 14.



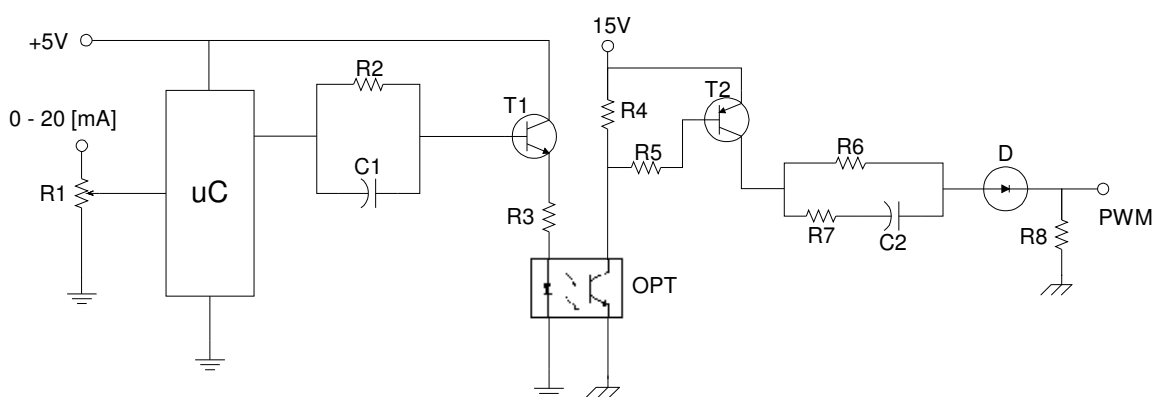
**Figura 14 - Forma de onda da corrente no circuito indutivo.**

A resolução do MC empregado é de 8 bits, resultando em 256 possibilidades de diferentes períodos de condução, onde cada um deles corresponde a um *step* no valor de tensão de entrada na ordem de 19,5 [mV].

Assim, neste sistema, o microcontrolador tem por função atuar na base do IGBT, levando-o a um período de condução condizente com o sinal proporcional da malha de controle implementada.

## 4.7 Driver de Gatilhamento

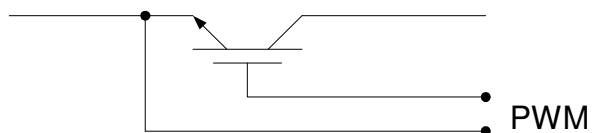
O circuito do driver de gatilhamento está mostrado na Figura 15.



**Figura 15 - Circuito de gatilhamento do IGBT.**

O sinal de corrente de 0 a 20 [mA], proveniente do CLP, é transformado em um sinal de tensão através do trimpot  $R_1$ . Este sinal é convertido em uma modulação PWM pelo microcontrolador que polariza a base do transistor  $T_1$  por meio do circuito  $R_2$  e  $C_1$ . O acoplador óptico OPT desacopla elétricamente as entradas e saídas do CLP e todos os demais circuitos eletrônicos do circuito de potência responsável pela produção da corrente de excitação. Por este motivo é importante que a fonte de +15 [Vcc, representada acima, tenha um referencial de massa próprio e isolado das outras fontes. O transistor interno ao acoplador óptico é excitado pela luz oriunda do led e através do transistor  $T_2$  e demais componentes a ele associados, disponibiliza um sinal PWM que irá controlar o IGBT.

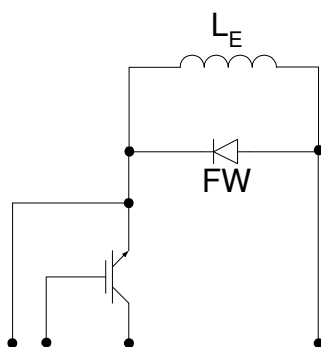
A saída do Driver de Gatilhamento atua no terminal Base-Emissor do IGBT, o qual está representado por PWM na figura a seguir.



**Figura 16 - Representação do IGBT.**

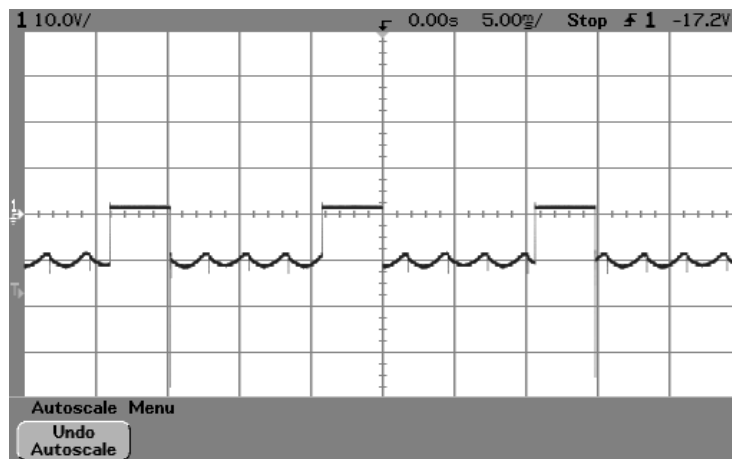
A atuação do regulador de tensão no controle da corrente  $I_e$  se faz através de um circuito *chopper* (modulação PWM), onde o período de condução dos pulsos de chaveamento, controla a tensão aplicada ao campo da excitatriz.

O outro componente que deve ser apresentado é o diodo de free-wheeling. Este dispositivo tem por finalidade permitir a circulação de uma corrente sustentada pela energia eletromagnética armazenada na indutância do circuito de excitação. Ao se estabelecer um caminho para a circulação da corrente, evita-se a ocorrência de uma eventual sobretensão nos terminais do IGBT, o que pode levar a interrupção da sua funcionalidade.



**Figura 17 - Aplicação do diodo de free-wheeling.**

A tensão anodo-catodo do diodo de free-wheeling também foi registrada, apresentando o comportamento ilustrado na Figura 18:



**Figura 18 - Forma de onda da tensão anodo-catodo do diodo de free-wheeling.**

A próxima seção apresenta a lógica de operação do regulador de tensão.

## 4.8 Lógica de Operação do Regulador

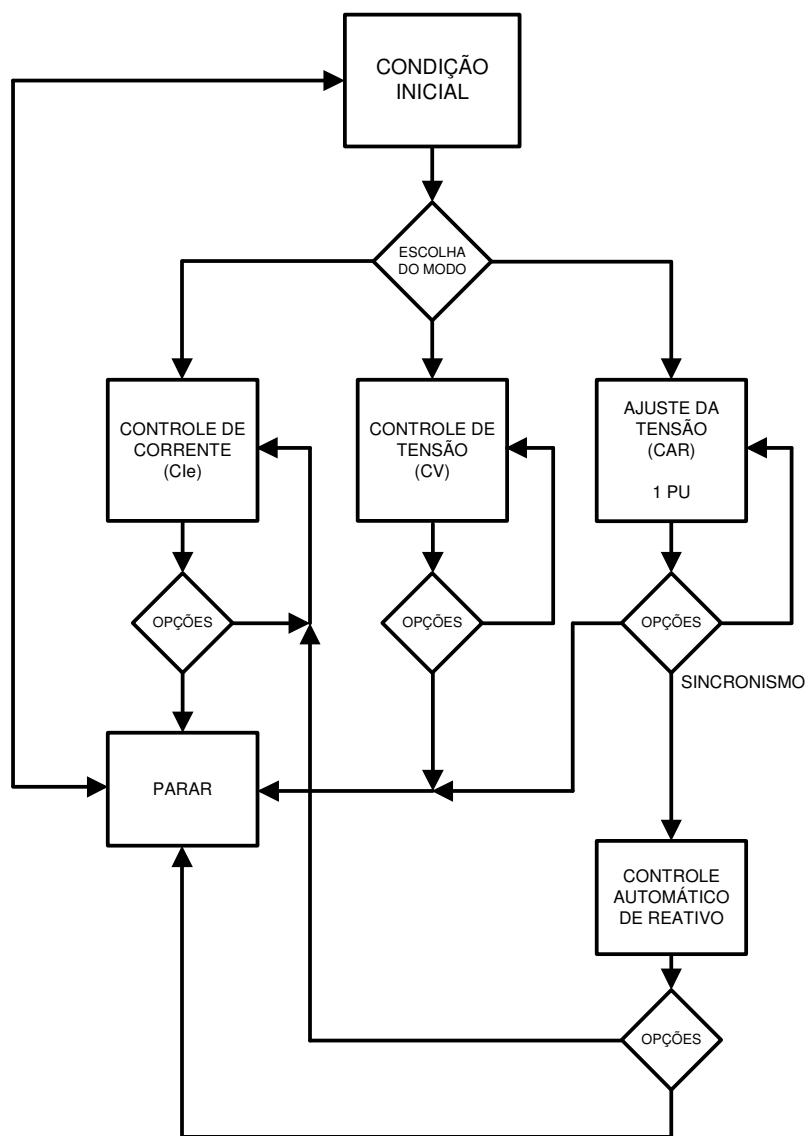
A lógica de funcionamento do sistema de controle implementada no CLP prevê três malhas de controle distintas, sendo uma para cada modo de operação do equipamento. Assim, o operador pode otimizar os ganhos e constantes de tempo da função matemática PID, para cada modo, independentemente.

Na configuração inicial, as características nominais de operação do gerador síncrono devem ser inseridas. A partir destas características, através de uma lógica de programação, são definidos os limitadores operacionais, cuja finalidade consiste em evitar condições de operação inadequadas sob o ponto de vista térmico do equipamento. As características nominais a serem inseridas são as seguintes:

- tensão nominal do gerador;
- corrente nominal do campo da excitatriz;
- máxima potência reativa indutiva;
- máxima potência reativa capacitiva.

Após a configuração inicial do equipamento, para se iniciar as ações de controle, os valores de referência devem ser selecionados.

A lógica de operação do regulador de tensão está descrita no fluxograma apresentado a seguir.



**Figura 19 - Fluxograma de funcionamento do regulador de tensão.**

Como pode ser observado através do fluxograma apresentado, uma vez definido o modo de operação como sendo controle de corrente ou controle de tensão, o algoritmo de

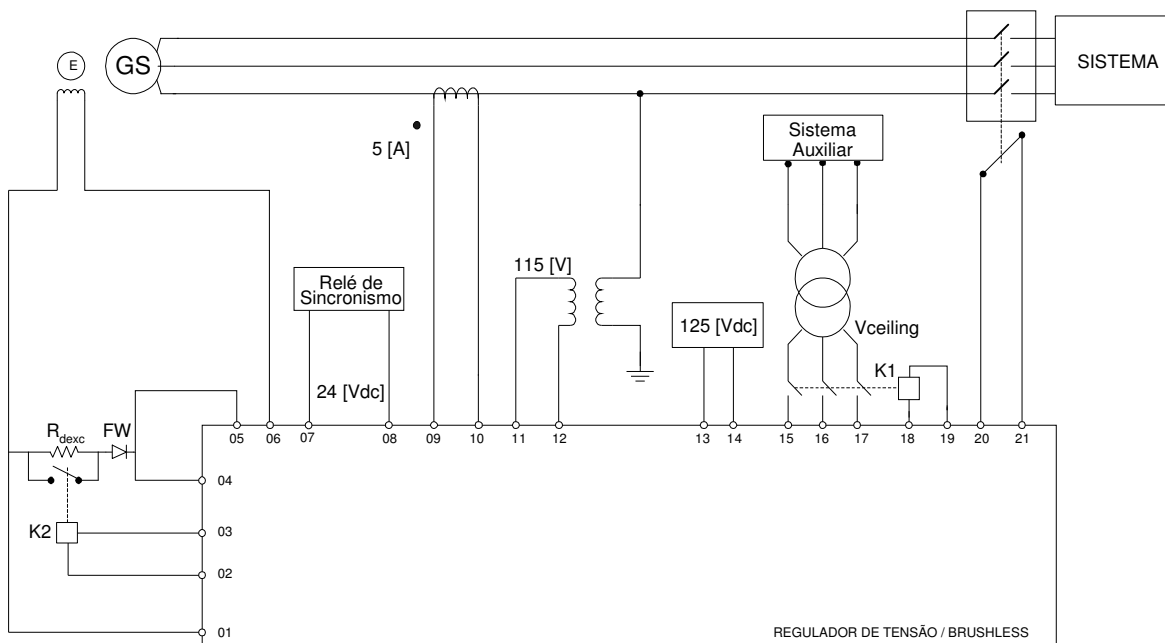


programação possibilita duas ações: parar as ações de controle ou permanecer na malha. Ao se definir a interrupção da circulação da corrente no campo da excitatriz (PARAR), automaticamente o CLP aciona uma saída digital em 24 [Vcc], que será responsável pela abertura do contator de alimentação do campo da excitatriz e pelo acionamento do circuito de desexcitação. Por outro lado, ao se optar por permanecer na malha de controle, o valor de corrente da saída do CLP deve permanecer constante.

Se o sistema estiver operando no modo CAR, inicialmente, ocorre uma ação da malha de controle de tensão, estabelecendo nos terminais do gerador 100% da tensão nominal. Uma vez atingido este nível de tensão, o sinal de saída do regulador permanece constante até o término das ações do relé de sincronismo. Após o comando do relé para fechamento do disjuntor existente entre a unidade geradora e a rede elétrica, o regulador é realimentado por um sinal de tensão em 24 [Vcc], resultando no início das ações de controle da potência reativa.

Uma outra ação operacional que deve ser prevista é a passagem do modo de controle de potência reativa para o controle de corrente, mediante a ocorrência de alguma irregularidade no sistema de realimentação de potência reativa.

De modo a permitir um maior entendimento a respeito do funcionamento do regulador de tensão conectado ao sistema, a Figura 20 apresenta o esquema de ligações externas do equipamento desenvolvido.



**Figura 20 - Esquema de ligações do regulador de tensão.**

Ao iniciar ou interromper o procedimento de excitação do gerador síncrono, a lógica de comando do regulador prevê uma atuação simultânea nos contatos auxiliares dos contadores representados por K1 e K2. Como pode ser observado através de uma análise da figura anterior, os dois contadores são do tipo normalmente aberto (NA). Assim, ao se iniciar as ações de regulação da tensão, o CLP, através da saída digital 24 [Vcc], aciona um relé, que por sua vez transfere um comando para ambos os contatos auxiliares, alimentando o circuito de potência e curto-circuitando a resistência de desexcitação ( $R_{desxc}$ ).

Ao se interromper a excitação do gerador, o curto-circuito em  $R_{dexc}$  deve ser desfeito, pois a resistência de excitação deve entrar no circuito de modo a permitir a dissipação da energia armazenada na indutância do campo da excitatriz. Vale ressaltar que a máxima transferência de potência ocorre quando o valor da resistência do campo for igual ao valor de  $R_{dexc}$ .

## 4.9 Controle PID

De um modo geral, o sistema de regulação de tensão de geradores síncronos é um processo em malha fechada, cujo comportamento dinâmico é resultado das ações da função matemática de controle PID.

Sendo assim, as ações do regulador no controle da tensão aplicada ao campo da excitatriz são conduzidas pelos resultados dos cálculos realizados pela equação matemática de controle empregada. As equações devem ser modeladas com a finalidade de minimizar ao máximo a diferença existente entre o valor de referência atribuído e o valor real “informado” pelo sistema de realimentação. Para tal finalidade, a equação PID apresentada a seguir, foi implementada no sistema de controle:

$$S(t) = K \cdot \left( e(t) + K_i \cdot \int e dt + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) + BIAS \quad (2.1)$$

Onde:

- K - ganho do sistema;
- $K_i$  - ganho integral;
- $T_d$  - ganho derivativo;
- $dt$  - tempo de amostragem
- $de$  - variação no erro (erro atual – erro anterior)
- $T_i$  -  $1 / K_i$ ;
- BIAS - offset da saída de controle.

Uma vez discretizado o sinal, a equação PID assume a seguinte característica:

$$S(\Delta t) = K \cdot \left( e(t) + \sum_0^{\infty} K_i \cdot e(t) \cdot \Delta t + T_d \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t} \right) + BIAS \quad (2.2)$$

Através da aplicação dos critérios de estabilidade e análises de resultados de ensaios realizados no laboratório e no campo, os valores dos ganhos e do tempo de amostragem foram definidos.

De uma maneira geral, a principal função da ação integral consiste em mitigar o erro existente no processo, no entanto a sua ação isoladamente pode não contribuir para a estabilidade relativa do sistema. Deste modo, a ação integral é em geral utilizada em conjunto com a ação proporcional.

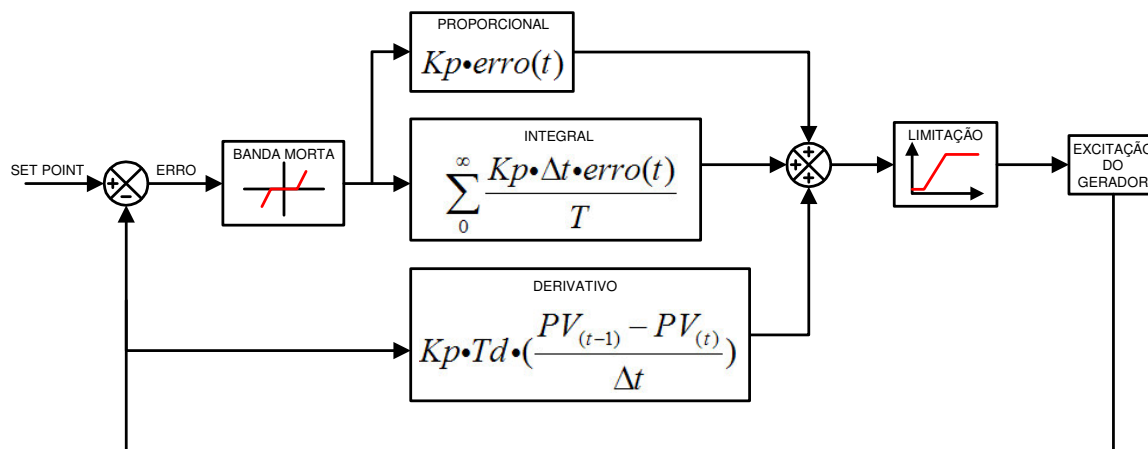
Ao se analisar as ações integral e proporcional conjuntamente, é possível notar que se durante as ações da malha de controle o ganho integral for aumentado, a ação integral pode começar a predominar sobre a ação proporcional, fazendo com que a resposta se aproxime mais rapidamente da referência. No entanto, se o ganho integral for excessivamente elevado, a resposta pode se tornar oscilatória.

Quanto ao ganho proporcional, o seu valor atribuído, também, influencia diretamente no tempo de resposta do sistema, ou seja, contribui na determinação do tempo de mitigação do erro. Por outro lado, a atribuição de elevados valores para o ganho proporcional pode resultar na ocorrência de *overshoot* na resposta do sistema. No próximo capítulo, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados para otimização dos parâmetros da malha de controle do regulador de tensão.

Com relação ao termo derivativo, pode-se caracterizá-lo da seguinte maneira: este termo somente deve atuar se houver variação de erro, ou seja, se o processo está estável mesmo com um erro presente, a sua atuação é nula. De um modo geral, o termo derivativo antecipa a ação de controle, prevendo qual deverá ser o erro a um determinado tempo a frente ( $T_d$ ).

O tempo de amostragem da malha de controle deve estar diretamente relacionado ao tempo de resposta do sistema. No caso dos sistemas de excitação brushless, este tempo possui um valor elevado (aproximadamente um segundo) se comparado ao sistema de excitação estática. Este fato contribui para a não utilização de máquinas de grande porte com sistema de excitação brushless.

No caso apresentado neste trabalho de dissertação, o modelo da malha de controle PID implementada está apresentado a seguir:

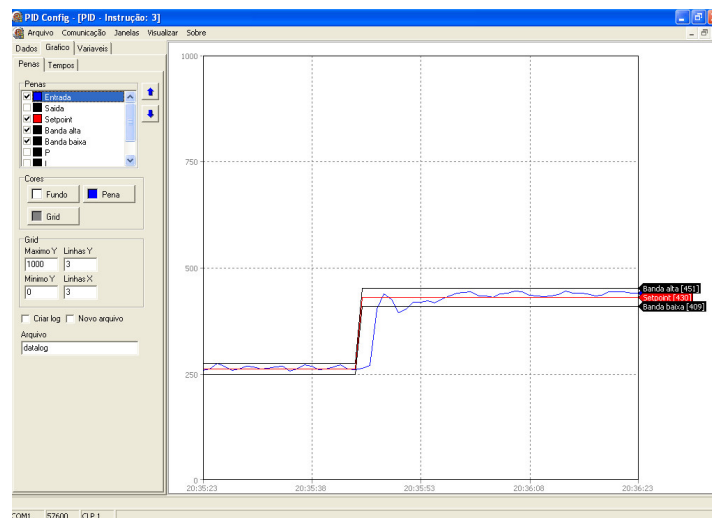


**Figura 21 - Malha de controle.**

Como o objetivo de verificar o comportamento da resposta da malha de controle, quando o sistema é submetido a condições diversas de operação, foi implementado um programa de supervisão para a o monitoramento dos sinais de controle. A sua implementação foi viabilizada através dos recursos disponíveis no software do fabricante do CLP empregado.

A Figura 22 apresenta a interface gráfica do programa, onde é possível visualizar *on-line* as seguintes variáveis do sistema: sinal de entrada, valor de referência e banda morta.

A banda morta retrata a faixa de tolerância para a variável de entrada com relação ao valor de referência (VR). Como para cada sistema existe um grau de oscilação característico da variável controlada, é importante que o valor da banda morta seja um parâmetro configurável e preferencialmente em valores percentuais com relação ao VR.



**Figura 22 - Tela do programa de supervisão implementado.**

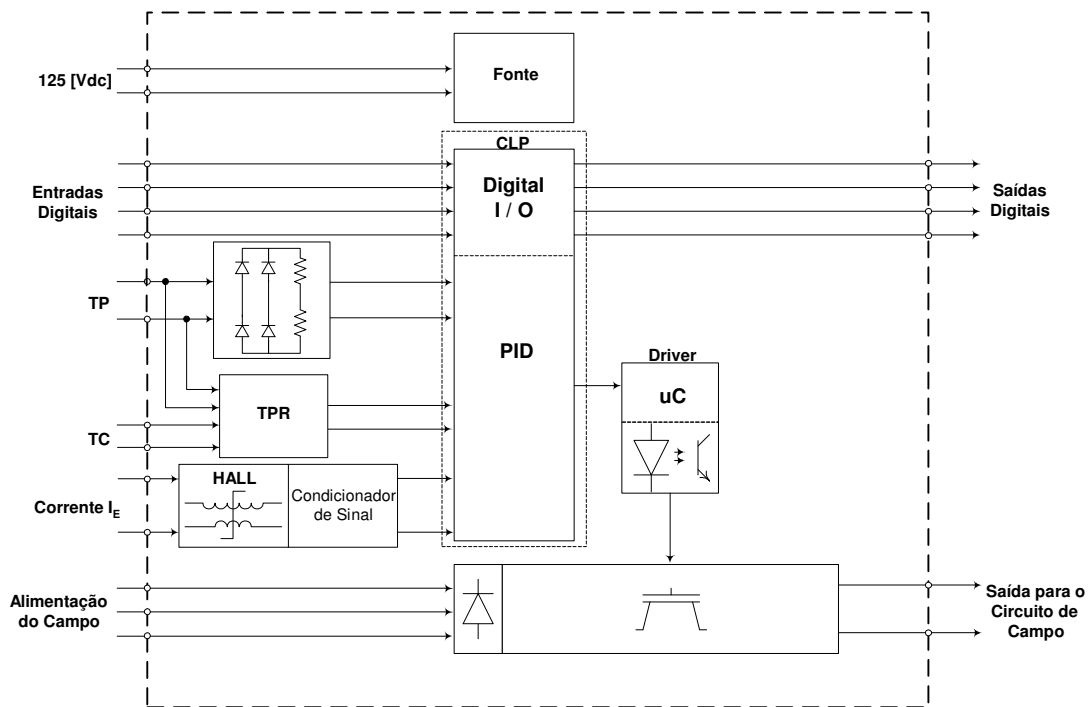
A curva em azul representa o sinal de realimentação da malha de controle. A linha em vermelho representa o valor de referência configurado, o qual tem associado uma banda morta representada pelas linhas de cor preta.

A utilização de um software de monitoramento das variáveis envolvidas no sistema de controle permite o acompanhamento *on-line* dos ensaios, possibilitando a verificação do comportamento do sistema e, se necessário, a otimização da modelagem da malha.

O programa de supervisão implementado teve uma importante contribuição nos ajustes dos parâmetros das malhas de controle dos modos operacionais, conforme mostram os ensaios apresentados no próximo capítulo.

## 4.10 Considerações Finais

Após as apresentações dos modos operacionais do regulador, das atribuições do CLP e MC, do driver de gatilhamento, da lógica de operação e da função de controle, a análise da figura a seguir possibilita ao leitor um entendimento a respeito do funcionamento integrado dos dispositivos utilizados no desenvolvimento do regulador.



**Figura 23 - Diagrama funcional.**

Ao se analisar a Figura 23, pode-se notar que os sistemas de realimentação dos três modos de operação estão integrados ao equipamento, assim como os circuitos eletrônicos e de controle. Nos sistemas de excitação brushless, o valor da corrente no campo da excitatriz, geralmente, é baixo, possibilitando desta maneira a inserção da ponte retificadora e do IGBT dentro do regulador.

Com isso, uma vez apresentados os aspectos construtivos e operacionais do regulador, o próximo capítulo traz os resultados dos ensaios que contribuíram para a sua validação.

## *Capítulo 5*

---

### *Ensaaios*



## **5. ENSAIOS**

O objetivo principal deste capítulo é apresentar os resultados dos ensaios realizados, os quais tiveram por finalidade verificar o comportamento dinâmico do regulador frente a diversas condições de operação. Os ensaios laboratoriais foram realizados nas dependências do Laboratório do Instituto de Sistema Elétrico e Energia da Universidade Federal de Itajubá. Já os ensaios de campo foram executados na Pequena Central Hidrelétrica Luiz Dias, localizada no município de Itajubá, MG.

Os ensaios foram registrados pelo software de supervisão apresentado no capítulo anterior. Através dos resultados dos ensaios, é possível verificar as ações da malha de controle modelada, a qual foi apresentada na Figura 21.

### **5.1 Ensaios Laboratoriais**

Para realização dos ensaios no laboratório foi montada uma bancada de ensaios, onde foram realizados testes com o regulador operando no controle da corrente  $I_e$ , no controle da tensão do terminal do gerador e no controle da potência reativa.

Para tal finalidade, foi utilizado um motor de corrente contínua acionando um gerador síncrono. Além deste grupo motor-gerador, foram empregados equipamentos de medição, proteção e comando, viabilizando a realização de todos os testes, inclusive a operação em paralelo com a rede local. No caso, a rede local está conectada ao sistema de distribuição da concessionária de energia CEMIG.

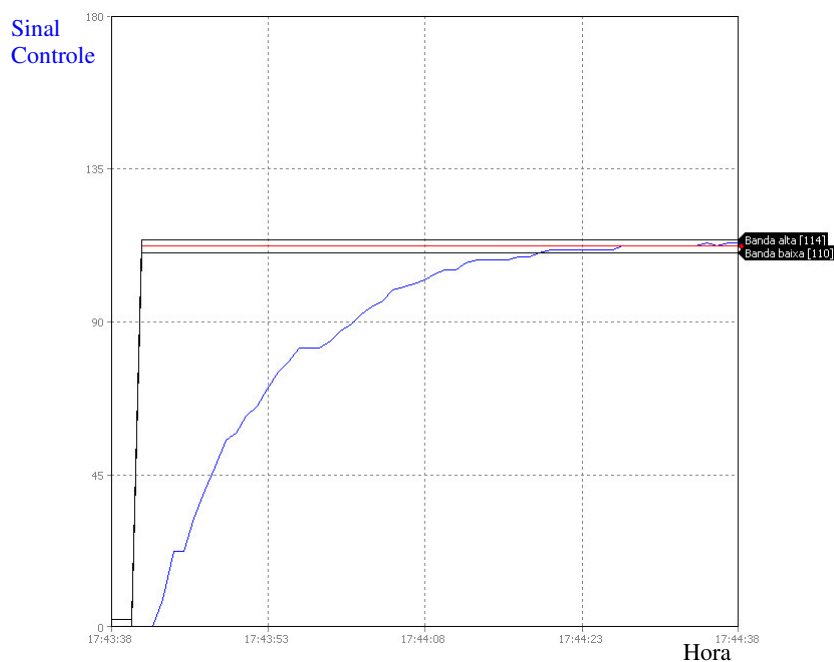
As características operacionais do motor de corrente contínua e do gerador síncrono são as seguintes:

<b>Motor de Corrente Contínua</b>	
Potência Mecânica	26,11 [kW]
Tensão Nominal	220 [V]
Corrente Nominal	173 [A]
Tensão Nominal de Excitação	175,40 [V]
Corrente Nominal de Excitação	3,05 [A]
Rotação Nominal	1800 [RPM]

<b>Máquina Síncrona</b>	
Potência Nominal	35 [kVA]
Tensão Nominal (Fase-Neutro)	380 [V]
Corrente Nominal	53,20 [A]
Tensão Nominal de Excitação	50 [V]
Corrente Nominal de Excitação	6,70 [A]
Rotação Nominal	1800 [RPM]

### **5.1.1 Resultados dos Ensaios no Modo de Operação CIE**

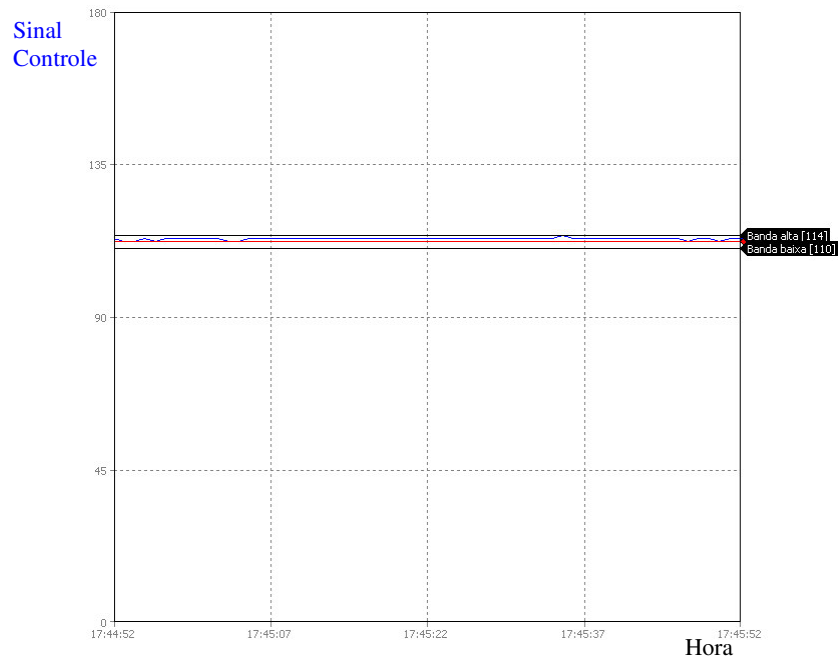
Neste item estão apresentados os resultados dos ensaios realizados com o regulador operando no modo CIE. Os ensaios tiveram por finalidade analisar o comportamento da ação do sistema de controle, quando foram realizadas alterações nos parâmetros da malha e mudanças nos valores de referência. No primeiro caso apresentado a seguir, o valor de referência para corrente de excitação do gerador foi definido em 5 [A].



**Figura 24 - Comportamento do sinal de controle de corrente.**

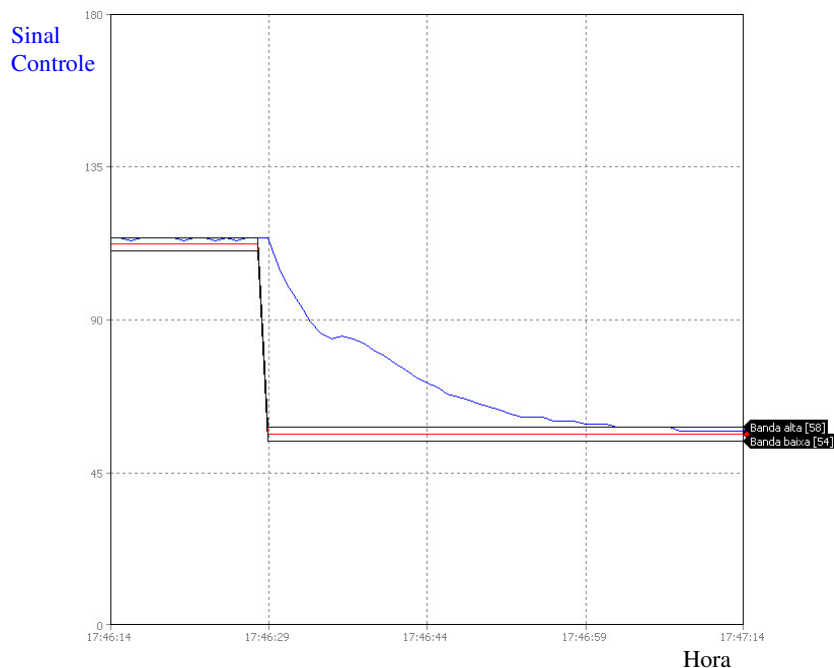
Por se tratar de um dos primeiros ensaios realizados no equipamento, a principal preocupação foi averiguar a funcionalidade dos circuitos eletrônicos e de controle. Ao se observar as Figuras 24 e 25, pode-se verificar que o erro do sistema foi mitigado e o sinal permaneceu em um regime estável de operação, indicando um funcionamento adequado de ambos os circuitos neste modo operacional.

Neste primeiro ensaio, o desempenho do sistema pode ser considerado satisfatório, tendo em vista que ao se iniciar o controle, o circuito de disparo (modulação PWM), através das ações PID, atuou no IGBT levando a corrente de 0 a 5 [A] em um determinado intervalo de tempo sem que houvesse períodos de instabilidade.



**Figura 25 - Comportamento estável da corrente.**

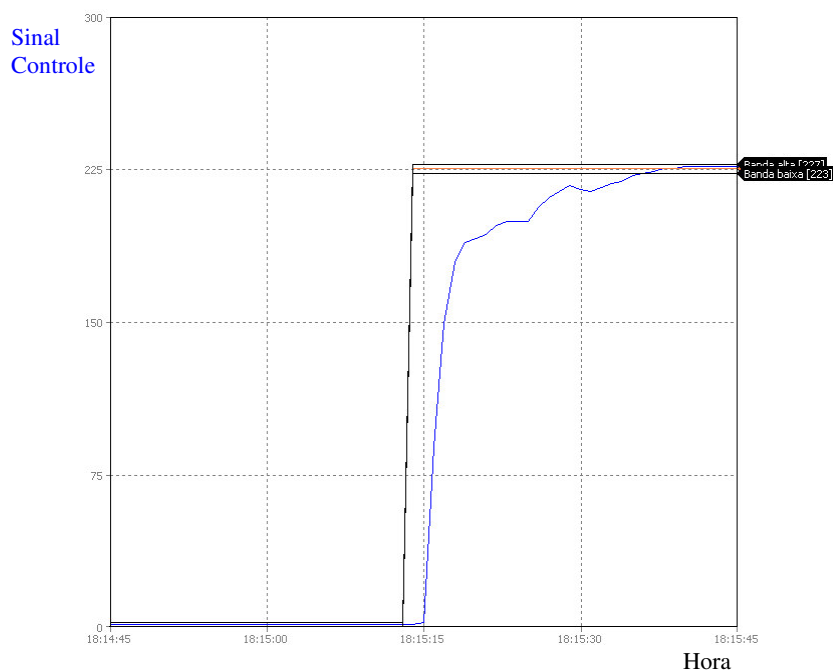
Após a análise da resposta do sistema frente a este primeiro ensaio apresentado, a próxima figura mostra a ação do sistema quando o valor de referência é alterado, estando o sistema em operação, para 2,5 [A].



**Figura 26 - Comportamento do sinal de corrente frente a um degrau negativo no valor de referência.**

Através da análise do sinal apresentado na Figura 26 pode-se notar que o sistema de controle atuou corretamente mediante a alteração *on-line*, ou seja, estando o sistema em operação, efetuada no valor de referência.

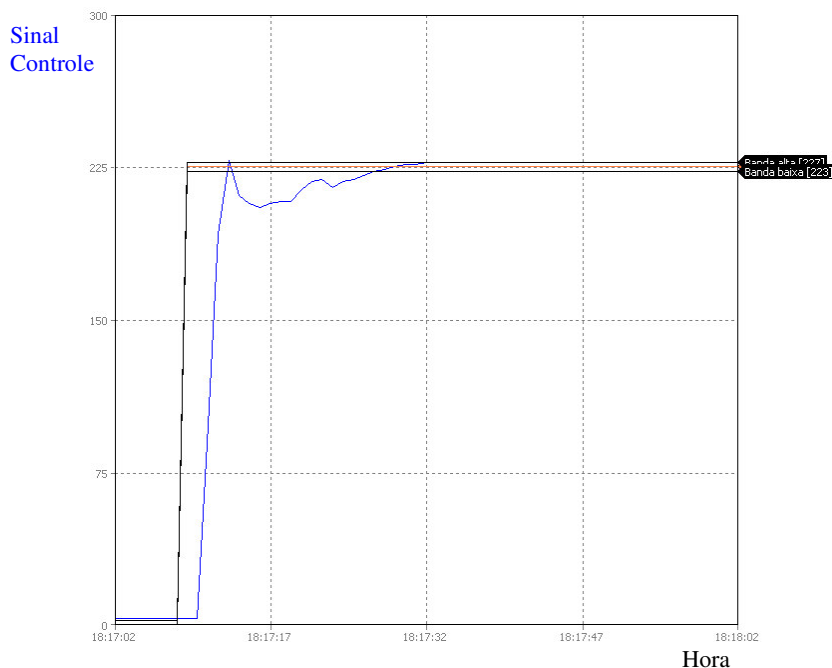
Com o objetivo de se analisar o tempo de resposta do sistema, o ganho proporcional da malha de controle foi alterado, resultando nos comportamentos expressos pela Figuras 27 e 28. No próximo caso apresentado, a ganho proporcional teve um acréscimo de 70% em relação ao primeiro ensaio apresentado (Figura 24).



**Figura 27 - Resposta mediante à elevação de 70% no valor do ganho proporcional.**

É interessante notar que ao se elevar o ganho proporcional, o sistema de controle responde mais rapidamente, fazendo com que a variável de entrada atinja a faixa de valores admissíveis (banda morta) em um tempo 90% menor que o registrado no primeiro ensaio.

O próximo caso apresentado mostra o comportamento do sistema de controle frente a uma elevação ainda maior no ganho proporcional com relação ao primeiro ensaio. Esta elevação foi de 100 %.



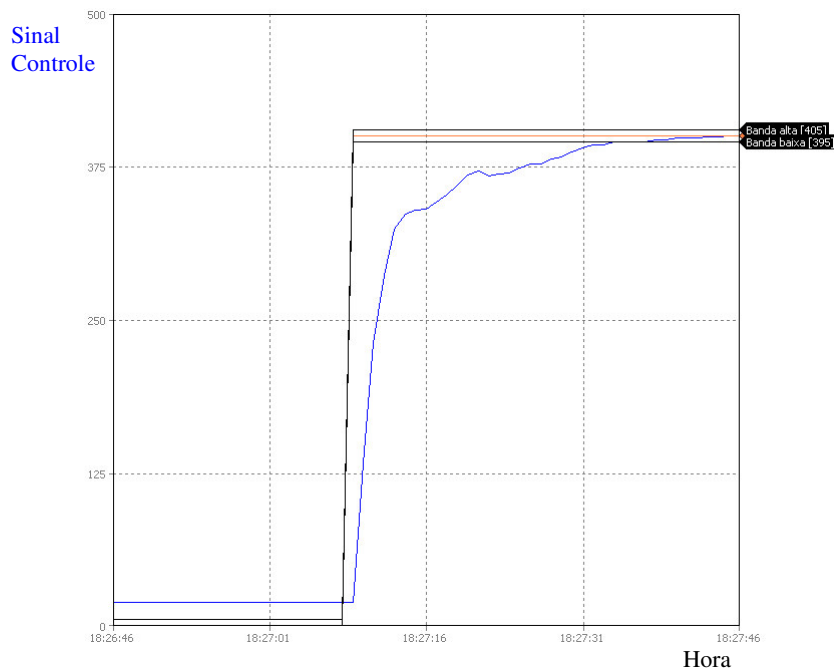
**Figura 28 - Resposta mediante a elevação de 90% no valor do ganho proporcional.**

De acordo com o esperado, ao se analisar as figuras 27 e 28, pode-se notar que as alterações no ganho proporcional resultaram em uma redução diretamente proporcional no tempo de resposta do sistema. É importante observar que os ganhos integral e derivativo e a constante de tempo foram ajustados no primeiro ensaio e mantidos constantes nos outros três ensaios apresentados nesta seção.

### 5.1.2 Resultados dos Ensaio no Modo de Operação CV

Os ensaios realizados neste modo de operação foram divididos em duas etapas: controle da tensão com o gerador em vazio e controle da tensão com o gerador em carga.

Analogamente aos ensaios realizados no modo CIE, o primeiro caso apresenta o comportamento do sinal de realimentação de tensão, quando se atribui um determinado valor de referência estando o sistema em vazio e, inicialmente, com um valor nulo na sua saída. Neste caso, a referência de tensão foi de 1 pu, ou seja, 380 [V] nos terminais de saída do gerador utilizado no ensaio.

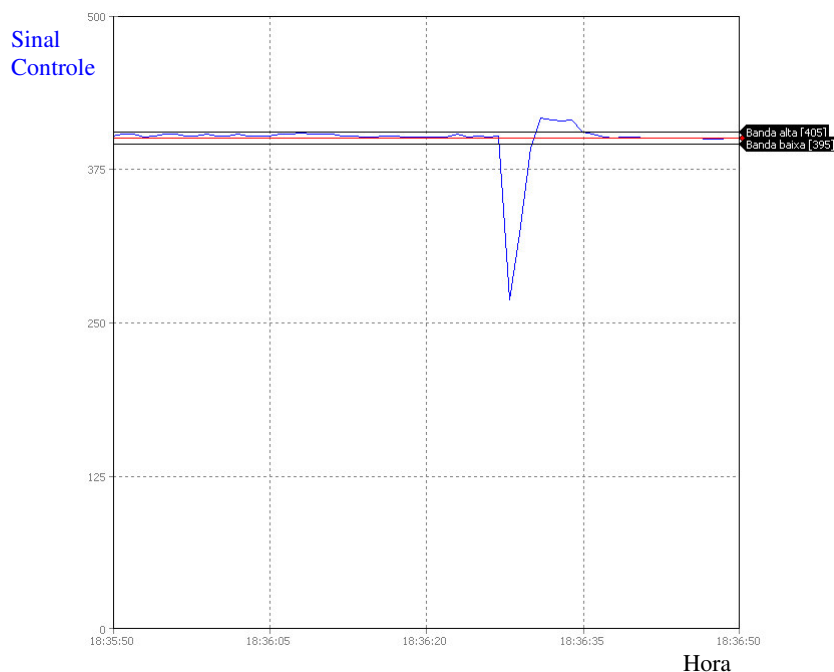


**Figura 29 – Comportamento do sinal de tensão.**

Sob o ponto de vista da estabilidade dinâmica o comportamento da tensão apresentou-se satisfatório, tendo em vista a não ocorrência de *overshoot* no sinal de entrada e a mitigação do erro.

No entanto, para se adquirir confiança no sistema de controle implementado no modo de operação CV, é necessário que se verifique a sua atuação mediante a presença de uma carga conectada nos terminais do gerador em teste. Sendo assim, a próxima figura ilustra resposta do sistema, quando é realizada partida direta de um motor de indução trifásico (MIT), conectado nos terminais do gerador. A potência do MIT é de 20 [cv], o que corresponde, principalmente durante o processo de partida, uma condição extremamente severa para o regulador de tensão.



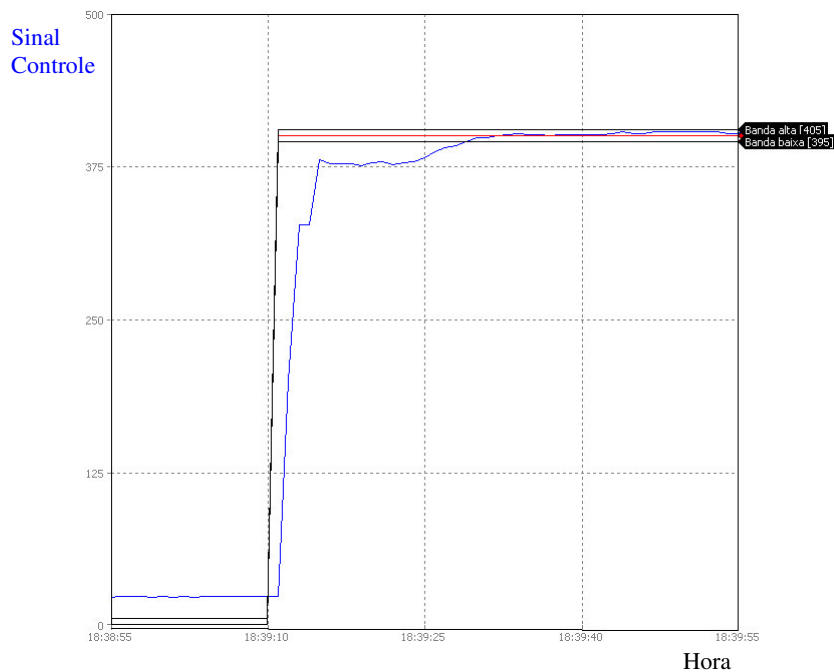


**Figura 30 - Comportamento da tensão na partida direta do MIT.**

Apesar da severidade do teste, o sistema de controle apresentou-se eficaz, restabelecendo a tensão de 1 pu nos terminais do gerador em um curto intervalo de tempo. Após o restabelecimento do valor da tensão em 1 pu, também, pode-se verificar a manutenção da estabilidade do sinal.

Uma vez testado o comportamento do regulador frente a uma entrada abrupta de carga, outros ensaios em vazio foram realizados, conforme apresentados nas Figuras 31 e 32.

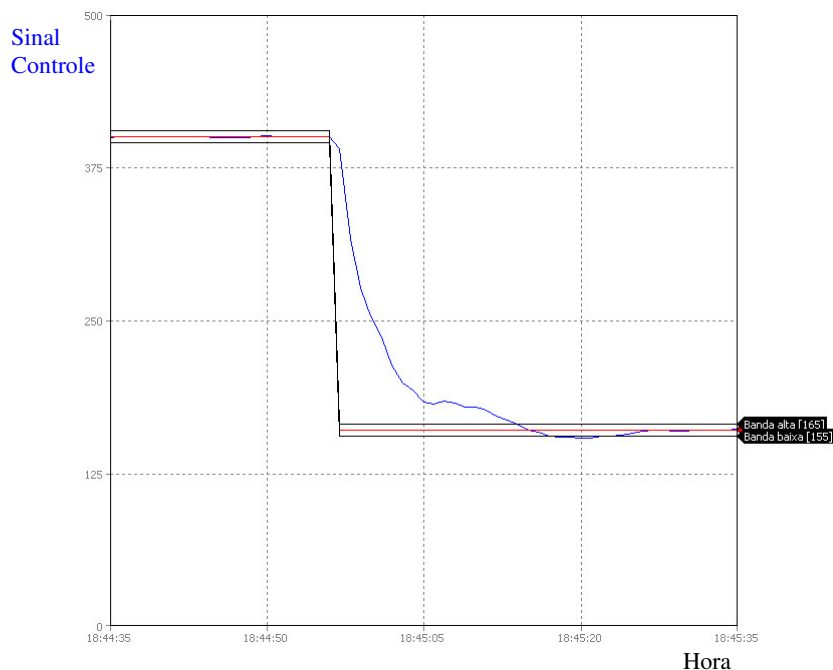
O próximo resultado de ensaio apresentado retrata o comportamento do sistema ao se elevar o ganho proporcional em 70% em relação ao caso apresentado na Figura 29.



**Figura 31 - Comportamento do sinal de tensão mediante alteração do ganho.**

É possível notar que a atuação do sistema de controle foi mais rápida, fato que pode ser constatado pela redução significativa no tempo de resposta se comparado ao caso apresentado na Figura 29.

O último teste apresentado no modo CV mostra o comportamento do sistema, quando o valor de referência é alterado *on-line* de 1 pu para 0,3 pu.



**Figura 32 - Comportamento do sinal de tensão frente a um degrau negativo no valor de referência.**

A próxima seção traz os resultados dos ensaios realizados no regulador operando no modo CAR, ou seja, conectado em paralelo com o sistema.

### 5.1.3 Resultados dos Ensaio no Modo de Operação CAR

Esta seção apresenta os resultados dos ensaios realizados com o regulador operando no modo CAR. Para tal, o gerador foi conectado em paralelo com rede de distribuição local (CEMIG) que alimenta o laboratório do campus da Universidade.

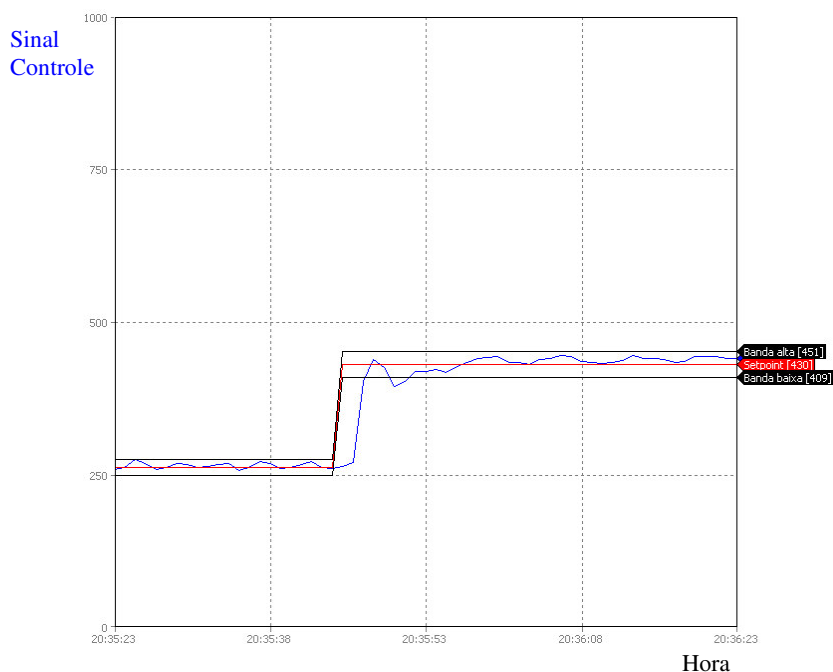
O procedimento adotado para a colocação do gerador em paralelo, ou melhor, em sincronismo com a rede foi o seguinte:

- colocou-se o grupo motor-gerador na velocidade nominal (1800 [rpm]);
- foi iniciada a excitação do campo do gerador através do modo CV, estabelecendo 1 pu de tensão;

- com o auxílio de um sincronoscópio, foi determinado o instante exato do fechamento do contator de sincronismo, o qual estabelece o contato entre os terminais do gerador e as fases do sistema elétrico;
- o contato auxiliar do contator acionou a entrada digital do regulador de tensão, dando início ao controle da potência reativa.

Como a tensão nominal de operação do gerador é 380 [V], foi utilizado um transformador 380/220 [V] para compatibilizar as tensões da rede e da máquina.

A figura a seguir mostra a resposta do sistema de controle quando o valor de referência de potência reativa indutiva é alterado de 5 [kvar] para 9 [kvar]. Esta característica indutiva indica uma absorção de potência reativa da rede por parte do gerador.

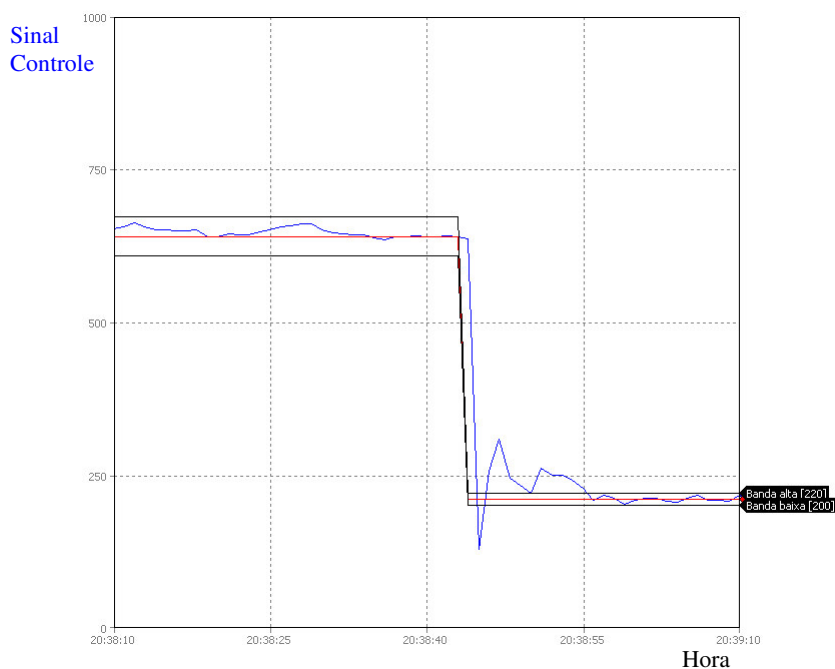


**Figura 33 - Comportamento da potência reativa indutiva mediante um degrau positivo da referência.**

Ao se analisar o comportamento do sinal de entrada apresentado na Figura 33, nota-se uma oscilação contínua no valor potência reativa controlada. No entanto, o valor da potência permanece sempre dentro da faixa aceitável. Esta oscilação, na grande maioria dos casos, é

resultado das variações da tensão da rede elétrica, as quais são ocasionadas, quase sempre, pela aleatoriedade das cargas. Neste caso, o valor da banda morta está entre  $\pm 5\%$  do valor de referência atribuído.

A próxima figura ilustra o comportamento do sistema diante de uma outra alteração no valor de referência, em que a potência reativa indutiva foi alterada de 15 [kvar] para 4 [kvar].



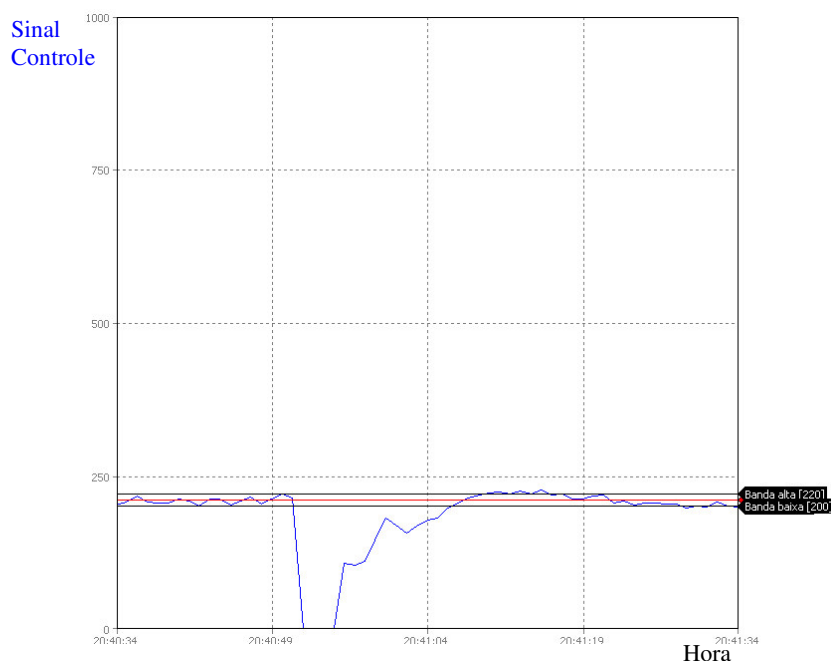
**Figura 34 - Comportamento da potência reativa indutiva mediante um degrau negativo da referência.**

Muito provavelmente, devido a um valor de ganho proporcional elevado, é possível notar na Figura 34 a ocorrência de um período de instabilidade na resposta do sistema de controle. Neste período, a variável de entrada oscilou em torno do valor de referência, atingindo a estabilidade após um determinado tempo.

Uma vez observado um comportamento com este, é fundamental que seja feita uma análise a respeito dos valores atribuídos aos parâmetros de controle da malha implementada. Deste modo, fica evidente a importância da utilização de um software supervisor na realização

dos ensaios, pois através da análise on-line do comportamento do sistema de controle pode-se otimizar a atribuição destes valores.

Eventualmente podem ocorrer quedas abruptas na tensão da rede de um sistema interligado, sendo causadas, por exemplo, pela ocorrência de um curto-circuito na rede ou pela perda de uma ou mais unidades geradoras. Nestas situações, as unidades que permanecem no sistema, em grande parte dos casos, devem interromper uma eventual absorção de potência reativa e iniciar um fornecimento imediato desta potência para o sistema. Diante do exposto, o regulador desenvolvido permite uma troca direta no sentido do fluxo de potência reativa, acessando apenas o respectivo comando. A Figura 35 mostra o comportamento do sistema frente a uma passagem direta de 4 [kvar] de potência reativa indutiva para o mesmo valor de potência reativa capacitiva.

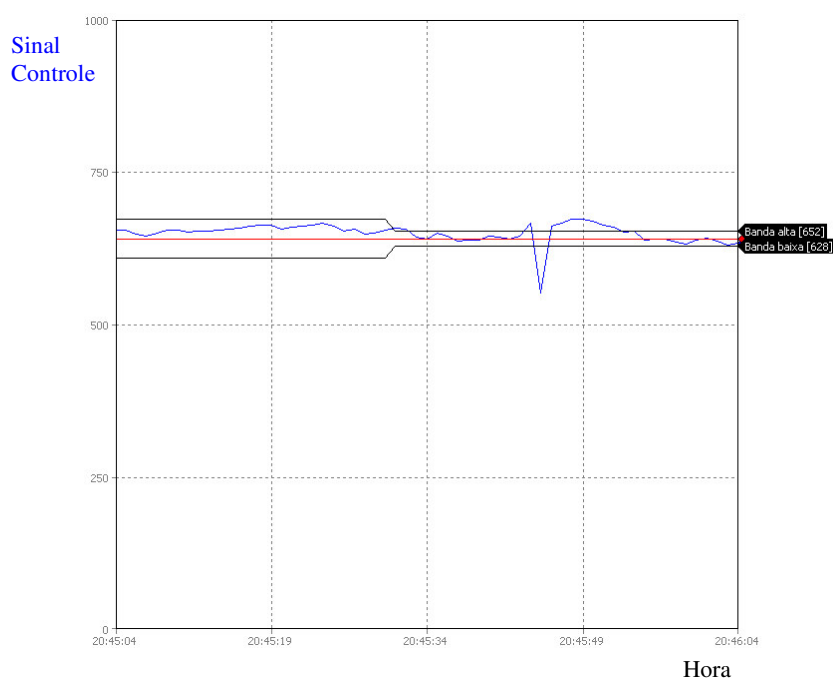


**Figura 35 - Passagem de potência reativa indutiva para capacitiva.**

Nesta situação, a corrente de excitação tem seu valor elevado gradativamente pela ação do regulador, levando a potência reativa a um valor nulo e na seqüência ao valor de potência

reativa capacitiva definido. Este comportamento retrata fielmente o princípio operacional do gerador síncrono definido na sua curva V.

Devido as freqüentes oscilações existentes no valor da potência reativa, quando o gerador está conectado em paralelo com a rede, o regulador desenvolvido permite o ajuste on-line do valor da banda morta. Para exemplificar a correlação existente entre a banda morta e a estabilidade do sistema de controle, a Figura 30 mostra a resposta do sistema mediante uma alteração na banda de +/- 5% para +/- 2%.



**Figura 36 - Comportamento da potência reativa indutiva mediante uma alteração na faixa de tolerância.**

Como pode ser observado, houve uma perda de estabilidade durante um curto intervalo de tempo. Sendo assim, fica evidente que a atribuição do valor da banda morta está relacionada à característica do sistema onde o gerador será conectado. Em sistemas com baixa potência de curto-circuito ocorre uma maior oscilação da potência reativa transferida do que em sistemas mais fortes.

## 5.2 Ensaio de Campo

Com a finalidade de validar o funcionamento do protótipo do regulador de tensão desenvolvido, foram realizados testes na Pequena Central Hidrelétrica Luiz Dias, localizada no município de Itajubá, MG. A usina possui três unidades geradoras de 900 [kVA] cada uma, sendo que todas operam em paralelo com a rede de distribuição de 13,8 [kV] pertencente à concessionária CEMIG.

As principais características operacionais do gerador síncrono utilizado nos ensaios são as seguintes:

- potência nominal = 900 [kVA];
- tensão nominal = 4,4 [kV];
- corrente nominal = 354 [A];
- tensão nominal de excitação = 110 [V];
- corrente nominal de excitação = 6 [A].

É importante observar que por se tratar de uma conexão em paralelo com a rede local, foram realizados somente ensaios no modo de controle CAR.

Apesar dos ensaios na usina não permitirem o mesmo grau de liberdade dos ensaios realizados no laboratório, durante o desenvolvimento de um protótipo, os testes de campo têm um peso significativo no processo de validação.

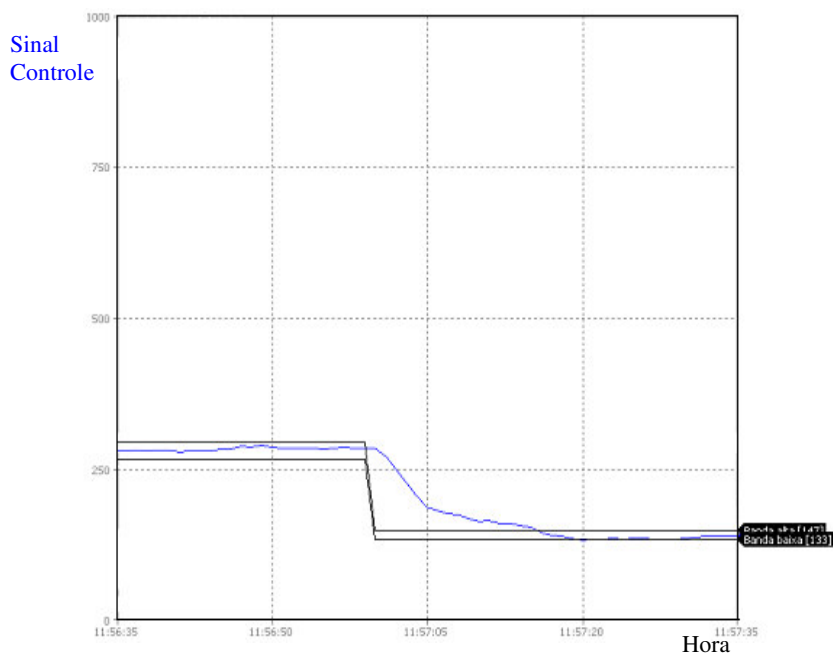
A seguir, encontra-se uma figura ilustrativa do grupo gerador utilizado nos ensaios.





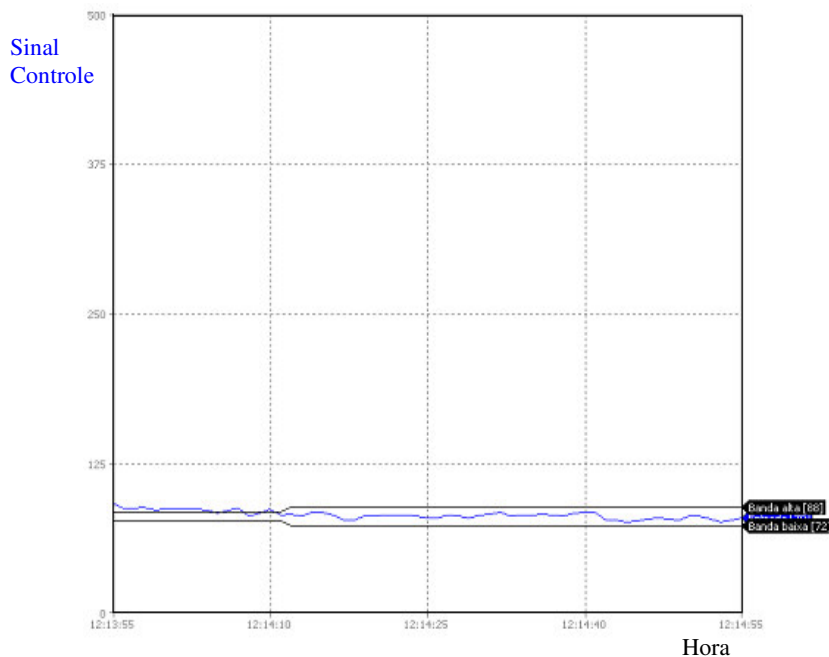
**Figura 37 - Unidade Geradora – PCH Luiz Dias.**

No primeiro ensaio apresentado a seguir, foi testada a estabilidade da potência reativa indutiva, quando o valor de referência foi alterado de 220 [kvar] para 100 [kvar]. Como poderá ser observada, a atuação do sistema de regulação apresentou-se eficaz, tendo em vista que o a potência atingiu o valor de referência sem a ocorrência de transitório ou períodos de instabilidade.



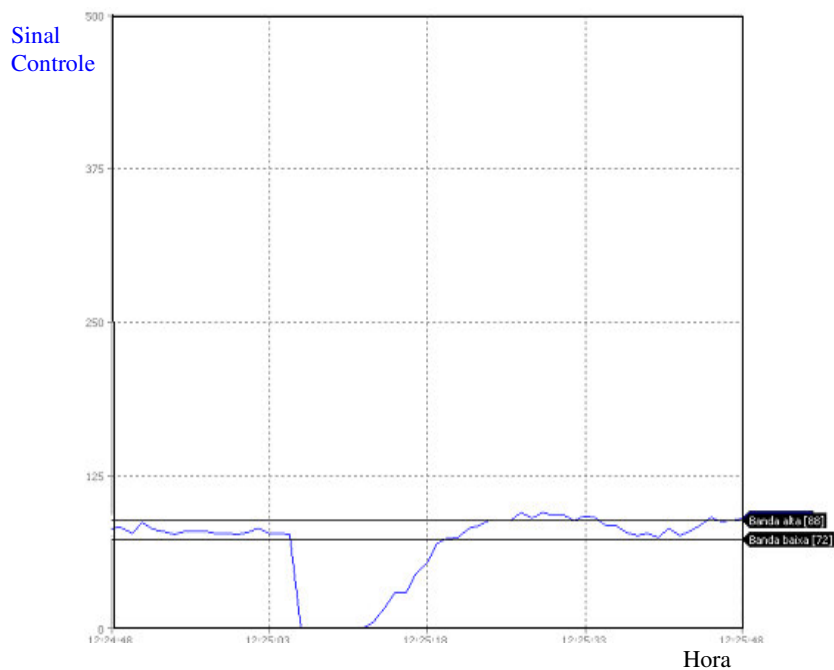
**Figura 38 - Comportamento da potência reativa mediante um degrau negativo da referência.**

Inicialmente, os testes estavam sendo realizados com uma banda morta na ordem de  $\pm 2\%$ . No entanto, através da análise da próxima figura, é possível notar que durante a realização dos testes, a rede estava com um nível de oscilação incompatível com a banda morta definida, dificultando a manutenção do sinal dentro da faixa estabelecida. Assim, para estabilizar a malha de controle, a banda morta teve seu valor alterado de  $\pm 2\%$  para  $\pm 5\%$ , resultando na resposta mostrada na Figura 39.



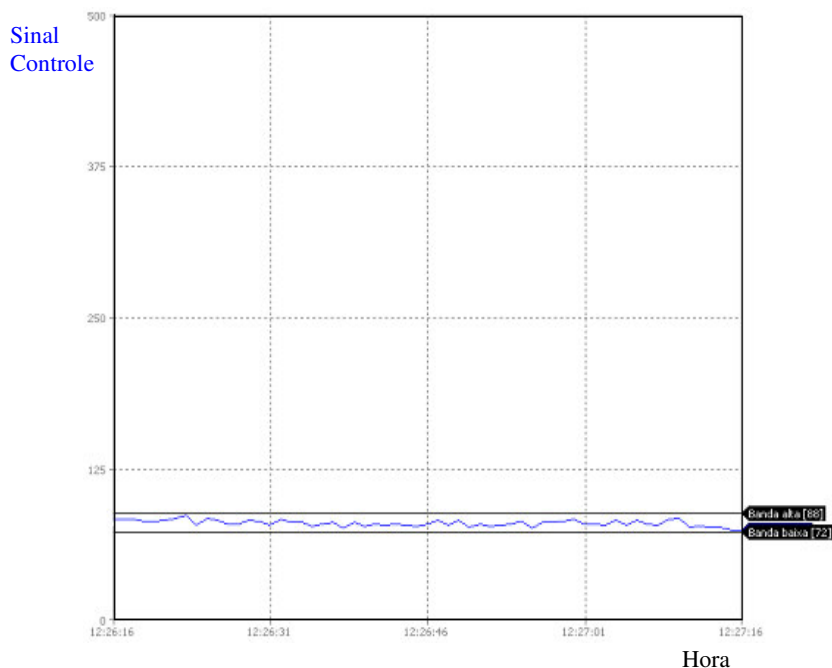
**Figura 39 - Alteração da faixa de tolerância.**

O ensaio apresentado na Figura 40 traz o comportamento da resposta do sistema quando é solicitada uma inversão no fluxo da potência reativa, passando de 100 [kvar] indutivo para 100 [kvar] capacitivo.



**Figura 40 - Passagem de potência reativa indutiva para capacitiva.**

Após a inversão do fluxo de potência reativa ter sido invertido, a próxima figura mostra que o sistema entrou em regime permanente e manteve o valor real dentro da banda morta estabelecida, ou seja, 10 [kvar] capacitivo.



**Figura 41 – Análise da estabilidade da potência reativa.**

Após a apresentação dos ensaios realizados tanto em laboratório, quanto em campo, a próxima seção deste capítulo descreve os principais ensaios que devem ser realizados em um sistema de regulação de tensão brushless. Estes ensaios, os quais são realizados durante o período de comissionamento da central hidrelétrica, tem por finalidade analisarem o comportamento do sistema e validar a conexão à rede.

### **5.2.1 Comissionamento do Sistema de Regulação de Tensão**

Com o objetivo de assegurar a operação correta e confiável de uma central hidrelétrica, após o término das instalações do grupo gerador (turbina e gerador elétrico), bem como dos serviços auxiliares, as centrais são submetidas a uma seqüência de verificações e testes a respeito do funcionamento das partes mecânicas e elétricas. Este procedimento, usualmente adotado, é denominado comissionamento de central hidrelétrica.

Diante do escopo deste trabalho de dissertação, o qual concentra-se no desenvolvimento de um regulador de tensão, este item apresenta os testes realizados no sistema de excitação e os resultados esperados do regulador, quanto à manutenção da estabilidade e tempo de resposta frente à ocorrência de situações adversas de operação.

Quanto aos testes executados no sistema de excitação, inicialmente, são realizados alguns ensaios com o gerador em vazio. Nesta condição de operação, aplica-se um degrau de tensão no campo da excitatriz, fazendo com que a tensão no terminal do estator do gerador principal atinja seu valor nominal.

Assim, através da oscilografia da corrente de campo da excitatriz, fica viável a determinação da constante de tempo da excitatriz, que é um parâmetro fundamental para o funcionamento adequado da malha de controle.

Como pode ser observado, neste primeiro teste citado, há um controle direto da corrente de campo, cuja realimentação é a própria corrente de campo. É interessante comentar que o valor de *set point* a ser ajustado nesta condição de teste corresponde ao valor de corrente associado à tensão nominal em vazio, cuja magnitude é apresentada como um dado de placa do gerador correspondente.

Ainda com o gerador em vazio, variações na intensidade da tensão aplicada ao campo da excitatriz são provocadas, com a finalidade de oscilografar e posteriormente analisar o comportamento da corrente. Estas variações são provenientes de alterações nos valores de *set point* estabelecidos na malha de controle de corrente.

Ao final das execuções destes dois ensaios em vazio, previamente descritos, é realizada a análise do comportamento da malha de controle da tensão. Neste ensaio, a realimentação do sistema de controle é feita pela tensão lida nos terminais do gerador. Sob esta condição de teste, o sistema de excitação, mediante a ação de controle do regulador de tensão, procura estabelecer a tensão terminal nominal do gerador. Para atingir esta condição, a alimentação

do campo da excitatriz pode ser dividida em dois estágios: corrente de pré-excitação e de excitação nominal em vazio.

Durante a realização do ensaio da malha de controle da tensão, deve-se oscilografar o comportamento da tensão do gerador, dando ênfase à análise da sua estabilidade dinâmica, verificando a intensidade do *overshoot* e a duração do período de instabilidade. A partir dos resultados provenientes destas análises é possível verificar se o sistema está correspondendo aos requisitos mínimos exigidos para a operação adequada de um sistema de excitação.

Tratando-se de uma função de controle PID, vale notificar que os valores atribuídos aos ganhos e as constantes de tempo inerentes a esta função são extremamente importantes no comportamento dinâmico do sistema controlado. Sendo assim, a realização de ensaios voltados à função de controle PID, conforme apresentado na seção III.1, são essenciais para uma pré-definição dos valores da maneira mais otimizada possível.

No entanto, ciente que os ganhos e as constantes de tempo dependem diretamente do sistema físico envolvido no controle, o período de comissionamento possibilita o ajuste dos parâmetros do PID, caso o comportamento dinâmico não apresente resultados satisfatórios, ou seja, dentro dos requisitos mínimos exigidos pelo o órgão operador responsável. Por outro lado, havendo um conhecimento prévio das características do sistema físico, pode-se implementar uma pré-rotina de programação, cuja finalidade consiste em atribuir valores otimizados aos parâmetros de controle, em função dos dados do sistema físico. Com isso, certamente, o processo de comissionamento do sistema de excitação pode ser otimizado, reduzindo o trabalho e o tempo despendido pelos responsáveis pelo processo.

Ao término dos testes em vazio, a próxima etapa do processo de comissionamento consiste em inspecionar o comportamento do regulador na realização do sincronismo. Como comentado, o relé de sincronismo, dentre outras funções, é o encarregado pelo o ajuste da corrente de excitação, de modo a estabelecer a igualdade entre as tensões da rede e do gerador. Este ajuste é feito através de pulsos elétricos transferidos para uma entrada digital

do controlador lógico programável. Assim, como no caso do teste de controle da tensão, os sinais de corrente de campo e tensão do gerador devem ser oscilografados e analisados. Uma vez detectado um comportamento adequado do sistema de excitação, o fechamento do disjuntor de sincronismo pode ser acionado, iniciando desta maneira o controle automático de reativo.

Com a unidade geradora em paralelo com a rede elétrica, é necessário que sejam realizados ensaios de rejeição de carga, os quais tem por objetivo avaliar a atuação imediata dos reguladores de tensão e velocidade. A atuação do regulador de velocidade perante situações de rejeição de carga requer uma atenção especial, haja vista a elevada inércia envolvida no processo de fechamento dos distribuidores da turbina, que resulta na redução da velocidade do rotor. Quanto à atuação do regulador de tensão, é esperado que o algoritmo de controle comande a abertura do disjuntor de campo e coloque em paralelo o circuito de desexcitação, conforme já apresentado no trabalho.

### **5.3 Considerações Finais**

Após a descrição de todo o desenvolvimento do protótipo do regulador, bem como a apresentação dos seus princípios operacionais, torna-se necessária a realização de ensaios para a verificação da sua funcionalidade. Diante desta necessidade, os resultados dos diversos ensaios realizados foram apresentados ao longo deste capítulo.

Os resultados dos ensaios mostraram um funcionamento eficaz do equipamento diante as diversas situações operacionais. Para esta verificação ser completa, a resposta do sistema foi apresentada durante o funcionamento do equipamento em todos os seus modos operacionais.

O próximo capítulo irá apresenta uma metodologia para monitoramento dos diodos da ponte retificador rotativa.

## *Capítulo 6*

---

### *Monitoramento dos Diodos Rotativos*



## 6. MONITORAMENTO DOS DIODOS ROTATIVOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar uma metodologia para identificação de defeitos nos diodos da ponte retificadora (seis diodos) rotativa do sistema de excitação *brushless*. A principal motivação para o desenvolvimento desta metodologia está relacionada ao relato, por parte dos fabricantes de geradores síncronos, da comum ocorrência de defeitos nestes dispositivos, que pode resultar em diversas adversidades operacionais no gerador, por exemplo, redução na eficiência do sistema de excitação. Esta redução na eficiência resulta em uma limitação da capacidade de fornecimento de potência reativa.

Devido ao fato da ponte retificadora do sistema de excitação *brushless* estar no eixo do gerador principal, existe grande dificuldade para se identificar um possível defeito nos diodos. Dentro deste contexto, a metodologia está fundamentada em um método indireto de identificação do defeito, utilizando os sinais de entrada e saída do regulador automático de tensão do sistema.

### 6.1 Metodologia Aplicada

A metodologia é baseada no fato que a ocorrência de um defeito em qualquer um dos diodos da ponte rotativa resulta na alteração do comportamento da tensão contínua aplicada ao campo do gerador principal, resultando conseqüentemente em alterações na corrente do campo da máquina.

Ciente que na grande maioria dos casos os defeitos nos diodos da ponte rotativa são caracterizados por uma interrupção na circulação de corrente (diodos abertos), a análise da metodologia aplicada retrata esta condição de defeito.

Através dos resultados das simulações apresentadas no próximo item, será possível comprovar que uma vez mantida constante a tensão AC aplicada à ponte, a queima de um

ou mais diodos ocasiona uma redução significativa no valor médio da corrente contínua eu circula no campo do gerador.

No entanto, com a finalidade de manter o valor da corrente no campo do gerador de acordo com as condições de operação estabelecidas, na ocorrência de um defeito, o regulador eleva automaticamente a tensão aplicada no campo da excitatriz. Deste modo, mediante a ação do regulador, o sistema de excitação busca restabelecer a condição operacional que o gerador se encontrava antes da ocorrência do defeito. Com isso, pode-se notar uma queda na eficiência do sistema de excitação, haja vista uma maior necessidade de corrente no campo da excitatriz para se manter um mesmo valor de tensão no terminal do gerador. Esta análise é válida tanto para o sistema operando em isoladamente (CV) ou em paralelo com a rede (CAR).

Para se aplicar a metodologia, deve-se efetuar o monitoramento contínuo da relação entre a grandeza controlada (potência reativa ou tensão do gerador) e a corrente do campo da excitatriz ( $I_E$ ). Assim, as seguintes relações devem ser estabelecidas.

***Relação entre a tensão do gerador e a corrente do campo da excitatriz:***

$$K_{VI} = \frac{V}{I_E} \quad (6.1)$$

***Relação entre a potência reativa e a corrente do campo da excitatriz:***

$$K_{QI} = \frac{Q}{I_E} \quad (6.2)$$

Onde:

- V - tensão do gerador;
- Q - potencia reativa;
- $I_E$  - corrente no campo da excitatriz.

Sob uma condição normal de operação, ou seja, com todos os diodos funcionando corretamente, os valores das relações  $K_{QI}$  e  $K_{VI}$  são definidos pelas características técnicas e construtivas do gerador, as quais estão expressas na sua curva de capacidade. No entanto, na ocorrência de um eventual defeito nos diodos da ponte, os valores destas relações passam a divergir dos valores esperados, que estão expressos na curva.

Deste modo, a metodologia prevê uma comparação contínua entre as relações reais  $K_{VI}$  e  $K_{QI}$  e as relações definidas pela curva de capacidade da máquina, definidas neste trabalho como sendo  $K_{VI0}$  e  $K_{QI0}$ . O resultado da comparação reflete o grau de divergência entre ambas as relações. Assim, se esta divergência ultrapassar um determinado estabelecido, o regulador deve interpretar como uma possível falha em um ou mais diodos da ponte. Os valores limites a serem definidos estão apresentados na seção 6.3.

Este procedimento de comparação pode ser facilmente aplicado através da implementação de uma rotina de programação no software do CLP. É importante ressaltar que as variáveis empregadas nos cálculos das relações são disponibilizadas pelo regulador.

Na próxima seção estão apresentados os resultados das simulações, os quais têm por objetivo validar a metodologia apresentada.

## **6.2 Resultados das Simulações**

Através da utilização dos recursos do software MATLAB/Simulink, foram realizadas simulações computacionais para a verificação da validade do método proposto.

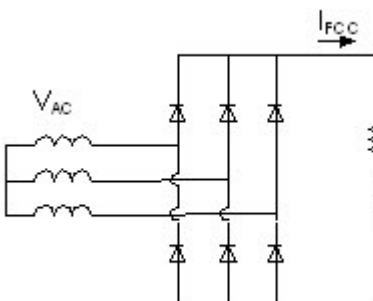
Diante do fato que na grande maioria dos casos o defeito apresentado no diodo resulta na abertura do circuito, ou seja, provoca uma interrupção da circulação de corrente pelo dispositivo, os resultados das simulações consideram diodo com defeito como circuito aberto.

Com o objetivo de obter resultados próximos do sistema físico real, o sistema foi modelado a partir de dados elétricos do campo de um gerador síncrono de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), cuja potência é de aproximadamente 15 [MVA] e a tensão de 6,9 [kV].

**Dados do campo do Gerador:**

- tensão AC – 94 [V] (tensão na entrada da ponte retificadora);
- resistência do Campo do Gerador: 0,20 [ohm];
- indutância do Campo do Gerador: 0,70 [H].

A partir destes dados, o seguinte sistema foi modelado através da utilização do aplicativo Simulink do MATLAB:



**Figura 42 - Sistema modelado.**

Onde:

- $V_{AC}$  - tensão alternada aplicada na entrada da ponte retificadora;
- $I_{FCG}$  - corrente do campo do gerador.

As simulações contemplaram as seguintes situações de defeitos (queima de diodos) na ponte rotativa:

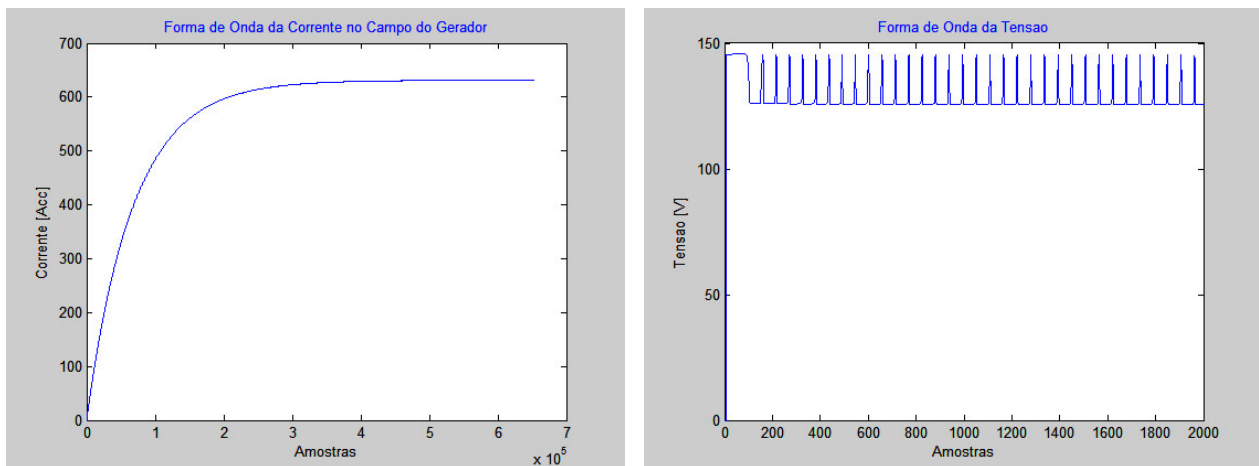
- defeitos individuais dos diodos;

- defeito em pares de diodo de uma mesma fase;
- defeito pares de diodos de fases distintas.

È importante ressaltar estas são as situações mais corriqueiras de queima de diodos em pontes trifásicas rotativas, sendo que outras situações também podem ser simuladas e analisadas analogamente.

Para se viabilizar uma análise comparativa, a tensão alternada na entrada da ponte ( $94\text{ V}_{AC}$ ) foi mantida constante, evidenciando única e exclusivamente as alterações ocorridas no lado DC da excitatriz.

### ***Simulação 1 – Formas de Onda da Corrente e Tensão no Campo do Gerador - Ponte em Perfeito Estado Operacional***



**Figura 43 - Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 1.**

Os correspondentes valores médios da tensão e corrente no campo do gerador, referentes à primeira simulação são os seguintes:

Tabela 6.1 – Valores médios referentes à simulação 1.

Valores Médios	
Corrente no Campo do Gerador - $I_{FCG}$	Tensão DC aplicada ao campo do Gerador
631,2	126,4

**Simulação 2 – Formas de Onda da Corrente e Tensão no Campo do Gerador – Ponte operando com um Diodo Queimado**

Neste caso, a queima do seguinte diodo foi simulada:

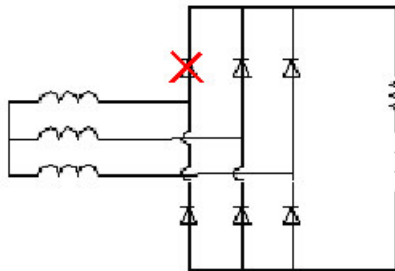


Figura 44 – Representação da condição de defeito da simulação 2

Assim, têm-se as seguintes formas de onda da corrente e tensão:

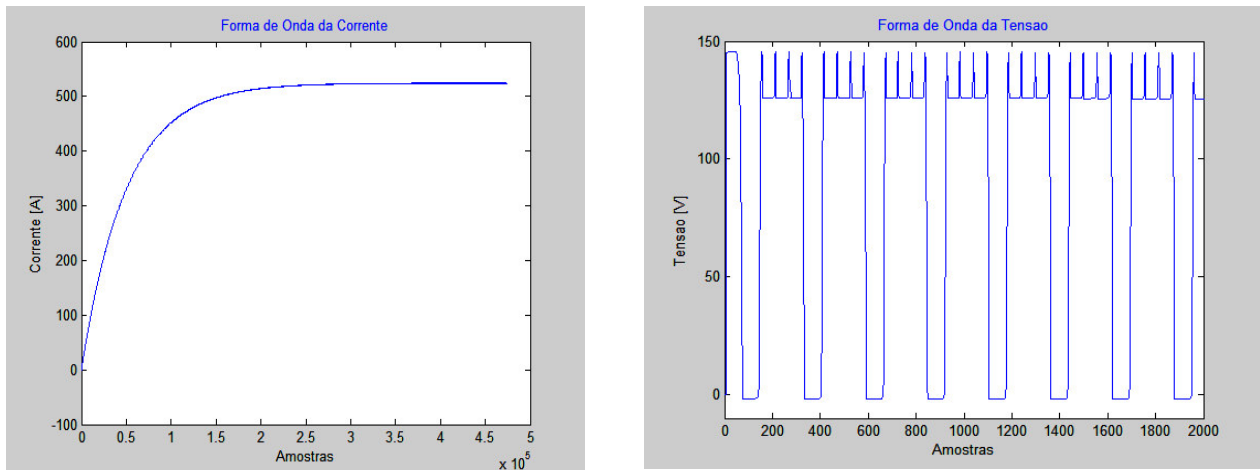


Figura 45 – Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 2.

Os correspondentes valores médios da tensão e corrente no campo do gerador, referentes à segunda simulação são os seguintes:

Tabela 6.2 – Valores médios referentes à simulação 2.

Valores Médios	
Corrente no Campo do Gerador - $I_{FCG}$	Tensão DC aplicada ao campo do Gerador
524,4	112,3

**Simulação 3 – Corrente e Tensão no Campo do Gerador – Ponte Operando com Diodos Danificados de uma Mesma Fase**

Neste caso, a queima dos seguintes diodos foi simulada:

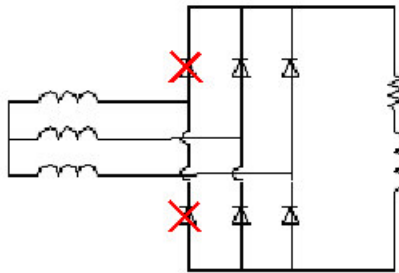


Figura 46 – Representação da condição de defeito da simulação 3.

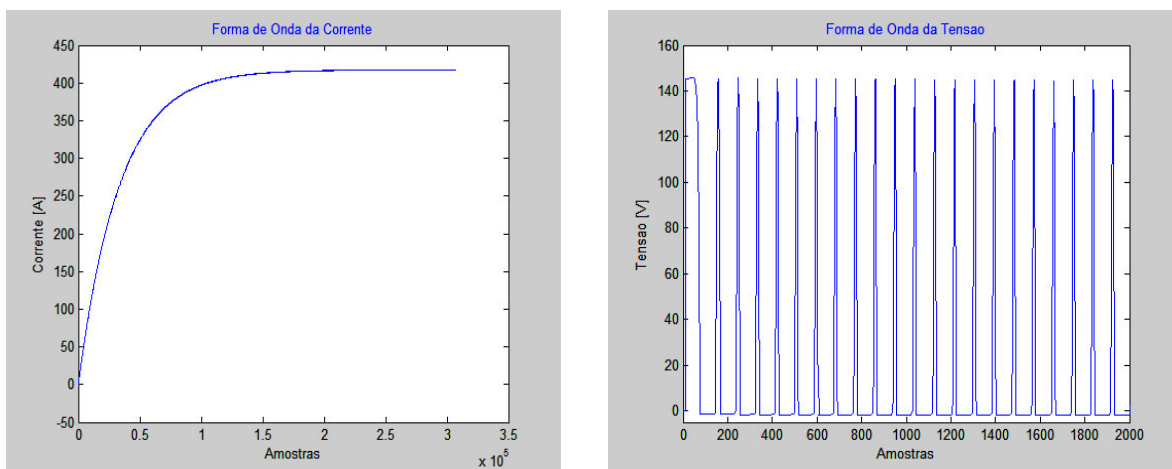


Figura 47 – Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 3.

Os correspondentes valores médios da tensão e corrente no campo do gerador, referentes à terceira simulação são os seguintes:

Tabela 6.3 – Valores médios referentes à simulação 3.

Valor Médio	
Corrente [Acc]	Tensão [Vcc]
417,2	95,12

**Simulação 4 – Corrente e Tensão no Campo do Gerador – Ponte Operando com Dois Diodos Queimados em Fases Distintas**

Neste caso, a queima dos seguintes diodos foi simulada:

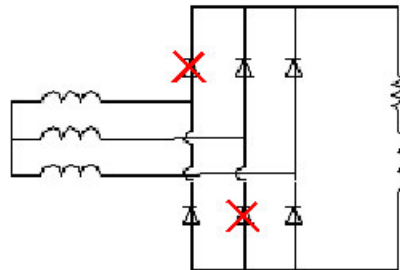


Figura 48 – Representação da condição de defeito da simulação 4.

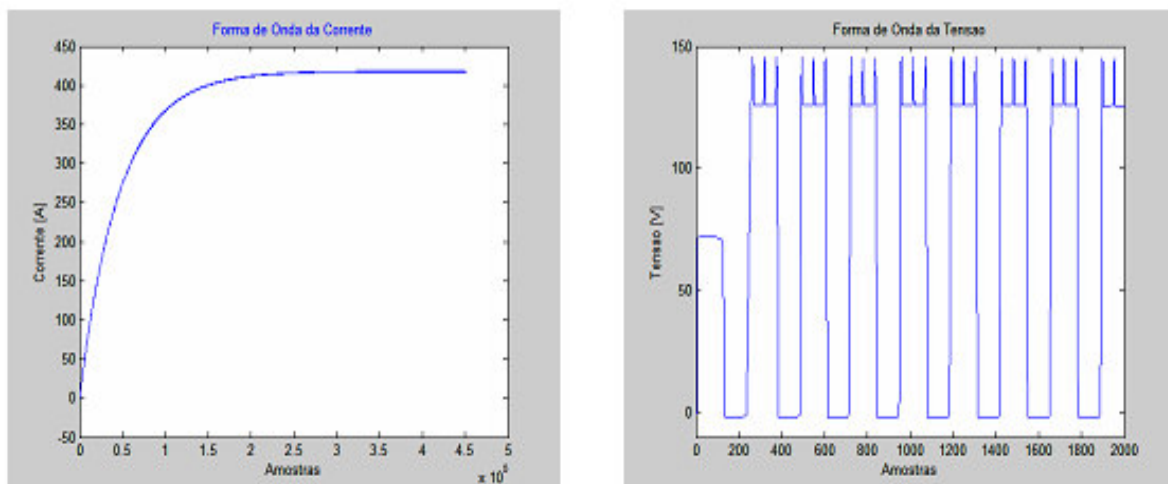


Figura 49 – Formas de onda da tensão e corrente – Simulação 4.



Os correspondentes valores médios da tensão e corrente no campo do gerador, referentes à quarta simulação são os seguintes:

**Tabela 6.4 – Valores médios referentes à simulação 4.**

Valor Médio	
Corrente [Acc]	Tensão [Vcc]
417,9	101,2

### 6.3 Análise dos Resultados

A tabela apresentada a seguir mostra as variações ocorridas nos valores médios da corrente do campo do gerador frente às queimas de diodos simuladas.

**Tabela 6.2 – Resultados das simulações.**

Simulação	Corrente [Acc]	Tensão [Vac]
1	631	<b>94</b>
2	524	
3	417	
4	417	

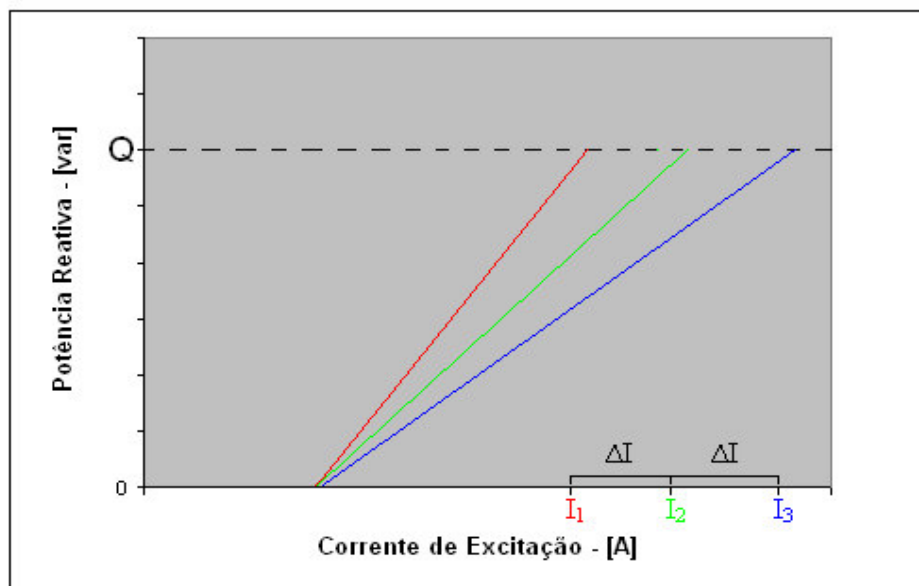
Através de uma análise dos resultados apresentados na tabela, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- a queima de um diodo provoca uma redução na corrente do campo do gerador de aproximadamente 17%;
- a queima de pares de diodos, sejam eles de uma mesma fase ou não, resulta em uma redução de 34% no valor da corrente do campo do gerador;

Como comentado, a redução na corrente do campo do gerador resulta na necessidade de uma elevação na tensão aplicada na entrada da ponte retificadora. Assim, para que isto ocorra, o regulador automaticamente eleva no valor da tensão aplicada ao campo da excitatriz.

A divergência máxima admissível entre as relações reais e as definidas pela curva de capacidade da máquina pode ser definida a partir dos resultados apresentados na Tabela 6.5. Por exemplo, se o valor da relação real ( $K_{VI}$  ou  $K_{QV}$ ) for inferior a 85% do valor da relação esperada ( $K_{VI0}$  e  $K_{QI0}$ ), há um forte indício da ocorrência de defeito em um diodo. Caso a relação real seja por volta de 70 % inferior, deve-se ter um par de diodos abertos.

Com a finalidade de esclarecer a metodologia proposta, a análise do gráfico apresentado a seguir, permite observar que estando a ponte operando com todos os seus diodos em perfeitas condições operacionais, para se manter um determinado fluxo de potência é necessária a circulação de uma corrente  $I_1$  no campo da excitatriz. No entanto, se um diodo ou um par de diodos estiver danificado, as correntes  $I_2$  ou  $I_3$  deverão circular no campo da excitatriz, respectivamente.



**Figura 50 – Variação da corrente em função dos defeitos dos diodos.**

Diante do exposto, o gráfico a seguir apresenta o comportamento dos parâmetros a serem monitorados através do software implementado no CLP.

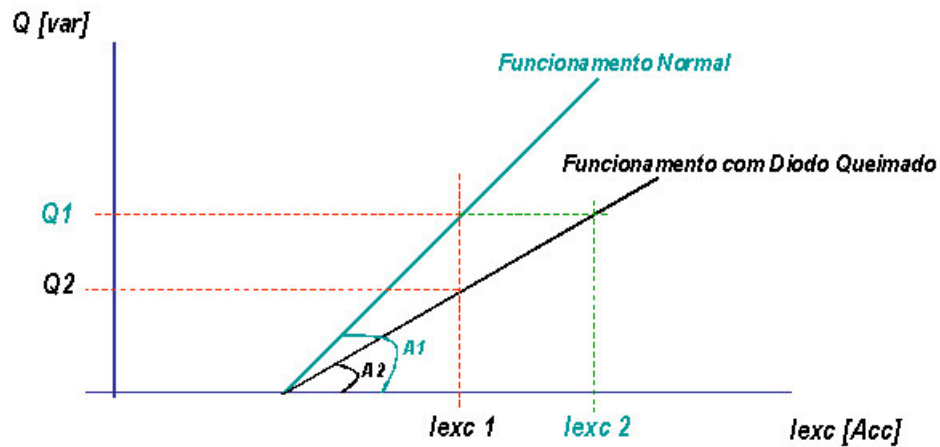


Figura 51 – Representação do coeficiente de monitoramento dos diodos.

Onde:

- $A_1$  – parâmetro relacionado às relações  $K_{VI}$  ou  $K_{QV}$ ; (definido pela curva de capacidade da máquina)
- $A_2$  – parâmetro relacionado às relações  $K_{VIo}$  e  $K_{Qio}$ . (relações reais)

O parâmetro representado por  $A_1$  indica um funcionamento normal da ponte, ou seja, sem defeito algum nos diodos. Na ocorrência de um defeito, a potência reativa reduziria de  $Q_1$  para  $Q_2$ , no entanto o regulador elevaria a corrente de excitação para um nível  $I_{exc2}$ , mantendo desta maneira a potência  $Q_1$ . Assim, ao se comparar os coeficientes  $A_2$  e  $A_1$ , conforme apresentado, o regulador pode indicar a ocorrência do defeito, sugerindo a inspeção e uma possível troca do dispositivo.

## 6.4 Considerações Finais

A metodologia apresentada neste capítulo mostrou os efeitos da queima de um ou mais diodos da ponte retificadora rotativa na tensão e corrente do campo do gerador. Com isso, foi sugerida a aplicação de uma metodologia para monitorar o funcionamento da ponte.

Sendo assim, como se trata do desenvolvimento de um protótipo, a implementação desta metodologia é extremamente viável e sua aplicação importante, tendo em vista a possibilidade de se evitar eventuais problemas decorrentes de um defeito nos diodos da ponte rotativa do sistema de excitação brushless.

## *Capítulo 7*

---

## *Conclusão*

## 7. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho consistiu em apresentar detalhadamente o desenvolvimento de um regulador de tensão para geradores síncronos com sistema de excitação brushless.

O desenvolvimento do equipamento foi resultado de uma parceria entre a Universidade e uma empresa do setor privado. O resultado desta parceria pode ser considerado positivo, tendo em vista que o desenvolvimento apresentado nesta dissertação resultou na construção de um protótipo, o qual foi testado no laboratório da Universidade Federal de Itajubá e na Pequena Central Hidrelétrica Luiz Dias.

Toda a tecnologia empregada no regulador foi apresentada gradativamente, mostrando as funções atribuídas a cada dispositivo empregado no sistema. Além da descrição dos dispositivos, os circuitos eletrônicos responsáveis pelo condicionamento dos sinais de realimentação foram apresentados, indicando os níveis dos sinais aplicados aos terminais de entrada do Controlador Lógico Programável (CLP) apresentado. Os resultados da ação da função de controle PID, a qual foi implementada no software do CLP, foram analisados através dos resultados dos ensaios, permitindo uma verificação do comportamento dinâmico das variáveis de controle envolvidas no sistema de regulação de tensão brushless.

A atuação da função de controle se faz através de uma ação conjunta do CLP com um microcontrolador programável (MC). Deste modo, os algoritmos de programação implementados no MC e no CLP foram apresentados, procurando sempre relacioná-los com as características operacionais do sistema de geração, as quais dependem da arquitetura da rede onde o gerador será conectado, ou seja, se a geração será para um sistema interligado ou para um sistema isolado.

Uma vez apresentado todo o desenvolvimento, resultados de ensaios foram apresentados, mostrando claramente o controle tensão no campo da excitatriz sendo realizado através de uma modulação PWM, bem como a atuação do regulador em situações de operação reais.

Um outro assunto interessante abordado neste trabalho, é a apresentação de uma metodologia de monitoramento dos diodos da ponte retificadora rotativa existente no sistema de excitação brushless. Resultados de simulações mostram a eficácia da metodologia proposta, restando apenas implementá-la em um sistema físico para validá-la.

Sendo assim, pode-se afirmar que este trabalho abordou diversos aspectos ligados ao campo da engenharia elétrica, uma vez que foram analisados os sistemas de medição de uma Pequena Central Hidrelétrica, os circuitos eletrônicos empregados no regulador, a tecnologia de controle aplicada e a eletrônica de potência envolvida no controle da tensão de excitação. Deste modo, este trabalho contribuiu significativamente para um entendimento geral a respeito de sistemas de excitação brushless, além de comprovar o quão produtiva pode ser a parceria entre a Universidade e a empresa privada.

## *Capítulo 8*

---

### *Referências Bibliográficas*



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, P. M.; FOUAD A. A.. **Power System Control and Stability**, Ames, IA, USA, 1997.

CRENSHAW, M.L.; BOLLINGER, K. E.; BYERLY, R.T.. **Excitation System Models For Power System Stability Studies**, IEEE Trans. Power Appar. and System, PAS-100, no. 2, pp. 494-509, 1981.

SHANDE, Shen; SHOUZHEN, Zhu. **Identification of Parameters of Synchronous Machine**, IEEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991, Hong Kong.

KUNDUR, Prabha. **Power System Stability and Control**, Electric Power Research Institute, Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc., 1994.

KARAYAKA, H. BORA; KYHANI, ALI; HEYDT, GERALD THOMAS; SELIN, DOUGLAS A.. **Synchronous Generator Model Identification and Parameter Estimation From Operating Data**, IEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 1, March 2003.

MARTINS, Leandro; CAMACHO, Carlos; REZEK, Ângelo. **Implementation of a Voltage Robust Control for Electric Generator Using Sliding Mode Controller**.

SUZUKI, K.; SUMIDA, T.; UDA, S.; SHIMOMURA, M.; TANAKA, S.. **The characteristics of Excitation System**. IEEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991, Hong Kong.

EDWARD, Y. Y; PARESH, HO.; SEN, C.. **Control Dynamics of Speed Drive Systems Using Sliding Mode Controllers with Integral Compensation**, IEEE Transaction on Industry Applications, vol 27, No. 5, September/October 1991.