

**ESCOLA POLITÉCNICA  
DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E  
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**COMPARATIVO ENTRE DUAS ESTRUTURAS DE CONTROLE PARA  
REGULADORES DE TENSÃO DE HIDROGERADORES**

**Daniel dos Santos Mota**

Projeto de Formatura 2003

**ESCOLA POLITÉCNICA  
DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E  
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**PROJETO DE FORMATURA 2003**

**COMPARATIVO ENTRE DUAS ESTRUTURAS DE CONTROLE PARA  
REGULADORES DE TENSÃO DE HIDROGERADORES**

Aluno : Daniel dos Santos Mota  
Orientador: Clovis Goldemberg  
Coordenador: Luiz Cláudio Ribeiro Galvão



# ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA – EPUSP

## Agradecimentos

Agradeço aos amigos pelo grande apoio durante a preparação deste projeto de formatura.

Agradeço aos moradores da República Tropeiros por transformarem aquele lar em um ambiente muito pouco propício para o estudo. Felizmente, as preocupações da escola e do trabalho nunca perturbaram o ambiente da Tropeiros!

Agradeço aos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela qualidade do ensino oferecido por esta instituição



# ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA – EPUSP

## Sumário

1- RESUMO	3
2- ABSTRACT	3
3- APRESENTAÇÃO	4
4- OBJETIVOS	5
4-1- Controle Direto	6
4-2- Controle Cascata	7
4-3- Motivação para a Realização deste Projeto e Principais Diferenças entre as Filosofias de Controle	8
5- METODOLOGIA	9
5-1- Revisão Bibliográfica	9
5-2- Desenvolvimento de Modelos Computacionais	9
5-3- Pré-dimensionamento do Sistema de Excitação e Adaptação dos Modelos	9
5-4- Ajuste e Otimização das Estruturas de Controle	9
5-5- Comparação dos Resultados das Simulações	9
6- SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	10
6-1- Tipos de Excitatrizes	11
6-1-a- Excitatriz Rotativa de Corrente Contínua	11
6-1-b- Excitatriz Rotativa de Corrente Alternada	11
6-1-c- Excitatriz Estática e Excitatriz Mista	12
6-2- Equipamentos e Componentes de um Sistema Estático de Excitação	13
6-2-a- Transformador de Excitação	13
6-2-b- Conversor de Potência	13
6-2-c- Circuito de Desexcitação e Proteção contra Sobretensão CC	14
6-2-d- Circuito de Pré-Excitação (Escorvamento de Campo)	14
6-2-e- Regulador Automático de Tensão	15
6-2-f- Regulador Manual de Tensão	15
6-3- Desempenho do Sistema de Excitação face a Grandes Perturbações	16
6-3-a- A Tensão de Teto de um Sistema de Excitação	16
6-4- Desempenho do Sistema de Excitação face a Pequenas Perturbações	17
7- DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS	18
7-1- Fenômenos Transitórios e suas Escalas de Tempo	18
8- MODELAGEM DO CONVERSOR DE POTÊNCIA	19
8-1- Tipos de Modelo	19
8-2- Aproximações feitas pelo Modelo do Tipo Pseudocontínuo	21
8-2-a- Tensões de Entrada do Conversor	21
8-2-b- Tratamento de Pequenos Tempos Mortos	21
8-3- Detalhamento do Modelo do Tipo Bornes	22
8-3-a- Composição da Tensão nos Bornes do Modelo	22
8-4- Comparação do Modelo do Tipo Bornes e do Tipo Pseudocontínuo	24
9- MODELAGEM DOS TRANSDUTORES DE TENSÃO E CORRENTE	25
9-1- O Transdutor de Tensão Terminal do Gerador	25
9-2- O Transdutor de Corrente de Campo	26
10- MODELAGEM DO GERADOR EM VAZIO	27





# ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA – EPUSP

11- PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO	30
12- BASES PARA AS SIMULAÇÕES	31
13- ESTRATÉGIAS PARA O PRÉ-AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS REGULADORES PI	32
13-1- Tratamento de Pequenas Constantes de Tempo	32
13-2- Ajuste Ótimo de um Regulador PI	33
13-3- Estratégia Inicial para o Ajuste dos Reguladores PI do Controle Cascata	35
14- AJUSTE DO CONTROLE DIRETO	37
15- AJUSTE DO CONTROLE CASCATA	40
15-1- Ajuste da Malha Interna de Corrente – Sobressinal de 5% na Resposta ao Degrau	41
15-2- Ajuste da Malha Interna de Corrente – Ajuste Ótimo	42
15-3- Ajuste da Malha Interna de Corrente – Amortecimento Crítico	42
15-4- Ajuste da Malha Externa – Sobressinal Máximo de 5% na Resposta ao de Degrau	44
15-5- Primeiro Refinamento do Ajuste do Controle Cascata	46
16- REFINAMENTO DOS AJUSTES DOS PARÂMETROS DOS PI'S DO CONTROLE DIRETO E CASCATA	48
17- COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS FILOSOFIAS DE CONTROLE	51
17-1- Respostas ao Degrau de 2% na Referência de Tensão Terminal	51
17-2- Respostas ao Degrau de 5% na Referência de Tensão Terminal	53
17-2-a- Detalhes do Controle Direto	54
17-2-b- Detalhes do Controle Cascata	56
17-3- Respostas ao Degrau de 6% na Referência de Tensão Terminal	58
17-3-a- Detalhes da Ponte de Tiristores do Controle Direto e do Controle Cascata	59
17-3-b- Limitadores do Regulador PI do Controle Direto	63
17-3-c- Limitadores dos Reguladores PI do Controle Cascata	65
18- CONCLUSÕES	67
19- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO I – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA EXCITAÇÃO I	69
ANEXO II – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA EXCITAÇÃO II	71
ANEXO III – MODELOS COMPUTACIONAIS E APRESENTAÇÃO DE GRÁFICOS	72



## **1-RESUMO**

Este projeto de formatura compara o comportamento de duas estruturas diferentes de controle automático da tensão de hidrogeradores com sistemas de excitação estáticos. Estes sistemas alimentam o enrolamento de campo do gerador através de pontes trifásicas tiristorizadas totalmente controladas conectadas aos terminais do gerador por meio de um transformador abaixador. A primeira estrutura, denominada de Controle Direto, compara a tensão terminal do gerador com uma tensão de referência e, através de um regulador PI, atua diretamente no ângulo de disparo do conversor estático, aumentando ou diminuindo a tensão de campo do gerador. A segunda, que emprega dois reguladores PI em cascata e é, portanto, chamada de Controle em Cascata, compara a tensão terminal com a referência de tensão e, através do PI externo, fornece a corrente de campo de referência ao regulador PI interno que se encarrega de controlar a corrente de excitação do gerador.

## **2-ABSTRACT**

*This graduation project compares two different control structures of the automatic voltage regulator of hydraulic generators with static excitation systems. These systems have a full thyristor bridge, fed by a step-down transformer connected to the generator terminals, that controls the voltage of the rotor winding. The first control structure, named Direct Control, has a single PI (proportional-integral) regulator that acts directly on the thyristor bridge firing angle. The second control structure, named Cascade Control, employs two PI regulators in cascade. The external PI regulator compares the actual terminal voltage with the terminal voltage reference and produces a command signal which is the field current reference of the internal PI regulator. The internal PI regulator compares this reference with the actual field current and acts on the thyristor bridge firing angle accordingly.*



### **3- APRESENTAÇÃO**

As primeiras usinas que produziam energia elétrica comercialmente eram de pequeno porte e possuíam geradores também de pequeno porte. A excitação destes geradores era feita de modo muito simples. Um barramento de tensão contínua era alimentado por geradores de corrente contínua conectados em paralelo. Deste barramento saíam derivações através das quais o campo dos geradores era alimentado. O controle da tensão dos geradores era feito manualmente por reostatos que atuavam na corrente de excitação das máquinas. Com o tempo, o consumo de energia elétrica cresceu e as usinas acompanharam este crescimento. A solução da barra geral mostrou-se antieconômica e pouco confiável. As soluções adotadas caminharam para pequenos geradores acoplados aos eixos de cada máquina (excitatrizes rotativas).

O surgimento de tiristores de grande potência tornou possível o desenvolvimento de sistemas de excitação estáticos. Tais sistemas consistem basicamente de uma ponte retificadora controlada alimentada com tensão alternada obtida de um transformador abaixador ligado aos terminais do gerador. Os sistemas de excitação estáticos apresentam características favoráveis, como por exemplo:

- Possibilitam reduzir o tempo de resposta de recuperação da tensão terminal do gerador quando comparados aos sistemas com excitação rotativa.
- Possibilitam a medição da temperatura do rotor através da variação da resistência de campo, pois o sistema de excitação tem informações em tempo real da corrente e da tensão de campo (a resistência de campo é proporcional à temperatura do rotor).
- Possibilitam a proteção de falha à terra do rotor, pois esta só é possível de ser implantada quando se tem o acesso aos terminais do enrolamento de campo, caso dos sistemas de excitação estáticos.

A possibilidade de manutenção da tensão e da frequência dentro de níveis adequados está intimamente ligada com a qualidade de atendimento de um sistema elétrico. Especificamente, em relação ao controle da tensão, é necessário um bom desempenho do sistema de excitação.

Para se manter a tensão de saída de um gerador no valor nominal, face às lentas e pequenas variações da tensão no sistema de potência, a excitatriz não necessita de qualidades excepcionais. Ela poderia ser apenas um gerador de corrente contínua comum, com potência suficiente para produzir a corrente de campo nominal e com razoá-



vel estabilidade e confiabilidade. Ela poderia ser também um gerador de corrente alternada ligado ao campo do gerador através de um conversor estático. Mas, é fato que durante fenômenos transitórios é necessário agir de modo rápido sobre a corrente de campo do gerador, e nestes casos, as excitatrizes puramente estáticas demonstram vantagens sobre as rotativas.

## 4- OBJETIVOS

A finalidade deste projeto de formatura é realizar, através de ferramentas matemáticas computacionais, um comparativo entre duas filosofias diferentes de controle da tensão de hidrogeradores realizado por sistemas de excitação estáticos. Tais filosofias serão denominadas de “Controle Direto” e “Controle Cascata”.

A Figura 4.1 apresenta um diagrama em blocos simplificado de um sistema estático de excitação:

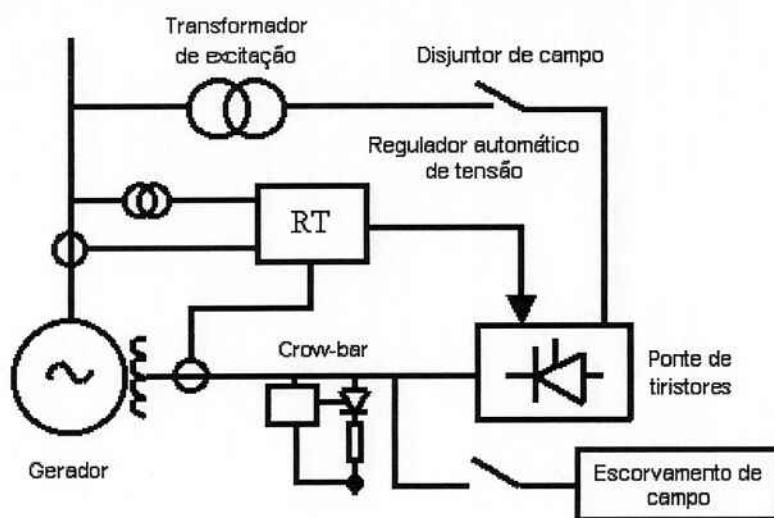


Figura 4.1: Sistema de Excitação Estático

Em seguida, serão apresentados diagramas em blocos que exemplificam as duas filosofias de controle para reguladores automáticos de tensão.



#### 4-1- CONTROLE DIRETO

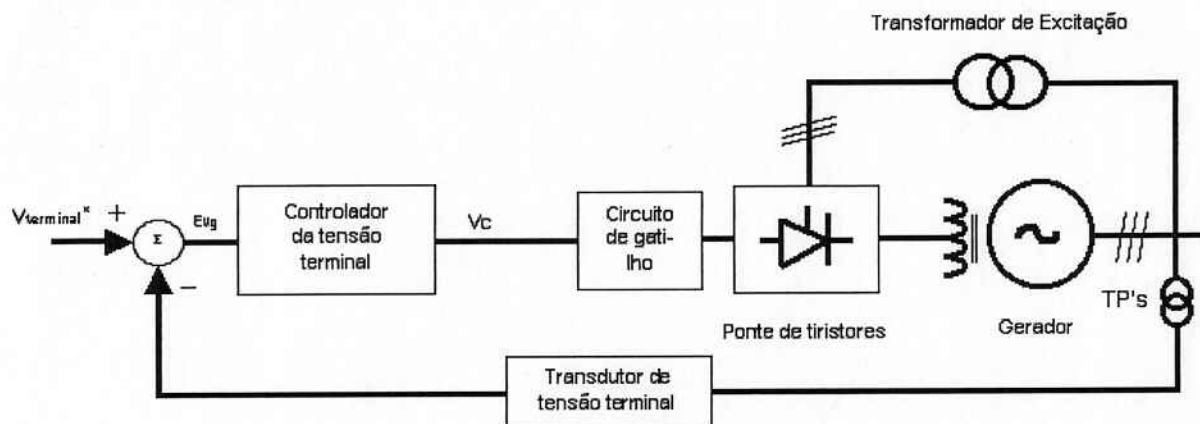


Figura 4.2: Sistema de Excitação com Controle Direto

O Controle Direto compara a tensão terminal do gerador com uma referência de tensão. O erro resultante é aplicado na entrada de um controlador PI (proporcional-integral) que produz a tensão de controle do circuito de gatilho da ponte de tiristores. Esta última alimenta o enrolamento de campo do gerador.



#### 4-2- CONTROLE CASCATA

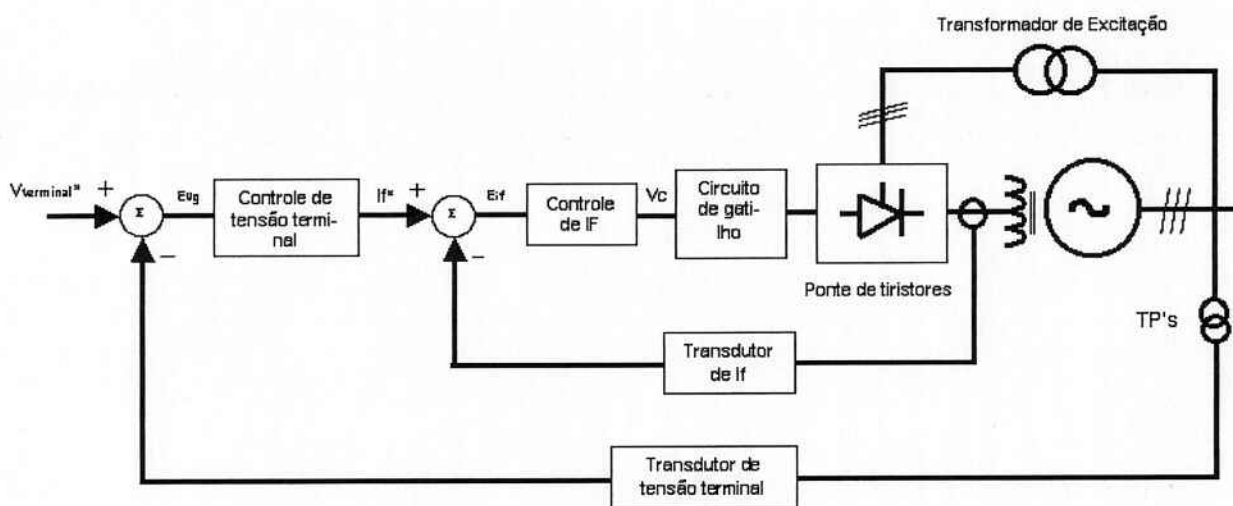


Figura 4.3: Sistema de Excitação com Controle Cascata

Nesta estrutura existem dois controladores do tipo PI (proporcional integral) em cascata. O PI externo compara a tensão terminal do gerador com uma referência de tensão, produzindo um sinal que corresponde à referência de corrente de campo. O PI interno compara a referência de corrente de campo com a corrente de campo medida, produzindo na saída a tensão de controle do circuito de gatilho da ponte de tiristores que alimenta o enrolamento de campo do gerador.



#### **4-3- MOTIVAÇÃO PARA A REALIZAÇÃO DESTE PROJETO E PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE AS FILOSOFIAS DE CONTROLE**

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi, em um primeiro momento, descobrir qual seria a influência da implantação de uma malha interna de corrente de campo no desempenho de um regulador de tensão para hidrogeradores de médio e grande porte que utiliza a filosofia de controle direto da tensão terminal.

A malha interna de controle de corrente representa um "drive" de corrente contínua utilizado normalmente para o acionamento de motores CC. Este "drive" pode ser empregado como o conversor de potência de um sistema de excitação estático, pois possui uma ponte retificadora e os circuitos de disparo dos tiristores desta ponte. O "drive" substituiria a ponte de tiristores e os circuitos de disparo do conversor de potência de um regulador com controle direto.

Entretanto, o "drive" introduz uma malha de controle de corrente de campo no sistema que pode alterar o comportamento deste. Esta nova malha é a principal diferença entre os dois sistemas. É por este motivo, para estudar os diferentes desempenhos das duas filosofias, que se iniciou este projeto de formatura.

Serão colocadas de lado, questões sobre a comparação entre o custo de um "drive" de corrente contínua e o custo de uma ponte de tiristores e dos circuitos de disparo. Questões sobre quais destes componentes são mais facilmente encontrados no mercado também não serão consideradas.





## **5- METODOLOGIA**

### **5-1- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Foi realizada uma coleta dos dados sobre controle de excitação de geradores e motores. Foi feita uma pesquisa de normas que regulamentam os sistemas de excitação, de catálogos de fabricantes de reguladores de tensão e de informações sobre modelagem computacional de sistemas elétricos.

### **5-2- DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS**

Os modelos computacionais foram desenvolvidos segundo a ordem abaixo:

- Modelagem da ponte de tiristores;
- Modelagem dos transdutores;
- Modelagem do gerador em vazio;
- Modelagem das estruturas de controle.

### **5-3- PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO E ADAPTAÇÃO DOS MODELOS**

- Realizou-se um pré-dimensionamento de um sistema de excitação a partir da folha de dados de excitação do projeto de um gerador real;
- Os modelos desenvolvidos foram adaptados ao pré-projeto do sistema de excitação e ao projeto do gerador.

### **5-4- AJUSTE E OTIMIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONTROLE**

- Foram pesquisadas estratégias de parametrização de reguladores PI;
- Através de ferramentas de controle clássico realizou-se o pré-ajuste dos parâmetros;
- Com o auxílio de simulações no domínio do tempo de modelos simplificados, foram refinados os ajustes e otimizados os modelos.

### **5-5- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES**

Depois de otimizadas e equalizadas, as estruturas de controle tiveram seu comportamento dinâmico comparado através de simulações no domínio do tempo.





## 6- SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Um sistema de excitação compreende todos os equipamentos e dispositivos necessários ao suprimento da corrente de campo do gerador principal.

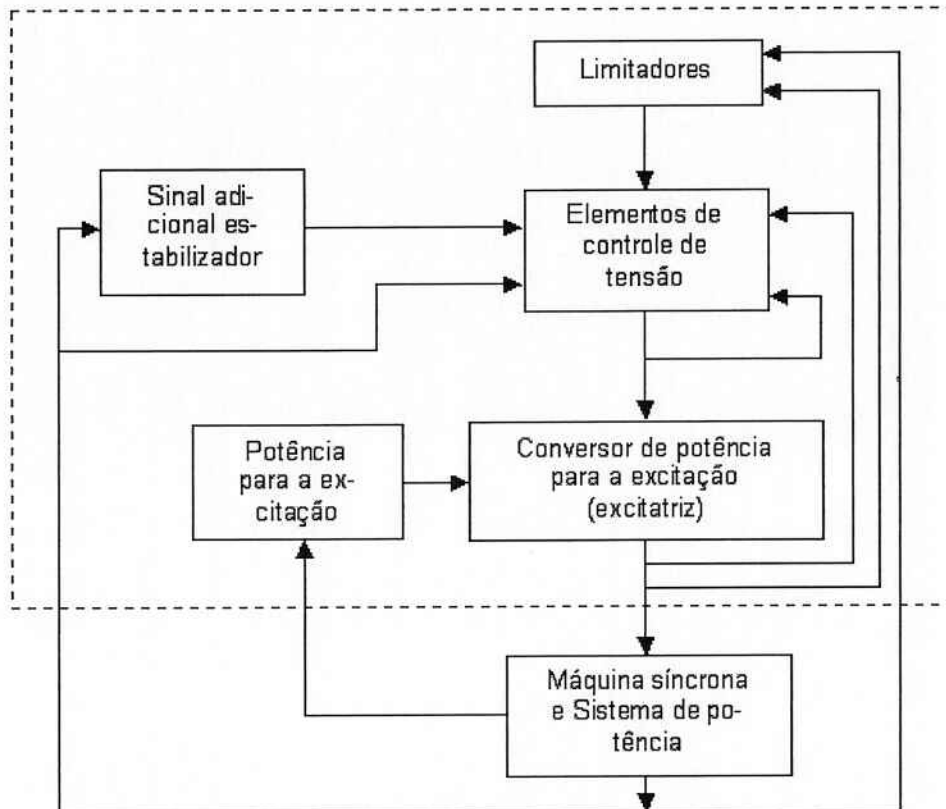


Figura 6.1: Diagrama em blocos de um sistema de excitação

Os principais componentes de um sistema de excitação são: a excitatriz, o regulador de tensão, seus limitadores e o sinal estabilizador. Este último, bem como alguns limitadores não necessariamente estão presentes em um sistema de excitação [1].



### 6-1- TIPOS DE EXCITATRIZES

A classificação dos diversos tipos de excitatrizes considera quatro grandes grupos: excitatrizes rotativas CC, excitatrizes rotativas CA, sistemas estáticos e sistemas mistos [1].

Em seguida será feita uma breve apresentação dos tipos de excitatrizes. Convém ressaltar que este projeto visa apenas comparar o desempenho de reguladores de tensão com sistemas de excitação estáticos.

#### 6-1-a- Excitatriz Rotativa de Corrente Contínua

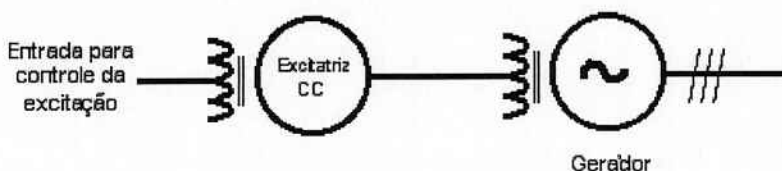


Figura 6.2: Excitatriz rotativa CC

Em sistemas com excitatrizes CC, uma máquina de corrente contínua alimenta o enrolamento de campo do gerador. Geralmente as excitatrizes CC estão diretamente acopladas ao eixo de gerador.

#### 6-1-b- Excitatriz Rotativa de Corrente Alternada

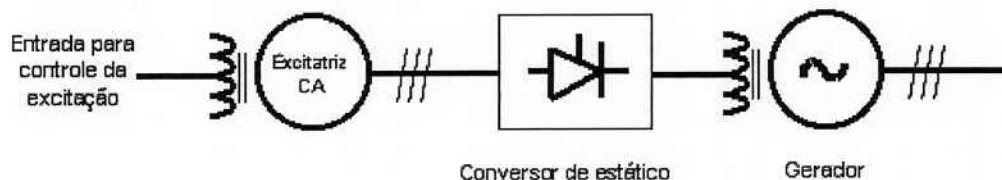


Figura 6.3: Excitatriz rotativa CA

A corrente de excitação, nestes sistemas, é produzida por um gerador CA associado a um retificador fixo ou rotativo (caso das máquinas com excitação sem escovas ou *brushless*).



### 6-1-c- Excitatriz Estática e Excitatriz Mista

Os sistemas com excitatrizes estáticas ou mistas podem ser classificados de diversas formas, como por exemplo, segundo a origem da alimentação do mesmo. Abaixo temos alguns tipos de excitatrizes estáticas e mistas:

- Auto-excitação direta simples (estática alimentada por fonte de tensão).
- Auto-excitação direta mista (estática composta).
- Auto-excitação indireta mista.
- Sistema de excitação independente direta.

Devido à abrangência deste trabalho, que se destina a comparar sistemas de excitação estáticos, apenas o sistema com auto-excitação direta simples será apresentado em seguida. Mais informações sobre a classificação de sistemas de excitação podem ser encontradas em [1] e [2].

#### *i - Auto-Excitação Direta Simples (Estática Alimentada por Fonte de Tensão)*

A Figura 6.4 ilustra a configuração básica de um sistema com auto excitação direta simples.

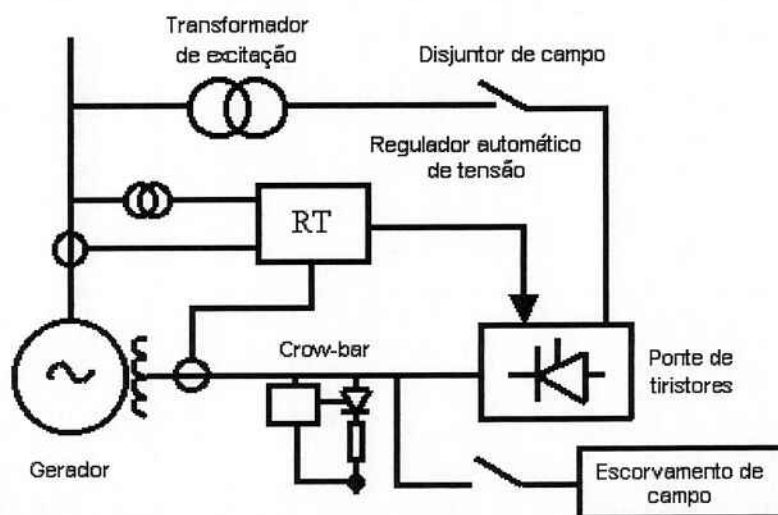


Figura 6.4: Diagrama em blocos de um sistema de excitação estático

A energia de excitação é drenada dos terminais da unidade geradora através de um transformador, retificada em uma ponte de tiristores de seis pulsos e direcionada ao campo do gerador.



Em pequenos geradores, a tensão residual é suficiente para se iniciar o processo. Entretanto, em grandes geradores, nem sempre é possível garantir um correto funcionamento do circuito de disparo da ponte de tiristores com um reduzido valor de tensão terminal. É necessário, portanto, conectar em paralelo um circuito de pré-excitação. Este circuito fornece a energia inicial para elevar a tensão terminal da máquina a um patamar no qual o circuito de disparo da ponte de tiristores possa funcionar. A energia de pré-excitação, ou de escorvamento, pode vir dos serviços auxiliares CA ou dos bancos de baterias da usina.

## **6-2- EQUIPAMENTOS E COMPONENTES DE UM SISTEMA ESTÁTICO DE EXCITAÇÃO**

Os sistemas de excitação são basicamente divididos em 7 subsistemas [1]:

- Transformador de excitação
- Conversor de potência
- Proteção contra sobretensão CC (crow-bar)
- Desexcitação
- Pré-excitação (escorvamento)
- Regulador automático de tensão
- Regulador manual de tensão

### **6-2-a- Transformador de Excitação**

O transformador de excitação é conectado aos terminais do gerador através de uma derivação e alimenta a ponte de tiristores. O local desta derivação é conhecido também como sangria.

Este transformador é normalmente ligado em estrela-triângulo. Este tipo de ligação possui vantagens quanto à propagação de harmônicos do lado do conversor de potência para os terminais do gerador.

### **6-2-b- Conversor de Potência**

O conversor de potência é constituído de pontes de semicondutores, em número adequado, ligadas em paralelo de maneira a suprir a corrente de campo do gerador.

A configuração que propicia atualmente uma ampla faixa de operação, e é padrão para a maioria das instalações, é a ponte trifásica de seis pulsos totalmente



controlada. Esta ponte permite, no caso de desexcitação da máquina, a inversão rápida da tensão de campo. Isto ajuda a reduzir mais rapidamente a corrente de excitação, impedindo assim o surgimento de sobretensões nos terminais do estator e do campo.

### 6-2-c- Circuito de Desexcitação e Proteção contra Sobretensão CC

O circuito de desexcitação é composto basicamente por um disjuntor de campo ou por um contator de campo associado a um resistor de descarga (o mesmo resistor utilizado na proteção de sobretensões de campo).

O resistor de descarga de campo deve sempre ser inserido em paralelo com o enrolamento de campo quando houver um comando de abertura do disjuntor ou do contator de campo. Caso isto não aconteça, sobretensões vão ser induzidas no sistema de excitação causando muito provavelmente danos a este e à máquina. Normalmente, o conversor de potência opera em regime inversor quando há um comando de abertura do contator de campo, isto reduz mais rapidamente a corrente de excitação e diminui esforços eletromecânicos tanto no contator de campo como no resistor de descarga.

A utilização de contator de campo CA, localizados antes da ponte de tiristores, possui algumas vantagens quando comparada a utilização de disjuntores de campo CC, localizados após a ponte de tiristores. Os dispositivos de interrupção de corrente CA são mais facilmente encontrados no mercado e, em geral, apresentam menos desgastes operacionais que os dispositivos CC.

Há um dispositivo para a proteção do sistema de excitação e do enrolamento de campo do gerador contra sobretensões, ele é conhecido como "crow-bar". Caso o valor da tensão de campo ultrapasse um valor determinado este dispositivo conecta aos terminais do enrolamento de campo do gerador o resistor de descarga desexcitando a máquina e eliminando a sobretensão.

### 6-2-d- Circuito de Pré-Excitação (Escorvamento de Campo)

Os sistemas de excitação estáticos alimentados através de uma derivação dos terminais do gerador necessitam de uma fonte de energia externa para prover inicialmente uma corrente de excitação à máquina, em grandes geradores a tensão de remanente nem sempre é suficiente para garantir um correto funcionamento da ponte de tiristores.



A corrente inicial de excitação deve levar a tensão terminal do gerador a um nível no qual o circuito de disparo do conversor de potência possa reconhecer esta tensão e assim disparar adequadamente a ponte de tiristores, a partir deste momento o circuito de pré-excitação pode ser desconectado do campo da máquina.

### 6-2-e- Regulador Automático de Tensão

O principal objetivo do regulador automático de tensão é controlar a tensão terminal do gerador em função de uma tensão de referência. O regulador também pode ser responsável pela distribuição da potência reativa entre várias máquinas quando estas operam em paralelo. Além desta função, o regulador pode ser responsável por controlar a tensão em um determinado ponto de um sistema de potência.

A faixa usual da tensão terminal do gerador é de 80% a 110% da nominal. Dentro desta faixa o regulador deverá ter uma precisão de  $\pm 0,5\%$  do valor de referência. Fora da faixa de  $\pm 10\%$  da tensão nominal, o regulador poderá operar por curtos intervalos de tempo com uma precisão menor que  $\pm 0,5\%$ , conforme Tabela 3 de [3].

Este projeto visa comparar apenas o comportamento de duas estruturas de controle para reguladores automáticos de tensão de hidrogeradores.

### 6-2-f- Regulador Manual de Tensão

O objetivo principal do regulador manual de tensão é controlar em malha aberta a tensão terminal do gerador através de um controle em malha fechada da corrente ou da tensão de campo. Normalmente, o regulador manual utiliza um controlador proporcional.

O regulador manual de tensão tem a finalidade de substituir o regulador automático quando ocorre alguma falha neste último. Para que não ocorram sobresaltos durante a transição do modo automático para o modo manual, o regulador manual deve constantemente reconhecer o estado de funcionamento do regulador automático de tensão.

Cabe aqui ressaltar que este modo também é utilizado durante o comissionamento da máquina e durante a realização de testes.





### **6-3- DESEMPENHO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO FACE A GRANDES PERTURBAÇÕES**

O desempenho face a grandes perturbações corresponde à resposta do sistema de excitação a distúrbios severos o bastante para que as não-linearidades sejam significativamente excitadas.

Convém aqui chamar atenção sobre um parâmetro do sistema de excitação que desempenha papel importante no seu comportamento, especialmente no que tange à aplicação de grandes perturbações.

#### **6-3-a- A Tensão de Teto de um Sistema de Excitação**

Sob a ação do regulador de tensão, as excitatrizes estáticas podem aplicar temporariamente tensões com módulos bem superiores à tensão nominal de campo de operação em plena carga. O valor desta tensão fica limitado à **tensão de teto máxima** e à **tensão de teto mínima**.

Vale salientar que a aplicação de tensão de teto negativa no campo não implica necessariamente na possibilidade de inversão da corrente de campo. No caso deste projeto de formatura, não haverá a possibilidade de correntes negativas de campo. Os sistemas de excitação aqui modelados possuem somente pontes de tiristores que conduzem corrente do transformador de excitação para o campo da máquina.

A tensão de teto positiva tem grande influência na estabilidade transitória de um sistema de potência. Muitas vezes, a definição da tensão de teto exige o emprego de ferramentas computacionais de simulação do comportamento dinâmico do sistema, nas quais são levadas em conta as respostas do sistema a distúrbios com alto grau de severidade e os diversos patamares de carga previstos para o sistema. Por exemplo, cargas como motores de indução podem exigir tensões de teto altas para permitir uma recuperação dos motores após a aplicação de defeitos na rede. Para garantir a partida de motores de grande porte, altos níveis de tensões de teto podem ser exigidos dos geradores de um sistema de potência.

A tensão de teto mínima tem especial significado nas limitações de sobreensões aplicadas ao gerador e ao sistema de potência, visto que, não raro se faz necessária uma rápida desexcitação de um gerador. Com relação as sobreensões, é importante examinar as condições operativas associadas à rejeição de carga e energização de linhas.



**6-4- DESEMPENHO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO FACE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES**

O desempenho face a pequenas perturbações corresponde à resposta de um sistema de excitação frente a distúrbios cuja magnitude não chega a excitar as não-linearidades do sistema.

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

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

No que diz respeito à estabilidade, deve-se destacar que ela deve ser mantida para todas as condições operativas do gerador, das condições de operação em vazio à operação interligada a um sistema de potência.





## **7- DESENVOLVIMENTO DE MODELOS COMPUTACIONAIS**

Na etapa de modelagem é feita uma descrição matemática do sistema através de equações diferenciais ou de funções de transferência evidenciando-se o comportamento estático e dinâmico do sistema e levando-se em conta fenômenos decorrentes de não-linearidades.

A escolha do grau de refinamento de um modelo é imprescindível para a obtenção de bons resultados durante uma simulação. Se o modelo escolhido for muito simples e não descrever com suficiente precisão a realidade, os resultados obtidos não serão confiáveis. Se o modelo escolhido foi muito complexo, ele também não será útil, pois haverá excesso de detalhes que não permitirão o reconhecimento dos comportamentos dinâmicos dominantes do sistema.

Em resumo, é necessário adaptar o grau de refinamento do modelo ao fenômeno que será modelado.

### **7-1- FENÔMENOS TRANSITÓRIOS E SUAS ESCALAS DE TEMPO**

Durante a modelagem de um sistema eletrônico de potência, é necessário que se leve em conta uma série de fenômenos transitórios que ocorrem em escala muito diferentes de tempo [4].

Há fenômenos de comutação de tiristores de potência que ocorrem em períodos de tempo da ordem de dezenas de  $\mu\text{s}$ . Comutações periódicas entre tiristores de um conversor de potência que causam harmônicas, ondulações e pulsações ocorrem em escalas de tempo de  $10\mu\text{s}$  a  $10\text{ms}$ . Há ainda fenômenos decorrentes do controle do sistema que podem variar de centenas de  $\mu\text{s}$  a centenas de  $\text{ms}$ .

Fica evidente que não é viável estabelecer um só modelo que funcione com o mesmo nível de detalhe para todas as escalas de tempo envolvidas nas simulações pertinentes a este projeto de formatura. Um modelo como este seria demasiadamente complexo, o que dificultaria o reconhecimento de padrões dominantes de funcionamento. Além disso, este modelo tornaria as simulações numéricas excessivamente demoradas.



## 8- MODELAGEM DO CONVERSOR DE POTÊNCIA

Podemos classificar os fenômenos transitórios de um sistema de potência quanto à escala de tempo na qual eles ocorrem [4]:

- ultra-rápidos: condução e bloqueio de corrente em semicondutores;
- muito-rápidos: comutação dos conversores estáticos;
- rápidos: fenômenos de controle;
- lentos: fenômenos de aquecimento.

Os modos lentos são devidos aos fenômenos de aquecimento dos semicondutores. As constantes de tempo envolvidas são da ordem de ms a muitos minutos, tais fenômenos não serão tratados neste projeto.

### 8-1- TIPOS DE MODELO

Distinguem-se três abordagens diferentes para a modelagem de conversores estáticos [4]:

- modelo do tipo SPICE;
- modelo do tipo sistema pseudocontínuo;
- modelo do tipo bornes.

Para o estudo dos fenômenos de escala de tempo ultra-rápida é necessário utilizar um **modelo do tipo SPICE** (Figura 8.1), pois este leva em conta os fenômenos relativos à condução e bloqueio dos tiristores e, por consequência, considera as formas de onda das correntes e tensões no interior do conversor estático. Neste tipo de modelo o funcionamento do dispositivo de disparo dos tiristores influi diretamente no comportamento do sistema.

O **modelo do tipo sistema pseudocontínuo** (Figura 8.2) utiliza uma aproximação do conversor estático, reproduzindo somente o valor médio da tensão de saída da ponte. O sistema de disparo dos tiristores é incorporado de uma maneira simplificada ao comportamento do conversor estático.

Para se estudar as ondulações e pulsações provocadas na carga (enrolamento de campo da máquina) pelo conversor estático, pode-se aplicar o **modelo do tipo bornes** (Figura 8.3). Neste modelo, a forma de onda da tensão de saída do conversor é composta por uma série de trechos de senoide. Estes trechos são, na verdade, recortes das tensões de entrada do conversor de potência selecionados em função de



quais tiristores estão conduzindo em cada instante. Neste caso, como no modelo do tipo montagem, é necessário levar em consideração o funcionamento do dispositivo de disparo dos tiristores.

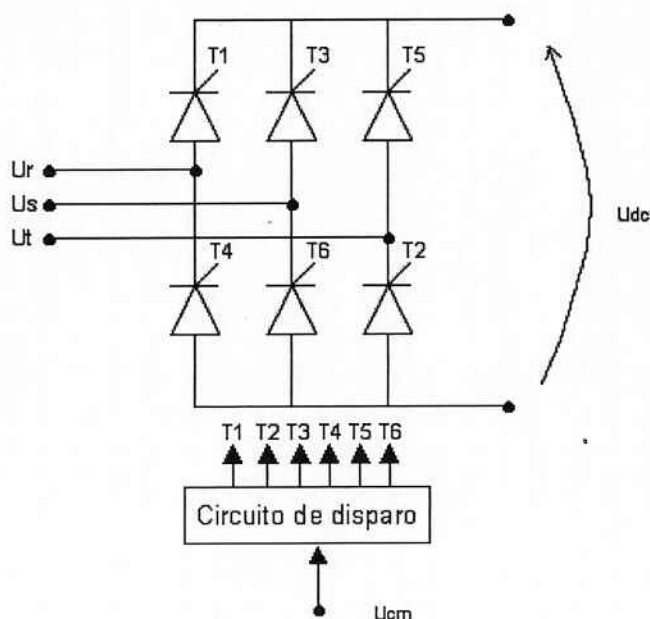


Figura 8.1: Modelo do tipo SPICE

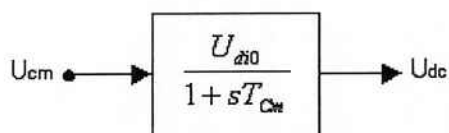


Figura 8.2: Modelo do tipo pseudocontínuo

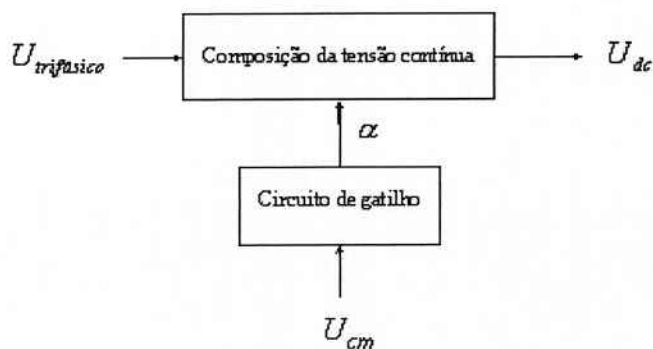


Figura 8.3: Modelo do tipo bornes



## **8-2- APROXIMAÇÕES FEITAS PELO MODELO DO TIPO PSEUDOCONTÍNUO**

Convém apresentar as justificativas para as aproximações feitas pelo modelo do tipo pseudocontínuo. Tais aproximações limitam a aplicação deste tipo de modelo para conversores estáticos.

### **8-2-a- Tensões de Entrada do Conversor**

O modelo do tipo pseudocontínuo desconsidera possíveis variações na amplitude e frequência das tensões de entrada do conversor estático, a saída  $U_{dc}$  depende apenas da tensão de comando  $U_{cm}$ . Para o caso dos sistemas de excitação analisados neste projeto de formatura, a tensão de entrada do conversor estático depende diretamente da tensão nos terminais do gerador. Portanto este modelo produz resultados satisfatórios somente para os casos nos quais a tensão terminal do gerador permanece em valor próximos a 1pu.

### **8-2-b- Tratamento de Pequenos Tempos Mortos**

A função de transferência de um conversor de corrente com os seus dispositivos de disparo pode ser tratada sob a forma de um tempo morto [4]:

$$G_s(s) = K_b e^{-sT_h}$$

*Equação 8.1*

Quando o tempo morto é muito pequeno em comparação com as constantes de tempo dominantes do sistema, pode-se substituí-lo por uma pequena constante de tempo (Equação 8.2). Este é uma das aproximações feitas pelo modelo do tipo pseudocontínuo de uma ponte trifásica de tiristores.

$$e^{-sT_h} = \frac{1}{e^{sT_h}} \cong \frac{1}{1 + sT_h}$$

*Equação 8.2*

Tal aproximação não é necessária quando se utiliza o modelo do tipo bornes, pois este incorpora o funcionamento do circuito de disparo dos tiristores.



### 8-3- DETALHAMENTO DO MODELO DO TIPO BORNES

A tensão de saída,  $U_{dc}$ , do modelo do tipo bornes é uma composição de setores de senoides selecionados do trifásico de entrada da ponte de tiristores. A escolha dos trechos de senoide é baseada nos sinais vindos do circuito de disparo dos tiristores.

#### 8-3-a- Composição da Tensão nos Bornes do Modelo

Para se obter a tensão de saída da ponte de tiristores (Figura 8.4), consideram-se dois grupos de comutação:

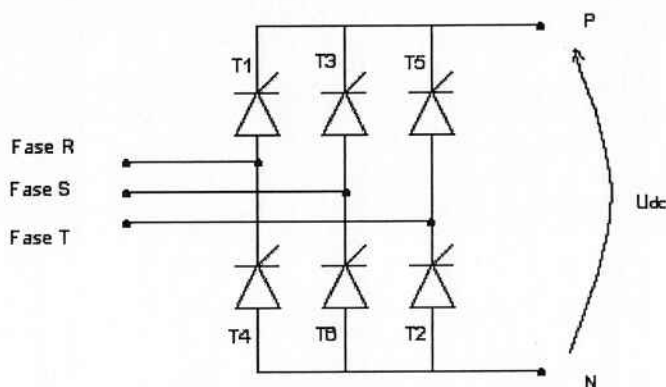


Figura 8.4: Ponte de tiristores

O grupo de tiristores superior, formado por T1, T3 e T5, produz uma tensão parcial **P** que tem valor médio essencialmente positivo, tomando-se como princípio que o conversor de potência opera a maior parte do tempo como retificador.

O grupo de tiristores inferior, formado por T2, T4 e T6 gera a tensão parcial **N**, que tem valor médio essencialmente negativo (a ponte opera normalmente como um retificador).

Enfim, a tensão contínua  $U_{dc}$  é composta pelas tensões parciais **P** e **N**. As Figura 8.5 e 8.6 mostram as tensões **P** e **N** e a tensão  $U_{dc}$ .

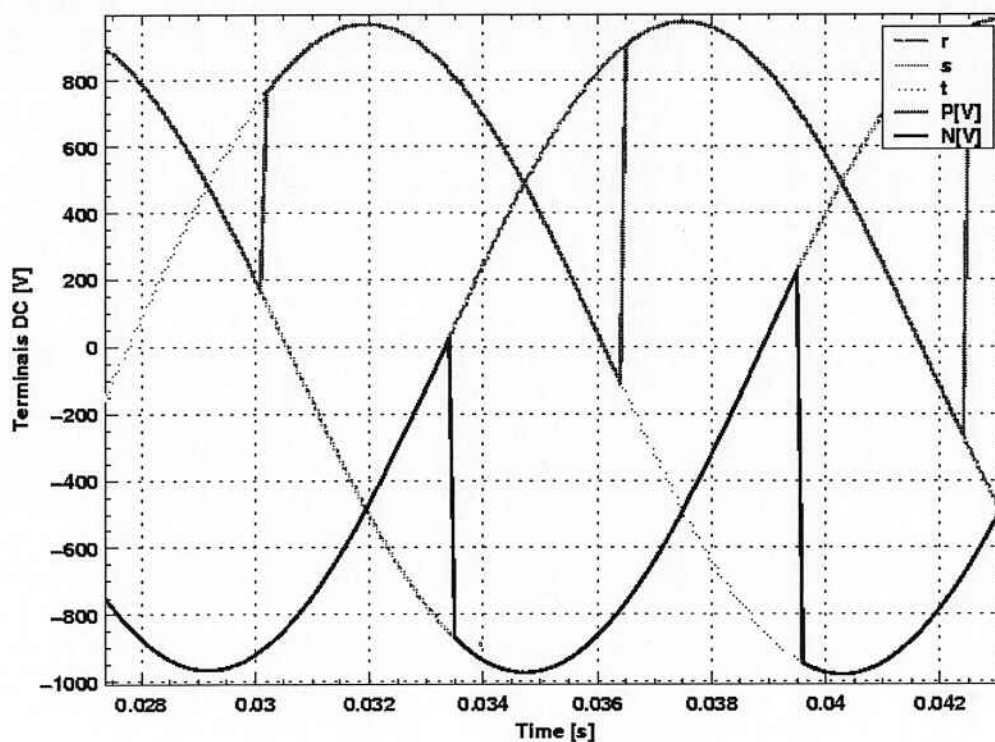


Figura 8.5: Terminais positivo e negativo da ponte de tiristores

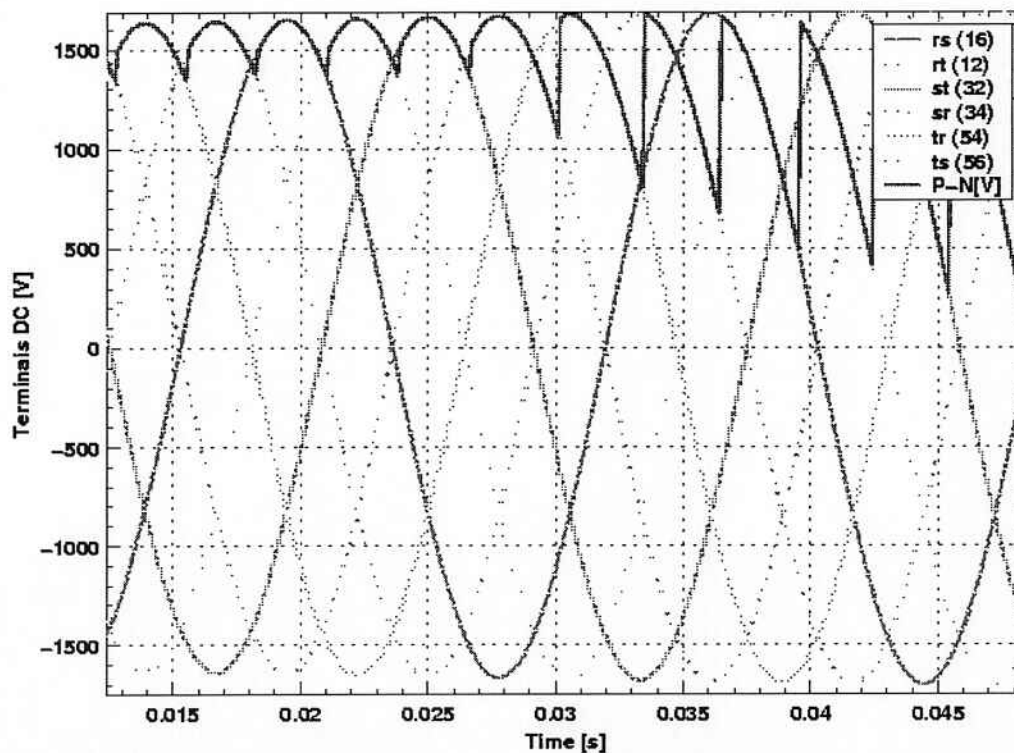


Figura 8.6: Tensão contínua na saída da ponte de tiristores





#### 8-4- COMPARAÇÃO DO MODELO DO TIPO BORNES E DO TIPO PSEUDOCONTÍNUO

A Figura 8.7 compara o comportamento dos dois modelos de conversores. A tensão de saída do modelo do tipo bornes,  $U_{dc(detalhado)}$ , é composta por uma série de recortes de senoide, ela oscila acompanhando as tensões de linha da entrada do conversor estático. Já a tensão de saída do modelo do tipo pseudocontínuo,  $U_{dc(pseudocontínuo)}$ , é o valor médio da tensão de saída do modelo do tipo bornes.

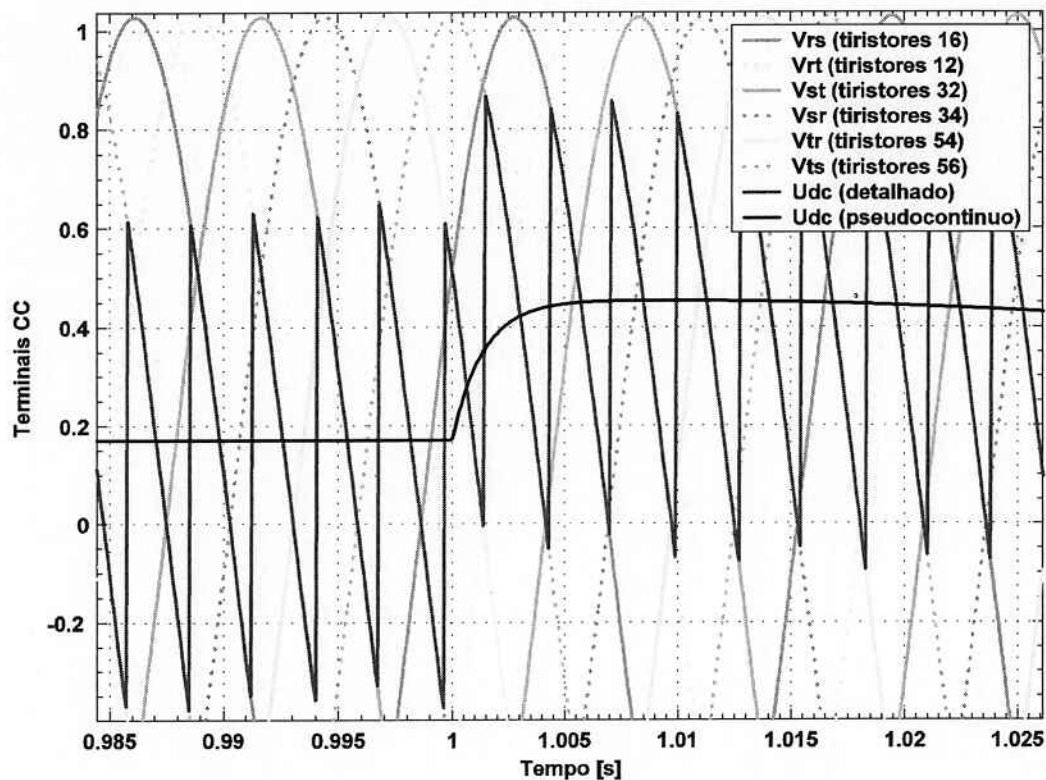


Figura 8.7: Comparação do modelo do tipo bornes e pseudocontínuo



## 9- MODELAGEM DOS TRANSDUTORES DE TENSÃO E CORRENTE

São apresentadas agora as considerações feitas para a modelagem do transdutor de tensão terminal do gerador e para a modelagem do transdutor de corrente de campo do gerador.

### 9-1- O TRANSDUTOR DE TENSÃO TERMINAL DO GERADOR

O transdutor de tensão terminal do gerador modelado neste projeto de formatura se compõe de transformadores de potencial que alimentam um retificador trifásico de onda completa não controlado. A tensão de saída da ponte retificadora é filtrada resultando um sinal que reflete a tensão terminal do gerador (Figura 9.1) [5].

Um filtro de segunda ordem composto pela associação em série de dois filtros de primeira ordem, com constantes de tempo de 4ms, conectado à saída da ponte trifásica de diodos, foi utilizado nesta modelagem.

As constantes de tempo introduzidas por este filtro representam não apenas os filtros reais de um transdutor de tensão mas também os atrasos inerentes aos processos de digitalização destes sinais (os sistemas de excitação atuais utilizam dispositivos microprocessados)

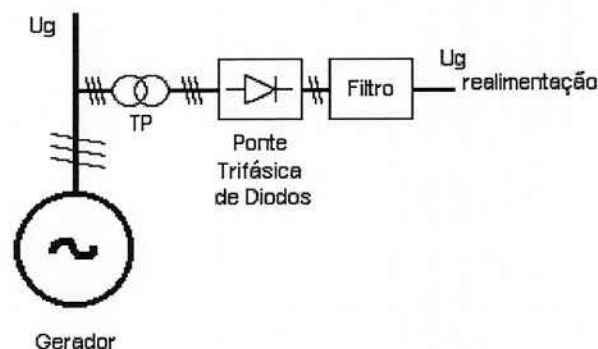


Figura 9.1: Transdutor de tensão terminal





A Figura 9.2 apresenta o modelo do transdutor de tensão terminal do gerador utilizado para as simulações dos sistemas com controle direto e cascata feitas com a ferramenta computacional MatLab.

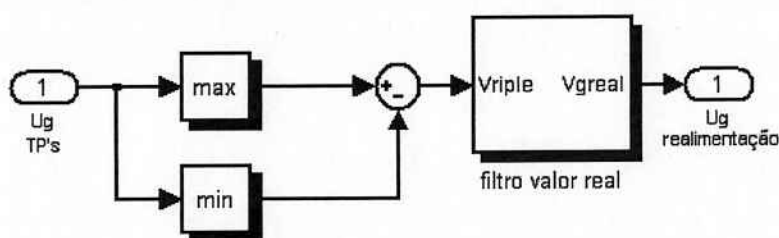


Figura 9.2: Modelo do transdutor de tensão utilizado nas simulações

## 9-2- O TRANSDUTOR DE CORRENTE DE CAMPO

O transdutor de corrente de campo (Figura 9.3) é composto por uma resistência conectada em série com o enrolamento de campo do gerador. A tensão entre os terminais desta resistência é proporcional à corrente de excitação do gerador.

O sinal proveniente deste transdutor deve, no entanto, ser tratado e digitalizado. Por esta razão, para modelar o circuito de medição de corrente de campo, foram utilizados os mesmos filtros que os da medição de tensão terminal do gerador.

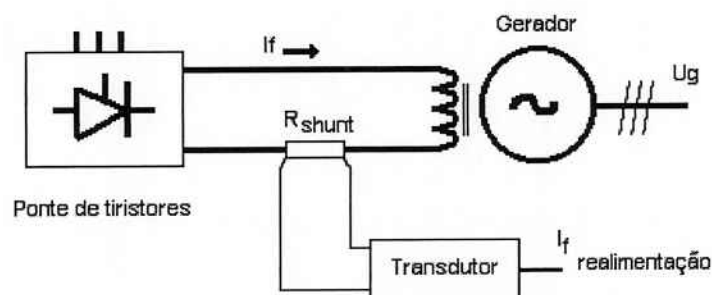


Figura 9.3: Transdutor de corrente de campo



## 10- MODELAGEM DO GERADOR EM VAZIO

Diversos testes são feitos antes de se conectar a máquina à rede durante o comissionamento de um hidrogerador e do seu sistema de excitação. A parametrização dos reguladores proporcional e integral dos modos manual e automático de operação de um regulador de tensão é primeiramente feita apenas com o gerador em vazio. O gerador somente será conectado à rede após a realização criteriosa de tais ajustes. Como resultados desta parametrização são apresentadas em relatórios de comissionamento as oscilografias da resposta a diferentes degraus na referência de tensão do gerador. Este projeto de formatura baseia a comparação das duas filosofias de controle de tensão de hidrogeradores principalmente no comportamento da tensão do gerador em vazio frente ao degrau na referência de tensão.

A modelagem do gerador em vazio partiu da folha de dados da excitação do projeto do gerador do Aproveitamento Hidrelétrico de Corumbá IV. As Tabelas 10.1 e 10.2 contêm alguns dados calculados para o gerador, sem considerar as devidas margens de segurança

Tabela 10.1: Dados da gerador

V	A	kVA	cos $\phi$	rpm	Hz
13800	2845	68000	0.95	200	60
$X_{d_{uns}}$	$X_{base}$	$R_f (20^\circ C)$	$R_f (130^\circ C)$	$L_f (75^\circ C)$	$T'_{do}$
1.05 pu	$2.801 \Omega$	$0.113 \Omega$	$0.161 \Omega$	0.65H	4.73s

Tabela 10.2: Dados da excitação do gerador

Condição	$U_n \%$	$I_n \%$	$U_f (V)$	$I_f (A)$
Linha do entreferro	100	0	83	608
Vazio	100	0	95	695
Carga nominal	100	100	183	1133

Modelou-se o enrolamento de campo do gerador por um circuito RL linear com resistência e indutância constantes. Entretanto, deve-se levar em conta que a resistência de campo varia em função da temperatura do enrolamento rotórico. Tomando-se os dados da excitação do gerador tem-se o seguinte valor da resistência do enrolamento de campo para o gerador em vazio:

$$R_{f_{vazio}} = \frac{95V}{695A} = 0.1397\Omega$$

Equação 10.1



A resistência de campo para o gerador operando em carga nominal é obtida através dos dados da Tabela 10.1 ( $R_f$  a  $130^\circ\text{C}$  é igual a  $0,161\Omega$ ) e também através da Equação 10.2:

$$R_{f_{\text{carga}}} = \frac{183V}{1133A} = 0.1615\Omega$$

Equação 10.2

Para o modelo do gerador em vazio, assumiu-se um valor fixo de  $0.15\Omega$  para a resistência de campo do gerador, este valor permanece entre  $R_{f_{\text{vazio}}}$  e  $R_{f_{\text{carga}}}$ . Optou-se por manter no modelo a constante de tempo  $T'_{do}$  com o mesmo valor apresentado na folha de dados da excitação do gerador. Portanto tem-se:

$$R_{f_{\text{modelo}}} = 0.15\Omega$$

Equação 10.3

$$T'_{do} = \frac{L_f}{R_f} = 4.73s$$

Equação 10.4

O efeito dos enrolamentos amortecedores foi modelado por uma função de transferência de primeira ordem com uma constante de tempo de 20ms. Esta simplificação simula apenas um atraso entre a corrente de campo e a tensão terminal, mas não considera os efeitos dos enrolamentos amortecedores sobre o enrolamento de campo. A Figura 10.1 apresenta a representação feita pela ferramenta computacional MatLab do modelo simplificado do gerador em vazio utilizado para os ajustes dos reguladores PI do Controle Direto e Cascata adaptado de [5].

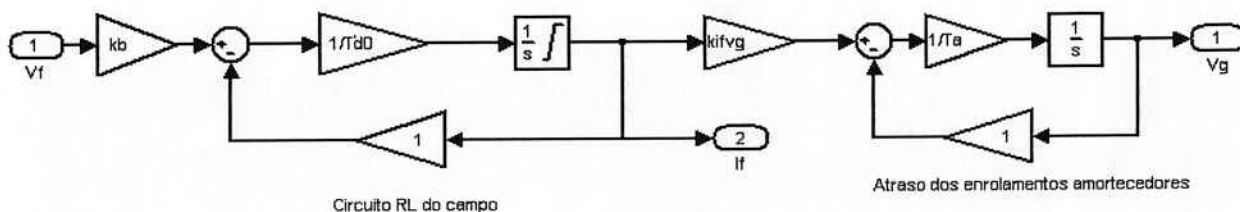


Figura 10.1: Modelo do gerador em vazio utilizado para os ajustes das malhas de controle



A Figura 10.2 apresenta a representação computacional MatLab do modelo detalhado do gerador em vazio. Tal modelo foi utilizado para a comparação entre as filosofias de controle.

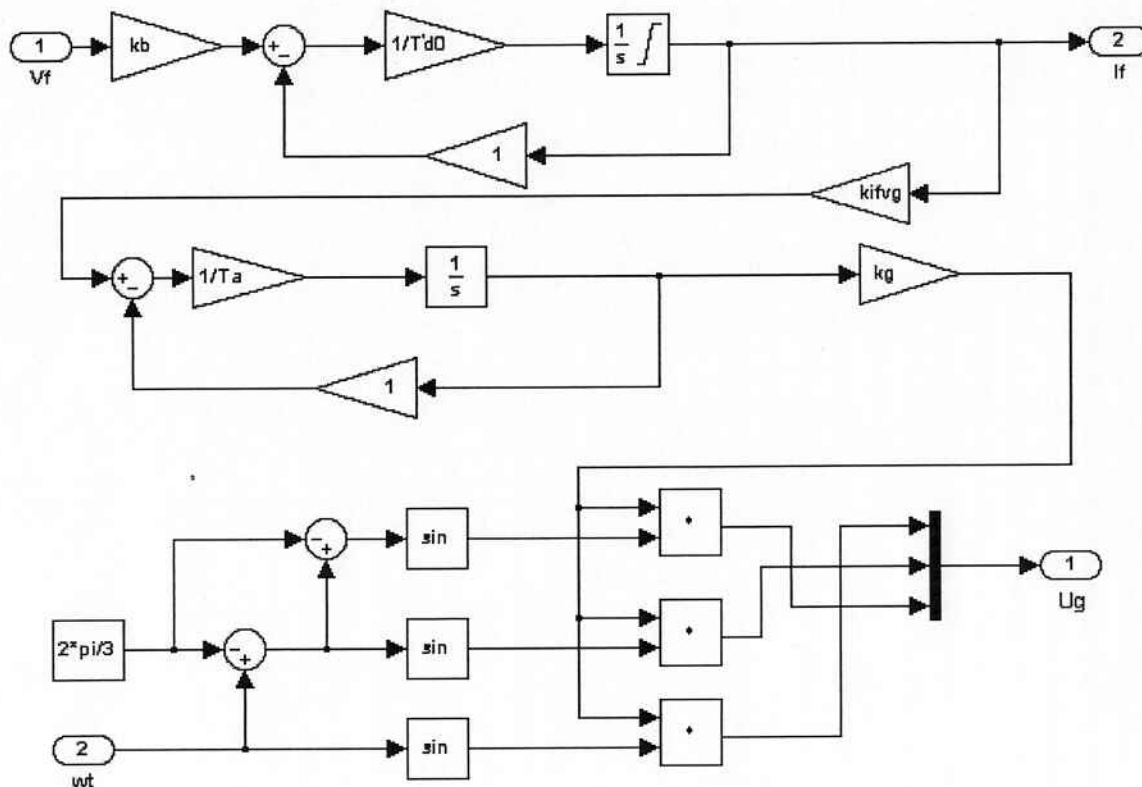


Figura 10.2: Representação do modelo simplificado do gerador em vazio

A Tabela 10.3 apresenta os parâmetros do modelo do gerador em vazio, suas denominações e os respectivos valores adotados.

Tabela 10.3: Denominação das constantes utilizadas no modelo do gerador

Denominação		Valor Utilizado
$K_b$	Relação entre $U_{teto}$ e $U_{fnom}$	3,3486
$T'_{do}$	Constante de tempo do enrolamento de campo com o gerador em vazio	4,73s
$K_{ifvg}$	Ganho entre corrente de campo e tensão terminal do gerador	1,7270
$T_a$	Constante de tempo dos enrolamentos amortecedores	20ms
$K_g$	Constante de normalização da amplitude da tensão do gerador	0.6046



## 11- PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

A Tabela 3 de [3] estabelece que “A tensão de campo deve ser mantida em valor superior à tensão de campo à carga nominal, durante defeitos do lado de alta tensão do trafo (sic) elevador, supondo-se que a tensão terminal tenha sido reduzida a 35% da tensão nominal” (Figura 11.1), de tal exigência obtém-se a Equação 11.1. A Tabela 2 de [3] exige que a tensão de teto positiva não deve ser inferior a 5pu, considerando-se que 1pu de tensão de campo corresponde à tensão nominal na linha do entreferro (Equação 11.2).

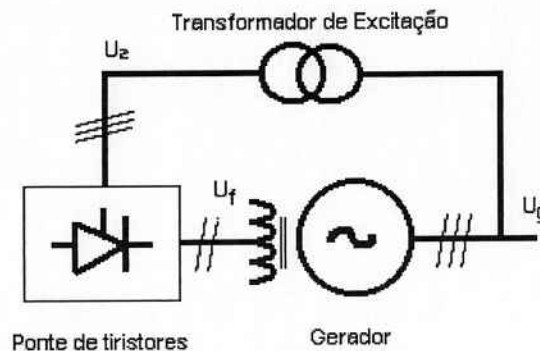


Figura 11.1:  $U_f$  nominal mesmo se  $U_g$  cair para 0,35pu

$$U_{teto} \geq 5 pu = 5 * 83V = 415V$$

Equação 11.1: Exigência da Tabela 3 de [3]

$$U_{teto} \geq \frac{U_{fn}}{0,35} = 523V$$

Equação 11.2: Exigência da Tabela 2 de [3]

Determina-se a tensão no secundário do transformador de excitação ( $U_2$ ) de maneira que a tensão de teto resultante (Equação 11.3) satisfaça as Equações 11.1 e 11.2.

$$U_{teto} = 1,35.U_2.\cos \alpha_{\min}$$

Equação 11.3



O valor adotado para  $U_2$  foi de 440V. Portanto o transformador de excitação terá a relação de transformação de 13,8kV para 440V. Assim, da Equação 11.3, considerando o ângulo de disparo mínimo ( $\alpha_{\min}$ ) igual a  $0^\circ$ , obtém-se a tensão de teto do sistema de excitação igual a 594V, o que satisfaz as exigências das Equações 11.1 e 11.2.

Os anexos I e II apresentam duas filosofias diferentes de pré-dimensionamento do mesmo sistema de excitação nas quais foi baseado o pré-dimensionamento realizado neste projeto de formatura.

## 12- BASES PARA AS SIMULAÇÕES

Convém agora definir quais serão as bases para a realização das simulações computacionais.

Tabela 12.1: Bases para realização das simulações

Grandeza real	Base		Valor correspondente a 1pu	Comentários
Tensão do Gerador	$U_g$ nominal	Tensão nominal do gerador	13800V	
Corrente de campo	$I_f$ nominal	Corrente de excitação nominal com o gerador em plena carga	1133A	A corrente de campo nominal com o gerador em vazio é de 0,605pu
Tensão de campo	$U_{\text{teto}}$	Tensão de teto do sistema de excitação	594V	A tensão de campo nominal com o gerador em vazio é de 0,173pu
Tensão de comando do circuito de gatilhamento dos tiristores	$U_c$ máximo	Tensão de comando máxima	1	$U_c=1$ equivale a requisitar $U_{\text{teto}}$ da ponte de tiristores

A opção por tomar  $U_{\text{teto}}$  como base para os valores de tensão de campo facilita a análise do estado de funcionamento da ponte de tiristores no que diz respeito aos limites deste equipamento. Valores próximos a 1pu de tensão de campo denotam a iminente saturação da ponte de tiristores, em outras palavras, denotam que o limite máximo de tensão de campo está para ser atingido.

A corrente de campo nominal com o gerador em carga foi escolhida como base para as simulações pois esta é associada diretamente às limitações térmicas do enrolamento de campo, ao passo que a corrente de campo nominal em vazio não possui a mesma relação.

As escolhas feitas para as bases da tensão e da corrente e de campo implicam nas seguintes considerações sobre os ganhos apresentados nos modelos da ponte de tiristores e do enrolamento de campo do gerador:





- O ganho entre a tensão de comando da ponte de tiristores e a tensão de campo é obrigatoriamente unitário,  $U_c=1$  corresponde a  $U_{teto}$  no campo do gerador.
- O ganho entre a tensão de campo em pu e a corrente de campo em pu é obrigatoriamente não unitário e maior do que 1. A tensão de campo que gera corrente de campo de 1pu é sempre menor do que  $U_{teto}$ . Tal ganho é igual a relação entre a tensão de teto do sistema de excitação e a tensão de campo nominal com o gerador em carga.

É necessário ajustar os parâmetros dos reguladores PI do Controle Direto e do Controle Cascata antes que este possam ser comparados.

### **13- ESTRATÉGIAS PARA O PRÉ-AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS REGULADORES PI**

Antes de se apresentar as estratégias utilizadas para o pré-ajuste dos controladores PI das duas filosofias de controle, deve-se introduzir uma maneira de se tratar um conjunto de pequenas constantes de tempo presentes em um sistema físico.

#### **13-1- TRATAMENTO DE PEQUENAS CONSTANTES DE TEMPO**

Um sistema possui normalmente uma ou duas constantes de tempo dominantes e uma série de pequenas constantes de tempo. As duas dominantes são geralmente devidas, por exemplo, ao tempo de estabelecimento de campos eletromagnéticos ou à inércia de massas girantes. As constantes de tempo dominantes podem ser compensadas por reguladores PID. As pequenas constantes de tempo são produzidas por filtros, por atrasos inerentes aos atuadores ou por outras causas. Estes pequenos atrasos podem aparecer sob a forma de pequenas constantes de tempo, pequenos atrasos puros (tempos mortos), ou podem ser introduzidos por circuitos de controle auxiliares, no caso deste projeto de formatura, reguladores em cascata.

Em seguida é apresentada uma maneira de tratar estas pequenas constantes de tempo, adaptada de [6]. A função de transferência presente na Equação 13.1 possui uma constante de tempo dominante e uma série de pequenas constantes de tempo. Tais pequenas constantes de tempo podem ser a aproximação de um pequeno tempo morto.



$$G_s(s) = \frac{K}{(1+sT_a)(1+sT_{p1})(1+sT_{p2})(1+sT_{p3})\dots(1+sT_{pn})}$$

Equação 13.1

Pode-se simplificar a função de transferência  $G_s(s)$  desenvolvendo o produto de  $(1+sT_{pn})$ , levando em conta apenas os termos proporcionais a  $s^1$  e desconsiderando os termos proporcionais a  $s^2, s^3 \dots s^n$ . Desta maneira, tem-se:

$$(1+sT_{p1})(1+sT_{p2})(1+sT_{p3})\dots(1+sT_{pn}) \cong 1 + s \sum_{k=1}^n T_{pk}$$

Equação 13.2

Utilizando-se a aproximação  $T_p = \sum_{k=1}^n T_{pk}$  obtém-se a função de transferência aproximada:

$$G_{s_{aproximada}}(s) = \frac{K}{(1+sT_a)(1+sT_p)}$$

Equação 13.3

Passa-se agora a descrição das estratégias de ajuste dos reguladores PI utilizados no Controle Direto e Controle Cascata.

### **13-2- AJUSTE ÓTIMO DE UM REGULADOR PI**

Se um sistema a se controlar possui apenas uma constante de tempo dominante  $T_a$  e uma constante de tempo  $T_p$  pequena em relação à dominante (a pequena constante de tempo pode ser a aproximação de um série de pequenas constantes de tempo):

$$G_s(s) = \frac{K}{(1+sT_a)(1+sT_p)}$$

Equação 13.4

Pode-se utilizar um regulador proporcional e integral com a função de transferência abaixo para realizar a compensação do sistema  $G_s(s)$ :





$$G_R(s) = K_r \frac{1 + sT_n}{sT_n}$$

*Equação 13.5*

A constante de tempo  $T_a$  é compensada com a constante de tempo  $T_n$ . Para um ajuste ótimo, o ganho  $K_r$  deve ser escolhido segundo a Equação 13.6 [6] [7]:

$$K_r = \frac{T_a}{2KT_p}$$

*Equação 13.6*

Observando-se novamente a Equação 13.4, parece lógico utilizar um regulador PID para compensar  $T_n$  e  $T_p$  ao mesmo tempo. Neste caso, a função de transferência em malha aberta resultante teria todas as constantes de tempo compensadas. Na realidade este caso ideal não pode ser alcançado pois existem sempre pequenas constantes de tempo inerentes ao sistema que provocariam oscilações e instabilidades. Não se deve compensar uma pequena constante de tempo através de um regulador. Mais informações sobre este tema podem ser encontradas em [6].

Após o ajuste ótimo do regulador, a função de transferência em malha aberta do sistema toma a seguinte forma:

$$G_o(s) = \frac{K}{2T_p s(1 + sT_p)}$$

*Equação 13.7*

E a função de transferência do sistema em malha fechada:

$$G(s) = \frac{1}{1 + 2T_p s(1 + sT_p)}$$

*Equação 13.8*

Com um ajuste ótimo do regulador PI, o sistema em malha fechada possui um sobressinal na resposta ao degrau de no máximo 4,3% e um tempo de subida igual a  $4,71 \cdot T_p$ . A rapidez da resposta do sistema depende apenas da pequena constante de tempo  $T_p$  [6].

Este ajuste foi utilizado para a sintonia do regulador PI do Controle Direto durante as fases iniciais deste projeto de formatura. Esta estratégia foi de extrema importân-



cia para a obtenção dos primeiros resultados das simulações, para o exame dos modelos do gerador e do sistema de excitação, além de ter permitido a aquisição de experiência com a ferramenta computacional matemática MatLab.

### **13-3- ESTRATÉGIA INICIAL PARA O AJUSTE DOS REGULADORES PI DO CONTROLE CASCATA**

No domínio da eletrônica industrial, faz-se necessário freqüentemente o emprego de reguladores em cascata. A partir de reguladores separados, é realizado o controle de uma ou várias grandezas auxiliares inerentes ao sistema a se regular [4] [6]. No caso deste projeto de formatura, utiliza-se um regulador para se controlar a corrente de campo, que é a grandeza auxiliar, e outro para se controlar a tensão terminal do gerador.

Em geral, as grandezas a serem controladas por reguladores em cascata estão ligadas a fenômenos físicos de natureza diferente. Pode-se citar, por exemplo, o caso de um motor de corrente contínua do qual se controlam velocidade e corrente de armadura. A velocidade está ligada à energia cinética presente no conjunto girante. Enquanto a corrente de armadura tem relação com a energia magnética armazenada pelos enrolamentos do motor. Neste trabalho isto não ocorre, tanto a tensão terminal quanto a corrente de campo estão ligadas ao fluxo magnético no interior da máquina síncrona.

Apresenta-se agora a estratégia inicial para o ajuste dos reguladores PI do Controle Cascata, tal estratégia foi adaptada de [6].

A Figura 13.1 representa um diagrama de blocos com dois reguladores conectados em cascata. O sistema a se regular possui a função de transferência  $G(s)$  que pode ser dividida em duas partes,  $G_1(s)$  e  $G_2(s)$ .

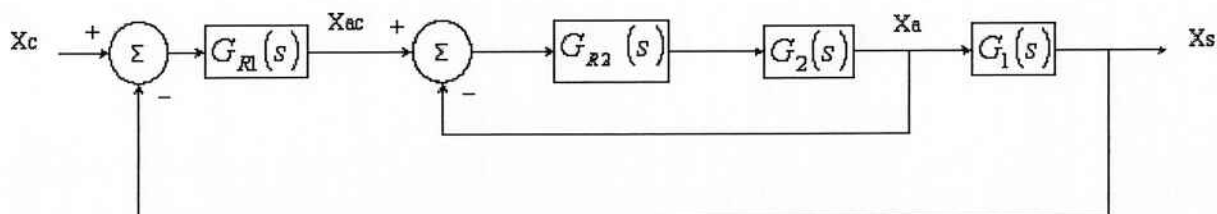


Figura 13.1: Reguladores em cascata



O valor de saída do bloco  $G_2(s)$  é a grandeza auxiliar  $x_a$ , que é comparado com o valor de referência  $x_{ac}$ . A diferença entre estes dois valores é tratada pelo regulador auxiliar caracterizado pela função de transferência  $G_{R2}(s)$ . O valor de referência  $x_{ac}$  é, por sua vez, fornecido pelo regulador principal,  $G_{R1}(s)$ , ao qual é aplicada a diferença entre o valor de referência  $x_c$  e o valor de saída  $x_s$ .

Considerando que o sistema  $G_2(s)$  possui uma série de pequenas constantes de tempo que podem ser agrupadas em uma pequena constante de tempo  $T_p$  e uma constante de tempo dominante, pode-se utilizar para  $G_{R2}(s)$  um regulador PI ajustado de maneira ótima. Obtém-se, então, a Equação 13.9 para a função de transferência da malha interna, da qual foi desconsiderada o termo em  $s^2$ :

$$G'_{aux}(s) = \frac{1}{1 + 2T_p s}$$

Equação 13.9

A malha principal passa a ter então a seguinte função de transferência em malha aberta:

$$G_o(s) = G_{R1}(s) G'_{aux}(s) G_1(s)$$

Equação 13.10

Se o sistema  $G_1(s)$  possui também pequenas constantes de tempo que podem ser modeladas por  $T_{1p}$  e uma constante de tempo dominante, deduz-se que a malha principal  $G_o(s)$  será caracterizada pela pequena constante de tempo equivalente:

$$T_{pequiv} = 2T_p + T_{1p}$$

Equação 13.11

A rapidez da regulação da malha principal será, por consequência, limitada pela pequena constante de tempo equivalente.

Entretanto, no caso deste projeto de formatura, a função de transferência  $G_1(s)$  não apresenta uma constante de tempo dominante. Além disso, o ajuste da malha interna do Controle Cascata através do método de ajuste ótimo demonstrou-se satisfa-



tório apenas para modelos nos quais não há não-linearidades como a saturação. Mais detalhes sobre o método de ajuste utilizado serão dados posteriormente.

## 14- AJUSTE DO CONTROLE DIRETO

Passa-se agora à parametrização do regulador PI do Controle Direto. O ajuste dos parâmetros foi feito com o auxílio de modelos lineares simplificados do sistema de excitação e do gerador pois tais modelos exigem menos tempo de simulação computacional.

O gerador foi modelado por duas funções de transferência de primeira ordem em série. O sinal de saída  $U_g$  do modelo representa o valor eficaz da tensão terminal do gerador, não há um sinal trifásico na saída do modelo de gerador. Por esta razão, apenas foram consideradas as funções de transferência do filtro de segunda ordem do transdutor de tensão, descartou-se a ponte retificadora a diodos deste.

Foi utilizado o modelo do tipo pseudocontínuo para a ponte de tiristores. Portanto, para que os resultados das simulações realizadas com este modelo sejam satisfatórios é necessário que a tensão terminal do gerador se mantenha próxima a 1pu.

A Figura 14.1 apresenta o modelo adaptado de [5] com o qual foi feita a sintonia dos parâmetros do regulador PI do controle direto.

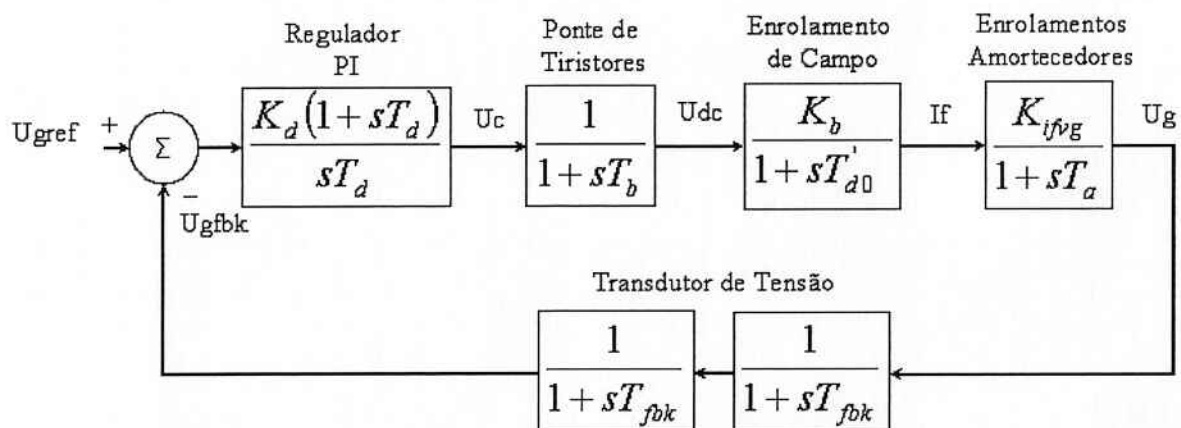


Figura 14.1: Modelo linear do sistema com controle direto



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA – EPUSP

A Tabela 14.1 apresenta as grandezas simuladas com este modelo e suas respectivas denominações:

Tabela 14.1: Grandezas modeladas e suas denominações

Grandezas	
Tensão de referência do gerador	$U_{\text{gref}}$
Tensão de realimentação do gerador	$U_{\text{gfbk}}$
Tensão de controle da ponte de tiristores	$U_c$
Tensão de saída da ponte de tiristores	$U_{\text{dc}}$
Corrente de campo do gerador	$I_f$
Tensão do gerador	$U_g$

A Tabela 14.2 apresenta os dados utilizados na modelagem da ponte de tiristores, do gerador em vazio e dos transdutores.

Tabela 14.2: Dados utilizados na modelagem do sistema com Controle Direto

Parâmetros		Valor
$K_d$	Constante proporcional do PI	a determinar
$T_d$	Constante integrativa do PI	a determinar
$T_b$	Constante de tempo da ponte de tiristores	1.4ms
$K_b$	Relação entre tensão de teto e tensão de campo nominal em carga	3.3486
$T_{do}$	Constante de tempo do enrolamento de campo com o gerador em vazio	4.73s
$K_{ifvg}$	Ganho entre corrente de campo e tensão terminal do gerador	1.7270
$T_a$	Constante de tempo dos enrolamentos amortecedores	20ms
$T_{fbk}$	Constante de tempo dos filtros de primeira ordem dos transdutores	4ms

A escolha da constante de tempo de integração do regulador PI é feita de maneira a se cancelar o pólo dominante referente ao tempo de resposta do enrolamento de campo do gerador [5] [6] [7].

A escolha da constante proporcional do regulador foi feita de maneira a se ter um sobressinal na resposta ao degrau de no máximo 5%. O lugar das raízes da função de transferência em malha fechada do sistema com controle direto está presente na Figura 14.2, o ganho proporcional do controlador PI determinado é  $K_d=14$ .

O ganho proporcional  $K_d=98$  deixa o Controle Direto no limite da estabilidade (Figura 14.3).



# ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA – EPUSP

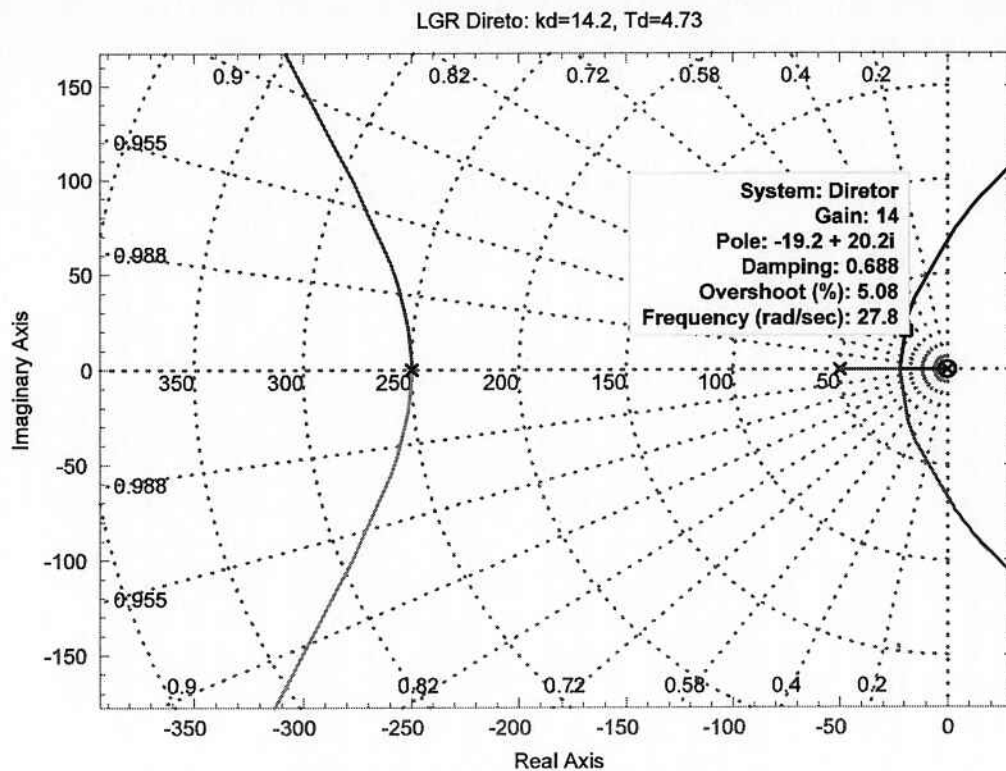


Figura 14.2: LGR do sistema com Controle Direto

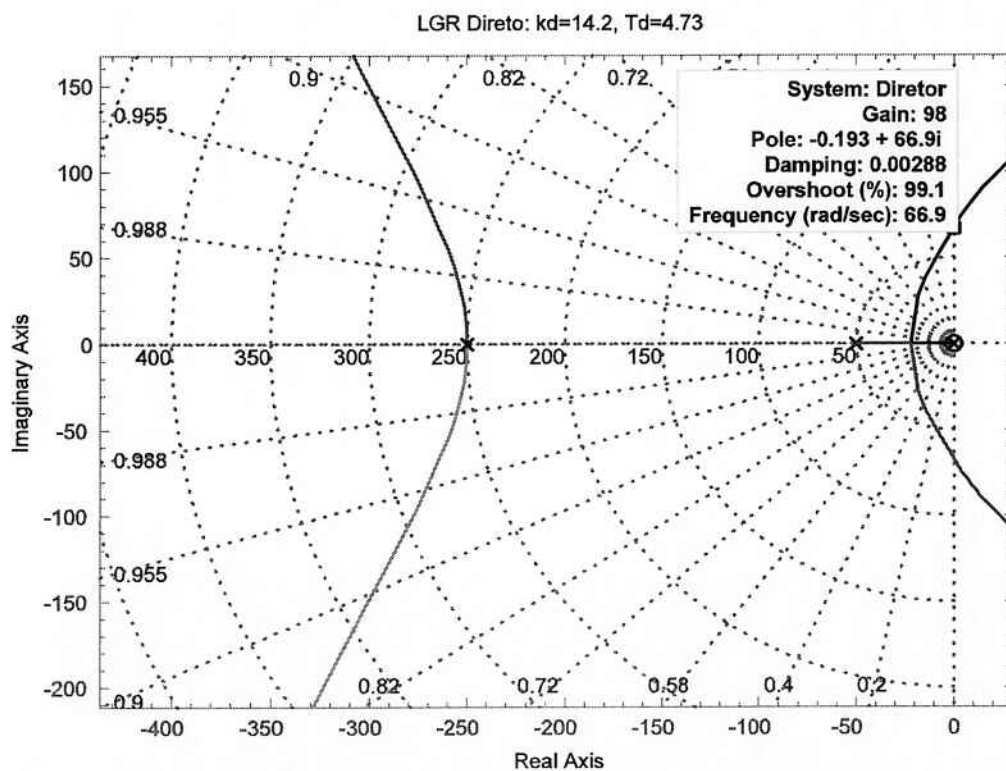


Figura 14.3: LGR do sistema com Controle Direto – Limite de estabilidade





## 15- AJUSTE DO CONTROLE CASCATA

O ajuste dos parâmetros dos reguladores PI do sistema com controle cascata foi realizado com o auxílio de um modelo linear simplificado que exigia menores tempos de simulação computacional.

O gerador foi modelado por dois subsistemas de primeira ordem, um representando o enrolamento de campo e outro representando os enrolamentos amortecedores. Considerou-se apenas os filtros de segunda ordem dos transdutores de tensão e de corrente para a modelagem destes.

O modelo presente na Figura 15.1 foi utilizado para a sintonia dos parâmetros dos reguladores PI do Controle Cascata.

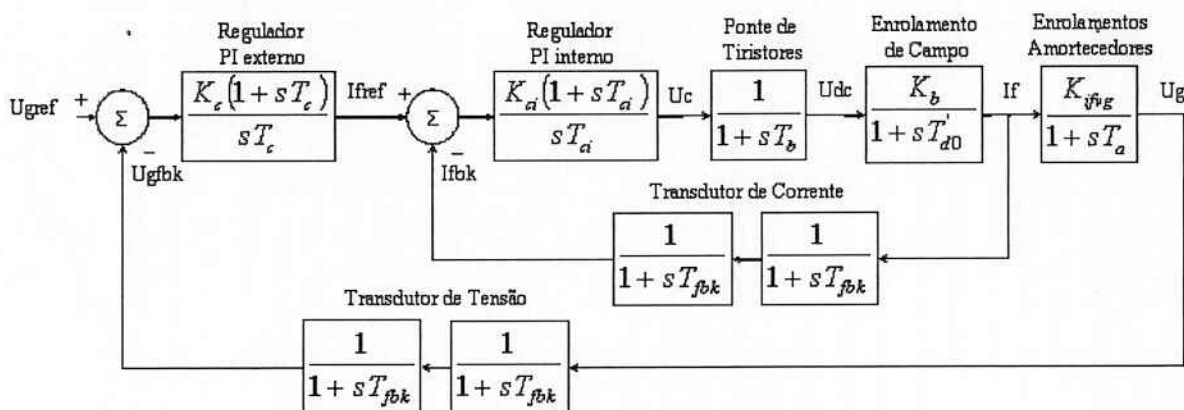


Figura 15.1: Modelo linear do sistema com Controle Cascata

A Tabela 15.1 apresenta os dados utilizados na modelagem da ponte de tiristores, do gerador em vazio e dos transdutores para a filosofia de Controle Cascata.

Tabela 15.1: Dados utilizados na modelagem do sistema com Controle Cascata

Parâmetros		Valor
$K_c$	Constante proporcional do PI externo	a determinar
$T_c$	Constante integrativa do PI externo	a determinar
$K_{ci}$	Constante proporcional do PI interno	a determinar
$T_{ci}$	Constante integrativa do PI interno	a determinar
$T_b$	Constante de tempo da ponte de tiristores	1.4ms
$K_b$	Relação entre tensão de teto e tensão de campo nominal em carga	3.3486
$T'_{do}$	Constante de tempo do enrolamento de campo com o gerador em vazio	4.73s
$K_{ifvg}$	Ganho entre corrente de campo e tensão terminal do gerador	1.7270
$T_a$	Constante de tempo dos enrolamentos amortecedores	20ms
$T_{fbk}$	Constante de tempo dos filtros de primeira ordem dos transdutores	4ms





## 15-1- AJUSTE DA MALHA INTERNA DE CORRENTE – SOBRESSINAL DE 5% NA RESPOSTA AO DEGRAU

A constante de tempo de integração do regulador PI interno foi escolhida de maneira a se cancelar o pólo dominante do sistema.

A escolha da constante de tempo proporcional do PI interno, considerando-se um sobressinal na resposta ao degrau de no máximo 5% não deu bons resultados. O ganho proporcional fica próximo a 80 (Figura 15.2). Erros da ordem de 1% na entrada do PI interno implicam em valores do sinal de controle da ponte de tiristores ( $U_c$ ) próximos a 1, provocando a saturação da ponte de tiristores.

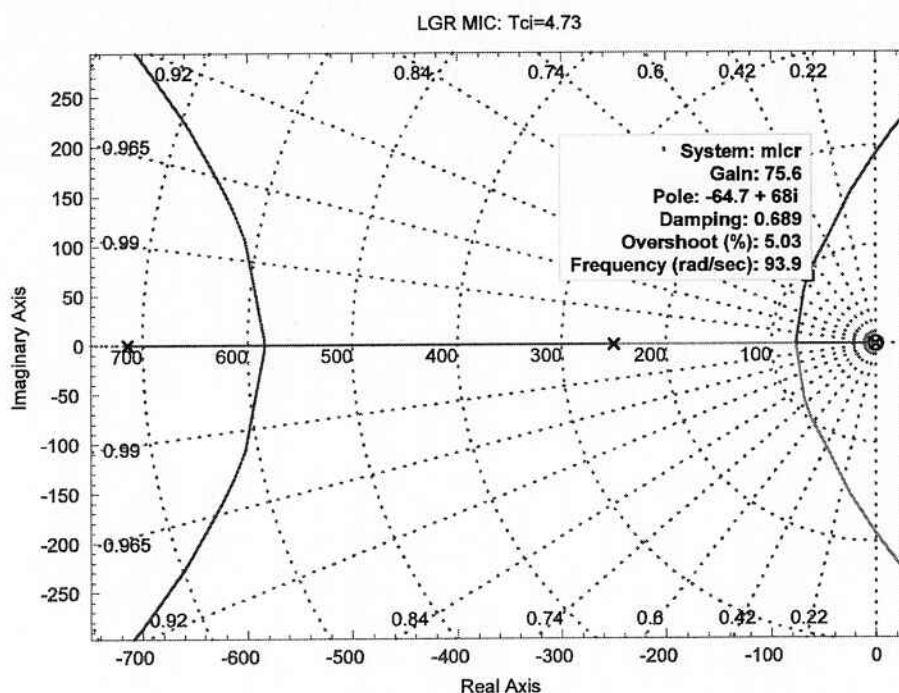


Figura 15.2: LGR da Malha Interna de Corrente do Controle Cascata (sobressinal máximo de 5%)



### **15-2- AJUSTE DA MALHA INTERNA DE CORRENTE – AJUSTE ÓTIMO**

De maneira a se verificar uma outra possibilidade para a sintonia da malha interna de corrente, tenta-se o método de ajuste ótimo de reguladores PI descrito anteriormente. Com a aplicação deste método, obtém-se um sistema que apresenta um sobressinal na resposta ao degrau de 4,73%. Este é um ajuste ligeiramente mais conservador do que o feito anteriormente (sobressinal de 5% na resposta ao degrau).

Primeiramente, tratam-se as pequenas constantes de tempo da malha interna de corrente:

$$(1 + sT_b)(1 + sT_{fbk})(1 + sT_{fbk}) \cong 1 + s(T_b + 2T_{fbk}) = 1 + sT_p = 1 + s0,0094$$

*Equação 15.1*

Obtém-se então a função de transferência em malha aberta da malha interna de corrente  $G_s(s)$ :

$$G_s(s) = K_{ci} \frac{1 + sT_{ci}}{sT_{ci}} \frac{K_b}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT_p)}$$

*Equação 15.2*

Escolhe-se  $T_{ci}$  de maneira a se cancelar o pólo dominante  $T'_{d0}$  e se obtém:

$$G_s(s) = \frac{K_{ci} K_b}{sT_{ci}(1 + sT_p)}$$

*Equação 15.3*

A constante  $K_{ci}$  é obtida da Equação 15.4:

$$K_{ci} = \frac{T_{ci}}{2K_b T_p} = 75.1$$

*Equação 15.4*

Novamente se obtém um valor demasiado alto para a constante  $K_{ci}$ .

### **15-3- AJUSTE DA MALHA INTERNA DE CORRENTE – AMORTECIMENTO CRÍTICO**

De maneira a evitar a saturação indevida da ponte de tiristores, optou-se por um ajuste mais conservador para o PI interno. A sintonia foi feita de modo a se ter um sistema com amortecimento crítico [5], ou seja, o sistema não apresenta sobressinal na resposta ao degrau na referência de corrente. (Figura 15.3).

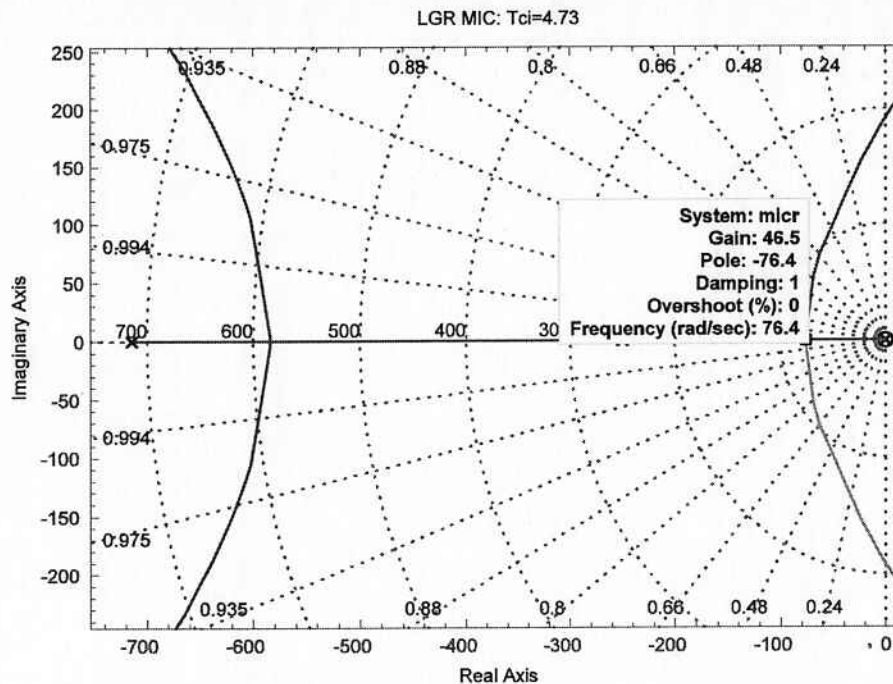


Figura 15.3: LGR da Malha Interna de Corrente do Controle Cascata (criticamente amortecido)

Com este ajuste obtém-se  $K_{ci}=45$ .

A Figura 15.4 mostra a resposta em frequência da malha interna de corrente. A frequência de corte do sistema é de 50 rad/s ou 7,96 Hz.

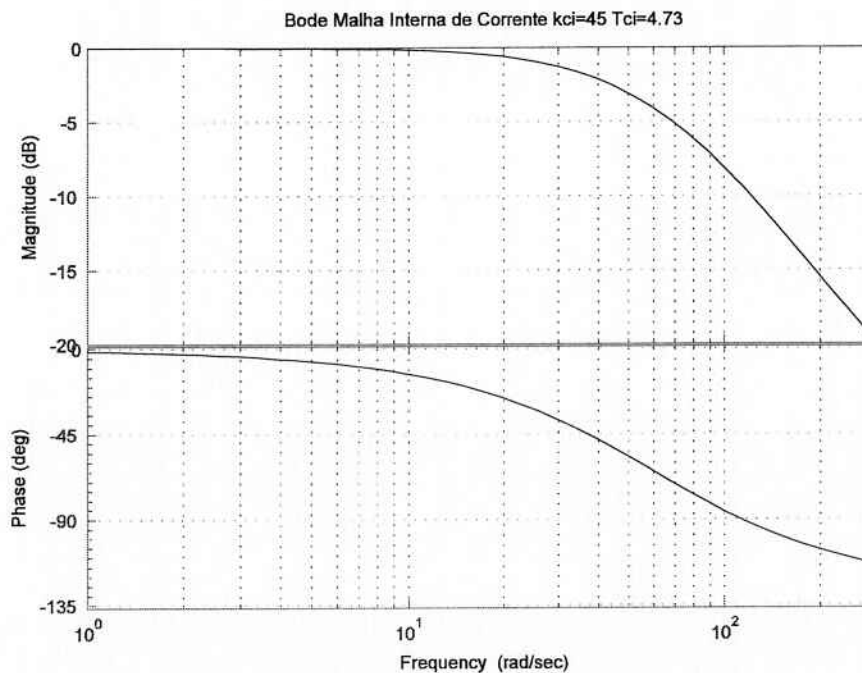


Figura 15.4: Resposta em frequência da Malha Interna de Corrente



**15-4- AJUSTE DA MALHA EXTERNA – SOBRESSINAL MÁXIMO DE 5% NA  
RESPOSTA AO DE GRAU**

A malha interna de controle compensa a constante de tempo dominante, sobrando apenas, neste caso, uma série de pequenas constantes de tempo. Estas pequenas constantes não podem ser totalmente compensadas por reguladores PID [7]. A estratégia adotada foi a de utilizar a constante do integrador externo para compensar, não uma pequena constante de tempo específica, mas a soma de todas estas [6], que é igual a 0,05s.

A constante proporcional do regulador PI externo foi escolhida de maneira a se ter no máximo 5% de sobressinal na resposta do sistema ao degrau, resultando o valor de 0,3 (Figura 15.5).

O valor da constante proporcional do regulador PI externo que levaria o sistema com Controle Cascata ao limite da estabilidade é igual a 2,11 (Figura 15.6). Tal valor é muito menor do que o ganho proporcional que levaria o sistema com Controle Direto ao limite da estabilidade, que é igual a 98 (Figura 14.3). Esta diferença, entre um ganho proporcional de 2,11 ou de 98, denota o cuidado necessário para se realizar a parametrização da malha externa do Controle Cascata.



# ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA – EPUSP

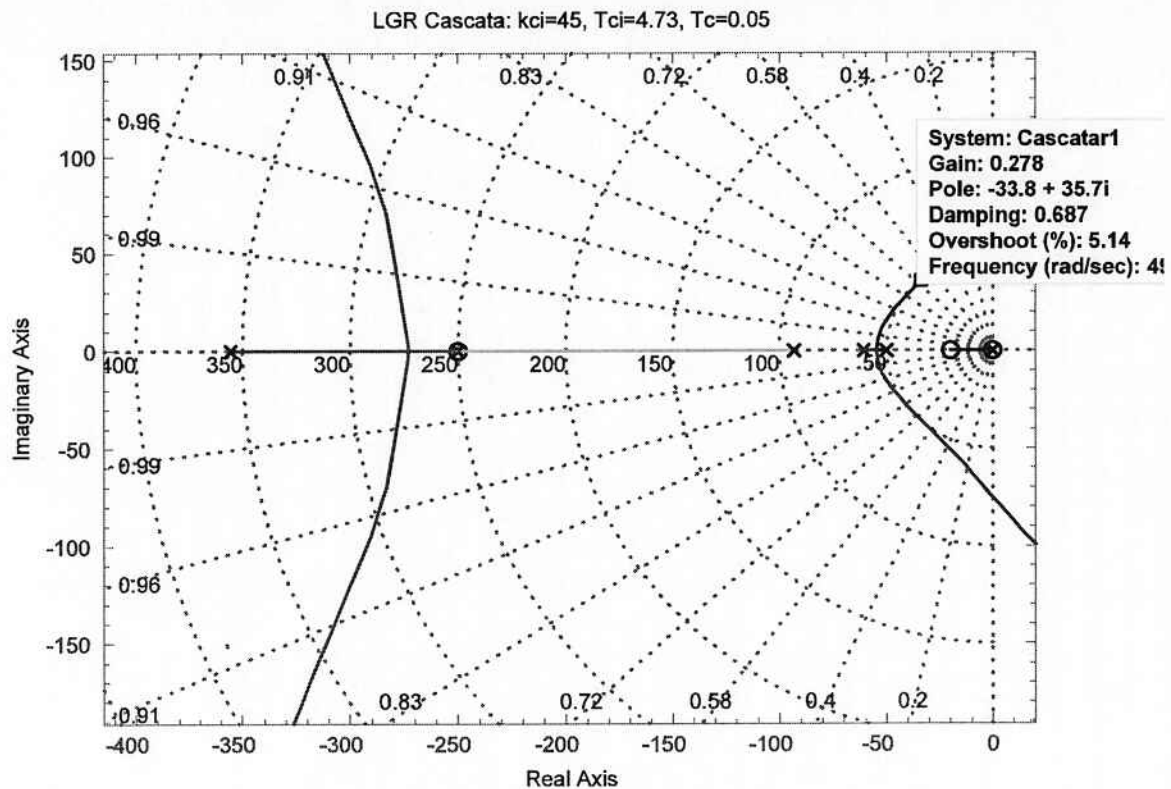


Figura 15.5: LGR do sistema com Controle em Cascata

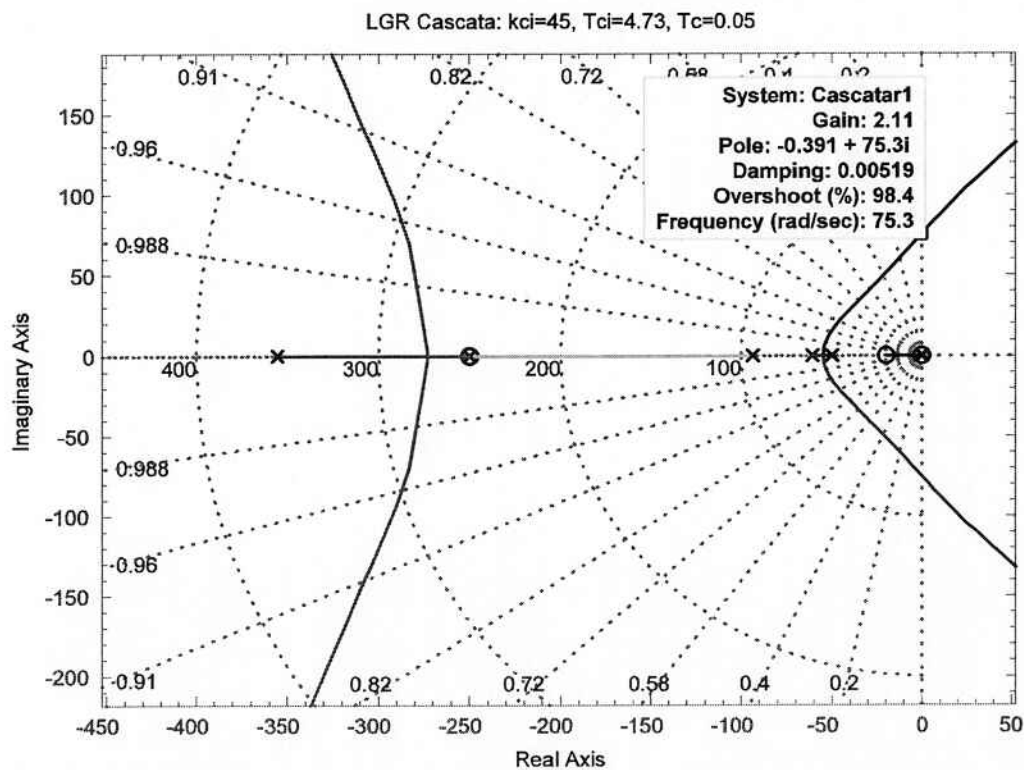


Figura 15.6: LGR do sistema com Controle Cascata – Limite da estabilidade



### 15-5- PRIMEIRO REFINAMENTO DO AJUSTE DO CONTROLE CASCATA

O ajuste do controle cascata obtido anteriormente foi refinado através de simulações no domínio do tempo, variando-se a constante de tempo do integrador do regulador PI externo.

A Figura 15.7 mostra a resposta ao degrau para diferentes constantes do integrador externo ( $T_c$ ). Variou-se  $T_c$  de 0,02s a 0,06s.

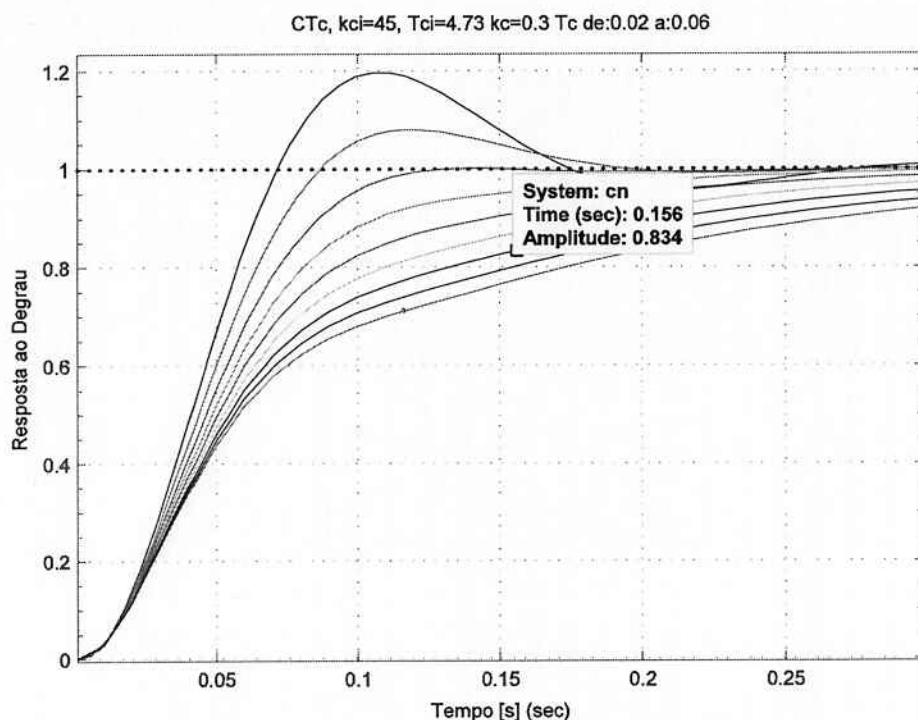


Figura 15.7: Resposta ao degrau do sistema com Controle Cascata

A resposta do sistema com  $T_c=0,03s$  é a terceira por ordem crescente de tempo de subida, não há praticamente sobressinal para este caso. Por esta razão a constante integrativa do PI externo foi modificada para 0,03s. O ponto marcado na figura,  $t=0,156s$  e amplitude=0,834, pertence à resposta ao degrau do sistema com  $T_c=0,05s$ .



A Figura 15.8 compara a resposta em frequência do sistema com Controle Cascata considerando duas constantes integrativas do regulador PI externo,  $T_c=0,03s$  e  $T_c=0,05s$ . O sistema com  $T_c=0,05s$  possui frequência de corte de 16,6rad/s ou 2,6Hz, enquanto o sistema com  $T_c=0,03s$  possui frequência de corte de 41,7rad/s ou 6,6Hz.

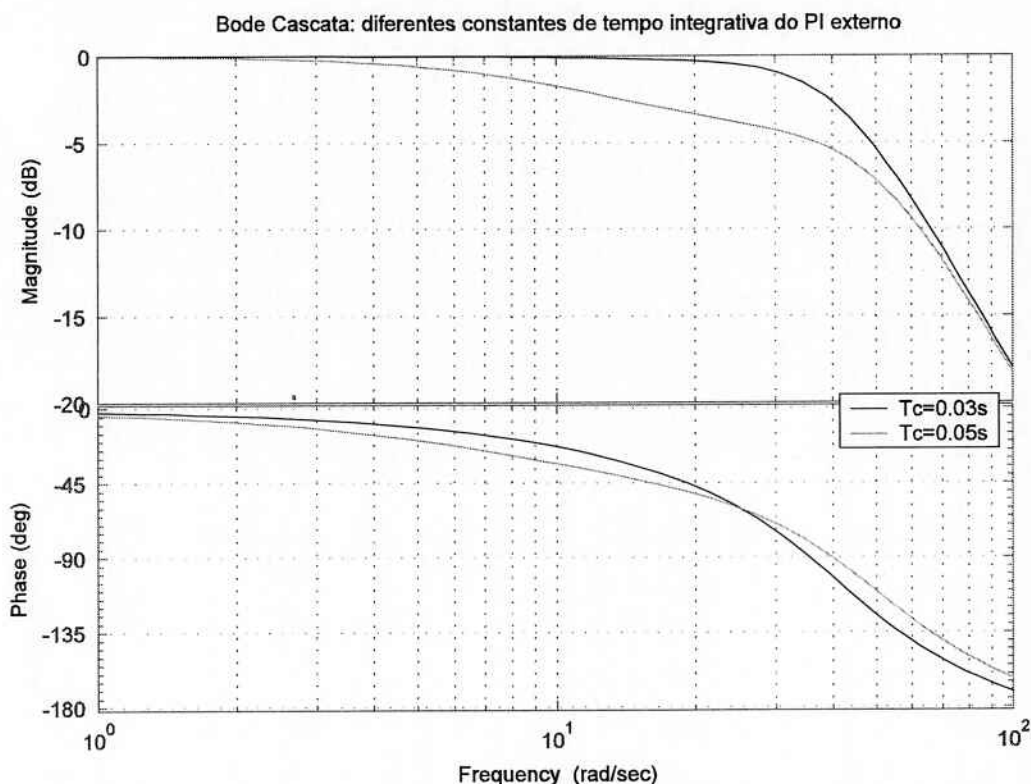


Figura 15.8: Resposta em frequência Controle Cascata com diferentes constantes de tempo integrativas do PI externo





## 16- REFINAMENTO DOS AJUSTES DOS PARÂMETROS DOS PI'S DO CONTROLE DIRETO E CASCATA

Com o intuito de realizar ajustes finos nos parâmetros dos reguladores, os sistemas com controle direto e cascata, modelados linearmente (Figura 14.1 e Figura 15.1), tiveram suas respostas ao degrau na tensão de referência comparadas. As simulações computacionais são mais simples e rápidas para este tipo de modelo. As Tabelas 16.1 e 16.2 apresentam os resultados do refinamento dos parâmetros.

*Tabela 16.1: Parâmetros dos PI's do sistema com Controle Cascata*

<b>Constante proporcional do PI interno (cascata)</b>	$K_{ci}$	45
<b>Constante integrativa do PI interno (cascata)</b>	$T_{ci}$	4,73s
<b>Constante proporcional do PI externo (cascata)</b>	$K_c$	0,39
<b>Constante integrativa do PI externo (cascata)</b>	$T_c$	0,03s

*Tabela 16.2: Parâmetros do PI do sistema com Controle Direto*

<b>Constante proporcional do PI (direto)</b>	$K_d$	14,2
<b>Constante integrativa do PI (direto)</b>	$T_d$	4,73s

A Figura 16.1 mostra que o sistema em cascata responde mais rapidamente com o mesmo sobressinal que o sistema com controle direto, os tempos de subida são respectivamente de 55ms e 75ms.

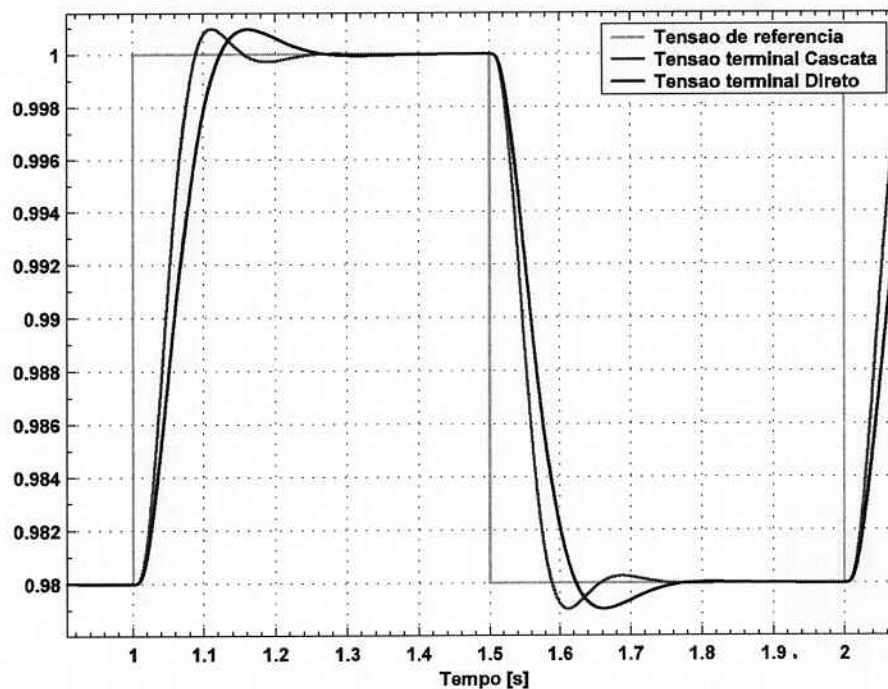


Figura 16.1: Resposta ao degrau de 2% - Tensões terminais

A Figura 16.2 mostra a referência de corrente de campo do sistema com controle em cascata, a corrente de campo do sistema com controle cascata e a corrente de campo do sistema com controle direto (em ordem crescente de tempo de subida).

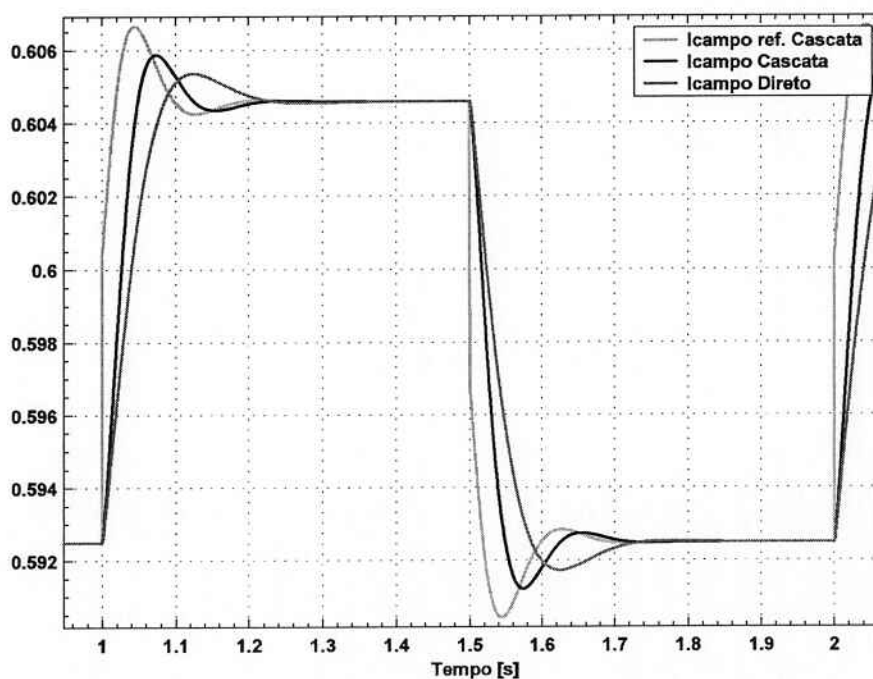


Figura 16.2: Resposta ao degrau de 2% - Correntes de Campo



Pode-se ver que, considerando apenas a modelagem totalmente linear, o sistema com controle em cascata responde mais rapidamente ao degrau na referência de tensão do que o sistema com controle direto.

A Figura 16.3 apresenta as respostas em frequência dos modelos simplificados dos sistemas com controle direto e cascata. O sistema com controle direto possui frequência de corte de 28,8rad/s ou 4,6Hz. O sistema com controle cascata possui frequência de corte de 40,7rad/s ou 6,5Hz.

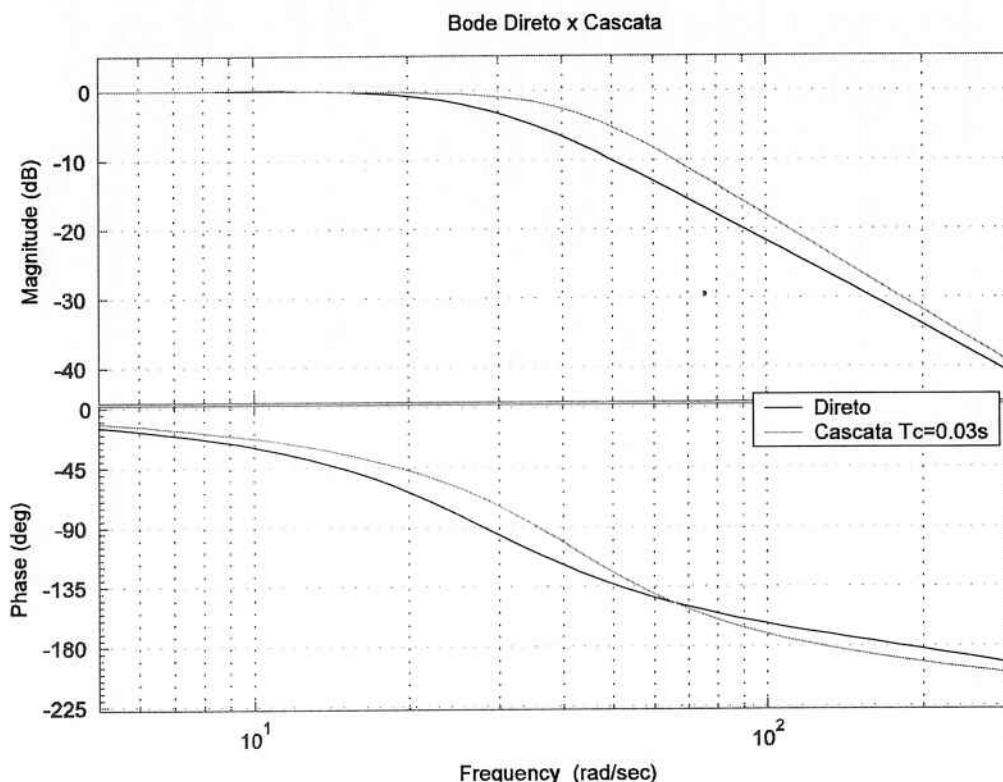


Figura 16.3: Resposta em frequência dos sistemas com Controle Direto e Cascata

Vê-se que o sistema com controle cascata possui maior frequência de corte do que o sistema com controle direto.

Entretanto, comparar as duas filosofias de controle através de simulações no domínio do tempo de modelos totalmente lineares e através da resposta em frequência das funções de transferência linearizadas não é suficiente. É preciso detalhar o modelo da ponte de tiristores, do gerador e do transdutor de tensão terminal para que conclusões possam ser tomadas.



## **17- COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS FILOSOFIAS DE CONTROLE**

As duas filosofias de controle foram comparadas fazendo uso de simulações no domínio do tempo de dois diferentes tipos de modelo:

- Modelo Simplificado: componentes modelados linearmente, sem limitações e saturação, modelo do tipo pseudocontínuo da ponte de tiristores, modelo simplificado do gerador em vazio;
- Modelo Detalhado: componentes com limitações, modelo do tipo bornes da ponte de tiristores, modelo detalhado do gerador em vazio, foi adicionado um ruído branco com amplitude de 0.2% aos sinais de realimentação de tensão e de corrente dos transdutores, representando condições realistas existentes em sistemas de excitação.

Em seguida serão apresentadas as respostas das duas filosofias de controle frente diferentes degraus na referência de tensão.

### **17-1- RESPOSTAS AO DEGRAU DE 2% NA REFERÊNCIA DE TENSÃO TERMINAL**

Pode-se notar a semelhança das respostas ao degrau de 2% na referência de tensão do Controle Direto e do Cascata modelados simplificadamente e detalhadamente quando se comparam as Figuras 16.2 e 17.1.

Da mesma maneira que na Figura 16.2, distinguem-se na Figura 17.1 por ordem crescente de tempo de subida, a referência de corrente de campo do controlador cascata, a correntes de campo dos sistemas com controle cascata e a corrente de campo do sistema com controle direto.

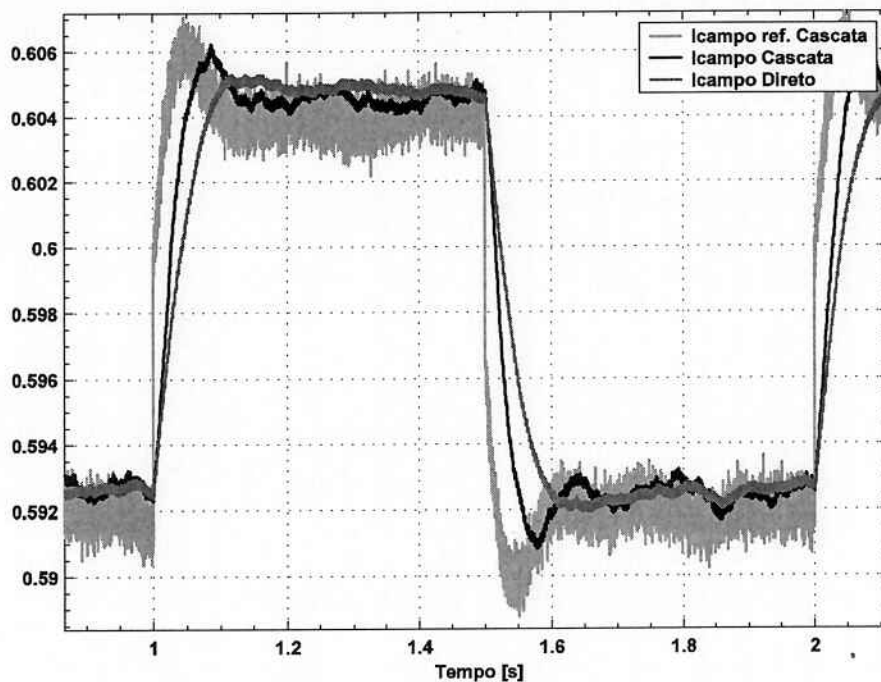


Figura 17.1: Resposta ao degrau de 2% - Correntes de Campo

As diferenças na resposta dinâmica da corrente de campo observadas na Figura 16.1, já não são mais mensuráveis quando se observa a saída dos transdutores de tensão terminal do gerador (Figura 17.2).

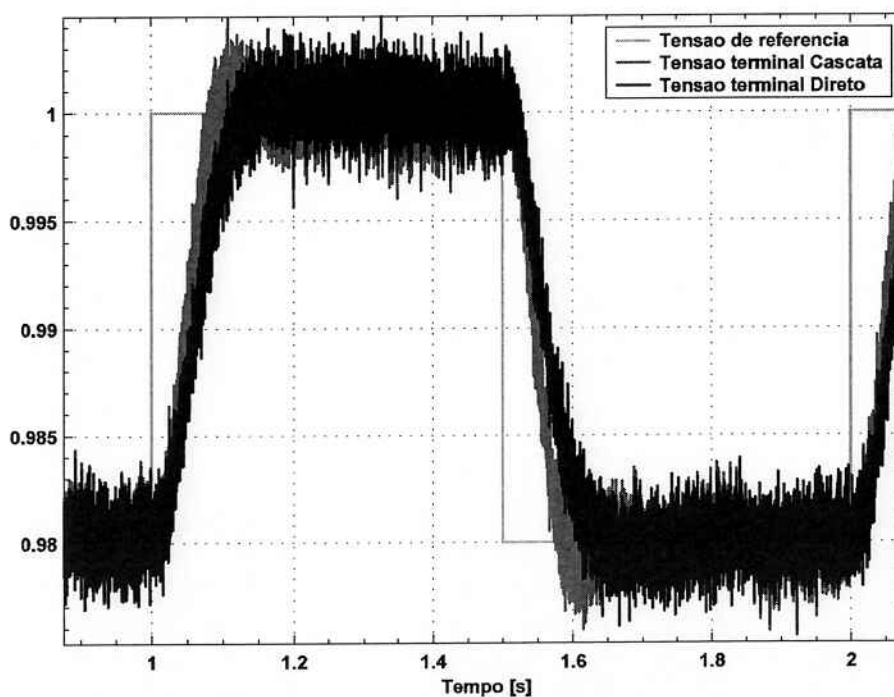


Figura 17.2: Resposta ao degrau de 2% - Tensões Terminais



### **17-2- RESPOSTAS AO DEGRAU DE 5% NA REFERÊNCIA DE TENSÃO TERMINAL**

Com o objetivo de explorar o comportamento das duas estruturas quando submetidas a transitórios que excitam não-linearidades, os sistemas tiveram as suas respostas ao degrau de 5% na referência comparadas.

A Figura 17.3 mostra a resposta ao degrau dos modelos simplificados. Observam-se as mesmas diferenças que já foram observadas na resposta ao degrau de 2%.

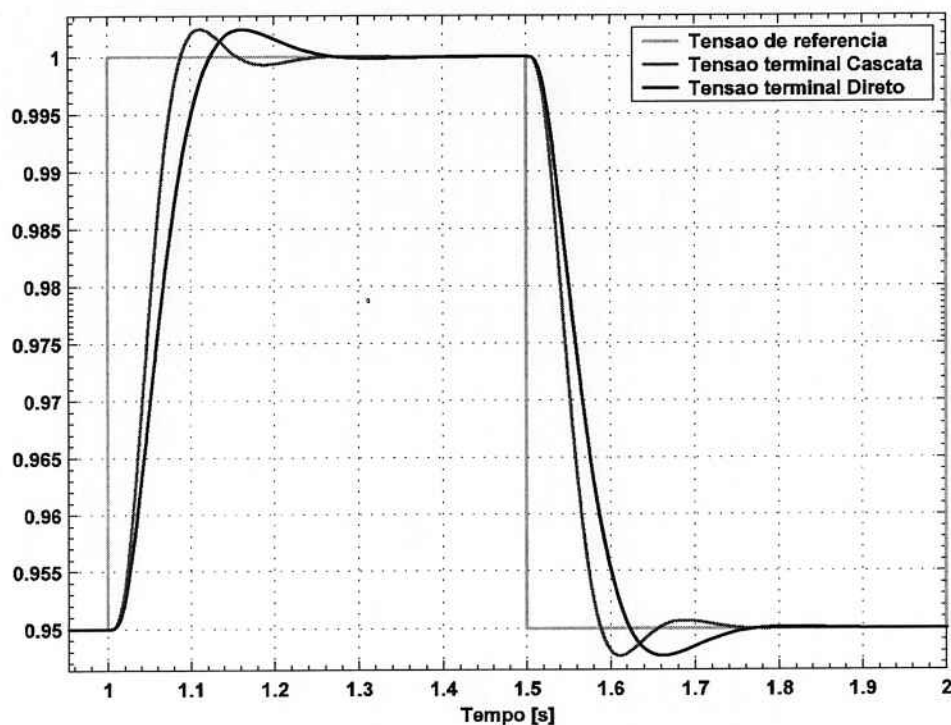


Figura 17.3: Resposta ao degrau de 5% - Modelos simplificados

A Figura 17.4 mostra a resposta do modelo detalhado frente ao degrau. Nota-se que, diferentemente do modelo simplificado, a resposta do Controle Cascata com o modelo detalhado apresenta um sobressinal maior do que o sobressinal apresentado pelo Controle Direto, sendo que as malhas de controle de ambas as estruturas foram parametrizadas para se ter o mesmo sobressinal na resposta ao degrau. Devido a esta diferença, convém analisar com mais detalhes o comportamento dinâmico das duas filosofias de controle.

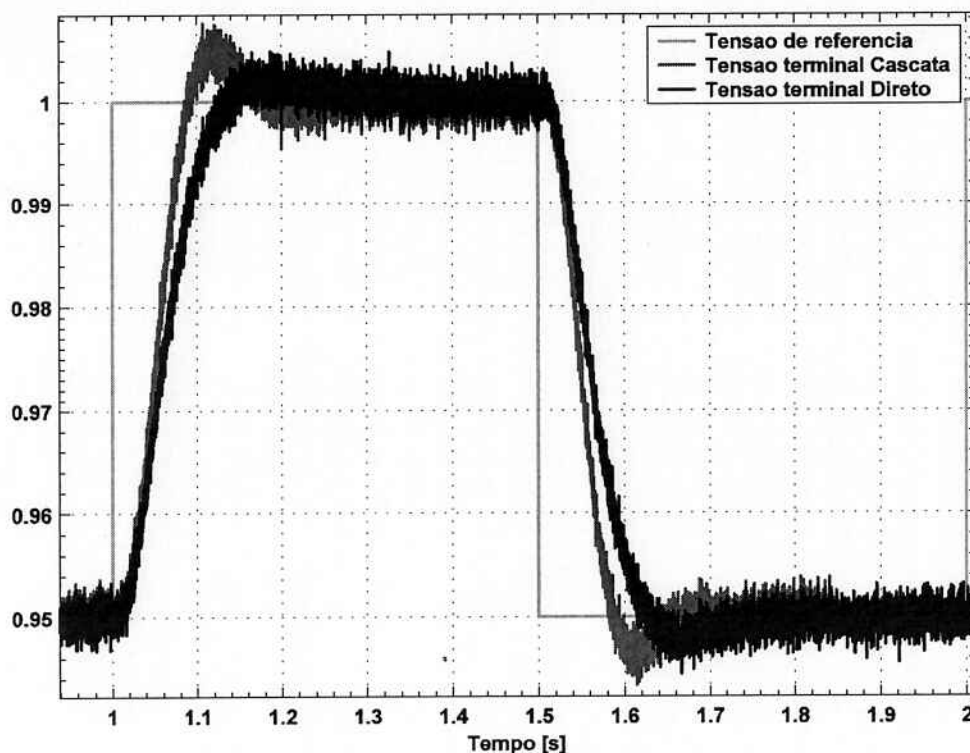


Figura 17.4: Resposta ao degrau de 5% - Modelos detalhados

### 17-2-a- Detalhes do Controle Direto

A Figura 17.5 mostra um detalhe do comportamento da ponte de tiristores próximo ao instante de 1s no qual há o degrau de 5% na referência de tensão terminal do gerador. Vê-se que, tanto no modelo pseudocontínuo como no detalhado, a ponte não forneceu tensão de teto durante o transitório.

Observa-se que para o caso do modelo detalhado do sistema, que utiliza o modelo do tipo bornes para a ponte de tiristores, o ângulo de disparo chega próximo a  $30^\circ$  logo após o degrau na referência de tensão.

Devido a não saturação da ponte de tiristores, as diferenças entre as respostas ao degrau de 5% dos modelos simplificado e detalhado dos sistemas com Controle Direto não foram significativas, como mostra a Figura 17.6.



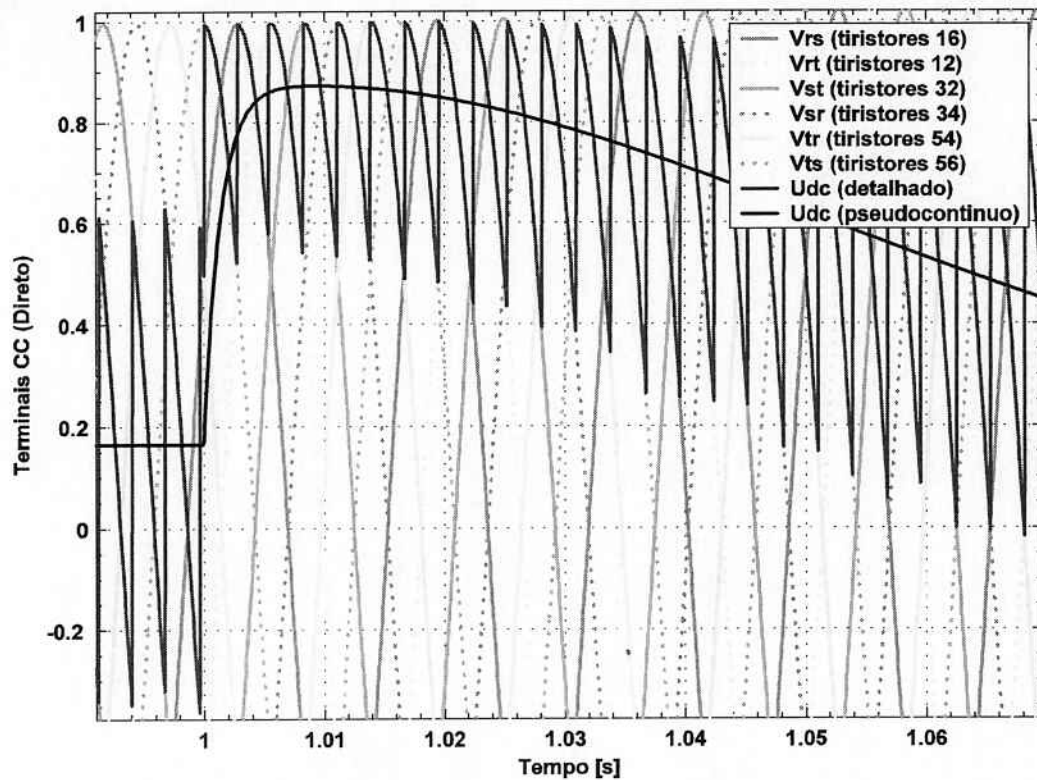


Figura 17.5: Ponte de tiristores – 5% – Controle Direto

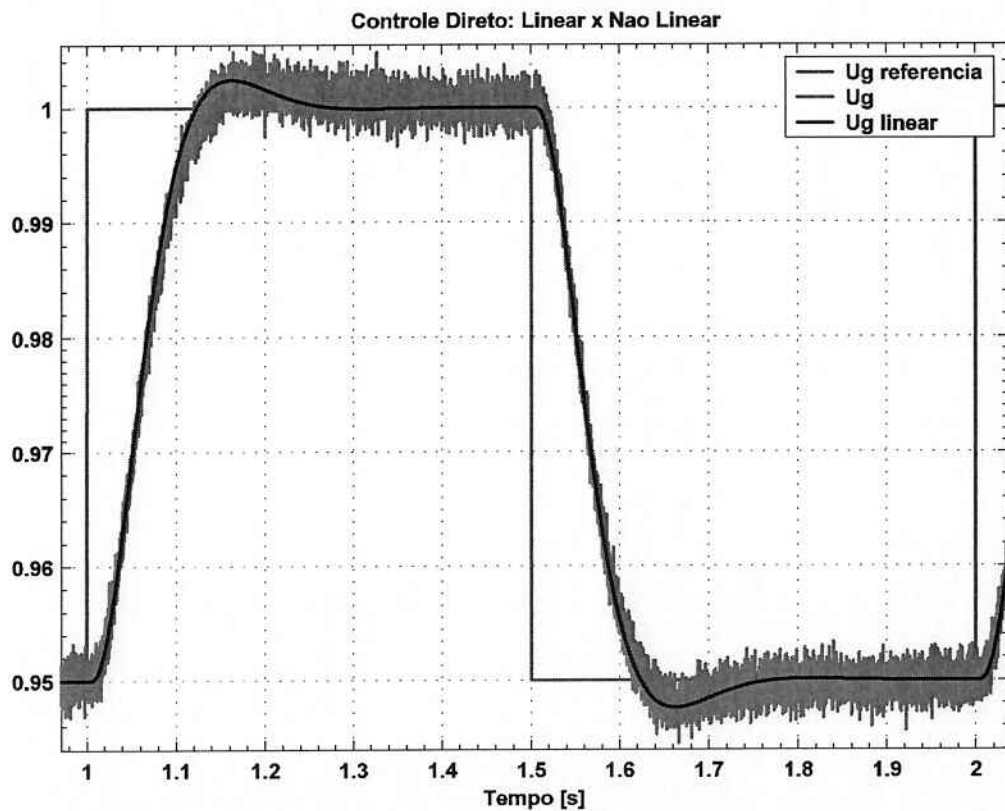


Figura 17.6: Comparação Simplificado Detalhado – 5% – Controle Direto



### 17-2-b- Detalhes do Controle Cascata

Nota-se que há diferenças relevantes entre a resposta do modelo simplificado, que não possui saturação, com a do modelo detalhado. Isto se deve ao fato de que a saída CC da ponte de tiristores atinge a tensão de teto durante o transitório imposto pelo degrau na referência. A Figura 17.7 mostra o detalhe do comportamento da ponte próximo ao instante 1s.

Na Figura 17.8 pode-se ver com mais precisão a diferença entre os dois modelos do Controle Direto pois suas respostas foram colocadas lado a lado. Nota-se que, durante o sobressinal, a tensão do gerador modelada detalhadamente ( $U_g$ ) se mantém acima da tensão do gerador modelada simplificada ( $U_{g \text{ linear}}$ ).

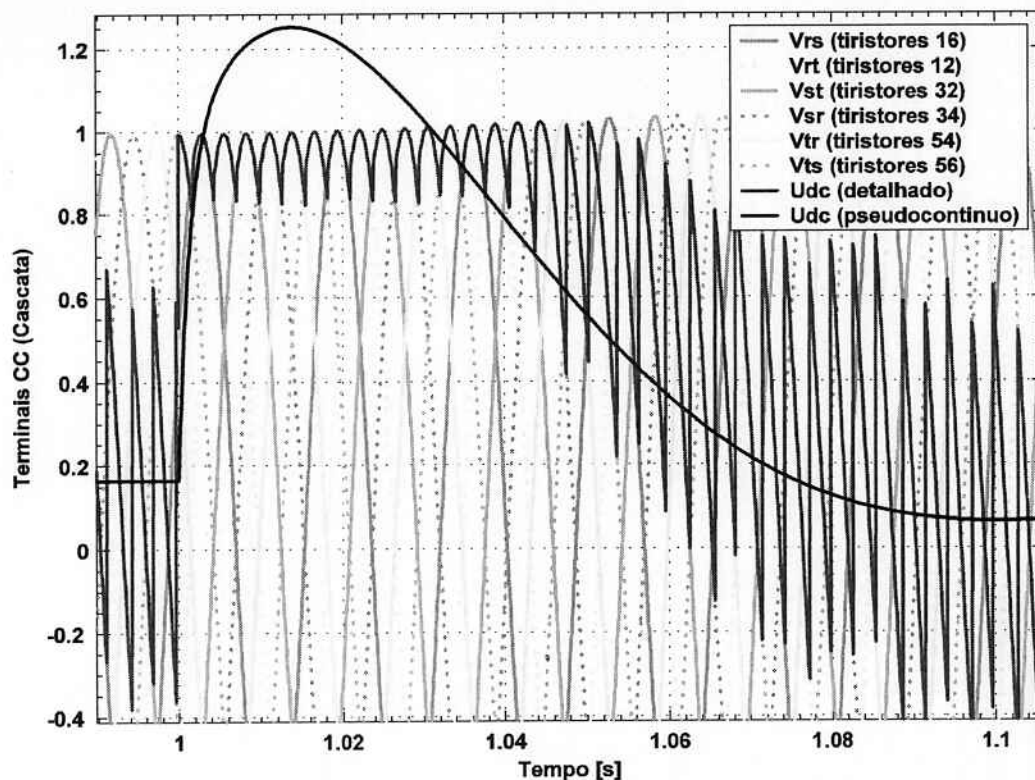


Figura 17.7: Ponte de tiristores – 5% – Controle Cascata

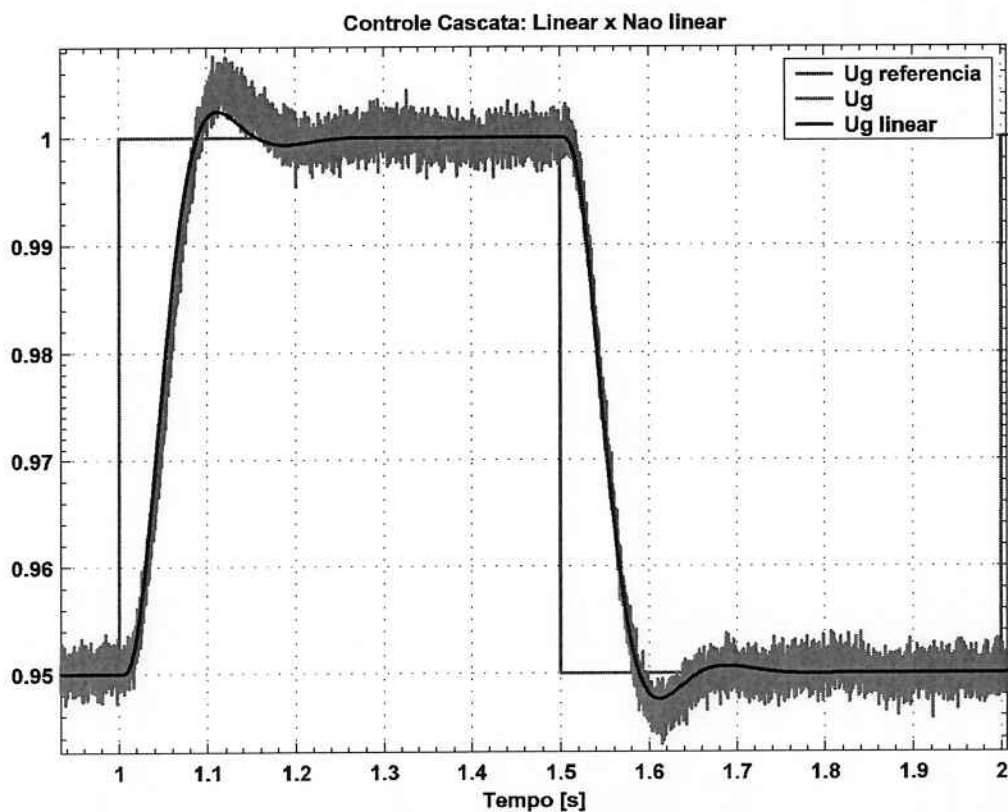


Figura 17.8: Comparação Simplificado Detalhado – 5% – Controle Cascata



## **17-3- RESPOSTAS AO DEGRAU DE 6% NA REFERÊNCIA DE TENSÃO TERMINAL**

Com o intuito de comparar ambas as filosofias de controle quando submetidas a transitórios que excitam não-linearidades dos sistemas, mais especificamente a saturação da ponte de tiristores, foram aplicados degraus de 6% na referência de tensão dos modelos simplificados e detalhados do Controle Direto e do Controle Cascata. As respectivas respostas dos sistemas são apresentadas em seguida.

Com relação aos modelos simplificados não há diferenças entre um degrau de 2%, 5% ou 6%, pois tais modelos não levam em conta as não-linearidades presentes nos sistemas reais. A Figura 17.9 mostra a resposta ao degrau de 6% dos modelos simplificados, não se vê significativas diferenças com relação às Figuras 16.1 e 17.3.

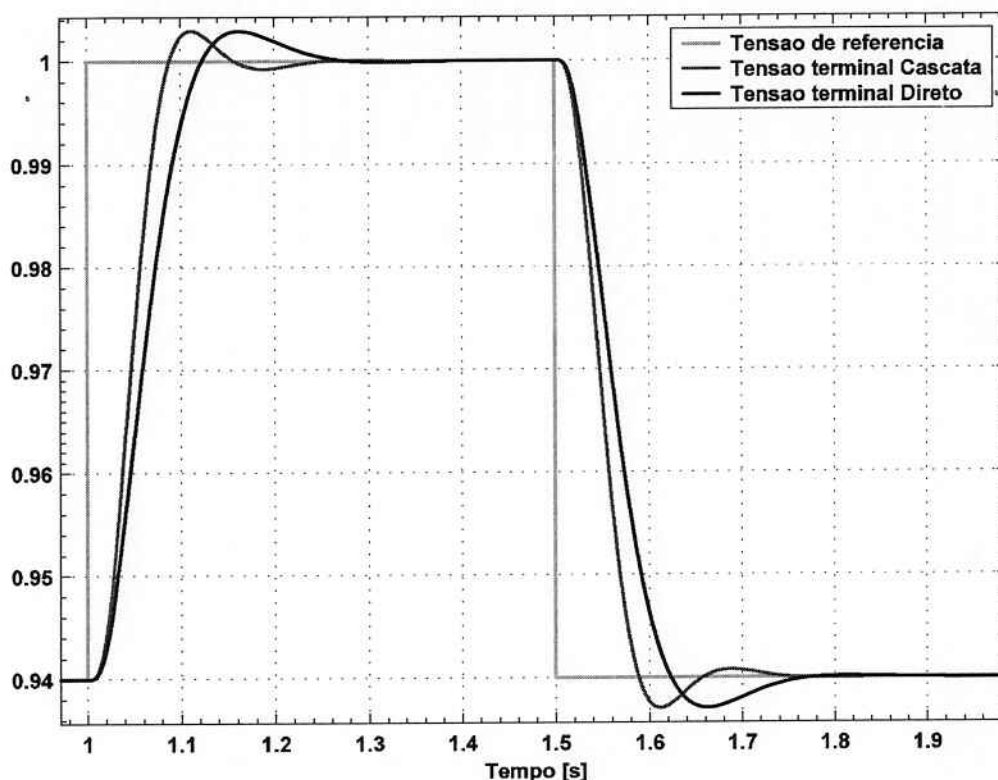


Figura 17.9: Resposta ao degrau de 6% – Modelos simplificados

O aumento no sobressinal da resposta do modelo detalhado do Controle Cascata observado para o caso do degrau de 5% é mais notável quando o degrau de 6% é aplicado na referência de tensão terminal do gerador (Figura 17.10).

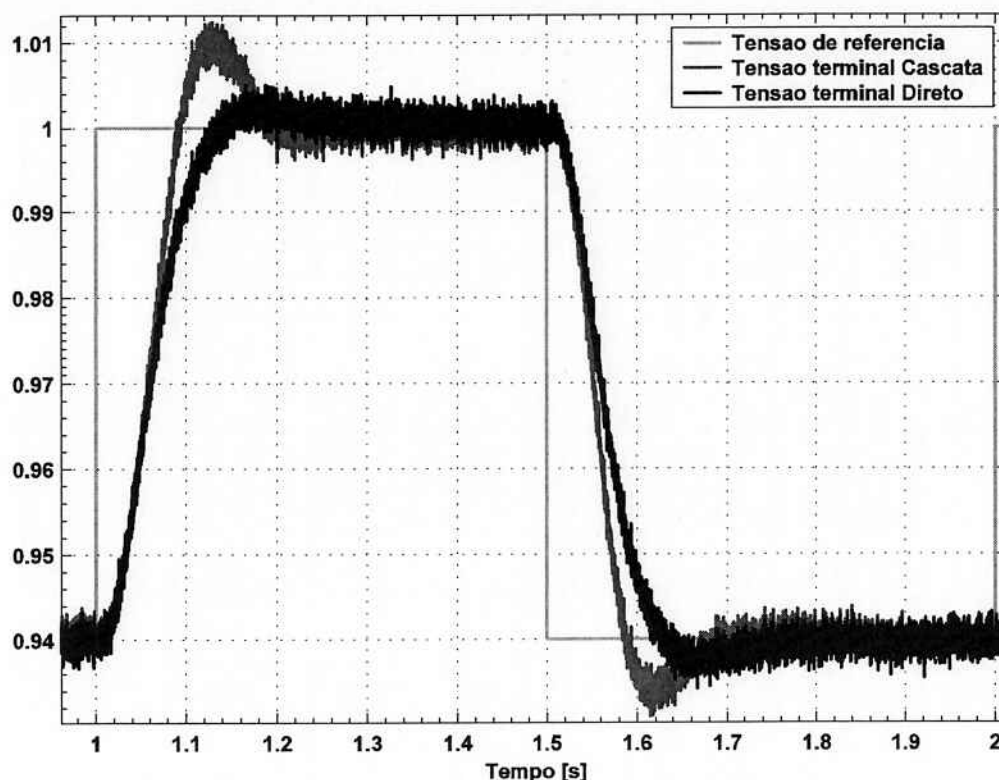


Figura 17.10: Resposta ao degrau 6% – Modelos simplificados

Convém agora analisar mais detalhadamente a ponte de tiristores para o Controle Cascata e o Controle Direto.

### 17-3-a- Detalhes da Ponte de Tiristores do Controle Direto e do Controle Cascata

Analisando o comportamento da ponte de tiristores nos instantes próximos à 1s verifica-se que ambas as estruturas de controle apresentam saturação da ponte de tiristores (Figuras 17.11 e 17.12). Mas nota-se que as diferenças entre o modelo simplificado e o detalhado do Controle Cascata são maiores do que as diferenças entre os dois modelos do Controle Direto (Figuras 17.13 e 17.14). A tensão terminal detalhada do Controle Direto tende responder mais lentamente do que a tensão do modelo simplificado. No caso do Controle Cascata, além do atraso há o sobressinal excessivo.

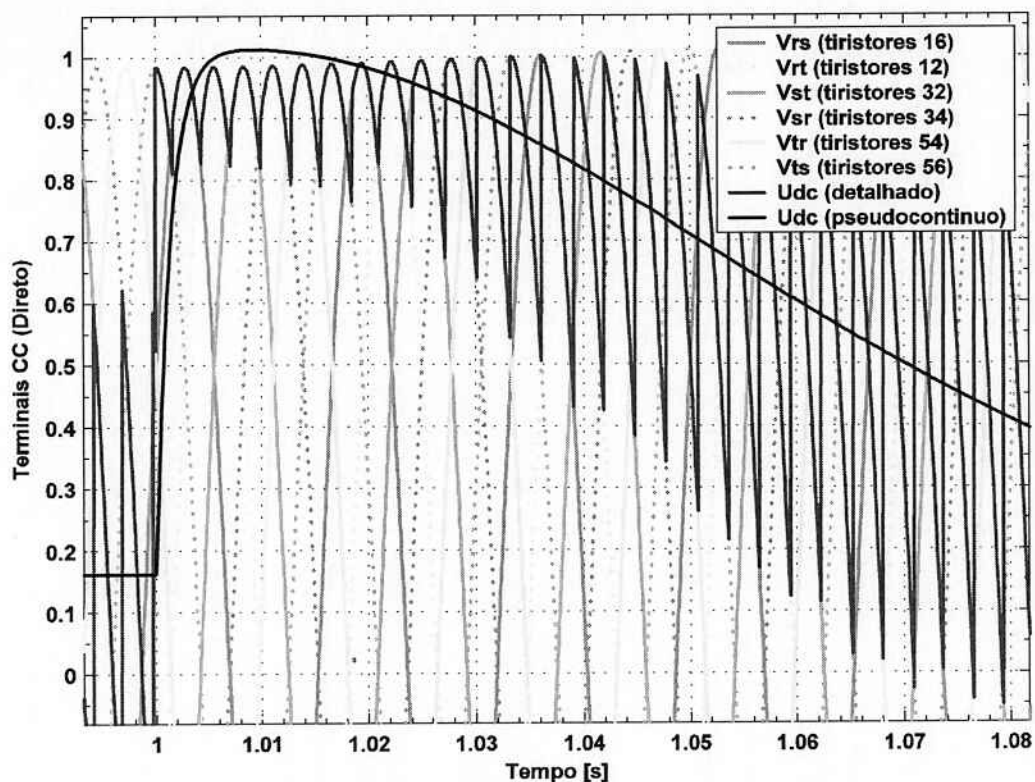


Figura 17.11: Ponte de tiristores 6% – Controle Direto

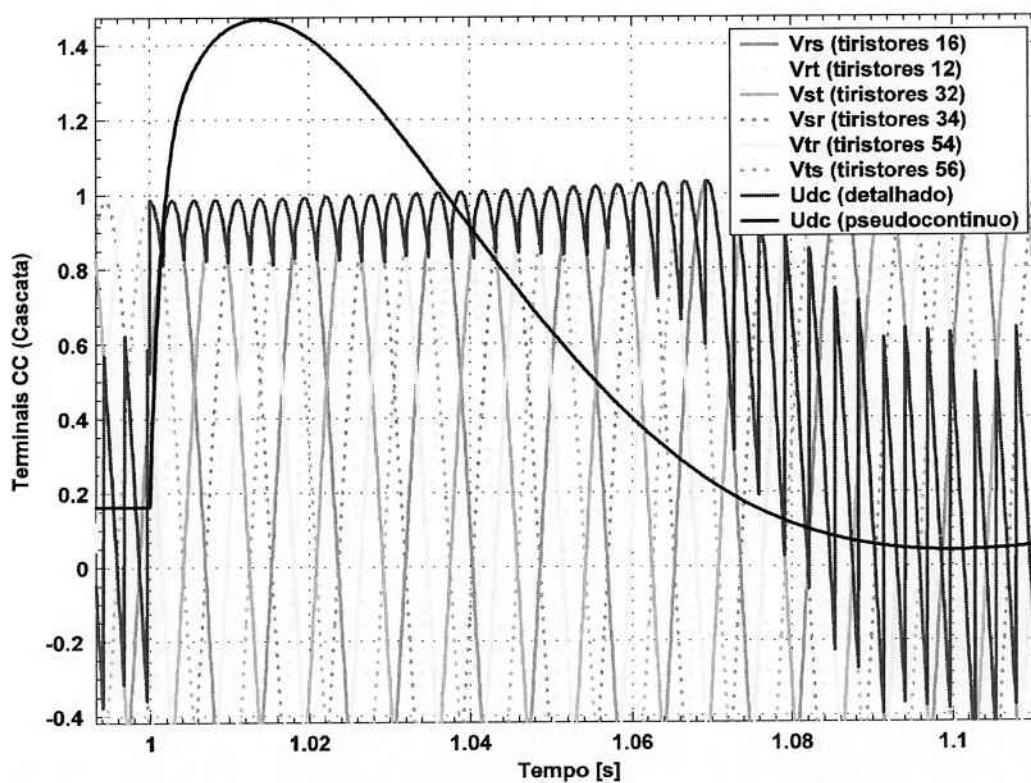


Figura 17.12: Ponte de tiristores – 6% – Controle Cascata



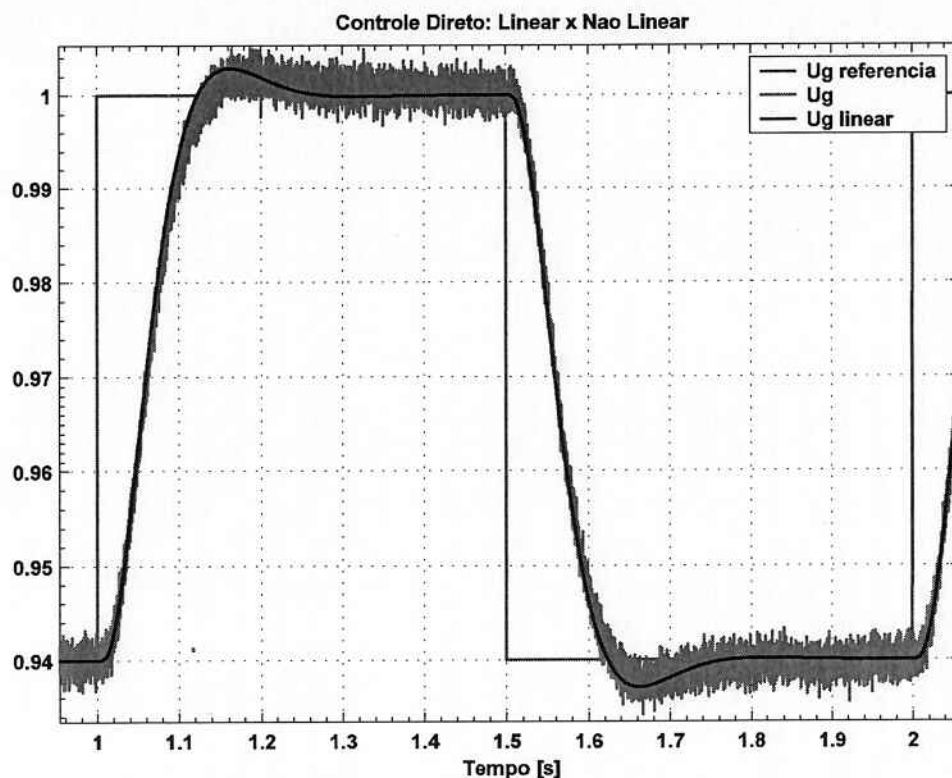


Figura 17.13: Modelo Simplificado Detalhado – Controle Direto

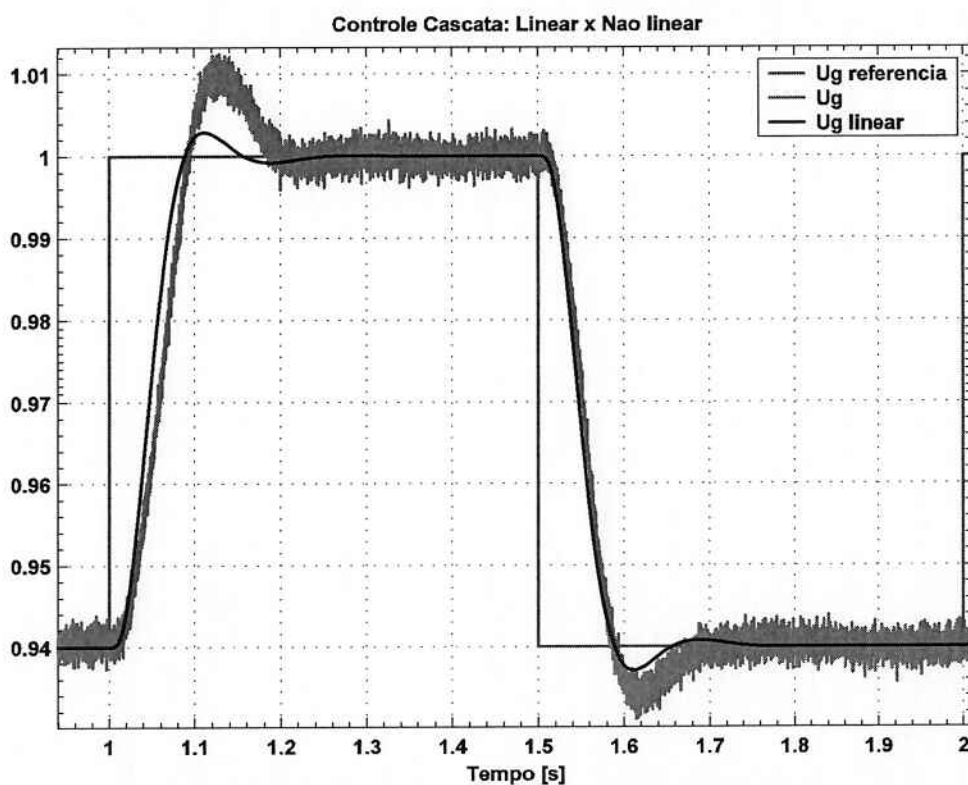


Figura 17.14: Modelo Simplificado Detalhado – Controle Cascata





O sobressinal observado na tensão terminal do gerador do modelo do Controle Cascata é novamente visível na Figura 17.15, na qual se identificam por ordem de tempo de subida a referência de corrente de campo do controle cascata, a corrente de campo do controle cascata e a corrente de campo do controle direto. A corrente de campo do controle direto apresenta um sobressinal muito menor do que a corrente de campo do controle cascata

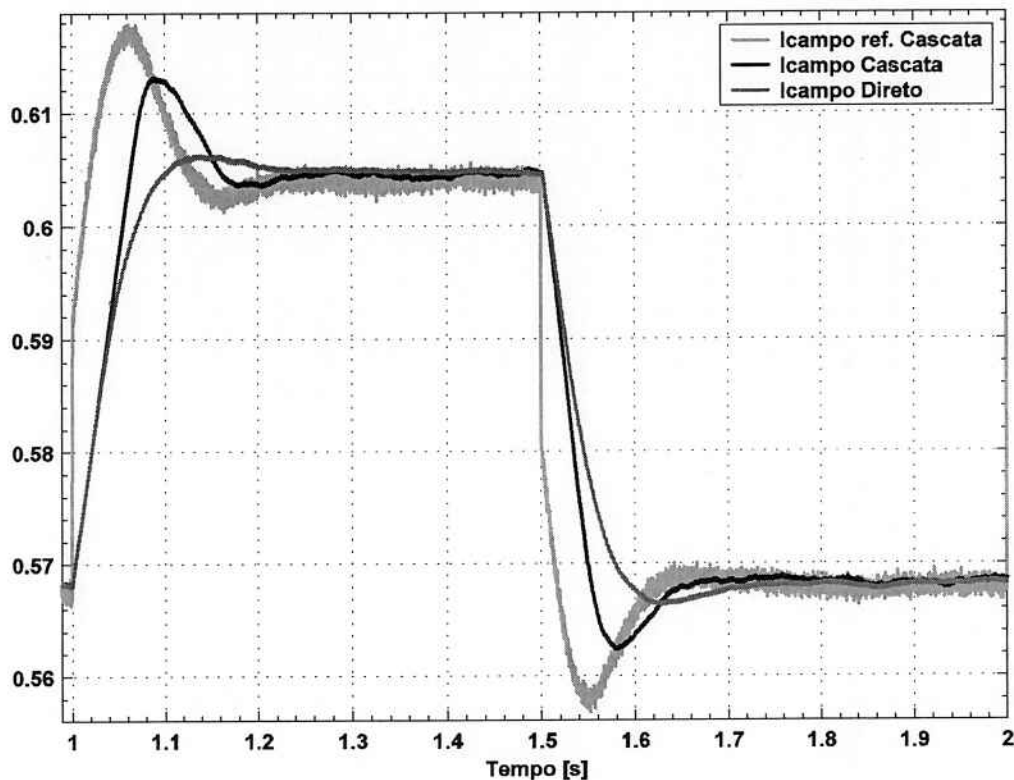


Figura 17.15: Correntes de Campo Modelos Detalhados

Em um primeiro momento pode-se pensar que o sobressinal observado na corrente de campo pode ser eliminado limitando-se o sinal de referência de corrente de campo. No entanto, antes de se tirar tal conclusão, deve-se analisar melhor os momentos próximos a 1s. No instante 1s, previamente à aplicação do degrau, a corrente de campo dos dois modelos estava em 0,568pu, o que produzia a tensão terminal do gerador de 0,94pu (Figura 17.10). Após o transitório produzido pelo degrau em 1s, a corrente de campo dos dois modelos se estabiliza próxima a 0,604pu, o que corresponde a 1pu de tensão terminal do gerador (Figura 17.10). O máximo valor atingido pela referência de corrente logo após o degrau é



0,618pu. Se tal corrente de campo se estabelecesse, a tensão do gerador chegaria a 1,02pu.

Durante o transitório, a corrente de campo do controle cascata e sua referência não atingiram valores que deveriam ter sido limitados. Pode-se, portanto, concluir que a simples introdução de limitadores para a referência de corrente de campo não é a solução para o sobressinal observado.

Com o fim de esclarecer os motivos de tal comportamento do controle cascata frente a transitórios que excitam não-linearidades do sistema, passa-se agora a um detalhamento dos limitadores presentes nos reguladores de ambas as filosofias.

### 17-3-b- Limitadores do Regulador PI do Controle Direto

A Figura 17.16 mostra a representação MatLab do modelo do regulador proporcional e integral utilizado no Controle Direto:

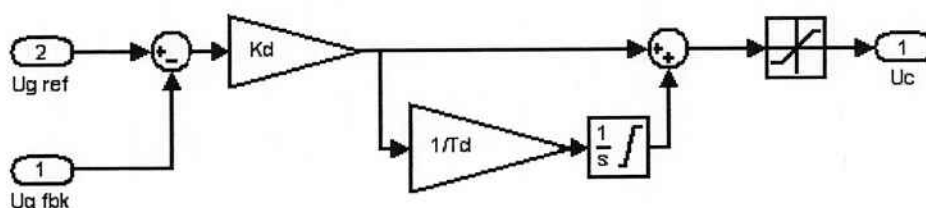


Figura 17.16: Regulador PI do Controle Direto

As entradas, a saída, os parâmetros do regulador PI são apresentados na Tabela 17.1.

Tabela 17.1: Entradas, saída, parâmetros e limitadores do PI do Controle Direto

	Denominação	Faixa / Valor utilizado
$U_{g \text{ ref}}$	Tensão terminal do gerador de referência	-
$U_{g \text{ fbk}}$	Tensão terminal do gerador de realimentação	-
$K_d$	Constante proporcional do PI (direto)	14,2
$T_d$	Constante integrativa do PI (direto)	4,73s
$U_c$	Tensão de controle da ponte de tiristores	-
	Limitador de $U_c$	$U_{\text{teto negativa}} \dots U_{\text{teto positiva}}$
	Limitador do integrador	$U_{\text{teto negativa}} \dots U_{\text{teto positiva}}$

A Figura 17.17 mostra um detalhe da tensão de controle da ponte de tiristores. Nos instantes próximos a 1s ocorre o degrau positivo na referência de tensão (Figura 17.10). Nota-se que  $U_c$  é limitado em 1pu, o que corresponde à tensão de teto, logo após o degrau. Caso não houvesse o limitador na saída do regulador PI,



$U_c$  ultrapassaria 1pu, ou seja, seria requisitado da ponte de tiristores um valor de tensão maior do que esta pode fornecer.

O ruído presente em  $U_c$  se deve ao fato de a realimentação de tensão terminal do gerador possuir um ruído que foi introduzido no modelo para simular condições realistas de operação de um regulador de tensão.

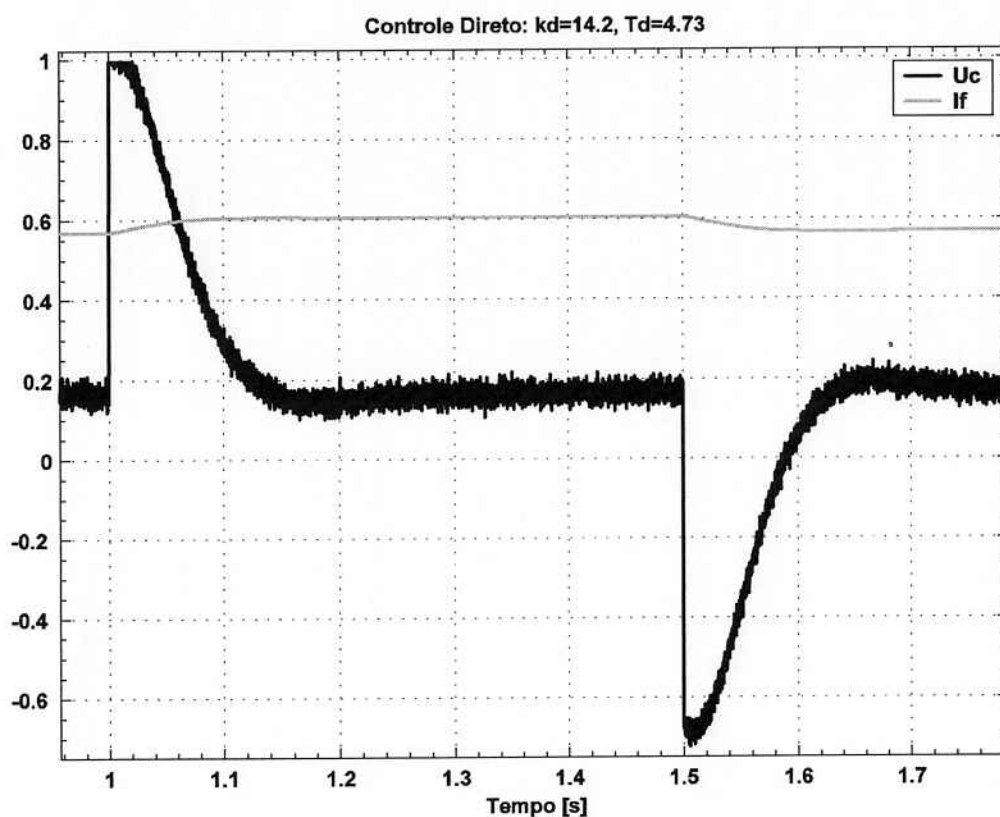


Figura 17.17: Detalhe do regulador PI do Controle Direto

Apenas para ilustração está presente na Figura 17.7 a corrente de campo, pode-se verificar seu comportamento frente às variações de  $U_c$ .



### 17-3-c- Limitadores dos Reguladores PI do Controle Cascata

A Figura 17.18 mostra a representação MatLab do modelo dos reguladores proporcionais e integrais utilizados no Controle Cascata:

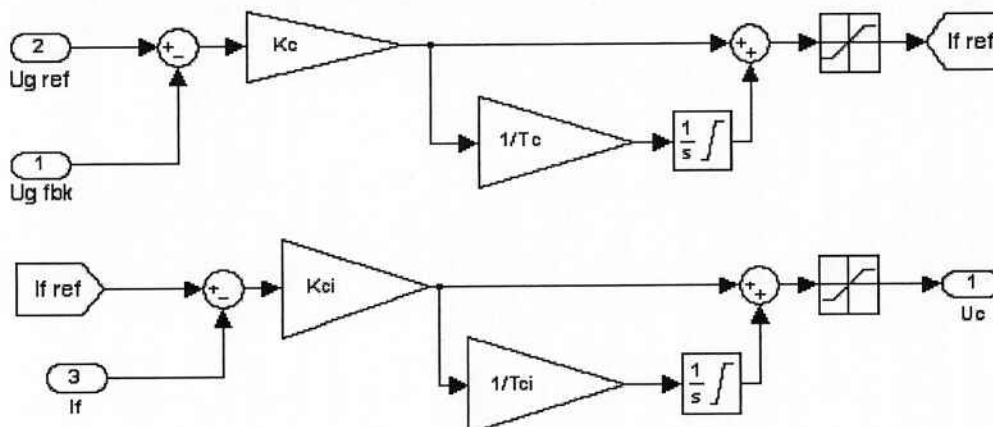


Figura 17.18: Reguladores PI do Controle Cascata

A Tabela 17.2 apresenta as entradas, a saída, os parâmetros e os limitadores presentes nos reguladores PI do Controle Cascata.

Tabela 17.2: Entradas, saída, parâmetros e limitadores dos reguladores PI do Controle Cascata

Denominação		Faixa / Valor utilizado
$U_{g \text{ ref}}$	Tensão terminal do gerador de referência	-
$U_{g \text{ fbk}}$	Tensão terminal do gerador de realimentação	-
$I_{f \text{ ref}}$	Referência de corrente de campo	-
$I_f$	Corrente de campo de realimentação	-
$K_{ci}$	Constante proporcional do PI interno (cascata)	45
$T_{ci}$	Constante integrativa do PI interno (cascata)	4,73s
$K_c$	Constante proporcional do PI externo (cascata)	0,39
$T_c$	Constante integrativa do PI externo (cascata)	0,03s
$U_c$	Tensão de controle da ponte de tiristores	-
	Limitador de $U_c$	$U_{\text{teto negativa}} \dots U_{\text{teto positiva}}$
	Limitador do integrador interno	$U_{\text{teto negativa}} \dots U_{\text{teto positiva}}$
	Limitador de $I_{f \text{ ref}}$	0.544pu...0.665pu
	Limitador do integrador externo	0.544pu...0.665pu

A Figura 17.19 mostra um detalhe dos sinais dos reguladores PI do controle cascata. A tensão de controle da ponte de tiristores atinge o seu limite logo após o degrau na referência de tensão no instante 1s, ela permanece em seu valor máximo durante cerca de 60ms. Durante este período, apesar da malha interna estar em seu limite de operação, o regulador externo continua a aumentar a referência de corrente de campo ( $I_{f \text{ ref}}$ ). A malha interna de corrente atinge muito mais rapi-



damente a saturação do que a malha externa de tensão, o sobressinal excessivo ocorre devido ao fato do regulador PI externo não modificar o seu modo de operação durante os períodos de saturação da malha interna.

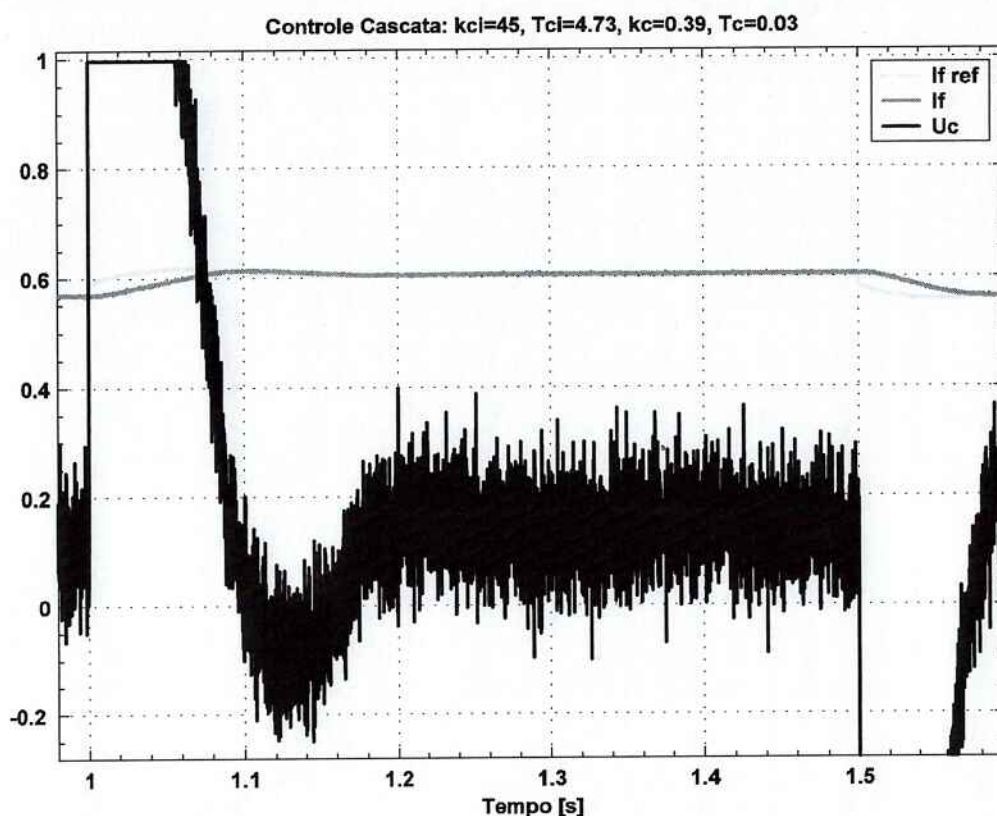


Figura 17.19: Detalhes dos reguladores PI do Controle Cascata

Como a limitação do regulador interno é atingida sem que a limitação do regulador externo seja atingida, torna-se necessário corrigir o comportamento dinâmico do regulador externo com base no funcionamento do regulador interno. Mais informações sobre este tema podem ser encontradas em [4].





## **18- CONCLUSÕES**

Foram comparadas duas filosofias diferentes de controle de reguladores de tensão de hidrogeradores, denominadas neste projeto de formatura de Controle Direto e Controle Cascata. Foram utilizados dois modelos para o sistema gerador/sistema de excitação neste trabalho. O modelo simplificado permitiu realizar os pré-ajustes do controle. O modelo detalhado permitiu a comparação entre o Controle Direto e o Controle Cascata.

Os dados utilizados nas simulações correspondem a um gerador e um sistema de excitação reais.

Notou-se que o ajuste e a otimização do Controle Direto se mostrou mais simples que o do Controle Cascata. Em particular, o ajuste da malha externa do Controle Cascata deve ser cuidadosamente realizado, notadamente o do ganho proporcional. As estratégias de ajuste de reguladores em cascata tem ampla aplicação em sistemas nos quais as grandezas a serem controladas estão ligadas a fenômenos físicos de naturezas diferentes. Como no caso de um motor de corrente contínua do qual se controlam as grandezas velocidade e corrente de armadura. A primeira grandeza está ligada à energia cinética, enquanto a segunda tem relação com a energia magnética. Neste trabalho, tanto a tensão terminal quanto a corrente de campo estão ligadas ao fluxo magnético. Esta pode ser uma das razões para as dificuldades encontradas no ajuste do Controle Cascata.

O comportamento dinâmico das duas filosofias de controle foi comparado através de simulações no domínio do tempo. Tais simulações abrangem condições de operação linear (pequenos transitórios) e não-linear (grandes perturbações).

Em condições lineares de operação não existem diferenças significativas entre o comportamento dinâmico das duas filosofias de controle.

Em transitórios de maior amplitude o Controle Cascata apresentou sobressinal excessivo, o que não ocorre para o Controle Direto. Tal diferença é provocada pela forma pela qual os limitadores atuam em cada uma das estruturas de controle. No Controle Direto a implementação é simples. Na estrutura de Controle Cascata existem duas malhas de controle, cada uma com seus respectivos limitadores. Durante transitórios de grande amplitude a malha interna do Controle Cascata atinge a saturação sem que as limitações da malha externa tenham sido atingidas. Mostrou-se necessário um estudo mais detalhado sobre a atuação dos limitadores em reguladores em cascata, seguindo indicações de [4](capítulo 6.8) e [8](capítulo 10.3).



## **19- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Guia para especificação de sistemas de excitação para máquinas síncronas; FT 38.01.09 – Cigré Brasil – Requisitos e desempenho de sistemas de excitação, 1998

[2] IEEE Standard definitions for excitation systems for synchronous machines; ANSI/IEEE Std 421.1 - 1986

[3] Requisitos Mínimos para a Conexão à rede Básica, Submódulo 3.8, ONS – Operador do Sistema Elétrico.

[4] BÜHLER, H., Réglage de systèmes d'électronique de puissance, Volume 1: Théorie. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.

[5] BARBUY, H. S.; ROCCO, L. A. F.; GOLDEMBERG, C., Rectifier Choices for Synchronous Generator Exciters.

[6] FRÖHR, F.; ORTTENBURGER, F.; Introduction to Electronic Control Engineering. Berlin; München, Siemens-Aktiengesellschaft and Heyden & Son, 1970.

[7] BÜHLER, H., Electronique de réglage et de commande. Lausanne, Éditions Georgi, 1979.

[8] BÜHLER, H., Réglage de systèmes d'électronique de puissance, Volume 2: Entraînements Réglés. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.





## ANEXO I – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA EXCITAÇÃO I

### Rating of the excitation system

Project: \_\_\_\_\_ codeword \_\_\_\_\_

#### Nominal data of generator:

$U(f_n)$	183	V
$I(f_n)$	1133	A
$I(f_0)$	695	A
$U(f_c)/U(f_n)$	3,25	pu
$I(f_{max})/I(f_n)$	1,1	pu
$I(f_c)/I(f_n)$	1,4	pu
$T'(d_0)$	4,73	s
$x(d)$	1,05	pu
$x'(d)$	0,31	pu

$I(f_{max})$	1246	A
$I(f_c)$	1586	A
$U(f_c)$	595	V

#### Excitation transformer:

$U(eff)$	476	V
$I(eff)$	1018	A
$P(trafa)$	900	kVA

#### Thyristor bridge:

Number of bridges because of redundance	3	
Safety factor due environment temperature	1,0	
Safety factor due site altitude	1,0	
Safety due factor overload	1,1	
Safety factor due Parallelism of rect. bridges	0,9	
Maximal current per bridge	860	A
Threshold voltage thyristor	1,0	V
Slope resistance	0,84	mOhm
I(bridge)	750	A
U(RRM)	1700	V
Utilization level	56	%



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas  
PEA – EPUSP

Efficiency	98,78 %
Power dissipation	2556 W

### **Field Flashing Transformer:**

$I(A)/I(f_0)$	0,25
$U(A)$	28,06 V
$P(\text{trafo})$	5,66 kVA
$U(\text{eff})$	23 V
$I(\text{eff})$	142 A



## ANEXO II – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA EXCITAÇÃO II

$$\begin{aligned}U_{fn} &= 183 \text{ V} \\I_{fn} &= 1133 \text{ A} \\I_{f\max} &= 1172 \text{ A} \\U_{f0} &= 83 \text{ V}\end{aligned}$$

### 1ª Condição – Tensão de Teto

$$U_p = 5 \cdot U_{f0} = 417,4993257$$

### 2ª Condição – Tensão de Teto

$$U_p = U_{fn}/0,35 = 523,5774573 \text{ V}$$

### CORRENTE NOMINAL DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

$$\begin{aligned}I_{en} &= 1,10 \cdot I_{f\max} = 1289,2 \text{ A} & I_{teto} &= 1,4 \cdot I_{en} = 1804,88 \\& \text{(Por norma, aceita-se 5\% de } I_{f\max}. \text{ O fator normalmente utilizado é 10\%.)}\end{aligned}$$

### DIMENSIONAMENTO DO TRAFÓ DE EXCITAÇÃO

$$\begin{aligned}U_{2\sim} &= 1,05 \cdot 0,8 \cdot U_p = 439,8050641 \text{ V} & \Rightarrow & 440 \text{ V} \\I_{2\sim} &= 1,1 \cdot 0,82 \cdot I_{f\max} = 1057,144 \text{ A} \\S_{trafo} &= \text{Raiz}(3) \cdot I_{2\sim} \cdot U_{2\sim} = 805651,9323 \text{ VA} & \Rightarrow & 810 \text{ kVA}\end{aligned}$$

### RETIFICADOR

$$\begin{aligned}I_{ret} &\geq I_{en}/(a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e) = 2319,748088 \text{ A} \\a &= 0,95 & \text{Redução devido a temp. ambiente } 35^\circ\text{C} & (40^\circ\text{C}) \\b &= 1 & \text{Redução devido a altitude } > 1000\text{m} & (< 1000\text{m}) \\c &= 0,9 & \text{Redução devido ao paralelismo} & (3 \text{ pontes}) \\d &= 0,65 & \text{Redução devido a sobrecargas ocasionais} \\e &= 1 & \text{Redução devido a empilhamento} & (\text{Sem})\end{aligned}$$

$$V_{rm} \geq 2,5 \cdot \text{Raiz}(2) \cdot U_{2\sim} = 1555,634919 \text{ V}$$

Tomando 3 unidades em paralelo, cada uma deverá ter uma capacidade nominal de:

$$\begin{aligned}I_{ret} &\geq I_{ret}/n = 773,2493627 \text{ A} \\n &= \text{número de unidades em paralelo}\end{aligned}$$



## ANEXO III – MODELOS COMPUTACIONAIS E APRESENTAÇÃO DE GRÁFICOS

Os arquivos com os modelos MatLab/Simulink e os programas de apresentação de gráficos estão no CD/disquete em anexo organizados segundo a tabela abaixo:

Diretório	Arquivo	Comentários
Modelo nao lineares	UGD.mdl	Modelo não-linear de uma unidade geradora em vazio com Controle Direto
	UGC.mdl	Modelo não-linear de uma unidade geradora em vazio com Controle Cascata
Modelos lineares	UGDL.mdl	Modelo linear de uma unidade geradora em vazio com Controle Direto
	UGDL.mdl	Modelo linear de uma unidade geradora em vazio com Controle Cascata
Gráficos	NL7.m	Simula os modelos lineares e não lineares e gera as curvas apresentadas no relatório final
	LL.m	Simula apenas os modelos lineares e gera as curvas apresentadas no relatório final
	figpre.m	Função utilizada por NL7.m e LL.m
	figpos.m	Função utilizada por NL7.m e LL.m
	zoomrb.m	Função utilizada por figpos.m
	existdir.m	Função utilizada por figpos.m
	existfille.m	Função utilizada por figpos.m
	grafdef.m	Função utilizada por figpos.m
	grafdef12.m	Função utilizada por figpos.m
	grafdef10.m	Função utilizada por figpos.m
	startup.m	Função utilizada por figpos.m