



Universidade Federal do Pará – UFPA
Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC
Faculdade de Engenharia Elétrica – FEE

PROPOSTA DE UM SEGUIDOR DE REFERÊNCIA
MICROCONTROLADO PARA OS REGULADORES DE
TENSÃO DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS
DA PRIMEIRA CASA DE FORÇA DA UHE TUCURUÍ.

JEFFERSON SOUZA COSTA

Tucuruí - Pará
Mai de 2013

PROPOSTA DE UM SEGUIDOR DE REFERÊNCIA
MICROCONTROLADO PARA OS REGULADORES DE
TENSÃO DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS
DA PRIMEIRA CASA DE FORÇA DA UHE TUCURUÍ.

JEFFERSON SOUZA COSTA

TRABALHO APRESENTADO AO
COLEGIADO DO CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ NO CAMPUS
UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA.

Tucuruí - Pará
Maio de 2013

*Dedico este trabalho de conclusão de curso à
minha maravilhosa esposa e amiga Maria de
Jesus e também meu amado filho Miguel.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que me permite ser vitorioso mesmo quando minhas limitações me fazem declinar as coisas que não o agradam, pois tamanha é sua misericórdia.

Agradeço a minha esposa que muitas vezes teve de se desdobrar em duas, ou até mais, para cuidar de todas as coisas de casa, fazer as disciplinas da faculdade, cuidar do nosso filho e ainda assim manter um sorriso que todos os dias me reanimava para continuar o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a meus pais cuja dedicação e esforço para a criação sempre me guiaram para os caminhos honestos da vitória.

Agradeço ao MSc. Janio José de Lana que teve a disponibilidade de reger o desenvolvimento deste trabalho através do seu imensurável conhecimento prático aliado a um forte embasamento teórico.

Agradeço ao Professor MSc. Raphael Barros Teixeira pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho e também pelo enorme incentivo à conclusão do mesmo.

Deixo meus agradecimentos ao corpo docente da Universidade Feral do Pará no campus Universitário de Tucuruí, pois foi neste espaço que o perfil profissional que tenho hoje foi formado. O que tem me permitido alcançar grandes vitórias.

Resumo

Tendo em vista a busca cada vez maior pela eficiência nos reguladores de tensão dos geradores síncronos, este trabalho apresenta a proposta de construção de um protótipo microcontrolado, o qual visa evitar que oscilações indesejadas de tensão terminal ocorram no gerador no momento em que ocorre a transferência do regulador de tensão automático para o regulador manual e vice-versa.

O protótipo apresenta uma malha de controle que tem como objetivo, rastrear a mudança da referência de tensão do regulador que assume o controle da tensão terminal, para assim modificar a referência da variável do regulador que não se encontra em retaguarda, de forma que as referências aplicadas aos dois reguladores propiciem um mesmo valor de tensão terminal. O que permite que a permuta entre os reguladores seja feita sem oscilações indesejadas de tensão terminal.

Como os reguladores de tensão utilizam variáveis diferentes para controle da excitação do gerador: o manual controla a corrente de campo e o automático controla diretamente a tensão terminal; tornou-se necessário correlacionar estas referências para que a comparação possa ser feita de forma coerente com as características físicas da máquina síncrona. Para isso foram realizados ensaios sobre um gerador síncrono de 350MW da primeira casa de força da usina hidroelétrica, localizada em Tucuruí-PA, com o intuito de se identificar sua característica de magnetização na condição em vazio e também em carga.

De posse da característica de magnetização do gerador, foi elaborado um programa em linguagem C que sintetiza a lógica de controle do protótipo seguidor de referência. Este programa foi desenvolvido para um microcontrolador específico da família PIC. Também foi projetado um módulo físico para o protótipo, de forma que o microcontrolador realize as ações necessárias ao acompanhamento entre as variáveis afins. Durante este trabalho são descritos os projetos do programa a ser embarcado no microcontrolador e do módulo físico do protótipo.

Palavras-Chave: Seguidor de Referência. *Follow-up*. Característica de Magnetização. Microcontrolador PIC. Sistema de excitação. Linguagem C.

Abstract

Considering the search for ever greater efficiency in voltage regulators of synchronous generators, this paper presents a proposal of a microcontrolled prototype that seeks to prevent undesirable terminal voltage oscillations from occurring in the generator at the time the manual voltage regulator is exchanged for an automatic and vice versa.

The proposal presents a control loop that aim to track the change of the regulator reference voltage that takes control of the terminal voltage and modify the regulator variable reference in standby, so that the references applied to the two regulators will support an even terminal voltage. This allows the exchange between regulators to be made without the “unwanted” oscillations in the value of terminal voltage.

Since the voltage regulators utilize different variables to control the generator excitation, the manual type controls the field current and the automatic type controls the terminal voltage directly, it became necessary to correlate these references so that the physical characteristics of the generator could be considered. For this, tests were performed on a 350MW synchronous generator of the powerhouse I of Tucuruí Hydropower Plant, Brazilian state of Pará, in order to identify its magnetization characteristic at no load and loaded condition.

After ascertaining the generator magnetization characteristic, a program was written in C language, which synthesizes the control logic of the reference follower prototype. This program was developed for a specific PIC family microcontroller. Furthermore, a physical module for the prototype was designed, so that the microcontroller perform the actions necessary to monitor the variables of interest. In this work, we describe the design of software to be embedded in the microcontroller, and the prototype physical module.

Keywords: Follower of Reference. Follow-up. Magnetization Characteristic. PIC microcontroller. Excitation system. C Language.

Índice de Ilustrações

Figura 2.1 – Esquema funcional de um gerador síncrono e máquina primária hidráulica.	10
Figura 2.2 - Curva característica no modo de funcionamento em vazio	13
Figura 2.3 – Curvas características no modo de funcionamento em carga	15
Figura 2.4 – Diagrama funcional do sistema de excitação de um gerador síncrono	17
Figura 2.5 – Diagrama funcional de sistema de Excitação com excitatriz CC	20
Figura 2.6 – Diagrama funcional de sistema de Excitação com excitatriz CA	21
Figura 2.7 – Sistema de Excitação com excitatriz estática autoalimentada por Trafo de excitação.	23
Figura 2.8 – Ponte retificadora controlada trifásica e seus circuitos relevantes.....	24
Figura 2.9 – Sistema de Excitação estático com Seguidor de Referência.....	29
Figura 3.1 – Visão geral do Armário de Regulação com seus módulos analógicos.....	33
Figura 3.2 – Equipamentos de medição instalados no armário de regulação.....	35
Figura 3.3 – Medição de corrente de campo no ponto M5 do módulo RM	37
Figura 3.4 – Medição de tensão terminal no ponto m6 do módulo RE cartela DE	38
Figura 3.5 – Curva interpolada dos dados do ensaio de magnetização em vazio.....	41
Figura 3.6 – Curvas interpoladas dos dados dos ensaios em vazio e em carga.....	44
Figura 3.7 – Superfície de tensão terminal dada em função da corrente de campo e potência ativa. Resultado da interpolação dos dados obtidos nos dois ensaios	44
Figura 3.8 – Superfície de tensão terminal dada em função da corrente de campo e potência ativa. Resultado da função estimada na Equação 2.	46
Figura 3.9 – Superfície de corrente de campo dada em função da tensão terminal e potência ativa. Resultado da função estimada na Equação 3.	46

Figura 4.1 – Malha do protótipo do circuito seguidor de referência para modo manual	49
Figura 4.2 – Malha do protótipo do circuito seguidor de referência para modo manual	51
Figura 4.3 – Diagrama de pinos do microcontrolador PIC 18F4520	53
Figura 4.4 – Formas de onda em modulação PWM para vários ciclos de trabalho	59
Figura 4.5 – Circuito buffer como divisor de tensão para condicionamento de sinais.....	64
Figura 4.6 – Circuito acionador dos potenciômetros digitais do regulador de tensão.....	65
Figura 4.7 – Circuito condicionador do sinal PWM de saída.....	66
Figura 4.8 – Circuito condicionador dos sinais digitais que indicam a mudança entre os modos do regulador de tensão.....	68
Figura 4.9 – Circuito acionador do relé auxiliar que modifica o potenciômetro digital comandado pelo controlador do protótipo.....	68
Figura 4.10 – Circuito completo do protótipo digital do seguidor de referência proposto	69

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Valores obtidos no ensaio a vazio no gerador síncrono	40
Tabela 3.2 - Valores obtidos no ensaio a vazio no gerador síncrono	43
Tabela 3.3 – Valores das constantes da função apresentada na Equação 2.....	45
Tabela 3.4 – Valores das constantes da função apresentada na Equação 3.....	46
Tabela 4.1 – Resumo sobre o funcionamento das duas malha de controle de acompanhamento embarcadas no protótipo seguidor de referência	56
Tabela 4.2 – Resumo sobre a análise do erro de acompanhamento com as possíveis ações de controle geradas no protótipo	58
Tabela 4.3 – Ação de controle do protótipo e seus respectivos valores de ciclo PWM definidos. Apresentam-se os níveis de tensão na saída do microcontrolador para cada ação..	60
Tabela 4.4 – Valores de ganho, por divisor de tensão, aplicados nas variáveis analógicas de entrada do protótipo V_i , onde V_0 é a tensão de saída do condicionador de sinais.	63
Tabela 4.5 – Sinais de saída do condicionador de controle em função das ações de controle.	67
Tabela 4.6 – Descrição dos códigos utilizados para endereçamento dos elementos do circuito do protótipo apresentado na Figura 4.10.	70

Sumário

Índice de Ilustrações	vii
Índice de Tabelas	ix
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA	4
1.3 PROPOSTA DE SOLUÇÃO DA PROBLEMÁTICA	5
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
Capítulo 2	9
Geradores Síncronos Hidráulicos	9
2.1. ASPECTOS GERAIS	9
2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	11
2.3. SISTEMA DE EXCITAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO	16
2.4. EXCITATRIZES	18
2.5. REGULADOR DE TENSÃO	25
2.6. SEGUIDOR DE REFERÊNCIA	27
Capítulo 3	31
Levantamento da Característica de Magnetização do Gerador Síncrono 31	
3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. LOCAL DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	32
3.3. MATERIAL UTILIZADO	34
3.4. PONTOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE	36

3.5.	LEVANTAMENTO DA CARACTERÍSTICA EM VAZIO	39
3.6.	LEVANTAMENTO DA CARACTERÍSTICA EM CARGA.....	41
3.7.	ESTIMAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO	44
Capítulo 4		47
Proposta do Seguidor de Referência Microcontrolado		47
4.1.	INTRODUÇÃO	47
4.2.	CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO DIGITAL DO SEGUIDOR DE REFERÊNCIA 48	
4.3.	SUPORTE DE <i>SOFTWARE</i> PARA O PROTÓTIPO	51
4.4.	SUPORTE DE <i>HARDWARE</i> PARA O PROTÓTIPO	62
Capítulo 5		73
Conclusão.....		73
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.2	PROJETOS FUTUROS	79
Referências Bibliográficas		81
Apêndice I.....		83
Resumo de características, recursos e funções do Microcontrolador PIC 18F4520.....		83
Apêndice II		85
Programa Desenvolvido para Apresentar a Proposta de Construção do Protótipo Seguidor de Referência Microcontrolado		85

Capítulo 1

Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante de um cenário de consumidores que exigem cada vez mais qualidade e continuidade no fornecimento de energia, o setor elétrico vem buscando melhorias no sistema de geração, transmissão e distribuição para que estes requisitos sejam atendidos. Uma das ações mais notáveis a este respeito é a interligação de sistemas, estes que anteriormente abasteciam apenas determinadas localidades, agora abrangem grandes áreas de cobertura (MOTA, 2010).

As vantagens da utilização do sistema interligado são muitas, a começar pela maior robustez às oscilações nas grandezas elétricas, possibilidade de ajuda mútua entre diferentes regiões, diante de um cenário sazonal de geração, e melhor aproveitamento dos recursos hídricos. Em contrapartida, surgem novos problemas relacionados à estabilidade deste sistema, como a maior possibilidade de blecautes de grande escala, correntes de falta em níveis maiores, entre outros fatores que justificam a classificação do sistema de potência como um dos mais complexos já construídos pelo homem (ANDERSON e FOUAD, 2003).

Desta maneira, na manutenção de um sistema elétrico de energia há a necessidade de garantir que o mesmo tenha a capacidade de alimentar as cargas de forma contínua e apresentado valores próximos dos pré-estabelecidos para tensão e frequência. Isto é, estas variáveis devem ser mantidas dentro de uma faixa justa de tolerância, para que os equipamentos consumidores possam funcionar sem apresentar problemas relacionados a oscilações destas grandezas.

Dentre os aspectos importantes a serem considerados no estudo do sistema elétrico está a estabilidade das máquinas síncronas que são conectadas ao mesmo. Isto é devido ao fato de que grande parte da energia gerada nos sistemas elétricos é originada deste tipo de geradores, os quais se mantêm em sincronismo com o sistema em condições normais de funcionamento. Na situação em que uma máquina síncrona tende a afastar-se da velocidade de sincronismo, quando o binário entre potência gerada e consumida é desequilibrado, os reguladores de velocidade a forçam novamente à velocidade de sincronismo.

O conceito de estabilidade transitória de tensão está relacionada à grandes perturbações que levam as variáveis do sistema a uma excursão tal que as não-linearidades devem ser consideradas. Tomando uma visão sistêmica, o interesse está em saber se o gerador é capaz de manter o sincronismo durante e logo após a perturbação. Como os reguladores de velocidade tem atuação lenta, se comparada às constantes de tempo das variáveis elétricas, o sistema de excitação deve tentar, tanto quanto possível, reduzir a variação da potência elétrica de saída no período de interesse, de modo a reduzir as oscilações de potência (KUNDUR, 1994).

Desta forma, o sistema de excitação auxilia a manter a estabilidade transitória, reduzindo a magnitude das grandezas nos primeiros instantes da perturbação. Além disso, o sistema de excitação, através de estabilizadores de sistemas de potência (ESP), pode aumentar o amortecimento dos efeitos oscilatórios mecânicos e evitar a perda de sincronismo.

Analisando agora o conceito de estabilidade de tensão a pequenos sinais ou a estabilidade dinâmica, a qual está relacionada ao comportamento da trajetória do sistema em uma vizinhança do ponto de operação, as perturbações são consideradas pequenas e as equações do sistema podem ser linearizadas. Este estudo indica se as variações de carga ou variações nas condições do sistema resultam em um ponto de equilíbrio para o qual o sistema se ajusta com a atuação dos reguladores. Em determinadas configurações, o sistema apresenta pequeno amortecimento ou até amortecimento negativo. Neste último caso, variações muito pequenas da carga levam a oscilações que crescem com o tempo (KUNDUR, 1994).

O regulador de tensão trabalha dentro do sistema de excitação do gerador, o qual engloba os elementos envolvidos no controle da tensão medida nos terminais da máquina síncrona. O regulador procura manter a tensão terminal da máquina igual ao valor de referência definido pela operação local ou por controles de nível mais elevado, através da modificação do valor de corrente fornecida a máquina para a formação do campo magnético indutor (ALBUQUERQUE, 2002).

Para as máquinas síncronas estudadas neste trabalho, os reguladores de tensão são compostos por duas malhas de controle. Uma destas malhas de controle é denominada de regulador automático e tem como variável de referência a tensão terminal do gerador. A segunda malha de controle é denominada de regulador manual e sua variável controlada é a corrente de campo. Este último recebe o nome de manual devido ao controle de tensão terminal ser feito de forma indireta, pois a variação da corrente de campo precisa ser acompanhada por um operador até que se note o valor desejado de tensão terminal no gerador.

Uma das desvantagens desta arquitetura de sistema de excitação está no fato de que a variação das referências de tensão terminal e corrente de campo, aplicadas nos respectivos módulos de controle, são realizadas de forma independente. Como os reguladores servem de retaguarda um do outro, é possível que haja a mudança de controle de regulador automático para o regulador manual, quando a máquina estiver conectada ao sistema de potência. Desta forma, no momento da mudança entre as malhas de controle, pode-se notar modificações na tensão terminal, o que equivale a uma perturbação degrau no gerador, gerando assim oscilações indesejadas na potência reativa do gerador síncrono.

Um elemento integrante do sistema de excitação que permite a atenuação destas oscilações provocadas na permuta entre os reguladores de tensão é o chamado seguidor de referência ou *follow-up*. Sua estratégia de funcionamento é baseada no acompanhamento dos sinais de controle dos reguladores de tensão que, em teoria, devem ser iguais para quando um mesmo valor de tensão terminal é configurado. Quando verificada diferença entre os sinais de controle, o seguidor de referência altera a referência da variável utilizada no regulador em aguardo.

Uma estratégia utilizada para a implementação dos seguidores de referência é através de circuitos analógicos detectores de erros. Neste caso, altera-se uma relação de ganho para que uma das referências seja modificada. O que implica dizer que a relação de acompanhamento entre as referências do seguidor de referência é linear. Como a relação entre corrente de campo e tensão terminal é não-linear, são verificados erros de acompanhamento com tendência crescente a medida que se distancia do valor para qual o seguidor de referência foi projetado. Sendo assim, estes seguidores podem ainda permitir oscilações na tensão terminal, durante a comutação entre os reguladores de tensão.

Tendo em vista peculiaridades do sistema de potência que permitem pequenas oscilações provocar riscos à estabilidade, nota-se grande relevância quanto ao desempenho apresentado pelo regulador de tensão diante do sistema elétrico de potência com toda a sua

complexidade e extensão. Neste contexto, este trabalho apresenta a proposta de construção de um protótipo microcontrolado cujo objetivo é atenuar, o tanto quanto possível, as oscilações nos valores de tensão terminal do gerador diante da modificação entre as malhas de controle automático e manual do regulador de tensão das unidades geradoras hidráulicas (UGH) de 350MW de potência encontrada na usina hidroelétrica (UHE) de Tucuruí – PA.

Uma descrição mais específica sobre o problema que serviu como fonte de inspiração para o desenvolvimento deste trabalho é tratado no item 1.2, enquanto uma noção geral da metodologia utilizada para solução da problemática apresentada é descrita no item 1.3.

1.2 DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA

Na condição de funcionamento normal dos reguladores de tensão, cuja estratégia construtiva utiliza duas malhas de controle, o regulador automático de tensão assume diretamente a malha de controle de tensão terminal enquanto que o regulador manual se encontra no modo em aguardo. Na partida do gerador, é aplicado na malha do regulador automático um valor de referência que direciona a tensão terminal para o valor nominal. Na malha de controle do regulador manual a estratégia é semelhante, com a diferença do valor de referência configurado ser relativo à corrente de campo, mas ainda sim este tende a levar a tensão terminal do gerador para o valor nominal.

A variação da tensão terminal é necessária por diversos motivos durante o funcionamento do gerador como, por exemplo, para atender a demanda de energia reativa. E para realiza-la, a referência da variável controlada no regulador automático é alterada, na condição padrão de funcionamento. Como a referência no regulador manual não foi alterada, devido a modificação da referência nos módulos do regulador ser feita de forma independente, passa a existir uma diferença entre o valor atual de tensão terminal e o valor anteriormente configurado nos reguladores, ou seja, em relação ao valor nominal de tensão.

Desta forma, na situação em que venha a acontecer algum problema no regulador automático que o inviabilize de continuar controlando o sistema de excitação, haveria comutação entre os reguladores de forma que o controle de tensão passaria a ser feito através do regulador manual. Como o valor da referência, equivalente à corrente de campo, no regulador manual ainda corresponde ao valor nominal de tensão, seria observada a brusca mudança da tensão terminal do gerador para o valor nominal. O que pode ocasionar problemas à estabilidade do sistema ao qual o gerador síncrono está conectado.

Para que os problemas relacionados com a situação descrita sejam atenuados, existe no regulador de tensão os chamados seguidores de referência, também conhecidos com *follow-up*, cuja intenção básica é alterar a referência de corrente do regulador manual quando detectada a mudança na referência do regulador manual, para a condição em que o regulador automático assume a malha de controle. Quando o regulador manual assume a malha de tensão, o seguidor de referência modifica a referência do regulador automático, tomando agora a alteração da referência de corrente de campo.

Por meio de observações feitas, por parte dos operadores e mantenedores, sobre as unidades geradoras hidráulicas estudadas, foram detectadas oscilações de tensão em níveis indesejáveis no momento em que ocorre a mudança entre os reguladores de tensão que possuem seguidores de referência implementados por meio de circuito analógicos. Implicando que os seguidores de referência apresentam problemas quanto ao acompanhamento entre as referências dos reguladores de tensão.

Devido ao fato de não haver forma de serem realizados ajustes nestes circuitos que realmente venham a reduzir os erros no acompanhamento entre as referências do regulador de tensão, o problema apresentado nos geradores em questão inspirou a ideia de desenvolvimento de uma melhoria nos seguidores de referência, cujo intuito é à redução dos níveis de oscilação de tensão na comutação entre os reguladores. Isto é, deseja-se alcançar valores de erro de acompanhamento entres as referências de corrente de campo e tensão terminal o mais próximo possível de zero.

1.3 PROPOSTA DE SOLUÇÃO DA PROBLEMÁTICA

Baseado na proposta de melhoria dos seguidores de referência das UGH's da UHE de Tucuruí-PA na sua primeira casa de força, foi idealizado o protótipo seguidor de referência que se trata, basicamente, de um módulo a ser implementado no regulador de tensão que realiza a correlação e aproximação, em relação a um único valor correspondente à tensão do gerador, entre as referências de tensão terminal, aplicada ao modo automático do regulador de tensão, e corrente de campo, utilizada no regulador manual de tensão. Isso para que a troca entre os módulos de controle do regulador de tensão do gerador seja feita de forma suave, isto é, não deve haver diferenças notáveis no valor equivalente em tensão terminal entre os dois reguladores no momento da comutação.

O princípio de funcionamento do protótipo baseia-se na modificação da referência do módulo de controle do regulador que não se encontra diretamente ligado à malha de tensão terminal, em função da alteração da referência aplicada no módulo do regulador que assume de forma direta a malha de controle de tensão. Esta descrição de funcionamento é condizente com o funcionamento da versão original do seguidor de referência implantada nos geradores em questão. O diferencial do protótipo seguidor está na metodologia utilizada para realizar a característica apresentada.

Para que o princípio de funcionamento apresentado seja alcançado, torna-se necessário equivaler a referência do regulador em aguardo para a grandeza utilizada como referência no regulador que assume diretamente o controle da tensão terminal. Desta forma, deve-se então estabelecer uma função matemática que relacione estas duas variáveis, permitindo que a comparação entre as mesmas seja feita de forma coerente com as características físicas do gerador.

Basicamente trata-se de realizar a conversão de tensão terminal para um valor equivalente em corrente de campo ou vice-versa. Em máquinas elétricas que necessitam ser excitadas por corrente contínua para geração de um campo indutor para realizar a conversão eletromecânica de energia, a relação entre a corrente de campo e a tensão nos terminais da máquina forma uma sequência de curvas de magnetização que são alteradas de acordo com o ponto de operação do gerador. Neste trabalho buscou-se identificar as curvas características de magnetização dos geradores síncronos nos quais o problema relacionado com o seguidor de referência foi identificado. Os ensaios foram realizados na condição desconectada e conectada do sistema de potência, esta última foi repetida para diferentes valores de potência ativa.

Depois de comparar as referências dos reguladores de tensão, analisa-se a diferença gerada, a qual representa o erro de acompanhamento, para que a decisão de modificar ou não a referência do módulo em aguardo seja tomada. Assim o valor de referência no modo em aguardo deve ser lido e novamente comparado à referência da variável do módulo que assume a malha de tensão, iniciando um novo ciclo de acompanhamento que deve ser repetido com determinada frequência.

A estrutura na qual o protótipo é baseada, se dá na forma de uma malha fechada. Esta estrutura permite verificar continuamente se a ação de controle converge ou diverge, com relação à aproximação entre as referências dos dois reguladores para um mesmo valor de tensão terminal equivalente.

O protótipo seguidor referência foi idealizado de forma que seja implementado em um microcontrolador PIC, devido a maior flexibilidade em adaptar suas ferramentas à solução do problema em questão. Além disso, este dispositivo tem uma simplicidade relevante de utilização com baixo custo. A arquitetura formada centraliza no microcontrolador todas as informações necessárias, o que lhe permite gerar a ação de modificação ou não da referência utilizada no módulo em aguardo.

Mais detalhes sobre a forma que as ferramentas do microcontrolador foram adaptadas à necessidades funcionais do protótipo, são apresentadas no decorrer deste trabalho. Da mesma forma que se apresenta as ferramentas de circuitos utilizadas para criar uma interface do dispositivo digital e o regulador.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está organizado de acordo com a descrição dos capítulos a seguir.

No Capítulo 2, é apresentada uma descrição sucinta sobre as características de funcionamento dos geradores síncronos. A partir de então, analisa-se o sistema de excitação, onde suas partes constituintes mais importantes são descritas. E finaliza-se apresentando o seguidor de referência no contexto do regulador de tensão. Este capítulo tem o objetivo de apresentar os princípios necessários para o melhor entendimento do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 3, são descritos os ensaios realizados em um dos geradores síncronos de 350MW da primeira casa de força da usina hidroelétrica de Tucuruí-PA, com o intuito de identificar as curvas características de magnetização a serem utilizadas com transdutores na malha de controle do protótipo. Com os dados levantados, as curvas foram tratadas de forma unificada por meio de uma expressão matemática.

No Capítulo 4, projeta-se a proposta de construção do protótipo seguidor de referência microcontrolado. Apresenta-se, de forma mais específica, a descrição de como o protótipo seguidor de referência deve funcionar e passa-se para a descrição da adaptação das ferramentas do microcontrolador para os fins deste trabalho, o que gerou um programa proposto a ser embarçado no microcontrolador deste sistema. Abordam-se também, as ferramentas de circuito utilizadas do módulo físico do protótipo proposto.

No Capítulo 5, apresenta-se uma análise final e de forma integrada das informações apresentadas neste trabalho. Bem como, abordam-se as propostas de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos, dando continuidade ao tema abordado.

Capítulo 2

Geradores Síncronos Hidráulicos

2.1. ASPECTOS GERAIS

Os geradores síncronos produzem a maior parte da energia elétrica consumida no mundo, o que caracteriza a grande importância do estudo destas máquinas elétricas para compreensão de muitos fenômenos no sistema elétrico. Sua estrutura de construção pode ser dividida em dois tipos básicos: polos lisos, mais empregado para máquinas de alta rotação (1800 e 3600 rpm), ou de polos salientes utilizados para rotações inferiores a 1800 rpm. Além do uso como geradores, estas podem ser utilizadas como motores síncronos que manipulam ou participam de grandes linhas industriais para fabricação de bens e contribuindo para correção do fator de potência de grandes instalações (MOREIRA, 2010).

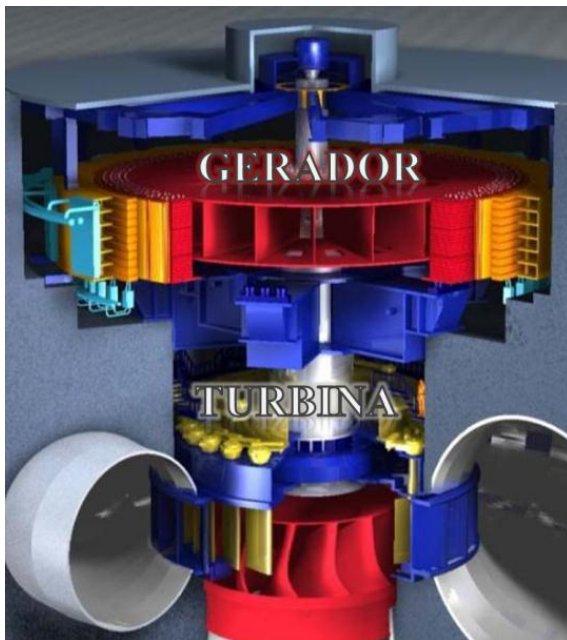
A arquitetura básica de um gerador síncrono é composta de um enrolamento de campo alocado na parte girante, ou rotor, e outro enrolamento denominado de estator, parte estática, que representa armadura trifásica onde são coletadas grandezas de saída: tensão e corrente. Os enrolamentos de campo são alimentados por um sistema de excitação em corrente contínua. Estes têm a função de gerar um campo magnético que interage, em função da movimentação da estrutura, com os enrolamentos dispostos no estator induzindo, assim, uma tensão terminal. A movimentação do rotor é realizada por meio da aplicação de energia mecânica a uma máquina primária que pode ser uma turbina hidráulica, a vapor, a gás, máquina de combustão interna, turbina eólica, entre outros.

Para geradores hidráulicos, a energia cinética do escoamento de água por dutos, denominados de condutos forçados, aplica o torque necessário à turbina hidráulica para a

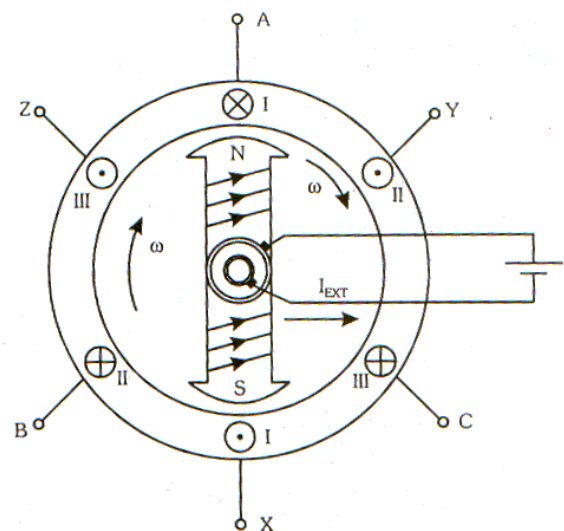
realização do movimento do rotor e, por consequência, o movimento dos enrolamentos de campo. A diferença de energia entre as perdas mecânicas e elétricas no conjunto gerador-turbina e a energia aplicada ao eixo da máquina é convertida em potência elétrica disponível na saída do gerador para suprimento de cargas conectadas a este. Ilustrativamente, a Figura 2.1a mostra o gerador acoplado à máquina primária, neste caso uma turbina hidráulica, enquanto que a Figura 2.1b mostra o arranjo funcional simplificado dos enrolamentos de campo e de armadura de um gerador síncrono.

Figura 2.1 – Esquema funcional de um gerador síncrono e máquina primária hidráulica.

(a) gerador síncrono e máquina primária



(b) rotor e estator do gerador síncrono



Fonte: ALBUQUERQUE, 2002.

Fonte: Adaptado de http://vivendoeletricidade.blogspot.com.br/2010_06_22_archive.html.

A potência elétrica surge em função da corrente elétrica nos enrolamentos do estator que, em contrapartida, também produz um campo magnético contrário ao sentido do campo produzido no rotor. Surge então um torque contrário ao movimento desequilibrando as forças no eixo do gerador e, como consequência, a velocidade de giro do campo é reduzida. A ação de controle do sistema de regulação de potência ativa e velocidade, ou simplesmente regulador de velocidade, é aplicar mais potência mecânica à turbina aumentando a vazão de água até que se atinja novamente o equilíbrio entre torque mecânico e elétrico. O atuador deste sistema de regulação, uma espécie de válvula para controle do fluxo de água disposta

em torno da turbina, é um conjunto de pás denominadas de distribuidor, para o caso das turbinas hidráulicas do tipo Francis e também do tipo Kaplan.

A intensidade da tensão medida nos terminais do gerador é basicamente função da frequência de giro do rotor e do fluxo magnético dos enrolamentos de campo (MORA, 2003). Considerando a operação em um sistema denominado de barra infinita, isto é, onde os parâmetros potência e frequência são na prática invariantes diante do porte do gerador, pode-se dizer que a frequência é constante e, portanto, a tensão é função somente do fluxo magnético, que por sua vez é diretamente proporcional a corrente aplicada ao enrolamento de campo.

Desta forma, a tensão terminal é regulada diretamente por meio da corrente de campo através de um sistema denominado de sistema de excitação. Este sistema possui uma malha de controle de tensão terminal do gerador cujo controlador é denominado de regulador de tensão. A relação corrente de campo e tensão terminal forma a curva de magnetização do gerador que sofre o fenômeno de histerese, por isso a relação é, no geral, não linear. O que gera algumas limitações com relação à zona na qual o gerador pode operar.

A ação do controle de tensão de redução ou aumento da mesma em relação à tensão mantida na barra do sistema na qual a máquina se encontra conectada, também controla a energia reativa fornecida ou absorvida pelo gerador, permitindo assim a regulação do fator de potência do gerador. A alteração da energia ativa provoca pequenas alterações na quantidade de energia reativa, uma vez que no modelo de gerador conectado a barramento infinito, estas duas variáveis são relacionadas pelo ângulo de carga que é o defasamento entre a tensão induzida e a tensão terminal (FITZGERALD, 2006). Mesmo assim a dependência entre a energia reativa e ativa pode ser desconsiderada, pois as variáveis são classificadas como de baixo acoplamento, permitindo assim gerar energia reativa e ativa de forma individualizada.

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Tomando uma visão macro do uso da máquina síncrona como gerador de energia elétrica, pode-se simplificar seu funcionamento para duas condições distintas: em vazio e com carga. A primeira situação remete ao estado quando em seus terminais não estão conectados a nenhuma carga elétrica. O modo de funcionamento com carga é caracterizado quando existe fluxo de potência na saída do gerador, ou seja, quando o gerador está alimentando a carga ou sistema ao qual está inserido.

Ainda existem as características de funcionamento para quando a máquina síncrona opera como compensador síncrono ou ainda quando a mesma é utilizada como motor. Cada modo de utilização tem suas peculiaridades, mas para os fins deste trabalho somente serão abordadas as características do funcionamento no modo gerador de energia elétrica.

2.2.1 Funcionamento em Vazio

O modo de funcionamento em vazio é utilizado para explicar o comportamento do gerador síncrono quando se encontra em regime permanente em relação ao controle de velocidade, isto é, à velocidade nominal, e não está conectado a nenhuma carga elétrica a qual deveria alimentar ou mesmo ligado ao sistema do qual faz parte. Neste caso, a frequência f com que as linhas de campo cortam os enrolamentos de estator é constante e, assim, a intensidade da tensão induzida é alterada apenas com a intensidade do fluxo magnético advindo do campo do rotor que, por sua vez, é função da intensidade da corrente contínua aplicada aos seus enrolamentos.

Segundo (MORA, 2003), o valor eficaz da tensão induzida E nos enrolamento do estator pode ser aproximada na forma da Equação 1. Onde K , denominada de constante de bobinamento, é utilizada para considerar a disposição das espiras no estator, bem como considera a eficiência como que as linhas de campo passam pelas mesmas; N é a quantidade de espiras por cada fase; e Φ_m é a magnitude do fluxo magnético proveniente do rotor.

$$E = 4,44KfN\Phi_m \quad (1)$$

O desejável é que a forma de onda da tensão induzida seja o mais próximo possível de uma senóide. Para que esta exigência seja atendida é preciso realizar uma distribuição do fluxo magnético no entreferro, entre rotor e estator, semelhante ao comportamento senoidal. Isto é obtido basicamente pela forma como os enrolamentos são distribuídos ao longo da superfície interna do estator. No caso da máquina de polos salientes, a geometria dos polos exerce influência acentuada na forma de onda do fluxo magnético. Já para máquinas de polos lisos, a indução aproximadamente senoidal é obtida pela forma como o enrolamento de campo é distribuído sobre a superfície do rotor e pela relação entre a parte em ranhuras e a parte lisa do rotor (KOSOW, 1982).

Uma característica importante para o funcionamento em vazio da máquina síncrona é a curva definida por $E = f(I_{exc})$, que expressa a tensão terminal E do gerador em função da

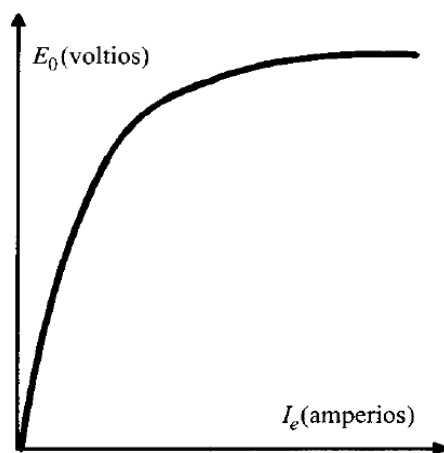
corrente de excitação I_{exc} . A determinação desta curva é dada de forma experimental, para o qual se faz necessário girar a máquina a velocidade de sincronismo por meio da máquina primária e então se deve modificar gradualmente a corrente de excitação, desde o valor mais baixo possível até um determinado valor máximo para o qual é observada saturação no valor de tensão induzida, e então se registrar o valor de tensão terminal para cada valor de corrente de excitação.

A interpolação linear do conjunto dos pares ordenados, formados por tensão terminal e corrente de excitação, constrói a curva característica de funcionamento do gerador síncrono em vazio cuja forma geral é apresentada pela Figura 2.2a. Na literatura se encontra uma discussão sobre como o ensaio de levantamento da curva em vazio deve ser feita, principalmente com relação ao efeito gerado pela histerese dos materiais ferromagnéticos presentes tanto no campo quanto no estator. Este fator causa diferença nos valores de tensão medidos de acordo com o sentido de variação da corrente de excitação, se no sentido crescente ou decrescente, e por consequência, altera a curva característica proporcionalmente ao grau de histerese dos materiais.

Segundo (BOLDEA, 2006), devem ser realizadas duas medições da tensão terminal, uma para a variação da corrente de excitação no sentido crescente e outra no sentido decrescente. A partir dos dados obtidos, a curva que melhor representa a característica em vazio da máquina é a curva média entre as duas medidas, como mostrado na Figura 2.2b. Nesta curva os valores de tensão terminal e corrente de excitação são mostrados em valores por unidade ou em p.u..

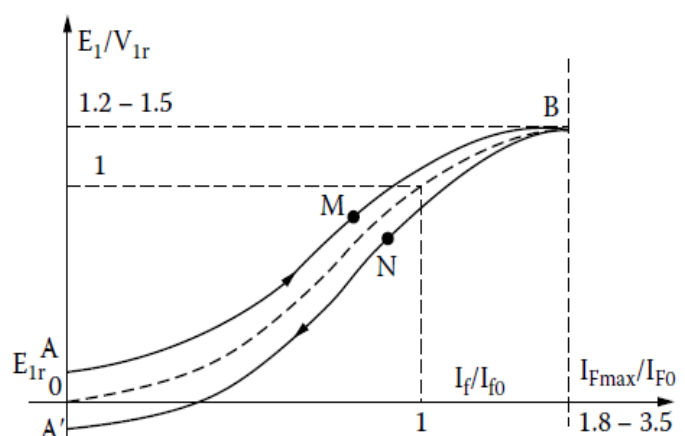
Figura 2.2 - Curva característica no modo de funcionamento em vazio

(a) Curva característica em vazio



Fonte: MORA, 2003.

(b) Levantamento da característica em vazio



Fonte: BOLDEA, 2006.

2.2.2 Funcionamento em Carga

O modo de funcionamento com carga vem tratar dos efeitos ocasionados, nas variáveis principais do gerador síncrono, pelo aproveitamento de potência na saída do gerador, levando em consideração a característica do fator de potência da carga e as considerando apenas como cargas lineares. Outras peculiaridades deste modo de funcionamento são relacionadas aos efeitos das dinâmicas transitórias de inserção e rejeição de carga, mas estes fenômenos estão fora do escopo deste trabalho e, por isso, não serão abordados.

A partir do momento em que potência útil é produzida na saída do gerador, em função da corrente elétrica nos enrolamentos de estator necessária para alimentar as cargas elétricas ou impedâncias ligadas a este, nota-se alteração do valor da tensão terminal com relação ao valor que se verificava em vazio, mesmo sem modificar a excitação. Além disso, é detectada variação na velocidade de giro do rotor, embora a regulação de velocidade não tenha atuado.

A modificação na tensão ocorre devido aos efeitos elétricos e magnéticos gerados pela passagem da corrente de carga nos enrolamentos de estator. Pode-se destacar, como principal efeito elétrico, o surgimento de uma diferença de potencial na impedância dos enrolamentos do induzido, denominada de impedância síncrona. Esta queda de tensão pode assumir um vetor de tensão aditivo ou subtrativo, com relação ao valor em vazio, dependendo do fator de potência da corrente de carga alimentada pelo gerador.

Analisando agora os efeitos magnéticos, pode-se explicar a modificação no valor de tensão por meio da interferência do campo magnético, gerado pela corrente de carga, na força magneto motriz (f.m.m.) do campo indutor alterando o fluxo magnético no entreferro (FITZGERALD, 2006). Este efeito é denominado de reação do induzido e sua influência sobre o campo indutor pode provocar elevação ou redução do campo de excitação do gerador e, portanto, na tensão induzida dependendo do ângulo do fator de potência da corrente de estator.

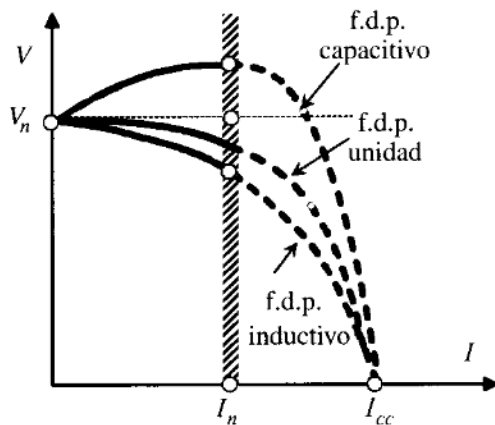
Nota-se então que o comportamento da tensão terminal é expandido como função não apenas da corrente de campo, como identificado para o funcionamento em vazio, mas também da corrente de carga e seu respectivo fator de potência. Pode-se explicar esta característica por meio de pelo menos duas curvas distintas: uma mostrando individualmente o efeito provocado na tensão terminal em função da corrente de carga, para os diferentes tipos de fatores de potência e considerando um valor de corrente de campo constante, como é mostrado na Figura 2.3a; a segunda curva exhibe o comportamento da tensão terminal em função da corrente de

campo considerando um valor fixo de corrente de carga, como é mostrado na Figura 2.3b. Nesta segunda curva também se pode mostrar o efeito para os diferentes tipos de fatores de potência, no entanto mostra-se somente para o caso de um fator de potência puramente indutivo.

A tensão terminal do gerador síncrono é modificada em função da corrente de carga e, analisando este comportamento com a excitação constante, nota-se pelas curvas apresentadas na Figura 2.3a que a variação da corrente de carga tende a aumentar a tensão terminal para fatores de potência adiantados, enquanto que para o caso dos demais fatores de potência, há uma tendência de queda da tensão, sendo que esta acentuada para fatores de potência indutivos. É importante destacar que esta análise é válida quando se verifica as curvas da Figura 2.3a desde valores nulos de corrente de carga até o seu valor nominal, pois, a partir deste ponto, as curvas são extrapoladas de forma que se possa ilustrar uma tendência para o comportamento do gerador até o ponto em que seus terminais são curto-circuitados, quando a tensão terminal passa é nula.

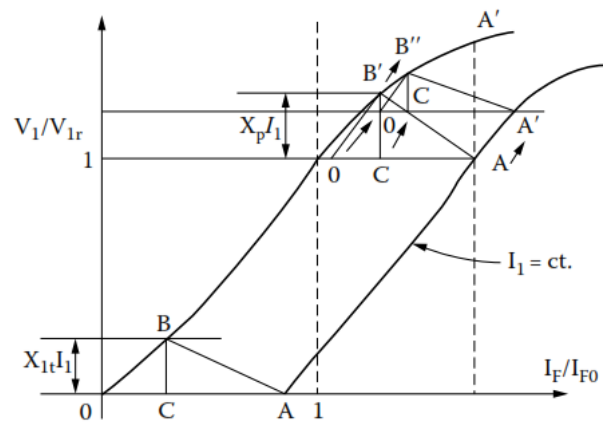
Figura 2.3 – Curvas características no modo de funcionamento em carga

(a) Tensão terminal em função da corrente de carga para três fatores de potência.



Fonte: MORA, 2003.

(b) Tensão terminal para em função da corrente de campo para corrente constante.



Fonte: BOLDEA, 2006.

A característica de funcionamento em carga do gerador, em relação a corrente de campo constante, apresenta uma curva semelhante à mostrada para o caso em vazio, no entanto a curva é deslocada devido ao desbalanço no valor do fluxo magnético resultante no entreferro provocado pela reação do induzido. Na Figura 2.3b ocorre um deslocamento inferior da curva em vazio proporcional a queda de tensão sobre a reatância síncrona. Estendendo o comportamento verificado para um fator de potência resistivo, baseado nas

curvas da Figura 2.3a para corrente de armadura nominal, pode-se dizer que o deslocamento da curva em vazio tende ainda a ser inferior, no entanto menos acentuado que o indutivo. De modo análogo, o fator de potência capacitivo tende a deslocar a curva em vazio para cima, o que se justifica por aumentar o fluxo magnético resultante no entreferro.

A combinação dos efeitos mostrados na Figura 2.3 compõe, na realidade, a determinação da tensão terminal por meio de uma função da corrente de campo e corrente de carga, o que forma uma superfície de tensão terminal. Quando o fator de potência da carga é modificado, a superfície é alterada, por isso tem-se na realidade um conjunto de superfícies de tensão para os diferentes fatores de potência.

2.3. SISTEMA DE EXCITAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

A função básica de um sistema de excitação é manter constante a tensão nos bornes de saída do gerador em um valor desejado por meio da correção da corrente contínua aplicada aos enrolamentos de campo. Esta correção é realizada por uma malha de controle de tensão composta por alguns subsistemas de controle auxiliares que realizam funções específicas de grande importância não somente para a máquina, mas também para o sistema elétrico de potência.

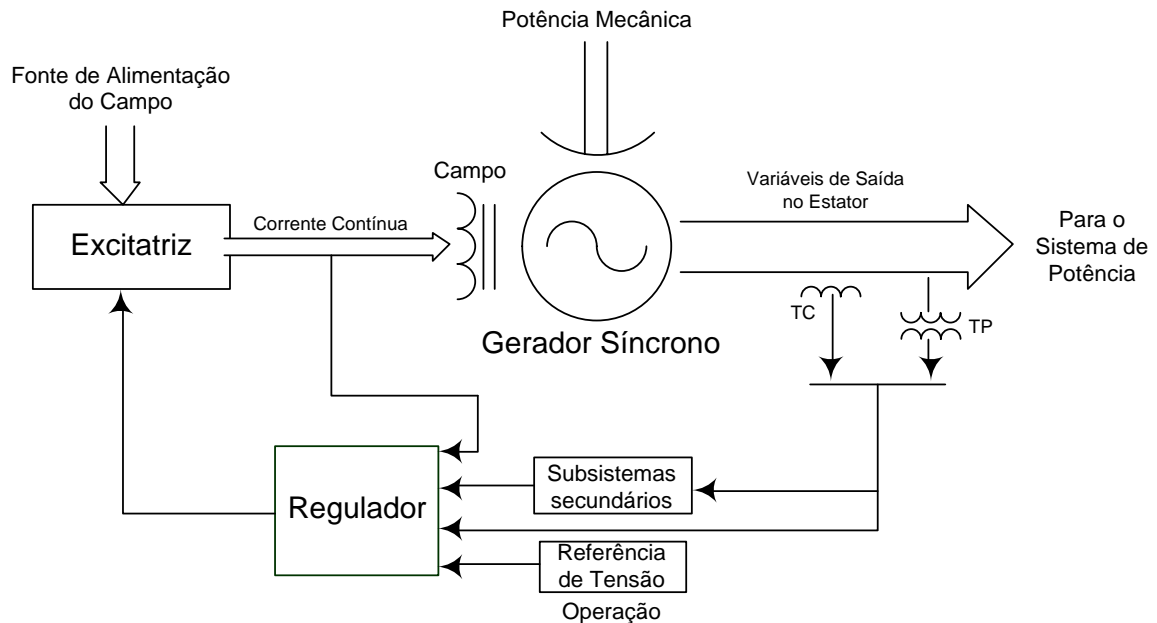
Tomando o sistema de potência como referência, o sistema de excitação tem importante função para com a estabilidade do mesmo, pois a malha de controle pode intervir gerando sinais que auxiliam em situações convenientes. Já na perspectiva do gerador, o sistema de excitação é indispensável para manter a operação do mesmo dentro de uma região que respeita os limites da curva de capacidade, principalmente em se tratando da estabilidade da máquina síncrona e inibição do superaquecimento de partes do gerador em diferentes condições de operação. A manutenção do funcionamento é realizada em conjunto com o sistema de controle de potência ativa.

A composição funcional básica de um sistema de excitação pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 2.4, onde são destacados regulador de tensão, o amplificador de potência, ou excitatriz, e outros subsistemas que realizam funções secundárias, mas de grande valia para o conjunto, como por exemplo, limitação das variáveis do gerador, compensação de carga, estabilização do sistema de potência e proteção dos componentes da máquina.

Pode-se destacar o regulador de tensão e a excitatriz como dois dos principais elementos do sistema de excitação, pois representam a malha de controle principal. O

regulador, ou controlador, de tensão é responsável por realizar a comparação da tensão terminal da máquina com a referência ou valor desejado, gerando assim um sinal de erro que serve de entrada de um algoritmo de controle cuja saída tende a forçar a tensão terminal ao valor almejado, isto é, tende a zerar o sinal de erro.

Figura 2.4 – Diagrama funcional do sistema de excitação de um gerador síncrono



Fonte: Adaptado de KUNDUR, 1994.

O sinal gerado pelo controlador é somado a sinais adicionais gerados pelos subsistemas secundários do regulador de tensão. Isso representa a ação dos limitadores que buscam manter o gerador operando sempre dentro de seus limites físicos, isto é, dentro da curva de capacidade. O sinal resultante desta somatória deve ser aplicado na excitatriz, para que seja amplificado, de forma que um valor de corrente contínua, capaz de gerar o campo indutor necessário para a correção da tensão da máquina, seja aplicado ao enrolamento do rotor.

Os subsistemas destinados à limitação dos valores das variáveis do gerador e também os subsistemas destinados à proteção do mesmo possuem uma vasta gama de funções que têm como objetivo restringir os valores de potência ativa e reativa que não ultrapassem os limites da máquina. Pois caso isso ocorra, isto pode implicar em, por exemplo, superaquecimento de enrolamentos de estator ou rotor, instabilidade do gerador, entre outros.

Um dos subsistemas secundários mais notáveis da excitação do gerador é o estabilizador de sistema de potência, ou simplesmente ESP, que tem como principal função aplicar sinais extras ao controle de tensão, de tal forma que sejam atenuadas as oscilações eletromecânicas de baixa frequência geradas pelo acoplamento dos geradores ao sistema elétrico de potência.

A compensação de carga é utilizada para corrigir a tensão em um ponto de referência longe dos terminais do gerador, corrigindo a energia reativa consumida por elementos entre o gerador e o ponto em questão. Um exemplo típico é a compensação de carga para o transformador elevador que separa o gerador do barramento do sistema.

Outros subsistemas podem ser encontrados nos reguladores de tensão dependendo do nível de potência, condições de estabilidade do sistema, entre outros fatores peculiares à aplicação. No entanto, os diferentes tipos e arquiteturas de sistema de excitação se diferenciam basicamente na forma com que o regulador de tensão e a excitatriz são estruturados. Os fatores que podem interferir na escolha da combinação mais adequada para determinada aplicação são, por exemplo, o tempo de resposta, resistência às condições de instalação, a eficiência e precisão.

2.4. EXCITATRIZES

A excitatriz é na realidade um amplificador de potência pelo qual o sinal de controle, proveniente do regulador de tensão, é convertido em um valor de corrente contínua aplicado diretamente aos enrolamentos de campo, de tal forma que o fluxo magnético produzido seja suficiente para induzir uma tensão terminal igual ao valor desejado. Os valores nominais de corrente de campo podem chegar a alguns milhares de Ampère, como é o caso dos geradores síncronos encontrados na casa de força 1 da usina hidroelétrica localizada em Tucuruí, a qual apresenta 12 unidades de 350MW de potência cujo campo indutor é alimentado com corrente nominal em torno de 1,8 a 2 kA.

O processo físico pelo qual o sinal de controle é convertido em corrente contínua depende da arquitetura da excitatriz, isto é, depende da forma com que a corrente é gerada e também da maneira pela qual a mesma é regulada. Em busca de respostas mais precisas e velozes, por maior eficiência, entre outros pontos, a arquitetura da excitatriz vem sofrendo modificações desde que os primeiros sistemas foram desenvolvidos na década de 1920.

Nos sistemas de excitação mais antigos a corrente necessária era gerada através de uma excitatriz rotativa, onde geradores auxiliares, podendo estes ser de corrente contínua (CC), para excitatrizes CC, ou corrente alternada (CA), para excitatrizes CA, eram acoplados ao eixo da máquina principal juntamente com o sistema que propicia a regulação da corrente CC em função do sinal de controle, também chamado de atuador da excitatriz. Os sistemas mais modernos, denominados de excitatrizes estáticas, utilizam semicondutores de potência controlados ou tiristores, que convertem a tensão alternada, oriunda de uma derivação dos terminais de saída do gerador, em um valor em corrente contínua proporcional ao seu ângulo de disparo (AHMED, 2000).

2.4.1. Excitatrizes de Corrente Contínua ou CC

Neste tipo de excitatriz, um gerador de corrente contínua (CC) é utilizado para produzir a corrente requerida aos enrolamentos de campo da máquina síncrona para a formação do campo indutor. O eixo deste gerador é acoplado ao eixo do gerador principal, tendo estes, portanto, a mesma máquina primária cuja variação de velocidade pode ser desprezada. Sendo assim, a corrente gerada pela excitatriz depende basicamente da corrente que alimenta o campo da mesma, por isso esta é a variável modificada pelo regulador para a variação da tensão terminal do gerador.

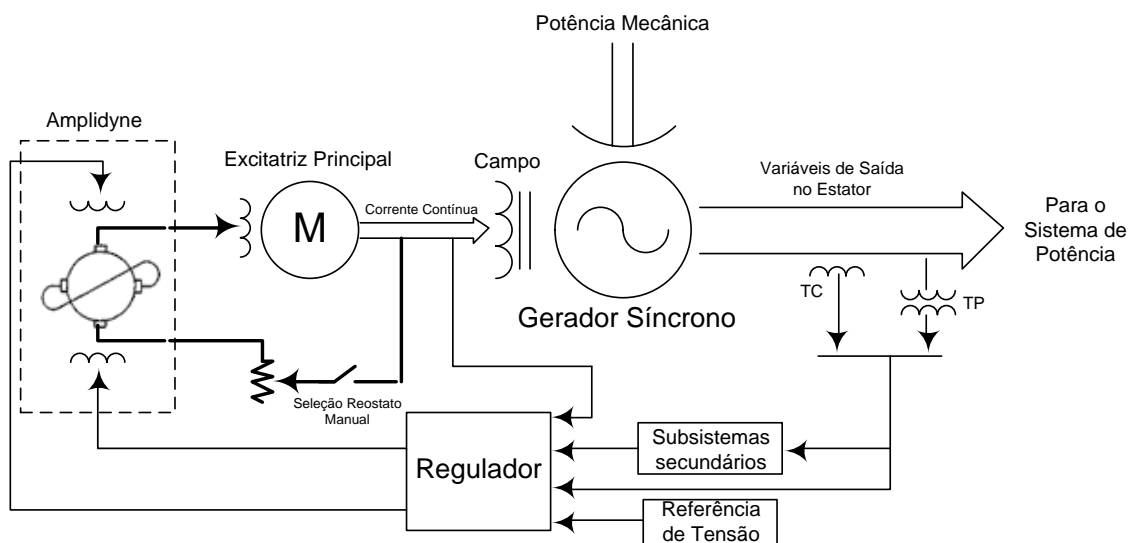
Os métodos antigos de regulação da corrente de campo da excitatriz utilizavam um reostato para controle e obtinham a corrente contínua necessária por meio de uma derivação da própria armadura do gerador auxiliar. No entanto, devido ao aumento de potência dos geradores e a necessidade de respostas mais rápidas, o sistema de excitação deixou de ser realimentado para utilizar um segundo gerador, chamado excitatriz piloto, que é relativamente de menor porte que a excitatriz principal. O ponto onde se insere controle passa a ser sobre a corrente de campo do menor gerador, por questão de simplificação, tendo como benefícios maior amplificação do valor de corrente inicialmente utilizado, além disso, se encontra um tempo de resposta menor se comparado com o sistema realimentado.

Na Figura 2.5 é mostrado um diagrama funcional do sistema de excitação CC que utiliza a arquitetura de construção com excitatriz piloto. Esta última é construída em uma estrutura especial denominada *Amplidyne*, que permite o controle do campo da mesma com baixos valores de corrente. Isso gera um ganho de amplificação de corrente na ordem de 10 a 100 mil vezes em relação ao valor inicialmente aplicado no campo da excitatriz piloto

(KUNDUR, 1994). Na situação em que a malha de controle de controle falhar, a regulação de tensão poder ser realizada manualmente por meio do ajuste de um reostato, este regula o valor de corrente de campo da máquina piloto que é proveniente de uma derivação da saída do primeiro gerador CC.

Em tese existe a possibilidade de criar uma sequência de geradores CC, um gerador menor alimentado o campo do maior até que se tenha a corrente necessária para alimentar o campo do gerador síncrono, independentemente do nível de potência da máquina principal. No entanto, a utilização de geradores auxiliares de corrente contínua mostra pontos negativos conforme se aumenta o porte do gerador. Com elevado número de manutenções, devido a utilização de escovas de carvão nos contatos deslizantes; dificuldades no acoplamento de grandes maquinas DC ao eixo do gerador, que podem rodar a velocidades elevadas como no caso dos turbo geradores; entre outros fatores que contribuíram na gradativa substituição deste tipo de excitatriz por excitatrizes CA.

Figura 2.5 – Diagrama funcional de sistema de Excitação com excitatriz CC



Fonte: Adaptado de (KUNDUR, 1994).

2.4.2. Excitatrizes de Corrente Alternada ou CA

A excitatriz do tipo CA utiliza um gerador de corrente alternada para gerar a corrente necessária à formação do fluxo indutor nos enrolamentos de campo. Esta corrente CA gerada é convertida em corrente contínua através de uma ponte de retificadores semicondutores, que pode ser controlada ou não. O gerador auxiliar pode, não necessariamente, ser acoplado ao

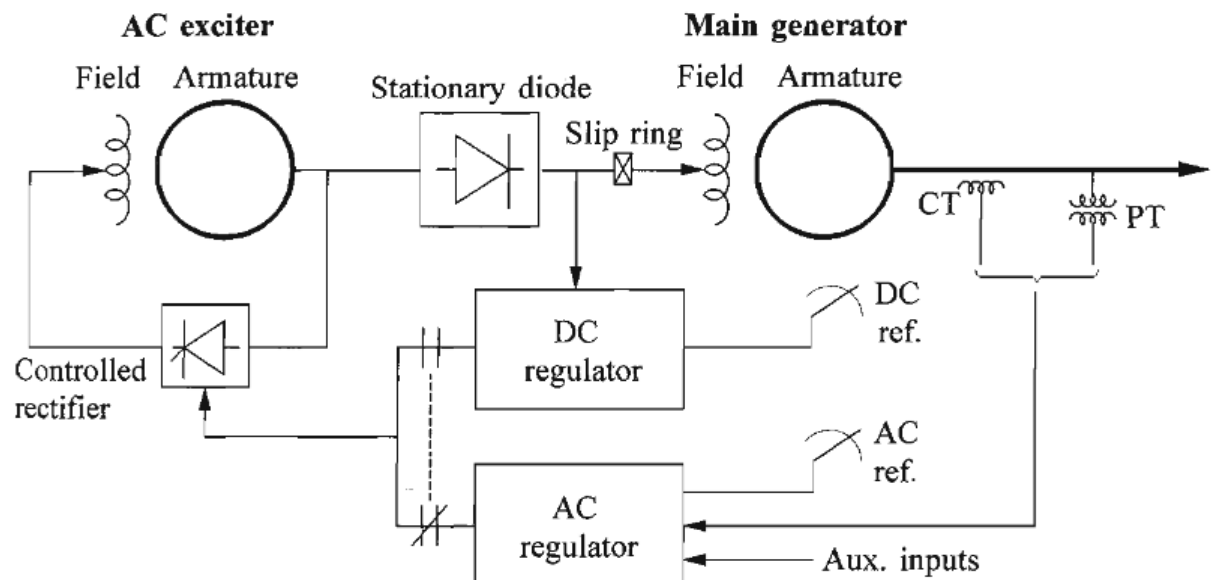
eixo do gerador principal. Enquanto que a ponte retificadora pode ser girante, ligada ao rotor, ou estática.

Para sistemas de excitação que utilizam ponte não controlada, a regulação do valor de corrente rotórica é realizada por meio do campo da excitatriz, que por sua vez controle a tensão de saída da excitatriz. A alimentação do campo da excitatriz pode ser feita através de uma excitatriz piloto ou mesmo por meio de realimentação de sua saída.

Nos casos em que se utilize uma excitatriz piloto de corrente alternada ou mesmo quando se realimenta o campo da excitatriz com sua saída, são utilizados retificadores controlados de potência onde o regulador de tensão atua diretamente. Quando utilizada excitatriz piloto de corrente contínua, o sistema de controle da excitação da excitatriz é semelhante ao descrito como arranjo *Amplidyne* na secção 2.4.1.

Na Figura 2.6 é exibido um diagrama de um sistema de excitação CA cujo campo da excitatriz é alimentado por meio de uma derivação de sua própria saída, intermediada por uma ponte de retificadores controlados pelo regulador de tensão. Assim como apresentado para excitatrizes CC, surge um segundo módulo de controle no caso de manutenção ou problemas na malha de controle comum de tensão, o controle manual que toma como referência não a tensão terminal e sim a corrente CC de campo para controle.

Figura 2.6 – Diagrama funcional de sistema de Excitação com excitatriz CA



Fonte: KUNDUR, 1994.

De acordo com (KUNDUR, 1994), a principal desvantagem do sistema de excitação CA é a grande demanda por manutenção devido a problemas relacionados aos anéis

deslizantes e às escovas de carvão, necessários para a condução da corrente CC dos retificadores para o campo do gerador, pois o sistema descrito tem semicondutores estacionários em relação ao rotor da máquina síncrona. Esta dificuldade foi superada com o desenvolvimento de um sistema de excitação CA sem escovas (*Brushless*) que tem, como principal característica, retificadores de campo girando juntamente com o rotor do gerador principal. A principal desvantagem para o sistema rotativo está na elevada força centrífuga a qual os retificadores ficam propensos, assim como outros equipamentos que também necessitam ser acoplados ao rotor do gerador.

2.4.3. Excitatrizes Estáticas

Na excitação estática, não existe a necessidade de se utilizar geradores auxiliares como no caso das excitatrizes de corrente contínua e de corrente alternada. A corrente necessária para alimentação dos enrolamentos de campo é extraída através de uma derivação da saída trifásica do próprio gerador. Enrolamentos auxiliares são, algumas vezes, utilizados para gerar a corrente necessária ao campo.

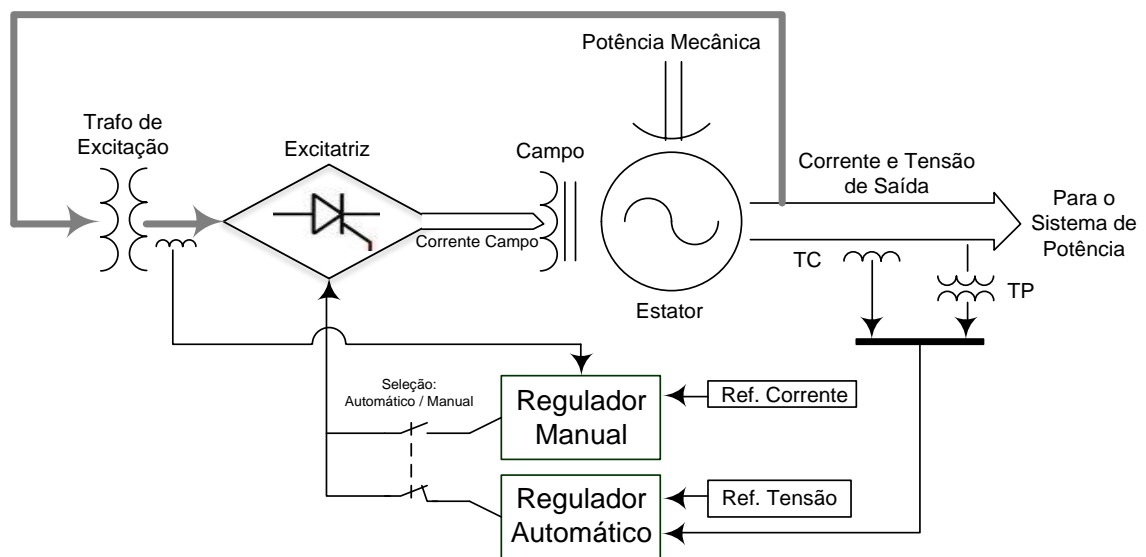
Um transformador de excitação é utilizado para rebaixar a tensão terminal da máquina a um nível de trabalho aceitável pela ponte totalmente controlada de retificadores, que faz interface direta com os enrolamentos do rotor. Em alguns casos a alimentação da ponte retificadora é feita por meio de um barramento auxiliar. Na Figura 2.7 um diagrama esquemático mostra o funcionamento do sistema de excitação que utiliza excitatriz estática como anteriormente descrita.

Como a alimentação dos retificadores é realizada através de fontes CA trifásicas, a configuração mais utilizada é a de ponte completa a seis pulsos, na qual o valor médio da tensão de saída, isto é, o valor CC, é dado em função do ângulo de disparo de cada tiristor. A excitatriz estática é formada por um conjunto de pontes retificadoras conectadas em paralelo, com o objetivo de dividir por igual o valor da corrente CC total de campo e também para possibilitar a manutenção de alguns retificadores sem prejuízo do funcionamento do gerador síncrono.

A estratégia de excitação estática é utilizada nos hidro geradores da UHE de Tucuruí, para a qual um conjunto de quatro pontes retificadoras trifásicas totalmente controladas, denominadas de armários de tiristores, são ligados em paralelo e sincronizadas em relação ao disparo dos tiristores. Cada um dos seis braços da ponte é construído com dois tiristores

ligados em série disparados ao mesmo tempo, na intenção de dividir a tensão reversa sobre cada elemento, dando maior garantia do bloqueio de condução do ramo do retificador em momentos inoportunos. A composição básica de cada ramo da ponte retificadora é feita pelos componentes descritos a seguir. Na Figura 2.8 é mostrada uma ilustração da ponte retificadora trifásica juntamente com seus componentes básicos.

Figura 2.7 – Sistema de Excitação com excitatriz estática autoalimentada por Trafo de excitação.

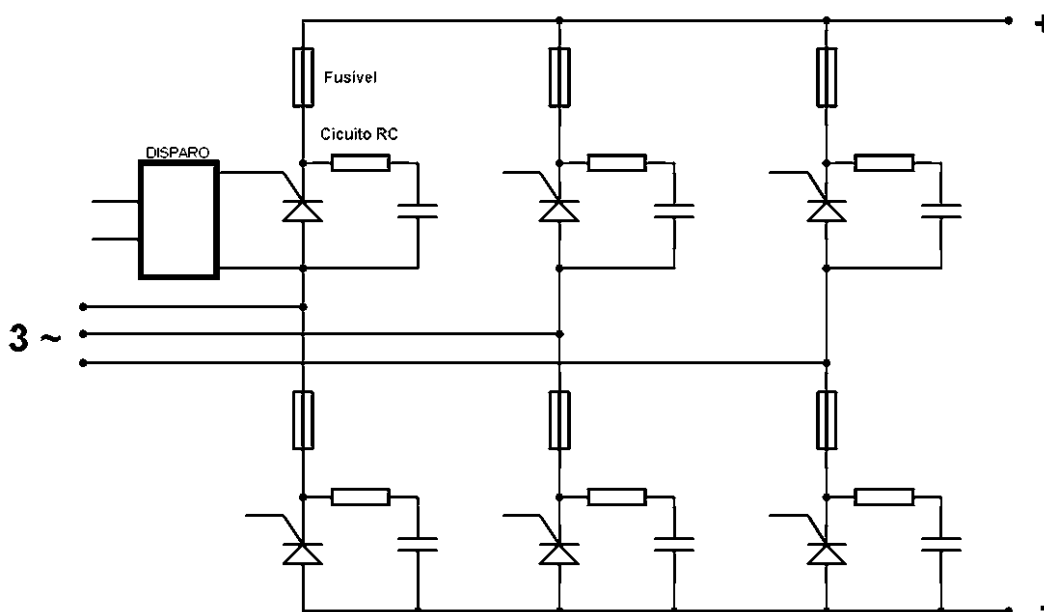


Fonte: Adaptado de (KUNDUR, 1994).

- **Circuito de disparo do tiristor:** possui uma série de componentes que, basicamente, tem a função de converter o sinal de controle vindo do regulador de tensão em um ângulo de disparo correspondente a faixa de operação dos semicondutores tiristorizados que compõem as pontes retificadoras. O ângulo calculado determina o momento do ciclo trifásico no qual cada tiristor deve operar para que o valor correto de corrente CC seja obtido. Produz-se então um pulso de disparo aplicado ao terminal *gate* do semicondutor.
- **Fusíveis de alta velocidade** são fusíveis de fusão rápida, colocados em série com o tiristor, que tem características adequadas de corrente/tempo utilizados para proteger os tiristores durante um curto-circuito nos terminais DC da ponte e também para isolar um tiristor defeituoso.

- **Os circuitos RC**, ligados em paralelo sobre o ânodo e o cátodo de cada tiristor, fornecem uma proteção contra valores excessivos de (dv/dt) , que pode provocar disparos indesejados ou a sua destruição, e sobre tensões transitórias, que aparece aos seus terminais durante a passagem do estado condutor ao bloqueio, sob a ação da eliminação rápida da corrente inversa.

Figura 2.8 – Ponte retificadora controlada trifásica e seus circuitos relevantes



Fonte: Adaptado de (MOREIRA, 2010).

Uma das principais vantagens da excitatriz estática é o ganho em velocidade de resposta do sistema de excitação, o que contribuiu imensamente com a melhoria na sustentação da estabilidade dos sistemas elétricos de grande potência. Isso se deve ao fato de que os únicos atrasos existentes neste sistema são na filtragem da tensão terminal e no disparo dos tiristores. A redução na demanda de manutenção também configura um ponto positivo para a excitação estática, no entanto ainda se tem problemas relacionados com o uso de anéis deslizantes para levar a corrente aos enrolamentos de campo.

O fato da tensão de entrada à ponte de retificadores ser diretamente ligada a tensão terminal do gerador, sem que haja controle individual desta variável como ocorria com o uso dos geradores auxiliares, implica em problemas quando em situação de falta no sistema causando rebaixamento de tensão. Esta dependência da tensão terminal para a excitação tem limitação de ser aplicada na partida na máquina, pois ainda que haja nível de magnetização remanente elevada, esta não é suficiente para prover a excitação inicial do gerador a fim de

que a tensão nominal seja alcançada. Utiliza-se uma fonte auxiliar, ou mesmo um banco de baterias, para alimentar o campo até que se obtenha um valor de tensão terminal que possibilite ao campo induzir a tensão terminal em realimentação.

Existem outras arquiteturas de excitatrizes estáticas que utilizam transformadores de corrente saturáveis para controlar o valor útil da corrente CA, derivada dos enrolamentos do estator, a ser aplicada em uma ponte de retificadores não controlados. Além disso, uma derivação da tensão de saída do gerador era feita a fim de suprir a corrente necessária ao campo em condições sem carga, isto é, corrente nula nos enrolamentos de estator, o que inviabiliza somente o uso do transformador de corrente. Este sistema serviu de alternativa às excitatrizes rotativas anteriormente ao advento dos tiristores na década de 1960.

2.5. REGULADOR DE TENSÃO

O regulador de tensão é o responsável pela manutenção do valor da tensão terminal do gerador, independente das condições do sistema no qual a máquina está conectada ou mesmo do comportamento do próprio gerador ou carga elétrica. É também de responsabilidade do regulador de tensão o controle do nível de potência reativa gerada, desta forma, implicando que o nível de tensão é constantemente alterado para suprir as oscilações na demanda de reativo por parte do sistema.

O algoritmo de controle utilizado no regulador é, na maioria das aplicações, um controlador linear geralmente de arquitetura PID (Proporcional, Integral e Derivativo), devido a sua simplicidade de projeto e sintonia, bem como por sua característica de atender boa parte das especificações do projeto com elevada robustez às pequenas variações. Os controladores mais antigos eram implementados por meio de circuitos analógicos, como é o caso dos hidro geradores da casa de força 1 da UHE de Tucuruí, que ainda têm excelente desempenho com reguladores analógicos, para os quais este trabalho é direcionado. No entanto, os reguladores mais modernos vêm sendo construídos em plataformas digitais, onde um microprocessador soluciona as equações de diferenças que dinamicamente aproximam a resposta do controlador analógico. Reguladores digitais de tensão são encontrados nas máquinas da Etapa II da UHE Tucuruí.

No item 2.4 foi introduzida a descrição sobre o funcionamento do regulador de tensão, para os diferentes tipos de excitatrizes utilizadas, basicamente como em dois modos distintos: manual e automático. No controle manual, o objetivo é a regulação da corrente de campo da

máquina, isto é, manter constante o campo indutor, o que indiretamente deve regular a tensão de saída do gerador. Mas esta malha de controle não leva em consideração a dinâmica de indução de tensão que podem acarretar em sérios problemas de estabilidade de tensão para a unidade geradora em meio a perturbações.

Em caráter mais rigoroso, entende-se que no modo de operação manual a malha de tensão encontra-se aberta ou não controlada. Além disso, este tipo de controle não realiza o controle direto sobre a grandeza tensão terminal e também não apresenta limitadores que garantam o funcionamento dentro da curva de capacidade, por isso não é viável para operação padrão, no entanto, é necessário em determinadas situações como para casos de falhas do regulador automático ou ainda para testes do sistema de excitação.

O modo configurado com padrão na regulação de tensão é o automático, e por isso o regulador de tensão é, muitas vezes, referido apenas como *regulador automático de tensão* (RAT), considerando que o *regulador manual* (RM) é utilizado extraordinariamente. Como o controlador do regulador automático toma diretamente como referência a tensão terminal, as implicações negativas da desconsideração de alguns fatores dinâmicos feita pelo controle manual são superadas, tendo em vista que perturbações nos valores de tensão são adicionadas diretamente na malha de controle. Assim a ação do controlador melhora as reações do gerador que contribuem para a estabilidade de tensão.

Em condições de teste utiliza-se o regulador manual de tensão devido às menores restrições quanto a modificação dos valores de algumas variáveis importantes do gerador. Isto é, no regulador manual o intervalo de valores no qual se pode modificar a tensão terminal é maior se comparado ao RAT, onde a faixa de variação da tensão terminal é de $\pm 10\%$ entorno do valor nominal da máquina (13,8 kV). No RM a variação somente é restrita aos limites de sobre e sub excitação, o que permite alcançar valores de tensão entre 0kV até 110% do valor nominal ou 15,18kV, na situação em que se utiliza uma fonte externa para alimentar a excitatriz do sistema de excitação.

O regulador de tensão recebe com entrada o sinal de referência de tensão, ou valor desejado, e também o valor da tensão terminal do gerador ou a corrente de campo, dependendo do modo de funcionamento (o regulador recebe outros sinais devido aos subsistemas auxiliares do sistema de excitação), por meio destes é gerado o sinal de erro da variável a ser controlada. O algoritmo dinâmico recebe o sinal de erro e gera um sinal de controle que, após ser amplificado por meio da excitatriz, produz um efeito que altera a tensão

terminal para o valor aplicado como referência na malha de controle, mas respeitando os limites de funcionamento do gerador.

Dentre os requisitos básicos que um regulador de tensão deve atender a nível primário, isto é, para o gerador, pode-se destacar a elevada velocidade de correção das perturbações, ou pequeno tempo de resposta, e também a possibilidade de realizar divisão da demanda de potência reativa, permitindo que vários geradores trabalhem em paralelo. Outros níveis de controle de tensão são encontrados para a formação do controle coordenado de tensão, que visa um controle de tensão em nível da instalação e não somente do gerador, como o controle secundário de tensão, que leva em consideração barras remotas do sistema, e também o controle terciário de tensão, que busca a otimização do fluxo de potência reativa.

A velocidade de resposta diante de uma perturbação, ou mesmo diante de uma mudança de referência de tensão por parte de um operador ou controlador de instância superior, está diretamente ligado ao algoritmo e sintonia do controlador. É sempre desejável que o tempo de resposta seja tão pequeno quanto possível para reduzir os fenômenos transitórios na tensão de saída. Enquanto que a possibilidade de operação de vários geradores conectados em paralelo em um mesmo local está associada ao controle conjunto de potência reativa, comumente denominado de *JVC (Joint Voltage Control)*. Esta característica do regulador de tensão permite a regulação da tensão na barra de alta tensão na qual os vários geradores estão conectados, evitando fluxos de energia reativa indesejados entre os geradores.

2.6. SEGUIDOR DE REFERÊNCIA

No Item 2.5 abordou-se a característica de funcionamento do regulador de tensão como em dois modos, o manual e o automático. Conjuntamente foram apresentadas as vantagens de se utilizar desta estratégia para situações específicas como, por exemplo, a realização de testes no sistema de excitação, e também algumas desvantagens em relação ao controle de tensão por meio da corrente de campo. Adicionado a isto, há também desvantagens relativas, principalmente, à mudança da variável utilizada como referência na malha de controle, isto é, a mudança do controle da tensão terminal para a corrente de campo ou vice-versa. O que é decorrente da possibilidade de haver comutação entre os modos de funcionamento no momento em que o gerador está em pleno funcionamento conectado ao sistema.

Como as malhas de controle manual e automática são praticamente independentes uma da outra, a mudança no valor da referência da variável controlada, equivalente à um valor em tensão terminal, no modo de regulação em funcionamento, que ocorre devido a diretrizes operativas, não é acompanhada de maneira ideal pela malha de controle em retaguarda. Em função disto, o valor de referência de corrente de campo, configurado no RM, pode gerar um valor de tensão terminal com um ΔV de diferença em relação ao valor configurado no regulador automático, quando em uma comutação entre os modos de controle. Esta diferença de tensão terminal ΔV pode atingir valores indesejados e, por consequência, implicar em variações na geração de energia reativa no momento da comutação.

As possíveis variações de energia reativa na comutação dos modos de funcionamento, como são realizadas fora do plano de geração, são interpretadas como perturbações ao sistema elétrico, que por sua vez afetam principalmente as demais máquinas conectadas em paralelo, pelo critério de proximidade, causando fluxos de energia reativa indesejados, o que pode gerar uma série de problemas às unidades geradoras. Este efeito negativo tem influência na estabilidade de tensão local quando se trata poucas máquinas apresentando o problema de erro na referência de tensão terminal. No entanto, o modo de funcionamento descrito para o sistema de excitação é largamente utilizado nos geradores síncronos, possibilitando ocorrer, de forma mais generalizada no sistema, as oscilações de tensão durante a permuta entre os reguladores de tensão, podendo este ter sua estabilidade seriamente comprometida.

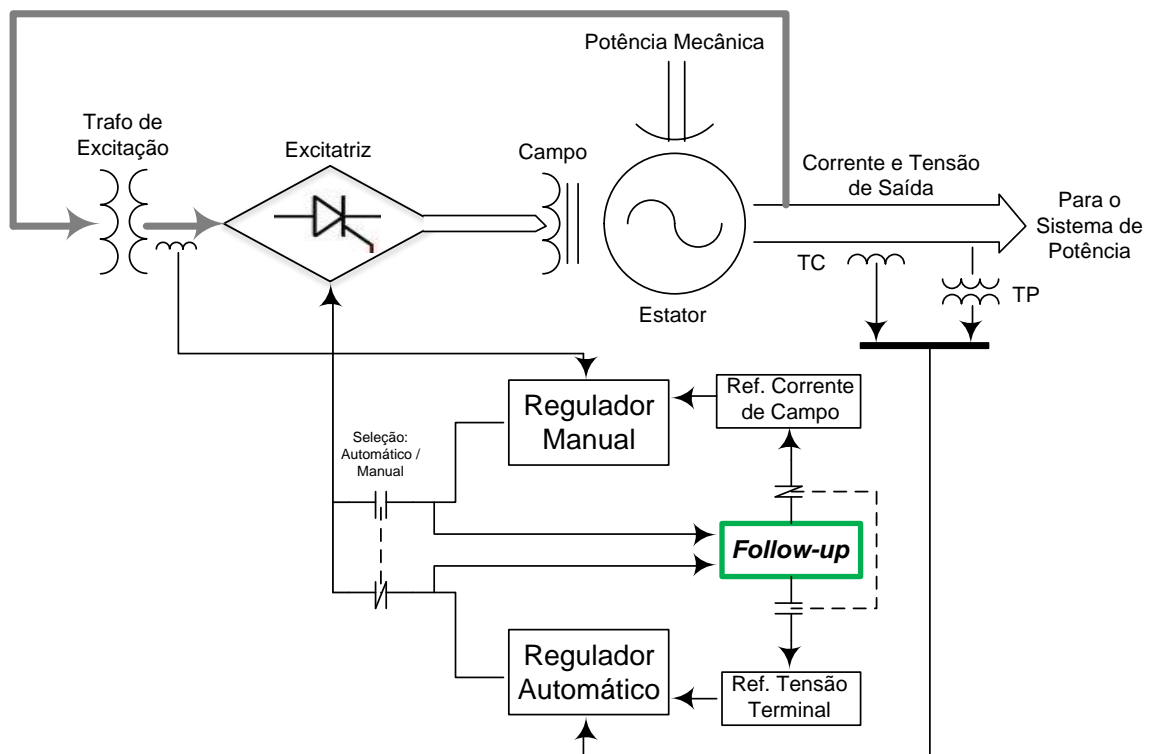
Para se resolver, ou ao menos atenuar, os problemas relacionados à geração do ΔV de tensão terminal na comutação dos modos do regulador de tensão, foi desenvolvido uma estratégia de rastreamento da mudança de referência de um módulo de controle e, em função disto, a referência do outro módulo é modificada. Esta estratégia recebe o nome de seguidor de referência ou, como é originalmente conhecido, *Follow-up*, que pode funcionar de forma uni ou bidirecional. Quando unidirecional, este rastreia a mudança de referência de tensão apenas do regulador automático e modifica a referência de corrente de campo no regulador manual. No caso bidirecional, a mudança de referência é rastreada no regulador que assume a malha de controle e modifica a referência do outro módulo de controle, independente deste ser o regulador automático ou manual.

Na Figura 2.9 verifica-se o diagrama funcional do sistema de excitação utilizados nos hidro geradores da UHE Tucuruí, como anteriormente mostrado, acrescido do seguidor de referência que, para esta aplicação, tem característica bidirecional. Basicamente, o seguidor de referência se baseia no valor do sinal de controle verificado na saída de cada regulador de

tensão, pois os valores serão iguais quando as referências nos dois reguladores tenderem a convergir para um mesmo valor de tensão terminal. Esta afirmação pode ser justificada no fato dos reguladores atuarem sobre a mesma excitatriz para controlar a corrente nos enrolamentos de campo. Implicando que um mesmo sinal de controle deve ser produzido pelos reguladores para que a mesma corrente de campo e, por conseguinte a mesma tensão terminal seja observada.

Os seguidores de referência mais antigos são realizados por meio de circuitos analógicos e, em sua essência, têm uma característica de acompanhamento linear. Isto é, o seguidor de referência relaciona as referências dos reguladores de tensão de forma proporcional, tomando a variação do sinal de controle. Esta característica pressupõe uma relação linear, ou mesmo aproximadamente linear em torno da região de operação, entre as variáveis tensão terminal e corrente de campo. No entanto, sabe-se que a relação entre estas variáveis ($V_t \times I_f$) é dada por uma curva saturável e por isso não linear, tendo em vista a descrição apresentada sobre o funcionamento do sistema de excitação na secção 2.2.1.

Figura 2.9 – Sistema de Excitação estático com Seguidor de Referência



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Sendo importante destacar que a característica de acompanhamento linear realizado pelo sistema estudado foi fator decisivo para se construir a proposta para o seguidor de referência baseado na relação real entre as referências dos reguladores de tensão, ou seja, baseada na característica de magnetização do gerador. Pois a verifica-se que a limitação do sistema analógico se encontra exatamente neste ponto.

A estimação linear no funcionamento do seguidor de referência apresenta bons resultados quando o intervalo de variação, ou acompanhamento, é relativamente pequeno. O que pode ser listado como uma das justificativas da limitação na variação de tensão encontrada nos reguladores automáticos. No entanto, esta estratégia apresenta uma tendência de elevar o nível de erro no acompanhamento a medida que o ponto de operação da máquina se afasta dos valores para os quais a relação entre tensão terminal e corrente de campo foi linearizada, ou seja, para os quais o seguidor de referência foi projetado.

O fato da característica linear do seguidor de referência apresentar valores de erro proporcionais à diferença entre do valor de tensão terminal configurado e o valor para o qual foi projetado é agravado pela mudança no valor da potência ativa gerada pela unidade, uma vez que a que a relação $V_t \times I_f$ é modificada de acordo com a corrente de armadura e o fator de potência. Uma estratégia adotada para que os valores de erros de acompanhamento não sejam muito elevados é a limitação do intervalo de rastreamento do seguidor de referência em torno de 5% do valor de projeto, valor nominal da tensão do gerador, como é utilizado nos geradores estudados.

Quando há erros elevados no acompanhamento das referências entre os modos do regulador de tensão, podem haver na verdade problemas semelhantes aos encontrados quando não se utiliza do seguidor de referência. Neste caso têm-se apenas uma atenuação dos riscos inerentes à arquitetura do sistema de excitação. No caso dos hidro geradores tomados como base para o desenvolvimento deste trabalho, para os quais o seguidor de referência é implementado por circuitos analógicos, tem se detectado níveis de erro no acompanhamento entre referências acima do considerado aceitável para o porte das máquinas em questão. Motivo pelo qual se desencadeou o desenvolvimento deste trabalho.

Em sistemas de excitação mais modernos, o seguidor de referência é implementado em *software* de tal forma que os fabricantes garantem suavidade na comutação entre os modos de funcionamento do regulador a ponto desta última ser quase imperceptível. Esta tecnologia de seguidor de referência é utilizada nos hidro geradores da casa de força 2 da UHE Tucuruí, onde são utilizados reguladores de tensão digitais.

Capítulo 3

Levantamento da Característica de Magnetização do Gerador Síncrono

3.1. INTRODUÇÃO

Baseada na função que estima a característica de magnetização do gerador, o protótipo seguidor de referência foi idealizado com um malha de controle que acompanha a referência da variável utilizada pelo modo do regulador de tensão em funcionamento, sendo que a malha de controle é realimentada com a referência da variável utilizada pelo outro regulador. Para o modo de funcionamento padrão, o regulador automático assume a malha de tensão e o manual se encontra em retaguarda, desta maneira o acompanhamento é dado em relação à referência de tensão terminal, enquanto se utiliza a referência de corrente de campo como a variável de realimentação.

A via de realimentação da malha de controle do protótipo possui um transdutor que realiza a equivalência de corrente de campo para tensão terminal, para o modo de funcionamento padrão, o que permite realmente comparar a proximidade entre as referências impostas aos modos do regulador de tensão e, assim tomar uma ação de controle mais efetiva no acompanhamento entre as mesmas. O transdutor de realimentação da malha de controle é na realidade uma expressão matemática que analisa a corrente de armadura, bem como a outras variáveis afins, e transforma a variável realimentada, corrente de campo no modo de funcionamento padrão, em seu equivalente valor para a variável configurada no

acompanhamento na malha de controle do protótipo do seguidor de referência, tensão terminal.

A ação desta malha de controle é a alteração do valor de referência no modo de controle que não está assumindo o controle de tensão terminal no gerador, ou do modo em retaguarda, até que o erro entre esta variável e a referência do modo em funcionamento seja nula. Isso permite que a comutação entre os modos do regulador de tensão seja feita de forma suave, sem a geração de grandes oscilações de tensão, sendo este o fim para o qual o protótipo seguidor de referência foi idealizado.

Analisando o exposto acima, a característica de magnetização do gerador síncrono tem grande importância para o desenvolvimento do protótipo seguidor de referência digital e, por isso, há a necessidade de serem realizados ensaios para levantar as informações necessárias para a construção da mesma. Este capítulo descreve os procedimentos de realização de ensaios feitos em um gerador síncrono de 350 MW da primeira casa de força da UHE Tucuruí, sobre a perspectiva de se obter a característica de magnetização da máquina síncrona nas situações de funcionamento em carga e também em vazio. As informações obtidas permitem a estimativa matemática do comportamento da tensão terminal em regime permanente, possibilitando a implementação da malha de controle do protótipo do seguidor de referência, mais especificamente a malha de realimentação.

3.2. LOCAL DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram precedidos pela solicitação dos mesmos aos órgãos competentes da empresa Eletrobrás/Eletronorte. Isso pelo elevado grau de responsabilidade sobre a realização de ensaios em geradores do porte dos utilizados na usina em questão, além do mais quando a máquina está conectada no sistema de potência. A liberação para realizar os ensaios de em vazio é feita em carácter local por um corpo técnico responsável pelas diretrizes operacionais da usina. No entanto para realizar os ensaios em carga, a liberação deve ser solicitada à nível de operação do sistema, junto ao Operador Nacional do Sistema (ONS). Isso porque há a necessidade de variação da potência ativa gerada. Tornando assim necessário informar ao órgão de controle de despacho de carga.

Devido aos diferentes prazos para a liberação dos ensaios solicitados, estes foram realizados em datas diferentes. O primeiro ensaio realizado foi o levantamento da curva característica em vazio, isto é, a tensão terminal em função apenas da corrente de campo. E

em seguida foi realizado o ensaio de magnetização com o gerador em carga conectado ao sistema, com o intuito de identificar a característica de magnetização em carga.

Os ensaios de levantamento da característica de magnetização foram realizados na unidade geradora de número 8 da primeira casa de força da UHE Tucuruí, durante um período no qual o gerador se encontrava parado devido a diretrizes operativas do sistema. A realização dos mesmos foi acompanhada por profissionais do setor de manutenção eletrônica da respectiva empresa, mais especificamente pelos integrantes da equipe de regulação.

Os equipamentos utilizados durante os testes foram instalados no chamado armário de regulação, onde se encontram os circuitos analógicos envolvidos na regulação de tensão do gerador. Adjacentes ao armário comentado estão outros armários do sistema de excitação contendo as pontes retificadoras, o disjuntor de campo e os barramentos de corrente contínua que alimentam os enrolamentos do rotor. O armário de regulação é composto de várias gavetas contendo cada um módulos de circuitos analógicos do regulador de tensão. Uma visão geral das gavetas que compõem este armário é apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Visão geral do Armário de Regulação com seus módulos analógicos



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

A medição das variáveis pode ser realizada em diferentes pontos nos vários módulos existentes no armário de regulação. Por isso, uma análise dos diagramas funcionais dos

mesmos foi realizada pela equipe que acompanhava os ensaios, para que os pontos de medição fossem definidos de acordo com critérios de simplicidade e segurança. Esta análise também determinou o modo como seria feito o controle de variação de alguns parâmetros do gerador como, por exemplo, a variação da corrente de campo, de tal forma que pudesse capturar a correlação com outras variáveis afins.

Após definidos os pontos de medição e controle das variáveis observadas nos ensaios, os equipamentos de medição foram cuidadosamente instalados nos pontos das cartelas analógicas antes que qualquer sistema fosse iniciado. A correta ligação dos cabos de medição deve ser observada para evitar contatos equivocados que podem causar problemas no funcionamento das placas de circuito, o que pode causar danos aos mesmos.

3.3. MATERIAL UTILIZADO

Uma característica dos geradores síncrono semelhantes à máquina de número 8, utilizada para realização dos ensaios, são os sistemas de controle analógicos, principalmente os reguladores de tensão e velocidade. Diferente dos sistemas de regulação encontrados nos geradores da casa de força 2 na mesma usina, onde os mesmos são sistemas digitais e disponibilizam poucas variáveis para medição externa. As medições são feitas através da interface digital do regulador.

No intuito de realizar as medições na unidade geradora 8, foi utilizado o equipamento de aquisição de sinais denominado AQX. Este equipamento possui um módulo de aquisição de dados com conversor A/D com entradas analógicas onde são coletados os sinais de interesse. O módulo possui comunicação via USB com o computador onde a sua respectiva interface está instalada. Por meio desta interface é possível configurar as variáveis medidas para serem visualizadas em gráficos de tempo real e também armazená-los em um arquivo tratável por outros *softwares* conhecidos.

Uma das limitações do equipamento AQX é a não medição de sinais acima de 10V, o que não permite a leitura de toda a faixa de algumas variáveis, já que em determinados pontos de medição escolhidos, os valores máximos excedem a este nível. Desta forma, utilizou-se de um multímetro digital para auxiliar a medição de valores fora da zona de leitura do equipamento de aquisição, visto que durante as medições as variáveis não foram condicionadas para que seus níveis não ultrapassassem os níveis do AQX. Neste sentido

poderia se utilizar apenas um divisor de tensão, onde o valor medidor seria equivalente à tensão no mesmo ponto de medição só que em níveis menores.

Para forçar a variação da tensão terminal na malha de controle utilizou-se uma fonte CC variável com tensão de saída de $-10V$ a $+10V$ inserida em determinado ponto de soma no regulador automático de tensão. Na Figura 3.2 são identificados os equipamentos, utilizados na realização dos testes, já devidamente instalados nos pontos de medição nos módulos do armário de regulação: 1 – Hardware do AQX; 2 – Multímetro digital; 3 – Interface do AQX; 4 – Fonte variável de $-10V$ a $+10V$.

Figura 3.2 – Equipamentos de medição instalados no armário de regulação



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Para o ensaio de identificação da característica de magnetização em carga, foi utilizado um transdutor de medição denominado de PQVI. Este leva o nome devido permitir medir as grandezas Potência ativa, Potência reativa, Tensão e Corrente por meio de ligações diretas com o transformador de potencial e também com o transformador de corrente. O PQVI produz medições em valores por unidade e também disponibiliza pontos de saída na faixa de 0 a 5V contínuos, para medição externa por outros equipamentos.

3.4. PONTOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE

Para a realização dos ensaios de identificação da característica de magnetização do gerador síncrono, foram definidos pontos de medição de corrente de campo, tensão terminal, potência ativa, entre outras variáveis, baseados em análises realizadas sobre os desenhos funcionais do regulador de tensão. Nos tópicos a seguir são descritos brevemente os pontos de medição e controle utilizados.

Os pontos serão descritos com as siglas que os identificam nos desenhos funcionais dos circuitos de regulação existentes na empresa. Desta forma, algumas nomenclaturas de localização dos pontos são necessárias como, por exemplo, Módulo, Cartela, Circuito, entre outros, assim como o código numérico-alfabético do borne de medição. Nesta descrição, o módulo indica qual a gaveta na qual o ponto de medição está localizado. Enquanto que a cartela ou Circuito vem indicar qual a placa de circuito impresso do mesmo. No código numérico-alfabético, os números classificam os pontos de medição nas régua de bornes, enquanto que as letras “M” e “m” definem os pontos de medição pertencentes ao módulo e a cartela.

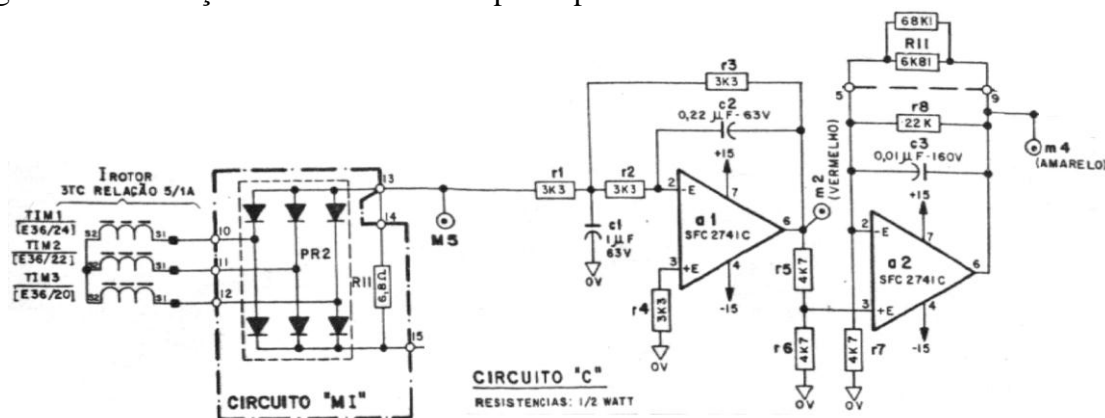
3.4.1 MEDIÇÃO DA CORRENTE DE CAMPO

Para a medição da corrente de campo há alguma variedade de pontos de coleta de sinal nos módulos do regulador de tensão. O ponto escolhido para medição desta variável foi o borne M5 do módulo RM (Regulador Manual), como é destacado na Figura 3.3 que mostra parte do desenho funcional do mesmo. Este ponto permite a medição da tensão sobre um resistor de 6,8 k Ω de ligado em antiparalelo a uma ponte de diodos trifásica. Neste ponto se verifica uma tensão de - 6,8V, em corrente contínua, para que corresponde a uma corrente CA de 2000A na saída do transformador de excitação. O ponto *m4* apresenta a tensão medida em M5 após a passagem por um filtro RC inversor de tensão, como pode ser visto na Figura 3.3. Neste ponto é medido 6,8V, filtrado em relação a M5, quando há 2000A na saída do transformador de excitação. Tanto o ponto de medição M5 quanto o ponto *m4* foram utilizados para medição da corrente de campo.

Outro ponto onde a corrente de campo pode ser medida é o borne PI3, o qual apresenta três pontos de medição que são ligados no secundário de um transformador de corrente, com relação de transformação 2000A/5A, ligado na saída do transformador de excitação. Desta forma, no borne PI3 mede-se um valor de corrente alternada correspondente a corrente de

campo aplicada aos enrolamentos da máquina. A medição neste ponto foi realizada por meio do equipamento PQVI.

Figura 3.3 – Medição de corrente de campo no ponto M5 do módulo RM



Fonte: Adaptado de Eletrobrás/Eletronorte

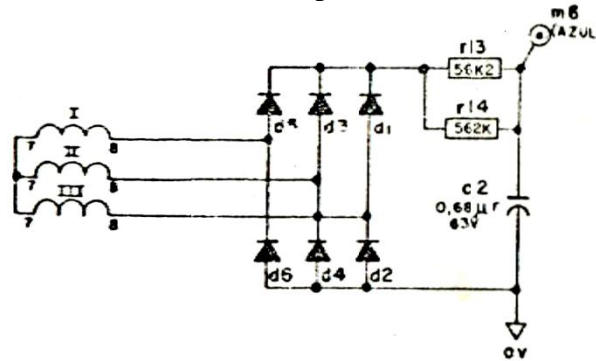
3.4.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO TERMINAL

A medição de sinal correspondente à tensão terminal pode ser feita em vários pontos do armário de regulação, devido ao fato desta variável ser bastante utilizada. Um dos pontos que pode ser utilizado para a medição é o ponto **m6**, borne cor azul, do módulo RE (regulador automático de tensão) da cartela DE (Detector de Erro), como é destacado na Figura 3.4 a qual mostra parte do diagrama funcional do regulador automático de tensão. Este ponto apresenta tensão em corrente contínua diretamente proporcional a tensão terminal, de maneira que 10V representam a tensão nominal do gerador de 13,8kV. Um fator positivo sobre a coleta de informação neste borne é a simplicidade com um equipamento de medição é neste conectado. Assim o equipamento de aquisição de dados AQX pode ser utilizado diretamente.

Um segundo ponto onde se pode medir a tensão terminal do gerador são os pontos M1, M2 e M3 da cartela AL-A (Alimentadores dos módulos do regulador automático de tensão), que são ligados em paralelo ao secundário de um transformador de potencial instalado na saída do transformador de excitação. A tensão alternada medida nestes pontos é de 100V quando há 13,8kV nos enrolamentos de estator. Obedecendo a relação de transformação, mede-se diretamente a tensão terminal em CA e não um valor correspondente em corrente contínua, como ocorre quando é utilizado o ponto **m6**. No entanto, não é possível utilizar

diretamente o equipamento de aquisição AQX por sua limitação analógica de entrada. Por isso foi utilizado o multímetro para realizar as medições neste ponto.

Figura 3.4 – Medição de tensão terminal no ponto m6 do módulo RE cartela DE



Fonte: Adaptado de Eletrobrás/Eletronorte.

Foram utilizados os dois pontos de medição descritos, o **m6** e o M1, M2 e M3, para a aquisição da tensão terminal do gerador síncronos nos ensaios de levantamento da característica de magnetização.

3.4.3 MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA

Em substituição ao ensaio de identificação descrito no Capítulo 2, o qual era baseado na variação da corrente de carga em um fator de potência fixo, optou-se pela avaliação da contribuição da potência ativa em relação à curva de magnetização identificada no ensaio a vazio. Isso leva a uma interpretação mais objetiva da característica de magnetização, visto que a potência ativa é, juntamente com a tensão terminal e a frequência, a variável mais importante para a unidade geradora.

A variável potência ativa é facilmente medida, uma vez que esta informação é disponibilizada diretamente nas telas de supervisão do gerador, através da interface Homem-Máquina (IHM), diferente das outras variáveis utilizadas nos ensaios. Desta forma, o valor de potência ativa foi registrado a partir do valor mostrado na tela do supervisor.

No entanto, como a variável potência ativa é incorporada como entrada no protótipo do seguidor de referência, devido a alteração na curva de magnetização causada pela mesma, há a necessidade de se determinar um ponto de medição de potência ativa no armário de regulação. Foi então escolhido o ponto SA18 pertencente a malha de controle de velocidade.

Este ponto disponibiliza um valor de tensão diretamente proporcional a potência ativa, no qual 10 volts são equivalentes a potência ativa nominal do gerador.

3.4.4 CONTROLE DA VARIAÇÃO DE TENSÃO TERMINAL

Como comentado anteriormente, a variação da tensão terminal foi realizada pela inserção de determinado valor de tensão em um ponto de soma da malha de controle do regulador automático de tensão. A tensão gerada advinha de uma fonte de corrente contínua externa ao regulador. Esse ponto de soma é o ponto M21 do módulo RE (Regulador automático de tensão) no qual é gerado um valor de erro de tensão terminal que é aplicado no algoritmo de controle PID do regulador de tensão. Neste ponto a tensão de 1V equivale a 10% da tensão nominal e como no modo automático a variação de tensão terminal é limitada a $\pm 10\%$ do valor nominal, há um valor constante de $-9V$ sendo somado neste ponto, o que corresponde à 90% da tensão nominal do gerador, garantindo que no valor máximo de variação da referência seja somado $-2V$, levando a tensão para 110% do valor nominal, enquanto que no mínimo se soma $0V$, conservando a tensão em 90%.

No ponto de soma M21 do regulador automático, é configurada a tensão de referência em $-1V$ quando o sistema de excitação é iniciado, totalizando $-10V$ que correspondem a tensão nominal do gerador. A tensão da fonte externa deve ser somada aos $-10V$ neste ponto, de tal forma se alcance valores de referência fora do intervalo de limitação, por exemplo, soma-se $2V$ no ponto M21 para modificar a referência para um valor correspondente a 80% do valor nominal normalmente configurado. A variação de tensão fora dos limites do regulador automático somente é permitida quando o gerador não se encontra conectado ao sistema. Por isso, no ensaio em carga onde é necessário se utilizar o RAT, a variação da tensão terminal foi realizada dentro do limite de $\pm 10\%$. Como para o ensaio em vazio foi utilizado o regulador manual, a variação da tensão terminal atingiu um intervalo maior.

3.5. LEVANTAMENTO DA CARACTERÍSTICA EM VAZIO

O procedimento seguido para a realização do ensaio em vazio se inicia a partir do momento em que os equipamentos de medição estão corretamente instalados nos pontos de medição. Inicialmente se solicita ao profissional responsável pela operação da máquina iniciar o procedimento de partida da mesma de forma automática. Neste momento, ocorre a abertura

do distribuidor permitindo a passagem de água do reservatório, a determinada pressão e velocidade, em quantidade suficiente para que a inércia do conjunto girante seja vencida.

A partir do momento em que a informação de velocidade chegar a 80% da rotação nominal (81,82 rpm), uma fonte de alimentação auxiliar da usina é chaveada para alimentar o campo do gerador até que a velocidade nominal seja atingida e a tensão terminal alcance cerca de 30% do valor nominal. Neste ponto, a fonte auxiliar é retirada e o campo do gerador é auto excitado através do transformador de excitação ligado aos terminais do gerador.

Assim que o gerador estiver com a tensão terminal no seu valor nominal (13,8kV), é selecionado o modo de controle manual que permite mais flexibilidade para a realização do ensaio. A partir deste ponto, inicia-se o primeiro conjunto de medições e registros das informações. Mede-se a tensão terminal no borne M1 com o multímetro digital, logo depois a tensão terminal é medida no ponto m6 com o multímetro e também registrada com o AQX, então, no ponto **m6**, a corrente de campo é medida através do multímetro e também registrada pelo AQX. Após a primeira medição, em tensão nominal, a fonte de tensão variável, inicialmente ajustada em 0V, tem seu valor aumentado em 10% de tal forma que se observa um aumento na mesma proporção na tensão terminal do gerador. Desta forma se iniciam o segundo conjunto de medições dados da mesma forma que o primeiro.

As medições posteriores foram feitas para uma redução de 10% do valor de tensão da fonte variável, de tal forma que se pudesse varrer um intervalo de 112% até 39% do valor nominal da tensão nos terminais do gerador. Valores menores de tensão não são possíveis por precauções relativas às pontes retificadoras. Na Tabela 3.1 são apresentados os dados medidos para cada valor de tensão terminal configurado.

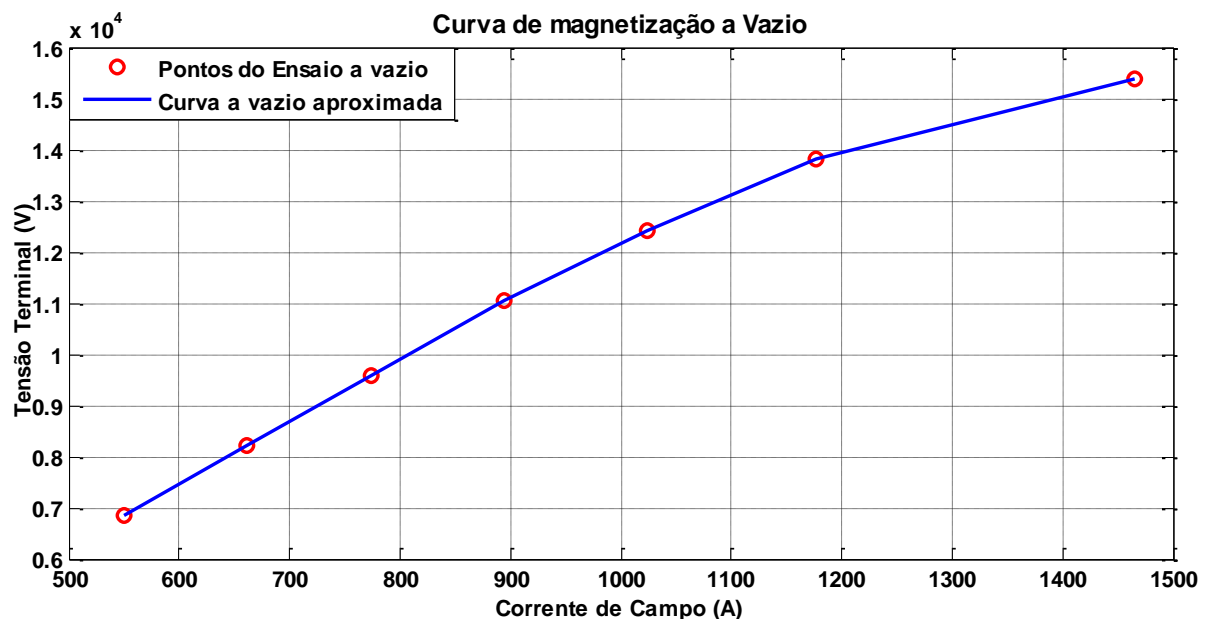
Tabela 3.1 - Valores obtidos no ensaio a vazio no gerador síncrono

Relação à tensão terminal	Tensão Terminal			Corrente de Campo		
	Real (kV)*	Ponto m6 (V)	Pontos M1, M2 e M3 (V)	Real (A)*	Ponto M5 (V)	Ponto m4 (V)
112%	15,40	11,16	128,1	1464,7	-4,95	4,98
100%	13,80	10	115	1176,5	-3,97	4
90%	12,43	9,01	103,5	1023,5	-3,47	3,48
80%	11,05	8,01	92	894,1	-3,02	3,04
69%	9,58	6,94	80	773,5	-2,62	2,63
60%	8,22	5,96	69	661,8	-2,23	2,25
50%	6,86	4,97	57,5	550,0	-1,86	1,87
39%	5,44	3,94	46	461,8	-1,56	1,57

*Valores calculados a partir da relação de transformação do(s) equipamento(s) utilizados para ligar o ponto de medição ao ponto onde se encontra a variável real.

Partindo das informações de corrente de campo de tensão terminal medidos no ensaio de magnetização a vazio, é possível montar a curva característica em vazio interpolando os pontos apresentados na Tabela 3.1, resultando na curva que pode ser vista na Figura 3.5. É possível notar na curva mostrada na Figura 3.5 a relação não linear entre a corrente de campo e tensão terminal, mesmo que em uma região dentro de patamares com valores de tensão terminal alcançados em operação normal. Isto reforça a ideia apresentada no Capítulo 2 a respeito dos erros apresentados pelo seguidor de referência analógico e linear encontrados nos geradores semelhantes à unidade geradora hidráulica de número 8 (UHG 08).

Figura 3.5 – Curva interpolada dos dados do ensaio de magnetização em vazio



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

3.6. LEVANTAMENTO DA CARACTERÍSTICA EM CARGA

Como comentado anteriormente, o foco de identificação da característica de magnetização foi alterado para a análise da contribuição da potência ativa. Um dos motivos que levaram a isto é a dificuldade de se realizar os ensaios necessários na formulação anteriormente apresentada, com o gerador conectado ao sistema de potência.

A abordagem alternativa para o ensaio em carga pode ser descrita como semelhante ao ensaio em vazio, adicionando-se a variação da potência ativa. Para realizar este ensaio, deve-se primeiro atentar para os limites de variação de tensão e potência ativa, existentes no próprio regulador automático de tensão e também por questões operativas. A variação de tensão é limitada a aproximadamente em torno $\pm 10\%$ da tensão terminal, enquanto que a

limitação de potência, dada por condições operativas da usina, foi definida como 60 MW em dois intervalos de 30MW cada. Desta forma, foram realizadas variações da corrente de campo de forma a varrer o intervalo permitido para três valores de potência ativa, sendo que o primeiro conjunto de medições foi realizado com o gerador fornecendo uma potência ativa de 256MW.

Para a realização deste ensaio é necessário que o gerador esteja sincronizado ao sistema elétrico de potência já fornecendo uma determinada potência ativa, a qual foi inicialmente configurada para 256MW. Após o gerador ter atingido o regime permanente neste valor, se iniciou o primeiro conjunto de medições. Mede-se a tensão terminal com o multímetro no ponto m6 do Módulo DE e também se registra o valor de tensão terminal apresentado pelo PQVI, assim como o valor de corrente de campo apresentado pelo mesmo.

Para variar a tensão terminal e continuar realizando as medições, a referência de tensão da malha de controle do RAT foi alterada pelo próprio operador em modo local. A mesma estratégia foi utilizada para a variação da potência ativa, a modificação manual da referência no quadro de manobra da unidade geradora. Desta forma foram definidos sete valores de tensão terminal e três valores de potência ativa para a realização das medições dos valores de corrente de campo correspondentes. Na Tabela 3.2 são apresentados os dados obtidos em todas as medições realizadas neste ensaio.

Utilizando os dados obtidos neste ensaio, é possível construir uma curva relacionando tensão terminal com corrente de campo para cada valor de potência ativa e assim compará-las a curva obtida no ensaio a vazio. Isso permite analisar a influência gerada pela potência ativa na curva característica de magnetização tomando como referência a curva em vazio. Na Figura 3.6 são mostradas as curvas obtidas neste ensaio em comparação com a curva obtida no ensaio a vazio.

O protótipo seguidor de referência deve conhecer a curva característica de magnetização tanto para o funcionamento em vazio quanto em carga, isso implica que o mesmo deve conhecer todas as curvas identificadas nos ensaios. Uma estratégia que simplifica a implementação de todas as curvas no protótipo é a estimação de uma função que leve em consideração tanto a corrente de campo quanto a potência, formando assim uma superfície de tensão terminal cuja forma pode ser estimada por meio de interpolação das quatro curvas mostradas na Figura 3.6 em função dos valores de potência ativa. A superfície estimada, na tentativa de estimar uma superfície de tensão dada em função da corrente de campo e também da potência ativa, é mostrada na Figura 3.7. Esta superfície é apenas uma

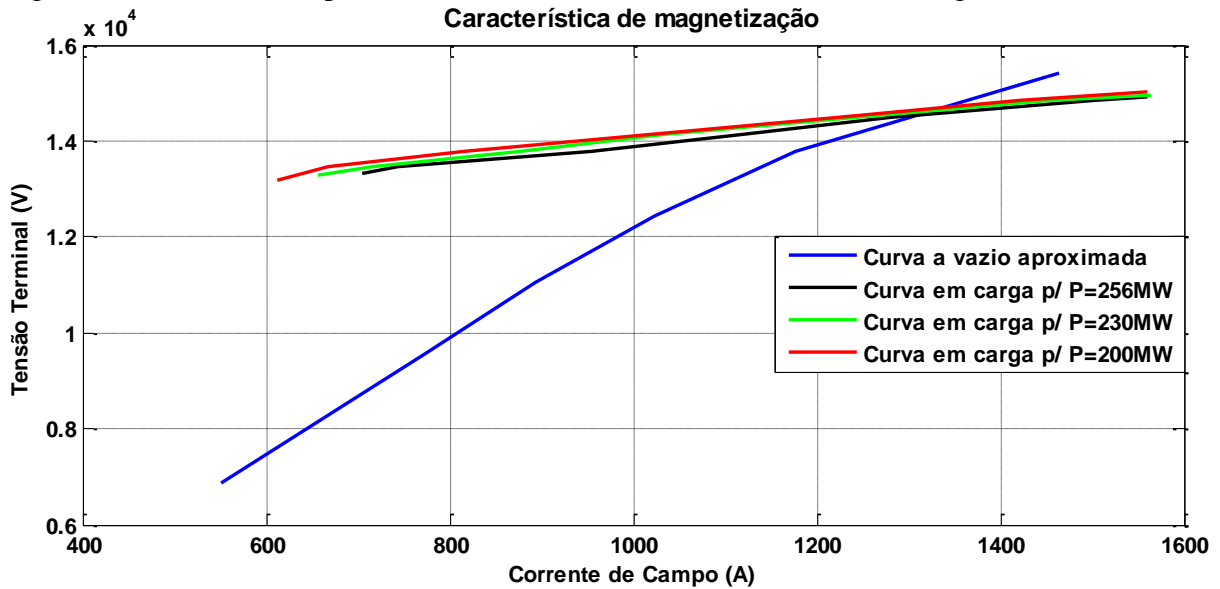
perspectiva matemática de estimar o comportamento da curva de magnetização para valores intermediários aos valores de potência ativa utilizados nos ensaios de identificação dos dados de magnetização do gerador.

Tabela 3.2 - Valores obtidos no ensaio a vazio no gerador síncrono

Potência Ativa (MW)	Tensão Terminal			Corrente de Campo	
	Real (kV)	Ponto m6	PQVI (%)	Real (A)	PQVI (%)
256	13,32	9,74	96,5%	704	35,20%
	13,46	9,83	97,5%	744	37,20%
	13,80	10,06	100,0%	954	47,7%
	14,15	10,36	102,5%	1120	56%
	14,49	10,57	105,0%	1280	64%
	14,84	10,84	107,5%	1502	75,10%
	14,93	10,89	108,2%	1560	78%
230	13,30	9,71	96,4%	656	32,80%
	13,46	9,82	97,5%	716	35,80%
	13,80	10,08	100,0%	876	43,80%
	14,15	10,33	102,5%	1034	51,70%
	14,49	10,56	105,0%	1244	62,20%
	14,84	10,81	107,5%	1454	72,70%
	14,96	10,91	108,4%	1564	78,20%
200	13,17	9,7	95,4%	612	30,60%
	13,46	9,81	97,5%	668	33,40%
	13,80	10,05	100,0%	816	40,80%
	14,15	10,33	102,5%	1020	51%
	14,49	10,57	105,0%	1224	61,20%
	14,84	10,82	107,5%	1422	71,10%
	15,01	10,94	108,8%	1560	78%

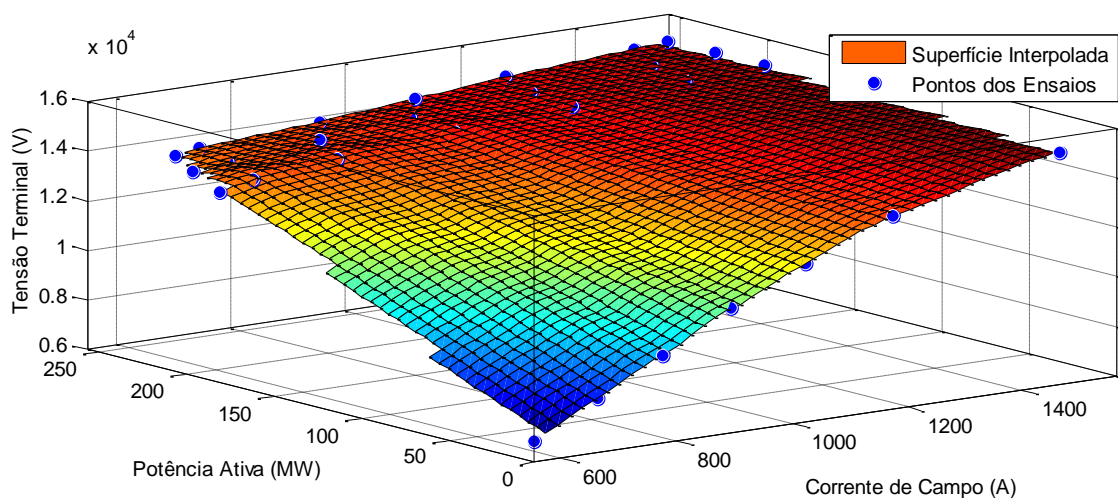
Com relação à superfície mostrada na Figura 3.7, não se pode afirmar que esta explica o comportamento real da máquina síncrona quanto ao funcionamento em vazio e em carga, pois a estimativa da mesma foi baseada apenas em interpolação cúbica dos dados obtidos nos ensaios. No entanto, devido a dificuldades de se coletar mais dados sobre a característica de magnetização, esta estimativa matemática será utilizada neste trabalho como a característica de magnetização do gerador síncrono, incluindo o funcionamento em vazio e em carga. Esta determinação pode ser justificada no fato de que a região de operação normal do gerador não permite que se trabalhe com valores de potência ativa inferiores a 200MW, valor mínimo utilizado no ensaio em carga. Desta forma, a superfície estimada não necessita representar a realidade na região de zero de potência ativa até próximo de 200MW.

Figura 3.6 – Curvas interpoladas dos dados dos ensaios em vazio e em carga



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Figura 3.7 – Superfície de tensão terminal dada em função da corrente de campo e potência ativa. Resultado da interpolação dos dados obtidos nos dois ensaios



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

3.7. ESTIMAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

Como apresentado anteriormente, a característica de magnetização do gerador síncrono pode ser resumida na forma de uma superfície de tensão dada em função da corrente de campo e da potência ativa. Desta maneira, a função matemática que deve ser implementada

no protótipo do seguidor de referência deve estimar o comportamento da superfície, atendendo o acompanhamento entre as variáveis de interesse desde a situação em vazio até determinado valor de potência ativa.

A estimação da função que representa a superfície apresentada na Figura 3.7 deve resultar em valores de tensão terminal condizentes com o ponto de aplicação da referência na malha de controle. Da mesma maneira, a corrente de campo de entrada da função deve ser dada nos mesmos níveis lidos diretamente nos ponto de coleta deste sinal pelo protótipo, o que também vale para a potência ativa. Este requisito será utilizado apenas como simplificação da estimação matemática, com a intenção de reduzir a ordem de grandeza dos coeficientes da função estimada.

Para estimar a função objetivo, foi utilizada uma ferramenta disponibilizada pelo software MATLAB® chamada *curve fitting toolbox* (Datasheet *Curve Fitting Toolbox*). Todos os dados de cada variável obtidas nos ensaios foram adicionados como entrada para a ferramenta a qual retornou uma função do mesmo tipo apresentado na Equação 2, onde I é a corrente de campo, P é a potência ativa e o valor de suas constantes é dada na Tabela 3.3, que obteve grau de aproximação elevado em relação aos dados dos ensaios. A superfície resultante para esta estimação é sobreposta com os dados dos ensaios na Figura 3.8 para comparação.

$$V_t(I, P) = a + bI + cP + dI^2 + eIP + fP^2 + gI^3 + hI^2P + kIP^2 \quad (2)$$

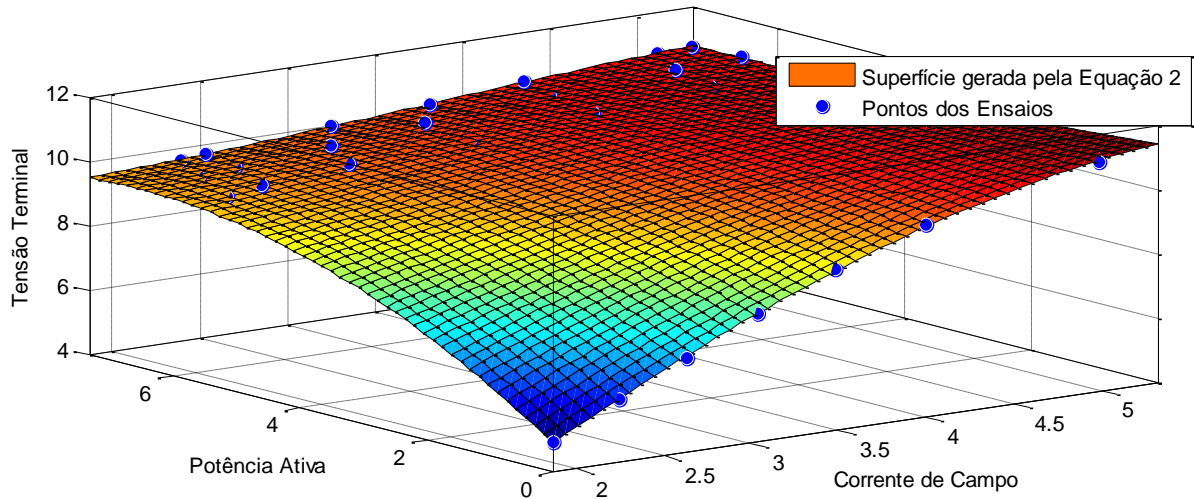
Tabela 3.3 – Valores das constantes da função apresentada na Equação 2

a	b	c	d	e	f	g	h	k
-1,343	3,659	2,745	-0,1311	-0,8129	-0,1697	-0,01966	0,04878	0,03489

Deseja-se que o protótipo seguidor de referência funcione de forma bidirecional, isto é, corrigindo a referência de tensão terminal quando o RM assumir a malha de tensão e também modificar a referência de corrente de campo quando o RAT estiver assumindo a malha. Para isso, é necessário fornecer a este a curva de magnetização inversa de tal forma que seja dada a tensão terminal e a potência ativa e a mesma resulte em determinado valor de corrente de campo. Então, deve-se estimar uma função $I_f = f(V_t, P)$ para os dados resultantes dos ensaios, o que foi realizado da mesma forma na qual se obteve a função mostrada na Equação 2. Isso resultou na função do mesmo tipo da apresentada na Equação 3, onde suas respectivas constantes são mostradas na Tabela 3.4, enquanto que a superfície

resultante para esta estimação é sobreposta com os dados dos ensaios na Figura 3.9 para comparação.

Figura 3.8 – Superfície de tensão terminal dada em função da corrente de campo e potência ativa. Resultado da função estimada na Equação 2.



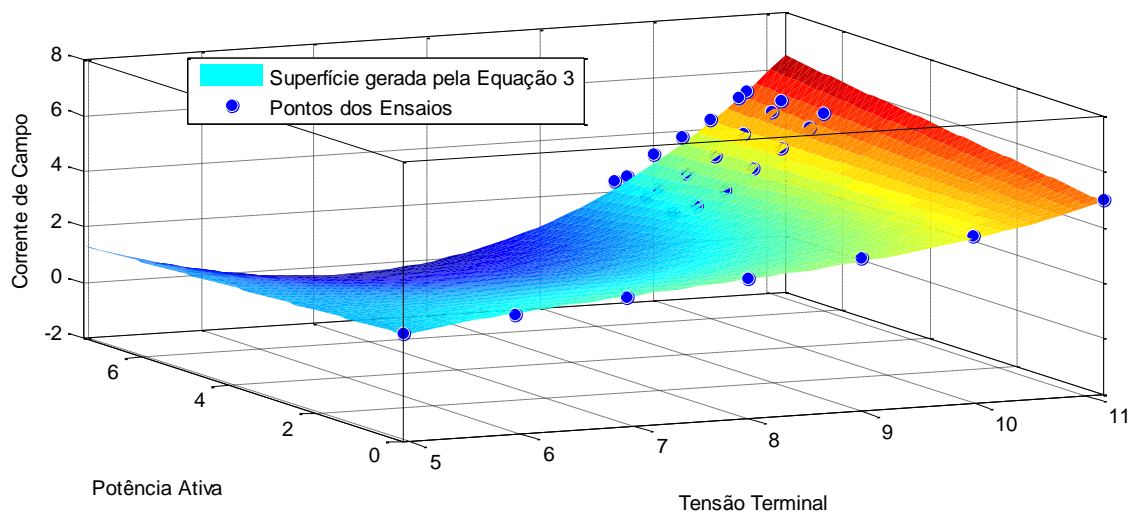
Fonte: Arquivo pessoal do autor.

$$I_f(V_t, P) = l + mV_t + nP + oV_t^2 + pV_tP + qV_t^3 + rV_t^2P \quad (3)$$

Tabela 3.4 – Valores das constantes da função apresentada na Equação 3

l	m	n	o	p	q	r
-6,815	3,327	2,524	-0,4121	-0,7744	0,01866	0,05084

Figura 3.9 – Superfície de corrente de campo dada em função da tensão terminal e potência ativa. Resultado da função estimada na Equação 3.



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Capítulo 4

Proposta do Seguidor de Referência Microcontrolado

4.1. INTRODUÇÃO

O acompanhamento e aproximação das duas referências nos reguladores de tensão, como comentado até este ponto do trabalho, se torna necessário devido à possibilidade da comutação ocorrer em situação em que o gerador está conectado ao sistema elétrico de potência, o que gera oscilações indesejáveis de tensão e potência reativa à máquina síncrona. A comutação pode acontecer em caso de algum problema relacionado ao regulador automático, quando este está assumindo a malha de excitação, pode haver a comutação entre os modos de funcionamento de forma que o regulador manual passe a assumir a mesma. A situação inversa também é possível, ou seja, pode haver a comutação do modo manual para o modo automático de controle de tensão terminal.

Atualmente existem seguidores de referência analógicos implantados nas unidades geradoras da primeira casa de força na UHE Tucuruí, as quais foram base para o desenvolvimento deste trabalho. Esta tecnologia é realizada por meio de amplificadores operacionais, resistores, capacitores, etc., e forma um circuito que possui característica linear de correlação entre as referências de tensão terminal e corrente de campo. No entanto, estes seguidores de referência vem apresentado níveis de erro acima dos valores aceitáveis para este subsistema e, como infortuno deste tipo de implementação, há dificuldade de se realizarem

ajustes que efetivamente reduzam o erro na aproximação das referências para um único valor de tensão terminal.

Como a proposta de solucionar o problema descrito, foi idealizado um protótipo seguidor de referência com implementação digital com o qual fosse possível atingir valores de erros no acompanhamento das referências significativamente menores se comparados a versão original analógica. Para a construção deste protótipo foi definido o microcontrolador PIC®, devido a maior flexibilidade em adaptar suas ferramentas à solução do problema em questão. Além disso, este dispositivo tem uma simplicidade relevante de utilização com baixo custo.

Uma das necessidades para o protótipo digital, devidos aos reguladores de tensão dos geradores em questão serem analógicos, é isolá-lo dos circuitos de maior potência dentro do regulador e também condicionar os sinais das variáveis afins para que possam ser corretamente lidos. Assim como é preciso construir circuitos que façam a adaptação dos sinais resultante do protótipo para que estes realizem a ação de alteração dos valores de referência nos módulos de funcionamento do regulador de tensão.

Desta forma, neste capítulo será descrita a estratégia elaborada para a construção do protótipo seguidor de referência, de forma que se esclareça não somente a ideia de como este deve funcionar, mas também as ferramentas de circuitos analógicos necessárias para a construção do módulo físico do protótipo e também as ferramentas em software necessárias para o desenvolvimento do programa a ser embarcado no microcontrolador PIC. Através de uma descrição de todas as ferramentas necessárias, apresenta-se a proposta de construção deste protótipo do seguidor de referência digital.

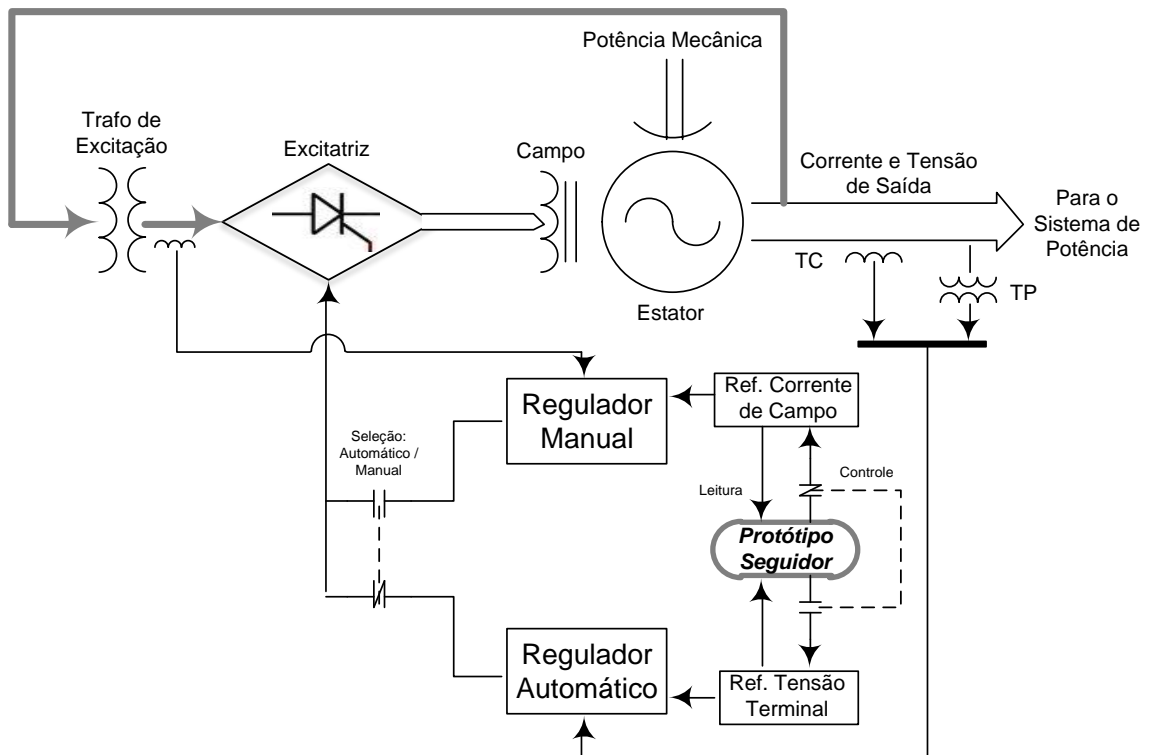
4.2. CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO DIGITAL DO SEGUIDOR DE REFERÊNCIA

O protótipo seguidor de referência digital deve realizar a aproximação, de forma que se verifique a convergência para um mesmo valor de tensão terminal, entre a variável utilizada como referência no modo que está assumindo a malha de controle de tensão terminal, o qual será mencionado como **modo ativado** no decorrer deste capítulo, e a referência da variável usada no modo de funcionamento em estado de espera ou retaguarda do módulo que está assumindo a malha de tensão. Este último será mencionado como **modo em aguardo**.

A abordagem genérica com relação aos modos de controle é utilizada para que se possa descrever o funcionamento bidirecional do protótipo, ou seja, este deve funcionar tanto na situação em que o modo automático assume a malha de controle de tensão quanto para o caso em que o regulador manual assume a regulação de tensão.

Tende em vista que o seguidor de referência apresentado neste trabalho deve-se tornar uma alternativa para os seguidores de referência analógicos estudados, é necessário primeiramente apresentar a forma que o mesmo será implementado no sistema de excitação do gerador, assim como é mostrado na Figura 4.1. Nota-se por meio desta ilustração que o protótipo seguidor de referência se diferencia da versão original estudada, tendo em vista que para o seu funcionamento não são tomados, na sua via de leitura, os sinais de controle de cada regulador e sim são monitorados os próprios valores de referência aplicados nos mesmos. A justificativa para este diferencial é expressa através da descrição do funcionamento interno ao protótipo seguidor de referência.

Figura 4.1 – Malha do protótipo do circuito seguidor de referência para modo manual



Fonte: Arquivo pessoal do Autor.

Para que a característica básica de funcionamento do protótipo seja atendida, torna-se necessário equivaler para uma mesma grandeza a referência de tensão terminal e corrente de

campo por meio da conversão da referência do modo em aguardo para o valor equivalente à variável de referência do modo ativado. Desta forma, deve-se então estabelecer uma função matemática que relacione as duas variáveis, permitindo que a comparação entre as mesmas seja feita de forma correta.

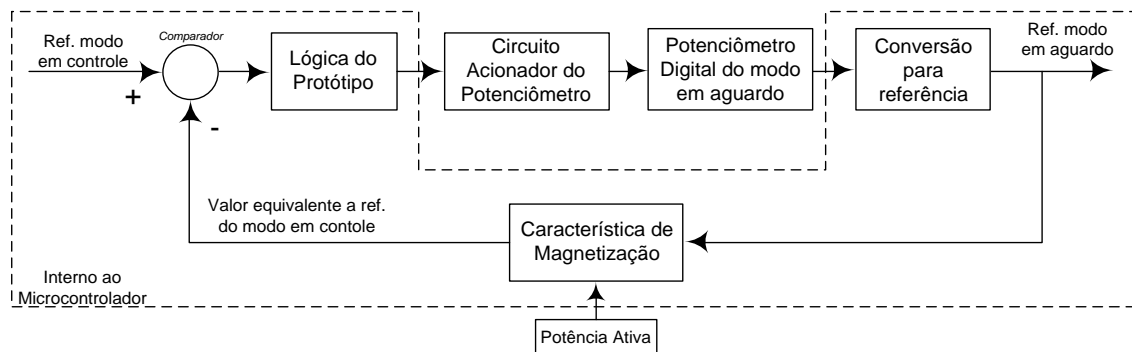
Tanto a referência de tensão terminal quanto a referência de corrente de campo são alteradas pelos valores de tensão gerados por potenciômetros digitais microcontrolados. As malhas de controle do regulador de tensão são construídas para que inicialmente converjam para o valor nominal da variável controlada, seja esta tensão terminal ou corrente de campo. Assim, a tensão do potenciômetro que é inicialmente configurada no valor que corresponde a metade do intervalo que pode varrer, altera uma porcentagem do valor nominal da variável controlada para mais ou para menos, geralmente se tem uma atuação em torno de $\pm 10\%$ do valor nominal.

A tensão gerada pelo potenciômetro digital pode ser controlada por meio da ligação de uma combinação de contatos terminais do módulo deste dispositivo. O controle de tensão do potenciômetro é realizada por meio de um circuito de acionamento, o qual recebe determinados níveis de tensão para que a combinação correta de contatos seja feita, por meio de relés auxiliares, para configurar a ação de aumento ou diminuição do valor de tensão que corresponde à variação da grandeza controlada. Por isso, a ação do protótipo seguidor de referência deve aplicar os níveis corretos de tensão no circuito acionador, de forma que a ação de redução ou aumento, produzida pela lógica embarcada no protótipo, seja realizada no potenciômetro digital do modo em aguardo.

Após o processamento da ação de controle por parte da lógica embarcada no protótipo, o novo valor de tensão gerado no potenciômetro deve ser lido, ajustado de forma que represente o valor de referência da variável do modo em aguardo, para que seja convertida em um valor equivalente à variável do modo ativado, e então comparada à variável do modo ativado, gerando um sinal de erro de acompanhamento a ser novamente analisado pelo protótipo, iniciando um novo ciclo de acompanhamento que deve ser repetido com determinada taxa de amostragem.

De acordo com a descrição apresentada, o funcionamento do protótipo seguidor de referência pode ser satisfeito através de uma malha fechada de controle, onde a forma básica em diagrama de blocos pode ser vista na Figura 4.2. Esta estrutura permite verificar continuamente se a ação de controle converge ou diverge, com relação à aproximação entre as referências dos dois modos do regulador de tensão.

Figura 4.2 – Malha do protótipo do circuito seguidor de referência para modo manual



Fonte: Arquivo pessoal do Autor.

Na estrutura de funcionamento apresentado na Figura 4.2, a função matemática de conversão da referência do modo em aguardo serve como bloco transdutor da variável de realimentação, a qual deve apresentar a relação entre a referência de tensão terminal e corrente de campo. Esta relação foi identificada nos ensaios realizados sobre o gerador síncrono, descritos no Capítulo 3 deste trabalho, com a qual foi possível estimar uma função que explicasse a característica de magnetização do gerador síncrono.

No diagrama de blocos se adiciona a variável potência ativa, de forma que a função que estima o comportamento da característica de magnetização do gerador possa gerar um valor, na conversão da variável do modo em aguardo, o qual leve em consideração o ponto de operação em potência ativa, visto que esta variável altera a relação entre tensão terminal e corrente de campo.

O funcionamento de cada bloco indicado na malha de controle do protótipo é apresentado nos itens a seguir. Serão abordadas ferramentas utilizadas para implementação das funções internas ao microcontrolador, tratadas como ferramentas de suporte de *software* para o protótipo, e também os circuitos que são necessários para fazer a comunicação entre os blocos internos ao microcontrolador com os demais elementos externos a este, os quais são tratados como ferramentas de suporte de *hardware* para o protótipo.

4.3. SUPORTE DE SOFTWARE PARA O PROTÓTIPO

Como anteriormente abordado, a forma com que o protótipo seguidor de referência deve ser implementado é através de uma plataforma digital, e para isso, o microcontrolador PIC definido como o dispositivo onde a lógica do protótipo deve ser implementada. Isso se deve principalmente por este dispositivo apresentar relativa simplicidade de utilização de suas

ferramentas, com o aditivo de ser de baixo custo e apresentar precisão suficiente para a aplicação em questão. Com isso, a primeira fase do desenvolvimento deste projeto foi dedicada ao estudo das ferramentas disponibilizadas por este microcontrolador que são necessárias para a construção do protótipo.

As ferramentas do microcontrolador são configuradas e utilizadas de diferentes formas pelo fato de haver diferentes ambientes de desenvolvimentos, onde a programação é escrita e compilada para o código de máquina com o qual trabalha o dispositivo. Por isso, inicialmente definiu-se o ambiente de desenvolvimento PCWCH da CCS, o qual é baseado em linguagem de alto nível C e já disponibiliza diversas pré-configurações dos dispositivos PIC, simplificando substancialmente a configuração e o uso de alguns dos recursos a serem utilizados no protótipo.

O compilador da CCS é formado por um ambiente de desenvolvimento, bastante amigável (IDE), que permite desenvolver cada fase de um projeto, desde a edição até compilação através de depuração, e tem suporte a toda a linha de Microcontroladores Microchip PIC. Com este compilador é possível traduzir o arquivo de origem escrito em C em linguagem de máquina para Microcontroladores PIC, gerando um arquivo no formato hexadecimal, o qual pode ser diretamente gravado no dispositivo.

Nos itens que seguem serão mais bem descritas as principais ferramentas do microcontrolador PIC utilizadas para o protótipo seguidor de referência digital e, de forma sucinta, será abordado como a configuração e uso das mesmas pode ser feita utilizando o ambiente desenvolvedor do compilador C da CCS.

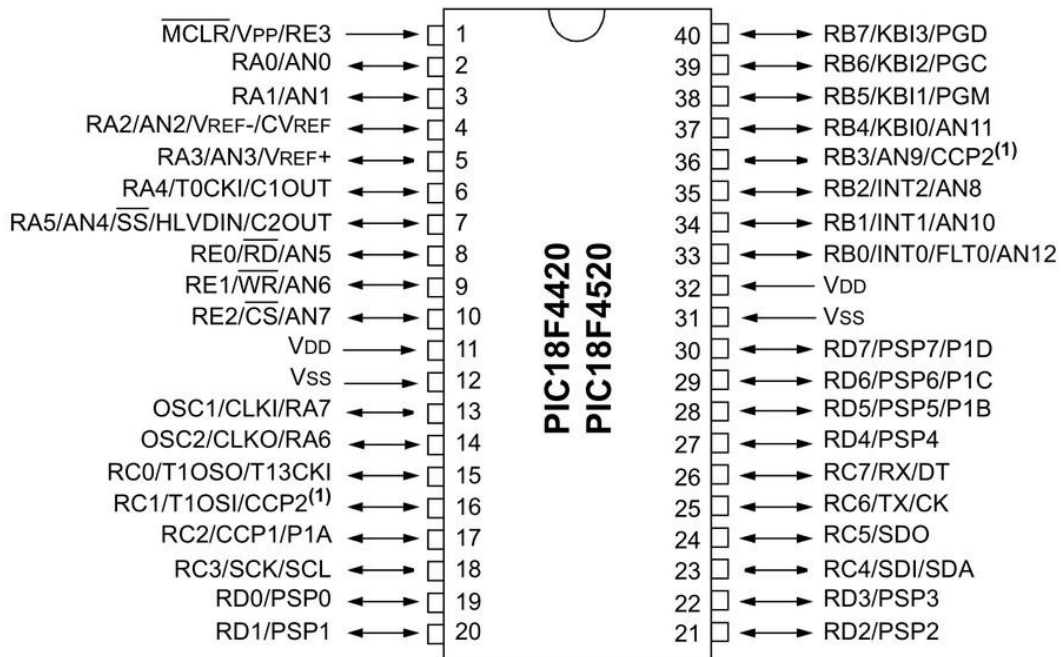
4.3.1. Apresentação do Microcontrolador PIC

Como há certa variedade nos tipos de Microcontroladores PIC disponibilizadas pela fabricante Microchip®, foi necessário focar a pesquisa em um tipo específico pelo critério da simplificação. O tipo escolhido foi o PIC18F4520 pelo critério de sua configuração atender de forma satisfatória os requisitos do projeto. Este é um microcontrolador de 8 bits que possui uma memória interna de 32kB para armazenamento do programa residente e 2048 bytes de memória RAM. Sua tensão de alimentação pode ser da ordem de 4 a 5,5 Volts e sua frequência de operação é de até 48MHz [MIYADAIRA, 2009].

O diagrama de pinos do Microcontrolador PIC18F4520, mostrado na Figura 4.3, apresenta um total de 40 pinos, sendo que 36 são configuráveis para realizar uma ou mais

funções específicas. No Apêndice I é encontrada uma tabela que contém uma listagem das principais características e ferramentas, juntamente com uma descrição sucinta das mesmas, disponibilizadas pelo microcontrolador que foram utilizadas para o desenvolvimento do projeto em discussão. Por meio da breve especificação feita sobre cada pino deste diagrama, tem-se uma noção da quantidade de recursos oferecidos por este dispositivo.

Figura 4.3 – Diagrama de pinos do microcontrolador PIC 18F4520



Fonte: Datasheet PIC18F4520.

4.3.2. Leitura das Variáveis Analógicas

A primeira necessidade encontrada para a construção do protótipo do seguidor de referência digital é a leitura das variáveis analógicas necessárias para a realização dos cálculos de acompanhamento. Grande parte dos Microcontroladores PIC disponibilizam conversores do tipo analógico para digital (A/D) cuja ação permite que um sinal analógico possa ser interpretado através da lógica binária, pela qual o dispositivo funciona. No PIC 18F4520 há apenas um conversor A/D com 14 portas que podem ser escolhidas com fonte de sinal a ser amostrado e quantizado.

A configuração desta ferramenta no ambiente de desenvolvimento do compilador da CCS deve definir a resolução em bits da informação de saída do conversor A/D com valor máximo de 10 bits para o microcontrolador utilizado, como no exemplo de comando `#device`

`adc=10`, que configura a resolução para 10 bits e que deve ser escrito no cabeçalho do programa após a configuração do dispositivo utilizado.

Para habilitar o uso das portas que podem servir de fonte na conversão é necessário entrar com a função `setup_adc_ports(ALL_ANALOG)`, que neste caso está configurando todas as portas com possibilidade de uso como habilitadas. Para informar ao microcontrolador qual a porta que será utilizada como fonte da leitura analógica usa-se a função `set_adc_channel(0)`, neste caso está configurando o canal zero, porta RA0 do PIC18F4520 nomeada como AN0 na Figura 4.3.

A conversão do sinal propriamente dita é realizada pela função `read_adc()`, a qual gera um código binário cujo tamanho é previamente configurado e que corresponde à contagem binária de um nível de tensão entre 0V e 5V equivalente ao valor lido, por isso precisa ser convertido para um valor decimal. O intervalo de 0V e 5V determina a região não saturável do conversor, isto é, a região em que a leitura pode ser realizada corretamente, o que gera a necessidade de garantir que o sinal a ser lido não apresente valores fora desta faixa, o que deve ser feito por meio do circuito condicionador de sinais, o qual será abordado posteriormente na secção 4.4.1.

Após a leitura do sinal na saída do potenciômetro digital do regulador de tensão no modo em aguardo, o valor lido é multiplicado por um ganho e somado a uma constante, de forma que o resultado apresente um valor que corresponda à referência da variável controlada no módulo do regulador em questão aplicada à sua respectiva malha de controle. Isso é devido ao fato de que a tensão no potenciômetro digital somente representa a variação da referência da variável afim.

No caso da malha de controle do regulador automático, a tensão de 0 a – 10 Volts gerada pelo potenciômetro digital faz com que haja uma variação de – 10% a +10% no valor da corrente de campo. Para que seja feita a conversão do sinal de tensão do potenciômetro no valor equivalente à referência de tensão terminal, é necessário que este seja multiplicado por 1/5 e somado à – 9V, pois o valor médio do intervalo de saída do potenciômetro digital (– 5V) deve corresponder ao valor nominal da variável controlada, e neste caso, coincide com o valor – 10V na malha de controle de correspondente ao valor de 13,8kV na tensão terminal. De forma análoga, no regulador automático a conversão do sinal de tensão do potenciômetro na referência de corrente de campo é feita de forma que o sinal de tensão resultante provoque a variação de 0 a 2 p.u. da corrente de campo em torno do valor nominal. A tensão de 4V no RM significa o valor nominal de corrente de campo.

Uma característica importante para o uso do conversor A/D é a taxa com que o sinal é amostrado e digitalizado, esta deve atender a necessidade da aplicação. A configuração da mesma pode ser feita simplesmente com o uso do máximo valor possível através da frequência de operação com a qual o microcontrolador foi inicialmente configurado no seu cabeçalho, como no exemplo de comando `#use delay(clock=20000000)`, o qual configura a frequência para 20MHz. Isto é, quando a rotina de leitura do conversor é escrita no laço do programa principal e fica limitado somente ao tempo de processamento dos demais comandos.

Também se pode determinar a frequência de amostragem definindo uma rotina de interrupção dentro do programa, esta fica dependente do estouro da contagem realizada por um dos contadores internos disponíveis, ao término da qual o laço principal é interrompido para a execução desta rotina. Pode-se configurar a frequência com que o estouro da contagem ocorre, o que permite certa flexibilidade na escolha de taxa de amostragem. Por este motivo, esta maneira de configuração da frequência de amostragem foi utilizada para a elaboração da lógica a ser embarcada no protótipo

A configuração da interrupção, bem como do contador interno ligado a este, necessita de vários comandos para ser realizada e pode ser encontrada em (PEREIRA, 2006). No Apêndice 2 deste trabalho, o qual contém o programa desenvolvido para apresentar a proposta do protótipo, os comandos mencionados aparecem bem identificados e comentados, de forma que a rotina se torna auto explicativa.

4.3.3. Função Transdutor de referência na Malha de Realimentação

A inserção da característica de magnetização no programa do protótipo seguidor de referência tem a função de converter a referência do modo em aguardo para um valor equivalente a referência da grandeza utilizada no modo ativado, isso permite realizar uma comparação real da proximidade entre as mesmas, com relação a um mesmo valor de tensão terminal.

A característica de magnetização do gerador síncrono foi identificada como uma superfície que retoma a tensão terminal em função da corrente de campo e da potência ativa. Esta superfície, aproximada pela função mostrada na Equação 2 no Capítulo 3 deste trabalho,

deve ser utilizada quando o regulador manual se encontra no modo em aguardo, pois a referência neste caso é dada em corrente de campo, a qual se deseja converter para um valor equivalente em termos da referência de tensão terminal.

Na situação em que o regulador manual assume o controle de tensão terminal, a referência de tensão terminal é a variável a ser convertida pelo transdutor em um valor correspondente a corrente de campo, a qual é a referência do modo ativado. Neste sentido, deve se utilizar a função que estima o comportamento da característica de magnetização como uma superfície que retoma a corrente de campo em função da tensão terminal e também da potência ativa do gerador, denominada neste trabalho de característica de magnetização inversa. Esta função é apresentada na Equação 3 no Capítulo 3 deste trabalho.

Para atender a característica descrita acima, torna-se necessária a criação de duas malha de controle embarcadas no protótipo, uma para a situação em que o modo ativado é o regulador automático, esta que pode ser referida como forma de funcionamento padrão, e outra para quando o modo ativado é o regulador manual, a qual pode ser referida com forma de funcionamento em retaguarda. As diferenças básicas entre estas duas malhas são o regulador que tem sua a variável de referência modificada e a função aplicada como conversão da variável do modo em aguardo. Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo sobre o funcionamento destas duas malha de controle no protótipo seguidor de referência.

Tabela 4.1 – Resumo sobre o funcionamento das duas malha de controle de acompanhamento embarcadas no protótipo seguidor de referência

Malha de controle de acompanhamento	Malha 1	Malha 2
Regulador de tensão Ativado	Regulador Automático	Regulador Manual
Regulador de tensão Em aguardo	Regulador Manual	Regulador Automático
Característica de magnetização utilizada como transdutor na malha de realimentação	Curva Direta	Curva Inversa
Variável realimentada juntamente com a potência ativa P	Referência de corrente de campo I_f do RM	Referência de tensão terminal V_T do RAT
Grandeza na qual as referências são ambas comparadas	Tensão terminal V_T	Corrente de campo I_f

A malha de controle embarcada no protótipo para a situação de funcionamento padrão, deve ter a função mostrada na Equação 2 como transdutor e modificar a referência da variável do regulador manual. Para isso, deve-se primeiramente entrar com os coeficientes desta função, mostrados na Tabela 3.3, o que necessita primeiramente de reservar um espaço na memória, declarando-se o tipo de dado, para cada valor a ser declarado feito no cabeçalho do programa.

Todos os coeficientes foram configurados no formato `signed long`, o qual permite entrar com valores dentro do intervalo $[-2^{31}, 2^{31} - 1]$, que é suficiente para a aplicação dos valores dos coeficientes convertidos para o formato de potência -4 na base dez. Isto é, o valor do coeficiente foi multiplicado por 10^4 para que sua declaração no programa em C fosse simplificada, no entanto na escrita da função do transdutor da malha de realimentação compensa-se este fator multiplicativo. O comando `signed long a,b,c,d,e,f,g,h,l,m,n,o,p,q,r,s;` mostra a configuração dos espaços reservados na memória para os coeficientes de **a** à **s** no formato `signed long`.

4.3.4. Geração e Lógica de Análise do Erro de Acompanhamento

De acordo com a malha de controle do protótipo apresentada na Figura 4.2, pode-se notar que o sinal de erro de acompanhamento é calculado a partir da subtração entre o sinal de referência no modo ativado e o sinal equivalente a este, após a passagem da referência do modo em aguardo pelo bloco transdutor na via de realimentação. Este sinal de erro aponta a diferença apresentada pelas referências dos dois reguladores de tensão com relação a convergência para um único valor de tensão terminal.

Caso o valor do erro apresentado seja menor que zero, significa que o valor de referência aplicado ao modo em aguardo convergiria para um valor de tensão terminal abaixo do valor correspondente ao modo ativado, em uma situação de comutação no instante da medição. Desta forma, a lógica de análise do erro do protótipo, a qual será remetida como controlador do protótipo, deve produzir uma ação para elevar o valor da referência no modo em aguardo.

Na situação em que o valor de erro medido na saída do comparador seja maior que zero, diz-se então que o valor de referência aplicado ao modo em aguardo convergiria para um valor de tensão terminal inferior ao valor configurado para o modo ativado. Devendo assim, o controlador do protótipo, produzir uma ação de forma que a referência aplicada no

modo em aguardo seja reduzida. Somente na situação em que o valor de erro verificado for nulo é que nenhuma ação é tomada pelo controlador.

Devido ao fato de existir limitações físicas que impeçam que o erro no acompanhamento nulo seja alcançado, é interessante que se adote uma margem de erro aceitável que seja superior ao nível de precisão máxima atingida pelo microcontrolador que, para uma resolução de 10 bits no conversor A/D, é de aproximadamente 0,1%. Para o projeto do seguidor de referência digital foi definido uma faixa tolerável de erro de acompanhamento de $\pm 0,15\%$ em torno do valor de referência aplicado ao modo ativado. No caso em o valor nominal de tensão estiver sendo aplicado neste regulador, a tolerância máxima do protótipo seguidor de referência é aproximadamente 21V, o que representa o máximo valor de oscilação na tensão terminal durante a comutação entre os reguladores de tensão.

Com a definição da margem de erro tolerável, a interferência do controlador do protótipo passa a existir somente quando o valor de erro se encontra fora do intervalo $|erro| \leq \pm 0,15\%$. Na situação em que o erro for maior que +0,15%, o controlador produzirá uma ação para reduzir a referência do modo em aguardo, enquanto que se menor que -0,15%, o controlador agirá para elevar a mesma referência. A implementação do controlador no programa é feita de testes lógicos através do comando `if`, verificando se o valor do erro se encontra ou não dentro do limite aceitável. Na Tabela 4.2 é apresentado de forma sintética as análises realizadas através da lógica embarcada no protótipo, bem como se apresenta as possíveis ações de controle de acompanhamento.

Tabela 4.2 – Resumo sobre a análise do erro de acompanhamento com as possíveis ações de controle geradas no protótipo

Análise sobre o erro	Ação de controle
Se <i>erro</i> > +0,15%.	Reduzir
Se <i>erro</i> < -0,15%.	Aumentar
Se $erro \leq 0,15\%$.	Não Alterar

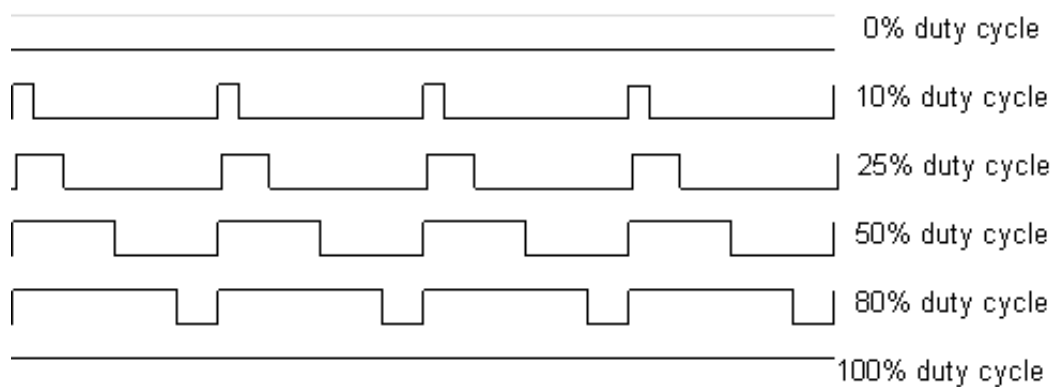
São três as ações que podem ser tomadas pelo controlador do protótipo e, para produzir os níveis necessários de sinal de controle, foi utilizada a saída analógica modulada na forma de sinal PWM cujo princípio de funcionamento, configuração e uso são abordados no item seguinte. Esta maneira com que o sinal de controle é externado aos circuitos que

permitiram a modificação ao da referência, apresenta certa simplicidade de implementação e também confiabilidade quanto a seu uso.

4.3.5. Modulação do Sinal de Controle por PWM

O sinal PWM do inglês *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso) é basicamente uma onda quadrada periódica com frequência fixa que atinge apenas dois níveis de amplitude, no caso dos Microcontroladores a saída atinge 0V e 5V. A principal característica da forma de onda PWM é a variação da duração do nível alto do sinal durante um período que, em relação à duração de todo o período, é chamado de ciclo de trabalho e é dado em valores percentuais. Na Figura 4.4 são mostradas as formas de onda em modulação PWM para vários ciclos de trabalho (*duty cycle*).

Figura 4.4 – Formas de onda em modulação PWM para vários ciclos de trabalho



Fonte: <http://arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM>

A transformada de Fourier de um sinal PWM é um conjunto de impulsos no domínio da frequência centrados em múltiplos da frequência fundamental da onda modulada com o valor médio do sinal, valor DC, localizado na frequência zero (LATHI, 2007). Pela característica de atenuação ou rejeição, por parte da maioria dos sistemas reais, à sinais com frequências muito elevadas, projeta-se a frequência fundamental do sinal PWM maior que a frequência de corte do sistema de tal forma que este rejeite todas as componentes do sinal diferentes da frequência zero, isto é, o valor médio. Com isso, somente o valor médio é interessante de ser modificado para a aplicação de interesse. No caso do protótipo seguidor de referência, apenas três valores de ciclo de trabalho serão utilizados.

O valor de ciclo de trabalho **100%** foi definido para ser utilizado quando a ação de controle tende a **reduzir** a referência aplicada no modo de controle em aguardo, enquanto que

o ciclo de trabalho **0%** é utilizado quando a ação de controle tende a **eleva**r a mesma referência. Para a situação em que o controlador não realiza ação de modificação de referência, foi definido o ciclo de trabalho de 50%. Na Tabela 4.3 estas informações são dispostas de forma mais simplificada. Adiciona-se a estas os valores de tensão na saída do microcontrolador para os ciclos PWM utilizados.

Tabela 4.3 – Ação de controle do protótipo e seus respectivos valores de ciclo PWM definidos. Apresentam-se os níveis de tensão na saída do microcontrolador para cada ação.

Ação de controle	Ciclo PWM	Saída do PIC
Reduzir	100%	5V
Aumentar	0%	0V
Não Alterar	50%	Média de 2,5V

A configuração da modulação PWM no microcontrolador PIC18F4520 através do compilador da CCS tem basicamente dois requisitos básicos. A primeira configuração é a habilitação do módulo CCP (*Capture, Compare and PWM*) do microcontrolador como PWM através do comando `setup_ccp1(ccp_pwm)` escrito no cabeçalho do programa. A segunda configuração é relacionada à frequência de operação do sinal PWM, a qual está ligada à frequência do contador interno de 8 bits *Timer2*.

A través do comando `setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,199,1)` configura-se a frequência do sinal PWM para 25kHz, quando a frequência do cristal usado no microcontrolador é de 20MHz. O item `T2_DIV_BY_1`, chamado *pre-scaler*, permite utilizar a frequência máxima de operação dos contadores internos, que é 25% da frequência do cristal. Os dois números após a vírgula são somados e o resultado divide a frequência na saída do *pre-scaler*. Após a configuração do módulo PWM, a forma utilizada para ajustar o ciclo de trabalho a ser modulado é o comando `set_pwm1_duty(ciclo)`, onde a variável `ciclo` pode assumir qualquer valor inteiro entre 0 e 1023, visto que o valor de ciclo PWM no PIC 18F4520 é uma variável inteira de 10 bits. Dentro deste intervalo, são configuradas os valores percentuais de forma a gerar os comandos do controlador do protótipo.

Para que os valores de tensão resultante da modulação PWM traduzam de forma correta a ação de controle, seja ela de diminuir ou aumentar a referência ou mesmo de manter o valor da mesma, é necessário que o sinal PWM na saída do microcontrolador seja

polarizado e amplificado, por meio de um circuito, chamado neste trabalho, de condicionador do sinal de controle, de forma que os corretos níveis de tensão sejam aplicados no circuito acionador do potenciômetro digital do regulador no modo em aguardo. O princípio de funcionamento do circuito acionador dos potenciômetros digitais do regulador de tensão, assim o circuito utilizado para o condicionamento do sinal de saída do PIC, serão abordados no item 4.4, o qual descreve as ferramentas de suporte em *Hardware* para a construção do protótipo seguidor de referência.

4.3.6. Seleção do modo de funcionamento

Como mencionado anteriormente, existem duas malhas de controle dentro do protótipo seguidor de referência. Uma destas é utilizada quando o módulo automático do regulador de tensão assume a malha de tensão terminal, ou seja, se encontra como modo ativado. Esta mesma possui na via de realimentação a função que estima a característica de magnetização direta do gerador apresentada na Equação 2. A segunda malha de controle entra em funcionamento quando o regulador manual se encontra como modo ativado. Esta última possui na realimentação a função que estima a característica de magnetização inversa do gerador apresentada na Equação 3.

A necessidade básica desta forma de funcionamento do protótipo seguidor de referência pode ser justificada com o seguinte fato: Na condição em que o regulador manual se encontra no modo ativado, o seguidor de referência ainda precisa realizar o acompanhamento entre a referência do mesmo com a referência do modo automático, visto que o funcionamento é bidirecional. No entanto a malha de controle do protótipo não pode corrigir a referência do modo manual, pois desta forma caracteriza-se a mudança direta na tensão terminal do gerador. Além disso, quando o operador tentasse alterar a referência de corrente de campo, o seguidor a traria de volta para o valor anterior, visto que a referência do modo automático, cujo valor não foi alterado, é tomada como horizonte de comparação.

Desta forma, quando o modo ativado é o modo manual, a referência a ser modificada é a referência de tensão terminal, a qual é a variável usada na malha de realimentação. Isso implica no uso de uma função que converta a referência de tensão em um valor correspondente á corrente de campo, justamente a função apresentada na Equação 3.

Um problema relacionado com a utilização de duas malha de controle no protótipo é a forma de como é feita a seleção entre elas. É necessário que a permuta entre as mesmas seja

realizada no mesmo instante em que houver comutação entre os modos de controle. Neste intuito, o protótipo seguidor de referência conta com duas entradas digitais, sendo que uma das entradas serve como redundância.

As entradas digitais detectam que o regulador manual passou a assumir diretamente a malha de controle de tensão, ou seja, foi configurado como modo ativado. Esta informação pode ser fornecida através de contatos livre dos relés 43X1, 43X2 e 43X3, cuja função é informar se o controle de tensão está configurado para o modo manual ou automático. Para proteção do circuito do protótipo, o acoplamento entre o sinal elétrico do contato dos relés mencionados e o microcontrolador é realizado por meio de um acoplador óptico, o qual é descrito no item 4.4.

Dentro do programa construído para apresentar a proposta do protótipo mostrado no Apêndice II, um comando *if* testa a condição das variáveis digitais comentadas para verificar qual modo do regulador de tensão está como modo ativado e assim permite que a correta malha de controle do protótipo seja habilitada. Além disso, foi inserido um pequeno intervalo de espera para habilitar o funcionamento do protótipo para a situação de comutação de malha de controle interna, apenas como fator de segurança no acompanhamento.

4.4. SUPORTE DE *HARDWARE* PARA O PROTÓTIPO

Para que o microcontrolador possa ser ligado eletricamente aos componentes que fornecem as informações necessárias a o protótipo seguidor de referência, é necessário que haja um conjunto de circuitos analógicos através dos quais as ligações são feitas. Os mesmos também são necessários para fazer com que a ação do controlador do protótipo seja traduzida como para alteração ou não da referência verificada nos potenciômetros digitais do regulador de tensão.

Além de permitir a entrada e saída de informações elétricas do Microcontrolador, estes circuitos realizam ações de proteção do protótipo de fatores originários dos circuitos do regulador de tensão. Um exemplo típico é a possibilidade de haver valores de corrente elevados, se comparados à potência de trabalho do microcontrolador, fornecidos pelos circuitos utilizados nas medições, entre outros problemas. Desta forma, nesta secção são apresentadas descrições sucintas sobre os circuitos projetados para dar suporte ao funcionamento do seguidor de referência digital proposto por este trabalho.

4.4.1. Condicionador dos Sinais Analógicos de Entrada

Uma das principais preocupações, quanto à proteção do microcontrolador na leitura de sinais analógicos, são os possíveis valores elevados de corrente que podem ser aplicados no mesmo, podendo leva-lo a mau funcionamento ou até mesmo danifica-lo. Outro ponto importante, com relação à leitura de sinais analógicos, é o intervalo no qual o microcontrolador pode trabalhar de forma que a informação não seja prejudicada por saturação. O conversor A/D do PIC18F4520 em sua configuração de referência de tensão interna de 5V, pode realizar a leitura de valores analógicos de tensão de 0V a 5V. Desta maneira, como o circuito condicionador de sinais deve preparar o sinal a ser lido pelo microcontrolador, este deve garantir a proteção à sobre corrente e também garantir que os valores a serem lidos no conversor A/D não estejam fora do intervalo de trabalho.

Na situação em que os valores do sinal de entrada somente assumem valores maiores zero, uma maneira usual de se fazer o valor mínimo e também o valor máximo do sinal analógico a ser lido não ultrapasse o intervalo de trabalho do microcontrolador, é aplicando ao sinal analógico um ganho menor que a unidade por meio de um divisor de tensão. Para sinais que não se encaixam nesta descrição, uma estratégia com circuitos somadores, cujos ganhos podem ser alterados de acordo com a necessidade, seria mais adequada.

Como todos os sinais a serem lidos pelo protótipo, nos pontos determinados de medição, somente assumem valores positivos, uma combinação de resistores foi aplicada para garantir que o valor máximo atingido seja menor que 5V. Na Tabela 4.4 são apresentados os resistores escolhidos para a aplicação do ganho no circuito condicionador de sinais de cada variável de entrada, bem é mostrado o nível de tensão máxima antes (V_i) e depois (V_0) da utilização do divisor de tensão. A tensão V_0 , a qual será utilizada para conexão do conversor A/D, é retirada sobre o resistor R2.

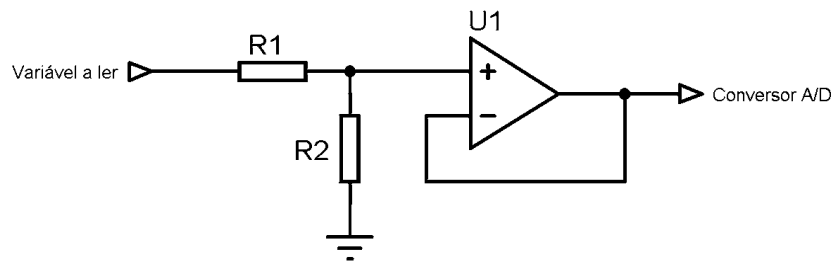
Tabela 4.4 – Valores de ganho, por divisor de tensão, aplicados nas variáveis analógicas de entrada do protótipo V_i , onde V_0 é a tensão de saída do condicionador de sinais.

	$\max(V_i)$	Divisor de tensão	$\max(V_0)$
Potência Ativa	15V	R1=10k Ω e R2=4,7k Ω	4,8V
Ref. Tensão Terminal*	10V	R1=16k Ω e R2=15k Ω	4,84V
Ref. Corrente de Campo*	10V	R1=16k Ω e R2=15k Ω	4,84V

*Sinais lidos nos terminais dos potenciômetros digitais do regulador de tensão.

Para proteger o microcontrolador de sobre valores de corrente nos terminais de medição dos sinais de entrada, foi utilizado o circuito seguidor de tensão, o qual utiliza um amplificador operacional cujo terminal inversor é diretamente ligado à saída e, no seu terminal não inversor, é aplicado o sinal a ser medido. O seguidor de tensão replica o valor posto à entrada não inversora na sua saída e, além disso, apresenta uma impedância de entrada grande o suficiente para isolar o sinal a ser lido do microcontrolador. A saída do divisor de tensão é aplicada como entrada no seguidor de tensão. O circuito condicionador de sinais utilizado para fins do protótipo seguidor de referência tem a saída do divisor de tensão resistivo aplicada à entrada do seguidor de tensão, como é mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Circuito buffer como divisor de tensão para condicionamento de sinais



Fonte: Arquivo pessoal do Autor.

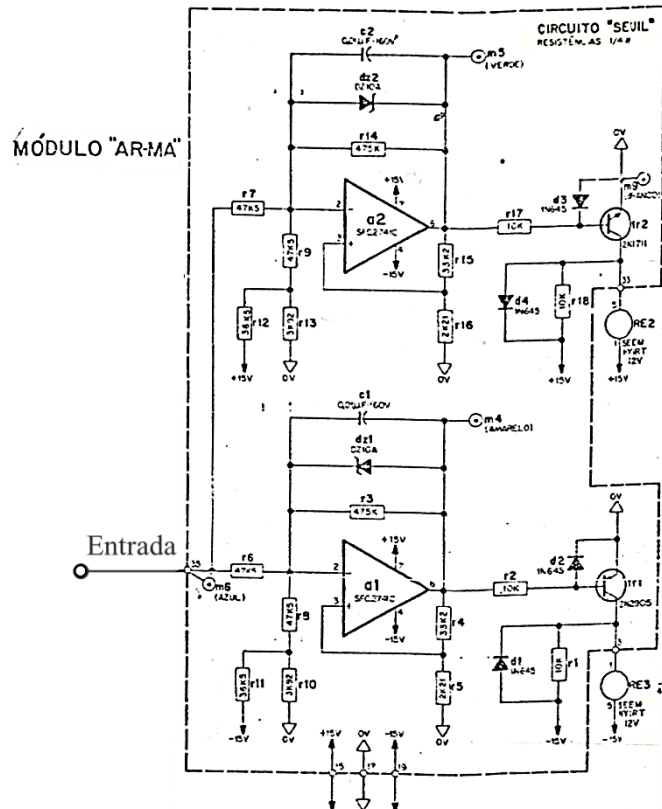
4.4.2. Condicionador do Sinal de Controle

Para que o sinal PWM produzido no microcontrolador aplique os valores corretos de tensão no circuito acionador dos potenciômetros do regulador de tensão, é necessário primeiramente conhecer os valores que devem ser aplicados no mesmo para que a ação desejada seja realizada. Na Figura 4.6 é mostrado o diagrama funcional do circuito acionador dos potenciômetros digitais do regulador de tensão. Pode-se notar que existem dois ramos com amplificadores, cada um aciona um relé auxiliar que é o responsável por combinar os contatos do potenciômetro digital de forma que haja redução ao aumento da referência, dependendo de qual é acionado.

O ramo superior do circuito mostrado na Figura 4.6 possui um circuito que aciona o relé auxiliar RE2 por meio de um transistor, o qual permite condução quando valores positivos de tensão são aplicados em sua base. Isso ocorre quando valores de tensão negativos são aplicados na entrada do acionador, pois é possível mostrar que a entrada do circuito acionador é basicamente reduzida de 10 vezes e tem seu sinal invertido na saída do amplificador operacional. Como o relé RE2 tem a função de reduzir a referência no potenciômetro digital, pode-se dizer que quando um sinal **negativo** é aplicado ao circuito

acionador, a referência do potenciômetro é **reduzida**. De forma análoga, quando um valor **positivo** é aplicado na entrada do circuito acionador, a referência no potenciômetro digital é **elevada** por meio da ação do relé RE3.

Figura 4.6 – Circuito acionador dos potenciômetros digitais do regulador de tensão



Fonte: Adaptado de Eletrobras/Eletronorte.

Desta forma, deve-se construir um circuito condicionador para tratar o sinal PWM de saída do microcontrolador de forma que a ação de redução da referência do modo em aguardo aplique um valor de tensão negativa no circuito acionador dos potenciômetros, ao passo que na ação de elevação seja aplicado um valor de tensão positiva no acionador.

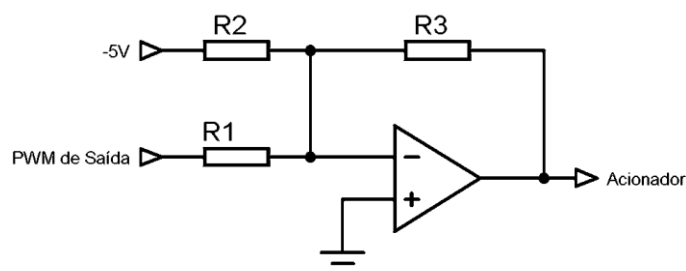
A ação de redução de referência produzida pelo controlador do protótipo gera um sinal PWM com 100% de ciclo de trabalho, o que significa que o sinal resultante passa 100% do período em nível alto, isto é, esta ação gera um sinal de corrente contínua em 5V. O que acontece de forma análoga para a ação de elevação de referência, a qual gera um sinal de corrente contínua em 0V. Enquanto que a ação de não modificação de referência caracteriza-se por gerar um sinal PWM variando de 0 a 5V com ciclo de trabalho de 50%, mas como a

frequência de trabalho do sinal é de 25kHz, espera-se que somente o valor médio (2,5 V) tenha efeito significativo no circuito acionador.

Como valores negativos não são alcançados pelo sinal PWM, é necessário primeiro polarizar este sinal de forma que seu valor médio, com ciclo de trabalho de 50%, seja nulo, até mesmo pelo fato de que 0V deve ser aplicado ao circuito acionador para a ação de não modificação de referência seja realizada. Depois de polarizado, o sinal PWM deve ser invertido para que no ciclo de trabalho de 100% (ação de redução de referência) valores negativos de tensão sejam aplicados no circuito acionador, assim como para que no ciclo de trabalho de 0% (ação de elevação de referência) valores positivos de tensão sejam aplicados no acionador.

Para que o requisito descrito anteriormente seja atendido, foi projetado o circuito condicionador para o sinal PWM de saída mostrado na Figura 4.7. Basicamente é um circuito somador inversor que inicialmente soma a tensão de $-2,5V$ ao sinal PWM, o que o torna polarizado de $+2,5V$ a $-2,5V$, e amplifica este sinal para, na saída, se observar um sinal de $\pm 10V$. O resistor R2 é projetado para ter o dobro do valor resistência de R1, para que um ganho de $1/2$ seja aplicado a tensão de $-5V$, bem como R3 é projetado para ter quatro vezes o valor de resistência de R1 para que um ganho de -4 (característica do circuito inversor) seja aplicado ao sinal PWM polarizado na saída do somador inversor. A saída deste circuito acionador aplica uma tensão de $-10V$ no circuito acionador para a ação de redução de referência e aplica $+10V$ para a ação de elevação. Estas informações estão dispostas de forma mais simplificada na Tabela 4.5.

Figura 4.7 – Circuito condicionador do sinal PWM de saída



Fonte: Arquivo pessoal do Autor.

4.4.3. Circuitos para Entradas e Saídas Digitais

O protótipo seguidor de referência digital foi projetado com duas entradas digitais que informam, de forma redundante, a mudança na malha de controle de tensão entre os modos do

regulador de tensão. Para que o microcontrolador seja protegido de fatores originados nos pontos de coleta destas informações, foi utilizado um circuito integrado que permite o acoplamento ótico entre os sinais elétricos do regulador e as entradas do microcontrolador. O circuito básico deste acoplador é mostrado na Figura 4.8, onde se pode notar que não existe ligação elétrica entre a entrada e a saída do circuito integrado, permitindo que o microcontrolador seja isolado do circuito de potência.

Tabela 4.5 – Sinais de saída do condicionador de controle em função das ações de controle.

Ação de controle	Ciclo PWM	Saída do PIC	Saída do protótipo
Reduzir	100%	5V	-10V
Aumentar	0%	0V	+10V
Não Alterar	50%	Média de 2,5V	Média 0V

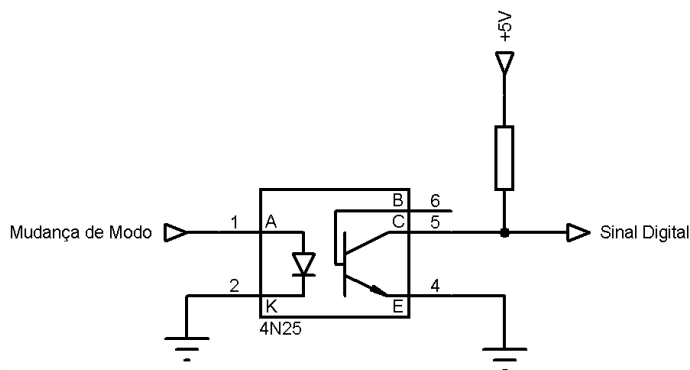
O circuito integrado escolhido foi o CI 4N25, onde o sinal de entrada é ligado entre os contatos 1 e 2, e quando apresenta nível de tensão suficiente para que o LED entre em condução, a luz emitida provoca a condução do foto transistor interno ao CI, o qual força uma tensão de 0V no terminal de coleta da variável digital conectada diretamente ao microcontrolador. Na situação inversa, quando o sinal de entrada não faz o LED conduzir, surge 5V no ponto indicado como sinal digital na Figura 4.8.

A forma com que o protótipo se comporta diante da comutação dos modos do regulador de tensão foi descrita como uma mudança de malha de controle interna ao programa, de forma que a variável a ser modificada passasse a ser a referência do modo que se encontrava em controle. No entanto, a modificação da variável a ser modificada por meio da ação do controlador, também implica em mudar os comandos para o circuito acionador do modo que passou para o funcionamento em aguardo, pois cada circuito acionador comanda apenas o potenciômetro digital de um dos módulos do regulador de tensão.

Para que esta necessidade seja atendida, um relé auxiliar é utilizado para mudar o ponto de aplicação da saída do circuito condicionador do sinal de controle. O circuito de acionamento deste relé auxiliar é mostrado na Figura 4.9, onde se pode notar que o relé somente é alimentado quando uma tensão positiva surge na base do transistor, cujo coletor é alimentado por +12V. Assim, uma variável digital é criada no programa (MOD) e, a partir da análise dos sinais digitais de entrada, a mesma aciona ou não o relé auxiliar. De acordo com

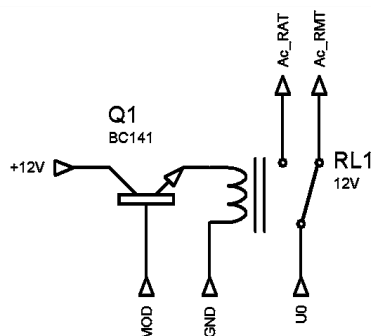
os valores das variáveis digitais de entrada, o módulo que se encontra em controle é sinalizado por meio de dois LED's no circuito geral do protótipo.

Figura 4.8 – Circuito condicionador dos sinais digitais que indicam a mudança entre os modos do regulador de tensão.



Fonte: Arquivo pessoal do Autor.

Figura 4.9 – Circuito acionador do relé auxiliar que modifica o potenciômetro digital comandado pelo controlador do protótipo



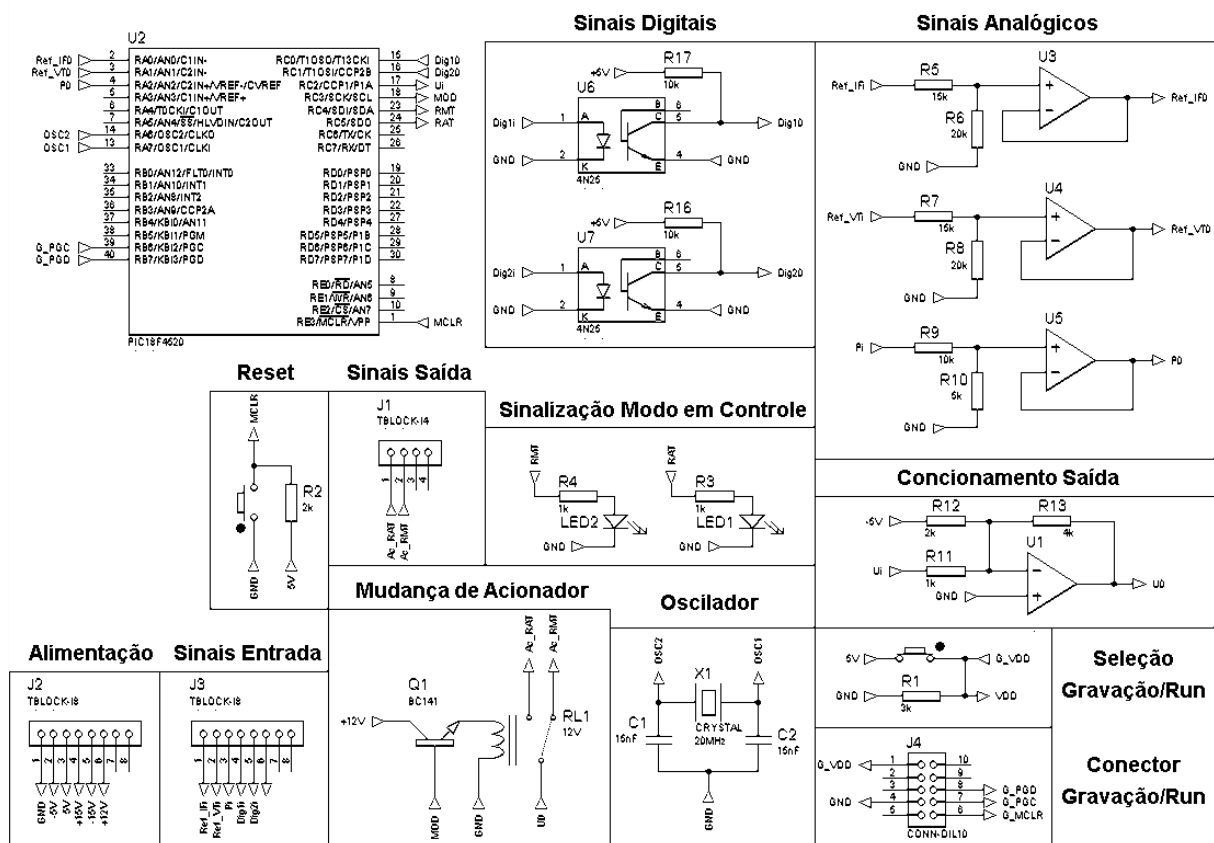
Fonte: Arquivo pessoal do Autor.

4.4.4. Circuito Completo do Protótipo Seguidor de Referência Digital

A partir do ponto em que os recursos de Hardware de suporte foram definidos, pode-se formar o circuito completo do protótipo seguidor de referência digital, mostrado na Figura 4.10, o qual se pretende implementar no regulador de tensão dos hidro geradores da casa de força 1 da UHE de Tucuruí. O circuito mostrado na Figura 4.10, onde as ligações elétricas entre os elementos são apenas indicadas, foi montado na plataforma de desenvolvimento e simulação em tempo real do ISIS Proteus®. Na Tabela 4.6 são mostrados os códigos utilizados no circuito para endereçamento dos pontos de conexão com os seus devidos significados.

Nota-se que os circuitos condicionadores dos sinais analógicos, destacados em um retângulo indicado como “Sinais Analógicos” no circuito da Figura 4.9, foram replicado para cada sinal de entrada já com a correta combinação de resistores que garante valores inferiores a 5V na conversor A/D do microcontrolador. Da mesma forma, os condicionadores de sinais digitais, destacados em um retângulo indicado como “Sinais Digitais” no circuito da Figura 4.10, foram replicados para as duas informações digitais vindas do regulador de tensão. O conjunto de sinais digitais e analógicos, os quais são aplicados nos condicionadores de sinais de entrada, são coletados nos pontos de medição do regulador de tensão e ligados ao protótipo por meio um conector identificado como “Sinais Entrada” no circuito da Figura 4.10.

Figura 4.10 – Circuito completo do protótipo digital do seguidor de referência proposto



Fonte: Arquivo pessoal do Autor.

O sinal verificado na saída do circuito condicionador do sinal PWM, gerado pelo microcontrolador, é aplicado no terminal comum de um relé auxiliar utilizado para modificar o potenciômetro digital no qual a referência deve ser modificada, isso na situação em que há mudança do módulo do regulador que assume a malha de controle de tensão terminal. O terminal normalmente fechado (NF) deste relé é ligado à entrada do circuito acionador do

potenciômetro digital do regulador manual de tensão, visto que esta configura a situação padrão de funcionamento do regulador de tensão, onde o regulador automático assume diretamente a malha de controle de tensão.

Tabela 4.6 – Descrição dos códigos utilizados para endereçamento dos elementos do circuito do protótipo apresentado na Figura 4.10.

Código	Localização no circuito	Significado
Ref_IFi	Entrada do Condicionador de sinal com os elementos R5, R6 e U3.	Valor de tensão verificada na saída do potenciômetro digital do regulador manual de tensão. Retoma a referência de corrente de campo.
Ref_IF0	Saída condicionador de sinal com os elementos R5, R6 e U3.	Sinal que remete a referência de corrente de campo após o condicionamento para a leitura pelo microcontrolador.
Ref_VTi	Entrada do Condicionador de sinal com os elementos R7, R8 e U4.	Valor de tensão verificada na saída do potenciômetro digital do regulador automático de tensão. Retoma a referência de tensão terminal.
Ref_VT0	Saída condicionador de sinal com os elementos R7, R8 e U4.	Sinal que remete a referência de tensão terminal após o condicionamento para a leitura pelo microcontrolador.
OSC1 e OSC2	Saídas do bloco oscilador.	Aplicação da frequência do oscilador de referência para o microcontrolador.
G_PGC e G_PG D	Microcontrolador e conector de Gravação <i>in circuit</i> .	Terminais de entrada da gravadora ISP.
Dig1i e Dig2i	Entrada dos condicionadores dos sinais digitais.	Informação, vinda do regulador de tensão, sobre a mudança entre os modos de controle.
Dig10 e Dig20	Saída dos condicionadores dos sinais digitais.	Informação digital sobre a mudança entre os modos de controle após o condicionamento e leitura pelo PIC.
Ui	Saída RC2 do PIC e entrada do condicionador do sinal de saída.	Sinal PWM de saída do microcontrolador modulando o sinal de controle.
U0	Saída do condicionador do sinal de saída.	Sinal PWM condicionado para comandar o circuito acionador do potenciômetro digital.
MOD	Base do transistor de acionamento do relé auxiliar de comutação.	Acionamento do relé de comutação.
RAT	Sinalização Modo ativado	Sinaliza que o regulador automático se encontra no modo ativado.
RMT	Sinalização Modo ativado	Sinaliza que o regulador manual se encontra no modo ativado.
Pi	Entrada do Condicionador de sinal com os elementos R9, R10 e U5.	Sinal de potência ativa lido no regulador de velocidade.
P0	Entrada do Condicionador de sinal com os elementos R9, R10 e U5.	Sinal de potência ativa condicionado para leitura pelo conversor A/D.
GND	Vários pontos.	Terra ou 0V.

Ac_RAT	Terminal NA do relé auxiliar de comutação.	Ponto de ligação com o circuito acionador do potenciômetro digital do regulador automático.
Ac_RMT	Terminal NF do relé auxiliar de comutação.	Ponto de ligação com o circuito acionador do potenciômetro digital do regulador manual.

Somente na mudança do controle para o regulador manual o relé auxiliar de comutação é acionado, assim o controlador passa a modificar a referência no potenciômetro digital do regulador automático, cujo circuito acionador é ligado ao terminal normalmente aberto (NA) do relé auxiliar. A informação do módulo do regulador de tensão que se encontra no modo ativado é sinalizada por meio de dois LED's no circuito do protótipo mostrado na Figura 4.10, onde são indicados como “Sinalização Modo ativado”.

Outros circuitos foram utilizados para suporte do funcionamento do microcontrolador, como o circuito de *reset* do microcontrolador utilizado para reiniciá-lo diante de uma condição de mau funcionamento ou necessidade operativa. Este procedimento faz com que as configurações iniciais do programa do microcontrolador sejam novamente feitas. Também se fez uso de um circuito de seleção do modo de operação, se em gravação ou funcionamento normal, o qual é utilizado para permitir que a gravação do microcontrolador possa ser realizada no próprio circuito sem a necessidade de retirar o CI. Este tipo de gravação é também conhecida como gravação *in circuit* cuja descrição de funcionamento e montagem pode ser encontrada em (MATOS, 2010).

Segundo as análises realizadas neste trabalho, o circuito da Figura 4.10 reúne os elementos necessários para este seja implementado no regulador de tensão dos geradores estudados para o desenvolvimento do mesmo. No entanto, antes disto, é necessário que testes sejam feitos sobre o circuito para analisar se o mesmo atende à outras possíveis peculiaridades práticas do regulador de tensão não detectadas durante o desenvolvimento da proposta de construção deste protótipo seguidor de referência digital.

Embora ainda não seja possível realizar os testes necessários sobre o circuito que compõe o módulo do seguidor de referência proposto, pois o mesmo ainda não possui versão física, foi possível apresentar uma proposta de programa a ser embarcado no microcontrolador PIC18F4520, como resultado da adaptação das ferramentas do dispositivo às necessidades do protótipo apresentadas neste capítulo. O programa proposto é mostrado no Apêndice II deste trabalho. Alguns comandos específicos sobre a programação do microcontrolador em questão não foram abordadas no item 4.3, o qual descreve as ferramentas de software, no entanto, o

programa apresentado como proposta houve a preocupação em comentar as principais linhas de código, de forma que é possível compreendê-las.

Outro ponto importante que precisa ser mencionado é o fato de que o programa apresentado como proposta não foi testado no circuito que compõe o módulo físico do protótipo seguidor de referência. O que permitiria analisar se o *software* desenvolvido atende os requisitos pré-estabelecidos para o projeto em questão, através da sintonia com o *hardware* projetado. Além disso, é preciso avaliar se o conjunto formado pelo módulo físico e o programa embarcado no microcontrolador apresentam uma resposta satisfatória diante do objetivo principal que é realizar o acompanhamento e aproximação entre as referências das variáveis utilizadas nos modos de controle do regulador de tensão.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a complexidade cada vez maior dos sistemas elétricos de potência, onde se expandem as áreas interconectadas, como no caso do sistema Brasileiro que possui um sistema de dimensão continental, nota-se uma tendência igualmente crescente de diferentes iniciativas de melhoria que visam a redução dos impactos gerados por fenômenos peculiares de máquinas e equipamentos elétricos sobre o sistema de potência.

No contexto de fenômenos peculiares, os geradores síncronos podem apresentar oscilações indesejadas nos valores de tensão e energia reativa produzida, em função da mudança entre os dois tipos de reguladores de tensão os quais possui. Cada regulador pertence a uma malha de controle de tensão cuja variável utilizada como referência é diferente do outro regulador. O chamado regulador automático de tensão (RAT) controla de forma direta a tensão terminal, no entanto o regulador manual (RM) controla o valor de corrente aplicada nos enrolamentos de campo do gerador, o que caracteriza o controle indireto da variável tensão terminal do gerador.

A mudança entre os reguladores de tensão pode ocorrer devido a problemas no regulador que assume o controle da tensão terminal, preparo do gerador para condições de testes no sistema de excitação, entre outros. A razão pela qual as oscilações de tensão podem acontecer está ligada a forma com que as referências das variáveis controladas são alteradas: isso ocorre de forma independente em cada regulador, o que em determinado momento pode configurar um valor equivalente em tensão terminal diferente entre os mesmos.

Uma solução que tem como objetivo atenuar a geração das possíveis oscilações de tensão na mudança entre os reguladores de tensão, visto que há a necessidade prática da utilização da estratégia de regulação manual e automática, é o chamado seguidor de referência cuja ação é alterar a referência aplicada ao regulador, cuja malha não se encontra selecionada para controle da tensão (ou se encontra no modo em aguardo), quando detectada a mudança na referência do regulador que assume o controle de tensão (ou se encontra no modo ativado).

Assim como apresentado nos capítulos anteriores deste trabalho, foram detectadas oscilações de tensão em níveis indesejados na mudança entre os reguladores de tensão em geradores que possuem seguidores de referência implementados de forma analógica. O que caracteriza que os mesmos vêm apresentando desempenho abaixo do esperado, surgindo então a necessidade de reajuste nos mesmos de maneira que sejam minimizados os erros de aproximação, ou acompanhamento, entre as referências dos reguladores de tensão.

Um ponto negativo de se utilizar seguidores de referência analógicos, é que não existe registro na literatura sobre a alteração dos parâmetros de forma que o acompanhamento seja melhorado em toda faixa de valores alcançáveis pelas variáveis afins. Isso devido a limitação de relação linear que o seguidor analógico realiza sobre as variáveis de tensão terminal e corrente de campo. Pois a relação entre as mesmas, como apresentado no Capítulo 2, formam uma família de curvas saturáveis, denominadas curvas de magnetização do gerador, as mesmas são diferenciadas em função da potência ativa gerada.

Desta forma, tornou-se necessário buscar alternativas para os seguidores de referência analógicos, o que deu origem ao tema de melhoria tratado neste trabalho de conclusão de curso. Foi idealizado um protótipo seguidor de referência no qual se pudesse embarcar a característica de magnetização do gerador e, assim, alcançar erros de acompanhamento significativamente menores, se comparado à versão analógica, em todo o intervalo de valores permitido à modificação das variáveis de interesse.

O primeiro passo dado em direção à execução do protótipo foram os ensaios realizados sobre um determinado gerador síncrono da primeira casa de força da UHE de Tucuruí-PA, para identificação de sua característica de magnetização. Estes ensaios foram precedidos por uma análise objetiva sobre o funcionamento do gerador e também das partes integrantes do sistema de excitação apresentados no capítulo 2 deste trabalho. Buscou-se com isso compreender a influência apresentada pela variável potência ativa exercida sobre a magnetização da máquina síncrona.

Inicialmente este problema foi estudado tomando como base a influência do módulo da corrente de armadura nas curvas de magnetização. As pesquisas e análises revelaram uma relação entre as variáveis corrente de campo, tensão terminal e corrente de armadura na forma de uma família de superfícies, as quais retomavam um valor de tensão terminal em função da variação das demais variáveis. As diferentes superfícies são dadas em função da modificação do fator de potência do gerador. Estendendo a relação da família de curvas para a variável potência ativa, verifica-se na verdade uma única superfície, visto que a variação da potência ativa no gerador também modifica o fator de potência. A análise baseada na variável potência ativa agrega mais significado aos dados obtidos nos ensaios em relação às observações prática do dia-a-dia dos operadores e mantenedores da máquina síncrona.

Para que os ensaios de identificação da característica de magnetização fossem realizados de forma objetiva e segura, estes foram devidamente programados junto aos órgãos competentes da empresa e planejados com base nos diagramas funcionais dos reguladores analógicos de tensão. Os ensaios foram realizados em dois momentos diferentes: na primeira parte, foram feitas as medições relativas ao funcionamento em vazio do gerador, isto é, sem que este estivesse conectado ao sistema; e em um segundo momento, as medições foram voltadas para a situação em carga, variando-se a corrente de campo e verificando o comportamento da tensão terminal para três valores de potência ativa dentro dos limites de variação liberados para este ensaio.

De posse dos dados dos ensaios, foram encontradas quatro curvas que apresentam a tensão terminal em função da corrente de campo foram identificadas, sendo que a diferença entre elas são dadas em função da variação da potência ativa. Para que as informações destas curvas fossem unificadas, dando forma a uma única superfície de magnetização, foi utilizado o *toolbox Curve Fitting* do *software* MATLAB®, o qual apresenta de forma objetiva ferramentas de estimação matemática de curvas. Desta forma, se obteve uma representação matemática da característica de magnetização direta: tensão terminal dada em função da corrente de campo e potência ativa; e inversa: corrente de campo dada em função da tensão terminal e da potência ativa.

Uma observação importante sobre a característica de magnetização encontrada está relacionada com os valores de potência utilizados nos ensaios. Após o ensaio em vazio (potência nula), o mínimo valor de potência ativa utilizada nos ensaios em carga foi de 200MW e o máximo valor foi de 256MW. Isso pode gerar dúvidas com relação à reapresentação das características reais do gerador, principalmente no intervalo entre 0 e

200MW. No entanto, não é permitido que o gerador trabalhe com valores muito inferiores à 200MW, dada a condição da queda d'água na data de realização dos ensaios, por isso, a faixa na qual incertezas podem estar presentes não é alcançada pela máquina síncrona. Dependendo da altura da queda d'água, a potência mínima pode sofrer variações. Além disso, a diferença entre as curvas identificadas em carga é pequena, o que possibilita projetar que, para potências maiores que 256MW, as curvas não sofrerão tanta modificação em relação às demais, viabilizando assim a utilização da superfície de magnetização identificada.

A partir do momento que se conhece a representação matemática da característica de magnetização do gerador, parte-se para a definição de qual ferramenta será utilizada para a implementação do protótipo seguidor de referência. Foi definido um microcontrolador PIC da família 18F principalmente por sua versatilidade, relativa simplicidade de utilização e baixo custo. O que necessitou primeiramente em pesquisas e estudos para que suas ferramentas, e também ferramentas de circuito que lhe deve dar suporte, pudessem ser utilizadas de forma adequada no caso em questão.

O próximo passo em direção ao desenvolvimento do protótipo seguidor de referência foi a definição da sua forma de funcionamento para que os requisitos iniciais fossem atendidos. Definiu-se uma malha de controle fechada para realizar o acompanhamento entre as referências dos reguladores de tensão. Basicamente, o seguidor de referência microcontrolado deve ler a referência do regulador no modo em aguardo, converte-la para um valor equivalente à referência do modo ativado, por meio da característica de magnetização direta ou inversa, dependendo de qual regulador se encontra em controle, logo depois este deve ser comparado ao valor da variável de referência no modo ativado, gerando assim um sinal de erro de acompanhamento.

O erro de acompanhamento gerado internamente ao protótipo seguidor de referência deve ser analisado em relação a um intervalo de tolerância máxima, dada em porcentagem sobre a variável do modo ativado. A tolerância máxima de erro está condicionada à precisão do microcontrolador utilizado. O resultado da análise do erro de acompanhamento deve produzir uma ação de controle na intenção de reduzir, aumentar ou mesmo manter o valor de referência apresentada no regulador no modo em aguardo.

Foi utilizada a modulação PWM para que a ação de controle fosse externada do microcontrolador aos circuitos responsáveis pela variação da referência nos reguladores de tensão. Circuitos condicionadores foram projetados para que a leitura das informações do regulador de tensão pudesse ser corretamente realizada, bem como para que o sinal de

controle modulado em PWM possa traduzir as ações necessárias para redução do erro de acompanhamento.

Subsequente à ação do controlador de alterar ou não a referência do regulador no modo em aguardo, o novo valor de referência deve ser lido, convertido para um valor equivalente em termos da referência do modo ativado, para que possa ser novamente comparado e gerar um valor de erro de acompanhamento. Isso caracteriza o início de um novo ciclo de funcionamento do protótipo seguidor de referência, o qual deve se repetir em uma determinada frequência configurada na rotina embarcada no microcontrolador.

Uma característica importante sobre a forma com que o protótipo seguidor de referência foi construído está relacionada com a mudança entre os reguladores de tensão. Visto que há a mudança da variável rastreada, foram projetadas duas malhas de controle. A seleção entre estas é feita na inicialização do protótipo, em que se detecta qual regulador se encontra no modo ativado. Esta seleção inicial somente é modificada na situação em que houver a mudança entre os reguladores de tensão.

O padrão normal de funcionamento do sistema de excitação configura o RAT no modo ativado e, por consequência, o regulador manual no modo em aguardo. Nesta condição, a primeira das malhas de controle do protótipo acompanha a referência de tensão terminal do RAT, o que significa que a referência a ser lida, e também modificada se necessário, é a corrente de campo do gerador. A referência lida deve então ser convertida para um valor equivalente à referência de tensão terminal e para isso, utiliza-se a função que estima a característica de magnetização direta do gerador, como um transdutor no ramo de realimentação da malha de controle do acompanhamento. O valor de erro gerado é analisado em relação aos limites toleráveis calculados por percentuais aplicados sobre o valor de referência de tensão terminal.

Quando ocorre a modificação entre os reguladores de tensão, pressupondo a configuração padrão com situação anterior, a malha de controle de acompanhamento também é modificada. A referência a ser lida é relativa à tensão terminal, pois a variável a ser rastreada é agora a referência de corrente de campo aplicada no regulador manual. Deve-se então converter a referência de tensão do gerador para um valor equivalente em corrente de campo, o que é feito através da curva de magnetização inversa no ramo de realimentação desta que é a segunda malha de controle do protótipo. O valor de erro gerado é analisado em relação ao valor de referência de corrente de campo.

Para todas as características descritas sobre o funcionamento do protótipo seguidor de referência microcontrolado buscou-se fazer uso das ferramentas disponíveis no microcontrolador utilizado, de forma fossem efetivamente realizadas por meio da programação. Além disso, foram projetados os circuitos analógicos utilizados como suporte para o uso do microcontrolador PIC conforme a necessidade desta aplicação, levando em consideração as peculiaridades do sistema de excitação. A partir disso, foi apresentado o programa que sintetiza a lógica de funcionamento do protótipo e também o circuito que compõe o módulo físico do protótipo seguidor de referência proposto neste trabalho.

Em princípio, o projeto relacionado ao protótipo seguidor de referência almejava a implementação física do protótipo e também a realização de testes do mesmo sobre o sistema de sistema de excitação dos geradores síncronos objetos de estudo para este trabalho. No entanto, devido a diversos fatores, como o reduzido tempo disponibilizado, foi possível alcançar o nível de lançar a proposta de construção do mesmo para que em projetos futuros seja possível continuar seu desenvolvimento.

Embora ainda seja possível realizar os testes necessários sobre o protótipo apresentado, pode-se dizer, tanto em relação ao programa a ser embarcado no microcontrolador quanto ao módulo físico, que o protótipo seguidor de referência proposto apresenta os elementos necessários para este ser implementado, ou seja, ter o seu circuito proposto com o microcontrolador construído, permitindo que testes iniciais sobre o mesmo possam sejam realizados no sistema de excitação. Esta afirmação pode ser justificada no fato de que todos os requisitos do projeto inicial foram atendidos de acordo com as características físicas do sistema de excitação descritas pelos próprios mantenedores do sistema de excitação e regulação de tensão.

Uma vez consolidado o protótipo seguidor de referência microcontrolado proposto por este trabalho de conclusão de curso, é possível que este seja implementado em outros geradores síncronos de outras usinas hidroelétricas que também apresentem problemas relacionados ao seguidor de referência. No entanto, é necessário destacar limitações da estratégia de construção do protótipo seguidor de referência, as quais estão ligadas principalmente pelo requisito de conhecer a característica de magnetização do gerador, pois isto é peculiar de cada máquina.

Dentro da primeira casa de força de UHE Tucuruí se encontram doze máquinas hidro geradoras com a mesma problemática descrita neste trabalho para o seguidor de referência. A priori projeta-se que os ensaios que foram realizados na UGH 08 sejam replicados nas outras

unidades de forma que o seguidor de referência pudesse ser projetado especificamente para gerador. Toda via, por meio dos ensaios que foram realizados sobre estes geradores durante o comissionamento, identificou-se que as máquinas de um mesmo fabricante, para o mesmo porte de geração (350MW), possuem comportamentos semelhantes quanto ao sistema de excitação. Desta forma, os ensaios de identificação da característica de magnetização se resumem os diferentes tipos de fabricantes e não à cada unidade.

Destaca-se que há alterações da característica de magnetização de geradores de mesmo fabricante quando se altera o porte de potência, desta forma, quando desejado implementar a estratégia apresentada neste trabalho para construção do seguidor de referência, é necessário primeiro avaliar o grau de alteração da curva de magnetização. Pode se exemplificar o exposto comparando os geradores estudados com as máquinas síncronas da segunda cada de força da UHE Tucuruí, para um mesmo fabricante, cuja potência nominal é de 375MW. Neste caso estima-se que modificação na característica de magnetização é pequena o suficiente para serem desprezadas, pois a diferença percentual de potência ativa é relativamente pequena, cerca de 7% apenas.

Para a situação descrita, a diferença na curva de magnetização, devido a alteração da potência ativa, foi desprezada, mas há situações em que será necessário realizar os ensaios para conhecimento da característica de magnetização. Outros fatores também podem interferir na alteração do sistema de excitação e ainda é necessário avaliar o grau de generalização das curvas identificadas nos ensaios e por tanto do protótipo seguidor de referência.

5.2 PROJETOS FUTUROS

Tendo em vista que este trabalho propôs um programa e também o circuito que compões o módulo físico do protótipo do seguidor de referência microcontrolado, é natural afirmar que a continuação deste projeto tem como primeira instância a construção do módulo apresentado. Isso permitirá analisar se os requisitos do projeto inicialmente idealizado foram atendidos, assim como verificar se o projeto inicial atende os requisitos reais do sistema. Podendo se chegar ao ponto de realizar modificações no protótipo proposto de forma que melhor realizasse a tarefa de acompanhamento entre as referências dos reguladores de tensão.

Para uma melhor visualização do desempenho do protótipo seguidor de referência, é necessário comparar seu comportamento com a versão analógica, implementada nos geradores síncrono estudados por este trabalho, diante da mudança entre os reguladores de

tensão para as mesmas condições especificadas de corrente de campo, tensão terminal e potência ativa. Projeta-se que este ensaio possa ser realizado sobre a condição a vazio, tomando uma variação percentual na referência de tensão terminal na situação em que o sistema de excitação é controlado pelo regulador manual. Nesta situação, o modo manual é selecionado para assumir o controle de tensão e, por meio de equipamentos de medição, a oscilação provocada na tensão terminal devido ao erro de acompanhamento é registrada.

Ainda como plano de continuação deste projeto, visualiza-se a construção de uma interface montada na plataforma de desenvolvimento do *software* LABVIEW®, o qual possa interagir dinamicamente com as variáveis disponibilizadas pelo protótipo. Principalmente o valor do erro de acompanhamento cuja variação poderá ser acompanhada graficamente e a verificação se este apresenta valores pequenos o suficiente para uma mudança suave entre os reguladores de tensão ou não.

Referências Bibliográficas

- [1] AHMED, ASHFAQ, Eletrônica de Potência, Prentice Hall, São Paulo, 2000.
- [2] ALBUQUERQUE, RÔMULO O., Análise de Circuitos em Corrente Alternada, Érica, 2002.
- [3] ALBUQUERQUE, VALÉRIO OSCAR DE, Controle Coordenado de tensão e potência reativa, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2002.
- [4] ALMEIDA, LEONARDO PINTO DE, Análise de Desempenho do Controle Automático de Geração e do Controle Secundário de Tensão, Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [5] ANDERSON, P. M. e FOUAD, A. A., Power System Control and Stability, 2nd edition, IEEE Press Editorial Board, United States of America, 2003.
- [6] BARBOSA, F. MACIEL, Estabilidade de Sistemas Eléctricos de Energia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2007.
- [7] BOLDEA, I. Synchronous generators / Ion Boldea. p. cm. -- (The electric power engineering series), Taylor & Francis, 2006.
- [8] CAMACHO, CARLOS ALEXANDRE PEREIRA, Utilização da Técnica de Otimização Simétrica no ajuste de tensão de um gerador síncrono, Itajubá (MG): UNIFEI, 2007.
- [9] DA MATA, CLAYTON GUIMARÃES. Uma contribuição na análise da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de distribuição na presença de geração distribuída. [Juiz de Fora] 2005 XIII, 122 p. 29,7 cm. (UFJF, M.E.E., Engenharia Elétrica, 2005)
- [10] Data Sheet PIC18F2420/2520/4420/4520, 28/40/44-Pin, MICROCHIP.
- [11] Desenhos funcionais dos reguladores de tensão dos geradores síncronos da primeira casa de força da usina hidrelétrica de Tucuruí-PA, ELETROBRAS ELETRONORTE.
- [12] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, Charles Jr.; UMANS, Stephen D. – Máquinas Elétricas. 6 ed.; São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2006.
- [13] GIMENEZ, S.P Microcontroladores 8051. 1. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2002.

- [14] <http://arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM>, acessado em 14/05/13 às 11:30 horas.
- [15] http://vivendoeletricidade.blogspot.com.br/2010_06_22_archive.html, acessado em 20/02/2013 às 20:00 horas.
- [16] <http://www.mathworks.com/products/curvefitting>, Datasheet *Curve Fitting Toolbox* MATLAB®, MathWorks, acessado em 20/02/2013 às 10:00 horas.
- [17] KOSOW, IRVING LIONEL, Máquinas Elétricas e Transformadores, tradução de Felipe Luiz Daiello e Percy Antonio Soares, Porto Alegre, Globo, 1982.
- [18] KUNDUR, PRABHA – Power System Stability and Control – McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 1994.
- [19] LATHI, B. P., Análise de Sistemas Lineares, tradução Gustavo G. Parma, Porto Alegre, Bookman, 2007.
- [20] MIYADAIRA, A. N. Microcontroladores Pic18, Aprenda e Programe em LINGUAGEM C. 1. ed. São Paulo: Érica, 2009.
- [21] MORA, JESÚS FRAILE, Máquinas Elétricas 5 ed, McGraw-Hill/Interamericana de España, 2003.
- [22] MOREIRA, TIAGO JOSÉ DE A., Estudo e enquadramento do sistema de excitação do alternador no aproveitamento hidroelétrico de Caniçada, UMINHO, 2010.
- [23] MOTA, DANIEL DOS SANTOS, Técnicas de ajustes de estabilizadores de sistemas de potência, Dissertação (Mestrado), Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [24] N. G., ALBERTO e L. F. C., Bretas. Estabilidade transitória em sistemas eletro energéticos. EESC/USP, São Paulo, 1978.
- [25] PEREIRA, FÁBIO, Microcontroladores PIC: Programação em C, Érica, 2003.
- [26] PORTUGAL, PAULO MAX MACIEL, Análise de Auto-Excitação e Curto-Circuito Capacitivo em Geradores Síncronos Conectados a Grandes Sistemas de Transmissão CCAT e CAAT. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Apêndice I

Resumo de características, recursos e funções do Microcontrolador PIC 18F4520

FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
Portas	As portas de entrada/saída do PIC são classificadas em cinco grupos (PORTs) denominados de A à E (PORTA, PORTB ... PORTE). A classificação é feita de acordo com as características elétricas relacionadas com a carga de funções realizadas por cada uma.
Canais I/O	A nomenclatura I/O (<i>Input/Output</i>) é geralmente utilizada para indicar entrada e saída digitais, ou seja, níveis zero (baixo) ou um (alto). Todos os pinos dos PORTs podem operar no modo digital, sendo este o estado <i>default</i> da maioria.
Portas Analógicas	O PIC18F4520 disponibiliza 13 portas que podem ser configuradas para realiza a leitura de sinais analógicos variando de 0 a 5V. Todos os canais são normalmente ligados em aberto com o único conversor A/D disponibilizado. Somente uma chave pode ser habilitada por vez. A diretriz é dada em programação.

Conversor A/D	Este dispositivo possui um conversor analógico para digital que pode acessar informação de qualquer um dos canais analógico por vez. Por configuração, um sinal analógico assumindo qualquer valor entre 0 e 5V é aplicado a um dos canais analógicos e o conversor A/D trata de quantizá-lo como um dos 1024, para o conversor de 10 bits, possíveis níveis de representação.
CCP (Capture/ Compare/ PWM)	Permite ao programador controlar e medir o tempo de diversos eventos. O modo de captura mede a duração do evento, o comparador analisa diferenças entre determinados contadores e o modo PWM realiza a modulação por largura de pulso de determinado sinal.
Timers	Os <i>timers</i> são conjuntos de contadores sincronizados com <i>clocks</i> de referência interna ou externa. Podem ser usados para registro de tempo, contagem de eventos, sincronização com outros dispositivos, etc. São disponíveis quatro diferentes tipos de timers no dispositivo em questão. Alguns deles estão associados a funções específicas como o timer 2 que determina o sincronismo do PWM.
Interrupções	A ação de interrupção permite que uma determinada atividade prioritária seja realizada independentemente do processamento atual. Existem 20 tipos de interrupções diferentes que podem ser geradas por processo interno ou externo.
Interrupções de Timers	As interrupções geradas por qualquer um dos Timers ocorrem sempre que o contador estoura, ou seja, chega ao seu valor máximo e retorna ao valor mínimo. É geralmente usada para a contagem de tempo, sincronização de alguma atividade como amostragem de um sinal, envio de dados para periférico, entre outras utilidades.
Oscilador	O oscilador possibilita a operação síncrona de todos os elementos do dispositivo. É normalmente configurado para ressoadores externos de cristal de quartzo ou cerâmico. A frequência de operação é limitada a 48MHz sobre a qual o dispositivo pode executar até 12 milhões de instruções por segundo.

Apêndice II

Programa Desenvolvido para Apresentar a Proposta de Construção do Protótipo Seguidor de Referência Microcontrolado

```
/*%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%  
%          Universidade Federal do Pará - UFPA  
%          Campus Universitário de Tucuruí - CAMTUC  
%          Faculdade de Engenharia Elétrica - FEE  
%  
%          TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
%  
%          AUTOR: Jefferson Souza Costa  
%  
%          ORIENTADOR: MSc. Janio José de Lana  
%  
%          COORIENTADOR: MSc. Raphael Barros Teixeira  
%  
%          Tucuruí - PA, MAIO DE 2013  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%*/
```

```
//Diretrizes de Compilação  
#include <18f4520.h>  
#device adc=10  
#use delay(clock=20000000)  
#fuses HS,NOWDT,PUT
```

```

//Definições de identificação das variáveis Digitais
#define RAT pin_c5
#define RMT pin_c4
#define MOD pin_c3

//Reserva de memória para as variáveis utilizadas no programa
short K,Dig10,Dig20;
signed long a,b,c,d,e,f,g,h,l,m,n,o,p,q,r,s;
int ciclo;
float Ref_IF0,Ref_VT0,P0,Vcor1,Vcor2,Vcor,Icor,Icor1,ERRO_RAT,ERRO_RMT;

signed long Ac,Va;

//Rotina de tratamento da interrupção pelo Timer0
#int_timer0
void t0()
{
//Carrega novamente o valor de contagem inicial no Timer0
set_timer0(64911-get_timer0());

/*A Leitura das entradas digitais informam qual regulador de encontra como
modo ativado. Nos testes que serão feitos a seguir do valor das mesmas,
a informação de que houve modificação entre os modos do regulador de tensão
será dada quando as duas variáveis assumirem o valor "1", o que significa que
o regulador manual se encontra como modo ativado.*/

Dig10=input(pin_c0);
Dig20=input(pin_c1);

/*Rotina de tratamento da modificação entre os modos do regulador de tensão.
No momento em que houver comutação entre os modos do regulador, é necessário
aguardar certo tempo para que a malha de acompanhamento do protótipo entre
para a correção da agora variável de referência do modo o qual esta em
controle. Isso pois ainda o tempo de atuação do relé auxiliar de modificação
dos modos, entre outros pequenos intervalos.*/

if (!(Dig10&Dig20)&K){ //Caso o RAT esteja no modo ativado, mas o
//identificador de comutação K é verdadeiro, significa
//que houve comutação do RMT para o RAT. Por isso:
disable_interrupts ( global | int_timer0);//Desabilita a contagem o Timer0
K=FALSE;//Identifica K como 0, modo normal quando o RAT é o modo ativado
OUTPUT_LOW(MOD);//Desliga o relé auxiliar da comutação
delay_ms(100);//Aguarda 100ms
enable_interrupts ( global | int_timer0);//Torna a habilitar o interrupção
OUTPUT_LOW(RMT); //Apaga o LED que identifica o RMT como modo ativado
OUTPUT_HIGH(RAT); //Acende o LED que identifica o RAT como modo ativado
}
if ((Dig10&Dig20)&!K){ //Caso o RMT esteja no modo ativado, mas o
//identificador de comutação K é falso, significa que
//houve comutação do RAT para o RMT. Por isso:
disable_interrupts ( global | int_timer0);//Desabilita a contagem o Timer0

```

```

K=TRUE;//Identifica K como 1, modo normal quando o RMT é o modo ativado
OUTPUT_HIGH(MOD);//Liga o relé auxiliar da comutação
delay_ms(100);//Aguarda 100ms
enable_interrupts ( global | int_timer0);//Torna a habilitar o interrupção
OUTPUT_HIGH(RMT); //Acende o LED que identifica o RMT como modo ativado
OUTPUT_LOW(RAT); //Apaga o LED que identifica o RAT como modo ativado
}

```

/*Malha de controle do Protótipo para quando o Regulador Automático se encontra como modo ativado.

A variável a ser acompanhada pela malha de controle e a referência de tensão Terminal lida na saída do potenciômetro digital do regulador automático. Lê-se a corrente de campo, a potência ativa e calcula-se qual o valor equivalente à referência em tensão terminal. Neste ponto, comparam-se os dois valores e de acordo como o erro, o controlador toma a decisão de modificar ou não a referência do regulador Manual.*/

```

if (!(Dig10&Dig20))//Testa o modo do regulador em controle, caso seja o RAT
{
//Leitura da referência do Regulador manual
set_adc_channel(0);//Ajusta a canal NA0 como fonte da leitura do conversor AD
Ref_IF0=31*((float)read_adc()+1)/1024/3;//Faz a leitura do valor de referência
//de corrente de campo e aplica o ganho de conversão para que o valor dado em
//binário seja convertido para o valor correspondente antes da entrada do
//condicionador de sinais.
delay_us(100);//Espera a conversão AD terminar

```

```

//Leitura da Potência Ativa
set_adc_channel(2);//Ajusta a canal NA2 como fonte da leitura do conversor AD
P0=235*((float)read_adc()+1)/1024/147;//Faz a leitura do valor da potência
//Ativa e aplica o ganho de conversão para que o valor dado em
//binário seja convertido para o valor correspondente antes da entrada do
//condicionador de sinais.
delay_us(100);//Espera a conversão AD terminar

```

```

//Leitura da referência de tensão terminal
set_adc_channel(1);//Ajusta a canal NA1 como fonte da leitura do conversor AD
Ref_VT0=31*((float)read_adc()+1)/1024/3;//Faz a leitura do valor de referência
//de tensão terminal e aplica o ganho de conversão para que o valor dado em
//binário seja convertido para o valor correspondente antes da entrada do
//condicionador de sinais.
delay_us(100);//Espera a conversão AD terminar

```

/*Cálculo do valor correspondente à referência de tensão terminal a partir dos valores de referência de corrente de campo e potência ativas medidos. A função que permite esta conversão foi a função identificadas nos ensaios e é chamada de característica de magnetização do gerador síncrono.

Este ponto do programa representa a via de realimentação da malha de controle do protótipo.*/

```

Vcor1=a+b*Ref_IF0+c*P0+d*Ref_IF0*Ref_IF0+e*Ref_IF0*P0;

```

```

Vcor2=Vcor1+f*P0*P0+g*Ref_IF0*Ref_IF0*Ref_IF0;
Vcor=(Vcor2+h*Ref_IF0*Ref_IF0*P0+l*Ref_IF0*P0*P0)/10000;

/*Calculo do erro de acompanhamento. Verifica a diferença entre a referência
de tensão terminal e o valor correspondente a este, calculado a partir da
referência de corrente de campo e da potência ativa. Este ponto do programa
representa o bloco comparador da malha de controle do protótipo.*/
ERRO_RAT=Ref_VT0-Vcor;//Gera o erro de acompanhamento da referência de tensão

/*Calculo do sinal de controle. Esta parte do programa representa o controlador
do protótipo, o qual analisa o valor do erro de acompanhamento gerado no
comparador e se o módulo for maior que o limite tolerável, é gerado um comando
de redução de referência do modo em aguardo, na situação em que o erro é menor
maior que o limite, o que é feito configurando o ciclo PWM como 100%.
Do contrário, quando o erro é menor que o limite, é gerado um comando de
elevação da referência, o que é feito configurando o ciclo PWM como 0%. Somente
na situação em que o módulo do erro de acompanhamento é menor que o limite
tolerável, é gerador um comando de não alteração de referência do regulador
manual, o que é realizado configurando o ciclo PWM com 50%.*/

if ((ERRO_RAT)>3*Ref_VT0/2000){ciclo=100;}//Testa se o valor do erro de
//acompanhamento é maior que o limite tolerável sobre a referência de tensão
//terminal. Caso verdadeiro, o ciclo PWM é configurado como 100%.
else if ((ERRO_RAT)<3*Ref_VT0/2000){ciclo=0;} //Testa se o valor do erro de
//acompanhamento é menor que o limite tolerável sobre a referência de tensão
//terminal. Caso verdadeiro, o ciclo PWM é configurado como 0%.
else{ciclo=50;}//Testa se o módulo do erro de acompanhamento é menor que
//o limite tolerável. Caso verdadeiro, o ciclo PWM é configurado como 50%.

set_pwm1_duty(1023*((int32)ciclo)/100);//Converte a porcentagem do ciclo PWM,
//Configurado na variável ciclo, para um valor equivalente entre zero e 2^10-1.
//O valor é convertido para uma variável inteira de 32 bits, pois é o formato
//aceito pela função que seta o valor do ciclo PWM, e então o valor de ciclo
//é efetivamente modulado na forma PWM.
} //Indicação final da malha de controle utilizada na situação em que o RAT se
//encontra no modo ativado.

/*Malha de controle do Protótipo para quando o Regulador Manual se encontra
como modo ativado.
A variável a ser acompanhada pela malha de controle é a referência de corrente
de campo lida na saída do potenciômetro digital do regulador Manual.
Lê-se a tensão terminal, a potência ativa e calcula-se qual o valor
equivalente à referência em corrente de campo. Neste ponto, comparam-se os dois
valores e de acordo como o erro, o controlador toma a decisão de modificar ou
não a referência do regulador automático.*/

if (Dig10&Dig20)//Testa o modo do regulador em controle, caso seja o RAT
{
//Leitura da referência do Regulador manual
set_adc_channel(0);//Ajusta a canal NA0 como fonte da leitura do conversor AD

```

```

Ref_IF0=31*((float)read_adc()+1)/1024/3;//Faz a leitura do valor de referência
//de corrente de campo e aplica o ganho de conversão para que o valor dado em
//binário seja convertido para o valor correspondente antes da entrada do
//condicionador de sinais.
delay_us(100);//Espera a conversão AD terminar

//Leitura da Potência Ativa
set_adc_channel(2);//Ajusta a canal NA2 como fonte da leitura do conversor AD
P0=235*((float)read_adc()+1)/1024/147;//Faz a leitura do valor da potência
//Ativa e aplica o ganho de conversão para que o valor dado em
//binário seja convertido para o valor correspondente antes da entrada do
//condicionador de sinais.
delay_us(100);//Espera a conversão AD terminar

//Leitura da referência de tensão terminal
set_adc_channel(1);//Ajusta a canal NA1 como fonte da leitura do conversor AD
Ref_VT0=31*((float)read_adc()+1)/1024/3;//Faz a leitura do valor de referência
//de tensão terminal e aplica o ganho de conversão para que o valor dado em
//binário seja convertido para o valor correspondente antes da entrada do
//condicionador de sinais.
delay_us(100);//Espera a conversão AD terminar

/*Calculo do valor correspondente à referência de corrente de campo a partir dos
valores de referência de tensão terminal e potência ativas medidos. A função
que permite esta conversão foi a função identificadas nos ensaios e é
chamada de característica de magnetização inversa do gerador síncrono.
Este ponto do programa representa a via de realimentação da malha de
controle do protótipo.*/
Icor1=m+n*Ref_VT0+o*p*Ref_VT0+q*Ref_VT0*P0;
Icor=(Icor1+r*Ref_VT0*Ref_VT0+s*Ref_VT0*Ref_VT0*P0)/10000;

/*Calculo do erro de acompanhamento. Verifica a diferença entre a referência
de corrente de campo e o valor correspondente a este, calculado a partir da
referência de terminal e da potência ativa. Este ponto do programa
representa o bloco comparador da malha de controle do protótipo.*/
ERRO_RMT=Ref_IF0-Icor;//Gera o erro de acompanhamento da referência de corrente

/*Calculo do sinal de controle. Esta parte do programa representa o controlador
do protótipo, o qual analisa o valor do erro de acompanhamento gerado no
comparador e se o módulo for maior que o limite tolerável, é gerado um comando
de redução de referência do modo em aguardo, na situação em que o erro é menor
maior que o limite, o que é feito configurando o ciclo PWM como 100%.
Do contrário, quando o erro é menor que o limite, é gerado um comando de
elevação da referência, o que é feito configurando o ciclo PWM como 0%. Somente
na situação em que o módulo do erro de acompanhamento é menor que o limite
tolerável, é gerador um comando de não alteração de referência do regulador
Automático, o que é realizado configurando o ciclo PWM com 50%.*/

//Atuador
if ((ERRO_RAT)>3*Ref_IF0/2000){ciclo=100;}//Testa se o valor do erro de
//acompanhamento é maior que o limite tolerável sobre a referência de corrente

```

```

//de campo. Caso verdadeiro, o ciclo PWM é configurado como 100%.
else if ((ERRO_RAT)<3*Ref_IF0/2000){ciclo=0;}//Testa se o valor do erro de
//acompanhamento é menor que o limite tolerável sobre a referência de corrente
//de campo. Caso verdadeiro, o ciclo PWM é configurado como 0%.
else{ciclo=50;}//Testa se o módulo do erro de acompanhamento é menor que
//o limite tolerável. Caso verdadeiro, o ciclo PWM é configurado como 50%.

set_pwm1_duty(1023*((int32)ciclo)/100);//Converte a porcentagem do ciclo PWM,
//Configurado na variável ciclo, para um valor equivalente entre zero e 2^10-1.
//o valor é convertido para uma variável inteira de 32 bits, pois é o formato
//aceito pela função que seta o valor do ciclo PWM, e então o valor de ciclo
//é efetivamente modulado na forma PWM.

} //Indica o final da malha de controle utilizada na situação em que o RMT se
//encontra no modo ativado.

} //Indica o final da rotina de tratamento da interrupção pelo Timer0.

/*Programa principal. Esta parte do programa é onde serão dadas as configurações
iniciais das rotinas que serão utilizadas durante o funcionamento normas do
programa. A parte antes do Loop infinito de execução no programa principal,
contém as diretrizes que serão carregadas somente uma vez. Em caso de perda
destas configurações por algum motivo durante a execução do programa, o
microcontrolador deve ser reiniciado.*/

void main()
{
/*Identificação do modo do regulador de tensão que se encontra em controle.
Em condições normais de funcionamento, a variável K identifica que o modo em
controle é o regulador automático com o valor FALSE e identifica como modo
em controle o RMT para o valor TRUE.
Quando o valor desta variável é confrontado com a informação das entradas
digitais do protótipo, esta auxilia a verificar se houve ou não comutação.*/
if (!(Dig10&Dig20)){ //No caso das duas entradas digitais serem falsas
OUTPUT_HIGH(MOD); //Desliga o relé auxiliar da comutação
K=FALSE; //Define a variável de teste de comutação como nível
//lógico 0, o que permite verificar se houve comutação do
//RAT para o RMT.

OUTPUT_HIGH(RAT); //Acende o LED que identifica o RAT como modo ativado
OUTPUT_LOW(RMT); //Apaga o LED que identifica o RMT como modo ativado
}
if(Dig10&Dig20){ //Caso contrário
OUTPUT_HIGH(MOD); //Liga o relé auxiliar da comutação
K=TRUE; //Define a variável de teste de comutação como nível
//lógico 1, o que permite verificar se houve comutação do
//RMT para o RAT.

OUTPUT_HIGH(RMT); //Apaga o LED que identifica o RMT como modo ativado
OUTPUT_LOW(RAT); //Acende o LED que identifica o RAT como modo ativado
}
}

```

```
//Inicialização dos valores das variáveis utilizadas no programa. Esta etapa é
//importante, pois apaga os valores anteriormente utilizados no espaço de
//memória agora alocado para uma variável de interesse deste programa.
```

```
ciclo=50;
Ref_IF0=0;
Ref_VT0=0;
P0=0;
Vcor1=0;
Vcor=0;
Icor=0;
Icor1=0;
ERRO_RAT=0;
ERRO_RMT=0;
```

```
/*Definição dos coeficientes das funções utilizadas como transdutor do valor
da variável do modo em aguardo para um valor equivalente ao valor da variável
do modo ativado. As constantes são configuradas com uma valor que
corresponde ao seu valor original multiplicado 10^4, isto para simplificar a
declaração dos mesmos neste programa. Desta forma, considera-se uma precisão de
4 casas decimais sobre o valores dos coeficientes das funções. A compensação
desta Multiplicação é feita na declaração da função que estima a característica
de magnetização do gerador identificada nos ensaios.*/
```

```
//Coeficientes para a função que estima a característica de magnetização direta
a=-13430;
b=36590;
c=27450;
d=-1311;
e=-8129;
f=-1697;
g=-197;
h=488;
l=349;
```

```
//Coeficientes para a função que estima a característica de magnetização inversa
m=-68150;
n=33270;
o=25240;
p=-4121;
q=-7744;
r=187;
s=508;
```

```
//Configurações iniciais sobre as funções que serão utilizadas no programa.
```

```
setup_adc_ports(ALL_ANALOG); //Configura todas as entradas que podem funcionar
//como canal analógico como habilitadas para servirem de fonte de sinal para
//o conversor A/D.
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //Configura clock de referência do Timer 0 e
//Timer2 como o clock interno, o qual representa o valor de frequência do
```

```

//cristal dividido por quatro, devido ser utilizado na saída do pre-scaler
//que separa o cristal da frequência interna do microcontrolador.
setup_timer_0( RTCC_INTERNAL | RTCC_DIV_8); //Configura o pre-scaler interno do
//contador Timer0 como 8, resultando em uma frequência que equivale a 1/32 da
//frequência do cristal: Ftimer0=(20M/4)/8 = 625kHz;
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,199,1); //Configura o Timer 2 com frequência de:
//Ftimer2=20M/4/(199+1) = 25 kHz. Esta é frequência de trabalho do PWM.
setup_ccp1(ccp_pwm); //Configura o ccp1 no modo PWM
set_timer0(64910); //Baseado no valor de frequência após o pre-scaler do
//Timer0 e sabendo que este contador para o PIC18F4520 é de 16 bits, o tempo
//em que o acumulador do Timer0 indicaria que seu limite foi excedido e que
//voltará a contar a partir de zero, o que configura o chamado estouro do
//contador, seria de 0,104856 segundos ou uma frequência de aproximadamente
//9,5Hz. Para elevar a frequência para 1kHz, carrega-se então um valor no
//acumulador que permita o estouro mais rapidamente. Neste caso, devem se
//passar 625 passos no contador para termos estouros com 1kHz de frequência. O
//valor a ser carregado é:  $2^{16}-1-625 = 64910$ . Este valor deve ser carregado
//sempre que houver um novo estouro, por isso esta função é utilizada na
//inicialização do programa e também no início da rotina de tratamento.
enable_interrupts ( global | int_timer0); //Habilita a interrupção pelo Timer 0

/*LOOP infinito. As rotinas escritas dentro do laço while serão executadas
normalmente quando o programa não se encontra em situação de estouro do
contador. Por isso, geralmente se coloca neste ponto do programa as rotinas de
comunicação, exibição de informações em LCD, entre outras. Como ainda nenhuma
destas funções são utilizadas por esta versão do protótipo seguidor de
referência digital, há apenas o comando de espera que impede que o
microcontrolador fique fazendo nada na máxima frequência possível. O comando
de espera não interfere na execução da rotina de interrupção.*/
while(true)
{
    Dig10=input(pin_c0);
    Dig20=input(pin_c1);
    set_pwm1_duty(1023*((int32)ciclo)/100); //Converte a porcentagem do ciclo PWM,
//Configurado na variável ciclo, para um valor equivalente entre zero e  $2^{10}-1$ .
//O valor é convertido para uma variável inteira de 32 bits, pois é o formato
//aceito pela função que seta o valor do ciclo PWM, e então o valor de ciclo
//é efetivamente modulado na forma PWM.
    delay_ms(750);
}
}

```