



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Mickael André da Silva

Desenvolvimento e aplicação de soluções para evitar o apagamento de pontes de tiristores em compensadores síncronos operando próximo de corrente nula

Florianópolis
2026

Mickael André da Silva

Desenvolvimento e aplicação de soluções para evitar o apagamento de pontes de tiristores em compensadores síncronos operando próximo de corrente nula

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Supervisor: Adelson Alves Junior, Eng.

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

da Silva, Mickael André da
Síntese e implementação de controle supervisório para
processos de energia / Mickael André da da Silva ;
orientador, Rodolfo César Costa Flesch, 2026.
96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação,
Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Limitador. 3.
Tiristores. 4. Reguladores. I. Flesch, Rodolfo César
Costa. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Mickael André da Silva

Desenvolvimento e aplicação de soluções para evitar o apagamento de pontes de tiristores em compensadores síncronos operando próximo de corrente nula

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 07 de julho de 2026.

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Orientador
UFSC/CTC/EAS



Documento assinado digitalmente
Rodolfo Cesar Costa Flesch
Data: 14/07/2026 11:08:55-0300
CPF: ***.466.879-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Adelson Alves Junior, Eng.
Supervisor
Empresa REIVAX



Documento assinado digitalmente
ADELSON ALVES JUNIOR
Data: 15/07/2026 09:29:25-0300
CPF: ***.301.229-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Guilherme Henrique Ludwig, Me.
Avaliador
Instituição UFSC/CTC/EAS

Prof. Max Hering de Queiroz, Dr.
Presidente da Banca
UFSC/CTC/EAS

Dedico este trabalho aos meus familiares, que não mediram esforços para tornar possível a conclusão desta etapa em minha vida. Aos colegas de jornada e aos professores, pelo apoio e aprendizado ao longo do caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu supervisor, Adelson Alves Junior, pelos ensinamentos pontuais e pelos direcionamentos nas soluções adotadas ao longo do trabalho. Estendo minha gratidão a Henrique Augusto Menarim, que me guiou dentro da REIVAX desde a escolha do tema até a conclusão da monografia, contribuindo de forma essencial para o desenvolvimento do projeto. Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Rodolfo César Costa Flesch, que aceitou me acompanhar neste desafio e foi fundamental para sua conclusão, sugerindo soluções, propondo melhorias e realizando as correções necessárias. Por fim, agradeço aos meus colegas de trabalho, que disponibilizaram parte de seu tempo para ouvir, discutir e contribuir com reflexões sobre este projeto.

*“A Engenharia é a arte de direcionar as grandes
fontes de energia da natureza para o uso e
conveniência do homem.”
(TREDGOLD, 1828)*

DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 28 de Junho de 2026.

Na condição de representante da REIVAX Automação e Controle LTDA na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa n° 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.



Documento assinado digitalmente

ADELSON ALVES JUNIOR

Data: 15/07/2026 09:27:57-0300

CPF: ***.301.229-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Adelson Alves Junior
REIVAX Automação e Controle LTDA

RESUMO

Com o aumento das exigências de qualidade e estabilidade da tensão nos sistemas elétricos de potência, compensadores síncronos têm sido amplamente utilizados para o controle de potência reativa em subestações. Em aplicações de elevado consumo de reativo, empregam-se reguladores de tensão a quatro quadrantes, baseados em pontes de tiristores em antiparalelo, que permitem a aplicação de tensões positivas e negativas ao campo da máquina síncrona. Nessas condições, a corrente de campo pode tornar-se zero, ocasionando o apagamento inesperado das pontes de tiristores e a perda temporária da capacidade de controle do sistema de excitação. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um limitador de corrente de campo implementado via software, capaz de atuar nos dois sentidos da corrente, evitando a operação da máquina na região de apagamento das pontes durante o controle de potência reativa. A solução proposta foi desenvolvida a partir do estudo do sistema de excitação e de máquinas síncronas, com implementação e validação em ambiente computacional, preservando a capacidade de comutação de pontes positivas e negativas em situações transitórias críticas, como afundamentos ou elevação de tensão no barramento. Os resultados obtidos por meio de simulações demonstram que o limitador mantém a operação em uma região segura, impede a ocorrência do apagamento indevido das pontes aumentando a robustez do sistema de regulação de tensão. Como limitação, identifica-se a dependência de uma estimativa precisa da corrente de campo, a qual requer dados da máquina obtidos por ensaios.

Palavras-chave: Limitador. Tiristores. Reguladores.

ABSTRACT

With the increasing demands for voltage quality and stability in electrical power systems, synchronous compensators have been widely used for reactive power control in substations. In high reactive power consumption applications, four-quadrant voltage regulators based on antiparallel thyristor bridges are employed, allowing the application of positive and negative voltages to the synchronous machine field. Under these conditions, the field current can become zero, causing unexpected thyristor bridge outages and temporary loss of excitation system control capability. This work proposes the development of a software-implemented field current limiter capable of acting in both current directions, preventing machine operation in the bridge outage region during reactive power control. The proposed solution was developed from the study of the excitation system and synchronous machines, with implementation and validation in a computational environment, preserving the switching capacity of positive and negative bridges in critical transient situations, such as voltage sags or surges on the bus. The results obtained through simulations demonstrate that the limiter maintains operation in a safe region, prevents the occurrence of undue bridge erasure, increasing the robustness of the voltage regulation system. As a limitation, the dependence on a precise estimation of the field current is identified, which requires machine data obtained through tests.

Keywords: Limiter. Thyristor. Regulators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sede da REIVAX	18
Figura 2 – Controladores lógicos CPX06 e CPX05	19
Figura 3 – Regulador integrado de tensão e velocidade	20
Figura 4 – Módulo TTM01: disparo e gerenciamento de retificadores	21
Figura 5 – Módulo MAC01	22
Figura 6 – Regulador de tensão	26
Figura 7 – Diagrama geral de um Regulador de Tensão (RT)	27
Figura 8 – Malha de controle tipo ST1C	28
Figura 9 – Regulador de velocidade	29
Figura 10 – Diagrama geral de um Regulador de Velocidade (RV)	30
Figura 11 – Estator de uma máquina síncrona	31
Figura 12 – Exemplos construtivos de rotores de máquinas síncronas	32
Figura 13 – Estrutura de uma excitatriz rotativa	33
Figura 14 – Estrutura simplificada de um sistema de excitação estática	33
Figura 15 – Relação entre grandezas de um compensador síncrono	36
Figura 16 – Curva de capacidade	37
Figura 17 – Característica tensão-corrente do tiristor	38
Figura 18 – Ponte retificadora trifásica	39
Figura 19 – Estrutura de pontes em antiparalelo	41
Figura 20 – Atuação do limitador de sobre-excitação	42
Figura 21 – Atuação do limitador de subexcitação	43
Figura 22 – Atuação do limitador de mínima excitação	44
Figura 23 – Atuação do limitador de corrente estatórica	45
Figura 24 – Atuação do limitador volts por hertz	46
Figura 25 – Mapa de quadrantes da tensão e corrente de campo	48
Figura 26 – Condições de operação das pontes	49
Figura 27 – Apagamento de ponte	50
Figura 28 – Ciclo de comutação de pontes	51
Figura 29 – Lógica de anti-windup por bloqueio do ganho integral no SEC	57
Figura 30 – Monitoramento de sinais no Sistema de Edição de Configurações (SEC) durante simulação	58
Figura 31 – Tela de operação do RT no xVision	59
Figura 32 – Ensaio de potência reativa visualizado no xVision	60
Figura 33 – Representação simplificada das malhas de controle do RT	64
Figura 34 – Posição do limitador na malha de controle	64
Figura 35 – Máquina de estados do comportamento básico do regulador	65
Figura 36 – Máquina de estados do comportamento em operação	66

Figura 37 – Máquina de estados dos modos de controle	67
Figura 38 – Lógica de ativação do limitador	70
Figura 39 – Detalhamento da malha de controle do limitador	72
Figura 40 – Comparações do controle com e sem <i>anti-windup</i>	73
Figura 41 – Comparação entre corrente de campo medida e estimada pelo modelo linear	75
Figura 42 – Comparação entre corrente de campo medida e estimada com saturação	76
Figura 43 – Comparação do modelo com tensão instantânea	78
Figura 44 – Comparação do modelo com tensão estimada	78
Figura 45 – Estrutura completa do limitador	79
Figura 46 – Operação sem limitador	80
Figura 47 – Operação sem limitador - Detalhes	81
Figura 48 – Operação com limitador sem lógica de relés para desativar	82
Figura 49 – Operação com limitador sem lógica de relés para desativar - Detalhes	82
Figura 50 – Operação com limitador sem <i>anti-windup</i>	83
Figura 51 – Operação com limitador sem <i>anti-windup</i> - Detalhes	84
Figura 52 – Operação com limitador completo	85
Figura 53 – Operação com limitador completo - Detalhes	86
Figura 54 – Malha de controle da parte positiva do limitador	93
Figura 55 – Malha de controle da parte negativa do limitador	94
Figura 56 – Estratégia de <i>anti-windup</i> por zeramento de K_I	94
Figura 57 – Lógica de desativação do limitador	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
DIO	Dispositivos de I/O
IHM	Interface Homem-Máquina
MAC	Módulo de Aquisição e Controle
MEL	<i>Minimum Excitation Limiter</i>
OEL	<i>Over Excitation Limiter</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PI	Proporcional-Integral
RT	Regulador de Tensão
RTVAX	Regulador Integrado de Tensão, Velocidade e Automação Linha Power
RTVX	Regulador Integrado de Tensão e Velocidade linha Power
RTX	Regulador de Tensão Linha Power
RV	Regulador de Velocidade
RVX	Regulador de Velocidade Linha Power
SBE	Software Básico Embarcado
SCL	<i>Stator Current Limiter</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SEC	Sistema de Edição de Configurações
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UEL	<i>Under Excitation Limiter</i>
VHL	<i>Volts per Hertz Limiter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

n_s	Velocidade síncrona
f	Frequência
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
FP	Fator de potência
E_a	Tensão interna induzida
k	Constante construtiva da máquina
ϕ	Fluxo magnético por polo
ω	Velocidade angular do rotor
R_a	Resistência de armadura
X_s	Reatância síncrona
I_a	Corrente de armadura
V_t	Tensão terminal
δ	Ângulo de carga
I_{fd}	Corrente de campo
I_L	Corrente de travamento do tiristor
I_H	Corrente de manutenção do tiristor
V_{fd}	Tensão média aplicada ao campo
V_{d0}	Tensão média máxima do conversor
α	Ângulo de disparo dos tiristores
V/f	Relação entre tensão terminal e frequência
I_{lim+}	Limiar de atuação da ponte positiva
I_{lim-}	Limiar de atuação da ponte negativa
H_+	Histerese associada ao comparador da ponte positiva
H_-	Histerese associada ao comparador da ponte negativa
e_{lim+}	Erro de limitação da ponte positiva
e_{lim-}	Erro de limitação da ponte negativa
Y_{POS}	Saída do controlador associado à ponte positiva
E_{lim+}	Erro de limitação da ponte positiva no domínio de Laplace
K_P	Ganho proporcional do controlador
K_I	Ganho integral do controlador
s	Variável complexa da transformada de Laplace
G_f	Função de transferência do filtro de primeira ordem
T_2	Constante de tempo do filtro de primeira ordem
Y_{POS_FILT}	Saída filtrada do controlador associado à ponte positiva
V_{ref}	Referência de tensão terminal resultante
Q_{Setp_VT}	Referência interna de tensão gerada pela malha de potência reativa

Y_{lim}	Ação corretiva produzida pelo limitador
$I_{fd,lin}$	Corrente de campo estimada pelo modelo linear
X_{ad}	Reatância mútua associada ao eixo direto
X_d	Reatância síncrona de eixo direto
Q_{ref}	Referência de potência reativa
I_{sat}	Corrente equivalente de saturação
V_{gap}	Tensão de entreferro estimada
A_g	Coeficiente da curva de saturação da máquina
B_g	Coeficiente da curva de saturação da máquina
X_l	Reatância de dispersão considerada na aproximação
$I_{fd,est}$	Corrente de campo estimada
V_{pred}	Tensão terminal predita
$V_{t,med}$	Tensão terminal medida
Q_{med}	Potência reativa medida
X_e	Reatância equivalente do compensador síncrono
dV_t/dt	Derivada temporal da tensão terminal
pu	Valor por unidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	A EMPRESA	18
1.1.1	Produtos	19
1.1.2	Contexto operacional	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo geral	23
1.2.2	Objetivos específicos	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	REGULADORES DE TENSÃO E VELOCIDADE	25
2.1.1	Regulador de tensão	26
2.1.2	Regulador de velocidade	29
2.2	MÁQUINAS SÍNCRONAS	30
2.2.1	Estrutura geral da máquina síncrona	31
2.2.2	Princípios de operação e controle da excitação	34
2.2.3	Curvas V e capacidade	36
2.3	TIRISTORES	37
2.4	PONTES DE TIRISTORES	39
2.5	LIMITADORES	41
2.5.1	Limitador de sobre-excitação (OEL)	41
2.5.2	Limitador de subexcitação (UEL)	42
2.5.3	Limitador de mínima excitação (MEL)	44
2.5.4	Limitador de corrente estatórica (SCL)	45
2.5.5	Limitador volts por hertz (V/Hz)	45
2.5.6	Relação entre os limitadores clássicos e o problema estudado	46
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	47
3	ANÁLISE DO PROBLEMA E REQUISITOS	48
3.1	TRANSIÇÃO DE QUADRANTES	48
3.2	APAGAMENTO DAS PONTES	50
3.3	IMPACTOS E EFEITOS PRÁTICOS	52
3.4	REQUISITOS TÉCNICOS	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	55
4.1	METODOLOGIA	55
4.2	FERRAMENTAS	56
4.2.1	SEC - Sistema de Edição de Configurações	56
4.2.2	xVision	58
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	61

5	SOLUÇÃO PROPOSTA E DESENVOLVIMENTO	62
5.1	MALHAS DE CONTROLE	63
5.2	MÁQUINAS DE ESTADOS	65
5.3	LIMITADOR DE MÍNIMA CORRENTE DE CAMPO	68
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
6.1	SIMULAÇÕES	80
6.2	APLICABILIDADE	86
7	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – LÓGICA DESENVOLVIDA NO SEC	93

1 INTRODUÇÃO

O setor energético global passa por um período de transformação associado à expansão de fontes renováveis, à busca por redução de emissões e à crescente presença de recursos conectados por conversores eletrônicos de potência (IEA, 2023). No Brasil, essa mudança ocorre em uma matriz elétrica já fortemente renovável, na qual a geração hidráulica permanece relevante e passa a conviver com a ampliação da participação de fontes eólicas e solares (EPE, 2024). Embora essa diversificação contribua para a descarbonização do setor elétrico, ela também altera características dinâmicas historicamente associadas à presença de máquinas síncronas convencionais, como inércia, potência de curto-circuito e suporte dinâmico de potência reativa (ONS, 2023; CIGRE, 2022).

Nesse contexto, o controle de tensão e a estabilidade da rede tornam-se aspectos centrais da operação de sistemas elétricos de potência. A potência reativa está diretamente relacionada à regulação de tensão em sistemas de corrente alternada e, quando inadequadamente controlada, pode contribuir para instabilidades e restrições operativas (Kundur, 1994). Os compensadores síncronos são inseridos nesse cenário como equipamentos capazes de fornecer ou absorver potência reativa de forma contínua, além de contribuir para a robustez eletromecânica do sistema por meio de sua natureza rotativa (CIGRE, 2022).

A aplicação de compensadores síncronos em regimes de maior flexibilidade operacional depende de sistemas de excitação capazes de atuar em diferentes combinações de tensão e corrente de campo. Em arquiteturas de quatro quadrantes, a ponte tiristorizada pode aplicar tensões positivas e negativas ao enrolamento de campo, ampliando os limites de operação da máquina síncrona, especialmente na região de absorção de potência reativa (Fitzgerald; Kingsley; Kusko, 2006; Rashid, 2014).

Um dos fenômenos críticos associados a essa operação ocorre em regiões de baixa corrente de campo, nas quais os tiristores podem deixar de conduzir quando a corrente fornecida cai abaixo da corrente de manutenção. Nesta monografia, esse fenômeno é chamado de apagamento da ponte, e é consequência direta da característica de disparo do tiristor, que é disparado pelo *gate*, mas somente permanece em condução enquanto a corrente de anodo se mantém acima do valor de manutenção (Rashid, 2014; Mohan; Undeland; Robbins, 2003). Assim, quando o ponto de operação do compensador exige correntes de campo próximas de zero, condição que pode ocorrer em transições de quadrantes ou em determinados regimes de absorção elevada de reativos, pode ocorrer a perda temporária de condução da ponte (Rashid, 2014), com impacto direto sobre a ação do regulador de tensão.

Diante desse problema, existe a necessidade de desenvolver uma solução implementada em software, capaz de reduzir a ocorrência de apagamento indevido das

pontes de tiristores sem depender exclusivamente de alterações físicas no conversor. A proposta consiste em tratar uma limitação associada ao hardware de potência por meio de lógica de controle e intertravamentos adequados, buscando preservar a continuidade do controle de excitação em compensadores síncronos operando próximos à corrente nula.

1.1 A EMPRESA

Fundada em 1987, em Florianópolis (SC), a REIVAX atua no desenvolvimento e fornecimento de sistemas de controle para geração de energia, com destaque para reguladores de tensão, reguladores de velocidade e soluções integradas de automação aplicadas a usinas e subestações. A empresa possui histórico de atuação em usinas hidrelétricas, subestações e parques solares com produtos voltados ao controle dinâmico de unidades geradoras e compensadores síncronos. A Figura 1 apresenta a sede da empresa.

Figura 1 – Sede da REIVAX



Fonte: REIVAX (2020a).

Em novembro de 2024, a REIVAX foi adquirida pela WEG S.A., movimento que ampliou a integração de seu portfólio ao segmento de geração, transmissão e suporte à estabilidade de sistemas elétricos (WEG, 2024c). Esse contexto institucional é relevante para o presente trabalho porque a solução desenvolvida está relacionada às plataformas de controle utilizadas pela empresa, especialmente em aplicações de reguladores de tensão para máquinas síncronas.

Para contextualizar a inserção da REIVAX no desenvolvimento desta monografia, esta seção foi dividida entre a apresentação de suas principais linhas de produtos e a descrição de seu contexto operacional, permitindo situar as soluções oferecidas pela empresa e o ambiente técnico no qual se insere o desenvolvimento de reguladores de tensão para máquinas síncronas.

1.1.1 Produtos

O portfólio da REIVAX abrange equipamentos e sistemas destinados tanto ao fornecimento para fabricantes de turbinas e geradores quanto à modernização de usinas existentes. Parte significativa dessas soluções baseia-se em controladores programáveis próprios, o que permite à empresa integrar funções de controle, proteção, supervisão e comunicação industrial em uma mesma plataforma.

O núcleo das soluções atuais é composto por controladores da família CPX, entre os quais se destaca o CPX06, apresentado na Figura 2. Trata-se de um controlador programável baseado em CPU x86 e desenvolvido para ambientes agressivos, com suporte a protocolos de comunicação industriais, como *IEC 61850*, *IEC 104*, *DNP3* e *Modbus*. O equipamento possui interfaces para entradas e saídas digitais e analógicas, além de recursos específicos para aquisição de grandezas elétricas provenientes de Transformador de Potencial (TP) e Transformador de Corrente (TC). O CPX06 é uma evolução do CPX05, anexando módulos de entrada e saída digitais e analógicas, e ampliando a capacidade de processamento e armazenamento de dados.

Figura 2 – Controladores lógicos CPX06 e CPX05



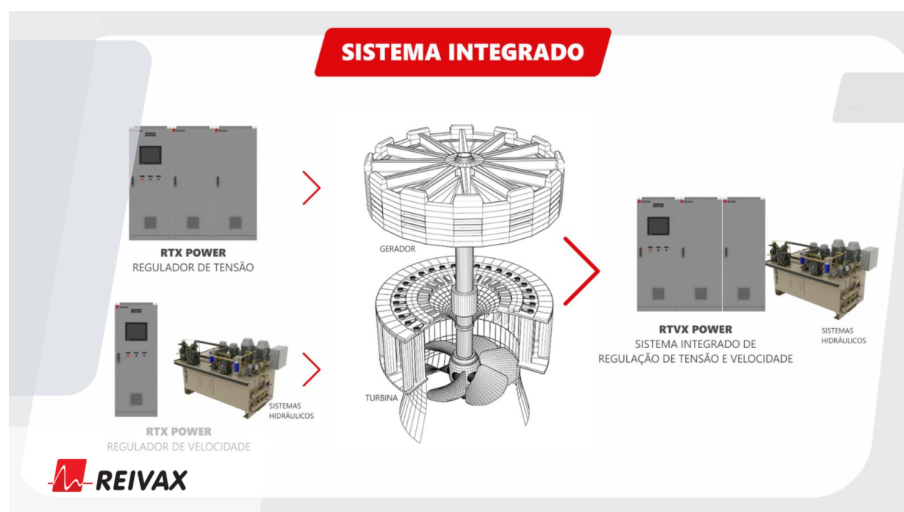
Fonte: Manual de usuário CPX05 e CPX06 – REIVAX.

Esses controladores são utilizados como base para diferentes linhas de produtos, que se distinguem principalmente pelas funções de controle incorporadas à plataforma, as principais soluções são:

- **Regulador de Velocidade Linha Power (RVX):** regulador de velocidade aplicado ao controle de turbinas hidráulicas, atuando sobre variáveis associadas à potência ativa, velocidade e abertura dos atuadores hidráulicos;
- **Regulador de Tensão Linha Power (RTX):** regulador de tensão destinado ao controle da excitação da máquina síncrona, sendo responsável pela regulação da tensão terminal, da corrente de campo, da potência reativa ou do fator de potência, conforme o modo de operação;
- **Regulador Integrado de Tensão e Velocidade linha Power (RTVX):** solução integrada que reúne, em uma mesma plataforma, as funções de regulação de tensão e velocidade, reduzindo a separação física entre os sistemas de controle da unidade geradora;
- **Regulador Integrado de Tensão, Velocidade e Automação Linha Power (RTVAX):** solução mais abrangente, que incorpora funções de regulação de tensão, regulação de velocidade e automação da unidade, permitindo maior integração entre controle, supervisão e sequenciamento operacional.

A Figura 3 apresenta um exemplo de RTVX. No contexto deste trabalho, essa família de produtos é relevante porque o limitador proposto é desenvolvido sobre a lógica de controle associada ao regulador de tensão, especialmente nas aplicações em que o controle da excitação ocorre por meio de pontes tiristorizadas.

Figura 3 – Regulador integrado de tensão e velocidade



Fonte: REIVAX (2023b).

Os reguladores de tensão são capazes de controlar a tensão e a corrente de campo da máquina síncrona por meio de conversores estáticos, compostos por tiristores ou transistores bipolares de *gate* isolado (IGBT, do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*). A REIVAX utiliza módulos dedicados ao disparo e ao monitoramento das pontes tiristorizadas, chamados de TTM01. Uma foto de um módulo TTM01 é apresentada na Figura 4. Este recebe comandos do controlador por meio de comunicação via CANOpen, gera os pulsos de disparo dos tiristores e monitora condições associadas ao retificador, como condução, temperatura, fusíveis, ventilação e estado da ponte. Em arquiteturas de quatro quadrantes, esse tipo de módulo é combinado com um outro módulo chamado DCZ, que identifica as passagens de corrente por zero, essencial para coordenar o acionamento de pontes positivas e negativas, evitando condições de disparo simultâneo ou comutação inadequada.

Figura 4 – Módulo TTM01: disparo e gerenciamento de retificadores



Fonte: REIVAX (2025c).

Além dos controladores e módulos de disparo, a empresa utiliza dispositivos auxiliares de aquisição, expansão e supervisão, como o Módulo de Aquisição e Controle (MAC) e Dispositivos de I/O (DIO). O MAC, apresentado na Figura 5, foi empregado em arquiteturas anteriores para a interface de sinais digitais e analógicos, enquanto o DIO é utilizado como expansão de entradas e saídas digitais em projetos de automação com grande quantidade de monitorações e acionamentos digitais. O DCZ, por sua vez, é aplicado em arquiteturas de quatro quadrantes para auxiliar na identificação da condição de corrente nula durante a comutação entre pontes, reduzindo o risco de curto-circuito entre os conversores.

Figura 5 – Módulo MAC01



Fonte: Manual de usuário MAC01 - REIVAX.

1.1.2 Contexto operacional

Em usinas hidrelétricas, algumas unidades podem ser operadas tanto como geradoras de potência ativa quanto como compensadores síncronos, absorvendo potência reativa. Nessa condição, a contribuição de potência ativa deixa de ser o objetivo principal da máquina, e o regulador de tensão passa a controlar a excitação de modo a ajustar a potência reativa trocada com a rede (Giosio et al., 2017; Chapman, 2013).

Em aplicações com excitação em quatro quadrantes, a operação pode exigir atuação em regiões de subexcitação profunda, nas quais a corrente de campo assume valores reduzidos ou até negativos. Essa condição exige cuidados adicionais durante a sequência de transição, incluindo a motorização do conjunto gerador-turbina e a retirada ou redução da carga mecânica (Giosio et al., 2017).

Embora as maiores soluções da REIVAX sejam aplicáveis a diferentes tipos de unidades geradoras, o presente trabalho aborda aplicações em subestações energéticas, com foco no controle de excitação de compensadores síncronos. Esses equipamentos são máquinas síncronas operando com baixa carga e baixo consumo, geralmente associada apenas às perdas mecânicas e elétricas, tendo a função de fornecer ou absorver potência reativa para auxiliar no controle de tensão do sistema elétrico (CIGRE, 2022).

Esse contexto aproxima diretamente o problema de controle da limitação física dos tiristores. Ao buscar ampliar a faixa de absorção de reativos, isto é, amplificar a capacidade de uma dada máquina síncrona, o sistema de excitação pode conduzir a máquina a pontos de operação próximos da corrente nula, região na qual a corrente nos semicondutores pode se tornar insuficiente para manter a condução, trazendo instabilidades na operação. Portanto, neste trabalho, é buscada uma solução capaz de contornar este problema, de forma que, composta com outras estratégias de controle,

possa garantir o funcionamento adequado da máquina nas regiões de transição da polaridade de corrente.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral deste trabalho, bem como os objetivos específicos estabelecidos para o desenvolvimento, implementação e validação da solução proposta.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e implementar soluções aplicáveis a compensadores síncronos controlados pelas linhas de produtos REIVAX, destinadas a mitigar o apagamento de pontes de tiristores durante a operação com correntes de campo próximas da corrente nula, preservar a continuidade do controle de excitação em quatro quadrantes, evitar falhas operacionais e permitir a comutação segura entre as pontes.

1.2.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral apresentado, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a arquitetura de retificação baseada em pontes de tiristores conectadas em antiparalelo, identificando as limitações físicas e lógicas que conduzem ao apagamento das pontes durante a transição entre quadrantes e a operação em regimes de baixa corrente.
- Desenvolver um limitador bidirecional de corrente mínima de campo, capaz de monitorar e atuar de forma preventiva tanto no sentido positivo quanto no negativo da corrente de excitação, impedindo a anulação indesejada da corrente por meio do controle do ângulo de disparo dos tiristores.
- Projetar a malha de controle associada ao limitador utilizando controladores Proporcional-Integral (PI), incorporando técnicas de *anti-windup* e lógicas de intertravamento, de modo a evitar a saturação do termo integral e permitir uma recuperação rápida do sistema, sem a introdução de instabilidades.
- Assegurar que a atuação do limitador ocorra exclusivamente quando necessária, de forma a não interferir no comportamento normal dos reguladores de tensão e de excitação durante condições operacionais adequadas.

- Implementar uma lógica de coordenação responsável por gerenciar a transição entre a atuação do limitador e a comutação natural das pontes de tiristores, garantindo que os mecanismos de proteção não impeçam a inversão de corrente quando esta for requerida pelo sistema elétrico.
- Validar a solução proposta por meio de simulações computacionais no ambiente de desenvolvimento da REIVAX, avaliando sua eficácia a partir de um modelo representativo de máquina síncrona e identificando eventuais limitações de aplicação.
- Propor um método para a integração da solução aos projetos comerciais existentes, visando ao aumento da confiabilidade e da segurança dos reguladores REIVAX, bem como a descrição de possíveis melhorias e evoluções futuras.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, organizados da seguinte forma:

- O **Capítulo 2** apresenta a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do projeto, abordando conceitos de máquinas síncronas, eletrônica de potência e limitadores aplicados a sistemas de excitação.
- O **Capítulo 3** dedica-se à análise do fenômeno de apagamento das pontes de tiristores, descrevendo seus efeitos operacionais e estabelecendo os requisitos técnicos da solução proposta.
- O **Capítulo 4** descreve o método adotado e as ferramentas utilizadas, incluindo o ambiente de desenvolvimento da lógica de controle e a interface gráfica de operação.
- O **Capítulo 5** detalha a implementação da solução, iniciando pela apresentação das malhas de controle e das máquinas de estados relevantes para o comportamento dos reguladores REIVAX, e avançando para o desenvolvimento específico do limitador de mínima corrente de campo.
- O **Capítulo 6** apresenta e discute os resultados obtidos por meio de simulações, analisando a eficácia da solução, suas limitações técnicas e sua viabilidade de aplicação em produtos comerciais.
- O **Capítulo 7** reúne as conclusões do trabalho, avaliando a solução em relação aos objetivos estabelecidos e indicando diretrizes para melhorias e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para o entendimento do problema investigado nesta monografia. Inicialmente, são discutidos os reguladores de tensão e velocidade empregados em máquinas síncronas, estabelecendo o contexto de atuação do sistema de excitação. Em seguida, são abordados os princípios de funcionamento da máquina síncrona, sua operação como compensador e a relação entre corrente de campo, tensão terminal e potência reativa. Na sequência, são apresentados os tiristores e as pontes utilizadas nos sistemas de excitação estática, cujas características de condução estão diretamente relacionadas ao fenômeno de apagamento analisado neste trabalho. Por fim, são discutidos os limitadores clássicos do regulador de tensão, situando a função desenvolvida em relação às restrições usuais de operação da máquina.

2.1 REGULADORES DE TENSÃO E VELOCIDADE

Os reguladores de tensão e de velocidade são produtos completos aplicados a máquinas síncronas, combinando o controle da parte mecânica, turbinas e atuadores hidráulicos com o controle das grandezas elétricas, através da excitação do campo. O regulador de tensão (RT) atua sobre a excitação da máquina e, por consequência, influencia a tensão terminal, a corrente de campo, a potência reativa e o fator de potência. O regulador de velocidade (RV), por sua vez, atua sobre o sistema mecânico de acionamento, sendo responsável pelo controle da velocidade, da potência ativa e de variáveis associadas à turbina. Embora o foco deste trabalho esteja no regulador de tensão aplicado a compensadores síncronos, a presença do regulador de velocidade é relevante para compreender a operação de unidades que podem atuar tanto como geradores quanto como compensadores.

Em uma unidade geradora convencional, a turbina fornece potência mecânica ao eixo e o RV regula a potência ativa e a velocidade de rotação, ao passo que o RT controla a excitação para manter a tensão terminal, a potência reativa ou o fator de potência na referência desejada. Em operação como compensador síncrono, a contribuição de potência ativa deixa de ser o objetivo principal e a máquina passa a operar essencialmente como recurso de controle de potência reativa. Nessa condição, o regulador de tensão torna-se o sistema central para a operação, pois a troca de reativos com a rede é determinada pela corrente de campo e pela estratégia de excitação adotada (Kundur, 1994; Chapman, 2013).

2.1.1 Regulador de tensão

O controle de tensão em máquinas síncronas é realizado por meio da variação da excitação do rotor. Em regime síncrono, a tensão interna induzida depende do fluxo magnético produzido pelo campo e da velocidade angular da máquina; como a velocidade permanece vinculada à frequência da rede, a variação da corrente de campo torna-se o principal mecanismo de ajuste da tensão e da potência reativa (Chapman, 2013).

Ao controlar o ângulo de disparo das pontes, é possível fornecer maior ou menor tensão de campo, movendo a região de operação da máquina entre o consumo e a geração de potência reativa e o aumento ou a redução da tensão terminal. O regulador também é responsável por manter a máquina dentro de uma região operacional compatível com seus limites térmicos, magnéticos e de estabilidade, proporcionando uma operação segura independentemente das referências enviadas pelos operadores.

A Figura 6 apresenta um exemplo de regulador de tensão empregado em sistemas de geração síncrona. Nesse arranjo, o RTX é composto por cubículos de controle, contator de campo, retificadores e circuito de descarga de campo, formando o conjunto responsável pela alimentação e pelo controle dinâmico da corrente de excitação.

Figura 6 – Regulador de tensão

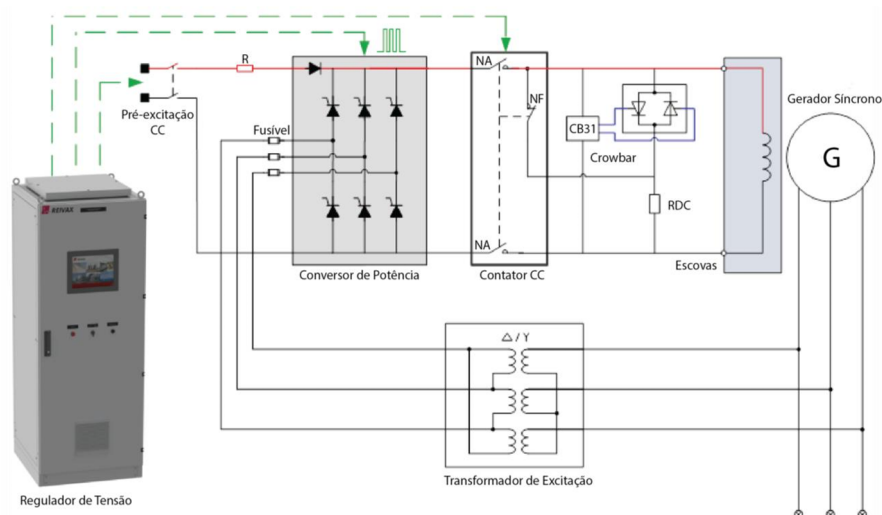


Fonte: REIVAX (2019d).

Em sistemas de excitação estática, a energia aplicada ao campo é obtida a partir dos terminais da máquina ou de uma fonte auxiliar. Um transformador de excitação reduz a tensão até a escala utilizada no campo; em seguida, a energia passa pelos circuitos de proteção e seccionamento e é convertida em tensão contínua pelas pontes retificadoras controladas. A Figura 7 apresenta uma arquitetura típica desse tipo de sistema, na qual a ponte retificadora recebe os pulsos de disparo do regulador e aplica a tensão resultante ao circuito de campo, passando pelo contator de campo e pelos

dispositivos de proteção. Essa estrutura é especialmente importante para este trabalho, pois o fenômeno de apagamento estudado ocorre justamente no estágio de potência tiristorizado responsável pela alimentação do campo.

Figura 7 – Diagrama geral de um RT



Fonte: REIVAX (2025c).

A sequência operacional de um regulador de tensão depende da máquina a ser controlada. Durante a partida, é comum que o sistema utilize uma etapa de pré-excitação para fornecer energia inicial ao campo e permitir a elevação gradual da tensão terminal. Essa etapa pode ser acompanhada da excitação por remanência, condição na qual a máquina mantém certo grau de magnetismo após sua operação anterior. Esse magnetismo pode ser suficiente para gerar uma tensão capaz de iniciar a excitação da máquina sem a necessidade de fontes auxiliares. Em situações nas quais a tensão residual não é suficiente, podem ser utilizados circuitos ou fontes auxiliares para a energização inicial do campo (Schaefer, 1998).

Entretanto, em compensadores síncronos e motores, a excitação inicial normalmente é realizada em modo de controle de corrente, e não de tensão. Isso ocorre porque essas máquinas são partidas e controladas por outros sistemas, responsáveis por aplicar a tensão terminal nominal e conduzi-las até a rotação nominal. Após essa condição ser atingida, o RT pode entrar em operação para controlar a potência reativa.

Antes da sincronização, com o disjuntor de grupo aberto, o regulador pode operar em modo de tensão ou em modo de corrente de campo, dependendo das condições de medição e dos procedimentos de teste. Após a sincronização, com o disjuntor fechado, passam a estar disponíveis os modos associados à operação em carga, como controle de tensão terminal, controle de corrente de campo, controle de potência reativa e controle de fator de potência. Em compensadores síncronos, o modo

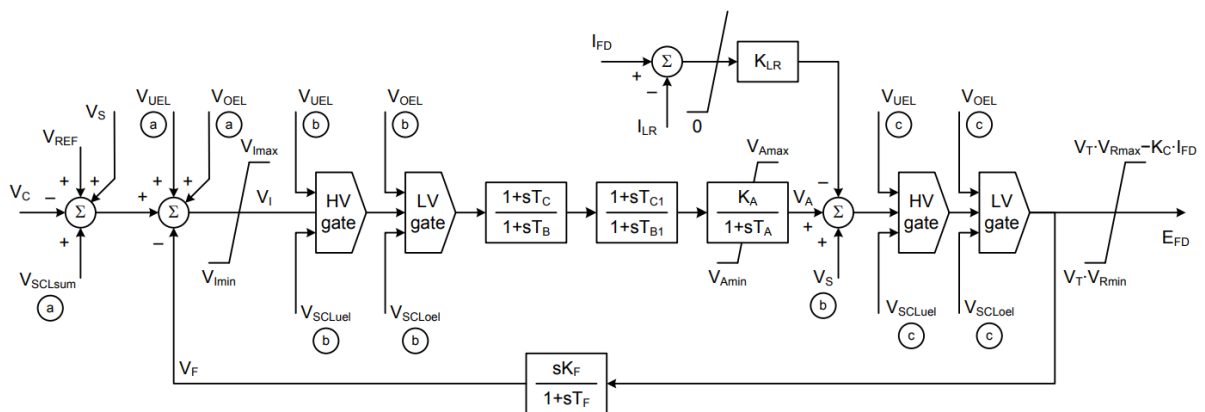
de potência reativa é particularmente relevante, pois a variação da excitação influencia diretamente a potência reativa trocada com o sistema elétrico e, conseqüentemente, na tensão da rede (Kundur, 1994).

Os modos de controle podem ser resumidos da seguinte forma:

- **Vt**: modo de controle da tensão terminal, principal malha do regulador, utilizado tanto em operação a vazio quanto em carga, desde que as medições necessárias estejam disponíveis e válidas;
- **lfd**: modo de controle da corrente de campo, empregado na partida de compensadores, em ensaios e condições específicas de operação ou situações em que a medição de tensão terminal não deve ser utilizada como variável principal;
- **VAR**: modo de controle de potência reativa, aplicado quando a máquina está sincronizada à rede e deve manter a potência reativa próxima à referência estabelecida;
- **FP**: modo de controle de fator de potência, utilizado para ajustar a relação entre potência ativa e reativa conforme a referência definida para a unidade.

Um exemplo de modelo de sistema de excitação estática é a estrutura ST1C descrita na IEEE Std 421.5-2016 (IEEE, 2016), apresentada na Figura 8, na qual é possível observar os limitadores clássicos interferindo nos sinais internos da malha após o cálculo dos erros de tensão e de corrente de campo, restringindo a tensão de campo, que corresponde à variável controlada. Esse tipo de modelo representa, de forma padronizada, a interação entre regulador, limitadores e excitatriz, sendo utilizado em estudos de estabilidade de sistemas elétricos de potência.

Figura 8 – Malha de controle tipo ST1C



Fonte: IEEE (2016).

Além das malhas principais de controle, os reguladores de tensão incorporam limitadores destinados a manter a máquina em regiões seguras de operação. Esses limitadores atuam sobre grandezas como corrente de campo, corrente estatórica, potência reativa, tensão terminal e frequência, sendo discutidos de forma concentrada na Seção 2.5.

2.1.2 Regulador de velocidade

O regulador de velocidade é responsável pela atuação sobre o sistema mecânico da unidade geradora. Em usinas hidrelétricas, sua ação ocorre normalmente sobre o distribuidor, as pás ou outros atuadores hidráulicos, de modo a controlar a vazão de água e, conseqüentemente, a potência mecânica entregue ao eixo. A Figura 9 apresenta um exemplo de regulador de velocidade da linha RVX em conjunto com a unidade hidráulica associada.

Figura 9 – Regulador de velocidade



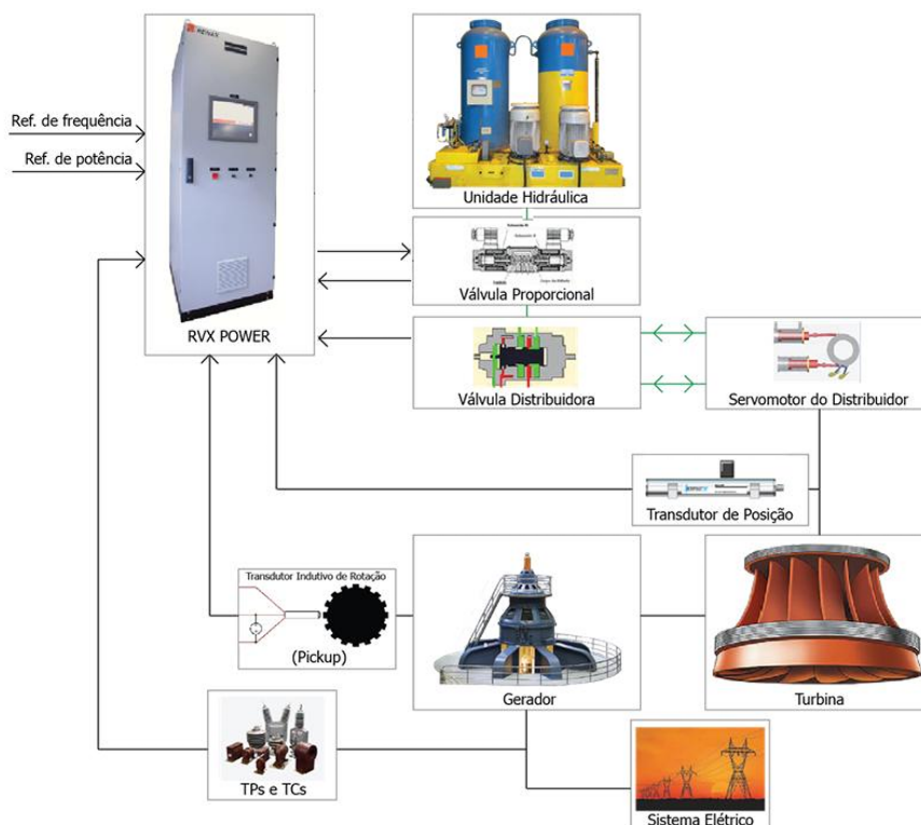
Fonte: REIVAX (2017e).

Em uma unidade geradora conectada ao sistema elétrico, o RV participa do controle de potência ativa e da resposta a perturbações mecânicas ou elétricas. Durante a partida, ele contribui para conduzir a máquina até a rotação nominal e, após a sincronização, atua conforme o modo de operação selecionado. Em aplicações nas quais a máquina também pode operar como compensador síncrono, o RV permanece associado à condição mecânica da unidade, mas o controle de potência reativa passa a ser determinado essencialmente pelo RT. Por esse motivo, a descrição do regulador de velocidade neste trabalho é mantida como contexto operacional, sem aprofundamento em suas malhas internas.

A Figura 10 apresenta um diagrama geral de um sistema de regulação de velocidade. Nele, observa-se que o regulador utiliza medições de velocidade, posição dos atuadores, potência e variáveis hidráulicas para definir comandos ao sistema de

atuação. Embora essas funções sejam relevantes para a operação da unidade, elas não fazem parte do problema central deste trabalho, que está associado à condução dos tiristores no sistema de excitação.

Figura 10 – Diagrama geral de um RV



Fonte: REIVAX (2025c).

2.2 MÁQUINAS SÍNCRONAS

As máquinas síncronas ocupam papel central em sistemas elétricos de potência, tanto na geração de energia quanto no controle dinâmico de tensão e potência reativa. Seu princípio de funcionamento baseia-se no acoplamento eletromagnético entre o campo girante do estator e o campo magnético produzido no rotor. A velocidade mecânica do rotor permanece sincronizada com a frequência elétrica da rede, o que diferencia esse tipo de máquina de outras máquinas de corrente alternada (Chapman, 2013; Fitzgerald; Kingsley; Kusko, 2006).

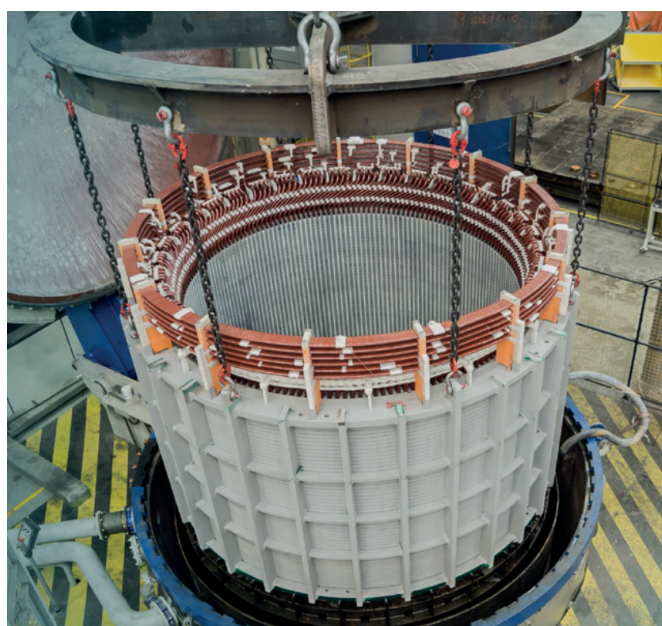
Esta seção está organizada inicialmente pela apresentação da estrutura construtiva e dos sistemas de excitação das máquinas síncronas, que estabelecem a interface entre o regulador de tensão e o circuito de campo. Em seguida, são discutidos os princípios que relacionam a corrente de excitação à tensão terminal e à potência reativa,

seguidos pelas curvas V e de capacidade, que delimitam as condições de operação do compensador síncrono. Essa sequência estabelece os conceitos necessários para compreender a operação de um compensador síncrono e as características que permitem a baixa corrente de campo.

2.2.1 Estrutura geral da máquina síncrona

A máquina síncrona é formada, em sua estrutura eletromagnética principal, pelo estator, pelo rotor e pelo entreferro que separa essas duas partes. O estator permanece fixo e abriga o enrolamento de armadura, normalmente trifásico, conectado ao sistema elétrico de potência. O rotor, por sua vez, gira solidário ao eixo mecânico e contém o enrolamento de campo, responsável pela produção do fluxo magnético principal da máquina. O entreferro permite a rotação mecânica e, ao mesmo tempo, estabelece o acoplamento magnético entre o campo produzido pelo rotor e o campo girante associado às correntes trifásicas do estator (Chapman, 2013). A estrutura construtiva do estator é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Estator de uma máquina síncrona



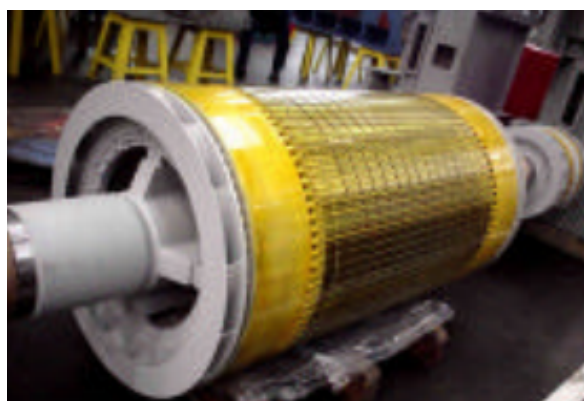
Fonte: WEG (2024a).

Do ponto de vista funcional, o estator representa a interface elétrica da máquina com a rede, enquanto o rotor define o nível de excitação magnética a partir da corrente contínua aplicada ao enrolamento de campo. Quando o estator é percorrido por correntes trifásicas equilibradas, forma-se um campo magnético girante. Em regime síncrono, o campo magnético do rotor permanece alinhado dinamicamente a esse campo girante, de modo que a velocidade mecânica da máquina fica diretamente relacionada à

frequência elétrica da rede e ao número de polos (Chapman, 2013). Apresentado na seção 2.2.2.

A construção do rotor depende da velocidade nominal e da aplicação da máquina. Em máquinas de baixa velocidade, como geradores acionados por turbinas hidráulicas, é comum a utilização de rotores de polos salientes, nos quais os polos magnéticos são fisicamente projetados para fora do núcleo do rotor. Essa construção permite acomodar um número elevado de polos e é adequada a aplicações em que a velocidade mecânica é reduzida. Em máquinas de alta velocidade, como turbogeradores acionados por turbinas a vapor ou a gás, utiliza-se frequentemente o rotor cilíndrico, também denominado rotor de polos lisos, cuja geometria é mais uniforme e mecanicamente adequada a rotações elevadas (Chapman, 2013). As configurações de polos lisos e de polos salientes são ilustradas na Figura 12.

Figura 12 – Exemplos construtivos de rotores de máquinas síncronas



(a) Rotor de polos lisos



(b) Rotor de polos salientes

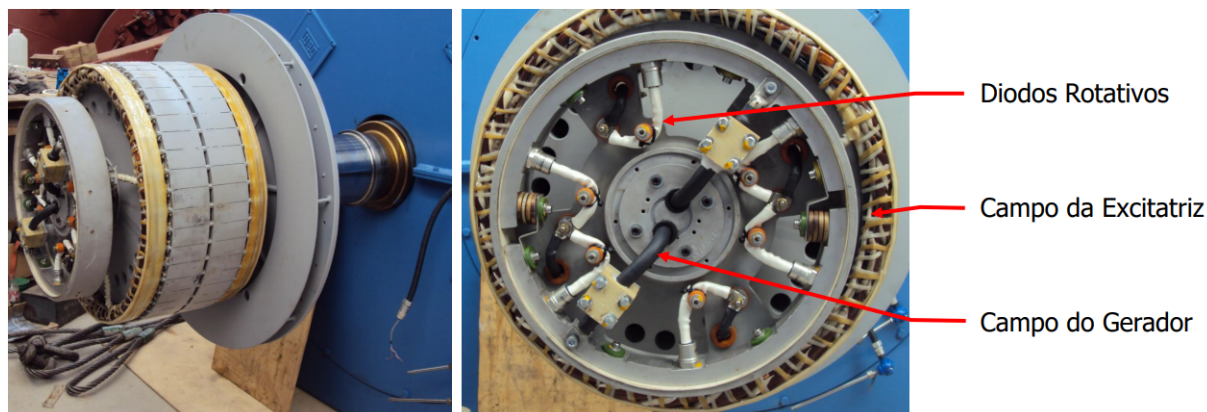
Fonte: WEG (2024b).

Para que o rotor produza o campo magnético principal, é necessário aplicar corrente contínua ao enrolamento de campo. Essa função é realizada pelo sistema de excitação, que regula a tensão e a corrente de campo conforme o modo de operação da máquina. Em termos construtivos, os sistemas de excitação podem ser classificados, de forma simplificada, em sistemas rotativos sem escovas e sistemas estáticos. Essa distinção é importante para este trabalho porque a forma de aplicação da corrente de campo determina a interface entre o regulador de tensão e o enrolamento do rotor.

Nos sistemas de excitação rotativos sem escovas, também chamados de sistemas *brushless*, a alimentação do campo principal é realizada por meio de uma excitatriz montada no mesmo eixo da máquina síncrona. O regulador de tensão controla o campo da excitatriz, enquanto a tensão alternada gerada em sua armadura rotativa é retificada por diodos girantes e aplicada diretamente ao enrolamento de campo do gerador principal. Como a retificação ocorre no próprio conjunto rotativo, esse arranjo dispensa o uso de escovas e anéis coletores para a alimentação do campo principal, reduzindo

alguns requisitos de manutenção associados ao contato elétrico deslizante (REIVAX, 2025c). A estrutura típica de uma excitatriz rotativa é apresentada na Figura 13.

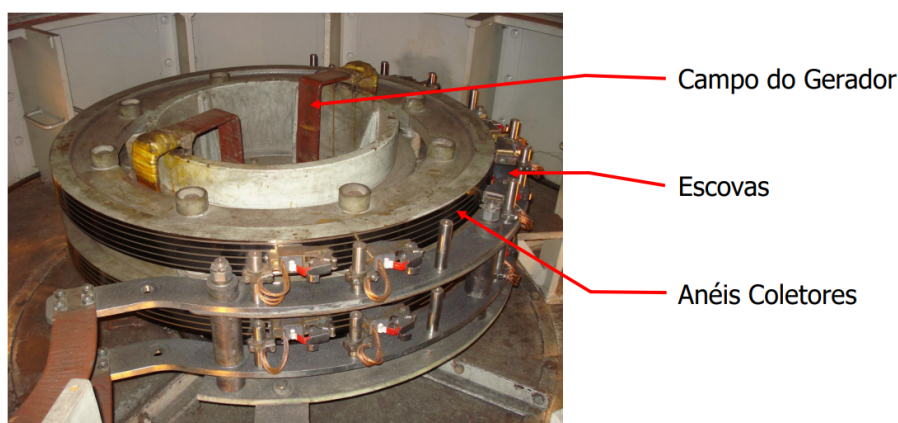
Figura 13 – Estrutura de uma excitatriz rotativa



Fonte: REIVAX (2025c).

Nos sistemas de excitação estática, a energia destinada ao campo é fornecida por equipamentos fixos, normalmente compostos por transformador de excitação, conversores eletrônicos de potência e circuitos de controle. A tensão alternada disponível é convertida em tensão contínua controlada e aplicada ao enrolamento de campo por meio de escovas e anéis coletores. Esse tipo de sistema permite resposta dinâmica elevada, pois o regulador atua diretamente sobre o conversor responsável pela tensão de campo, sendo por isso amplamente empregado em aplicações que exigem controle rápido da excitação (REIVAX, 2025c). A Figura 14 apresenta a estrutura simplificada de um sistema de excitação estática.

Figura 14 – Estrutura simplificada de um sistema de excitação estática



Fonte: REIVAX (2025c).

No contexto deste trabalho, a excitação estática é o arranjo de maior interesse, pois a solução proposta atua sobre reguladores de tensão que controlam pontes de tiristores responsáveis pela tensão aplicada ao enrolamento de campo da máquina

síncrona. Em arquiteturas de quatro quadrantes, essas pontes são organizadas de modo a permitir a aplicação de tensão média positiva ou negativa ao enrolamento de campo e, em condições apropriadas de operação, a transição entre sentidos de corrente (Rashid, 2014).

Essa característica amplia a capacidade de controle da potência reativa em compensadores síncronos, uma vez que a variação da excitação influencia diretamente a potência reativa trocada pela máquina com a rede (Chapman, 2013). Entretanto, a operação em regiões próximas de corrente nula torna-se crítica, pois a continuidade de condução dos tiristores passa a depender da manutenção de corrente suficiente nos dispositivos semicondutores (Rashid, 2014).

2.2.2 Princípios de operação e controle da excitação

A operação da máquina síncrona depende do acoplamento entre o campo magnético produzido pelo rotor e o campo girante associado às correntes trifásicas do estator. Em regime permanente, a velocidade mecânica do rotor permanece sincronizada com a frequência elétrica da rede, de modo que a rotação síncrona é determinada por:

$$n_s = \frac{120f}{P}, \quad (1)$$

em que n_s é a velocidade síncrona em rotações por minuto, f é a frequência elétrica em hertz e P é o número de polos da máquina. Essa relação mostra que, para uma frequência de rede definida, a velocidade mecânica depende diretamente da construção da máquina, razão pela qual máquinas de baixa rotação, como as acionadas por turbinas hidráulicas, normalmente apresentam maior número de polos (Chapman, 2013).

Quando a máquina opera conectada a um sistema elétrico de grande porte, a frequência e a tensão do barramento impõem condições externas de operação. Nesse contexto, a corrente contínua aplicada ao enrolamento de campo do rotor torna-se uma das principais variáveis de controle, pois altera o fluxo magnético principal e, consequentemente, a tensão interna induzida da máquina. De forma simplificada, a tensão interna por fase pode ser expressa por:

$$E_a = k\phi\omega, \quad (2)$$

em que E_a é a tensão interna induzida, k é uma constante construtiva, ϕ é o fluxo magnético por polo e ω é a velocidade angular do rotor. Como a velocidade é praticamente fixa em regime síncrono conectado à rede, o controle de E_a ocorre principalmente pela variação da corrente de excitação, que modifica o fluxo magnético produzido pelo rotor (Chapman, 2013).

O comportamento elétrico da máquina pode ser representado, em regime permanente, por um circuito equivalente por fase. Nesse modelo, a tensão interna E_a aparece em série com a resistência de armadura R_a e com a reatância síncrona X_s , resultando em:

$$E_a = V_t + (R_a + jX_s)I_a, \quad (3)$$

em que V_t é a tensão terminal e I_a é a corrente de armadura. Em estudos de sistemas de potência, é comum desprezar R_a quando seu valor é pequeno em comparação com X_s , obtendo-se a aproximação:

$$E_a \approx V_t + jX_s I_a. \quad (4)$$

Essa representação permite relacionar a operação da máquina ao seu diagrama fasorial. O ângulo entre E_a e V_t , usualmente denominado ângulo de carga ou ângulo de potência, está associado à transferência de potência ativa, enquanto a magnitude da tensão interna, controlada pela excitação, influencia diretamente a troca de potência reativa com o sistema elétrico. Para uma máquina conectada a um barramento de tensão praticamente constante e desprezando a resistência de armadura, a potência ativa pode ser aproximada por:

$$P = \frac{3V_t E_a}{X_s} \sin \delta, \quad (5)$$

em que δ é o ângulo de carga. Nas mesmas hipóteses, a potência reativa fornecida pela máquina ao sistema pode ser expressa, conforme a convenção adotada, por:

$$Q = \frac{3V_t}{X_s} (E_a \cos \delta - V_t). \quad (6)$$

As Equações (5) e (6) mostram a diferença entre o controle de potência ativa e o controle de potência reativa. A potência ativa depende principalmente do ângulo de carga, associado ao torque mecânico aplicado ao eixo, enquanto a potência reativa depende fortemente da magnitude da tensão interna e, portanto, da corrente de excitação. Essa distinção é central para este trabalho, pois em um compensador síncrono a potência ativa é pequena e está relacionada principalmente às perdas, ao passo que a função principal da máquina é fornecer ou absorver potência reativa por meio do controle da excitação (Kundur, 1994; Chapman, 2013).

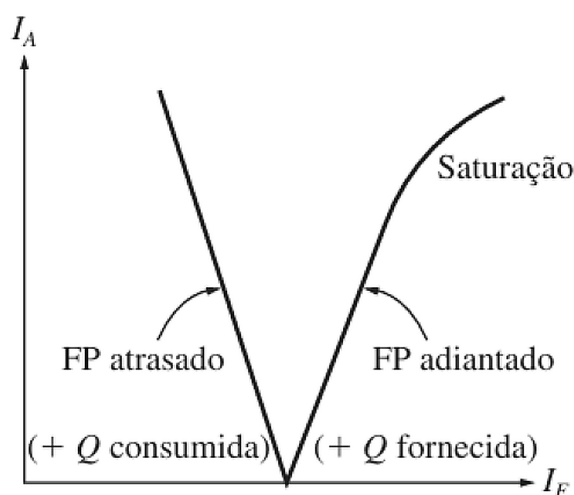
Quando a corrente de campo é elevada, a tensão interna tende a aumentar e a máquina passa a fornecer mais potência reativa ao sistema, contribuindo para a elevação ou sustentação da tensão do barramento. Quando a excitação é reduzida, a potência reativa fornecida diminui e a máquina pode passar a absorver reativos, auxiliando no controle de sobretensões. Essa capacidade de transitar entre fornecimento e absorção de potência reativa fundamenta a aplicação do compensador síncrono

em sistemas elétricos de potência e justifica a importância do regulador de tensão no controle da corrente de campo.

2.2.3 Curvas V e capacidade

A Figura 15 apresenta a curva V de um compensador síncrono, que demonstra a variação da corrente de armadura (I_a) em função da corrente de campo (I_{fd}) para determinada condição de carga. Em uma máquina síncrona operando como compensador, essa curva ilustra que existe uma região de excitação na qual a corrente de armadura é mínima, associada a fator de potência próximo da unidade. À medida que a corrente de campo aumenta ou diminui em relação a esse ponto, a corrente de armadura cresce, assumindo caráter associado ao fornecimento ou à absorção de potência reativa (Chapman, 2013).

Figura 15 – Relação entre grandezas de um compensador síncrono



Fonte: Chapman (2013).

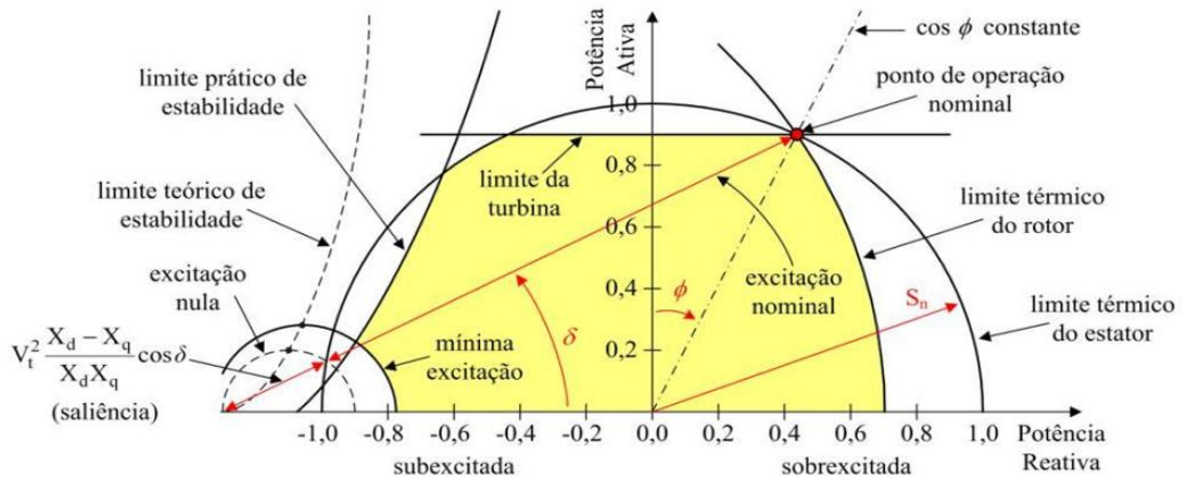
A operação prática da máquina é limitada por restrições térmicas, magnéticas e de estabilidade. Em geradores síncronos, esses limites são representados pela curva de capacidade, demonstrada na Figura 16. O plano é composto pela potência ativa no eixo vertical e a potência reativa no eixo horizontal, este é denominado plano P - Q . A região de operação admissível é delimitada por restrições como a corrente máxima do estator, a corrente máxima de campo, o aquecimento das extremidades do estator e o limite de estabilidade. Na figura, essas restrições são representadas pelas curvas e retas que delimitam a área destacada em amarelo, correspondente à região segura de operação da máquina síncrona.

Em compensadores síncronos, como a potência ativa é pequena, a região operacional fica concentrada em torno de $P \approx 0$, mas os limites de corrente estatórica,

corrente de campo e estabilidade continuam determinando a faixa admissível de fornecimento e absorção de potência reativa.

A curva de capacidade para geradores e compensadores é a mesma. Entretanto, deve-se considerar que o eixo de potência ativa está em módulo.

Figura 16 – Curva de capacidade



Fonte: REIVAX (2025c).

Essa discussão é importante porque os limitadores clássicos do regulador de tensão são normalmente projetados para manter o ponto de operação dentro da curva de capacidade da máquina. O problema estudado neste trabalho, entretanto, não decorre diretamente de uma violação térmica ou de estabilidade da máquina, mas de uma limitação do conversor tiristorizado durante a operação em regiões de corrente de campo muito baixa.

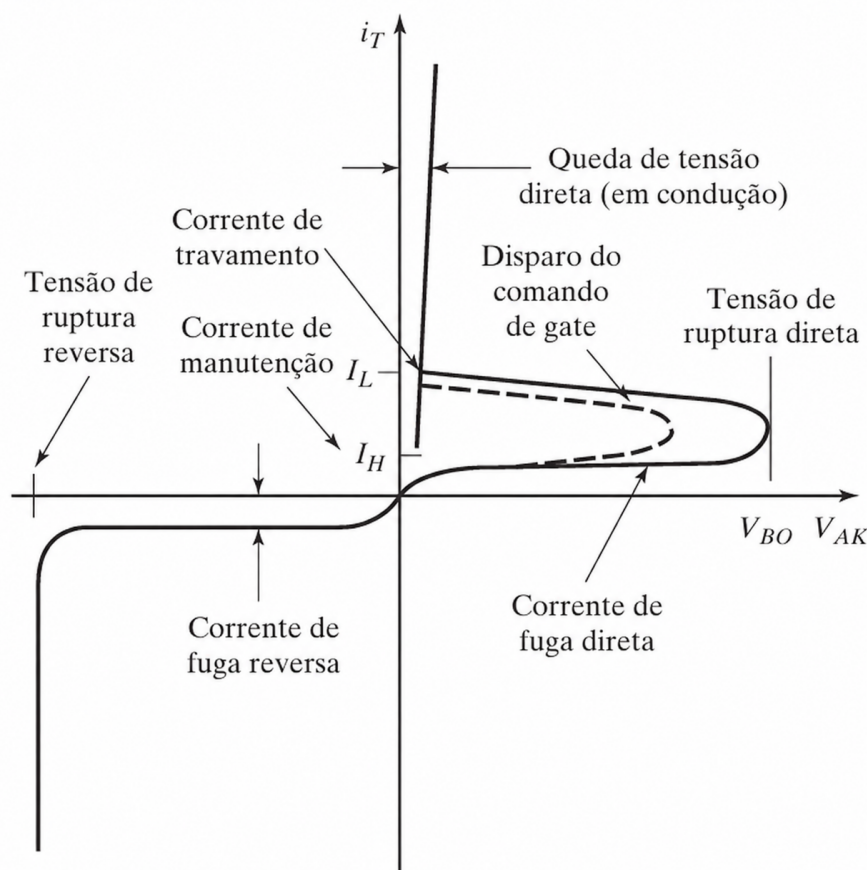
2.3 TIRISTORES

Os tiristores do tipo retificador controlado de silício (do inglês, *Silicon Controlled Rectifier* (SCR)) são dispositivos semicondutores amplamente empregados em conversores de alta potência, devido à sua robustez, à elevada capacidade de corrente e às baixas perdas em condução. O SCR é um dispositivo semicontrolado, seu terminal de *gate* permite iniciar a condução, mas não permite desligar diretamente o componente. O bloqueio ocorre somente quando a corrente de anodo cai abaixo da corrente mínima necessária para manter o dispositivo conduzindo (Rashid, 2014). Essa característica é fundamental para compreender o fenômeno de apagamento em pontes de excitação operando em baixa corrente.

A Figura 17 apresenta a característica tensão-corrente típica de um tiristor. Nela, destacam-se dois parâmetros importantes para a análise de condução em baixa corrente: a corrente de travamento, representada por I_L , e a corrente de manutenção,

representada por I_H . A corrente de travamento é a corrente mínima necessária para que o SCR permaneça ligado imediatamente após o disparo e a retirada do pulso de *gate*. A corrente de manutenção, por sua vez, é a corrente mínima necessária para manter o tiristor conduzindo em regime estabelecido. Em geral, I_L é maior que I_H (Rashid, 2014).

Figura 17 – Característica tensão-corrente do tiristor



Fonte: Rashid (2014).

A distinção entre esses parâmetros é relevante porque o problema estudado nesta monografia ocorre com a ponte já em operação. Dessa forma, o parâmetro mais diretamente associado ao apagamento é a corrente de manutenção. Mesmo que a lógica de disparo continue enviando pulsos aos tiristores, a ponte pode deixar de conduzir se a corrente de campo se tornar insuficiente para manter os dispositivos no estado ligado. Como a corrente de campo é também a corrente que percorre o estágio retificador de excitação, a operação do compensador síncrono em regiões próximas de corrente nula passa a depender não apenas da referência de controle, mas também da capacidade física da ponte de permanecer conduzindo.

Em uma ponte trifásica totalmente controlada, os SCRs são organizados em topologia de Graetz e disparados em sequência, sincronizados com a tensão alternada de alimentação. O ajuste do ângulo de disparo controla o valor médio da tensão

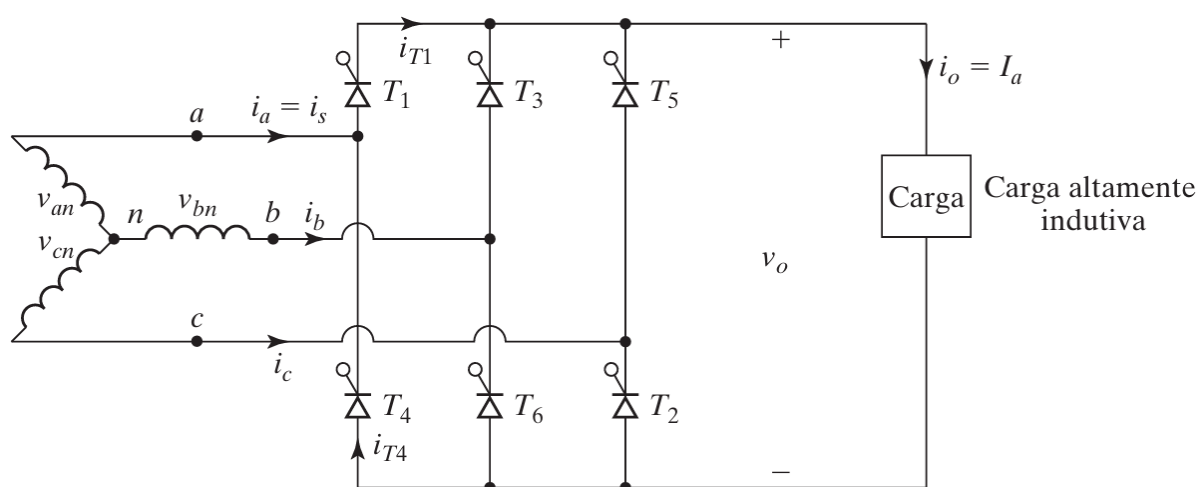
retificada e, nos sistemas de excitação, determina a tensão aplicada ao circuito de campo. Quando duas pontes de polaridades opostas são utilizadas em antiparalelo, uma delas fica associada à aplicação de tensão média positiva e a outra à aplicação de tensão média negativa. Essa estrutura permite a operação em quatro quadrantes (Rashid, 2014), mas exige intertravamentos e critérios de comutação para evitar tanto a condução simultânea quanto a perda de condução da ponte ativa.

Estudos sobre máquinas síncronas associadas a pontes tiristorizadas indicam que os parâmetros da máquina, a dinâmica do circuito de campo, a comutação do conversor e as indutâncias envolvidas influenciam diretamente as formas de onda de tensão e corrente (Abdel-Razek; Poloujadoff, 1978). No contexto deste trabalho, essa interação é analisada sob a perspectiva do controle de excitação em baixa corrente, região na qual a característica de manutenção de condução dos SCRs passa a limitar a continuidade da atuação do regulador. Portanto, o apagamento da ponte é uma limitação associada ao estágio semicondutor do sistema de excitação. A máquina pode ainda estar em uma região admissível do ponto de vista eletromecânico, enquanto a ponte tiristorizada já opera em uma condição crítica de condução.

2.4 PONTES DE TIRISTORES

Existem diversas formas de montar pontes retificadoras com o uso de tiristores. Nesta monografia, são abordadas as pontes trifásicas completas, compostas por seis tiristores acionados de forma sincronizada, capazes de converter a tensão em Corrente Alternada (CA) em tensão em Corrente Contínua (CC), aplicada ao enrolamento de campo da máquina. A arquitetura de uma ponte retificadora trifásica completa é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Ponte retificadora trifásica



Fonte: Rashid (2014).

Nos sistemas de excitação baseados em pontes tiristorizadas, o controle da tensão aplicada ao campo é realizado pela variação do ângulo de disparo dos tiristores. Para uma ponte totalmente controlada, em condições ideais e em regime de condução contínua, a tensão média de saída pode ser representada de forma simplificada por:

$$V_{fd} = V_{d0} \cos \alpha, \quad (7)$$

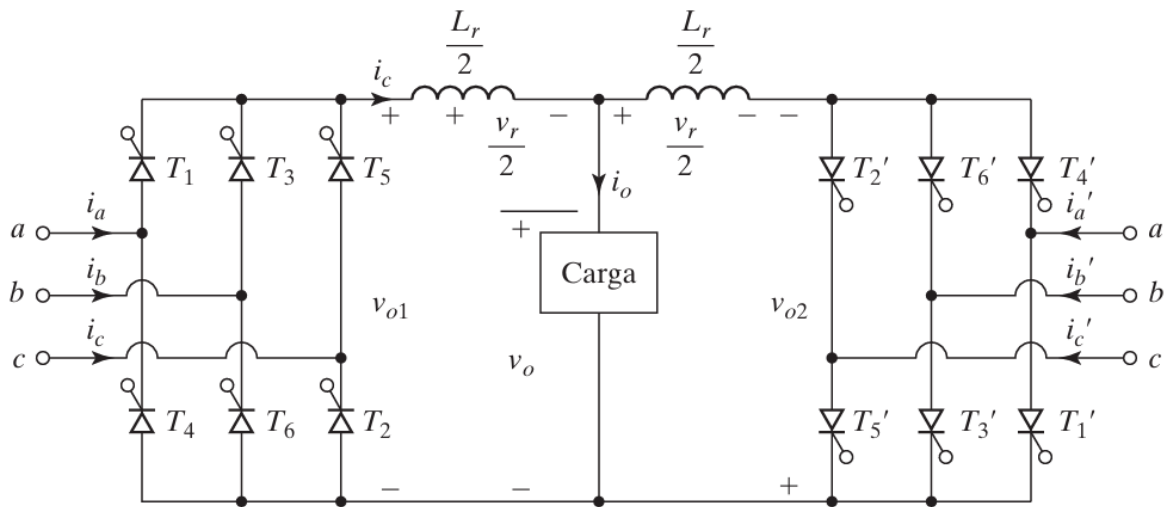
em que V_{fd} representa a tensão média aplicada ao campo, V_{d0} é a tensão média máxima do conversor para $\alpha = 0$ e α é o ângulo de disparo dos tiristores. Essa expressão é utilizada neste trabalho como uma representação média ideal do conversor, desconsiderando quedas nos semicondutores, sobreposição de comutação, ondulação e efeitos das indutâncias da fonte e da carga. A formulação é coerente com a teoria de retificadores controlados por fase, nos quais o valor médio da tensão de saída é proporcional ao termo $\cos \alpha$ (Rashid, 2014).

Como o enrolamento de campo possui comportamento predominantemente indutivo, a corrente de excitação não varia instantaneamente quando a tensão de campo é alterada (Chapman, 2013). Assim, durante transitórios ou mudanças de quadrante, a tensão aplicada ao campo pode ser invertida antes que a corrente atinja o novo valor desejado. Essa característica é importante para o presente trabalho, pois a região próxima de corrente nula representa uma condição crítica para conversores a tiristores: embora o regulador ainda possa solicitar tensão de campo, a ponte pode deixar de conduzir se a corrente nos dispositivos semicondutores cair abaixo do valor mínimo necessário para sustentar a condução (Rashid, 2014).

Para permitir a operação em quatro quadrantes, utilizam-se pontes retificadoras completas em antiparalelo, conforme a Figura 19, de modo a permitir a aplicação de tensão média positiva ou negativa ao enrolamento de campo. Essa configuração amplia a capacidade dinâmica do sistema de excitação, pois permite acelerar tanto o aumento quanto a redução da corrente de campo e viabilizar a inversão de seu sentido. Entretanto, a transição entre pontes exige coordenação para que a condução simultânea não ocorra, evitando curto-circuito entre os conversores.

Considerando os sentidos de referência adotados na Figura 19, a ponte positiva conduz enquanto a corrente de campo é positiva. Quando essa ponte aplica tensão de campo positiva, tensão e corrente possuem o mesmo sinal, caracterizando a operação no primeiro quadrante e elevando a corrente de campo. Quando a ponte positiva aplica tensão de campo negativa, a corrente permanece positiva durante o transitório devido ao comportamento indutivo do enrolamento de campo. Nessa condição, a operação ocorre no quarto quadrante, reduzindo a corrente até a passagem por zero.

Figura 19 – Estrutura de pontes em antiparalelo



Fonte: Rashid (2014).

De forma análoga, a ponte negativa conduz enquanto a corrente de campo é negativa. Quando essa ponte aplica tensão de campo negativa, tensão e corrente possuem o mesmo sinal, caracterizando a operação no terceiro quadrante e aumentando o módulo da corrente negativa. Quando a tensão aplicada passa a ser positiva, a corrente permanece negativa durante o transitório. A operação ocorre então no segundo quadrante, reduzindo o módulo da corrente até a passagem por zero, condição necessária para a comutação segura para a ponte oposta.

2.5 LIMITADORES

Os reguladores automáticos de tensão utilizam limitadores para manter a máquina síncrona dentro de regiões admissíveis de operação. Essas funções atuam de forma coordenada com a malha principal do regulador, restringindo referências ou sinais internos quando grandezas como corrente de campo, corrente estatórica, tensão terminal, frequência ou potência reativa se aproximam de limites térmicos, magnéticos ou de estabilidade. No contexto deste trabalho, a apresentação dos limitadores tem como objetivo situar as funções clássicas do regulador de tensão e diferenciá-las da estratégia proposta, que está voltada à manutenção da condução das pontes tiristorizadas em regiões próximas da corrente nula.

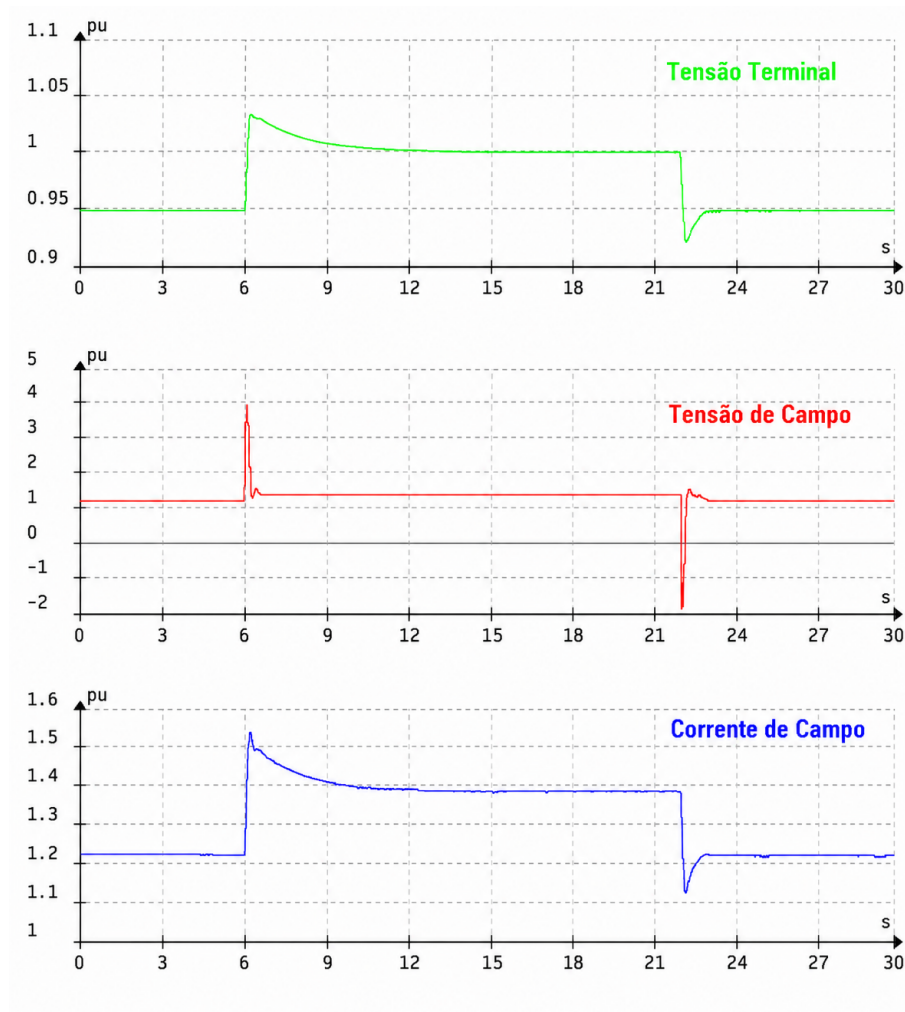
2.5.1 Limitador de sobre-excitação (OEL)

O limitador de sobre-excitação (OEL, do inglês *Over Excitation Limiter*), está associado ao limite térmico do rotor. Sua função é evitar que a corrente de campo permaneça acima do valor admissível por tempo excessivo, condição que pode provocar aquecimento do enrolamento de campo e comprometer a isolamento do rotor. Para

isso, o limitador compara a corrente de campo medida com o limite ajustado e, quando necessário, atua no sentido de reduzir a excitação (REIVAX, 2025c).

Como o aquecimento do rotor possui dinâmica lenta, a atuação do OEL costuma ser temporizada ou dependente da severidade da sobrecorrente. Isso permite que a máquina suporte transitórios de curta duração sem intervenção imediata do limitador, preservando a capacidade dinâmica do sistema de excitação. A validação do ajuste pode ser realizada por meio de um degrau na referência do regulador de tensão próximo ao ponto de atuação, conforme exemplificado na Figura 20.

Figura 20 – Atuação do limitador de sobre-excitação



Fonte: REIVAX (2025c).

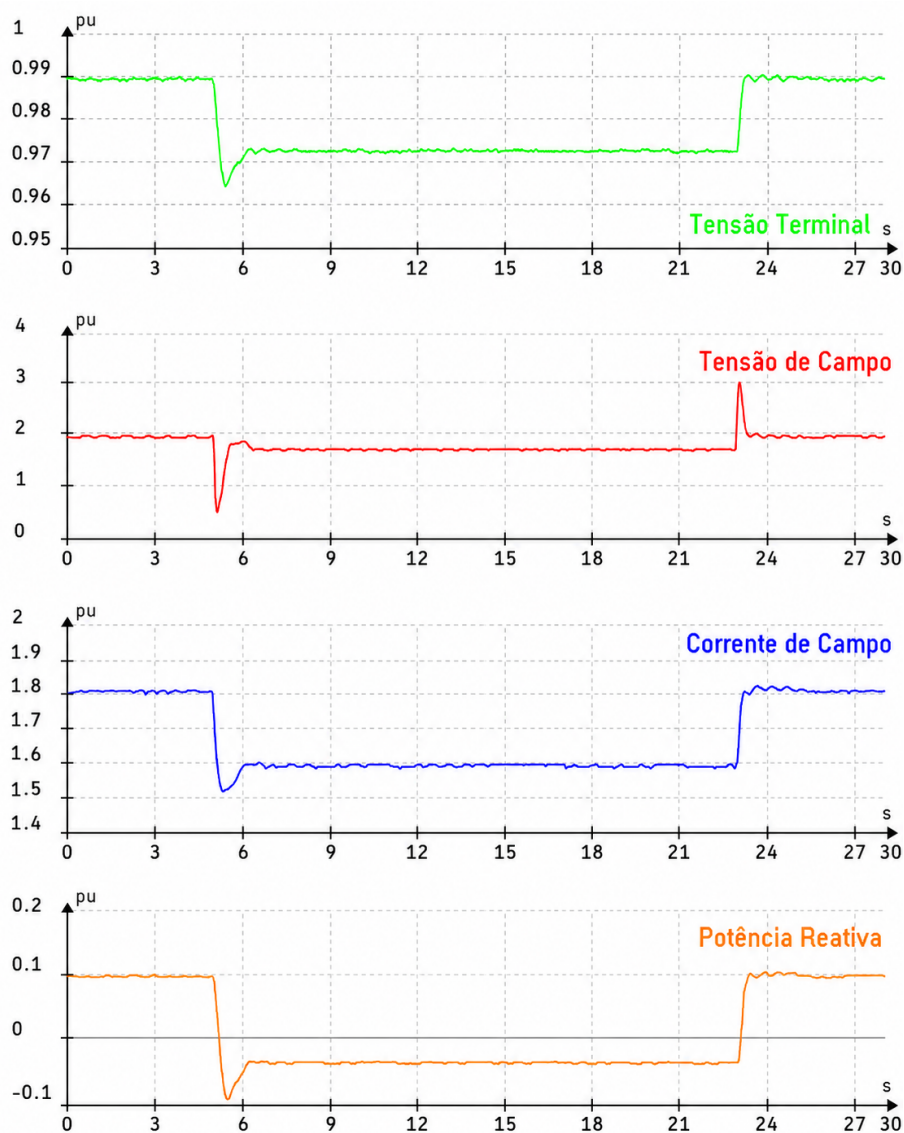
2.5.2 Limitador de subexcitação (UEL)

O limitador de subexcitação (UEL, do inglês *Under Excitation Limiter*), atua na região em que a excitação é reduzida e a máquina tende a absorver potência reativa. Sua finalidade é evitar que o ponto de operação ultrapasse limites associados à estabilidade de regime permanente, ao aquecimento de regiões do estator e à coordenação

com a proteção de perda de excitação. Em implementações práticas, sua região de atuação pode ser definida por uma reta ou por um conjunto de retas sobre a curva de capacidade, calculadas a partir de combinações entre tensão, corrente ativa e corrente reativa (REIVAX, 2025c).

Em compensadores síncronos, esse limitador é especialmente relevante porque a absorção de potência reativa faz parte da função principal da máquina. A resposta dinâmica do UEL pode ser verificada por meio de um degrau negativo na referência de tensão terminal, observando-se grandezas como tensão terminal, tensão de campo, corrente de campo e potência reativa. Um exemplo desse comportamento é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Atuação do limitador de subexcitação



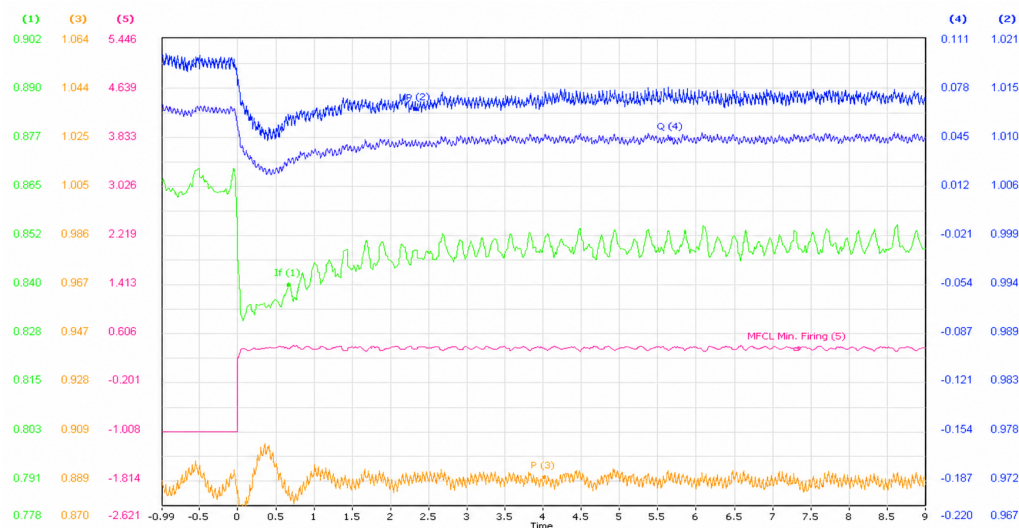
Fonte: REIVAX (2025c).

2.5.3 Limitador de mínima excitação (MEL)

O limitador de mínima excitação (MEL, do inglês *Minimum Excitation Limiter*), evita que a máquina opere com excitação excessivamente baixa. Essa condição pode provocar aumento de fluxo disperso e aquecimento em regiões como cabeças de bobina e partes estruturais da máquina. Em sistemas com excitatriz estática, a mínima excitação admissível também pode estar relacionada à corrente mínima necessária para manter os tiristores em condução, o que aproxima esse limitador do problema investigado nesta monografia (REIVAX, 2025c).

Em geral, o MEL atua aumentando a excitação quando a corrente de campo, ou a grandeza equivalente utilizada no regulador, fica abaixo do valor mínimo ajustado. O limitador pode ser implementado por um controlador do tipo PI, cujo sinal é somado à referência do regulador de tensão. Sua atuação também deve ser coordenada com a proteção de perda de excitação, identificada pela função ANSI 40, responsável por detectar condições em que a corrente de campo se reduz a níveis insuficientes para a operação segura da máquina. A Figura 22 apresenta uma resposta típica do MEL, destacando a corrente de campo, a tensão terminal, as potências ativa e reativa e o sinal de atuação do limitador.

Figura 22 – Atuação do limitador de mínima excitação



Fonte: REIVAX (2025c).

Em arquiteturas de quatro quadrantes, nas quais as pontes tiristorizadas podem aplicar tensões positivas e negativas ao campo, a região de operação em baixa excitação pode ser ampliada. Nessa condição, o ajuste de mínima corrente de campo precisa considerar não apenas os limites convencionais da máquina, mas também a coordenação entre pontes e a manutenção da condução dos tiristores em regiões próximas da corrente nula. Por isso, embora o MEL seja o limitador clássico mais pró-

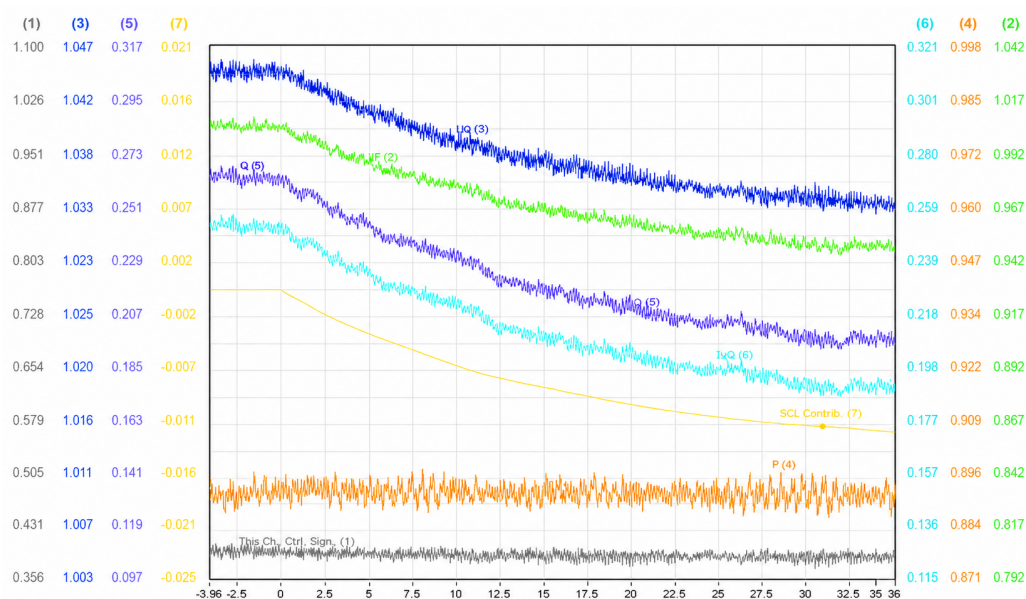
ximo do tema deste trabalho, a solução proposta não se limita a reproduzir sua função convencional.

2.5.4 Limitador de corrente estatórica (SCL)

O limitador de corrente estatórica (SCL, do inglês *Stator Current Limiter*), atua sobre o limite térmico do estator. Como a corrente estatórica depende da combinação entre potência ativa, potência reativa e tensão terminal, esse limite pode ser atingido tanto em operação sobre-excitada quanto subexcitada. Quando a máquina está sobre-excitada, o limitador tende a reduzir a excitação; quando está subexcitada, tende a aumentá-la, buscando reduzir a componente reativa da corrente estatórica (REIVAX, 2025c).

Em algumas implementações, o SCL é calculado a partir das componentes ativa e reativa da corrente. A diferença fasorial entre a corrente estatórica máxima admissível e a corrente ativa define uma referência máxima para a componente reativa, usada para restringir a atuação do regulador. A Figura 23 apresenta um exemplo de resposta dinâmica desse limitador.

Figura 23 – Atuação do limitador de corrente estatórica



Fonte: REIVAX (2025c).

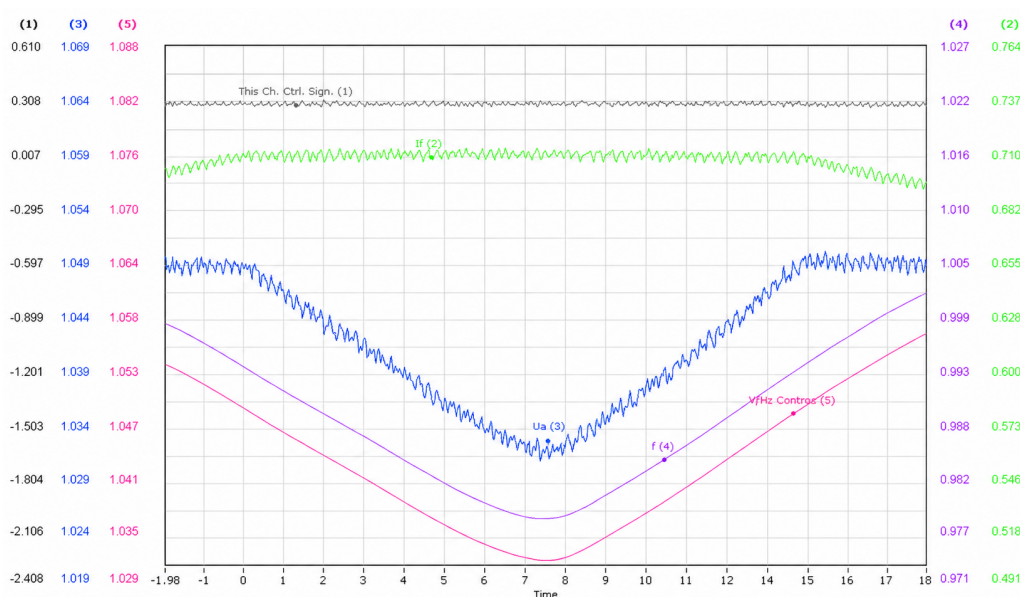
2.5.5 Limitador volts por hertz (V/Hz)

O limitador volts por hertz (VHL, do inglês *Volts per Hertz Limiter*), protege a máquina e equipamentos associados contra sobrefluxo magnético. O sobrefluxo ocorre quando a relação entre tensão terminal e frequência excede os valores admissíveis de projeto, elevando a densidade de fluxo no núcleo. Nessas condições, o limitador atua

reduzindo a excitação ou restringindo a referência de tensão, mantendo a relação V/f dentro de uma faixa segura (REIVAX, 2025c).

Esse limitador é particularmente importante em condições de baixa frequência com tensão elevada, como partidas, paradas ou perturbações no sistema elétrico. Em aplicações reais, seu ajuste deve ser coordenado com a proteção contra sobrefluxo, usualmente associada à função ANSI 24, responsável por detectar condições em que a relação entre tensão e frequência excede os limites admissíveis da máquina. Essa coordenação permite que a ação do regulador ocorra antes do desligamento da unidade por proteção. A Figura 24 apresenta um exemplo de atuação do VHL.

Figura 24 – Atuação do limitador volts por hertz



Fonte: REIVAX (2025c).

2.5.6 Relação entre os limitadores clássicos e o problema estudado

Os limitadores apresentados atuam sobre restrições já conhecidas da máquina ou do sistema de excitação. O OEL está associado ao limite térmico do rotor, o SCL ao limite térmico do estator, o UEL à região de subexcitação e à estabilidade, o MEL à mínima excitação admissível e o VHL à proteção contra sobrefluxo. Essas funções são essenciais para manter a máquina dentro de sua curva de capacidade e coordenar a atuação do regulador com as proteções elétricas.

O fenômeno estudado nesta monografia tem natureza diferente. O apagamento das pontes de tiristores está associado ao estágio semicondutor do sistema de excitação e pode ocorrer mesmo quando a máquina permanece em uma região aceitável do ponto de vista térmico ou de estabilidade. Nessa condição, a corrente no conversor cai abaixo da corrente de manutenção dos tiristores, levando à extinção da ponte ativa.

Dessa forma, o limitador desenvolvido neste trabalho deve ser entendido como uma função complementar aos limitadores tradicionais. Sua finalidade é preservar a continuidade de condução do conversor tiristorizado durante a operação do compensador síncrono em regiões próximas da corrente nula, sem substituir as funções clássicas destinadas à proteção térmica, magnética e de estabilidade da máquina.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A análise apresentada evidencia que os sistemas de excitação estática com pontes tiristorizadas permitem ampliar a capacidade de controle da corrente de campo e, conseqüentemente, da potência reativa trocada pelo compensador síncrono. Entretanto, essa ampliação introduz uma condição crítica de operação em regiões próximas à corrente nula, nas quais a continuidade de condução dos tiristores deixa de depender apenas da ação do regulador e passa a ser limitada pelas características físicas do conversor.

Embora os limitadores clássicos sejam responsáveis por restringir a operação da máquina conforme seus limites térmicos, magnéticos e de estabilidade, eles não foram concebidos especificamente para tratar a perda de condução de uma ponte ativa em condições de baixa corrente. Dessa forma, torna-se necessário analisar como o apagamento indevido ocorre em arquiteturas de quatro quadrantes, quais efeitos produz sobre o controle de excitação e quais requisitos devem ser atendidos por uma estratégia capaz de mitigar esse comportamento. Esses aspectos são apresentados no Capítulo 3.

3 ANÁLISE DO PROBLEMA E REQUISITOS

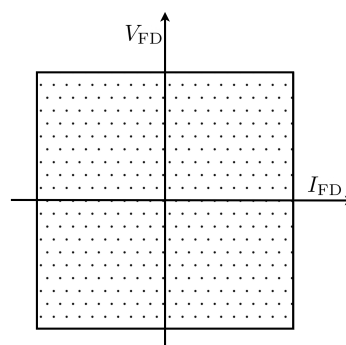
Este capítulo apresenta o problema abordado neste trabalho, contextualizando sua origem física e operacional em sistemas de excitação estática com pontes tiristorizadas, bem como os desafios associados à operação em quatro quadrantes. A análise parte da transição entre regiões de corrente de campo positiva e negativa, descreve o mecanismo de apagamento das pontes, discute seus efeitos práticos sobre o controle e, por fim, estabelece os requisitos técnicos que a solução proposta deve atender.

3.1 TRANSIÇÃO DE QUADRANTES

Conforme discutido no Capítulo 2, o compensador síncrono controla a potência reativa por meio da variação da corrente de campo. Aumentando a excitação, a máquina fornece potência reativa e reduzindo-a ela passa a consumir potência reativa, limitada pela curva de capacidade, pelas proteções elétricas e pelas características do sistema de excitação. Essa relação torna a corrente de campo uma variável central para a operação do compensador, principalmente quando se busca ampliar sua faixa de atuação em regiões de baixa excitação.

A corrente de campo não é imposta diretamente pelo regulador, mas resulta da tensão média aplicada ao enrolamento de campo. Como esse enrolamento possui comportamento predominantemente indutivo, a corrente varia de forma gradual e pode apresentar sentido diferente da tensão aplicada durante transitórios. Por esse motivo, a análise da operação em quatro quadrantes considera simultaneamente os sinais da tensão e da corrente de campo, conforme indicado na Figura 25. Nos quadrantes em que tensão e corrente possuem o mesmo sinal, a tensão aplicada tende a reforçar o sentido atual da corrente, então estes são os quadrantes desejáveis para se operar (I e III). Nos quadrantes em que possuem sinais opostos (IV e II), a tensão atua no sentido de reduzir a corrente existente, condição típica de desaceleração da excitação ou de comutação entre pontes.

Figura 25 – Mapa de quadrantes da tensão e corrente de campo

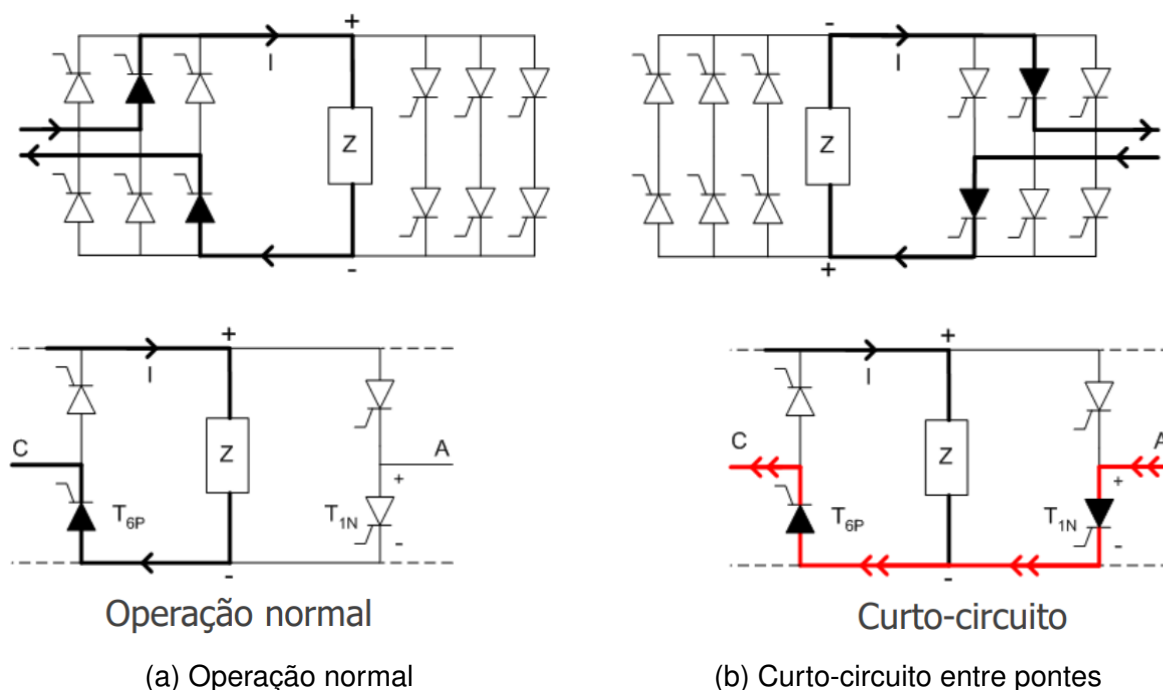


Fonte: REIVAX (2025c).

Durante a operação em absorção de potência reativa, a redução da corrente de campo aproxima o sistema de uma região crítica. Em arquiteturas com apenas uma ponte, essa redução fica limitada pela capacidade do conversor de diminuir a excitação sem perder o controle efetivo do campo. Caso a corrente se aproxime demasiadamente de zero, a ponte ativa pode deixar de conduzir, pois os tiristores dependem de uma corrente mínima para permanecerem no estado ligado. Assim, mesmo que o regulador continue solicitando disparos, a ponte pode apagar por características operacionais dos tiristores, exigindo uma retomada posterior da condução por meio da ação de controle elevada e dos trens de pulso de disparo (Rashid, 2014).

Uma forma de ampliar a atuação do sistema de excitação consiste na utilização de pontes de tiristores em antiparalelo, demonstradas na Figura 26. Essa estrutura permite a aplicação de tensão positiva ou negativa ao enrolamento de campo. Com essa arquitetura, a corrente de campo pode ser conduzida para valores negativos quando essa operação for prevista pelo projeto, o que pode melhorar o aproveitamento da região de absorção de reativos. A operação continua condicionada à capacidade, às proteções, à estabilidade e aos limites térmicos e magnéticos, mas a presença de uma ponte negativa oferece ao sistema de excitação uma trajetória de controle que não estaria disponível em conversores unidirecionais.

Figura 26 – Condições de operação das pontes



Fonte: REIVAX (2022f).

Entretanto, deve-se ter um cuidado extra com o acionamento das pontes, pois quando duas pontes são acionadas, isso cria um caminho de curto-circuito entre os conversores, desviando a corrente do circuito de campo e submetendo os semicondu-

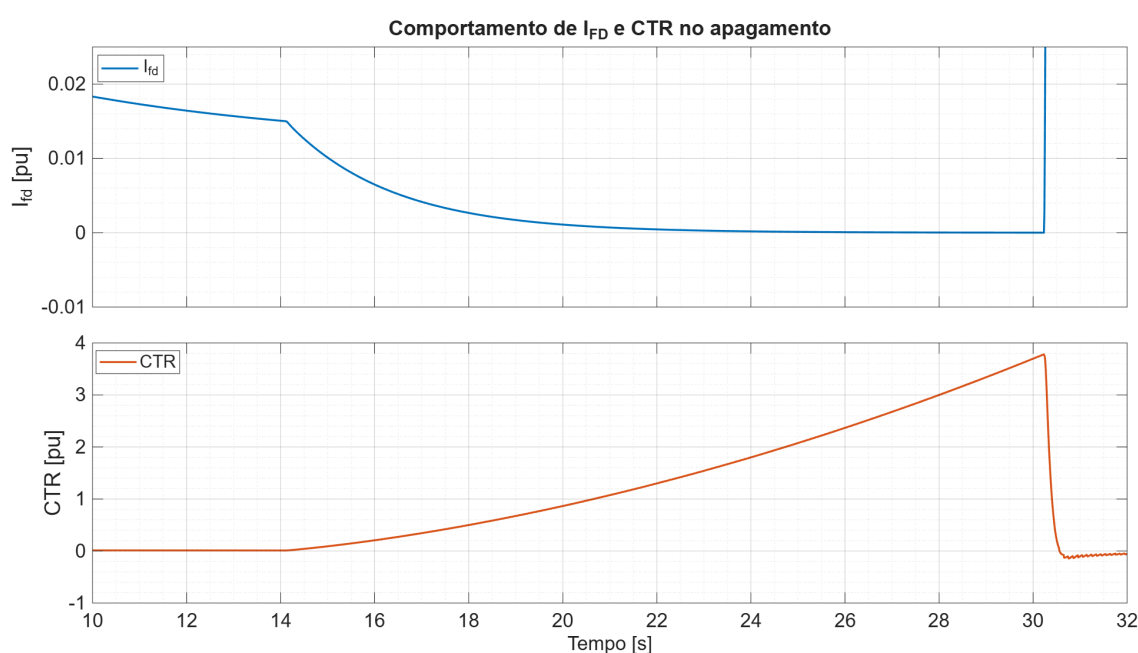
tores a uma condição destrutiva. A Figura 26 (b) ilustra esse problema, quando uma das pontes conduz a corrente através da carga e retorna ao retificador, mas quando a ponte oposta é acionada de forma indevida, estabelece-se um caminho direto entre conversores, caracterizando um curto circuito e causando danos irreversíveis à ponte e à máquina caso as proteções não atuem.

Para assegurar a comutação de pontes e a troca de quadrantes de operação, é observada redução da corrente de campo e a detecção da passagem por zero pelo modulo DCZ. Quando ambas as condições (além das verificações das máquinas de estados internas ao regulador) são alcançadas, é então acionada a ponte oposta para mover o regulador ao quadrante desejado.

3.2 APAGAMENTO DAS PONTES

O apagamento das pontes tiristorizadas é caracterizado pela perda não intencional de condução dos tiristores de uma ponte que deveria permanecer ativa. A Figura 27 demonstra essa ocorrência quando o ponto de operação da máquina exige uma corrente próxima de zero. A corrente de campo, representada em azul, reduz-se gradativamente e no momento em que a ponte apaga, por volta de 14 s, a corrente cai a zero de forma acelerada. Nesse instante, a ação de controle se eleva, pois o regulador identifica que a corrente se afastou do valor esperado. Como essa ação inicial não restabelece a condução, o controle continua se intensificando até que a condução seja retomada, por volta de 30 s.

Figura 27 – Apagamento de ponte

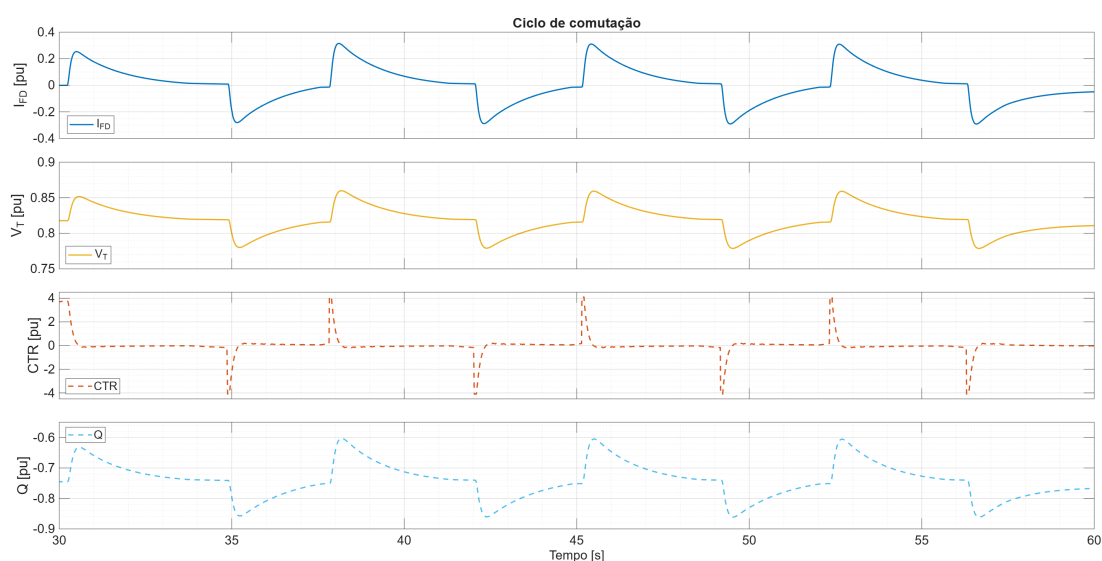


Fonte: Autoria própria.

Esse fenômeno ocorre quando a corrente de campo cai abaixo da corrente de manutenção, fazendo com que a ponte deixe de aplicar tensão efetiva ao campo mesmo que a lógica de controle continue enviando comandos de disparo. Nesse ponto, a existência de pulsos de *gate* não garante, por si só, a permanência da condução.

Quando a ponte apaga, o regulador tende a aumentar sua ação de controle para recuperar a corrente de campo, o que pode resultar em variações bruscas da tensão aplicada ao campo e atrasos na retomada do controle, especialmente quando ocorrem perturbações na tensão da rede ou mudanças rápidas na referência de potência reativa. Em casos de referência muito baixa, a máquina pode entrar em um ciclo limite, alternando a condução entre as pontes positiva e negativa. Nesse comportamento, a corrente de campo passa repetidamente por zero, provocando o apagamento da ponte ativa e levando o regulador a aplicar ação de controle elevada na tentativa de retomar a condução, como demonstrado na simulação da Figura 28.

Figura 28 – Ciclo de comutação de pontes



Fonte: Autoria própria.

Além das transições planejadas entre quadrantes, o apagamento pode ser favorecido por variações abruptas de tensão, ruídos de medição, erro de sincronismo de disparo, operação prolongada em baixa excitação, atraso excessivo no ângulo de disparo ou condições transitórias que conduzam a corrente de campo a valores muito reduzidos. Em aplicações industriais, essa condição pode ser nomeada informalmente como "ponte dormindo", isto é, uma situação na qual a ponte permanece sem condução efetiva por mais tempo do que o esperado e retarda a retomada do controle da corrente de campo.

Algumas estratégias para mitigar esse problema envolvem ajustes físicos no conversor, como redimensionamento de circuitos auxiliares, inclusão de cargas ou

resistências para garantir corrente mínima e modificações na topologia do estágio de potência. Essas alternativas podem ser efetivas em determinadas aplicações, mas aumentam custo, complexidade e dependência de alterações de hardware. Por isso, torna-se relevante investigar uma estratégia complementar baseada em software, capaz de atuar preventivamente sobre a condição de baixa corrente sem modificar obrigatoriamente a topologia física do conversor.

Do ponto de vista de controle, uma prática usual em retificadores SCR é o emprego de trens de pulsos no *gate*, aumentando a probabilidade de entrada em condução em condições variáveis de carga e alimentação (Patel et al., 2016). Ainda assim, em situações de corrente muito baixa, essa estratégia pode não ser suficiente para manter a ponte conduzindo, pois a permanência do estado ligado depende da corrente de manutenção dos tiristores.

Uma outra estratégia aplicada pela REIVAX em projetos com compartilhamento de corrente entre máquinas, é o uso de um controlador a parte para fazer o controle conjunto das unidades em paralelo, onde este fica responsável pelo equilíbrio das correntes reativas.

3.3 IMPACTOS E EFEITOS PRÁTICOS

O principal efeito prático do apagamento é a perda temporária da capacidade do regulador de tensão de aplicar a tensão de campo desejada, perdendo o controle temporariamente sobre a dinâmica da operação. Como a corrente de campo determina a excitação da máquina e influencia diretamente a troca de potência reativa, a perda de condução da ponte pode produzir erro entre a referência solicitada e a resposta efetiva do compensador síncrono. Na operação do sistema, esse comportamento pode aparecer como atraso na resposta de potência reativa, limitação momentânea de absorção ou fornecimento de reativos e degradação do controle de tensão.

Outro impacto relevante é o atraso na retomada da condução. Em registros internos de operação analisados pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) antes do desenvolvimento do projeto, foram observadas situações em que a perda de condução da ponte resultou em atrasos da ordem de alguns segundos, chegando aproximadamente a 5 s em determinadas ocorrências.¹ Embora esses registros não sejam apresentados integralmente, eles indicam que o fenômeno pode produzir tempos de recuperação incompatíveis com a resposta esperada de um regulador de tensão. Esse período no qual campo permanece em zero, é chamado de campo em aberto. Em máquinas em que a operação nessa situação não é esperada, pode ocorrer a indução de corrente no campo causando a instabilidade na operação.

¹ Os valores mencionados decorrem de registros internos de aplicação industrial analisados antes do desenvolvimento do projeto. Os registros completos não são apresentados por conterem informações técnicas e operacionais de caráter restrito.

Do ponto de vista do desempenho do compensador, o apagamento restringe a operação em regiões próximas de corrente nula, especialmente durante absorção elevada de potência reativa ou em transições de quadrantes, e também, reduz a capacidade do regulador de reagir a situações diversas da rede, como sobretensão e subtensão em tempo hábil, afetando a qualidade da energia fornecida aos consumidores.

3.4 REQUISITOS TÉCNICOS

A solução deve atuar como função complementar aos limitadores tradicionais do regulador de tensão, preservando a condução da ponte ativa sem impedir a comutação segura entre pontes positiva e negativa quando a inversão de corrente for necessária.

Do ponto de vista funcional, o limitador deve monitorar a corrente de campo, medida ou estimada, ou outra grandeza capaz de representar de forma confiável a condição de condução da ponte ativa. A partir dessa informação, deve evitar que a corrente seja conduzida a uma região inferior ao limite mínimo necessário para sustentar a condução dos tiristores, exceto durante janelas de comutação explicitamente permitidas pela lógica de controle. A função também deve atuar de forma bidirecional, contemplando operação com corrente de campo positiva e negativa, pois o problema pode ocorrer tanto na transição da ponte positiva para a negativa quanto no sentido oposto.

Do ponto de vista dinâmico, a atuação do limitador deve ser suficientemente rápida para impedir que a corrente de campo atravesse a região crítica sem controle, mas não deve introduzir oscilações ou atrasos relevantes na malha principal do regulador de tensão. Como referência de projeto, o tempo de resposta deve ser na ordem de dezenas de milissegundos, respeitando a dinâmica indutiva do campo e a segurança da comutação entre pontes. A limitação também não deve ocorrer de forma abrupta, devendo ser coordenada com a dinâmica da máquina e com a malha principal de controle.

Do ponto de vista de segurança, a solução não deve causar o disparo simultâneo indevido das pontes positiva e negativa. A liberação da ponte oposta deve depender de condições seguras de comutação, de modo a evitar curto-circuito entre conversores. Ao mesmo tempo, a lógica não deve bloquear indefinidamente uma transição necessária, pois isso impediria o regulador de aplicar a tensão de campo requerida para conduzir a máquina ao novo ponto de operação. A função também deve ser coordenada com limitadores já existentes, como UEL e OEL, além das proteções associadas ao circuito de campo.

Por fim, a solução deve ser aplicável à plataforma de controle do regulador sem exigir alterações obrigatórias na topologia física do conversor. Seus parâmetros devem ser ajustáveis para diferentes aplicações, considerando valores mínimos de corrente de campo, características da ponte tiristorizada, dinâmica do enrolamento de campo e critérios de comutação adotados no projeto. A validação deve demonstrar, por simulação computacional, a atuação em baixa corrente, a preservação da condução da ponte ativa, a liberação adequada da comutação quando necessária e a ausência de interferência indevida nos demais modos de operação do regulador.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos e as ferramentas empregados no desenvolvimento da estratégia proposta nesta monografia. Inicialmente, é descrita a organização metodológica adotada para conduzir o estudo desde a delimitação do problema até a verificação da solução em ambiente de simulação. Em seguida, são apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas para a implementação das lógicas de controle, a realização dos ensaios e o acompanhamento das variáveis necessárias à análise do comportamento do regulador.

4.1 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi estruturada em conjunto com a equipe de P&D da REIVAX e organizada em etapas sucessivas, desde o estudo do problema até a validação da solução proposta em ambiente de simulação. Essa organização permitiu relacionar a fundamentação teórica, a análise do fenômeno de apagamento das pontes e a implementação da estratégia de controle no ambiente de desenvolvimento utilizado pela empresa.

- **Revisão bibliográfica sobre sistemas de excitação:** estudo da atuação dos sistemas de excitação em máquinas síncronas, partindo da relação entre o RT e as grandezas controladas. A partir dessa base, foram analisadas as características da excitação estática com pontes de tiristores e o papel das arquiteturas em antiparalelo na operação em quatro quadrantes. Essa revisão também permitiu compreender como o apagamento das pontes pode ocorrer em condições de baixa corrente, quais alternativas são descritas na literatura para mitigar esse comportamento e de que forma os limitadores clássicos do regulador restringem a resposta da máquina dentro de suas regiões admissíveis de operação.
- **Aprofundamento em máquinas síncronas:** estudo do comportamento da máquina síncrona com ênfase na operação como compensador, focando nos efeitos da corrente de campo na geração ou consumo de reativos, estudando a curva de capacidade e a operação em regiões de baixa excitação. Essa análise serviu de base para compreender por que a operação próxima de corrente nula se torna crítica e por que essa região precisa ser considerada no desenvolvimento da estratégia de controle.
- **Análise dos limitadores do regulador de tensão:** investigação do funcionamento dos limitadores clássicos, como OEL, UEL, MEL, SCL e VHL, com o objetivo de compreender suas dinâmicas de atuação e sua relação com os limites da máquina. Essa etapa também permitiu diferenciar esses limitadores da estra-

tégia proposta neste trabalho, voltada especificamente à preservar a condução das pontes e permitindo a comutação entre pontes positivas e negativas.

- **Desenvolvimento da estratégia de controle:** elaboração da lógica de controle e dos intertravamentos necessários para a implementação do limitador de mínima corrente de campo. Essa etapa utilizou como referência as malhas de controle existentes nos reguladores da REIVAX juntamente com as máquinas de estados que definem o comportamento esperado do sistema, aplicando os requisitos pensados e desenvolvidos no Capítulo 3 e todo conteúdo absorvido durante os estudos realizados na fundamentação teórica.
- **Simulação e validação:** verificação da solução proposta por meio de simulações em ambiente computacional, utilizando ferramentas proprietárias da REIVAX. A validação consistiu na análise do comportamento do regulador em cenários críticos de baixa corrente, observando a atuação do limitador, a preservação da condução da ponte ativa, a coordenação da comutação entre pontes e a compatibilidade da solução com os demais modos de operação.

4.2 FERRAMENTAS

As ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho pertencem ao ambiente interno de engenharia da REIVAX e são empregadas na customização dos softwares dos reguladores. Elas também são capazes de simular e supervisionar o Controlador Lógico Programável (CLP) em modo virtual e em *Hardware-in-the-Loop*. No contexto desta monografia, sua utilização foi baseada em dois programas: o Sistema de Edição de Configurações (SEC) para criação das lógicas internas do CLP e xVision para monitoração de comportamentos via Interface Homem-Máquina (IHM).

4.2.1 SEC - Sistema de Edição de Configurações

O SEC é a ferramenta utilizada pela REIVAX para programação e parametrização dos controladores da família CPX. Por meio desse ambiente, são desenvolvidas lógicas de controle, cálculos, intertravamentos, alarmes e rotinas de comunicação, além de ser possível monitorar variáveis internas durante testes e simulações. No presente trabalho, o SEC foi utilizado como ambiente principal para a implementação da estratégia de limitação de corrente de campo e para a análise dos sinais associados ao regulador de tensão.

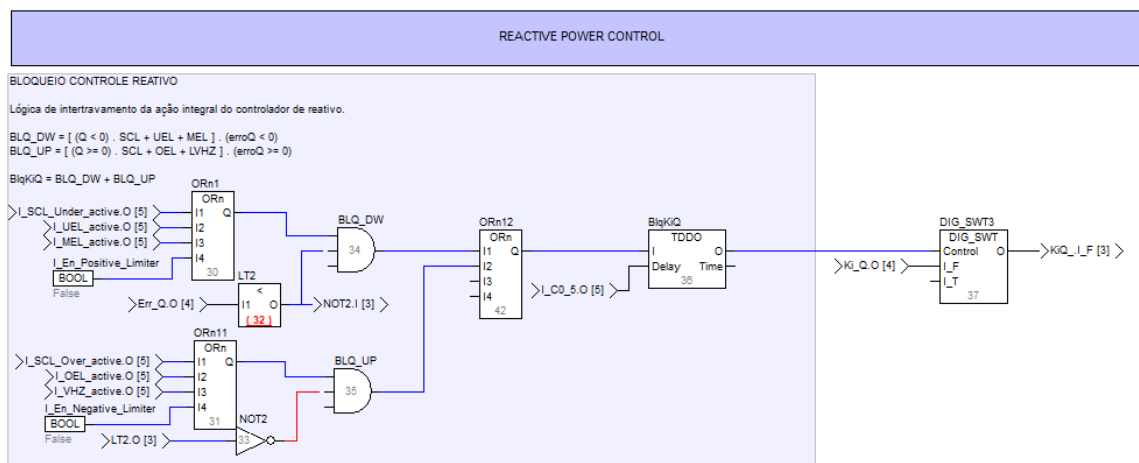
O desenvolvimento de projetos no SEC parte de arquivos de configuração padronizados, que contêm a estrutura básica dos reguladores que serão empregados nos projetos. Para a aplicação estudada, o foco foi direcionado aos programas relacionados ao regulador de tensão, pois é nessa parte da aplicação que se concentram

as malhas responsáveis pela atuação sobre o sistema de excitação e, consequentemente, sobre a corrente de campo da máquina síncrona. Esse reaproveitamento da estrutura padrão é importante porque permite desenvolver a nova função de controle sem descaracterizar a arquitetura já utilizada nos produtos da empresa.

Entre os programas empregados no desenvolvimento, destaca-se o RTX_CTR, no qual estão concentradas as principais lógicas de controle do regulador de tensão. A implementação da estratégia proposta utilizou sinais internos desse programa, blocos funcionais de controle e estruturas de intertravamento já existentes, de modo que a solução pudesse atuar como função complementar aos limitadores tradicionais, sem substituir indevidamente as proteções e restrições operacionais do regulador.

A Figura 29 apresenta um exemplo de lógica implementada no SEC para bloqueio do integrador da malha de potência reativa. Embora essa lógica não seja a solução principal deste trabalho, ela ilustra um tipo de estratégia utilizada nos reguladores com modificação dinâmica de ganhos ou sinais internos para evitar que as malhas compitam entre si, ou forçar um comportamento desejado. Esse princípio é relevante para a solução proposta, pois o limitador desenvolvido também precisa interferir na ação de controle de forma coordenada, evitando tanto o apagamento da ponte quanto a introdução de comportamentos imprevisíveis.

Figura 29 – Lógica de anti-windup por bloqueio do ganho integral no SEC



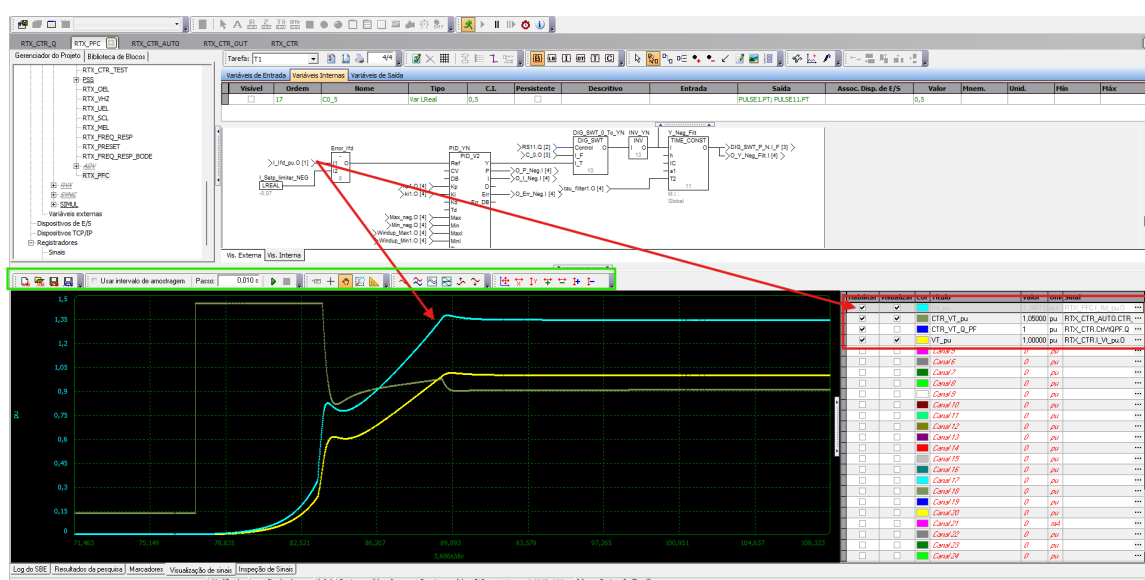
Fonte: Arquivo pessoal.

Uma funcionalidade essencial do SEC para este projeto é a simulação dos programas em ambiente virtual. Essa simulação é realizada em conjunto com o programa *Simul* e com o Software Básico Embarcado (SBE), responsável por converter as lógicas desenvolvidas em um código funcional compatível com os controladores. Com esse recurso, é possível testar lógicas, alarmes, intertravamentos e estratégias de controle diretamente no computador, sem a necessidade imediata de um controlador

físico ou de uma bancada dedicada, ainda que com menor representatividade física quando comparado a uma solução do tipo *Hardware-in-the-Loop*.

Durante a simulação, o SEC permite o monitoramento dos sinais internos em tempo real, recurso utilizado para acompanhar a evolução das grandezas de interesse e verificar a resposta do regulador frente aos cenários definidos na metodologia. A Figura 30 apresenta um exemplo de visualização de sinais durante a excitação da máquina, incluindo corrente de campo, tensão terminal e ação de controle. Esse tipo de registro foi utilizado como apoio à análise do comportamento dinâmico, especialmente nos ensaios envolvendo baixa corrente de campo e atuação do limitador.

Figura 30 – Monitoramento de sinais no SEC durante simulação



Fonte: Arquivo pessoal.

A integração entre o SEC e uma interface gráfica desenvolvida no xVision também foi utilizada durante os testes, permitindo que comandos, referências e condições de operação fossem aplicados por meio de uma IHM executada no próprio computador. Essa integração possibilitou avaliar a lógica de controle em um ambiente semelhante ao de operação, no qual a resposta do regulador pode ser acompanhada tanto pelos sinais internos do SEC quanto pelas telas de supervisão.

4.2.2 xVision

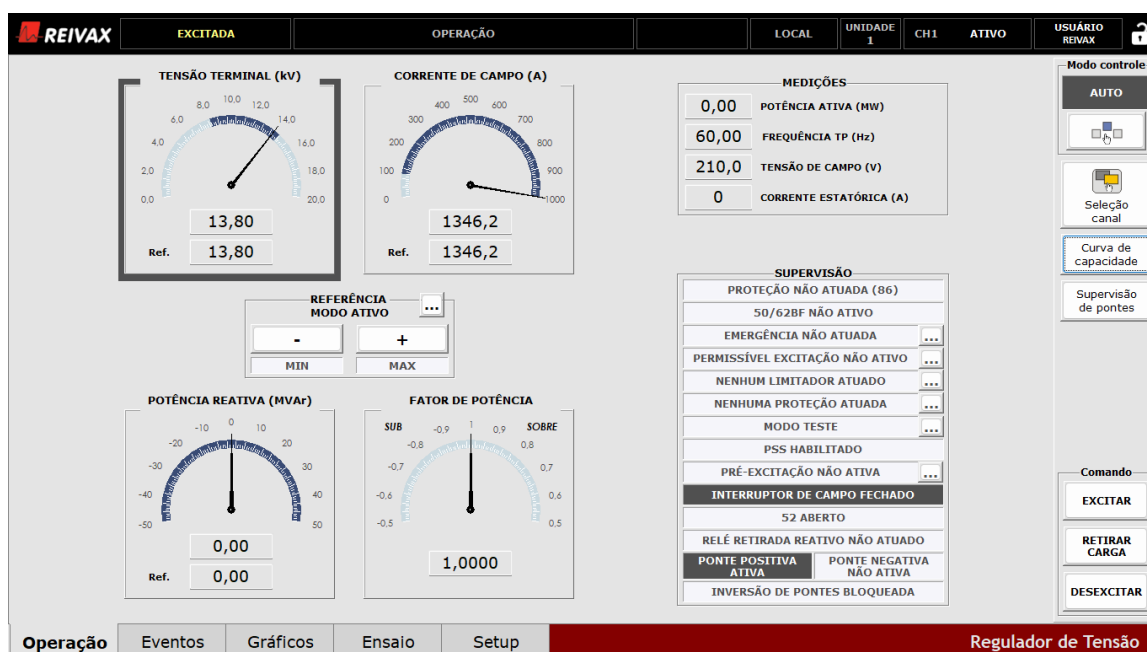
O xVision é a ferramenta proprietária da REIVAX destinada ao desenvolvimento de interfaces gráficas para IHMs, permitindo a criação de telas de operação, parametrização, supervisão e diagnóstico de falhas. No contexto deste trabalho, o xVision foi utilizado principalmente como meio de comando e supervisão da simulação, possibilitando a alteração de referências durante a execução de ensaios e a visualização do

comportamento do regulador em condições próximas às encontradas na operação de campo.

A comunicação entre a IHM desenvolvida no xVision e o controlador CPX ocorre por meio de protocolos industriais, sendo o Modbus TCP um dos protocolos utilizados em aplicações desse tipo devido à sua compatibilidade com redes Ethernet e à simplicidade de integração entre equipamentos de automação (MODBUS, 2006). Para que comandos e medições sejam trocados corretamente, as variáveis da interface precisam estar associadas aos endereços de comunicação definidos no controlador e com escalas compatíveis, garantindo assim que uma variável compartilhada entre os equipamentos tenha o mesmo valor e precisão em cada um.

No desenvolvimento da simulação, a IHM foi empregada para executar os comandos de partida e parada, alterar referências, habilitar condições de ensaio, acompanhar o comportamento do regulador por meio dos gráficos temporais e selecionar os modos de controle. A Figura 31 apresenta a tela de operação utilizada durante simulações.

Figura 31 – Tela de operação do RT no xVision



Fonte: Arquivo pessoal.

Os modos disponíveis para a operação do compensador síncrono são AUTO, lfd, Q e FP. O modo AUTO corresponde ao controle da tensão terminal, enquanto o modo lfd realiza o controle da corrente de campo. O modo Q é destinado ao controle de potência reativa e fica disponível após a sincronização da máquina, assim como o modo FP, utilizado para o controle do fator de potência. Em compensadores síncronos com partida direta, a excitação inicial é realizada no modo lfd. Após a corrente de

campo atingir valores nominais, o regulador realiza a transição para o modo AUTO e, na sequência, para o modo Q. O modo fator de potência é disponibilizado, mas dificilmente utilizado pois não é o foco de operação de compensadores.

Além da tela de operação, o xVision foi utilizado para acompanhar graficamente os ensaios de potência reativa e as respostas do regulador a alterações de referência. Os gráficos disponíveis na IHM permitem visualizar o comportamento do regulador ao longo do tempo. Entretanto, se for necessária uma análise de precisão, os registros do SEC são mais adequados pois têm um tempo de amostragem reduzido. A Figura 32 apresenta um exemplo de utilização da IHM para o ensaio de potência reativa. Nesta tela pode ser monitorada a resposta temporal do sistema, sendo possível aplicar degraus na referência e alterar os limites de saturação e ganhos do controlador PI.

Figura 32 – Ensaio de potência reativa visualizado no xVision



Fonte: Arquivo pessoal.

A utilização conjunta do SEC e do xVision permitiu conduzir o desenvolvimento da estratégia de controle em um ambiente integrado de simulação, no qual a lógica implementada pôde ser comandada e avaliada a partir do comportamento das variáveis do problema estudado. O uso dessas ferramentas foi essencial para a implementação e validação da estratégia proposta, pois são capazes de emular um ambiente de operação para realização de testes e desenvolvimento estratégias, monitorando o comportamento do sistema e os efeitos das ações aplicadas.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A utilização conjunta do SEC e do xVision permitiu conduzir o desenvolvimento da estratégia de controle em um ambiente integrado de simulação, no qual a lógica implementada pôde ser comandada e avaliada a partir do comportamento das variáveis associadas ao problema estudado. Essas ferramentas foram essenciais para a implementação e a validação da estratégia proposta, pois possibilitaram a simulação de condições próximas às encontradas na operação e o ajuste das lógicas desenvolvidas a partir dos resultados observados.

Com base na metodologia definida e nos recursos apresentados, o Capítulo 5 descreve o desenvolvimento da solução proposta, detalhando sua integração às malhas de controle do regulador, os critérios de atuação do limitador e a estratégia adotada para a comutação entre pontes.

5 SOLUÇÃO PROPOSTA E DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da solução proposta para mitigar o apagamento das pontes de tiristores durante a operação do compensador síncrono em regiões próximas à corrente nula de campo. Para isso, são descritas a arquitetura geral da solução, sua integração com as malhas de controle do RT, as condições de habilitação do limitador e a lógica adotada para permitir a comutação entre as pontes positiva e negativa.

A estratégia desenvolvida parte da necessidade de manter a corrente de campo afastada da região crítica de manutenção dos tiristores, sem impedir a dinâmica normal da máquina síncrona e sem eliminar a possibilidade de comutação entre as pontes. Com base nesse requisito, foi proposta uma estrutura de limitação de mínima corrente de campo aplicada ao modo de controle de potência reativa, que é o principal modo de controle utilizado na operação de compensadores síncronos. A solução possui relação conceitual com a limitação de mínima excitação, pois atua para impedir que a excitação seja reduzida além de uma região admissível. Entretanto, diferentemente de uma aplicação convencional do MEL, a proposta deste trabalho não se limita a restringir a redução da corrente de campo em uma única direção. Como a arquitetura analisada utiliza pontes em antiparalelo, o limitador deve atuar de forma bidirecional, preservando a condução da ponte ativa e, ao mesmo tempo, permitindo que a corrente ultrapasse a região próxima de zero quando a comutação entre pontes for requerida.

Essa característica torna a solução específica para aplicações de quatro quadrantes. Em sistemas com apenas uma ponte, a limitação de mínima excitação pode ser suficiente para impedir que a corrente de campo seja reduzida abaixo de um valor mínimo ajustado, desde que a operação prevista não exija inversão de corrente. Em arquiteturas com ponte positiva e ponte negativa, essa abordagem passa a ser insuficiente, pois a solução precisa distinguir uma redução indevida da corrente, que deve ser limitada, de uma redução intencional associada à comutação de pontes, que deve ser permitida sob condições controladas.

Para preservar a atuação das malhas principais do regulador, o limitador foi estruturado como uma ação adicional sobre a referência interna de tensão terminal gerada pela malha de potência reativa. Dessa forma, em vez de substituir diretamente a saída do controlador principal por um valor fixo, a solução adiciona um sinal corretivo à ação de controle existente. Essa escolha permite que a malha de reativo continue influenciando a referência de tensão terminal, ao mesmo tempo em que o limitador passa a atuar quando a corrente de campo se aproxima da região crítica definida para a ponte em condução.

A integração do limitador à arquitetura do regulador exigiu o estudo da estrutura de controle padrão utilizada no sistema de excitação da REIVAX. Por questões de

sigilo industrial, essa estrutura não é apresentada em detalhes nesta monografia. Essa análise permitiu definir o ponto de inserção da ação corretiva, evitar conflito direto com os controladores já existentes e preservar o comportamento nominal do RT fora da região de atuação do limitador. Assim, antes da descrição detalhada da lógica proposta, apresenta-se uma visão geral das principais malhas de controle relacionadas à solução desenvolvida.

5.1 MALHAS DE CONTROLE

A arquitetura de controle de um RT é composta por malhas organizadas em cascata e em paralelo, selecionadas conforme o modo de operação da máquina síncrona e as funções habilitadas no regulador. De forma simplificada, a malha de controle de tensão terminal constitui a estrutura central do sistema, pois sua saída está associada à geração da referência de excitação utilizada pelas etapas posteriores de equalização de corrente e disparo das pontes de tiristores.

A malha de controle de potência reativa é externa à malha de tensão e atua em cascata com ela. Nessa condição, a saída da malha de reativo passa a operar como referência para a malha interna de tensão, conforme a arquitetura implementada. Essa organização permite que variáveis elétricas distintas sejam controladas sem modificar diretamente a etapa final de disparo dos tiristores, desde que os sinais sejam devidamente condicionados e compatibilizados com os limitadores existentes.

A Figura 33 apresenta uma representação simplificada da arquitetura de controle utilizada no sistema de excitação. O diagrama permite visualizar a relação entre as variáveis de entrada e saída, a forma como os limitadores existentes interferem no sistema e o ponto de inserção do limitador desenvolvido neste trabalho. A figura não tem o objetivo de representar todos os blocos internos do regulador, mas de evidenciar a estrutura necessária para compreender a integração da solução proposta.

O ponto de inserção do limitador foi definido após o controlador Proporcional-Integral (PI) da malha de reativo e antes dos limitadores tradicionais. Neste ponto, a saída do controlador é utilizada como referência de tensão terminal, então ao somar o valor calculado pelo limitador com este sinal, a referência da malha interna de tensão será deslocada quando a corrente se aproximar do limiar de apagamento. A posição do limitador pode ser observada na Figura 34 e uma versão mais detalhada da mesma é apresentada na Seção 5.3.

A malha de tensão, por possuir resposta mais rápida que a malha de potência reativa e que o limitador proposto, permanece responsável por responder às variações rápidas da rede durante a operação. Quando a corrente de campo se aproxima da região crítica de apagamento, o limitador desloca a referência de controle para afastar a operação dessa região. Quando a referência de operação exige uma transição rápida entre pontes, a lógica de supervisão avalia as condições de comutação e permite ou

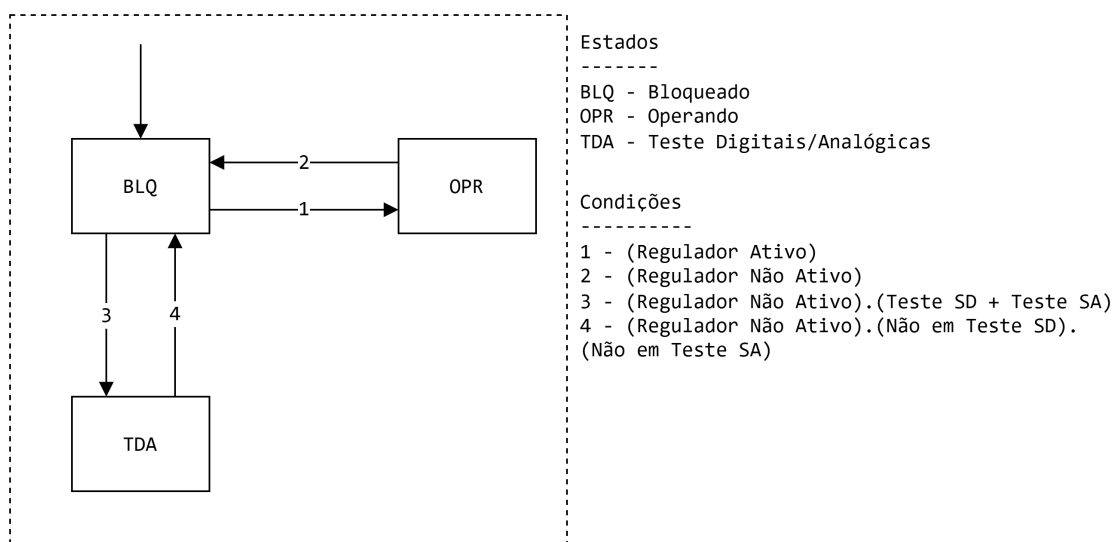
5.2 MÁQUINAS DE ESTADOS

O comportamento do regulador é definido por máquinas de estados que se conectam e se intertravam, estabelecendo os modos de operação e impedindo que comandos incompatíveis sejam executados simultaneamente, sendo utilizadas também para ordenar sequências operacionais de partida, parada, testes e comutação de pontes. No contexto deste trabalho, a análise dessas estruturas é necessária porque o limitador desenvolvido não deve atuar de forma permanente, mas apenas quando o regulador estiver em condição adequada de operação e quando os sinais internos indicarem que a intervenção não compromete as demais funções do sistema.

Esta seção apresenta as máquinas de estados envolvidas na operação do regulador em conjunto com o limitador proposto, indicando os estados utilizados como permissivos e sua função dentro da lógica de controle. A abordagem não tem o objetivo de detalhar todas as transições internas do regulador, mas de evidenciar os sinais necessários para garantir que o limitador atue apenas nos modos de operação compatíveis com a aplicação em compensadores síncronos.

A primeira máquina de estados considerada é apresentada na Figura 35. Essa máquina delimita o comportamento básico do regulador, indicando se o sistema está bloqueado, em operação normal ou em modo de teste de saídas digitais e analógicas. A partir dela, é possível identificar a condição geral de disponibilidade do regulador antes da habilitação das demais máquinas de estados associadas à operação.

Figura 35 – Máquina de estados do comportamento básico do regulador

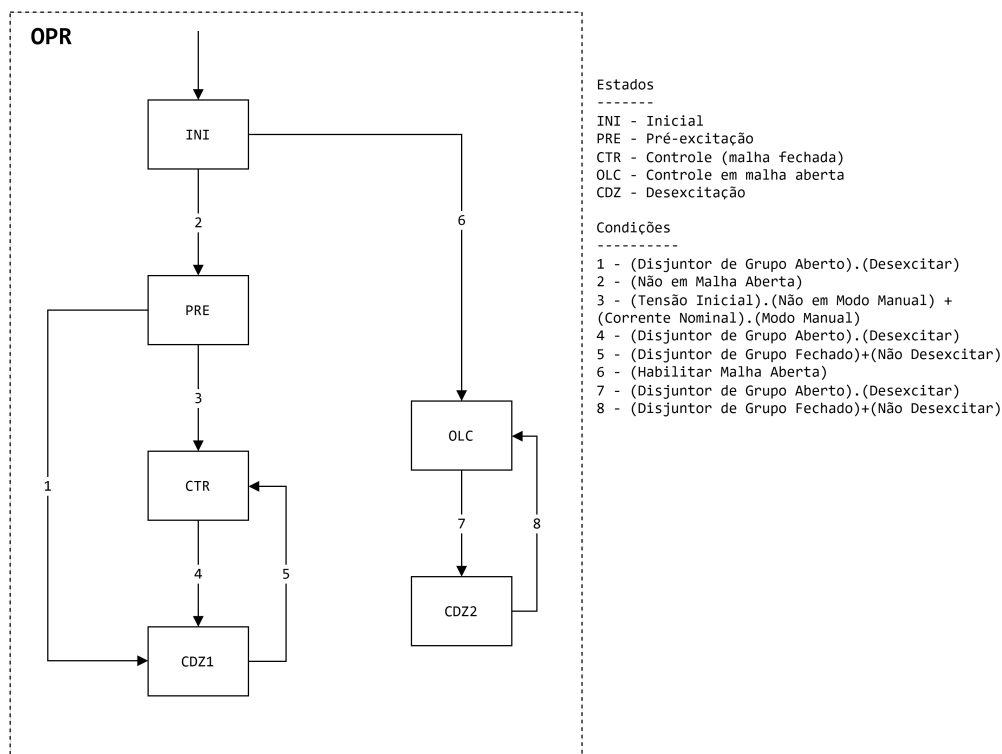


Fonte: Arquivo pessoal.

Não há razão para habilitar o limitador proposto enquanto o regulador estiver bloqueado ou em modo de teste, pois nessas condições a máquina não está sob operação normal do RT. A habilitação do limitador deve ocorrer apenas quando o

regulador estiver em um dos modos de operação, os quais são regidos pela máquina de estados OPR, ativada pelo sinal de regulador ativo ou sinal de partir RT. Essa máquina é apresentada com mais detalhes na Figura 36.

Figura 36 – Máquina de estados do comportamento em operação



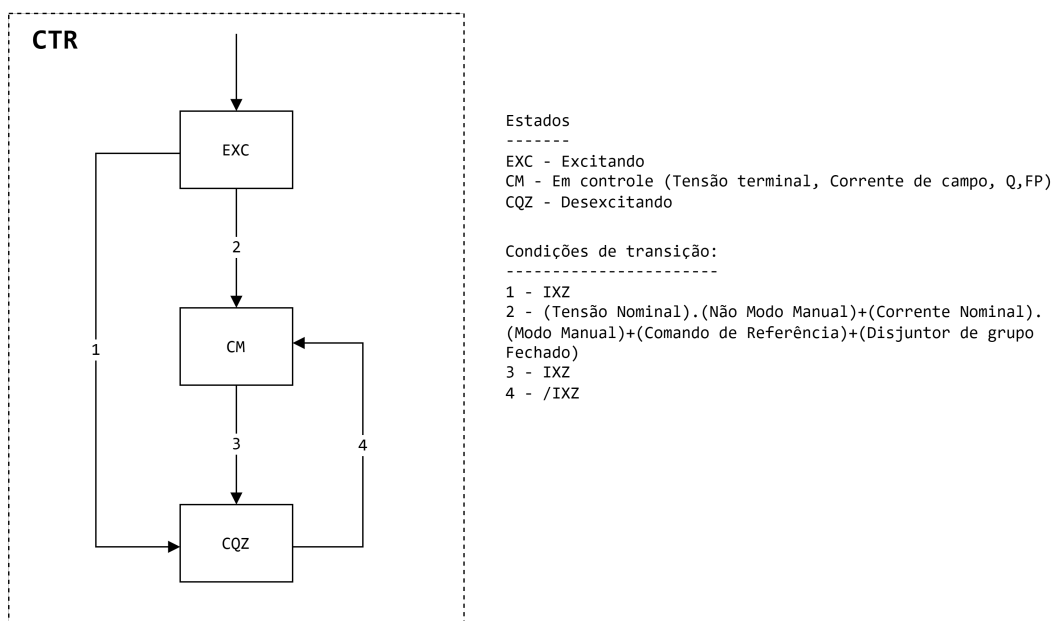
Fonte: Arquivo pessoal.

Quando o regulador está ativo e entra na máquina OPR, a sequência de operação passa a seguir as transições definidas por essa estrutura. A partir do estado inicial, caso o modo de malha aberta não esteja habilitado, o regulador inicia a etapa de pré-excitação, responsável por elevar a tensão terminal e a corrente de campo até as condições necessárias para a transição aos modos tradicionais de controle. Quando essas condições são alcançadas, o sistema passa ao estado CTR, no qual ficam disponíveis as malhas de controle utilizadas durante a operação normal. Caso o modo de malha aberta esteja habilitado, a sequência é direcionada ao estado OLC, utilizado para comandos de teste e ensaios. Tanto a partir de CTR quanto de OLC, o comando de desexcitação conduz o regulador aos estados associados à retirada de carga e à desexcitação, representados por CDZ, encerrando a operação dentro da máquina OPR.

O sinal proveniente dessa máquina de estados é relevante para a ativação do limitador, pois a solução proposta deve atuar apenas quando o regulador estiver em operação. Entretanto, essa condição ainda é ampla para a aplicação estudada, uma vez que o limitador não deve ser habilitado em todos os modos disponíveis dentro da operação normal. Por esse motivo, é necessário observar também a máquina de

estados CTR, apresentada na Figura 37, que define a transição para os modos de controle utilizados pelo regulador.

Figura 37 – Máquina de estados dos modos de controle



Fonte: Arquivo pessoal.

O estado inicial da máquina CTR corresponde à condição em que o regulador ainda está partindo a máquina (excitação inicial), a partir da sequência anterior. Quando são atingidos os valores nominais de tensão terminal ou de corrente de campo no modo de controle a vazio selecionado, ou quando ocorre o fechamento do disjuntor de grupo, a máquina habilita a estrutura CM, responsável pela definição dos modos de controle em operação. É nessa etapa que são tratados os modos manual, automático, controle de potência reativa e controle de fator de potência, conforme as condições internas e os comandos aplicados ao regulador.

Os sinais dessas máquinas de estados entram na lógica de ativação dos modos de controle. Neste trabalho, o modo de interesse é o controle de potência reativa, pois ele representa a condição de operação nominal do compensador síncrono considerada no desenvolvimento da solução. Assim, o sinal de modo de controle de reativos ativo, chamado de OPR_Q, foi utilizado como um dos permissivos de habilitação do limitador. Esse sinal garante que a função proposta não interfira na partida do regulador, nem em modos de controle que não fazem parte do escopo analisado, atuando apenas após a excitação inicial e durante a operação em controle de reativo.

Além dos modos de controle, a solução utiliza informações de estado operacional das pontes em arquiteturas de quatro quadrantes, permitindo identificar a condição de operação associada a cada sentido da corrente de campo. Como a solução atua nos dois sentidos da corrente de campo, foram implementadas duas malhas de limita-

ção: uma associada à corrente positiva e à ponte positiva, e outra associada à corrente negativa e à ponte negativa.

A habilitação de cada malha é condicionada à indicação da respectiva condição operacional, evitando atuações incompatíveis com a polaridade vigente ou durante transições entre pontes. Dessa forma, o limitador atua somente no sentido correspondente à condição de operação, permanecendo inibido nos demais casos.

Para permitir a comutação entre pontes, não foi necessário inserir sinais adicionais na máquina de estados existente, pois a estratégia adotada consiste em desabilitar o limitador no momento adequado, permitindo que as malhas de potência reativa e tensão terminal conduzam naturalmente o ponto de operação para uma condição que demande a ponte oposta. Quando essa condição é atingida, a máquina de estados de comutação executa sua sequência normal. Essa escolha preserva a lógica original de comutação, que já é validada em campo e opera de forma consolidada no regulador, reduzindo o risco de introduzir alterações em uma estrutura crítica de intertravamento.

Os diagramas apresentados e as condições de transição foram simplificados para preservar as lógicas internas do regulador e facilitar a compreensão da aplicação pelo leitor. Em cada máquina de estados existem lógicas adicionais de acionamento, intertravamento e verificação que tornam as transições seguras. Para o desenvolvimento da solução proposta, entretanto, não é necessário reproduzir todas essas condições internas, pois a lógica do limitador utiliza apenas os sinais já condicionados pelos estados das máquinas. Assim, os sinais OPR, OPR_Q, OPR_POS e OPR_NEG são suficientes para definir as principais permissões de atuação do limitador dentro da arquitetura do regulador.

5.3 LIMITADOR DE MÍNIMA CORRENTE DE CAMPO

A solução proposta para mitigar o apagamento das pontes de tiristores consiste na implementação de um limitador de mínima corrente de campo aplicado ao modo de controle de potência reativa em projetos com arquitetura de quatro quadrantes. A função foi desenvolvida para atuar tanto na ponte positiva quanto na ponte negativa, impedindo que a corrente de campo permaneça em uma região inferior à corrente de manutenção dos tiristores, sem bloquear a comutação de pontes quando essa transição for requerida pela operação do sistema.

A atuação do limitador desloca o ponto de operação quando a corrente de campo se aproxima da região crítica. Em condições de demanda constante, essa ação mantém a corrente em uma região segura e produz um novo equilíbrio entre tensão terminal e potência reativa. Entretanto, essa mesma característica introduz uma restrição adicional ao desenvolvimento da lógica, pois a comutação entre pontes depende da redução da corrente de campo até a região próxima de zero. Dessa forma, a solução não pode apenas limitar a corrente medida, pois também deve identificar

quando a referência de operação exige a transição para a ponte oposta. Para isso, a lógica final utiliza a corrente medida para ativar o limitador e uma corrente estimada com base no modelo fenomenológico caso não houvesse o limitador, para avaliar a possibilidade de retirada da limitação, permitindo que as malhas internas conduzam a comutação quando houver condição adequada.

A primeira etapa da solução corresponde à definição das condições de habilitação e atuação do limitador. A lógica de ativação é composta por comparadores de corrente de campo, temporização e permissivos provenientes das máquinas de estados descritas na seção anterior. Para a ponte positiva, a atuação ocorre quando a corrente de campo medida permanece abaixo do limiar configurado, considerando a histerese e o atraso de atuação. Essa condição pode ser representada por:

$$I_{fd} < I_{lim+} + H_{+}, \quad (8)$$

em que I_{fd} representa a corrente de campo medida, I_{lim+} representa o limiar de atuação da ponte positiva e H_{+} representa a histerese associada ao comparador. Para a ponte negativa, a lógica é equivalente, porém aplicada ao sentido oposto da corrente. Assim, a atuação ocorre quando a corrente de campo permanece acima do limiar negativo configurado, conforme:

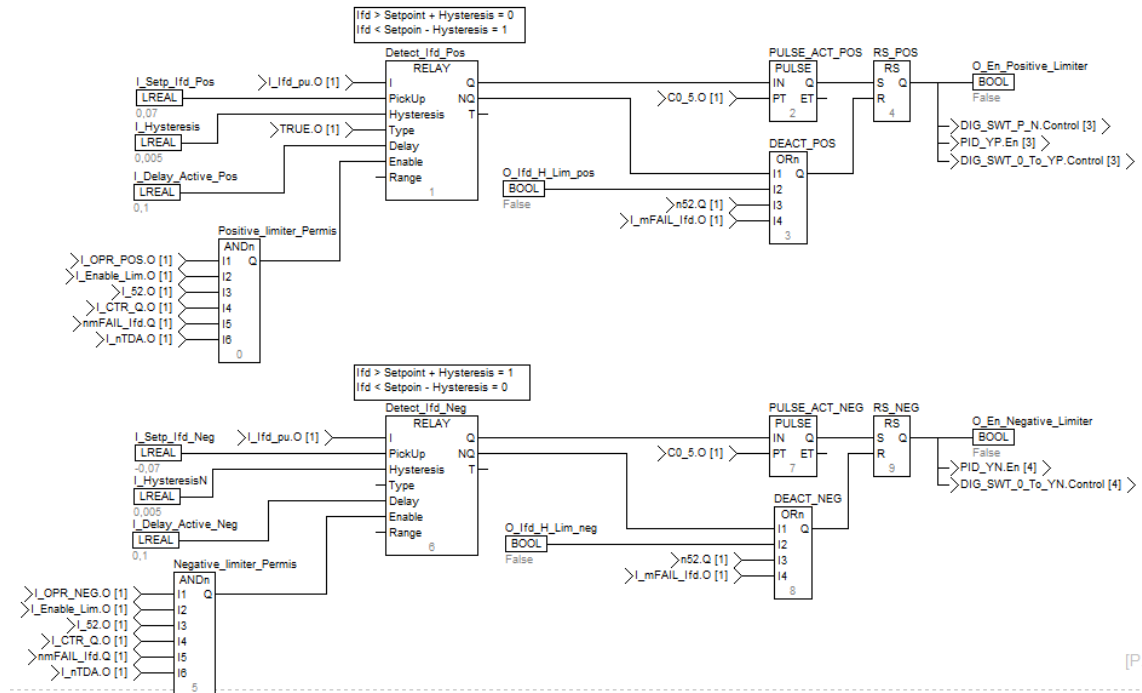
$$I_{fd} > I_{lim-} + H_{-}, \quad (9)$$

em que I_{lim-} representa o limiar de atuação da ponte negativa e H_{-} representa a histerese associada ao comparador desse sentido de corrente. Nos ensaios deste trabalho, foi adotado o valor de 0,07 pu como referência inicial de atuação, ajustável conforme as características do projeto e da ponte de tiristores, resultando em $I_{lim+} = 0,07$ pu e $I_{lim-} = -0,07$ pu.

A saída do comparador somente é considerada quando os permissivos de operação do limitador estão satisfeitos, garantindo que a máquina esteja sincronizada com a rede, com o disjuntor de grupo fechado, em modo de controle de potência reativa, sem falha de medição de corrente de campo e sem condição de teste que descaracterize a operação normal do regulador. Além disso, a atuação depende da habilitação da função pelo operador e do estado da ponte ativa. Assim, o limitador positivo atua apenas quando a ponte positiva está em operação nominal, enquanto o limitador negativo atua apenas com a ponte negativa. Quando essas condições são satisfeitas e o comparador permanece ativo por 100 ms, é gerado o comando de ativação do respectivo limitador. A estrutura de ativação implementada é apresentada na Figura 38.

O atraso de 100 ms foi inserido para que uma demanda transitória rápida possa conduzir o sistema à condição de comutação antes que o limitador assuma a ação de controle. Assim, o limitador atua preferencialmente sobre situações sustentadas de aproximação da região de apagamento, enquanto a comutação rápida permanece disponível para eventos associados à dinâmica da rede.

Figura 38 – Lógica de ativação do limitador



[P. 2]

Fonte: Arquivo pessoal.

Após a definição da lógica de ativação, foi implementada a malha de controle do limitador, composta por um controlador do tipo PI com parâmetros de ajustes de saturação de saída e de erro integral, tendo como variável de entrada o erro entre a corrente limite definida para atuação e a corrente de campo medida. Para a ponte positiva, o erro é definido por:

$$e_{lim+} = i_{lim+} - i_{fd}, \quad (10)$$

em que e_{lim+} representa o erro de limitação da ponte positiva. Com essa definição, o erro aumenta quando a corrente de campo fica abaixo do limite configurado, fazendo com que a ação do controlador atue no sentido de elevar a referência interna de tensão e afastar a corrente da região crítica. Para a ponte negativa, o erro e_{lim-} é análogo, porém aplicado ao sentido oposto da corrente, conforme:

$$e_{lim-} = i_{fd} - i_{lim-}. \quad (11)$$

A saída do controlador do limitador positivo, representada por Y_{POS} , pode ser expressa no domínio de Laplace, em função de E_{lim+} e da variável s , por:

$$Y_{POS}(s) = E_{lim+}(s) \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right), \quad (12)$$

em que K_P representa o ganho proporcional e K_I representa o ganho integral do controlador. Para suavizar a ação aplicada à referência interna de tensão e também a

transição para zero durante a desativação, a saída do controlador é submetida a uma função de primeira ordem, representada por G_f , dada por:

$$G_f(s) = \frac{1}{1 + sT_2}. \quad (13)$$

Assim, o sinal filtrado aplicado pelo limitador positivo pode ser representado pela Equação (14), em que T_2 é a constante de tempo do filtro.

$$Y_{\text{POS_FILT}}(s) = E_{\text{lim+}}(s) \left(\frac{sK_P + K_I}{s(1 + sT_2)} \right). \quad (14)$$

A ponte negativa utiliza a mesma estrutura de controle, com o erro definido pela Equação (11) e com o sinal de saída compatibilizado com o sentido de atuação da ponte ativa. Dessa forma, a malha positiva e a malha negativa possuem comportamento equivalente, mas atuam em regiões opostas da corrente de campo.

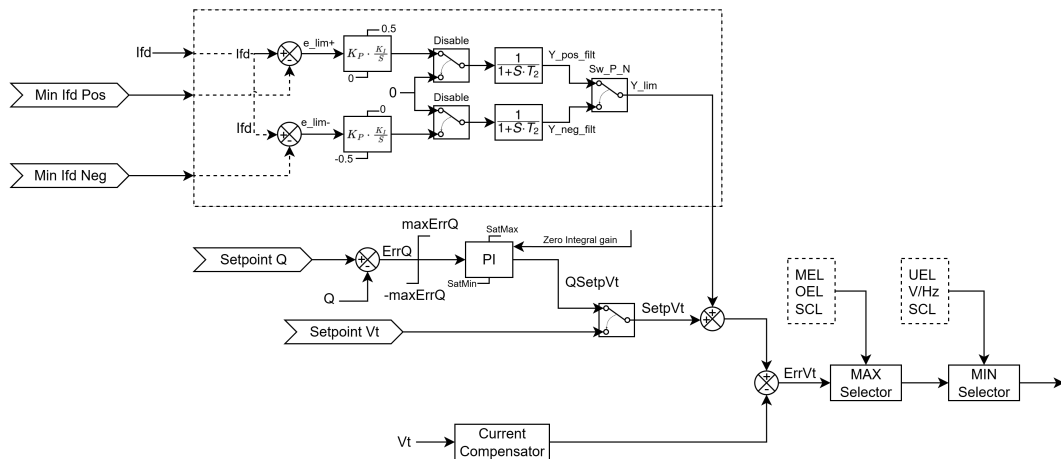
O controlador PI utilizado possui limites de saturação configuráveis tanto para o sinal de saída quanto para o termo integral. Na malha associada à ponte positiva, o sinal de saída é limitado entre 0 e +0,05, de modo que o limitador atue apenas no sentido de elevar a corrente de campo. Na malha associada à ponte negativa, o sinal de saída é limitado entre -0,05 e 0, fazendo com que sua atuação ocorra somente no sentido de reduzir a corrente de campo. O termo integral de ambas as malhas é limitado entre -0,5 e 0,5. Essa configuração restringe a atuação de cada malha ao sentido necessário para afastar a corrente de campo da região crítica, sem permitir que o controlador imponha uma limitação permanente independentemente da condição de operação.

O sinal produzido pelo limitador é somado à referência interna de tensão terminal proveniente da malha de potência reativa. Dessa forma, o limitador não substitui a malha principal de controle, mas acrescenta uma ação corretiva quando as condições de atuação são satisfeitas. A referência resultante, representada por V_{ref} , pode ser escrita por:

$$V_{\text{ref}} = Q_{\text{Setp_VT}} + Y_{\text{lim}}, \quad (15)$$

em que $Q_{\text{Setp_VT}}$ representa a referência interna de tensão gerada pela malha de potência reativa e Y_{lim} representa a ação corretiva produzida pelo limitador. Essa referência é subtraída da tensão terminal medida e compensada, em seguida, aplicada à estrutura dos limitadores tradicionais, sendo posteriormente utilizada pela malha interna de tensão terminal em cascata, conforme a arquitetura apresentada na Figura 39.

Figura 39 – Detalhamento da malha de controle do limitador



Fonte: Arquivo pessoal.

A primeira implementação do limitador permitiu manter a corrente de campo no valor definido para a ponte em operação, tanto no sentido positivo quanto no sentido negativo. Entretanto, a comutação entre pontes permanecia bloqueada quando o limitador fixava o ponto de operação, e em simulações executadas sem a restrição de tempo real, observou-se que a malha externa de potência reativa continuava integrando o erro durante a aplicação do limitador.

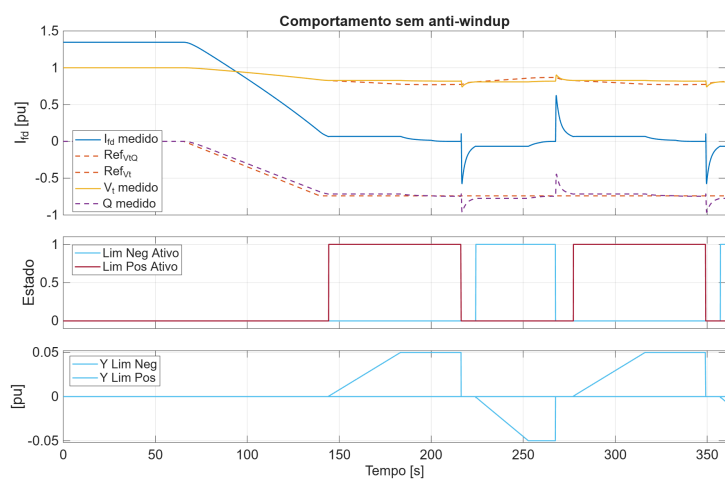
Esse comportamento levava ao crescimento gradual da ação integral da malha de potência reativa, que com o passar do tempo, superava a ação do limitador, conduzindo novamente a corrente de campo para a região crítica e provocando o apagamento da ponte. Quando a ponte apagava, o erro de controle aumentava de forma significativa e a ação de controle tendia a crescer até possibilitar a retomada de condução pela ponte oposta. Em seguida, a malha de reativo buscava retornar ao ponto de operação original, repetindo o processo.

Para evitar que a malha de potência reativa continue acumulando erro durante a operação do limitador, foi incorporada uma lógica de *anti-windup*, impedindo que este erro cresça, fazendo a malha de reativo não competir com o sinal do limitador. Para realizar essa função, foi utilizada a mesma estratégia empregada em outros limitadores do regulador, baseada na comutação do ganho integral para zero, conforme representado na Figura 29.

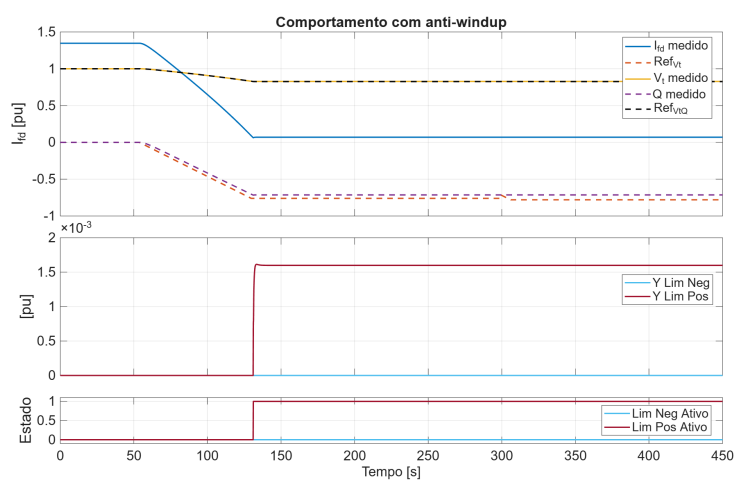
Na operação com a ponte positiva, o bloqueio do termo integral ocorre quando o limitador positivo está ativo e o erro de potência reativa indica que a malha externa reduziria a corrente de campo caso pudesse atingir livremente a referência. Na operação com a ponte negativa, a condição é invertida, mantendo a coerência com o sentido oposto da corrente. Com essa estratégia, a malha de potência reativa deixa de competir com o limitador durante a limitação, e o ponto de operação pode permanecer na região segura sem saturação da ação integral. A comparação entre os comportamentos do

controle com e sem a estratégia de *anti-windup* é apresentada na Figura 40.

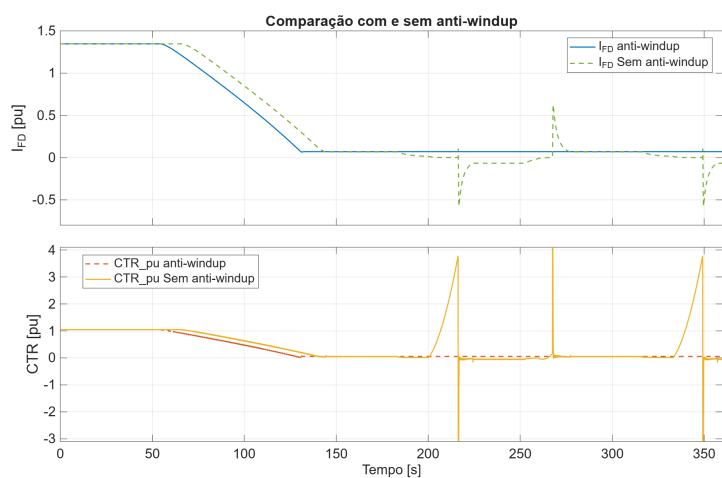
Figura 40 – Comparações do controle com e sem *anti-windup*



(a) Controle sem *anti-windup*.



(b) Controle com *anti-windup*.



(c) Comparação entre os controles.

Fonte: Arquivo pessoal.

Após a definição do limitador nos dois sentidos da corrente e da lógica de *anti-windup*, a etapa seguinte consistiu em coordenar a atuação do limitador com a comutação entre pontes. A limitação individual preserva a condução da ponte ativa, mas, se aplicada de forma isolada, pode impedir a inversão de corrente. Para resolver esse problema, foi adotada uma estratégia de estimação da corrente de campo esperada a partir da referência de potência reativa. A lógica parte da premissa de que, se a corrente estimada sem a ação do limitador estiver em uma região segura para a ponte oposta, o limitador pode ser desabilitado e a malha de potência reativa pode retomar a integração, conduzindo naturalmente o sistema para a condição de comutação.

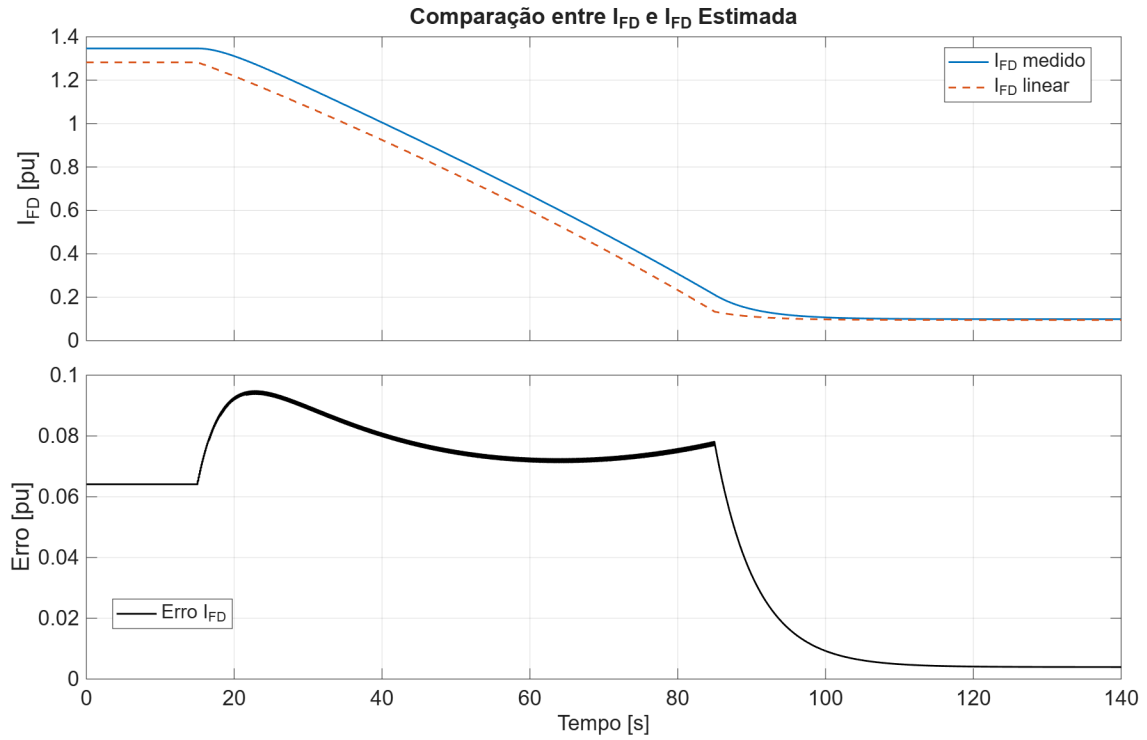
A estimação da corrente de campo não é direta, pois depende dos parâmetros da máquina síncrona e de grandezas acopladas, como tensão terminal e potência reativa. Como primeira aproximação, foi adotado um modelo linear válido para a região próxima de corrente nula, na qual o comportamento magnético da máquina é menos influenciado pela saturação. Nessa aproximação, a corrente de campo estimada é calculada por:

$$I_{fd,lin} = \frac{1}{X_{ad}} \left(V_t + \frac{Q_{ref} X_d}{V_t} \right), \quad (16)$$

em que $I_{fd,lin}$ representa a corrente de campo estimada pelo modelo linear, X_{ad} representa a reatância mútua associada ao eixo direto, X_d representa a reatância síncrona de eixo direto, V_t representa a tensão terminal e Q_{ref} representa a referência de potência reativa. Essa estimativa fornece uma relação inicial entre a referência de reativo e a corrente de campo esperada, permitindo avaliar a tendência do ponto de operação quando a limitação deixa de atuar.

Para avaliar o comportamento dessa primeira aproximação, a Figura 41 apresenta, no gráfico superior, a comparação entre a corrente de campo medida e a estimada pelo modelo linear e, no gráfico inferior, o erro entre esses sinais. Com a aplicação de referências distintas de potência reativa, observa-se que o erro de estimação se torna mais significativo à medida que a corrente de campo se afasta da região de zero. Quando a corrente de campo atingiu 1,346 pu, o erro aproximou-se de 0,0641 pu. Já para uma corrente de 0,105 pu, o erro aproximou-se de 0,0082 pu. Esse resultado indica que o modelo linear apresenta maior aderência à corrente medida na região de ocorrência do apagamento das pontes.

Figura 41 – Comparação entre corrente de campo medida e estimada pelo modelo linear



Fonte: Arquivo pessoal.

Para melhorar a estimativa, foi incorporado o efeito da saturação magnética da máquina, considerando a corrente de campo como soma de uma componente linear e de uma componente associada à saturação, conforme a modelagem usual da curva de magnetização de máquinas síncronas. A componente de saturação foi calculada a partir da tensão de entreferro estimada, conforme:

$$I_{\text{sat}} = V_{\text{gap}} A_g e^{B_g (V_{\text{gap}} - 1)}, \quad (17)$$

em que I_{sat} representa a corrente equivalente de saturação, V_{gap} representa a tensão de entreferro estimada e A_g e B_g são coeficientes associados à curva de saturação da máquina. A tensão de entreferro foi aproximada por:

$$V_{\text{gap}} \approx V_t + \frac{Q_{\text{ref}}}{V_t} X_l, \quad (18)$$

em que X_l representa a reatância de dispersão considerada na aproximação. Substituindo a estimativa de V_{gap} na expressão da saturação, obtém-se:

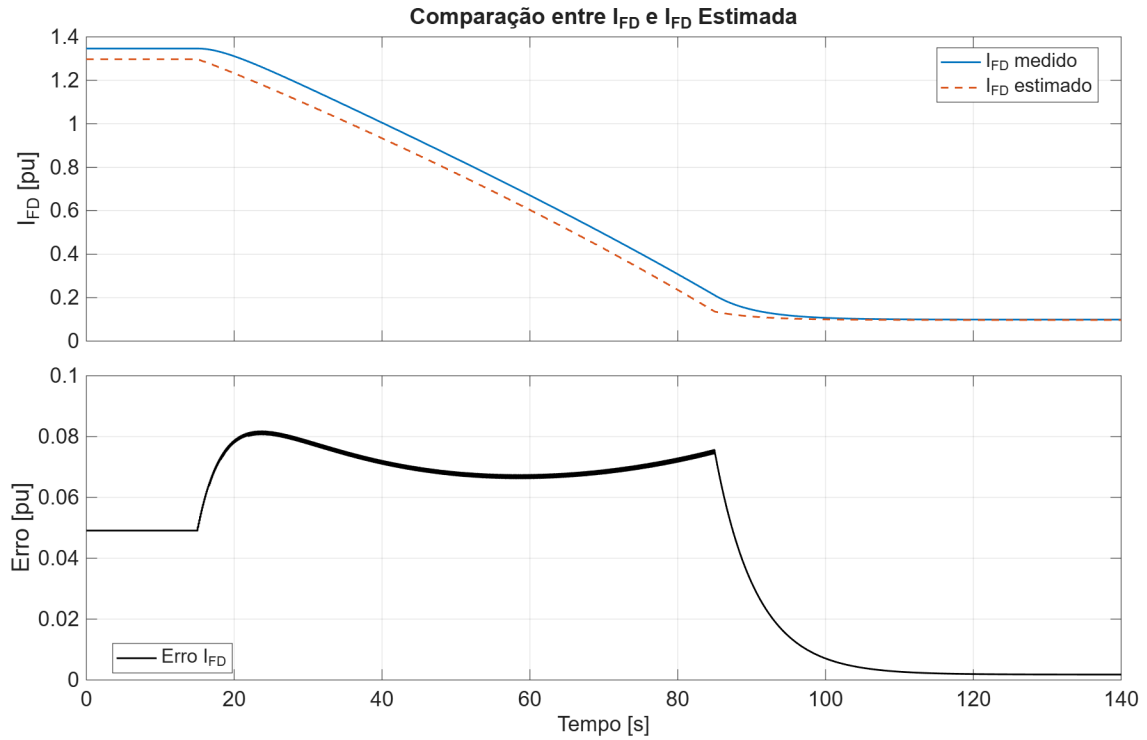
$$I_{\text{sat}} = \left(V_t + \frac{Q_{\text{ref}}}{V_t} X_l \right) A_g e^{B_g \left(V_t + \frac{Q_{\text{ref}}}{V_t} X_l - 1 \right)}. \quad (19)$$

A corrente de campo estimada, representada por $I_{\text{fd,est}}$, passa então a ser dada por:

$$I_{fd,est} = I_{fd,lin} + I_{sat}. \quad (20)$$

Observando o erro em simulação demonstrado na Figura 42, foi constatada uma melhoria aproximada de 23% em relação à estimação anterior.

Figura 42 – Comparação entre corrente de campo medida e estimada com saturação



Fonte: Arquivo pessoal.

Esse modelo de estimação de corrente se mostrou eficiente para o propósito utilizado, porém ainda limitado para estimar a corrente quando o limitador está atuado. Foi acrescentada uma estimativa simplificada da tensão terminal esperada sem o limitador, pois durante sua atuação, os valores de Q e V_t são influenciados pela limitação de corrente. Nas Equações (16), (18) e (19), a referência de potência reativa já é utilizada no lugar da potência reativa medida, mas a tensão terminal ainda corresponde ao valor instantâneo medido. Como essa tensão não representa necessariamente o valor que seria obtido após a retirada da limitação, foi adotada uma aproximação para a tensão terminal predita.

A aproximação considera a diferença entre a referência de potência reativa e a potência reativa medida, ponderada por uma reatância equivalente do sistema. A tensão terminal predita é calculada por:

$$V_{pred} = V_{t,med} + \left(\frac{Q_{ref} - Q_{med}}{V_{t,med}} \right) X_e, \quad (21)$$

em que V_{pred} representa a tensão terminal predita, $V_{t,\text{med}}$ representa a tensão terminal medida, Q_{med} representa a potência reativa medida e X_e representa a reatância equivalente utilizada na aproximação. Essa expressão não substitui um modelo completo da máquina e do sistema elétrico, mas permite corrigir parte da distorção introduzida pelo uso direto da tensão terminal medida durante a atuação do limitador.

Substituindo V_t por V_{pred} nas Equações (16) e (19), obtém-se a expressão final utilizada para a estimação da corrente de campo na lógica de comutação:

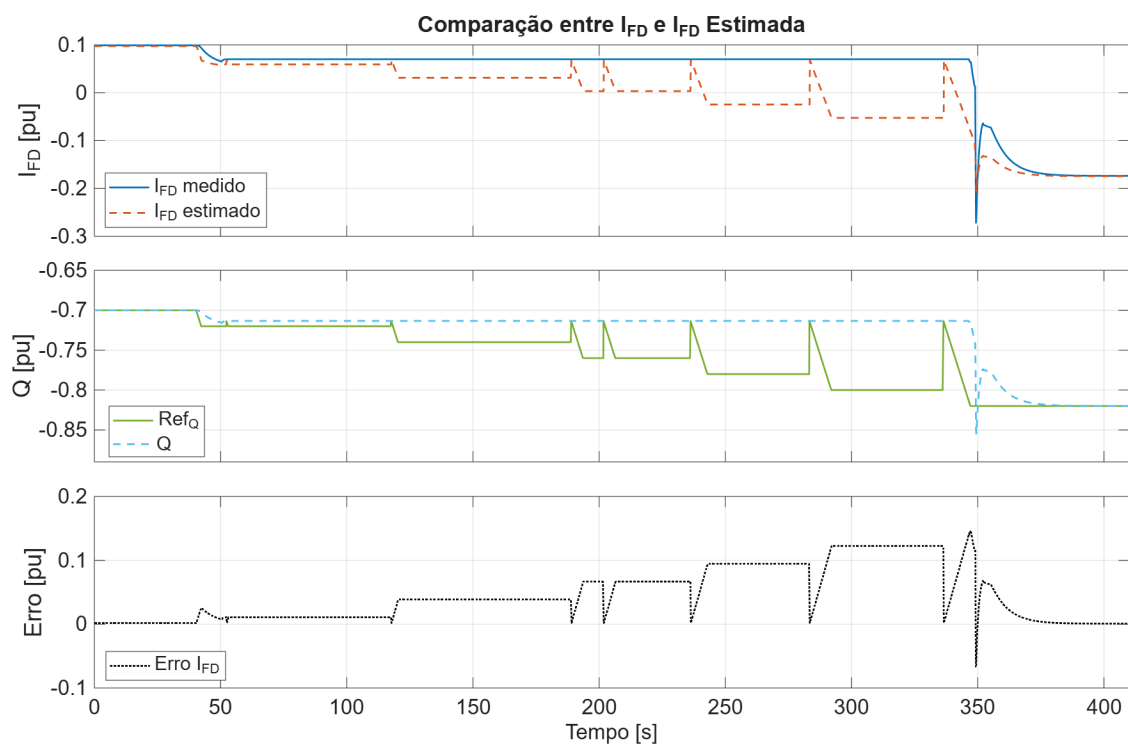
$$I_{fd,\text{est}} = \frac{1}{X_{ad}} \left(V_{\text{pred}} + \frac{Q_{\text{ref}} X_d}{V_{\text{pred}}} \right) + \left(V_{\text{pred}} + \frac{Q_{\text{ref}}}{V_{\text{pred}}} X_l \right) A_g e^{B_g \left(V_{\text{pred}} + \frac{Q_{\text{ref}}}{V_{\text{pred}}} X_l - 1 \right)}. \quad (22)$$

Com essa formulação, a estimativa passou a representar melhor a tendência da corrente de campo após a retirada da limitação, afirmação essa que pode ser confirmada ao simular as duas formas de estimação. Nas Figuras 43 e 44, é mostrado um comportamento bastante semelhante entre a estimação e a tensão instantânea conforme degraus de referência de reativo eram aplicados durante atuação do limitador. Entretanto a melhoria é percebida quando observado o tempo em que ocorre a comutação e comparadas a corrente de campo e a potência reativa após a comutação da ponte. No caso da corrente, no primeiro caso assentou em $-0,174$ pu e no segundo caso em $-0,125$ pu, para potência reativa $-0,82$ pu e $-0,79$ pu. O erro permaneceu dependente da aproximação de V_t e dos parâmetros da máquina, o que indica que modelos mais completos ou estratégias de identificação poderiam melhorar a precisão da lógica em aplicações futuras.

A estimativa corrigida pela componente de saturação e pela tensão terminal predita apresentou o melhor desempenho entre as alternativas avaliadas. Com essa formulação, a corrente estimada se aproximou da condição real observada após a retirada do limitador, reduzindo o deslocamento necessário nos relés de corrente estimada para garantir a liberação da comutação entre limitadores e pontes. A partir desse resultado, a lógica final passou a ativar o limitador com base na corrente medida, preservando a leitura direta da condição de condução da ponte ativa, e a avaliar sua retirada por meio da corrente estimada, que representa a tendência esperada do sistema quando a malha de potência reativa volta a atuar livremente.

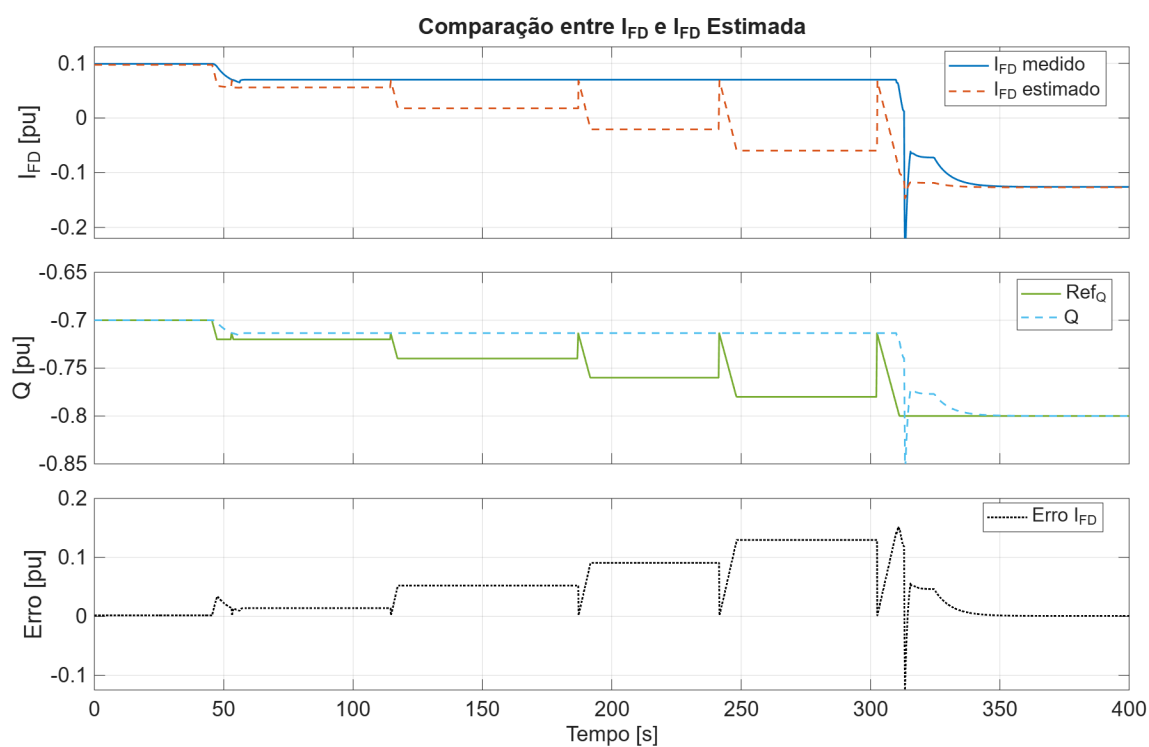
O diagrama disposto na Figura 45 representa de forma simplificada o limitador completo, combinando os cálculos de estimação com as lógicas de ativação e desativação, bem como as conexões principais da malha de controle e estratégia *anti-windup*. A estrutura real, com as conexões e blocos utilizados está disponível no Apêndice A.

Figura 43 – Comparação do modelo com tensão instantânea



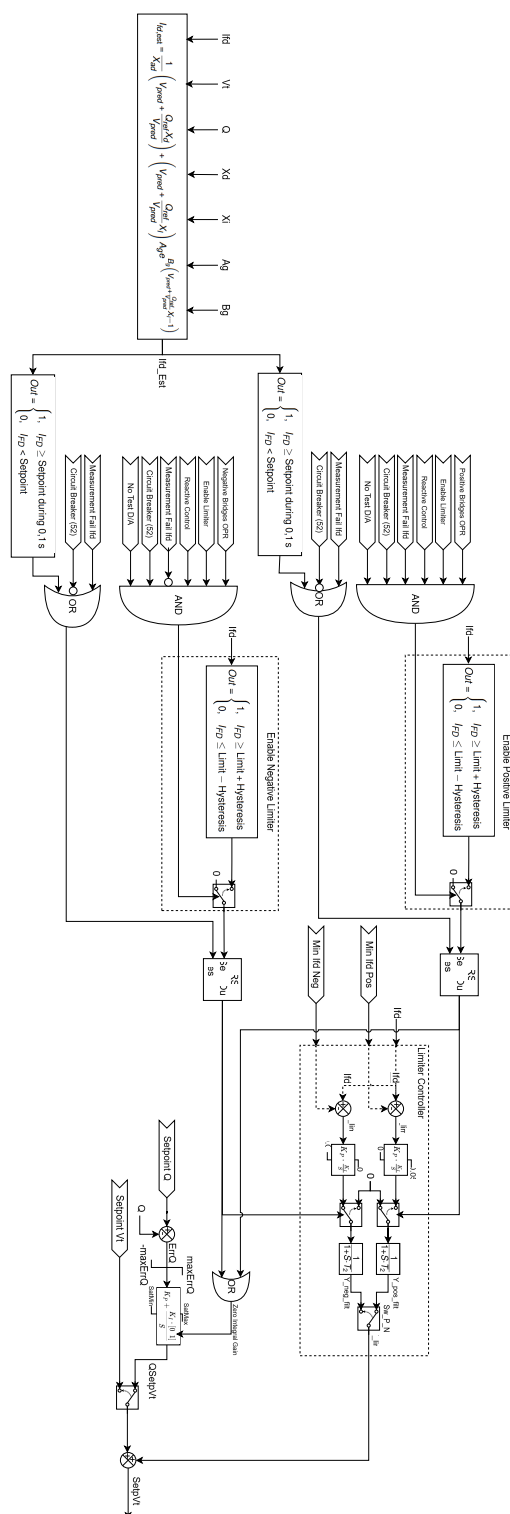
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 44 – Comparação do modelo com tensão estimada



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 45 – Estrutura completa do limitador



Fonte: Arquivo pessoal.

Com essa estrutura, o regulador passa a dispor de uma função complementar aos limitadores tradicionais, voltada especificamente à preservação da condução dos tiristores em regiões próximas da corrente nula. A validação da atuação do limitador, bem como a análise de suas limitações, é apresentada no Capítulo 6.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

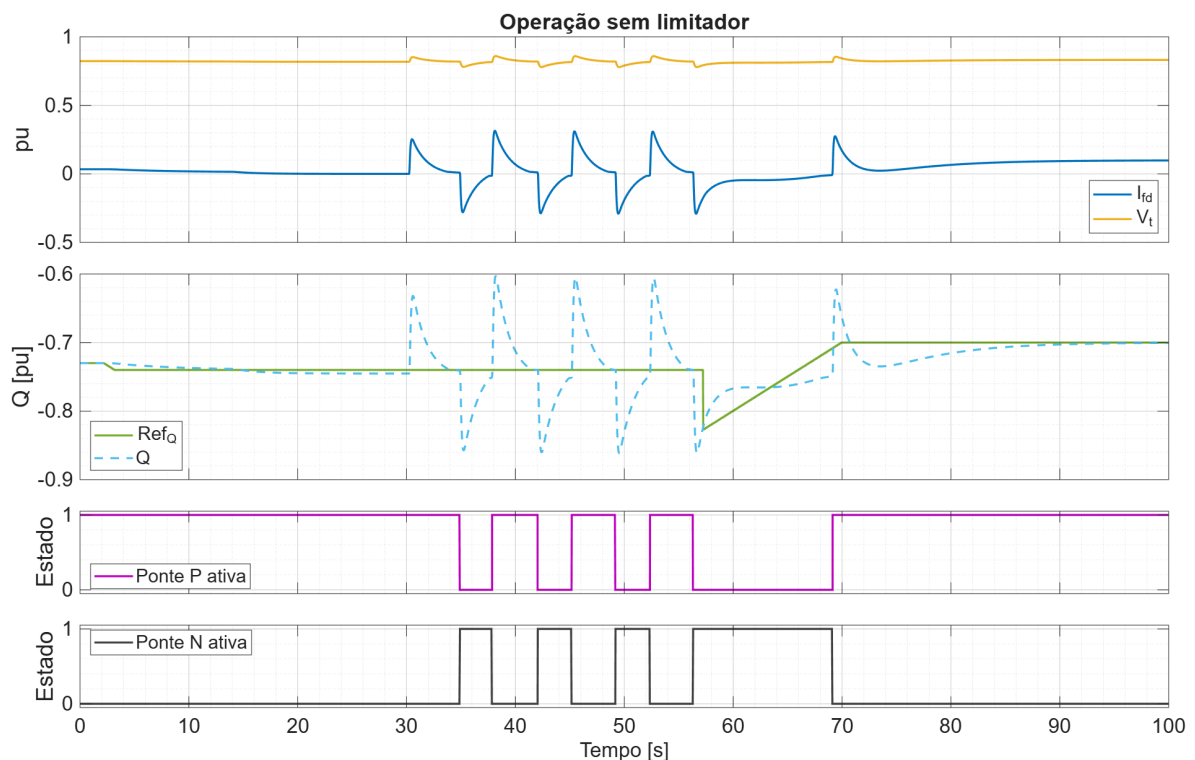
Neste capítulo, são demonstrados os resultados obtidos nas simulações realizadas durante o desenvolvimento e os testes do limitador, bem como sua aplicabilidade em cenários reais. As simulações concentram-se na operação do regulador em diferentes casos.

6.1 SIMULAÇÕES

Para justificar o trabalho realizado no estudo e no desenvolvimento do limitador, foi necessário simular o regulador próximo ao limiar de corrente de manutenção, a fim de verificar se o problema de fato ocorre, compreender como o sistema reage nesse ponto de operação e identificar quais variáveis impactam seu funcionamento.

A Figura 46 apresenta a simulação realizada nas condições originais de operação do regulador, sem a adoção da estratégia de limitação proposta neste trabalho. Nessa condição, o apagamento das pontes ocorre de forma indevida. Além disso, caso o ponto de operação desejado esteja dentro da região de apagamento, o sistema entra em ciclo, comutando as pontes até que a referência seja alterada para fora dessa região.

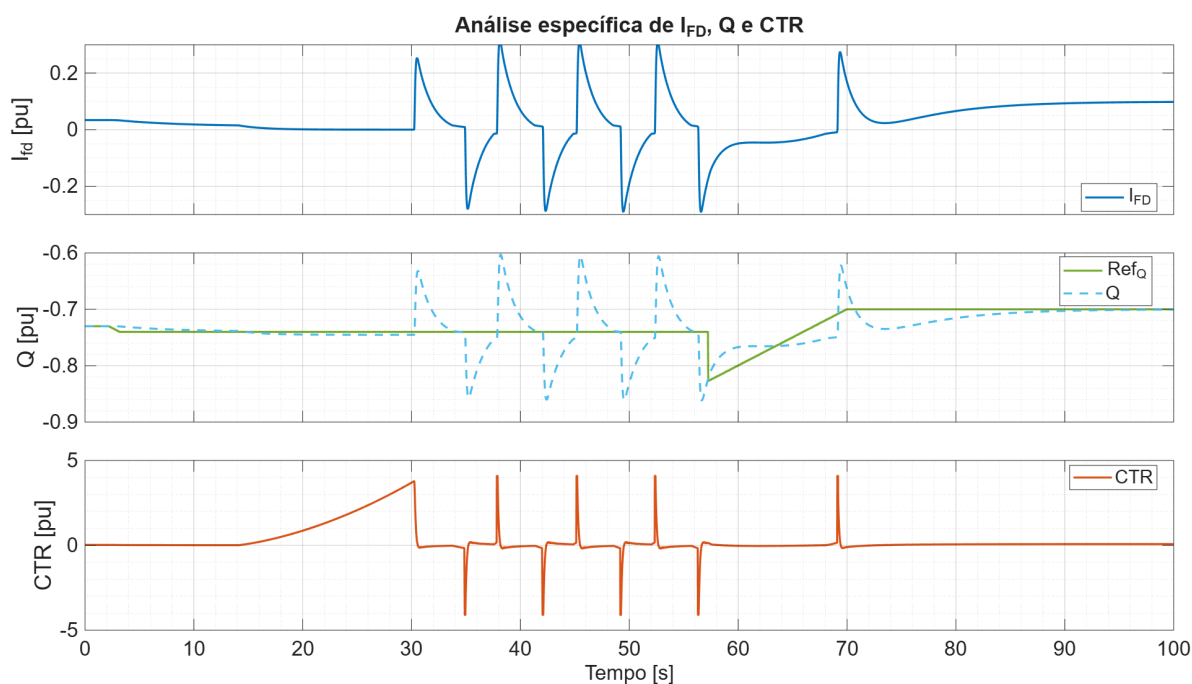
Figura 46 – Operação sem limitador



Fonte: Arquivo pessoal.

Além disso, ao observar o comportamento com mais detalhes, verifica-se a elevação da ação de controle quando o apagamento ocorre, na tentativa de reativar a ponte e conduzir o sistema até a referência desejada. Conforme previsto nos capítulos anteriores, esse comportamento é visualizado na Figura 47 e prova que o tempo para retorno da operação pode levar muitos segundos.

Figura 47 – Operação sem limitador - Detalhes

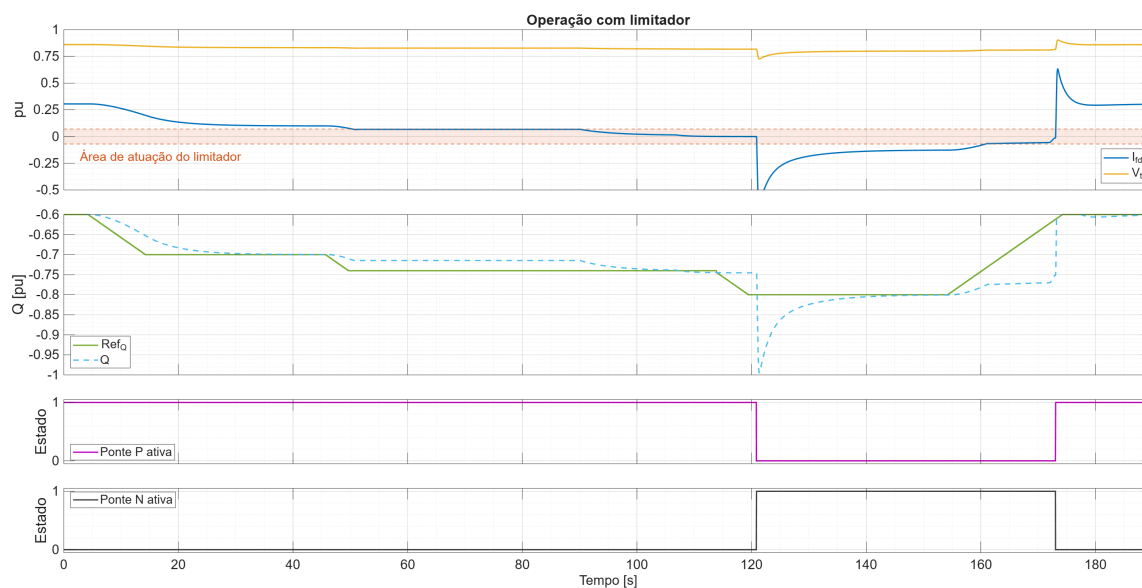


Fonte: Arquivo pessoal.

Como essa elevação da ação de controle ocorre a ponto de acionar novamente a ponte, o sistema é levado para fora do ponto de operação, caracterizando um sobressinal. Dessa forma, o regulador tenta retornar novamente ao ponto de operação, levando à comutação das pontes, e o ciclo se repete. Assim, o limitador desenvolvido neste trabalho mostra-se necessário nesse cenário. A primeira abordagem pode ser visualizada na Figura 48, na qual foi aplicada apenas a malha de controle com as condições de acionamento, sem a predição da corrente com o uso de relés para retirada do limitador e sem a aplicação da técnica de *anti-windup*.

Observa-se que o limitador consegue manter a corrente fora da região de apagamento quando esta se aproxima da área de atuação. Entretanto, ao alterar a referência de reativo para valores que exigiriam a comutação ($\approx 0,8$ pu), o limitador continua atuando, bloqueando a comutação e permitindo-a apenas quando a corrente cai a ponto de desligar a ponte e, conseqüentemente, desativar o limitador.

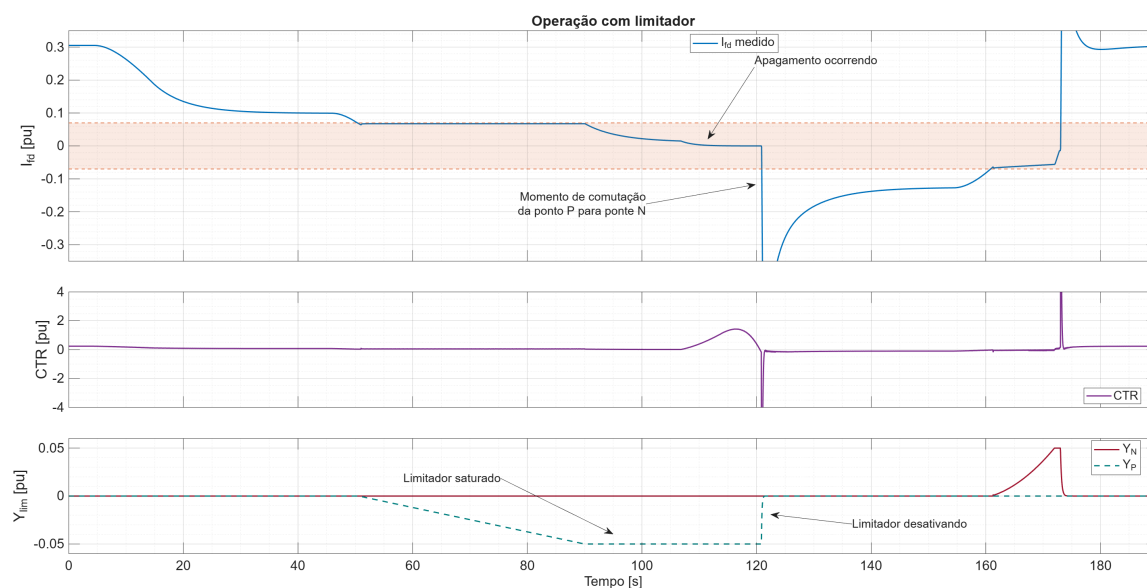
Figura 48 – Operação com limitador sem lógica de relés para desativar



Fonte: Arquivo pessoal.

Esse cenário é melhor compreendido na Figura 49, na qual fica clara a ação de controle do limitador indo a zero em razão da desativação provocada pela perda do estado da ponte positiva em operação.

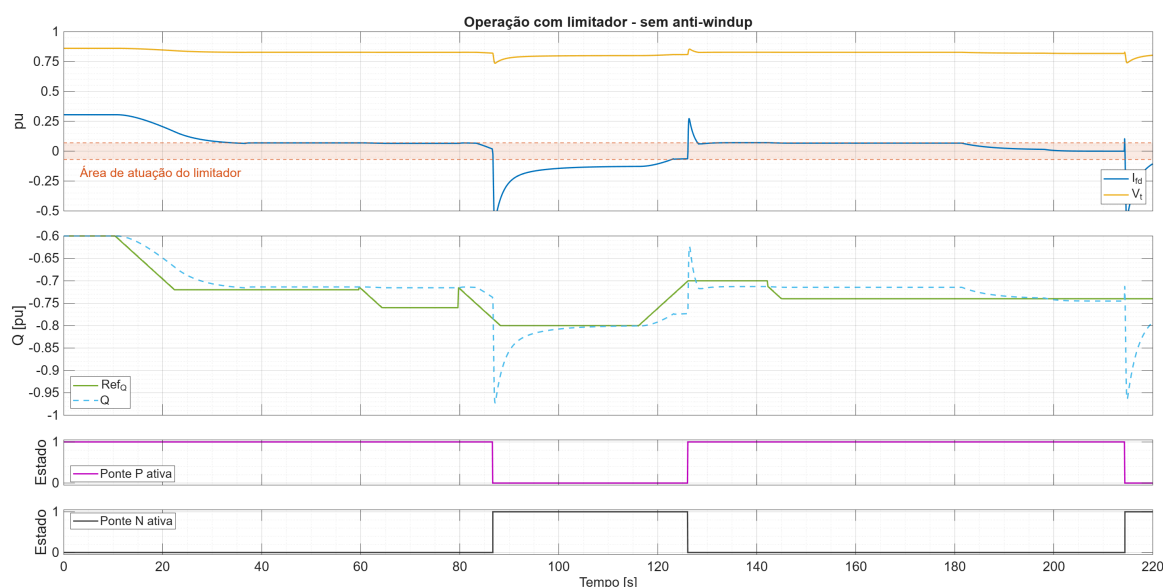
Figura 49 – Operação com limitador sem lógica de relés para desativar - Detalhes



Fonte: Arquivo pessoal.

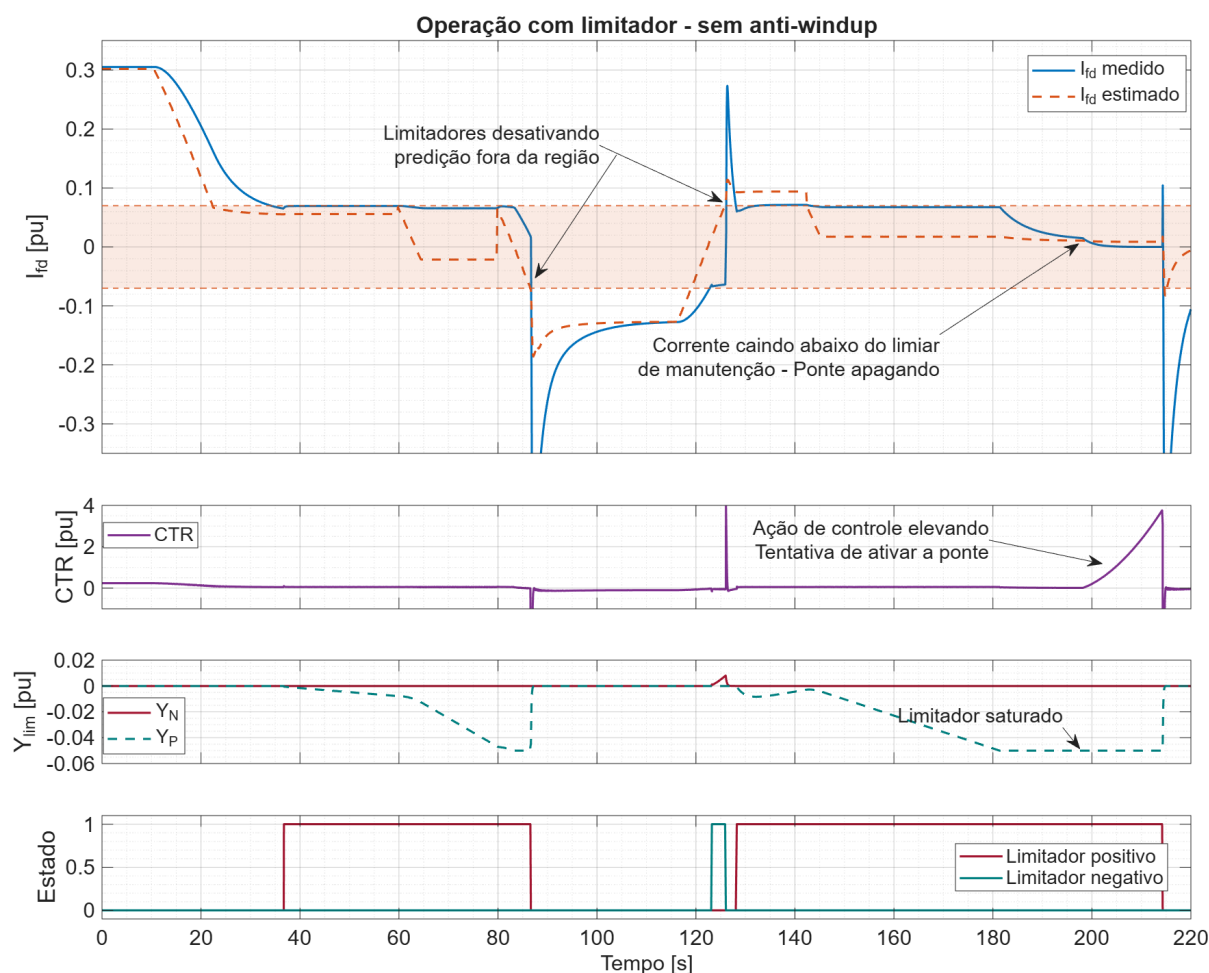
Com a inclusão da lógica de desativação dos limitadores por meio da predição da corrente, o limitador passou a deixar de atuar quando identificava que o ponto de operação estaria fora da região de apagamento, levando ao comportamento observado na Figura 50, o que já traz uma pequena melhoria ao modelo utilizado anteriormente.

Figura 50 – Operação com limitador sem *anti-windup*



Fonte: Arquivo pessoal.

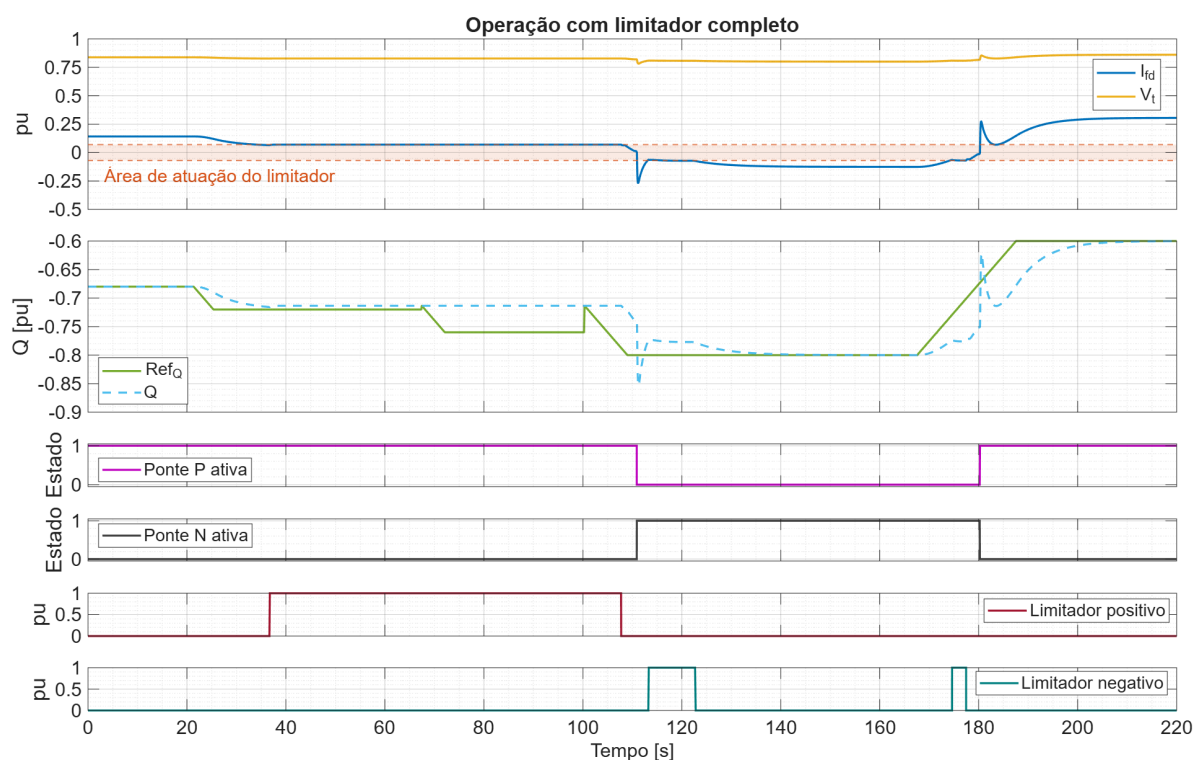
A predição da corrente, apresentada com mais detalhes na Figura 51, mostra que o limitador deixou de atuar em um momento no qual o sistema sem o limitador seria levado a um ponto de operação em que a corrente estaria fora da região de apagamento. Porém, quando o ponto de operação desejado está dentro da região de atuação, o limitador permanece forçando a ação de controle a elevar ou reduzir a corrente para sair dessa área. Com o passar do tempo, a malha satura, deixando de interferir no valor de atuação das malhas principais e levando novamente ao apagamento indevido.

Figura 51 – Operação com limitador sem *anti-windup* - Detalhes

Fonte: Arquivo pessoal.

Por fim, ao unir a malha do limitador com a predição de corrente de campo e a estratégia *anti-windup*, obtém-se o limitador completo. A Figura 52 demonstra o comportamento geral do limitador desenvolvido como solução final, sendo perceptível a capacidade de limitação da corrente de campo sem que ocorra a saturação da malha de controle, até que a região de operação desejada seja afastada da região de atuação ou, ainda, até que o limitador seja desativado quando a estimativa da corrente de campo ultrapassa esse limiar.

Figura 52 – Operação com limitador completo



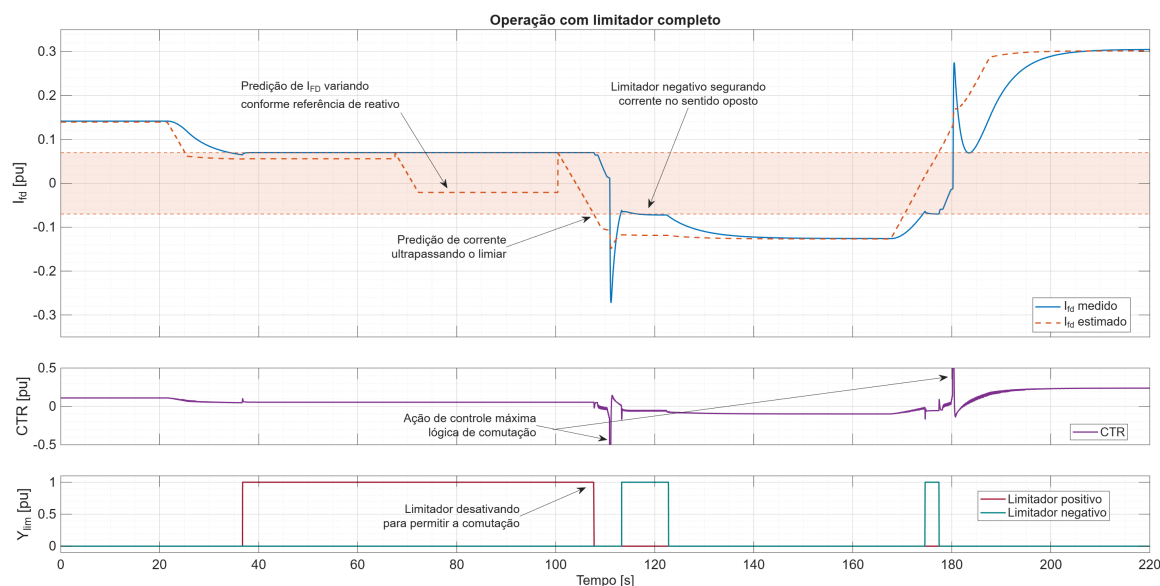
Fonte: Arquivo pessoal.

Com o limitador atuando, a referência de potência reativa foi alterada, modificando também o valor da corrente de campo estimada. O intervalo entre 100 s e 120 s da simulação apresentada na Figura 53 mostra que o limitador deixa de atuar antes da comutação de pontes, no momento em que a corrente estimada cruza o valor limite. Dessa forma, as malhas de controle de Q e V_t conduzem naturalmente a comutação da ponte positiva para a negativa. A corrente estimada cruza o limiar enquanto a referência de reativo está em rampa, de modo que, ao comutar a ponte, as correntes alcançam valores compatíveis e se afastam do limiar.

Outro comportamento observado é a atuação do limitador na retomada de controle após a comutação. Após a ativação da ponte negativa pela elevada ação de controle aplicada, o regulador tenta retornar rapidamente ao ponto de operação, o que causaria os sobressinais observados nas simulações iniciais. Porém, ao atingir o limiar negativo de corrente de campo, o regulador atenua o sinal, fazendo com que a potência reativa retome a referência de forma suave.

Os resultados das simulações foram suficientes para demonstrar que o limitador é funcional, restando avaliar sua aplicabilidade, discutida na Seção 6.2.

Figura 53 – Operação com limitador completo - Detalhes



Fonte: Arquivo pessoal.

6.2 APLICABILIDADE

A aplicação prática do limitador desenvolvido em reguladores comerciais apresenta limitações relevantes, sendo a principal delas a dependência de parâmetros construtivos da máquina síncrona, necessários para a estimação da corrente de campo utilizada na lógica de liberação da comutação entre pontes.

A estratégia de comutação proposta fundamentou-se na estimação da corrente de campo (I_{fd}) a partir da referência de potência reativa, dos valores atuais de tensão e de parâmetros da máquina. Conforme apresentado no Capítulo 5, o modelo matemático empregado depende de grandezas como a reatância mútua associada ao eixo direto (X_{ad}), a reatância de dispersão considerada na aproximação (X_l), a reatância equivalente do sistema (X_e) e os coeficientes da curva de saturação em vazio. Esses parâmetros são fundamentais para que a corrente estimada represente adequadamente os valores de corrente que seriam obtidos caso o limitador não estivesse atuando.

Em fornecimentos comerciais de reguladores, não é comum que os dados das máquinas síncronas sejam disponibilizados com precisão suficiente para o modelo desenvolvido, sendo necessária a obtenção desses parâmetros por outros meios. Isso é tecnicamente possível durante a etapa de comissionamento, por meio de ensaios de identificação de sistemas e de validação de parâmetros, conforme as práticas descritas em IEEE (2019).

No entanto, a realização desses ensaios aumenta o tempo de comissionamento e, conseqüentemente, eleva os custos do projeto. Considerando que o fenômeno de

apagamento das pontes ocorre em uma região operacional muito específica, associada à baixa corrente de campo e à transição entre quadrantes, o custo adicional para obter os parâmetros necessários torna a solução pouco atrativa em aplicações reais.

Para viabilizar a aplicação comercial desse limitador, trabalhos futuros poderiam investigar métodos de detecção para comutação que independam de parâmetros da máquina difíceis de obter. Alternativas promissoras incluem o uso de observadores de estados adaptativos ou a correlação da condição de comutação com variáveis diretamente monitoráveis e de dinâmica rápida, como a derivada da tensão terminal (dV_t/dt) ou o erro integral da malha de potência reativa, eliminando a necessidade de modelagem complexa do gerador.

No cenário comercial atual, a mitigação do fenômeno de apagamento de pontes baseia-se predominantemente em alterações de hardware, como o redimensionamento de componentes físicos para reduzir a probabilidade de extinção da corrente, a inclusão de resistores ou a imposição de restrições operacionais. Esta última abordagem, ao configurar os limitadores clássicos para evitar as regiões de instabilidade, reduz o aproveitamento da faixa operacional da máquina. Consequentemente, a máquina pode operar em condição de subutilização de sua capacidade de absorção de reativos quando comparada à região de operação estendida que seria viabilizada pelo limitador proposto neste trabalho. É importante salientar que o uso dos limitadores clássicos ajustados de forma a reduzir o apagamento das pontes não impede que elas comutem, o que torna o sistema funcional; entretanto, os limitadores passam a atuar fora de sua função principal, deixando de cumprir plenamente aquilo para o qual foram projetados.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu e avaliou uma estratégia de controle para mitigar o apagamento de pontes de tiristores em compensadores síncronos operando próximos à corrente de campo nula. O estudo partiu da análise do sistema de excitação estática em quatro quadrantes, das características de condução dos tiristores e dos efeitos produzidos pela perda de condução das pontes durante a operação em baixa corrente.

A solução proposta consistiu na implementação de um limitador de mínima corrente de campo, aplicável no sentido positivo e negativo da corrente, sendo estruturado para atuar sobre a referência da malha de tensão terminal para impedir que a corrente de campo se aproxime do valor de manutenção, preservando a condução da ponte ativa, utilizando como critério de desativação sinais de sincronismo e falha, bem como a verificação de uma condução segura utilizando a estimativa da corrente de campo. Também foi incorporada uma estratégia de *anti-windup*, necessária para impedir que a malha externa de potência reativa integrasse o erro indefinidamente, saturando o controlador e levando a operação ao apagamento das pontes.

As simulações realizadas demonstraram que, sem a solução proposta, o regulador pode operar em ciclo de apagamento e retomada de condução quando a referência conduz a corrente de campo para a região crítica. As implementações parciais do limitador mostraram que a limitação direta da corrente medida não é suficiente para garantir a comutação controlada entre pontes, especialmente quando a malha de potência reativa permanece integrando erro. Com a estrutura completa, o limitador manteve a corrente de campo fora da região de apagamento, impediu a saturação da ação de controle e permitiu a retirada da limitação quando a corrente estimada indicou condição segura para a ponte oposta.

Dessa forma, o objetivo técnico do trabalho foi atendido em ambiente de simulação. A estratégia desenvolvida mostrou-se funcional para preservar a condução dos tiristores em baixa corrente e a comutação entre pontes positiva e negativa. Entretanto, a análise de aplicabilidade indicou que a solução, em sua forma atual, apresenta limitações para uso comercial direto, pois depende de parâmetros da máquina síncrona que nem sempre estão disponíveis com precisão suficiente em projetos reais, exigindo ensaios que elevam o tempo e o custo de projeto.

Conclui-se, portanto, que a solução proposta é funcional no ambiente de simulação adotado, mas possui aplicabilidade prática limitada sem métodos adicionais de identificação ou estimação. Trabalhos futuros poderiam consistir no estudo de estratégias de liberação de comutação menos dependentes de parâmetros construtivos da máquina, utilizando variáveis diretamente monitoráveis pelo regulador ou métodos adaptativos capazes de reduzir a necessidade de ensaios específicos durante o comissionamento.

REFERÊNCIAS

ABDEL-RAZEK, A. A.; POLOUJADOFF, M. Analytical Approach to the Operation of a Synchronous Machine Associated with a Thyristor Bridge. **Electric Machines and Power Systems**, v. 2, 1978.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2024**: Ano base 2023. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 14 jun. 2026.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GIOSIO, Dean R.; HENDERSON, Alan D.; WALKER, Jessica M.; BRANDNER, Paul A. **Rapid Reserve Generation from a Francis Turbine for System Frequency Control**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/496>. Acesso em: 27 jun. 2026.

IEEE STD 1110. **IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Parameter Verification with Applications in Power System Stability Analyses**. New York, 2019. Revision of IEEE Std 1110-2002.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 421.5-2016**: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. New York, 2016.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. **Guide on the Assessment, Specification and Design of Synchronous Condenser for Power System with Predominance of Low or Zero Inertia Generators**. Paris, 2022. Technical Brochure 885. Disponível em: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/885-guide-on-the-assessment-specification-and-design-of-synchronous-condenser-for-power-system-with-predominance-of-low-or-zero-inertia-generators.html>. Acesso em: 14 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. Paris, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 14 jun. 2026.

KUNDUR, Prabha. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

MODBUS ORGANIZATION. **MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide**. 1.0b. [S.l.], 2006. Disponível em: <https://www.modbus.org/modbus-specifications>. Acesso em: 14 jun. 2026.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2003.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano de Ampliações e Reforços e Planejamento da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/expansao>. Acesso em: 14 jun. 2026.

PATEL, Yogesh P.; TALLAM, Rangarajan M.; BROWN, Brian P.; BUSSE, Doyle F.; HU, Jiangang; CAMPUZANO, Daniel; STRANDT, Alia R. Mitigation of the Effects of Common-Mode Current on the Operation of SCR-Based Rectifiers for AC Drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Piscataway, 2016.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, Circuitos e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

REIVAX. **Controlando energia, gerando desenvolvimento: Sistemas de Excitação para Compensadores Síncronos (Quatro Quadrantes)**. Florianópolis, 2022f. Disponível em: <https://www.reivax.com/wp-content/uploads/2022/03/RTX-POWER-em-Compensadores.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2026.

REIVAX. **REIVAX: E-book 30 anos**. [S.l.], 2020a. Disponível em: <https://www.reivax.com/wp-content/uploads/2020/02/REIVAX-E-book-30-anos.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2026.

REIVAX. **REIVAX Academy: Sistemas de regulação para hidrelétricas**. [S.l.], 2025c. Material interno de treinamento.

REIVAX. **RTVX e RTVAX: conheça nossas soluções em sistemas integrados**. [S.l.], 2023b. Publicação institucional no LinkedIn. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/rtvx-e-rtvax-conhe%C3%A7a-nossas-solu%C3%A7%C3%B5es-em-sistemas-integrados-evxpf/>. Acesso em: 4 jun. 2026.

REIVAX. **RTX POWER: Sistema de Excitação**. [S.l.], 2019d. Disponível em: <https://www.reivax.com/wp-content/uploads/2020/01/Folder-A4-RTX-POWER-G2-2019-compressed.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2026.

REIVAX. **RVX POWER: Sistema de Controle de Turbinas**. [S.l.], 2017e. Disponível em: <https://www.reivax.com/wp-content/uploads/2020/01/Folder-A4-RVX-POWER-G2-2017.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2026.

SCHAEFER, Richard C. **Applying Static Excitation Systems**. [S.l.], 1998. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=730764>. Acesso em: 25 jun. 2026.

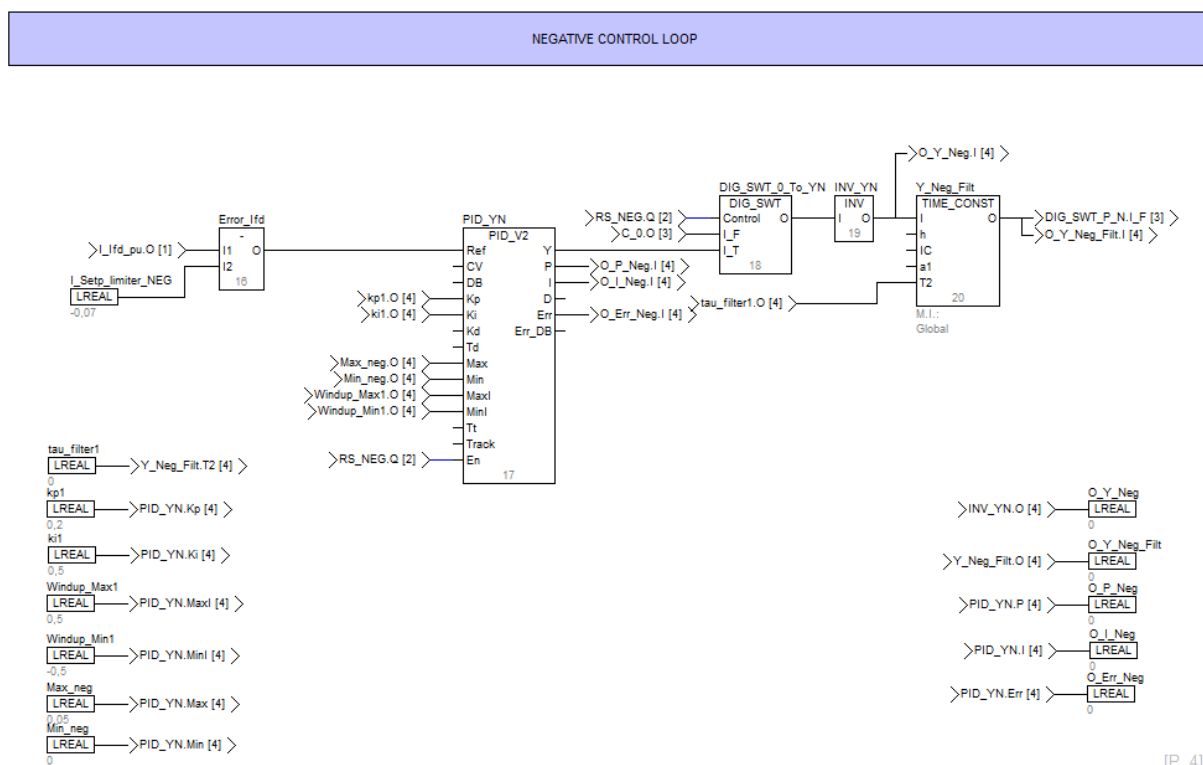
WEG. **Hydro Turbine Driven Generators**: technical specification. Jaraguá do Sul, 2024a. Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h8f/hde/EM_Hydro_Turbine_Driven_Generator.pdf. Acesso em: 14 jun. 2026.

WEG. **Motores síncronos**: catálogo técnico. Jaraguá do Sul, 2024b. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/ha8/hf1/WEG-motores-sincronos-50005369-catalogo-portugues-br-dc.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2026.

WEG. **WEG adquire a REIVAX, empresa brasileira de soluções de controle de geração de energia**. [S.l.], 2024c. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/corporativo/weg-adquire-a-reivax-empresa-brasileira-de-solucoes-de-controle-de-geracao-de-energia>. Acesso em: 14 jun. 2026.

Apêndices

Figura 55 – Malha de controle da parte negativa do limitador



[P. 4]

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 56 – Estratégia de *anti-windup* por zeramento de K_I

