

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELIS MARINA SALES DE CASTRO

APLICAÇÃO DE CONTROLE DE ORDEM FRACIONÁRIA EM INVERSORES DE  
TENSÃO PRESENTES EM SISTEMAS ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO

CURITIBA

2019

ELIS MARINA SALES DE CASTRO

APLICAÇÃO DE CONTROLE DE ORDEM FRACIONÁRIA EM INVERSORES DE  
TENSÃO PRESENTES EM SISTEMAS ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof Gustavo H. da Costa Oliveira, Dr  
Coorientador: Prof Gideon Villar Leandro, Dr

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C355a

Castro, Elis Marina Sales de

Aplicação de controle de ordem fracionária em inversores de tensão presentes em sistemas ativos de distribuição [recurso eletrônico] / Elis Marina Sales de Castro. – Curitiba, 2019.

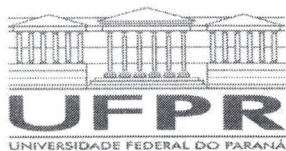
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Gustavo Henrique da Costa Oliveira – Coorientador: Gideon Villar Leandro

1. Energia elétrica – Distribuição. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Energia solar. 4. Sistemas de energia fotovoltaica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Oliveira, Gustavo Henrique da Costa. III. Leandro, Gideon Villar. IV. Título.

CDD: 621.315

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
ELÉTRICA - 40001016043P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ELIS MARINA SALES DE CASTRO** intitulada: **Aplicação de Controle de Ordem Fracionária em Inversores de Tensão Presentes em Sistemas Ativos de Distribuição**, sob orientação do Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Dezembro de 2019.

GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA  
Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RICARDO SCHUMACHER  
Avaliador Interno (DELT.)

ALEXANDRE RASI AOKI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

EMERSON DONAISKY  
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ)

*Dedico este trabalho àqueles que apoiam e torcem pela ciência*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Elizane e Castor pelo amor e apoio incondicionais, pelos sábios conselhos nos momentos mais difíceis. Ao meu irmão, Elvis, pelo carinho, incentivo e inspiração que desperta em mim.

Ao Professor Dr. Gustavo, pela confiança investida, paciência, orientação e ensinamentos valiosos.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Alexandre Rasi Aoki, Dr. Ricardo Schumacher, da Universidade Federal do Paraná e Dr. Emerson Donaisky, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela disponibilidade para leitura e avaliação deste trabalho e pelas recomendações que enriquecem-no. Agradeço também aos professores Dr. Gideon Leandro, pela co-orientação e o Dr. João Américo Vilela que dedicou bastante tempo e atenção para me ajudar durante as simulações.

Muito obrigada ao pessoal do LASICO (Doug, Mari, Duda, Wagneto, Cris's, Renato, Ádamo, Lucas, Edu) e vizinhos (Carlos's), pela parceria, companhia no R.U., conversas e trocas de experiências valiosas. Obrigada também a meus amigos da PK09 (Gabo, Renan, Ellen, Rodrigo, Jeffito, Theoma, Márcio), que muitas vezes me acolheram no laboratório de SEP e também me aconselharam muito nessa jornada acadêmica.

Aos meus queridos amigos e professores do *Hung Gar Kuen*, pela amizade e cuidado com a saúde do meu corpo e da minha mente.

Agradeço ao apoio financeiro do Projeto PD 2866-0470/2017, projeto este regulamentado pela ANEEL e desenvolvido no âmbito do programa de PD da Companhia Paranaense de Energia, COPEL DIS.

Enfim, agradeço à Universidade Federal do Paraná, que foi minha segunda casa durante esses dois anos.

*Na vida, não existe nada a se temer, apenas a ser compreendido.*

*Marie Curie*

## RESUMO

Nos últimos anos, a geração distribuída, caracterizada pela instalação próxima ao consumidor, tem ganhado bastante espaço nos sistemas elétricos. Com isso, os sistemas de distribuição passam a ser chamados de ativos, com fluxos bidirecionais de potência. As principais matrizes energéticas desse tipo de geração são as renováveis, como a eólica e a fotovoltaica. Devido à natureza intermitente das entradas dessas gerações, conversores de energia se fazem necessários na conexão dessas usinas à rede elétrica. Nos conversores, é indispensável a realização do controle de tensão, para a manutenção da qualidade da energia injetada na rede. Nesse contexto, é proposta a aplicação de uma estratégia de controle de tensão em um dos níveis do conversor, no barramento CC, no presente trabalho. O método escolhido foi o CRONE, controle de ordem fracionária, cuja aplicação ainda não foi suficientemente explorada, sobretudo em sistemas elétricos. Para sua validação, foi realizada uma simulação no programa *Simulink*, do MATLAB. A aplicação foi realizada em duas minirredes: uma no DELT da Universidade Federal do Paraná, contendo apenas uma usina fotovoltaica, e uma do Centro Politécnico, contendo duas usinas. Dos resultados de simulação, foi demonstrado que o CRONE pode ser aplicado nesse tipo de planta. Assim, é verificado que o CRONE é mais uma opção de método a ser aplicado no controle de tensão do barramento CC, presente na geração distribuída fotovoltaica em sistemas ativos de distribuição.

**Palavras-chaves:** Controle de Ordem Fracionária. Controle de Tensão. Geração Distribuída Fotovoltaica. Sistemas Ativos de Distribuição.

## ABSTRACT

In recent years, distributed generation, characterised by its near-consumer installation, has gained a lot of space in electrical systems. With this, distribution systems are now called active, with bidirectional power flows. The main energy matrices of this type of generation are renewable, such as wind and photovoltaic. Due to the intermittent nature of these generation inputs, power converters are required to connect these plants to the power grid. In converters, voltage control is indispensable for maintaining the quality of the energy injected into the grid. In this context, it is proposed to apply a voltage control strategy at one of the converter levels (the DC bus) in the present work. The chosen method was CRONE, fractional order control, whose application has not been sufficiently explored, especially in electrical systems. For its validation, a simulation was performed in MATLAB's Simulink program. The application was carried out in two mini-grids: one at the DELT of the Federal University of Paraná, containing only one photovoltaic plant, and one from the Polytechnic Center, containing two plants. From the simulation results, it was demonstrated that CRONE can be applied to this type of plant. Thus, it is verified that CRONE is one more method option to be applied in DC bus voltage control, present in photovoltaic distributed generation in active distribution systems.

**Key-words:** Fractional Order Control. Photovoltaic Distributed Generation. Voltage Controller. Active Distribution Network.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Elementos de um Sistema Elétrico de Potência Atual . . . . .	18
FIGURA 2 – Instalação de Fotovoltaica Per Capta no Mundo e Crescimento por país. .	19
FIGURA 3 – Classificação dos tipos de estabilidade de Minirredes . . . . .	21
FIGURA 4 – Linha do tempo dos principais cientistas na área de cálculo fracionário. .	26
FIGURA 5 – Diagrama de blocos associado à representação do espaço de pseudo-estados.	30
FIGURA 6 – Região de estabilidade de um sistema com ordem fracionária ( $0 < \nu \leq 1$ )	31
FIGURA 7 – Parâmetros do FOPID . . . . .	33
FIGURA 8 – Diagrama de blocos do controlador TID. . . . .	34
FIGURA 9 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de <i>feedback</i> negativo de unidade de saída. . . . .	35
FIGURA 10 – Robustez da margem de fase do CRONE primeira geração . . . . .	36
FIGURA 11 – Diagrama de Bode de $G(s)$ para $\tau = 1000$ , $\tau = 1000/3$ , $\tau = 31000$ . . .	39
FIGURA 12 – Forma paralela do controlador CRONE projetado . . . . .	40
FIGURA 13 – Resposta ao degrau para controladores PID e CRONE . . . . .	41
FIGURA 14 – Diagrama do sistema de geração fotovoltaico. . . . .	42
FIGURA 15 – Diagrama do Inversor Trifásico Tipo Fonte de Tensão . . . . .	44
FIGURA 16 – Modulação PWM . . . . .	45
FIGURA 17 – Diagrama de blocos da estratégia de controle do inversor trifásico. . . .	46
FIGURA 18 – Diagrama Unifilar da Minirrede UFPR. . . . .	48
FIGURA 19 – Vista Aérea da Minirrede UFPR. . . . .	49
FIGURA 20 – Implementação dos módulos FV por inversor (ao todo são 17 circuitos em paralelo). . . . .	50
FIGURA 21 – Valores de Base para Entrada do Painel FV . . . . .	51
FIGURA 22 – Diagrama de Blocos do Sistema Modelado . . . . .	52
FIGURA 23 – Diagrama de Bode da Malha de Controle de Corrente . . . . .	53
FIGURA 24 – Ambiente de Definição da Planta na <i>toolbox</i> CRONE . . . . .	53
FIGURA 25 – Ambiente de Definição do Controlador na <i>toolbox</i> CRONE . . . . .	54
FIGURA 26 – Resposta ao Degrau pra CRONE . . . . .	54
FIGURA 27 – Esquemático do Bloco de Controle do Inversor e do Controle de Tensão .	55
FIGURA 28 – Resultados de Simulação para Curto-circuito Usando o Bloco do <i>Simulink</i> com PI. . . . .	56
FIGURA 29 – Resultados de Simulação para Redução de Irradiação Usando o Bloco do <i>Simulink</i> com PI. . . . .	56

FIGURA 30 – Resultados de Simulação para Curto-circuito Usando o Bloco do <i>Simulink</i> com CRONE. . . . .	58
FIGURA 31 – Resultados de Simulação para Redução de Irradiação Usando o Bloco do <i>Simulink</i> com CRONE. . . . .	58

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Projetos de Geração Distribuída Cadastrados (sob análise da EPE). . . .	19
TABELA 2 – Formulação de Integrais de Ordem Genérica . . . . .	27
TABELA 3 – Formulação de Derivadas de Ordem Genérica . . . . .	28
TABELA 4 – Dados do Inversor de Tensão. . . . .	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

**ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica

**BIO** Termelétrica a Biomassa

**CA** Corrente Alternada

**CC** Corrente Contínua

**CGH** Centrais Geradoras Elétricas

**COMMP** Central de Operação e Monitoramento da Minirrede do Campus Centro Politécnico

**CRONE** Controle Robusto de Ordem Não Inteira (*Commande Robuste d'Ordre Non Entier*)

**DELTA** Departamento de Engenharia Elétrica

**EDOF** Equação Diferencial de Ordem Fracionária

**EOL** Eólica

**EPE** Empresa de Pesquisa Energética

**FV** Fotovoltaica

**GD** Geração Distribuída

**MPPT** Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (*Maximum Power Point Tracker*)

**PCH** Pequenas Centrais Hidrelétricas

**PMU** Unidade de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit*)

**PWM** Modulação por Largura de Pulso (*Pulse-Width Modulation*)

**UFPR** Universidade Federal do Paraná

**UFV** Usina Fotovoltaica

**UHE** Usinas Hidrelétricas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$J^v$	Operador de integração de ordem genérica
$D^v$	Operador de diferenciação de ordem genérica
$v$	Ordem da operação de integração/derivação
$f(t)$	Função a ser integrada/derivada, no domínio do tempo
$t$	Tempo
$m$	Índice de somatório
$h$	Variável de limite
$t_0$	Limite inferior de integração/derivada
$a$	Limite superior de integração/derivada
$\tau$	Constante de tempo
$k$	Índice de somatório
$s$	Variável do domínio da frequência
$F(s)$	Função a ser integrada/derivada, no domínio da frequência
$A, B, C, D$	Matrizes de um modelo representado em espaço de estados
$x(t)$	Variáveis de estado
$y(t)$	Variáveis de saída
$u(t)$	Variáveis de entrada
$G(s)$	Função de Transferência Genérica
<b>I</b>	Matriz Identidade
$M_\phi$	Margem de fase
$M_G$	Margem de ganho
$\beta$	Função do modelo usado como exemplo
$G_{FOPID}$	Função de transferência do controlador FOPID
$K_P$	Constante do controlador proporcional

$K_I$	Constante do controlador integral
$K_D$	Constante do controlador derivativo
$\lambda$	Potência do integrador
$\mu$	Potência do diferenciador
$i_d$	Corrente Direta
$i_q$	Corrente em Quadratura
$C_v$	Controle da Tensão do Barramento
$C_d$	Controle da Corrente Direta do barramento
$C_q$	Controle da Corrente em Quadratura do barramento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	SISTEMAS ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO	17
1.2	ESTABILIDADE DE MINIRREDES	20
1.3	CONTROLE DE ORDEM FRACIONÁRIA	22
1.4	JUSTIFICATIVA	23
1.5	OBJETIVOS	24
1.5.1	Objetivo Geral	24
1.5.2	Objetivos Específicos	24
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	24
<b>2</b>	<b>SISTEMAS DE CONTROLE COM EQUAÇÕES DE ORDEM FRACIONÁRIA</b>	<b>25</b>
2.1	HISTÓRICO DO CÁLCULO FRACIONÁRIO	25
2.2	DEFINIÇÕES DE OPERADORES FRACIONÁRIOS	27
2.3	SISTEMAS DESCRITOS POR EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DE ORDEM FRACIONÁRIA	29
2.4	ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ORDEM FRACIONÁRIA	31
2.5	SISTEMAS DE CONTROLE FRACIONÁRIO	32
2.6	CONTROLE ROBUSTO DE ORDEM NÃO INTEIRA	35
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
<b>3</b>	<b>CONTROLE DE TENSÃO EM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA</b>	<b>42</b>
3.1	CONEXÃO DE USINAS FV COM A REDE ELÉTRICA	42
3.2	MALHAS DE CONTROLE PRESENTES EM UM CONVERSOR DE TENSÃO	45
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO CRONE: MINIRREDE DO DELT E MINIRREDE UFPR</b>	<b>47</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MINIRREDE UFPR	47
4.2	MODELAGEM DA MINIRREDE UFPR	49
4.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MINIRREDE DELT	50
4.4	MODELAGEM DA MINIRREDE DELT	51
4.5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO: MINIRREDE DELT	52
4.6	EXEMPLO DE APLICAÇÃO: MINIRREDE UFPR	55
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>59</b>

**REFERÊNCIAS** ..... **61**

# 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência clássico é uma rede composta por unidades de geração, sistemas de transmissão, redes de distribuição, e cargas (unidades de consumo). Com o aumento da inserção de Geração Distribuída (GD), o cenário desse sistema tem mudado drasticamente. Hoje a injeção de potência não é centralizada, pois também é provida por diversos pontos do sistema. Com isso, diversos estudos tem sido desenvolvidos para considerar o novo panorama dos sistemas de potências.

Dentre as diversas matrizes elétricas inseridas como GD, há um favoritismo para as fontes renováveis, como a eólica e a fotovoltaica. Neste capítulo é apresentado um pequeno apanhado do contexto atual, no sentido da implementação de painéis solares como fonte de GD e dos esforços investidos no controle de tensão, sobretudo para manter a estabilidade do sistema que, a priori, não foi projetado para esse tipo de geração.

## 1.1 SISTEMAS ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO

Os sistemas elétricos de potência hoje em dia contam com a presença de GD ou minirredes. Assim, o sistema passa por uma transição: de redes de distribuição passivas estáveis com transporte de eletricidade unidirecional para redes de distribuição ativas com transporte de eletricidade bidirecional. Os Sistemas Ativos de Distribuição são aqueles com unidades GD, levando a fluxos de energia bidirecionais nas redes (CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009).

A minirrede consiste em um conjunto de cargas e microssistemas operando como um único sistema controlável que fornece energia a uma determinada área. Para o sistema ativo de distribuição, a minirrede representa uma célula controlada. Essa célula pode ser controlada como uma única carga despachável, que pode responder em segundos para atender às necessidades do sistema de transmissão. Da mesma maneira, a minirrede pode ser projetada para atender a determinadas necessidades como: aumentar a confiabilidade local; reduzir as perdas do alimentador; suportar tensões locais; corrigir a queda de tensão ou fornecer funções de fonte de alimentação ininterrupta (LASSETER, 2002). As minirredes tem conceito equivalente, porém trata de maiores fluxos de potência.

A implementação de GD é uma tendência que se fortaleceu nos últimos anos. Segundo ANEEL (2012), a Geração Distribuída é definida por uma geração de energia elétrica, com fontes renováveis ou de cogeração qualificada e com uma eficiência energética segundo a Resolução Normativa nº 235 de 14/11/2006. Outro fator requerido para caracterizar uma GD é a conexão na rede de distribuição, realizada por meio de instalações de unidades consumidoras e de potência instalada de: no máximo 75kW, para microgeração; ou entre 75kW e 5MW para minigeração. Pode ser implementada com diversas matrizes energéticas diferentes, como uma usina a óleo,

pequena central hidrelétrica, parques solares, etc.

A Figura 1 apresenta a ilustração de um sistema de potência moderno. Nele, é possível identificar os sistemas conectados (minirredes), a geração distribuída e os elementos de um sistema de potência tradicional: geração centralizada; cargas; linhas de transmissão e redes de distribuição.

FIGURA 1 – Elementos de um Sistema Elétrico de Potência Atual



Fonte – CEPEL, 2013

No Brasil, desde a regulamentação da geração distribuída, diversos fatores tem incentivado o crescimento deste tipo de geração. O fomento e o treinamento e capacitação de profissionais, viabilidade de instalação, desconto no imposto de renda, nas tarifas de uso do sistema de transmissão e distribuição são fatores que tornam a instalação de GD um investimento atrativo (SILVA, 2015).

Na Tabela 1, são apresentados os projetos de instalação de geração distribuída, previstos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). É notável que a matriz fotovoltaica representa mais de 50% da oferta de potência. A energia eólica também previsão de grande crescimento (ANDRÉ FELBER AFONSO LUGO, 2019).

Assim, percebe-se que dentre as matrizes energéticas usadas na GD, a preferida é a energia Fotovoltaica (FV). É uma fonte de energia sustentável e renovável, ou seja, é não-poluente e de fonte inesgotável. Além disso, sua instalação é simples, simples e não requer grandes espaços (pode ser realizada em telhados, coberturas de estacionamentos, etc). Contudo, o principal fator que torna a geração FV atrativa é a constante redução dos custos e as melhorias na eficiência de

TABELA 1 – Projetos de Geração Distribuída Cadastrados (sob análise da EPE).

Matriz Energética		Projetos	Oferta (MW)	%
Fotovoltaica	UFV	751	26253	51,3%
Eólica	EOL	751	23110	45,1%
Termelétrica a Biomassa	BIO	19	1039	2,0%
Pequenas Centrais Hidrelétricas	PCH	44	606	1,2%
Hidrelétricas	UHE	4	164	0,3%
Centrais Geradoras Elétricas	CGH	12	32	0,1%
Total		1581	51204	100,0%

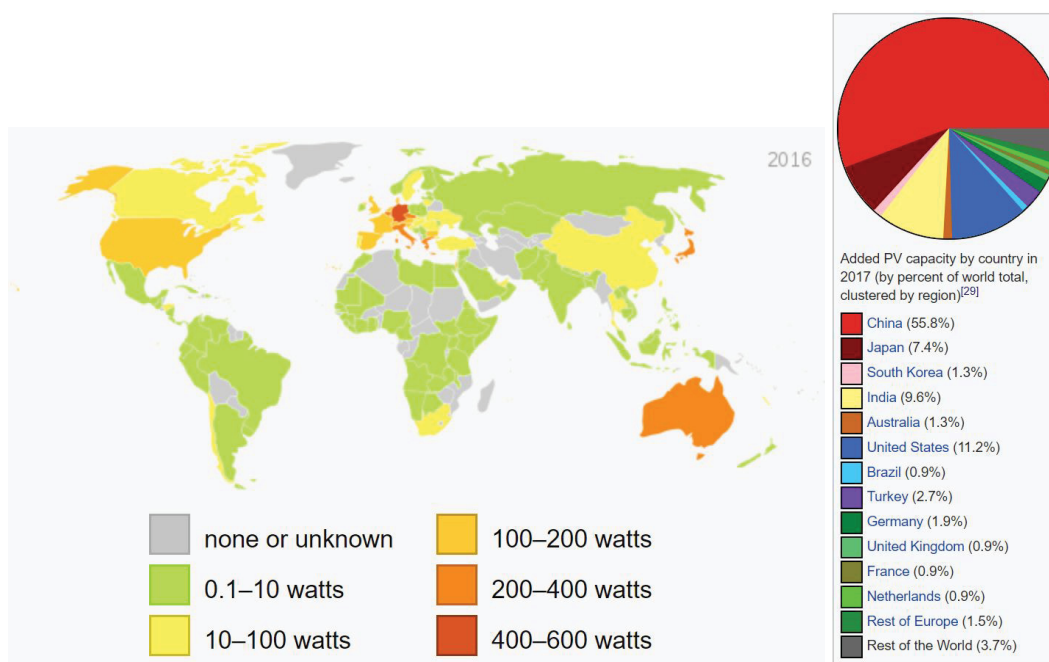
Fonte – André Felber Afonso Lugo, 2019

painéis.

A entrada da China na fabricação de painéis FV foi um grande agente no aumento exponencial desse tipo de energia no mundo. Além de aquecer o mercado com painéis de baixo custo, em 2017 a China teve um incremento de potência FV instalada de 53GW (IEA, 2018).

A Figura 2 apresenta um mapa-múndi com a quantidade de geração FV instalada per capita de cada país. Na mesma figura, há um gráfico com o incremento de geração FV em cada país (vê-se nela a presença do Brasil como um dos principais). Em 2019, o Brasil alcançou a marca de 1GW de potência FV instalada, divididos em mais de 82,9 mil usinas (ENERGIA, 2019).

FIGURA 2 – Instalação de Fotovoltaica Per Capta no Mundo e Crescimento por país.



Fonte – IEA, 2018

Embora a geração distribuída seja favorável em alguns pontos, como redução das perdas por transmissão, melhoria da qualidade e confiabilidade, alguns impactos são causados pela

implementação da geração distribuída, como a complexidade no planejamento e operação do sistema e nos procedimentos de manutenção. Importante observar também que nem todas as concessionárias de distribuição de energia estão preparadas para este novo panorama, pois o sistema elétrico não foi projetado para este tipo de conexão (DIAS; BORTONI; HADDAD, 2005). A implementação de gerações eólicas e fotovoltaicas ainda causam flutuação na potência e frequência do sistema, devido à intermitência na velocidade do vento e à radiação solar inconsistente (PANDEY; MOHANTY; KISHOR, 2013).

Assim como em sistemas de potência tradicionais, o funcionamento correto de sistemas ativos de distribuição depende de alguns fatores. Tais requisitos são: que as energias ativa e reativa sejam constantemente controladas para atender às mudanças constantes na carga; que a geração tenha um custo e um impacto ambiental mínimos e a energia fornecida seja considerada de qualidade. As definições de qualidade de energia de um sistema, no Brasil, são dada pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018). A fim de avaliar o quão satisfatória a energia elétrica é para seus consumidores, também são consideradas as distorções harmônicas, flutuações de tensão, desequilíbrio de sistemas trifásicos e transitórios rápidos (DECKMANN; POMILIO, 2017).

## 1.2 ESTABILIDADE DE MINIRREDES

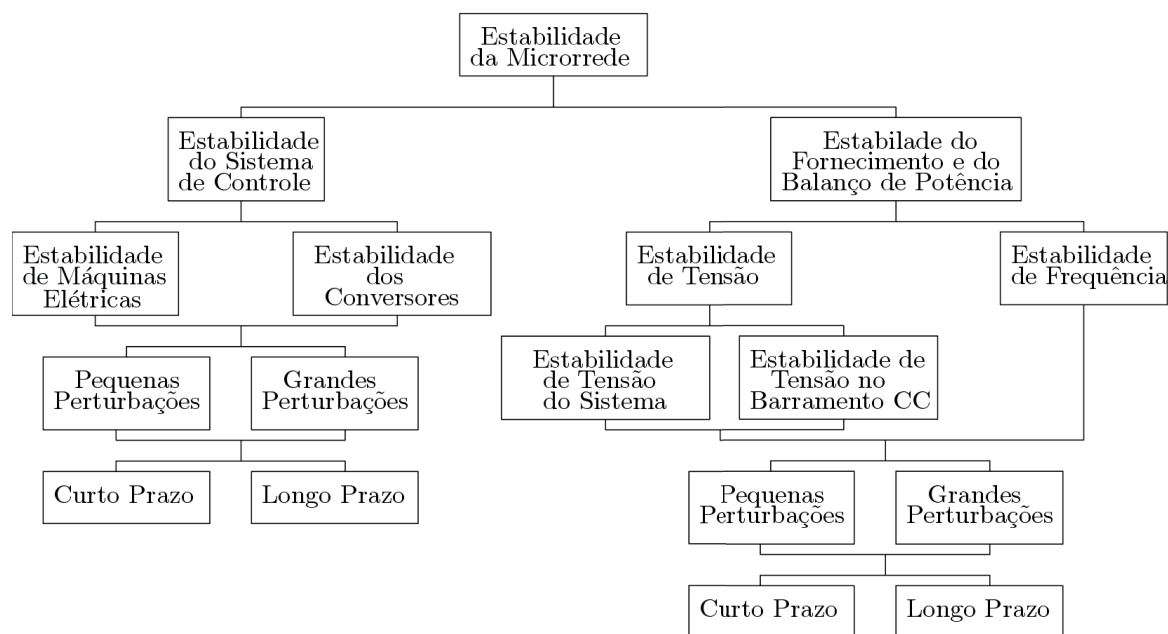
Um fator primordial para o bom funcionamento de sistemas dinâmicos é a estabilidade. No caso de sistemas elétricos de potência, a estabilidade é definida também como a capacidade do sistema elétrico de potência de, estando em uma condição operativa estável, reestabelecer seu equilíbrio operativo após sofrer uma perturbação, de modo que as variáveis do sistemas sejam limitadas e o sistema conserve-se intacto (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). As perturbações de um sistema estão associadas a quaisquer entradas exógenas, ou mudanças na condição de operação. Isso corresponde a mudanças de carga, falhas de componentes ou ajustes de modo operacional, etc.

A classificação de estabilidade em sistemas elétricos de potência estão bem estabelecidos e consolidados na comunidade acadêmica, nas concessionárias e nos demais agentes do setor (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Entretanto, no que diz respeito a estabilidade de minirredes, a proposta de classificação é recente e está em fase de consolidação (FARROKHABADI et al., 2019). Isso se deve a presença de elementos adicionais característicos de sistemas ativos de distribuição e minirredes, a saber conversores de tensão, baterias, etc. A força tarefa do IEEE, denominada (FARROKHABADI et al., 2019) foi criada recentemente para tratar deste assunto.

A Figura 3 ilustra essa classificação de estabilidade, no contexto de minirredes. Nota-se a presença de minirredes, conversores, baterias, além dos elementos clássicos de um sistema de potência. Nesta figura, os problemas de estabilidade são classificados quanto à parte do sistema (de controle ou de potência), quanto aos equipamentos envolvidos (máquinas, conversores, rede, barramento em corrente contínua - CC), quanto à grandeza (tensão ou frequência), quanto à

intensidade da perturbação ou quanto ao tempo de perturbação.

FIGURA 3 – Classificação dos tipos de estabilidade de Minirredes



Fonte – Adaptado de Farrokhabadi et al. (2019)

A estabilidade do fornecimento e do balanço de potência está relacionada a problemas de tensão e frequência do sistema. Por não ter longas linhas de transmissão, a estabilidade de tensão de minirredes não sofre com os limites de transferência de energia (causa de problemas em sistemas elétricos convencionais). Em sistemas com GD e minirredes, a regulação da tensão acontece diretamente nos terminais dos geradores. Contudo, perturbações que surgem na geração refletem imediatamente no resto do sistema (FARROKHABADI et al., 2019).

Com a adição de matrizes elétricas renováveis, como FV e eólica, que requerem conversores e barramentos CC, trata-se então da estabilidade de tensão no barramento CC. O valor de tensão nesse equipamento é mantido através de inversores (no caso da matriz FV), assim as ondulações de tensão no capacitor dependem da potência instantânea injetada pelos painéis.

Em usinas FVs, controle de tensão pode ser feito em três níveis diferentes: rastreamento do ponto de potência máxima (MPPT), controle de tensão no barramento CC ou através do controle de corrente reativa. Neste trabalho, o foco é dado no controle de tensão no barramento CC.

Alguns trabalhos também tratam do controle nesse contexto, como (SCHONBERGER; DUKE; ROUND, 2006), (AHMED; AL-OTHMAN; ALRASHIDI, 2011) e (CHEN; CHENG; WU, 2006) que tratam do controle no barramento CC conectado a sistemas híbridos, ou seja, com

presença de FV, geração eólica e geração a óleo. Em (WU et al., 2012), o controle é realizado no barramento conectado a inversores de tensão bidirecionais, para geração FV, contudo, a rede em questão é em corrente contínua.

No contexto brasileiro, (MACHADO, 2004) apresenta o projeto de um PI para o controle do barramento CC, considerando a rede como um receptor de potência e o barramento CC como um fornecedor de energia. Assim, para qualquer queda na potência absorvida pela fonte há um aumento na tensão do barramento CC, a fim de manter a potência injetada invariável. Também realizado por brasileiros, o trabalho (SILVA et al., 2016) apresenta um controle usado para reduzir a amplitude das oscilações na tensão do barramento CC. Nele, foi usado um controle do tipo *feed-forward*.

### 1.3 CONTROLE DE ORDEM FRACIONÁRIA

Em meio aos métodos de controle disponíveis atualmente, há uma classe que vem recebendo destaque na literatura: o controle com equações de ordem fracionária. O uso de modelos descritos por equações de ordem fracionária foi iniciado por Caputo (1969), por quem foi demonstrada a existência de sistemas onde modelos de ordem fracionária são mais indicados que modelos de ordem inteira. São sistemas relacionados com fenômenos como a viscoelasticidade, estudo do comportamento de fractais (CARPINTERI; MAINARDI, 2014), dinâmica de sistemas caóticos (HARTLEY; LORENZO; QAMMER, 1995), entre outros.

Uma das vantagens em trabalhar com controle de ordem fracionária é que a região de estabilidade do sistema (na ordem inteira limitada ao lado esquerdo do plano complexo) pode variar e até ultrapassar o eixo imaginário do plano. Aproveitando essa propriedade dos controladores de ordem fracionária, o trabalho de Muresan et al. (2015) usa uma unidade de levitação magnética para validar experimentalmente um controle fracionário.

Hoje em dia, modelos de ordem fracionária estão bem consolidados e são encontrados em diversas aplicações. Alguns exemplos são apresentados em (LANUSSE; POMMIER; OUSTALOUP, 2000) onde um controlador de ordem fracionária é aplicado num sistema atuador hidráulico, em (OUSTALOUP; MOREAU; NOUILLANT, 1996), aplicado a um sistema de suspensão de carro, dentre outros.

No campo dos sistemas elétricos de potência, há diversos trabalhos que usam equações de ordem fracionária, sobretudo no controle de carga e frequência. Nos trabalhos de Sondhi e Hote (2014), e Osinski, Leandro e Oliveira (2018) por exemplo, foram usados controladores PID de ordem fracionária no regulador de velocidade em sistemas de geração hidráulica, com o uso de algoritmos de otimização dos parâmetros do controlador. No primeiro, foi usado um algoritmo de critério de erro, onde se testam diferentes combinações dos coeficientes de integração e derivação e aquela combinação que der o menor erro é escolhida. Já em (OSINSKI; LEANDRO; OLIVEIRA, 2018), a sintonia dos cinco parâmetros de controle foi realizada através de uma

técnica de otimização usando algoritmos genéticos. O autor ainda comparou seus resultados com o PID tradicional, obtendo respostas de controle menos oscilantes com o controle fracionário. Tais trabalhos tiveram como foco os sistemas de controle presentes em usinas hidrelétricas.

Neste trabalho, a técnica de controle CRONE (Controle Robusto de Ordem Não Inteira) é aplicada no controle de tensão, com atuação no inversor de uma geração fotovoltaica. Para isso, foi escolhida para este estudo uma unidade geradora, a Usina de Minigeração do centro politécnico da UFPR (Universidade Federal do Paraná), de matriz fotovoltaica.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Hoje o sistema elétrico de potência sofre grandes transformações, como a implementação de minirredes e a presença de geração distribuída com diferentes matrizes. Por isso, diversos esforços são investidos no problema do controle da tensão para este contexto.

Na literatura, há trabalhos que tratam do problema da inserção de fotovoltaica como matriz de GD através de diferentes perspectivas (impactos causados, avaliação da qualidade de energia, controle local e global de tensão) e em diferentes cenários (global e brasileiro). Além disso, análises de estabilidade considerando o novo panorama do sistema elétrico estão no foco de diversas pesquisas atuais. Os controladores de ordem fracionária, contudo, tem ocupado pouco espaço dentro desse contexto.

Nos últimos anos, o Brasil tem crescido em termos de pesquisa nas áreas da geração distribuída e geração solar fotovoltaica. Assim, para viabilizar a produção desse tipo de energia, facilitar a implantação, fomentar e propiciar a capacitação laboratorial das universidades, foi elaborada a Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 013/2011, da ANEEL (MELO; GRIMONI, 2012). Além dessa chamada, incentivos foram atribuídos à geração distribuída fotovoltaica, como: desconto na tarifa de uso dos sistemas de transmissão e de distribuição (TUST e TUSD, respectivamente), sistema de compensação de energia elétrica, redução do imposto de renda, entre outros (SILVA, 2015).

Nesse âmbito, a COPEL Distribuidora, através de uma chamada pública, publicada pela ANEEL: “Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE” e “Procedimentos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento – PROP&D”, selecionou propostas de projetos plenamente aderentes à “Chamada nº 001/2016 – Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: ‘Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior’”. O Departamento de Engenharia Elétrica (DELTA) da UFPR, tornou-se então responsável pelo projeto da minirrede, concebido a fim de prover um ambiente de estudos e pesquisas na área de geração distribuída.

Tal projeto tem como justificativa prover economia de energia para o centro politécnico. Para isso, foram realizadas a troca das lâmpadas existentes (por 39.280 lâmpadas e luminárias LED) como ação de eficiência energética e a construção do parque solar, com a implementação

de 3160 placas fotovoltaicas de 315 Wp e 16 inversores de 60 kW. Com essa unidade de geração estima-se 2.682 MWh de redução no consumo anual, ou seja, R\$ 1.023.900,63 de economia por ano (6% da despesa com energia elétrica).

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia de projeto de sistemas de controle usando equações de ordem fracionária para inversores de tensão presentes em sistemas de distribuição ativa.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

Dentro do contexto do objetivo geral deste trabalho, tem-se os seguintes objetivos específicos

- Desenvolver metodologia de projeto para controle de ordem fracionária do tipo CRONE, Controle Robusto de Ordem Não Inteira (em francês, *Commande Robuste d'Ordre Non Entier - CRONE*), dedicado ao problema de controle de tensão no barramento CC de conversores de tensão presentes em minirredes de distribuição;
- Aplicar a metodologia de projeto em sistemas de distribuição ativa baseada em geração fotovoltaica, não ilhada, tendo como base, as usinas solares do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) e do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido da seguinte maneira: no Capítulo 2 são introduzidas as definições de equações de ordem fracionária, sistemas de ordem fracionária e suas propriedades. Nesse mesmo capítulo, são apresentados os principais tipos de controladores de ordem fracionária, terminando com o algoritmo CRONE, que será explorado ao longo do trabalho.

No Capítulo 3 são apresentadas as principais malhas de controle contidas em inversores de tensão, com abordagem voltada para a geração em usinas fotovoltaicas.

No Capítulo 4, dois exemplos de aplicação são apresentados. Tratam-se de sistemas de controle do barramento CC de inversores de tensão presentes na minirrede do DELT e na minirrede do Centro Politécnico. Simulações e características das futuras usinas fotovoltaicas são discutidas e um exemplo de modelo de inversor é apresentado. São apresentados e avaliados os resultados de simulação do controle de tensão destas usinas, usando CRONE no controle do barramento CC dos inversores.

Por fim, no Capítulo 5, as conclusões do trabalho são discutidas, bem como sugestões e observações para trabalhos futuros são apresentadas.

## 2 SISTEMAS DE CONTROLE COM EQUAÇÕES DE ORDEM FRACIONÁRIA

O intuito deste capítulo é apresentar os principais elementos dos métodos de controle com equações de ordem fracionária. Para introduzir o tema, traz-se aqui: um breve apanhado histórico do cálculo fracionário e as definições de integrais e derivadas de ordem fracionária, bem como sua interpretação matemática.

Na sequência, são discutidos os sistemas de ordem fracionária, propriedades desse tipo de sistema. Dentre eles, dá-se destaque aos controladores com equações de ordem fracionária, como o CRONE, ou Controle Robusto de Ordem Não-Inteira, tema de interesse deste trabalho. Ao final, é exposto um exemplo para ilustrar o desempenho do controlador em questão. Para a implementação desse exemplo, foi usada uma *toolbox* do CRONE, compatível com o MATLAB<sup>®</sup>. Essa *toolbox* é gratuita e disponível através do site <https://archive.ims-bordeaux.fr/CRONE/toolbox>.

### 2.1 HISTÓRICO DO CÁLCULO FRACIONÁRIO

O cálculo fracionário surgiu no século XVII, em uma carta de L'Hôpital a Leibniz, onde foi primeiro discutida a interpretação de uma derivada de ordem  $1/2$ . Naquele tempo não existiam jornais ou revistas e a maneira que os cientistas compartilhavam seus conhecimentos era através de cartas. Na carta, Leibniz questiona l'Hôpital "*O significado de derivadas com ordem inteira pode ser generalizado para derivadas com ordens não inteiras?*", respondida por l'Hôpital com "*E se a ordem for  $1/2$ ?*". Em seguida, Leibniz refuta com as célebres palavras "*Isso levará a um paradoxo. Deste aparente paradoxo, um dia serão trazidas consequências úteis*". (CAFAGNA, 2007).

Desde então, diversos matemáticos exploraram essa temática. Dos estudos realizados por esses matemáticos, diferentes definições para integrais e derivadas de ordem fracionária foram propostas. Em Oldham e Spanier (1974) foi publicada uma lista cronológica de contribuições para o cálculo fracionário, do século XVII ao século XX. Para mais referências, ver (MACHADO; GALHANO; TRUJILLO, 2014), que publicaram um apanhado das principais publicações desde 1974 na área.

A Figura 4 apresenta alguns dos cientistas que contribuíram para o desenvolvimento do cálculo fracionário desde a sua origem. Nela, constam alguns dos principais cientistas que contribuíram para o desenvolvimento desse cálculo, como Euler, Lacroix, Fourier, Lagrange, Laplace, Liouville, Riemann, Grünwald, Letnikov, entre outros.

Em 1832, Joseph Liouville desenvolveu o primeiro estudo sistemático de cálculo fracionário, onde foi definida uma derivada de ordem arbitrária como uma série infinita. Anos depois, Bernhard Riemann usou uma generalização das séries de Taylor para definir a integral de ordem arbitrária (CAFAGNA, 2007). Assim, surgiu a formulação para derivadas e integrais de



do conhecimento, como modelagem de sistemas mecânicos (DIETHELM; FREED, 1999), física (RUDOLF, 2000), controle de carga e frequência em sistemas elétricos (SONDHI; HOTE, 2014) e (OSINSKI; LEANDRO; OLIVEIRA, 2018), bioengenharia (MAGIN, 2006), entre outros. Nesta dissertação, o cálculo fracionário é representado pelo método de controle proposto por Oustaloup, Melchior et al. (2000), aplicado no controle de tensão de geração fotovoltaica.

## 2.2 DEFINIÇÕES DE OPERADORES FRACIONÁRIOS

Existem diferentes conceitos dos operadores fracionários. Aquele a ser implementado depende do contexto do problema. O conceito de Riemann-Liouville, por exemplo, é mais adequado ao tratar-se de equações diferenciais cujas condições iniciais sejam conhecidas. A formulação proposta por Grünwald-Letnikov também é largamente usada e tem grande aplicação em problemas de cálculo numérico. Estas duas definições, isto é, a de Rieamn-Liouville e a de Grunwald-Letnikov, são as mais usadas na literatura e apresentam os mesmos resultados em diversas aplicações (CAMARGO et al., 2009). Na Tabela 2 estas definições de integrais de ordem genérica são apresentadas.

TABELA 2 – Formulação de Integrais de Ordem Genérica

Integrais Fracionárias	
Grünwald-Letnikov	$J^\nu f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^\nu \sum_{m=0}^{\frac{t-a}{h}} \frac{\Gamma(\nu + m)}{m! \Gamma(\nu)} f(t - mh) \quad (2.1)$
Riemann-Liouville	$J^\nu f(t) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t - \tau)^{(1-\nu)}} d\tau \quad (2.2)$

Sendo a função  $\Gamma(\nu)$  dada pela equação 2.3:

$$\Gamma(\nu) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\nu-1} dx \quad (2.3)$$

Nessas equações,  $J^\nu$  é definido como o operador de integral de ordem genérica  $\nu$ , sendo  $\nu \in \mathbb{R}$  a ordem do integrador da função  $f(t)$ . Caso  $\nu \in \mathbb{N}$  então, tem-se o caso tradicional, de ordem inteira. O valor de  $m$  é a parte inteira de  $\nu + 1$ . Para que estas integrais sejam verdadeiras, é necessário que  $f(t)$  seja uma função real contínua no intervalo de integração desejado.

Uma possível interpretação, para o operador de integração fracionária  $J^\nu$  no domínio do tempo, para o caso de  $\nu \in \mathbb{R}$ , é considerá-lo como a superfície que define a função  $f(t)$  ponderada por um fator de enfraquecimento representado pela função no intervalo de tempo (CAFAGNA, 2007).

Para um melhor detalhamento da definição de Grünwald-Letnikov, verificar (POLUBNY, 1998). Neste trabalho, explora-se a definição de Riemann-Liouville. Ao trabalhar no domínio da frequência, usa-se a transformada de Laplace, a partir da equação 2.2.

Assim como no caso do cálculo diferencial de ordem inteira, a Transformada de Laplace é também uma ferramenta fundamental para a análise e modelagem de sistemas com equações de ordem fracionária. Isto porque, no domínio do tempo é possível interpretar  $J^\nu f(t)$  como a convolução entre o operador  $J^\nu$  e a função  $f(t)$ .

Levando isso em conta, então a transformada de Laplace de  $J^\nu f(t)$  é definida pela equação 2.4

$$\mathcal{L}\{J^\nu f(t)\} = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \mathcal{L}\{J^\nu\} \mathcal{L}\{f(t)\} = s^{-\nu} F(s), \quad \nu > 0 \quad (2.4)$$

Assim como o operador de integração, foram desenvolvidas definições para a derivada de ordem fracionária. A derivada de ordem fracionária é definida, para os casos de Riemann-Liouville e de Grünwald-Letnikov, baseando-se no fato de a derivada ser a operação inversa da integração.

Para isso, considera-se um operador identidade  $I$ , e  $\nu \in \mathbb{R}$  para o qual:

$$D^\nu J^\nu = I, \quad J^\nu D^\nu \neq I \quad (2.5)$$

Como consequência da equação 2.5, constata-se então que o operador  $D^\nu$  é o inverso de  $J^\nu$  à esquerda (CAMARGO et al., 2009). A partir da definição de Riemann-Liouville, surge a definição Caputo. Na Tabela 3 constam as principais definições de derivadas de ordem fracionária.

TABELA 3 – Formulação de Derivadas de Ordem Genérica

Derivadas Fracionárias	
Grünwald-Letnikov	$D^\nu f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\nu} \sum_{m=0}^{\frac{t-a}{h}} (-1)^m \frac{\Gamma(\nu+1)}{m! \Gamma(\nu-m+1)} f(t-mh) \quad (2.6)$
Riemann-Liouville	$D^\nu f(t) := D^m J^{m-\nu} f(t) \quad (2.7)$ $= \frac{d^m}{dt^m} \left[ \frac{1}{\Gamma(m-\nu)} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\nu+1-m}} d\tau \right]$
Caputo	$D^\nu f(t) := J^{m-\nu} D^m f(t) \quad (2.8)$ $= \frac{1}{\Gamma(m-\nu)} \int_0^t \frac{f^{(m)}(\tau)}{(t-\tau)^{\nu+1-m}} d\tau$

As definições de Riemann-Liouville e Caputo apresentadas na Tabela 3 são muito semelhantes. O que as diferencia essencialmente é o fato da definição de Caputo requerer condições iniciais da função em derivadas de ordem inteira, enquanto para Riemann-Liouville as condições iniciais devem ser dadas em termos da integral  $J^{m-\nu}$  (CAMARGO et al., 2009).

Da mesma maneira que a transformada de Laplace do integrador fracionário, a derivada fracionária, no domínio da frequência, considera a convolução entre  $D^\nu$  e  $f(t)$ . Assim, segue na

equação 2.9 a definição de  $\mathcal{L}\{D^v f(t)\}$ :

$$\mathcal{L}\{D^v f(t)\} = s^v F(s) - \sum_{k=0}^{m-1} s^{m-1-k} D^k (J^{m-v} f(t)) \quad (2.9)$$

Levando em conta o escopo deste trabalho, as próximas considerações referem-se à definição de Caputo (1969), desenvolvida e publicada em seu livro *Elasticità e Dissipazione* para a aplicação no campo da viscoelasticidade. Isto porque o controle CRONE, de interesse para este trabalho, tem por base essa definição.

A definição de Caputo foi escolhida pelo grupo de pesquisa CRONE porque leva a uma transformada de Laplace menos complexa, já que permite a consideração das condições iniciais em termos de derivadas de ordem inteira, que são mais facilmente interpretáveis. Assim, segundo a definição de Caputo, a equação 2.8, no domínio da frequência segue a equação 2.10.

$$\mathcal{L}\{D^v f(t)\} = s^v F(s) - \sum_{k=0}^{m-1} s^{v-1-k} D^k f(0) \quad (2.10)$$

Na próxima seção, são abordados banda de frequência e modelos de sistemas de ordem fracionária a partir desta definição.

### 2.3 SISTEMAS DESCRITOS POR EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DE ORDEM FRACIONÁRIA

Diversos problemas são melhor descritos a partir de modelos de ordem fracionária. Exemplos são sistemas como: o descarregamento de um capacitor com perdas, o fluxo de um fluido sobre superfícies porosas, a condução de calor em uma placa semi-infinita, ou mesmo a relação entre tensão e corrente em uma linha de transmissão semi-infinita (DAS; PAN, 2011). Estes são alguns dos exemplos cuja descrição é mais precisa quando feita com equações de ordem fracionária.

Para modelar e analisar sistemas com múltiplas entradas e saídas, no domínio do tempo, utiliza-se a representação em espaço de estados. Assim como modelos de ordem inteira, os modelos de ordem fracionária podem também ser representados por representação de espaço de pseudo-estado, como na equação 2.11. Da mesma maneira, variáveis de pseudo-estado podem ser escolhidas para obter uma forma canônica de controlabilidade ou observabilidade.

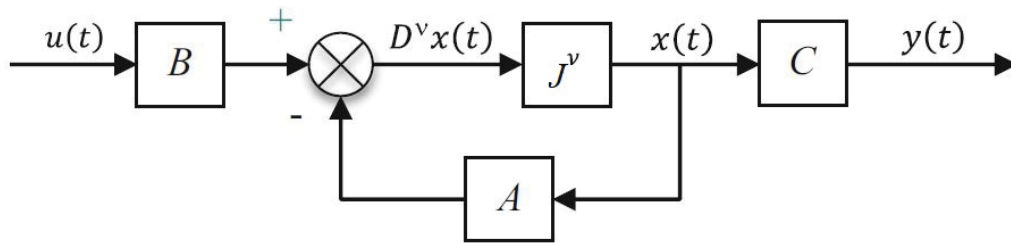
$$\begin{cases} D^v x(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) = \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t) \end{cases} \quad (2.11)$$

Na Equação 2.11,  $\mathbf{A}$  é a matriz de pseudo-estado,  $\mathbf{B}$  é a matriz de entrada,  $\mathbf{C}$ , a matriz de saída e  $\mathbf{D}$  é a matriz de transmissão direta. Os vetores coluna são:  $x(t)$ , com as variáveis

de estado,  $y(t)$  com as variáveis de saída e em  $u(t)$ , as variáveis de entrada.  $D$  é o operador de diferenciação e  $\nu$  é a ordem dessa derivada.

O diagrama de blocos associado à representação do espaço de pseudo-estado apresentada na equação 2.11 é ilustrado pela Figura 5

FIGURA 5 – Diagrama de blocos associado à representação do espaço de pseudo-estados.



Fonte – Sabatier et al. (2015)

O termo "pseudo" é dado pelo fato de modelos fracionários serem qualificados como modelos de dimensão infinita. Isso porque, para resolver uma equação diferencial de ordem fracionária (EDOF), utiliza-se um princípio de equivalência que relaciona uma EDOF a uma equação diferencial ordinária, porém com um vetor de estado dimensional infinito (J. TRIGEASSOU; N. MAAMRI, 2009).

Como em sistemas lineares de ordem inteira, um sistema de ordem fracionária pode ser modelado no domínio da frequência, a partir de uma função de transferência. Representação matemática da relação entre a entrada e a saída de um sistema, a função de transferência pode ser convertida na representação em espaço de estados. O processo inverso também pode ser realizado. A equação 2.12 ilustra como se dá essa transformação (CHEN, 1998).

$$G(s) = \mathbf{C}(s^\nu \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2.12)$$

Onde,  $G(s)$  é uma função de transferência cujos polinômios numerador e denominador são expressos em termos de  $\nu$ .  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade, de tamanho compatível para a equação 2.12. Na representação de um sistema de ordem fracionária,  $G(s)$  é uma EDOF.

O conhecimento do passado do modelo é uma informação necessária para a resolução de operações de integração e diferenciação. O "passado" do modelo se dá através de uma função complementar, ou função de inicialização, cujo objetivo é identificar as condições iniciais do sistema. Numa integral de ordem inteira, a função de inicialização resulta em uma constante. No cálculo fracionário, é atribuída uma função, de acordo com a integral ou derivada desejada (LORENZO; HARTLEY, 2001). Para que as condições iniciais sejam expressas como os valores dos estados em  $t = 0$ , então é recomendado o uso da definição de Caputo.

As condições iniciais dos sistemas de ordens fracionárias continuam sendo um problema em aberto, apesar de um grande número de contribuições, como (LORENZO; HARTLEY, 2001), (TRIGEASSOU; MAAMRI, 2011) e (J.TRIGEASSOU; N.MAAMRI, 2009). No trabalho de J.Trigeassou e N.Maamri (2009), por exemplo, a abordagem para inicialização de um sistema de EDOF usa o princípio da equivalência. Assim, substitui-se as condições iniciais de uma EDOF por um problema equivalente a uma EDO de dimensão infinita. Dessa maneira, é mais simples resolver um problema de inicialização convencional.

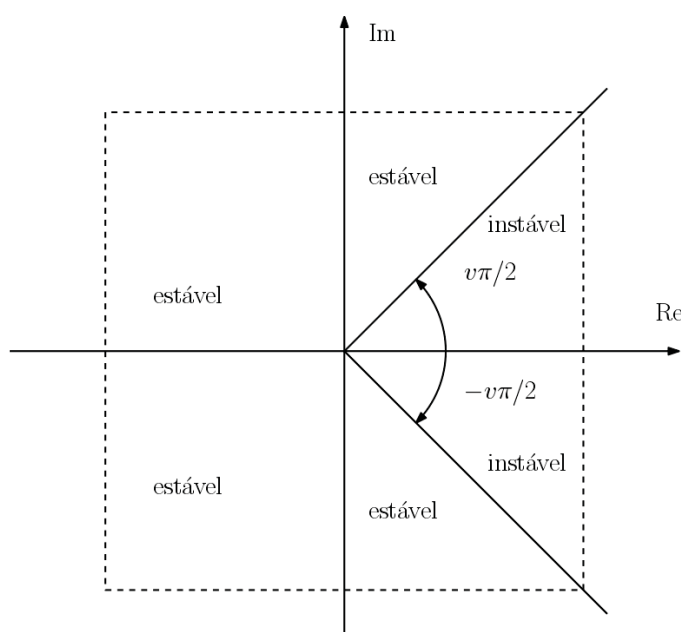
## 2.4 ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ORDEM FRACIONÁRIA

A estabilidade é uma propriedade importante na análise de sistemas dinâmicos. Além disso, sistemas devem atender a outros requisitos, como rastreamento de sinais desejados e eliminação dos ruídos (CHEN, 1998).

Para sistemas de ordem inteira, a estabilidade pode ser verificada através da localização no plano complexo dos polos da função de transferência.

Em sistemas de ordem fracionária, por exemplo, é possível ter regiões de estabilidade como a ilustrada na Figura 6. Essa é uma das principais propriedades do uso de equações de ordem fracionária para descrição de um sistema.

FIGURA 6 – Região de estabilidade de um sistema com ordem fracionária ( $0 < \nu \leq 1$ )



Segundo (MATIGNON, 1996), o sistema da equação 2.11 é estável se, e somente se  $|\text{Arg}(eig(\mathbf{A}))| > \nu\pi/2$ , onde  $eig(\mathbf{A})$  são os autovalores da matriz de estados  $\mathbf{A}$ .

Quando  $\nu = 1$ , então trata-se de um sistema de ordem inteira. Neste caso, o domínio da estabilidade é o semi-plano esquerdo complexo e a análise de estabilidade pode ser resolvido da forma convencional.

Para o caso ilustrado na Figura 6, quando  $0 < \nu \leq 1$ , então o sistema é estável se  $\exists P \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  semi-definido positivo (autovalores são maiores ou iguais a zero) para que a condição da Equação 2.13 seja atendida (SABATIER et al., 2015).

$$(\mathbf{A}^{1/\nu})\mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A}^{1/\nu}) < 0 \quad (2.13)$$

Para a Equação 2.13,  $\mathbf{A}^{1/\nu}$  é definido como  $e^{(1/\nu)\log\mathbf{A}}$ , sendo  $\mathbf{A}$  semi-definida positiva.

Um fator importante a ser levado em conta em um sistema é seu grau de estabilidade em malha fechada. Nesse contexto, a análise se dá através das margens de fase, ganho, atraso e módulo (SABATIER et al., 2015).

As margens de fase e de ganho são medidas de estabilidade relativa e indicam as mínimas modificações do modelo em malha aberta que poderiam instabilizar o sistema em malha fechada estável. Para um sistema de malha fechada estável, a margem de fase  $M_\phi$  é a menor variação de fase que tornaria o sistema de malha fechada instável. Já a margem de ganho  $M_G$  é a menor variação de ganho que tornaria o sistema de malha fechada instável.

Para o caso de sistemas de ordem fracionária, o diagrama de Bode, bem como as margens de fase e de ganho são construídos tal qual sistemas de ordem inteira. Em se tratando de estabilidade modelos de ordem fracionária, o trabalho de Matignon (1996) apresenta resultados voltados para o controle de sistemas lineares fracionários de dimensão finita. Assim, é possível verificar a estabilidade do modelo por meio da localização no plano complexo dos autovalores da matriz de estados da representação do espaço de pseudo-estado do modelo. Outro trabalho tratando desse contexto foi o de Tavazoei e Haeri (2009), onde analisou-se a estabilidade de um sistema ordinário equivalente, ao invés de investigar a estabilidade de um sistema de ordem fracionária.

## 2.5 SISTEMAS DE CONTROLE FRACIONÁRIO

Em sistemas dinâmicos e teoria de controle, um controlador de ordem fracionária é um sistema dinâmico que pode ser modelado por uma equação diferencial fracionária que contenha derivadas de ordem fracionária (MONJE et al., 2010). Dentre os métodos de controle disponíveis atualmente, o controle com equações de ordem fracionária tem sido foco de diversas pesquisas, como em (PODLUBNY, 1994), (AXTELL; BISE, 1990), (SONDHI; HOTE, 2014), (LURIE, 1994), (SAHU et al., 2016) ou (OUSTALOUP; MOREAU; NOUILLANT, 1996).

Na literatura há diversos tipos de controladores que utilizam equações de ordem fracionária. Os principais são: a) PID de Ordem Fracionária (em inglês, *Fractional Order Proportional-Integral-Derivative - FOPID*), b) Controle Integral Derivativo de Inclinação (em inglês, *Tilt-Integral-Derivative - TID*) e c) CRONE.

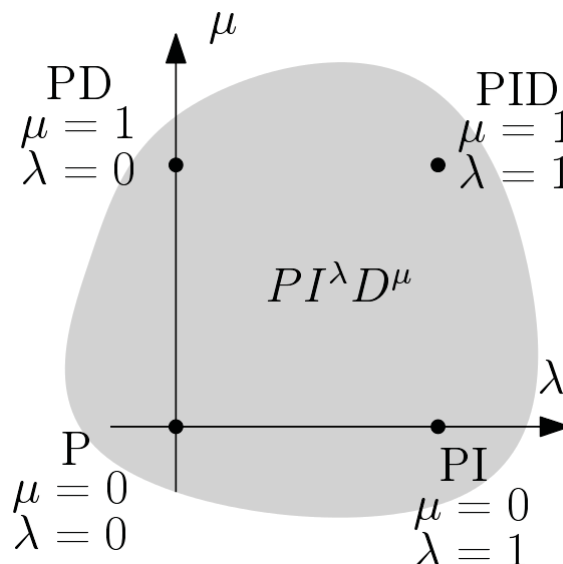
Um controlador PID com equações de ordem fracionária pode ser considerado um

PID convencional com a adição de expoentes não inteiros nas parcelas integral e derivativa do PID. Em outras palavras, o PID convencional é um caso particular do FOPID. A função de transferência do controlador é descrita pela equação (2.14):

$$G_{FOPID}(s) = K_P + K_I s^{-\lambda} + K_D s^{\mu}, (\lambda, \mu > 0) \quad (2.14)$$

Pode-se observar que para  $\lambda = \mu = 1$  tem-se o controlador PID convencional. Caso  $\lambda = \mu = 0$ , então tem-se o controlador proporcional; enquanto para  $\lambda = 0, \mu = 1$ , tem-se o controlador PD e finalmente para  $\lambda = 1, \mu = 0$  tem-se o controlador PI. Portanto, é possível afirmar que esses controladores são casos particulares de um controlador  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  (PODLUBNY, 1994). Esta afirmação pode ser descrita graficamente na Figura 7.

FIGURA 7 – Parâmetros do FOPID



Observa-se, assim, que à medida em que reduz-se o valor de  $\lambda$ , o impacto do integrador também é reduzido. Da mesma maneira  $\mu$  funciona para o diferenciador. Assim, os parâmetros  $\lambda$  e  $\mu$  podem funcionar como ajustes de “velocidade” da resposta do sistema (AXTELL; BIASE, 1990).

Diversas aplicações deste tipo de controlador podem ser encontradas na literatura atual, como em (XUE; ZHAO; CHEN, 2006), que apresenta um estudo de caso onde o controlador FOPID é usado em um sistema de motor de corrente contínua com eixo elástico, ou em (CHEN; YUAN et al., 2014), onde o controlador FOPID é proposto para regulação de uma turbina hidráulica usando algoritmos caóticos. Em (SONDHI; HOTE, 2014), o FOPID é usado para controle de carga e frequência de sistemas elétricos. Assim, as aplicações deste controlador são bastante versáteis, podendo ser utilizado em sistemas de controle de diferentes áreas da engenharia.

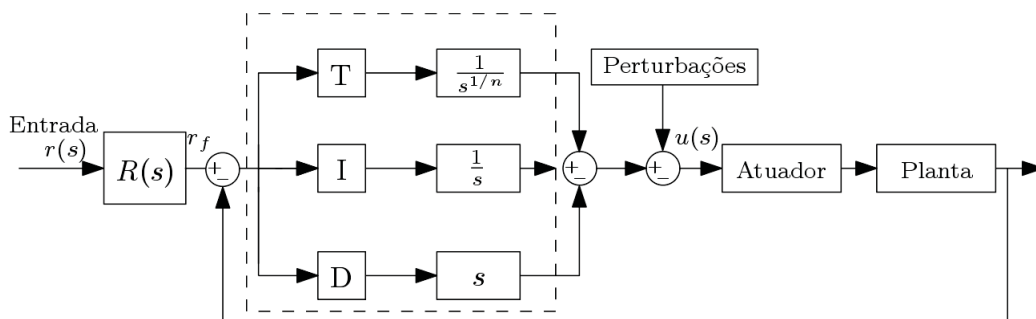
O maior desafio na implementação deste tipo de controlador é a necessidade de ajustar cinco parâmetros diferentes. Na literatura existem propostas de métodos para encontrar o ajuste

ótimo desses controladores. Em (PADULA; VISIOLI, 2011), algumas regras de ajuste são estipuladas.

Outro tipo de controlador fracionário é o TID (do inglês *tilt integral derivative*). Este controlador, de natureza integral derivativo de inclinação, é um PID com a troca do componente proporcional por uma função de transferência  $s^{-1/n}$ . Com essa mudança na função de transferência da malha, atinge-se um melhor desempenho de controle, ajuste simples dos parâmetros, melhor rejeição de perturbações e menores efeitos das variações das especificações da planta na resposta em malha fechada para certos sistemas (CHEN; PETRAS; XUE, 2009).

Seja o sistema em malha fechada, com controlador TID, apresentado na Figura 8.

FIGURA 8 – Diagrama de blocos do controlador TID.



Fonte – Adaptado de: Lurie (1994)

Nesta figura,  $R(s)$  é a malha a ser controlada,  $u(s)$  o sinal de controle,  $r_f$  é o valor de referência da saída e  $r(s)$  é o sinal de entrada.

Observa-se que a componente proporcional foi substituída por uma função de inclinação. Neste esquemático proposto por Lurie (1994), são identificados três elementos do controlador (de inclinação, de integração e derivação), ligadas em paralelo no sistema de controle. Um filtro na entrada do controlador  $R(s)$  foi incluído no projeto a fim de corrigir a resposta em malha fechada do sistema. Sua função de transferência segue a equação 2.15.

$$R(s) = s^2 + 2\omega_b s + \omega_b^2/s^2 + 5,2\omega_b s + \omega_b^2 \quad (2.15)$$

O objetivo desta proposta é obter um sistema em malha fechada com as vantagens do PID tradicional e com uma resposta próxima da ideal, fornecendo vários graus de ganho e deslocamento de fase em função da frequência. Em (LURIE, 1994), comparou-se, através de um exemplo, os controladores PID com o TID, a fim de demonstrar estas propriedades.

Em (SAHU et al., 2016), foi proposto um controlador derivativo integral de inclinação (TID) com filtro, para controle de frequência de carga de sistemas de energia interconectados de múltiplas áreas. Nesta aplicação, os parâmetros do controlador foram ajustados por um método de otimização de evolução diferencial. No trabalho de (SAIN; SWAIN; MISHRA, 2016), o

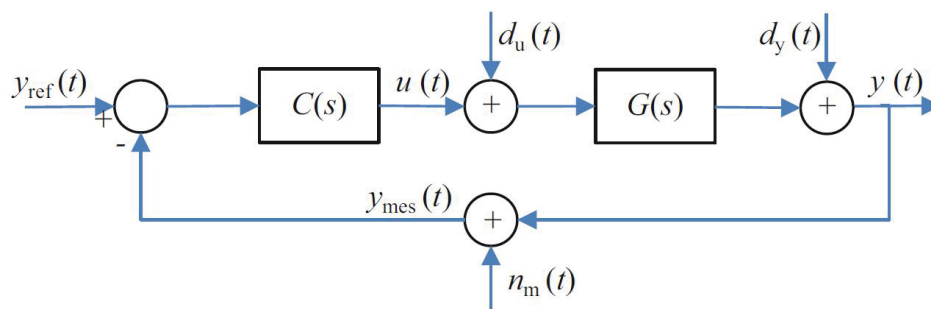
controlador TID foi proposto para um sistema de levitação magnética (para aplicação num Maglev – um tipo de trem-bala) usando algoritmos genéticos na otimização dos parâmetros.

## 2.6 CONTROLE ROBUSTO DE ORDEM NÃO INTEIRA

O CRONE, método dividido em três gerações, foi proposto por Oustaloup e Melchior (1993). Controladores robustos são aqueles que cujo projeto trata matematicamente as incertezas sobre o modelo do processo que está sendo controlado. Estes controladores garantem estabilidade ou estabilidade e desempenho especificado (desempenho robusto) mesmo na presença de erros de modelagem de limites conhecidos. Essa propriedade motivou o uso do CRONE em sistemas de controle clássicos para melhorar seu desempenho (CHEN; PETRAS; XUE, 2009).

O CRONE é baseado na configuração de realimentação ilustrada pela Figura 9.

FIGURA 9 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de *feedback* negativo de unidade de saída.



Fonte – Sabatier et al. (2015)

Nesta figura,  $G(s)$  é a função de transferência, modelo linear do processo que está sendo controlado,  $u(t)$  o sinal de controle,  $y(t)$  o sinal de saída,  $y_{mes}(t)$  o valor medido na saída do processo,  $C(s)$  é o controlador linear que fornece o esforço de controle  $u(t)$ ,  $y_{ref}(t)$  é o valor de referência da saída  $y(t)$ ,  $d_u(t)$  é um distúrbio na entrada da planta,  $d_y(t)$  é uma perturbação na saída da planta, enquanto  $n_m(t)$  é um ruído de medição (normalmente de alta frequência).

No CRONE, as incertezas (ou perturbações) da planta são levadas em conta independente de sua natureza, sejam elas estruturadas (paramétricas) ou não. No presente trabalho, a primeira geração do CRONE foi a estratégia de controle escolhida, portanto apenas ela é abordada e formulada. Contudo, três métodos foram desenvolvidos, onde a cada geração o campo de aplicação foi ampliado.

Os primeiros parâmetros de projeto do CRONE são a margem de fase e a frequência de cruzamento. Na primeira geração de controle CRONE, propõe-se o uso de um controlador cuja margem de fase  $M_\phi$  varia unicamente com os parâmetros do modelo (e não com o controlador, por exemplo). Outra propriedade para o uso da primeira geração desse controlador é que a frequência de cruzamento de ganho de malha aberta  $\omega_{cg}$  esteja dentro de uma banda de frequência de

comportamento assintótico da planta. A banda de comportamento assintótico de uma planta é definida pelo intervalo de frequências  $[\omega_A, \omega_B]$  em torno do  $\omega_{cg}$  pretendido. Dentro deste intervalo, o primeiro controlador CRONE proposto segue função de transferência fracionária de uma ordem  $n \in \mathbb{R}$  e com  $C_0 \in \mathbb{R}$ , indicada na equação 2.16. Nesse intervalo, as variações da planta se comportam como ganhos.

$$C_F(s) = C_0 s^n \quad (2.16)$$

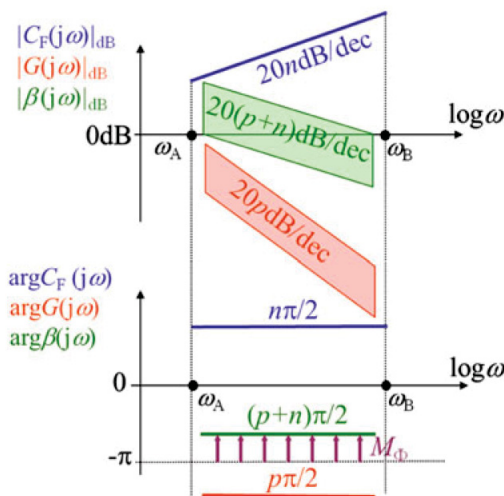
É interessante notar que para a segunda geração do CRONE, com uma função de transferência mais complexa, a frequência de cruzamento de ganho de malha aberta  $\omega_{cg}$  pode estar fora de uma banda de frequência de comportamento assintótico da planta. A terceira geração, além desta propriedade, permite o tratamento de incertezas mais gerais do que apenas perturbações semelhantes a ganhos. Isto porque a terceira geração do CRONE é de ordem  $n \in \mathbb{C}$  (SABATIER et al., 2015).

A margem de fase  $M_\phi$  constante do controlador para o comportamento assintótico da planta, de ordem  $p$ , é dada pela equação 2.17.

$$M_\phi = (n + p + 2) \frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

A Figura 10 apresenta a robustez da margem de fase de um CRONE da primeira geração para uma fase constante  $n\pi/2$ . Em azul, tem-se um corte do diagrama de Bode do controlador. Em laranja, da planta a ser controlada e em verde da planta com o controle. A margem de fase do controlador é indiferente às variações de frequência e de ganho da planta dentro da faixa de frequência  $\omega_A$  e  $\omega_B$ .

FIGURA 10 – Robustez da margem de fase do CRONE primeira geração



A fim de que o controlador seja bipólio, ou seja, o número de polos seja igual ao de zeros, a equação 2.16 deve ser alterada. Da mesma maneira, sua banda deve ser levada em conta na função de transferência do modelo. Para isso, ela é deslocada para  $[\omega_l, \omega_h]$ , onde  $\omega_l < \omega_A$  e  $\omega_h < \omega_B$ . O controlador então segue a equação 2.18.

$$C_F(s) = C_0 \left( \frac{\omega_l}{\omega_h} \right)^{n/2} \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_l}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right)^{n/2} \quad (2.18)$$

Porém, ainda era necessário corrigir o erro de estado estacionário e o nível de sensibilidade do controle. Para tanto, foram incluídos um integrador de ordem limitada  $n_I$  e um filtro passa-baixa de ordem  $n_F$ , de maneira que o CRONE passou a seguir então a equação 2.19

$$C_F(s) = C_0 \left( 1 + \frac{\omega_I}{s} \right)^{n_I} \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_l}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right)^n \frac{1}{(1 + s/\omega_F)^{n_F}} \quad (2.19)$$

Onde a ordem do filtro passa-baixas  $n_F$  deve ser positiva e preferencialmente  $n_F \geq 1$ , assegurando a sensibilidade desejada do sinal.

Uma vez definida a frequência de corte de malha aberta  $\omega_{cg}$ , definem-se  $\omega_l$  e  $\omega_h$ , que são as frequências de banda limitada do operador de diferenciação fracionária real. De acordo com as especificações de tempo e de imunidade a ruídos, respectivamente,  $\omega_l$  e  $\omega_F$  definem a banda da frequência de ganho unitário de malha aberta.  $\omega_l = \omega_{cg}/\alpha_I$  e  $\omega_F = \alpha_F \omega_{cg}$ , onde  $\alpha_I$  e  $\alpha_F \in [1, 10]$ . Todas as frequências devem ser definidas dentro do intervalo  $[\omega_A, \omega_B]$ .

A partir das definições dos parâmetros iniciais, é possível calcular  $n$  e  $C_0$ , segundo as Equações 2.20 e 2.21.

$$n = \frac{-\pi + M_\phi - \arg G(j\omega_{cg}) + n_F \arctan \frac{\omega_{cg}}{\omega_F} + n_I \left( \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega_{cg}}{\omega_l} \right)}{\arctan \frac{\omega_{cg}}{\omega_l} - \arctan \frac{\omega_{cg}}{\omega_h}} \quad (2.20)$$

$$C_0 = \frac{\left( 1 + \frac{\omega_{cg}^2}{\omega_F^2} \right)^{n_F/2}}{|G(j\omega_{cg})| \left( \frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{n/2} \left( 1 + \frac{\omega_l^2}{\omega_{cg}^2} \right)^{n_I/2}} \quad (2.21)$$

Para que o controlador da Equação 2.19 possa ser implementado, foi proposta uma aproximação (OUSTALOUP, 1981), que torna a equação de ordem fracionária numa função de transferência racional, descrita pela Equação 2.22:

$$C_R = C_0 \left( 1 + \frac{\omega_I}{s} \right)^{n_I} \prod_N \frac{1 + \frac{s}{\omega_i'}}{1 + \frac{s}{\omega_i} \left( \frac{s}{\omega_F} \right)^{n_F}} \quad (2.22)$$

Em que:

- $\omega'_1 = \sqrt{\eta}\omega_l$
- $\omega_1 = \alpha\omega'_1$
- $\omega'_{i+1} = \alpha\eta\omega'_i$
- $\omega_{i+1} = \alpha\eta\omega_i$
- $\alpha = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{\frac{n}{N}}$
- $\eta = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{\frac{1-n}{N}}$

Um exemplo explorado por (SABATIER et al., 2015) foi implementado através da *toolbox* CRONE, compatível com o MATLAB®. Para a verificação do modelo neste trabalho, o mesmo exemplo foi reproduzido. A *toolbox* CRONE é gratuita e disponível para *download* no endereço [cronetoolbox.ims-bordeaux.fr/](http://cronetoolbox.ims-bordeaux.fr/).

### ■ Exemplo 3.1:

Seja um sistema dinâmico com função de transferência dada pela equação 2.23:

$$G_{ex}(s) = \frac{k}{s(1 + \tau s)} \quad (2.23)$$

Sendo  $k = 10$  e  $10^3/3 \leq \tau \leq 3 \cdot 10^3$ . Os parâmetros de projeto são: frequência de cruzamento  $\omega_{cg}$  de aproximadamente 5 rad/s, margem de fase  $M_\phi$  de  $50^\circ$ , controlador com ação integral e dinâmica compatível com um filtro passa baixa.

O diagrama de Bode da planta  $G(s)$  é apresentado na Figura 11, para  $\tau = 1000$ ,  $\tau = 1000/3$ ,  $\tau = 3 \cdot 1000$ . Nesta figura, tem-se o gráfico para o valor nominal do sistema ( $G_{nom}(s)$ ) e seus limites máximos e mínimos.

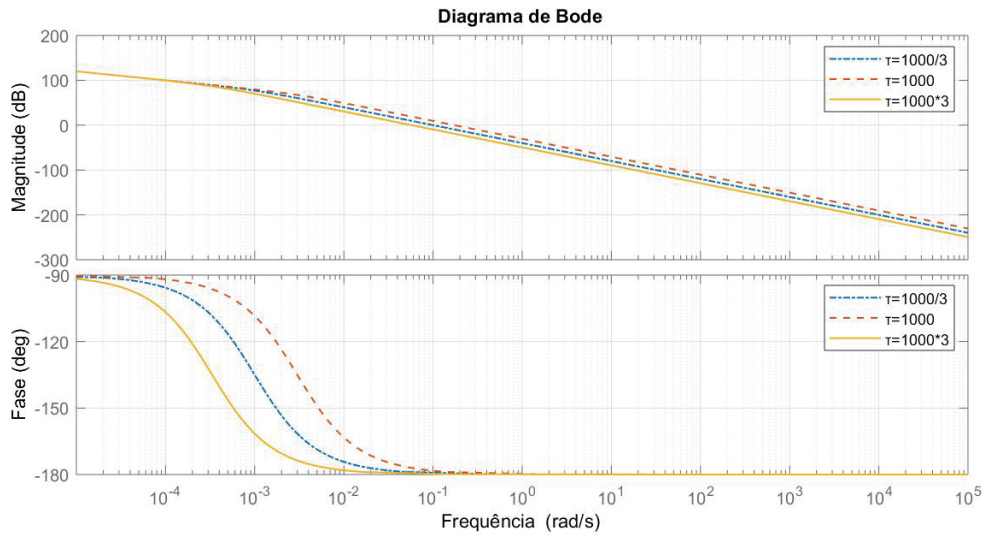
Para uma frequência próxima de 5 rad/s, a incerteza da resposta em frequência da planta é de 19,1 dB para a magnitude e  $0,03^\circ$  para a fase.

Usando a *toolbox* CRONE, insere-se os dados da planta  $G_{nom}(s)$  a ser controlada, bem como os valores de margem de fase e  $\omega_{cg}$  requeridas para o projeto do controlador. A taxa de diminuição do ganho de magnitude é calculada pela Equação 2.17:

$$50 = (n + p + 2)90 \therefore n + p = -1,44$$

Tendo então o valor de incerteza da magnitude da planta (19,1 dB) e a taxa de diminuição do ganho de magnitude (-1,44), o cálculo do intervalo  $[\omega_A, \omega_B]$  é dado pela Equação 2.24:

$$20 \log_{10} \frac{\omega_A}{\omega_B} = \left| \frac{19,1}{n + p} \right| \therefore \frac{\omega_A}{\omega_B} = 4,62 \quad (2.24)$$

FIGURA 11 – Diagrama de Bode de  $G(s)$  para  $\tau = 1000$ ,  $\tau = 1000/3$ ,  $\tau = 31000$ 

Assim,  $\omega_A = \frac{\omega_{cg}}{\sqrt{4,62}}$  e  $\omega_B = \omega_{cg}\sqrt{4,62}$ , tendo então  $[\omega_A; \omega_B] = [2,33; 10,7]$ . As frequências  $\omega_l$  e  $\omega_h$  são definidas a partir desse intervalo, sendo:  $\omega_l = \omega_A/10$  e  $\omega_h = 10\omega_B$ .

Define-se  $n_I$  e  $n_F$  como 1 e  $\omega_I = \omega_{cg}/40$ ,  $\omega_F = 40\omega_{cg}$ . Com esses valores, a partir das Equações 2.20 e 2.21, tem-se  $n = 0,624$  e  $C_0 = 368$ , gerando assim um controlador, segundo a Equação 2.19, dado por 2.25:

$$C_{Fex} = 368 \left(1 + \frac{0,125}{s}\right) \left(\frac{1 + \frac{s}{0,233}}{1 + \frac{s}{107}}\right)^{0,624} \frac{1}{1 + \frac{s}{200}} \quad (2.25)$$

Após a inserção dos dados da planta a ser controlada, da escolha do CRONE a ser usado (primeira, segunda ou terceira geração), a *toolbox* CRONE gera um bloco de controle no ambiente *Simulink*, ilustrado na Figura 12. A estrutura do controlador é feita a partir de blocos com funções de transferência de ordens inteiras, arranjados em paralelo. Isto porque o controlador de ordem fracionária é representado pela aproximação de Oustaloup (1981), através de funções de ordem inteira. O número de células, os valores de aproximação e a ordem das funções resultam do algoritmo da *toolbox*, dependem da ordem  $n$ , conforme a Equação 2.22.

Para a definição da função aproximada,  $C_R$ , são calculados  $\alpha$  e  $\eta$ , sendo então:

$$\alpha = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{\frac{n}{N}} = \left(\frac{107}{0,233}\right)^{0,624/4} = 2,61$$

$$\eta = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l}\right)^{\frac{1-n}{N}} = \left(\frac{107}{0,233}\right)^{1-0,624/4} = 1,78$$

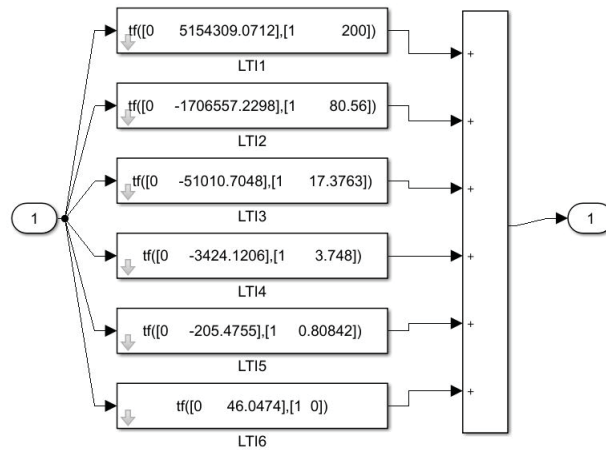
Desses dados, foi calculada a Equação 2.26, uma aproximação da Equação 2.25 usando 2.22:

$$C_{Rex} = 368 \left( 1 + \frac{0,125}{s} \right) \left( \frac{1 + \frac{s}{0,3109}}{1 + \frac{s}{0,8113}} \right) \left( \frac{1 + \frac{s}{1,4444}}{1 + \frac{s}{3,7691}} \right) \left( \frac{1 + \frac{s}{6,7103}}{1 + \frac{s}{17,5107}} \right) \left( \frac{1 + \frac{s}{31,1747}}{1 + \frac{s}{81,3510}} \right) \frac{1}{1 + \frac{s}{200}} \quad (2.26)$$

Na Equação 2.26, o filtro e o integrador presentes em  $C_{Rex}$  são os mesmos da Equação 2.25, presentes em  $C_{Fex}$ . Sendo  $N = 4$  o número de fatores requeridos no produto da aproximação (neste exemplo), então a forma racional do CRONE consiste em 6 blocos: um para cada um dos fatores de aproximação, um para o filtro e um para o integrador.

Usando as ferramentas do *Simulink*, implementa-se o esquemático apresentado na Figura 9, substituindo o bloco " $C(s)$ " pelo bloco de controle da Figura 12.

FIGURA 12 – Forma paralela do controlador CRONE projetado



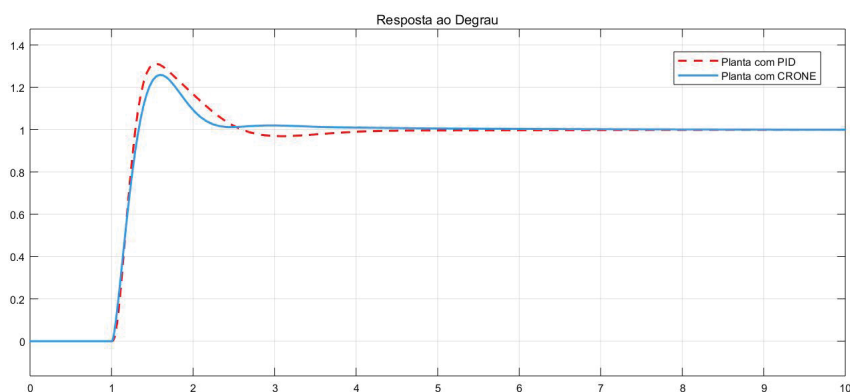
Na Figura 12, é notável que os parâmetros das funções de transferência não coincidem com os da Equação 2.26. Isto porque a aproximação precisou ser ajustada, de maneira que os blocos com as funções de transferência fossem somados, para que a ligação seja em paralelo.

Para fins de comparação, assumamos um controlador PID dado pela equação 2.27 conforme (SABATIER et al., 2015).

$$C_{PID}(s) = 833 \left( 1 + \frac{0.5}{s} \right) \left( \frac{1 + s/2.84}{1 + s/8.8} \right)^2 \frac{1}{1 + s/50} \quad (2.27)$$

As respostas ao degrau para o sistema em malha fechada com controlador CRONE e PID são apresentadas na Figura 13. Com os resultados obtidos, foi possível constatar que: o desempenho global do CRONE teve vantagem sobre o PID, apresentando tempo de assentamento e sobre-sinal menores. ■

FIGURA 13 – Resposta ao degrau para controladores PID e CRONE



## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, foram apresentadas as principais definições do cálculo fracionário, sistemas descritos por equações de ordem fracionária, para compreensão de sistemas de controle fracionário e suas vantagens. Na literatura, há diferentes métodos de controle fracionário, cada um apresentando suas vantagens e peculiaridades.

Controladores de ordem fracionária fornecem mais parâmetros de ajuste que permitem melhorar a robustez do controlador, ou seja um desempenho satisfatório de estabilidade, mesmo com as incertezas do modelo.

O CRONE da primeira geração pode ser implementado para plantas com variação de magnitude e fase constantes. Com a evolução da metodologia do CRONE, sua aplicação é possível mesmo quando a fase da planta varia em relação à frequência.

Como observado no exemplo apresentado, é um método bastante eficaz e que, uma vez munido dos parâmetros da planta e desejados para o controle, sua implementação é bastante simples. A *toolbox* disponibilizada pela equipe de pesquisa CRONE é prática e intuitiva.

### 3 CONTROLE DE TENSÃO EM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Neste capítulo, são apresentadas algumas definições e princípios de funcionamento de um inversor de tensão e seus sistemas de controle. Além disso, são abordados o papel desses equipamentos na nova realidade do sistema elétrico de potência, bem como alguns de seus métodos de controle em diferentes níveis de conversão.

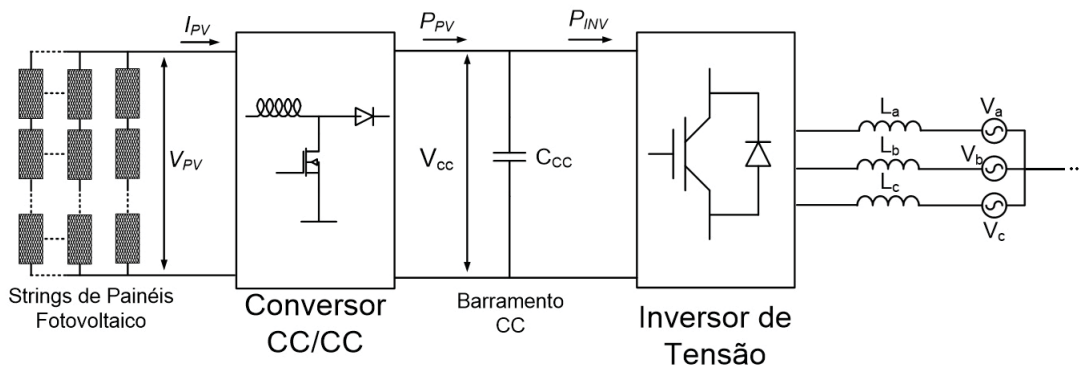
O capítulo é dividido em 3 seções, onde trata-se: do contexto e implementação das usinas FV em sistemas ativos de distribuição, das malhas de controle aplicadas na conexão dessas usinas e enfim são apresentadas as considerações finais do capítulo.

#### 3.1 CONEXÃO DE USINAS FV COM A REDE ELÉTRICA

A energia renovável, na forma de usinas FV e Eólicas, vem sendo cada vez mais conectadas ao sistema elétrico de potência, sobretudo na forma de geração distribuída (HASSAN; ABIDO, 2010). Neste cenário, estão presentes os inversores de tensão e seus sistemas de controle, que tem como objetivo garantir condições de operação adequadas e confiáveis para estes sistemas. Em outras palavras, os conversores de energia, responsáveis pela conexão dessas usinas com a rede, e o controle de tensão e potência reativa realizado neles tem importante papel na manutenção da estabilidade do sistema, como citado na Figura 3.

Os principais componentes de um sistema de geração de energia elétrica a partir de fonte FV são ilustrados na Figura 14.

FIGURA 14 – Diagrama do sistema de geração fotovoltaico.



Na Figura 14, tem-se à esquerda, os strings de painéis FV representados por um nível de tensão e de corrente contínua ( $V_{PV}$  e  $I_{PV}$ ). O conversor CC/CC utiliza técnicas de controle para extrair a máxima potência desses painéis em função dos valores de corrente ( $I_{PV}$ ) e de tensão ( $V_{PV}$ ). Na direita está o inversor de tensão conectado à rede CA (de Corrente Alternada), que utiliza técnicas de controle vetorial para injetar a potência ativa e reativa na rede CA. A potência gerada pelos painéis fotovoltaicos é transferida para o barramento CC ( $P_{PV}$ ), e para que a tensão

do barramento permaneça constante a potência ativa que o inversor injeta na rede ( $P_{INV}$ ) deve ser igual à potência gerada nos painéis, salvo as perdas nos conversores.

O controle do conversor CC/CC é realizado a partir de um rastreamento do ponto de potência máxima (MPPT). A partir desse conversor, o sistema passa a proporcionar uma injeção de potência definida, de acordo com a tensão de referência da rede.

Existem diferentes métodos de rastreamento do ponto de máxima potência. Alguns, conhecidos como métodos indiretos, usam valores estimados de injeção de potência. Já os métodos diretos usam os valores medidos de potência e corrente injetados no sistema. Entre os diretos, pode-se citar o método da diferenciação, por exemplo. Esse método usa pontos de potência máxima e mínima, encontrados a partir da derivada da equação de potência (produto entre tensão e corrente) (XIAO et al., 2007). Na técnica *feedback* de corrente, usa-se como o sinal de controle a corrente de saída do painel fotovoltaico, para regular a saída de energia do painel fotovoltaico (FERNÁNDEZ et al., 2008).

Um dos principais métodos diretos é o Perturba e Observa (P&O), em que se usa uma pequena variação de tensão (perturbação), para posterior verificação da variação da potência (observação). Se a variação de potência for positiva, as variações de tensão seguem positivas. Caso contrário, a perturbação na tensão passa a ser negativa (SALAS et al., 2006).

Uma vez realizada a conversão CC/CC, a conversão de energia em Corrente Contínua para Corrente Alternada é requerida para que a conexão das fontes de energia CC com a rede elétrica seja segura. Para isso, é necessário que na saída do conversor CC/CA a tensão, frequência, forma de onda e amplitude sejam estáveis. Do mesmo modo, a tensão fornecida deve ser independente de pequenas alterações na entrada CC, da demanda de potência das cargas ou pequenas mudanças na rede CA à qual ele está conectado (POMILIO; PAREDES; DECKMANN, 2013).

Devido à natureza estocástica da entrada da geração FV (irradiação solar e temperatura) é necessário suavizar o fluxo de energia na entrada do inversor, através do armazenamento de energia (SUN et al., 2011). Para isso, entre os conversores CC/CC e CC/CA, é instalado um banco de capacitores no barramento CC.

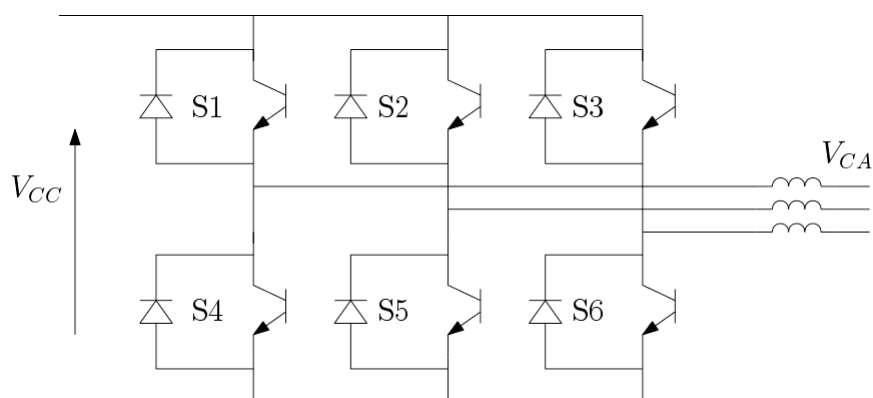
A tensão CC da entrada do inversor pode ser controlada a partir do carregamento e descarregamento de potência ativa nesses capacitores. Quando há sobretensão e é necessário injetar mais potência ativa, então o banco capacitores é descarregado, para suprir a tensão demandada. Da mesma maneira, ao sinal de subtensão, carrega-se o banco de capacitores (SUAREZ SOLANO, 2015). Em alguns casos, o banco de capacitores é substituído por um banco de baterias, como os exemplos expostos em (SUN et al., 2011), (OZDEMIR; KAVASLAR, 2009) e (YU; HSU, 2012).

O princípio de funcionamento do conversor CC/CA e sua estrutura variam de acordo com o tipo de inversor implementado. Por exemplo, um inversor pode ser do tipo fonte de tensão,

fonte de corrente, fonte de tensão com saída quadrada, com saída quase quadrada, etc. Sua classificação também se dá pela topologia da saída: monofásicos, trifásicos a três fios, trifásicos a quatro fios e inversores multiníveis. Para cada tipo, uma estrutura diferente é implementada.

Neste trabalho, o conversor estudado é o inversor de tensão com forma de onda senoidal, operando como fonte de corrente (pois está conectado à rede de distribuição). Sua estrutura está ilustrada na Figura 15. Nota-se, do esquemático da figura, que o funcionamento desse tipo de inversor se dá a partir da condução em seus interruptores superiores e inferiores. Os interruptores conectados entre si em cascata nunca funcionam ao mesmo tempo: se S1 está conduzindo, S4 obrigatoriamente não conduz; caso S2 esteja conduzindo, S5 não conduz; e a mesma relação se dá entre S3 e S6. Cada par de condutores, nessa configuração, fornece a tensão para uma fase (DI BERNARDO NETO, 2018).

FIGURA 15 – Diagrama do Inversor Trifásico Tipo Fonte de Tensão



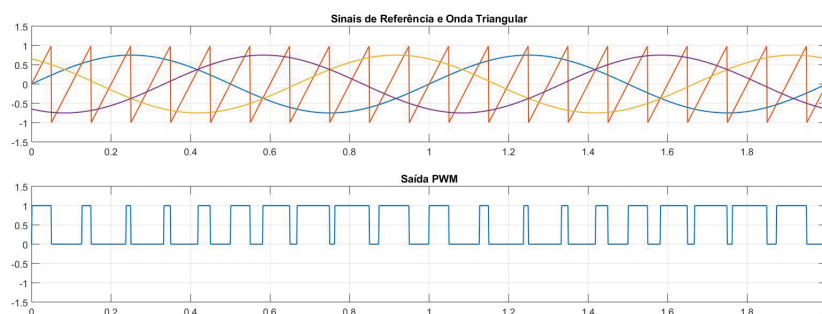
O fluxo de energia em cada fase da saída do conversor é controlado pela relação de ligação ou desligamento das chaves, ciclo de trabalho. Para que a forma de onda das correntes seja senoidal, variam-se os ciclos de trabalho sinusoidalmente com o tempo, empregando técnicas de Modulação por Largura de Pulso (PWM) (HOLTZ, 1994).

Assim, a partir da variação da largura de um pulso retangular de período fixo, é possível obter-se um sinal em baixa frequência (DI BERNARDO NETO, 2018). Uma das formas mais comuns de modulação com chaves eletrônicas é comparando um sinal senoidal e uma onda triangular de frequência alta, para obtenção de um sinal retangular. A Figura 16 ilustra o funcionamento dessa modulação.

A onda triangular usada na modulação tem metade da frequência dos pulsos retangulares apresentados na Figura 16. O chaveamento (ciclo de trabalho) define essa frequência (DI BERNARDO NETO, 2018).

As componentes harmônicas são um inconveniente associado à modulação PWM. As harmônicas são componentes senoidais, com frequência múltipla da frequência fundamental da função, e sua presença pode causar distúrbios no sistema. O grau em que essas componentes podem ser prejudiciais é determinado pela suscetibilidade da carga (IEEE, 1993). Para reduzir

FIGURA 16 – Modulação PWM



esse efeito, conecta-se um filtro *LCL* à saída do inversor.

O controle de tensão se dá, então, em diferentes etapas da conversão de tensão desde os painéis fotovoltaicos até a conexão com a rede. O foco deste trabalho é o controle realizado no barramento CC entre as duas etapas de conversão.

### 3.2 MALHAS DE CONTROLE PRESENTES EM UM CONVERSOR DE TENSÃO

Nesta seção são abordadas as malhas de controle de um inversor de tensão presentes num sistema elétrico de potência.

O controle no inversor é realizado em duas etapas: controle através da injeção de corrente reativa e controle através da tensão do barramento CC. O regulador de tensão é a parte do sistema encarregada desse controle. (LI et al., 2011).

Na saída do inversor é fornecida para o sistema uma potência aparente,  $S$ , medida em Volt-Ampères. Essa potência é formada por duas componentes, uma real, a potência ativa  $P$ , medida em watts, e uma imaginária, a potência reativa  $Q$ , medida em Volt-Ampères reativo.

Na entrada do inversor, o controle de tensão é realizado pela injeção de corrente ativa, através do descarregamento do banco de capacitores. A implementação do banco de capacitores para o armazenamento é capaz de melhorar a produção de energia, especialmente na presença de condições inadequadas (SUN et al., 2011).

O controle no barramento CC é implementado usando do conceito de limites de carga e descarga do banco de capacitores. Assim, a energia é fornecida por fontes individuais de maneira distribuída, induzindo às alterações desejadas no nível de tensão do barramento e realizando a comunicação entre as interfaces de geração e armazenamento (SUN et al., 2011).

O controle por injeção de corrente, conhecido também por método de controle vetorial, é realizado através das correntes de injeção de potência ativa e reativa (LI et al., 2011). Como a corrente de potência ativa é definida pelo MPPT, a maneira mais viável de alterar a tensão de saída no inversor é injetando corrente de potência reativa. Assim, o controle de potência reativa se dá através do fator de potência da geração.

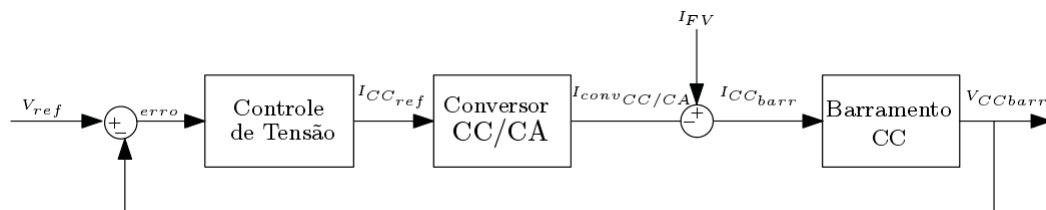
Para isso, é necessário transformar as três correntes de fase (referências providas da rede) em correntes de coordenadas síncronas (correntes direta e em quadratura, respectivamente  $i_d$  e  $i_q$ ). Essa operação é feita através das transformadas de Clarke e de Park.

A transformada de Clarke representa o sistema trifásico em um sistema bifásico equivalente, enquanto a transformada de Park transforma um sistema bifásico em um sistema estacionário, a fim de que o sistema girante seja estacionário em relação às coordenadas girantes da rede (CHATTOPADHYAY; MITRA; SENGUPTA, 2011).

Dessa maneira,  $i_q$  e  $i_d$  são comparadas com suas referências e assim compensadas. O controle de tensão do barramento CC fornece referência de  $i_d$ . A partir desses dados, é definido o valor de corrente direta a ser injetada na rede, bem como a potência ativa injetada ou absorvida da rede pelo inversor. Enquanto isso, a corrente em quadratura  $i_q$  é usada para o ajuste do fator de potência do inversor.

O projeto do inversor e de seu sistema de controle é apresentado na Figura 17.

FIGURA 17 – Diagrama de blocos da estratégia de controle do inversor trifásico.



É importante notar que as duas malhas de controle estão conectadas entre si e que uma depende da saída da outra. Assim, o controle de tensão por corrente ativa deve ser mais demorado do que o de corrente reativa, para que a saída do primeiro não cause distúrbios na entrada do segundo. Outro ponto importante para o projeto dos controles de corrente e tensão é a modelagem do inversor, dos medidores, sensores e da modulação PWM usada.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos da conversão eletrônica de energia fotovoltaica usados para a aplicação dos exemplos expostos no capítulo 4. Foram citados os diferentes níveis de controle de tensão usados nessa conversão: o controle no conversor CC/CC, o de injeção de corrente reativa no inversor e o controle de injeção de corrente ativa, no barramento CC.

A seguir, um exemplo de aplicação do controle de corrente ativa no barramento CC é exposto.

## 4 APLICAÇÃO DO CRONE: MINIRREDE DO DELT E MINIRREDE UFPR

Neste capítulo, aponta-se o contexto do projeto da minirrede da UFPR, onde a minirrede do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR (DELT) está inserida. Informações como potência instalada, número de células, número de inversores, potência dos inversores e diagrama unifilar são expostas.

Além disso, são apresentados dois exemplos de aplicação do CRONE no controle de tensão no barramento CC, por meio de simulação computacional. O primeiro exemplo trata da minirrede do DELT, enquanto que o segundo trata da minirrede UFPR. O projeto de controle bem como os resultados de simulação são expostos.

O capítulo é dividido em 6 seções: na primeira, apresenta-se a minirrede UFPR, sua constituição, suas características físicas e as plantas de geração distribuída nela instaladas. Na seção 4.2, sua modelagem computacional no ambiente *Simulink* é apresentada. Na seção 4.3, trata-se da minirrede do DELT, enumerando suas características e valores nominais. Em seguida, sua modelagem matemática, para posterior projeto e aplicação do CRONE, apresentados na seção seguinte. O capítulo termina com a implementação do CRONE na minirrede UFPR.

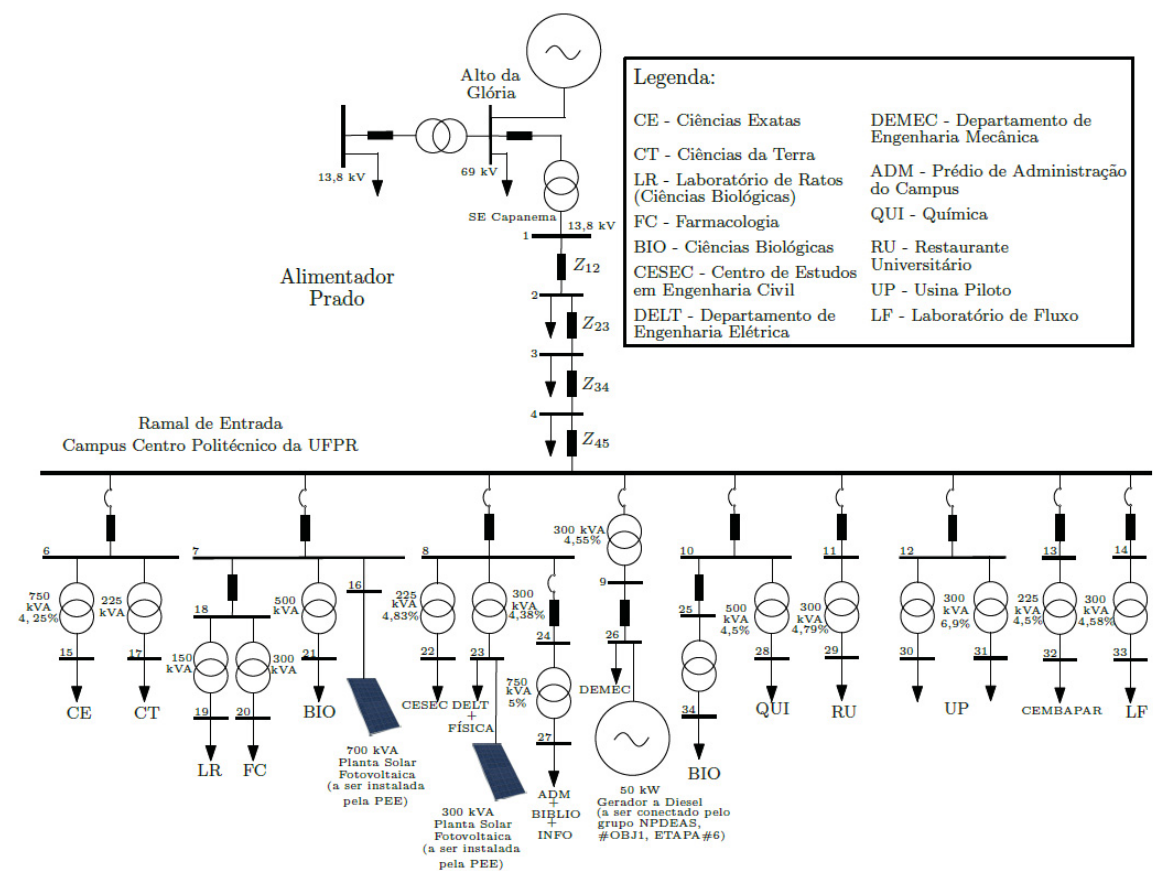
### 4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MINIRREDE UFPR

A minirrede do campus Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba (Figura 18), é constituída por 9 alimentadores (compreendendo, aproximadamente, 3 km de cabos) em 13,8 kV e 16 transformadores de 13,8/0,220 kV na configuração  $\Delta$ -Y. A interligação dessa minirrede com a rede de 13,8 kV da COPEL Distribuição S.A. e o resto do sistema elétrico interligado é feita através de um alimentador de distribuição chamado Prado (de aproximadamente 5 km de extensão) e a Subestação Capanema, em Curitiba/PR.

Além disso, a minirrede conta com um sistema de monitoramento meteorológico para medição de temperatura, radiação solar, dentre outras grandezas (localizado no DELT), e de monitoramento elétrico constituído por medidores convencionais, analisadores de qualidade de energia e unidades de medição fasorial sincronizada próprias para redes de distribuição, as chamadas micro-PMUs (ou simplesmente  $\mu$ PMUs), que possuem resolução de microssegundos e precisão de medição angular de fasores (tensão e corrente) na faixa de milgraus. Mais detalhes do projeto podem ser consultados em (OLIVEIRA et al., 2020).

Em relação ao diagrama unifilar apresentado na Figura 18, foram instaladas duas  $\mu$ PMUs no DELT e uma terceira unidade no Campus das Agrárias da UFPR, a cerca de 8 km do Campus Centro Politécnico. As informações coletadas da minirrede em tempo real são encaminhadas para a Central de Operação e Monitoramento da Minirrede UFPR (COMMMP), localizada no Laboratório de Geração Distribuída, no DELT. Os dados provenientes do sistema

FIGURA 18 – Diagrama Unifilar da Minirrede UFPR.



\* A relação de todos os transformadores é 13,8/0,22 kV

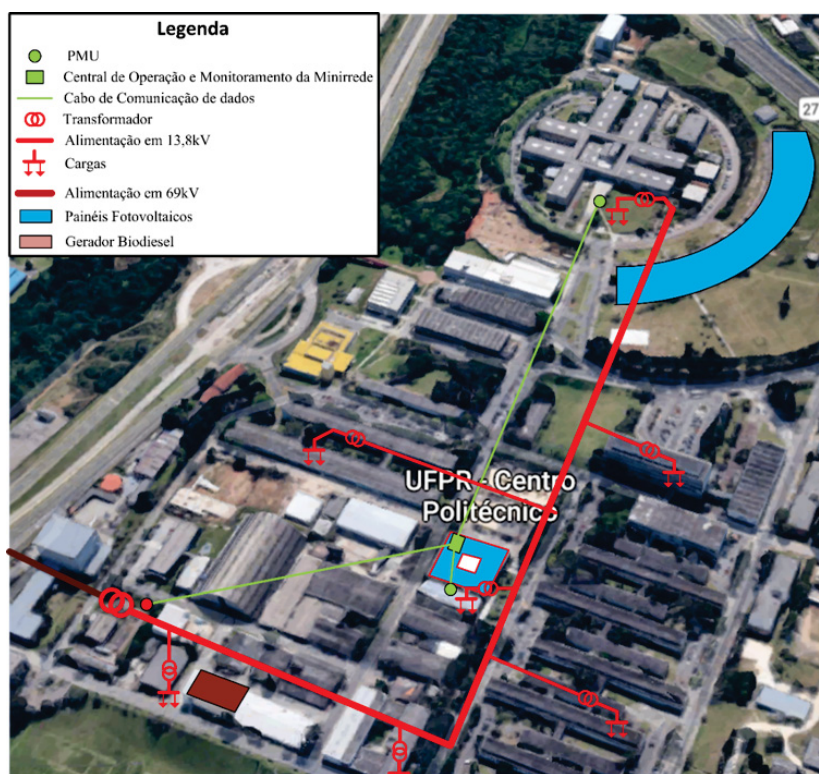
Fonte – Projeto Desenvolvimento de Minirredes com Fontes de Energia Renováveis não Convencionais - PD 2866-0470/2017. ANEEL / COPEL-DIS

de monitoramento são captados e levados pela rede para a COMMP para serem guardados para realização de estudos off-line e utilizados para tomadas de decisão de operação em tempo real. Tais dados são usados para a modelagem computacional da minirrede. Parte deles é apresentada em tempo real em monitores localizadas na COMMP e também via WEB.

Duas plantas de geração solar FV estão sendo implantadas no campus Centro Politécnico da UFPR: uma no estacionamento do Setor de Ciências Biológicas, e outra no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT). A vista aérea, com o projeto da minirrede, a localização do ponto de interconexão, exemplo de algumas cargas e transformadores, é ilustrada pela Figura 19.

A primeira planta, denominada FV-BIO, localizada na barra 16 do diagrama unifilar da Figura 18, tem potência instalada aproximada de 1100 kWp. Na vista aérea apresentada pela Figura 19, observa-se o prédio do Setor de Ciências Biológicas da UFPR e, ao lado, sobre o estacionamento, as futuras instalações. Esta planta FV-BIO conta com um transformador 13,8/0,600 kV de 1100 kWp, 1,2 MVA, 6 inversores de frequência CC/CA de 175 kW, cada um alimentado por 216 módulos fotovoltaicos de 400 Wp.

FIGURA 19 – Vista Aérea da Minirrede UFPR.



Fonte – Projeto Desenvolvimento de Minirredes com Fontes de Energia Renováveis não Convencionais - PD 2866-0470/2017. ANEEL / COPEL-DIS

A segunda, denominada planta FV-DELT, tem potência instalada aproximada de 66 kWp e é conectada à barra 23, constituindo uma minirrede que possibilitará a operação no modo ilhado de parte do DELT. A geração nessa planta tem saída em 380 V nos 3 inversores de 20 kW e conta com um transformador 0,220/0,400 kV de 150 kVA e três inversores de tensão CC/CA de 20 kW cada.

A minirrede UFPR contará ainda com um gerador síncrono de potência de 50 kW com turbina térmica alimentada por biodiesel (localizada na barra 26 da Figura 18).

#### 4.2 MODELAGEM DA MINIRREDE UFPR

Para a implementação da minirrede, foi utilizado o pacote computacional *Simscape Electrical*, também conhecido como *SimpowerSystems*, da *Mathworks*. Este pacote, desenvolvido em colaboração com a *Hydro-Quebec*, trabalha na plataforma *Matlab/Simulink* e contém uma biblioteca para modelagem e simulação de sistemas elétricos de potência. Portanto, os modelos utilizados se referem aos pacotes disponíveis nesta plataforma.

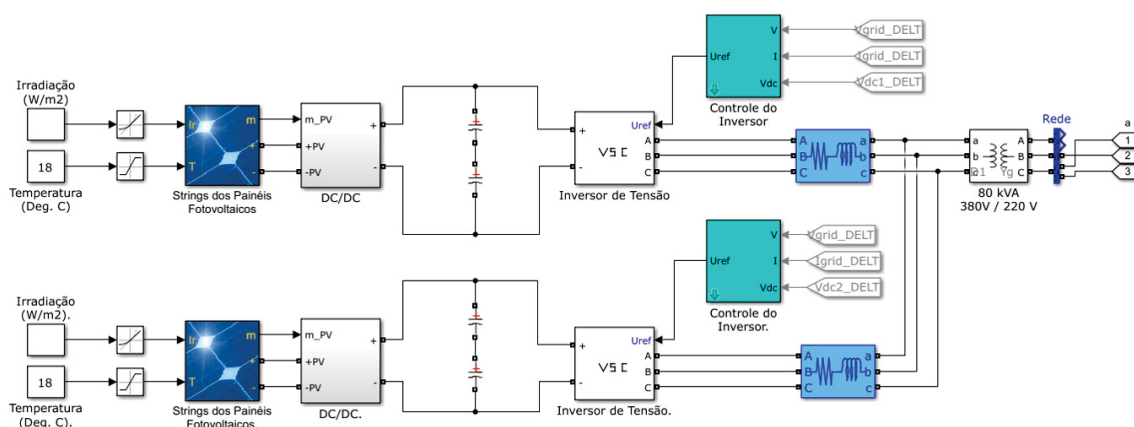
Os parâmetros da minirrede (dados de cabos, transformadores, cargas, etc.) para o desenvolvimento do modelo computacional foram obtidos a partir de coleta de dados de campo, medições de consumo (potência ativa e reativa) de cada alimentador e dados de projeto das duas

plantas de geração solar FV.

Cada ramo entre barramentos da rede foi representado como um modelo em regime permanente, caracterizado por um circuito RL série parametrizado com dados do diagrama unifilar do sistema. As cargas foram representadas, para fins de análise em regime transitório, como uma impedância (RLC paralelo) constante e balanceada em conexão Y aterrado. Os transformadores são também representados por modelo em regime permanente, alimentados com dados de potência, tensão nominal, resistência e indutância dos enrolamentos e resistência e indutância de magnetização. A curva de saturação do núcleo não foi implementada. Na implementação da minirrede, o gerador síncrono foi representado por uma máquina síncrona com rotor de polos salientes.

A implementação computacional está ilustrada através da Figura 20. Nesta Figura, pode-se observar à esquerda a implementação dos painéis solares (*strings*) cuja entrada são os dados de irradiação solar e temperatura. À direita, a tensão nos painéis. Cada conversor CC/CC é do tipo *Boost* controlado por um MPPT (Rastreador do Ponto de Máxima Potência). O conversor CC/CA está implementado por um modelo de valor médio de conversor de potência para representar as chaves de eletrônica de potência. O controle MPPT garante que a máxima potência disponível nos módulos fotovoltaicos seja sempre transferida ao conversor DC/DC, independente das variações de temperatura e tensão de entrada. Cabe ressaltar, entretanto, que a máxima potência disponível nos módulos é uma função da irradiação solar.

FIGURA 20 – Implementação dos módulos FV por inversor (ao todo são 17 circuitos em paralelo).

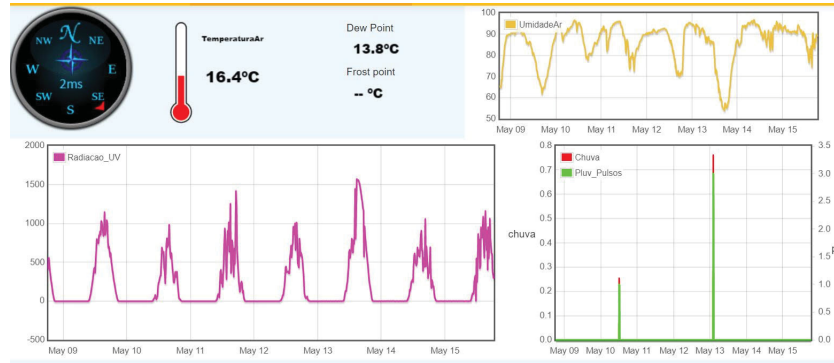


Os dados de entrada da geração fotovoltaica são temperatura e irradiação. Através dos medidores instalados, tais dados de entrada podem ser obtidos conforme ilustra a Figura 21.

#### 4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MINIRREDE DELT

A minirrede instalada no DELT - Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR consiste em uma usina fotovoltaica e as cargas a ela conectadas. Assim, tem-se um exemplo simples de minirrede com presença de geração FV.

FIGURA 21 – Valores de Base para Entrada do Painel FV



Em (DI BERNARDO NETO, 2018), foi projetado um inversor para a minirrede, bem como seu controle de tensão. Embora no projeto da minirrede UFPR a planta de geração FV tenha 3 inversores de 20 kW, neste exemplo de aplicação o estudo foi realizado em apenas 1 inversor. Para fins de estudo e posterior comparação de métodos de controle de tensão (CRONE e o PI proposto por Di Bernardo Neto (2018)), esse inversor foi reproduzido.

Os principais parâmetros do inversor de tensão projetado em (DI BERNARDO NETO, 2018) são listados na Tabela 4.

TABELA 4 – Dados do Inversor de Tensão.

Tensão de Linha ( $V_{rede}$ )	220 V
Potência Máxima ( $S_{inversor}$ )	15 kVA
Corrente de Linha Máxima ( $I_{rms}$ )	40 $A_{rms}$
Frequência de Operação da Rede ( $f_{rede}$ )	60 Hz
Frequência de Comutação dos Interruptores ( $f_{sw}$ )	15 kHz
Tensão de Barramento ( $E$ )	500 V
Ondulação de Tensão no Barramento	5 %

Fonte – Di Bernardo Neto (2018))

#### 4.4 MODELAGEM DA MINIRREDE DELTA

Na modelagem de (DI BERNARDO NETO, 2018), os dados são apresentados de acordo com dispositivos reais. O ganho no sensor de corrente é  $K_{sensor} = 1/2000$ , enquanto o ganho do conversor analógico/digital é  $K_{CAD} = 1241,21$ . O ganho na modulação é dado por  $K_{PWM} = 2/2700$ .

O modelo do inversor segue a equação 4.1

$$G_{inversor} = \frac{E(C_f R_f s + 1)}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2 - 2L_1 L_2 C_f \omega^2) C_f R_f s^2 + (L_1 + L_2 - 2L_1 L_2 C_f \omega^2) s} \quad (4.1)$$

Os dados do sistema necessários para o modelo do inversor, calculados em (DI BERNARDO NETO, 2018) são:  $L_1 = 250 \mu\text{H}$ ,  $L_2 = 500 \mu\text{H}$ ,  $C_f = 42 \mu\text{F}$ ,  $R_f = 0,8 \Omega$ ,  $E = 500 \text{V}$ ,  $C_{barramento} = 2,7 \text{mF}$  e  $\omega = 1$ .

Substituindo esses valores na equação 4.1, obtém-se então a função de transferência da usina na equação 4.2

$$G_{inversor} = \frac{0,01644s + 500}{5,242 \cdot 10^{-12}s^3 + 2,515 \cdot 10^{-8}s^2 + 0,0007561s} \quad (4.2)$$

A função de transferência do controle de injeção de corrente reativa é dada pela equação 4.3.

$$C_{corrente} = \frac{9,988 \cdot 10^{-5}s^2 + 0,8496s + 1807}{8,956 \cdot 10^{-12}s^3 + 5,985 \cdot 10^{-6}s^2 + s} \quad (4.3)$$

O banco de capacitores responsável pelo carregamento e descarregamento de corrente ativa segue a função de transferência da Equação 4.4.

$$C_{banco} = \frac{1}{2,7 \cdot 10^{-3}s} \quad (4.4)$$

Assim, o diagrama da Figura 17 passa a ser como o da Figura 22.

FIGURA 22 – Diagrama de Blocos do Sistema Modelado



#### 4.5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO: MINIRREDE DELTA

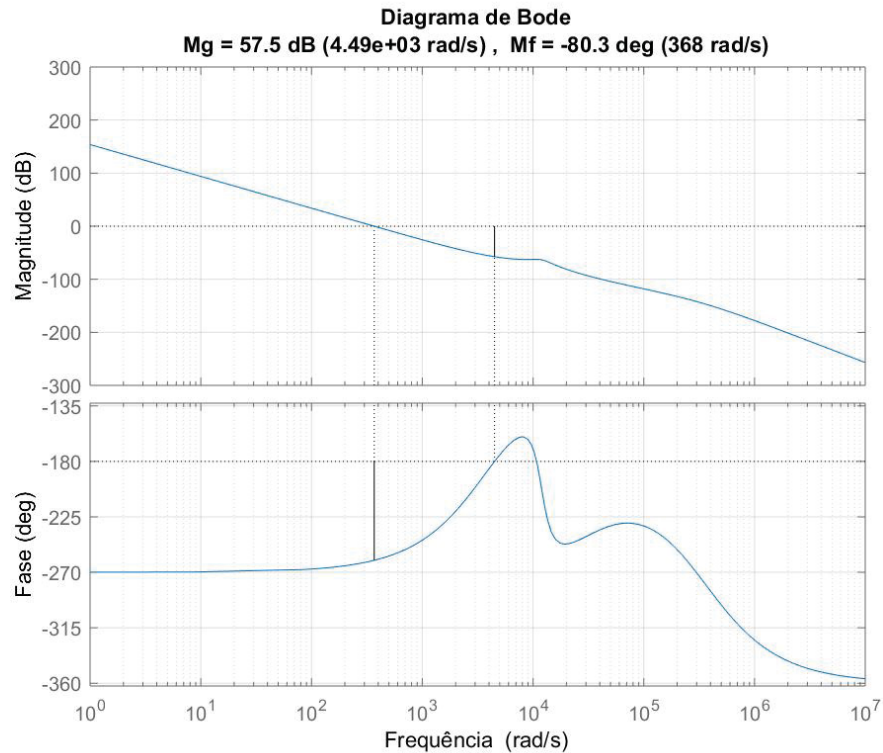
De acordo com os dados de modelagem da seção 4.4, tem-se o diagrama de Bode da malha fechada do controle de corrente da Figura 17 ilustrado pela Figura 23.

Do diagrama, observa-se que a fase e a variação de magnitude passam a ser constantes para uma frequência de corte de  $\omega_{cg} = 3 \text{ rad/s}$ . Escolhendo uma margem de fase  $55^\circ$ , o projeto do CRONE pode então ser implementado.

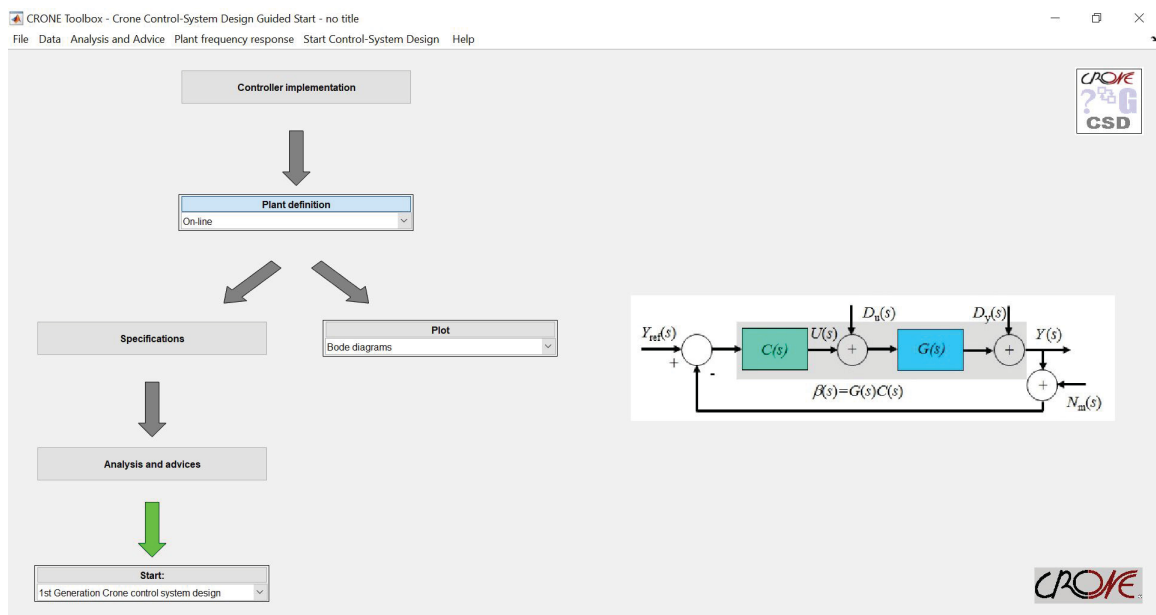
A função de transferência a ser controlada é dada pela Equação 4.5.

$$G_{planta} = G_{inversor} K_{PWM} C_{corrente} C_{banco} \quad (4.5)$$

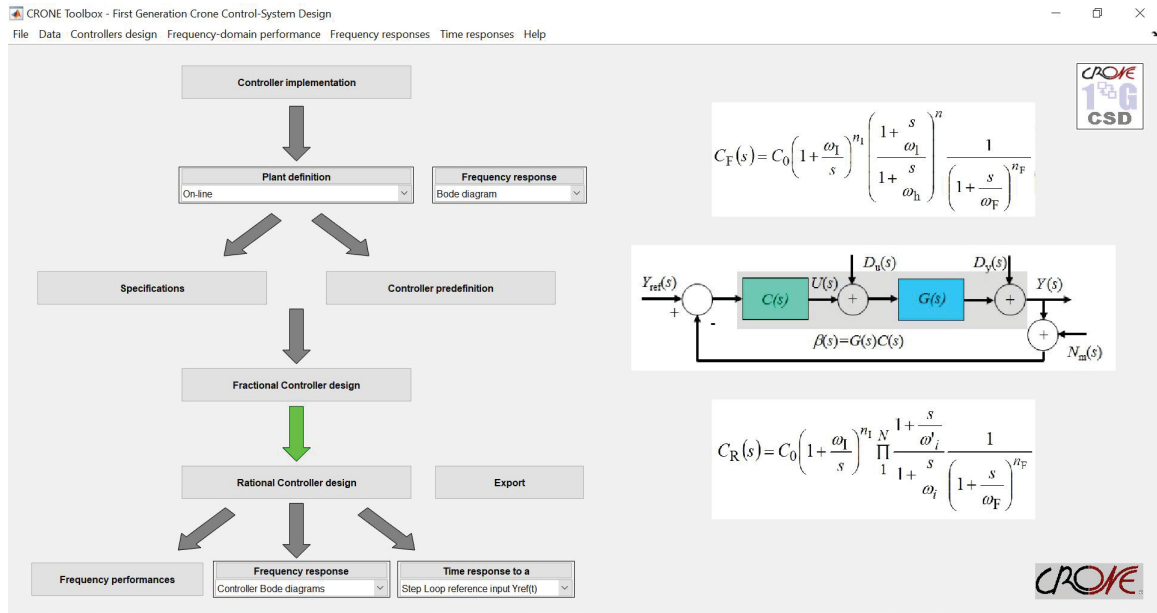
FIGURA 23 – Diagrama de Bode da Malha de Controle de Corrente



O ambiente de implementação do CRONE é ilustrado pela Figura 24. Na primeira etapa de projeto, é necessário inserir os dados da função de transferência da planta  $G_{planta}$  e a escolha da geração usada.

FIGURA 24 – Ambiente de Definição da Planta na *toolbox* CRONE

Uma vez escolhidos  $\omega_{cg} = 3 \text{ rad/s}$  e  $M_\phi = 55^\circ$  como parâmetros de projeto, passa-se à etapa de definição do controlador, como ilustrado na Figura 25.

FIGURA 25 – Ambiente de Definição do Controlador na *toolbox* CRONE

Para o sistema da Figura 22, o CRONE gerado teve como valores de  $n_I$  e  $n_F$  como 1.  $C_0 = 1,4059 \cdot 10^{-13}$ ,  $\omega_l = 0,1 \text{ rad/s}$ ,  $n = 1,6529$ ,  $\omega_l = 0,00030869 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_h = 29155,0655 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_F = 90 \text{ rad/s}$ . A partir desses valores, o controlador, segundo a Equação 2.19, é dado por 2.25:

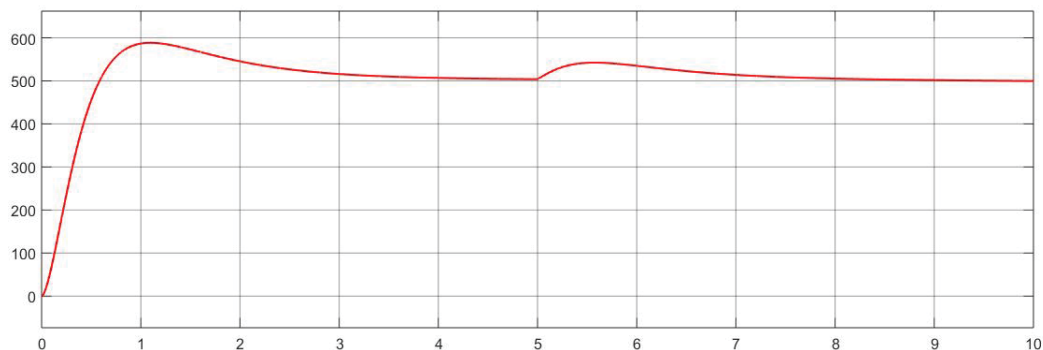
Assim,

$$C_F(s) = 1,4059 \cdot 10^{-13} \left(1 + \frac{0,1}{s}\right) \left(\frac{1 + \frac{s}{0,00030869}}{1 + \frac{s}{29155,0655}}\right)^{1,6529} \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{90}\right)} \quad (4.6)$$

Os cálculos que geram  $C_F$  e sua aproximação  $C_R$  são realizados pela *toolbox*.

A malha de controle foi projetada como na Figura 22, com o CRONE em substituição do Controle de Tensão. A Figura 26 ilustra a resposta ao degrau do sistema controlado pelo controlador CRONE projetado para este modelo. O valor do degrau é de 500 V e a perturbação  $I_{PV}$  é um outro degrau, de valor 1, que acontece no instante  $t = 5$  s.

FIGURA 26 – Resposta ao Degrau pra CRONE



Observa-se com os resultados obtidos que, mesmo tendo um sobressinal e uma perturbação aplicada, a resposta controlada pelo CRONE se estabelece no instante 4 segundos e, após a

perturbação, a resposta se estabelece em 2 segundos. Na seção 4.6, o mesmo método de controle é aplicado num sistema mais complexo, para validação da sua aplicação no controle de tensão.

#### 4.6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO: MINIRREDE UFPR

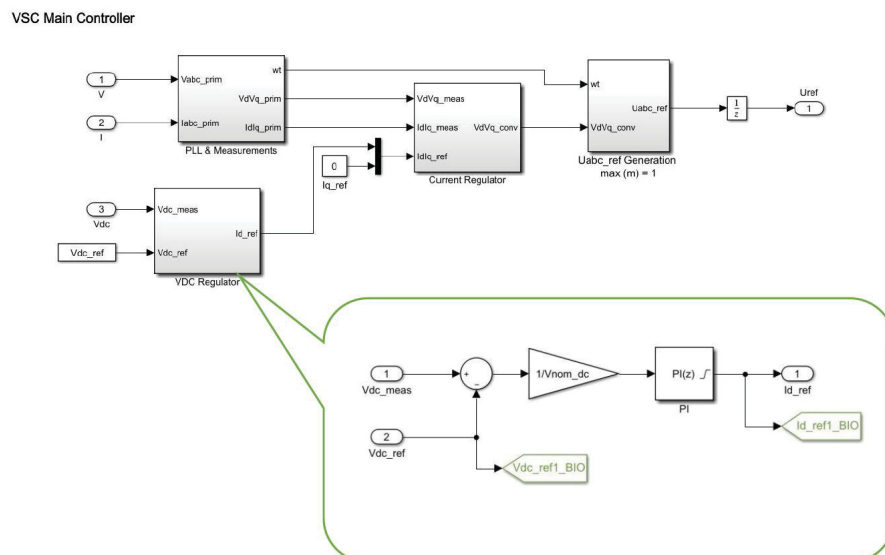
As simulações do exemplo implementado na Minirrede UFPR consideram a geração fotovoltaica apenas na usina FV-BIO, constituída de 17 inversores como os ilustrados na Figura 20. Para esse exemplo de aplicação, foram realizadas simulações em duas condições de operação: a) um curto-circuito no alimentador principal, iniciando no instante 2 segundos e sendo extinguido no instante 2,2 segundos e b) redução em 40% da irradiação solar, simulando a passagem de uma nuvem sobre os painéis.

O bloco de controle do inversor (em ciano na Figura 20) é um bloco pré-definido, da biblioteca do *Simulink*. Dentro dele, há o controle de tensão de entrada e corrente indireta, que são implementados separadamente (assim como o controle apresentado no capítulo anterior). O controle de tensão é realizado por um PI, conforme a Figura 27. A função de transferência desse controlador é apresentada na Equação 4.7.

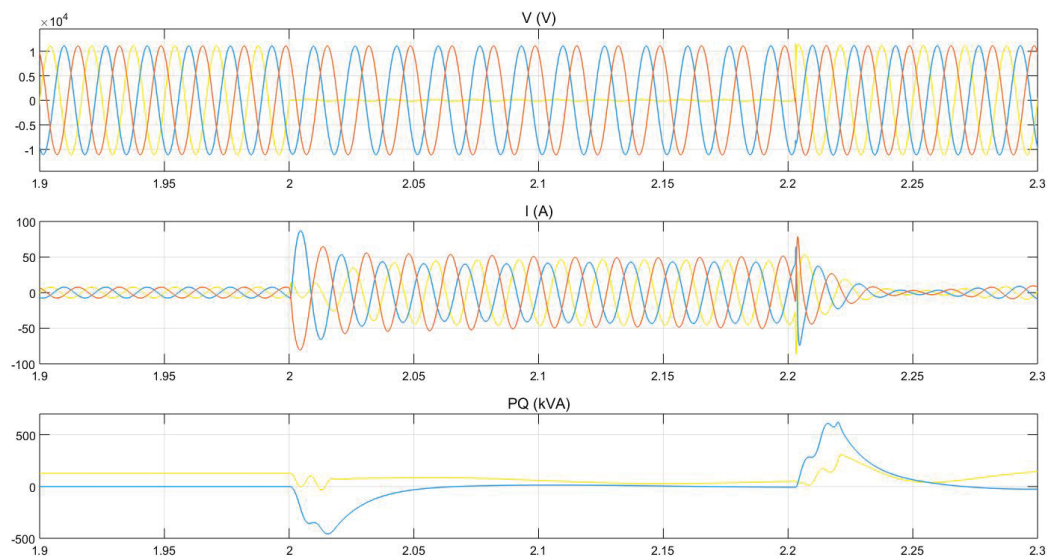
$$C_{PI} = P + I \cdot \frac{T_s z + 1}{2 z - 1} \quad (4.7)$$

Onde  $P = 7$ ,  $I = 800$  e  $T_s = 0,0001$

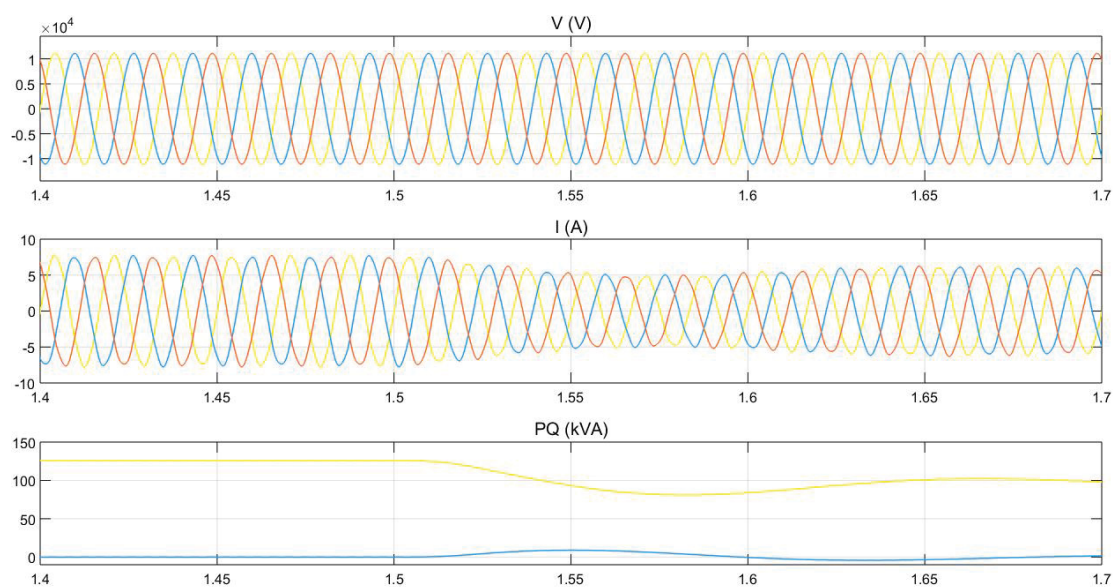
FIGURA 27 – Esquemático do Bloco de Controle do Inversor e do Controle de Tensão



Na primeira condição de operação, com o controlador PI, os resultados de tensão e potência são apresentados na Figura 28. Observa-se um bom desempenho por parte do controlador, já que as tensões e correntes recuperam seus valores rapidamente, após o fim do curto. Além disso, as tensões nas outras fases, que não foram atingidas pela perturbação, se mantêm estáveis durante o curto.

FIGURA 28 – Resultados de Simulação para Curto-circuito Usando o Bloco do *Simulink* com PI.

No caso da redução de irradiação, que consiste na segunda condição de operação avaliada nessa seção, os resultados estão na Figura 29. Nesse estudo de caso, a irradiação foi reduzida a 40% de seu valor no instante 1.5 segundos. Da mesma maneira, a potência gerada foi reduzida. O sistema não apresentou instabilidades nem desequilíbrio nas saídas de tensão e corrente. A corrente teve sua amplitude reduzida proporcionalmente à redução de potência gerada.

FIGURA 29 – Resultados de Simulação para Redução de Irradiação Usando o Bloco do *Simulink* com PI.

O principal objetivo deste trabalho é a implementação do CRONE no controle de tensão do inversor. Assim, foi projetado um modelo de controle para esse fim. Para esse estudo de caso, o controle foi projetado considerando o modelo de inversor do capítulo anterior, ajustando os dados da função de transferência da equação 4.1.

$$G_{inversor} = \frac{E(C_f R_f s + 1)}{L_f C_f s^3 + (L_f - 2L_f C_f \omega^2) C_f R_f s^2 + (L_f - 2L_f C_f \omega^2) s}$$

Assumindo:  $L_f = 5mH$ ,  $R_f = 0,05\Omega$ ,  $E = 500 V$ ,  $C_f = 100\mu F$  e  $\omega = 1$ . O banco de capacitores tem valor  $C_{barramento} = 50mF$

Conforme os valores do esquema da minirrede UFPR, então o modelo do inversor considerado segue a equação 4.8.

$$G_{inversorCP} = \frac{8 \cdot 10^{-8} s + 1000}{5 \cdot 10^{-7} s^3 + 3.999 \cdot 10^{-13} s^2 + 0.004999 s} \quad (4.8)$$

Considerando a conexão do banco de capacitores com a entrada do inversor, a função de transferência usada como planta a ser controlada é apresentada pela Equação 4.9.

$$G_{planta} = \frac{4 \cdot 10^{-8} s + 500}{5 \cdot 10^{-7} s^3 + 3.999 \cdot 10^{-13} s^2 + 0.004999 s} \quad (4.9)$$

Neste exemplo de aplicação, o controle foi realizado diretamente no regulador de tensão que compara a tensão de referência com a tensão de entrada do inversor (diferente do exemplo da seção anterior, em que o controle foi realizado no barramento CC).

Com base na planta da equação 4.8, tomando  $\omega_{cg} = 45 \text{ rad/s}$  como frequência de corte e margem de fase  $M_\phi = 70$ , usou-se a *toolbox* para projetar o CRONE. Os parâmetros de controle são:  $C_0 = 0,00023252$ ,  $n_i = n_f = 1$ ,  $n = 3,9721$ ,  $\omega_I = 1,5 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_F = 1350 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_l = 1,3523 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_h = 1497,4659 \text{ rad/s}$ .

Lembrando que o controlador segue a equação 2.19, reproduzida:

$$C_F(s) = C_0 \left(1 + \frac{\omega_I}{s}\right)^{n_I} \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_l}}{1 + \frac{s}{\omega_h}}\right)^n \frac{1}{(1 + s/\omega_F)^{n_F}}$$

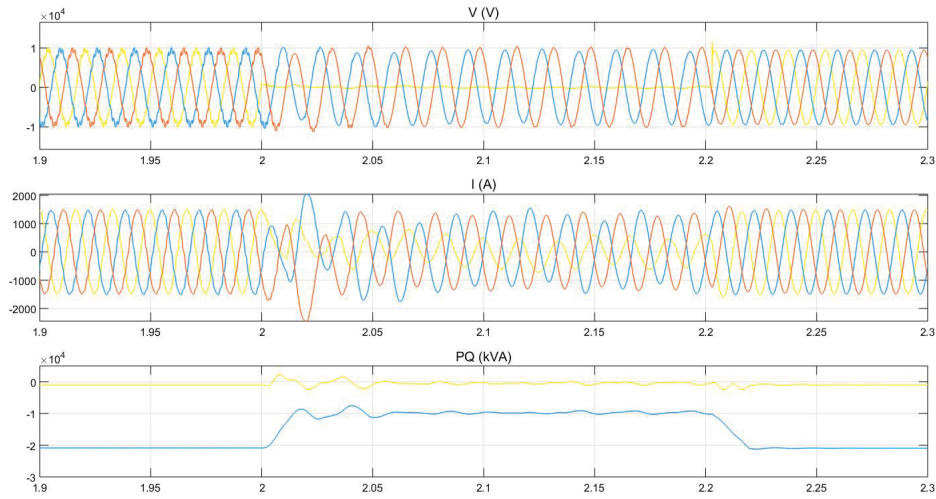
Assim, o controlador gerado segue a equação 4.10.

$$C_F(s) = 0,00023252 \left(1 + \frac{1,5}{s}\right) \left(\frac{1 + \frac{s}{1,3523}}{1 + \frac{s}{1497,4659}}\right)^{3,9721} \frac{1}{(1 + \frac{s}{1350})} \quad (4.10)$$

Os resultados obtidos na simulação da primeira condição de operação, usando o CRONE, são apresentados na Figura 30.

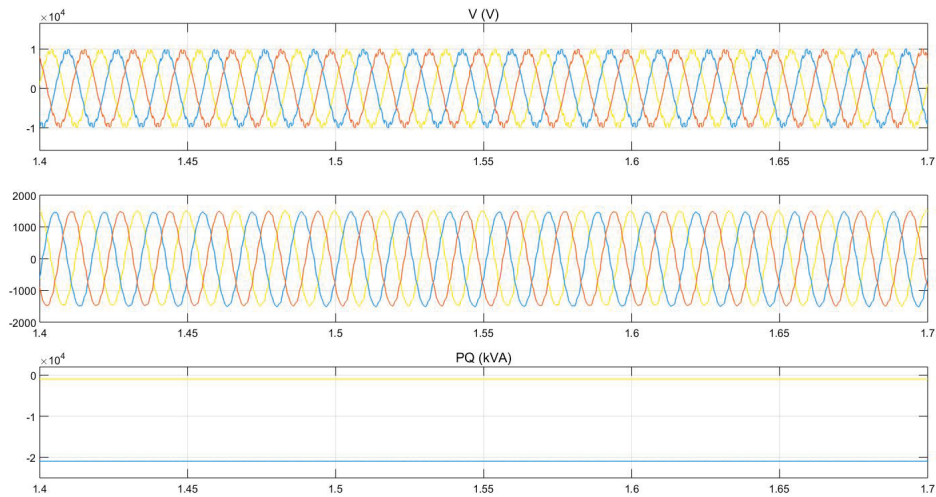
Observou-se com os resultados que os valores de corrente são demasiadamente altos. Observa-se também potências e reativas negativas vindo da geração FV. Isso pode ser interpretado como a fonte consumindo energia. Esses problemas se devem provavelmente à modelagem do inversor, que não foi feita adequadamente para este sistema.

FIGURA 30 – Resultados de Simulação para Curto-circuito Usando o Bloco do *Simulink* com CRONE.



Na modelagem foi usada uma função de transferência de outro inversor (o mesmo do DELT). A partir desse modelo, o controlador foi projetado. Ainda assim, a resposta à perturbação ocorreu e os valores de corrente e tensão voltaram à normalidade após o fim do curto-circuito.

FIGURA 31 – Resultados de Simulação para Redução de Irradiação Usando o Bloco do *Simulink* com CRONE.



Na Figura 31 são apresentados os resultados para a segunda condição de operação. As curvas de corrente, assim como na primeira condição operacional, tem valores muito altos e a fonte também funciona como consumidora. Por isso, mais análises e simulações precisam ser realizadas, bem como estudos de modelagem da planta da UFPR.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho traz um breve apanhado das recentes mudanças no sistema elétrico, com foco na inserção da geração distribuída fotovoltaica nos sistemas ativos de distribuição, onde os fluxos de energia são bidirecionais. Tendo em vista que fontes renováveis de energia requerem o uso de conversores, é essencial que a conexão entre a geração distribuída e o sistema seja feita de maneira adequada. Por isso, mencionou-se também a nova classificação das estabilidades no sistema elétrico dentro desse cenário.

As malhas de controle de tensão tem importante papel dentro desse contexto, pois se fazem necessárias para garantir que a energia injetada no sistema pelos conversores esteja dentro dos níveis permitidos pela ANEEL, para a operação correta do sistema. Foram discutidos e apresentados alguns métodos de controle de tensão, que são encontrados em diferentes níveis e tem diferentes papéis na conexão da geração distribuída.

Nesse sentido, os controladores de ordem fracionária revelam-se como métodos alternativos. Dentre alguns dos métodos de controle fracionário mencionados, existe o CRONE, ainda pouco explorado no âmbito do controle de sistemas elétricos, é uma ferramenta com bastante potencial a ser descoberto. Para a apresentação do método CRONE, além de tratar do desenvolvimento de suas equações matemáticas, foi reproduzido um exemplo de aplicação, fazendo um passo a passo. Neste trabalho, aplicou-se então essa metodologia, focando no problema de controle de tensão no barramento CC dos conversores de tensão presentes nas minirredes de distribuição estudadas.

Aplicou-se o CRONE como método de controle de potência ativa injetada na rede (na entrada do inversor), no barramento CC, em geração fotovoltaica, não ilhada, presente num sistema de distribuição ativa. No primeiro exemplo de aplicação, na minirrede DELT, observou-se que após sofrer perturbação, há um sobressinal na resposta, que logo se estabiliza. Com isso, constatou-se que o método CRONE é adequado para esse tipo de planta, pois ele é capaz de manter o sistema estável.

O mesmo método foi aplicado à minirrede UFPR, porém alguns aspectos dificultaram essa aplicação. Devido à complexidade desse sistema, a modelagem matemática usada (a mesma para a minirrede do DELT, quando o sistema requeria uma modelagem mais precisa) se mostrou inadequada, pois os valores de corrente simulados foram muito altos. Contudo, o CRONE ainda é uma ferramenta válida para o controle de geração FV. Além disso, a *toolbox* onde o bloco do controlador é gerado é bastante prática e permite o ajuste dos parâmetros de projeto, de acordo com as necessidades da planta a ser controlada.

Para trabalhos futuros, algumas sugestões que podem ser pertinentes são:

- Realização da modelagem matemática do sistema, de maneira que o controlador seja projetado de acordo com o modelo do sistema a ser controlado;
- Uso das outras gerações do CRONE (segunda e terceira) no controle da injeção de potência ativa, para avaliação de sua viabilidade;
- Aplicação dessa metodologia no controle de correntes reativas, controlando a injeção de potência reativa para correção do fator de potência;
- Já que a minirrede tem possibilidade de funcionamento em modo ilhado, poderiam ser feitas análises desse tipo de funcionamento, para verificação da viabilidade desse controle em sistemas ilhados.

## REFERÊNCIAS

AHMED, Nabil A; AL-OTHMAN, AK; ALRASHIDI, MR. Development of an efficient utility interactive combined wind/photovoltaic/fuel cell power system with MPPT and DC bus voltage regulation. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 81, n. 5, p. 1096–1106, 2011. Citado na página 21.

ANDRÉ FELBER AFONSO LUGO, Fernando Witzel. **Cadastramento EPE - Análise últimos Leilões A-4**. [S.l.: s.n.], 2019.

<https://www.epowerbay.com/single-post/2019/04/08/A-4-2019-Cadastramento-EPE---Analise-ultimos-Leiloes-A-4-17-18-19>. Acessado em 30/05/2019. Citado na página 18.

ANEEL. **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. [S.l.], 2018. Citado na página 20.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012**. [S.l.], 2012. Citado na página 17.

AXTELL, Mark; BISE, Michael E. Fractional calculus application in control systems. In: IEEE. AEROSPACE and Electronics Conference, 1990. NAECON 1990., Proceedings of the IEEE 1990 National. [S.l.: s.n.], 1990. p. 563–566. Citado nas páginas 32, 33.

CAFAGNA, Donato. Fractional calculus: A mathematical tool from the past for present engineers [Past and present]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, IEEE, v. 1, n. 2, p. 35–40, 2007. Citado nas páginas 25, 27.

CAMARGO, Rubens de Figueiredo et al. Cálculo fracionário e aplicações. [sn], 2009. Citado nas páginas 27, 28.

CAPUTO, Michele. **Elasticita e dissipazione**. [S.l.]: Zanichelli, 1969. Citado nas páginas 22, 26, 29.

\_\_\_\_\_. **Lectures on seismology and rheological tectonics**. [S.l.: s.n.], 1992. Citado na página 26.

\_\_\_\_\_. Vibrations of an infinite plate with a frequency independent Q. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 60, n. 3, p. 634–639, 1976. Citado na página 26.

CARPINTERI, Alberto; MAINARDI, Francesco. **Fractals and fractional calculus in continuum mechanics**. [S.l.]: Springer, 2014. v. 378. Citado na página 22.

CHATTOPADHYAY, Surajit; MITRA, Madhuchhanda; SENGUPTA, Samarjit. Clarke and park transform. In: **ELECTRIC Power Quality**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 89–96. Citado na página 46.

CHEN, Chi Tsong. **Linear system theory and design**. [S.l.]: Oxford University Press, Inc., 1998. Citado nas páginas 30, 31.

CHEN, YangQuan; PETRAS, Ivo; XUE, Dingyu. Fractional order control-a tutorial. In: IEEE. AMERICAN Control Conference, 2009. ACC'09. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1397–1411. Citado nas páginas 34, 35.

CHEN, Yaow-Ming; CHENG, Chung-Sheng; WU, Hsu-Chin. Grid-connected hybrid PV/wind power generation system with improved DC bus voltage regulation strategy. In: IEEE. TWENTY-FIRST Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06. [S.l.: s.n.], 2006. 7–pp. Citado na página 21.

CHEN, Zhihuan; YUAN, Xiaohui et al. Design of a fractional order PID controller for hydraulic turbine regulating system using chaotic non-dominated sorting genetic algorithm II. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 84, p. 390–404, 2014. Citado na página 33.

CHOWDHURY, S; CROSSLEY, P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. [S.l.]: The Institution of Engineering e Technology, 2009. ISBN 978-1-84919-014-5. Citado na página 17.

DAS, Saptarshi; PAN, Indranil. **Fractional order signal processing: introductory concepts and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. Citado na página 29.

DECKMANN, Sigmar Maureen; POMILIO, José Antenor. Avaliação da qualidade da energia elétrica. available in <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>, 2017. Citado na página 20.

DI BERNARDO NETO, Pietro. **Projeto e Desenvolvimento de um Inversor Trifásico com Controle Vetorial**. 2018. Diss. (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. Citado nas páginas 44, 51, 52.

DIAS, Marcos Vinicius Xavier; BORTONI, Edson da Costa; HADDAD, Jamil. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. **Revista Brasileira de Energia**, v. 11, n. 2, p. 11, 2005. Citado na página 20.

DIETHELM, Kai; FREED, Alan D. On the solution of nonlinear fractional-order differential equations used in the modeling of viscoplasticity. In: SCIENTIFIC Computing in Chemical Engineering II. [S.l.]: Springer, 1999. p. 217–224. Citado na página 27.

ENERGIA, Ambiente. **Energia Solar Ajuda a Ultrapassar 1GW em Geração Distribuída no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2019.

<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2019/06/energia-solar-1gw-geracao-distribuida/36342>. Acessado em 17/06/2019. Citado na página 19.

FARROKHABADI, Mostafa et al. Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, 2019. Citado nas páginas 20, 21.

FERNÁNDEZ, Herman et al. A simple, low cost design using current feedback to improve the efficiency of a mppt-pv system for isolated locations. In: IEEE. 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1947–1950. Citado na página 43.

- HARTLEY, Tom T; LORENZO, Carl F; QAMMER, H Killory. Chaos in a fractional order Chua's system. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications**, IEEE, v. 42, n. 8, p. 485–490, 1995. Citado na página 22.
- HASSAN, MA; ABIDO, MA. Optimal design of microgrids in autonomous and grid-connected modes using particle swarm optimization. **IEEE Transactions on power electronics**, IEEE, v. 26, n. 3, p. 755–769, 2010. Citado na página 42.
- HOLTZ, Joachim. Pulsewidth modulation for electronic power conversion. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 82, n. 8, p. 1194–1214, 1994. Citado na página 44.
- IEA. **2018 Snapshot of Global Photovoltaic Markets**. [S.l.], 2018. Citado na página 19.
- IEEE, I. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. **New York, NY, USA**, 1993. Citado na página 44.
- J.TRIGEASSOU; N.MAAMRI. State space modeling of fractional differential equations and the initial condition problem. In: 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. [S.l.: s.n.], mar. 2009. p. 1–7. Citado nas páginas 30, 31.
- KUNDUR, Prabha; BALU, Neal J; LAUBY, Mark G. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. v. 7. Citado na página 20.
- LANUSSE, Patrick; POMMIER, Valérie; OUSTALOUP. Fractional control-system design for a hydraulic actuator. **IFAC Proceedings Volumes**, Elsevier, v. 33, n. 26, p. 321–326, 2000. Citado na página 22.
- LASSETER, Robert H. Microgrids. In: IEEE. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309). [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 305–308. Citado na página 17.
- LETNIKOV, AV. Theory of differentiation of fractional order. **Mat. Sb**, v. 3, n. 1, p. 1868, 1868. Citado na página 26.
- LI, Shuhui et al. Direct-current vector control of three-phase grid-connected rectifier–inverter. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 81, n. 2, p. 357–366, 2011. Citado na página 45.
- LORENZO, Carl F; HARTLEY, Tom T. Initialization in fractional order systems. In: IEEE. 2001 European Control Conference (ECC). [S.l.: s.n.], 2001. p. 1471–1476. Citado nas páginas 30, 31.
- LURIE, Boris J. **Three-parameter tunable tilt-integral-derivative (TID) controller**. [S.l.]: Google Patents, dez. 1994. US Patent 5,371,670. Citado nas páginas 32, 34.
- MACHADO, JA Tenreiro; GALHANO, Alexandra MSF; TRUJILLO, Juan J. On development of fractional calculus during the last fifty years. **Scientometrics**, Springer, v. 98, n. 1, p. 577–582, 2014. Citado nas páginas 25, 26.

- MACHADO, Ricardo Quadros. **Sistema de Geração Distribuída com Fontes CA e CC Conectado à Rede Monofásica e Controle Eletrônico da Qualidade da Energia Elétrica**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - Brasil. Citado na página 22.
- MAGIN, Richard L. **Fractional calculus in bioengineering**. [S.l.]: Begell House Redding, 2006. Citado na página 27.
- MATIGNON, Denis. Stability results for fractional differential equations with applications to control processing. In: LILLE, FRANCE. COMPUTATIONAL engineering in systems applications. [S.l.: s.n.], 1996. v. 2, p. 963–968. Citado nas páginas 31, 32.
- MELO, Emerson Gonçalves de; GRIMONI, José Aquiles Baesso. Energia Solar Fotovoltaica: Estimativa do Fator de Sombreamento e Irradiância em Modelo Tridimensional, 2012. Citado na página 23.
- MONJE, Concepción A et al. **Fractional-order systems and controls: fundamentals and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. Citado na página 32.
- MURESAN, Cristina I et al. Fractional order control of unstable processes: the magnetic levitation study case. **Nonlinear Dynamics**, Springer, v. 80, n. 4, p. 1761–1772, 2015. Citado na página 22.
- OLDHAM, Keith; SPANIER, Jerome. **The fractional calculus theory and applications of differentiation and integration to arbitrary order**. [S.l.]: Elsevier, 1974. v. 111. Citado na página 25.
- OLIVEIRA, Gustavo H. C. et al. UFPR Microgrid: A Benchmark for Distributed Generation and Energy Efficiency Research. **Innovative Smart Grid Technologies**, Washington, DC, 2020. Citado na página 47.
- OSINSKI, Cristiano; LEANDRO, Gideon; OLIVEIRA, Gustavo. Controlador PID Fracionário Aplicado ao Problema de Carga e Frequência em Usinas Hidrelétricas. In: XXII Congresso Brasileiro de Automática. João Pessoa - PB, Brasil: [s.n.], Dezembro 2018. Citado nas páginas 22, 27.
- OUSTALOUP, A. Linear feedback control systems of fractional order between 1 and 2. In: PROC. of the IEEE Symposium on Circuit and Systems. [S.l.: s.n.], 1981. v. 4. Citado nas páginas 37, 39.
- OUSTALOUP, A; MELCHIOR, P et al. The CRONE toolbox for Matlab. In: IEEE. CACSD. Conference Proceedings. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (Cat. No. 00TH8537). [S.l.: s.n.], 2000. p. 190–195. Citado na página 27.
- OUSTALOUP, A; MOREAU, X; NOUILLANT, M. The CRONE suspension. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 4, n. 8, p. 1101–1108, 1996. Citado nas páginas 22, 32.

- OUSTALOUP, Alain; MELCHIOR, Pierre. The great principles of the CRONE control. In: IEEE. PROCEEDINGS of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference-SMC. [S.l.: s.n.], 1993. v. 2, p. 118–129. Citado na página 35.
- OZDEMIR, Engin; KAVASLAR, Fatih. A new multifunctional power converter for grid connected residential photovoltaic applications. In: IEEE. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. [S.l.: s.n.], 2009. p. 2650–2656. Citado na página 43.
- PADULA, Fabrizio; VISIOLI, Antonio. Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers. **Journal of process control**, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 69–81, 2011. Citado na página 34.
- PANDEY, Shashi Kant; MOHANTY, Soumya R; KISHOR, Nand. A literature survey on load–frequency control for conventional and distribution generation power systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 25, p. 318–334, 2013. Citado na página 20.
- PODLUBNY, Igor. **Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications**. [S.l.]: Elsevier, 1998. v. 198. Citado na página 27.
- \_\_\_\_\_. Fractional-order systems and fractional-order controllers. **Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, Kosice**, v. 12, n. 3, p. 1–18, 1994. Citado nas páginas 32, 33.
- POMILIO, José Antenor; PAREDES, Helmo Kelis Morales; DECKMANN, Sigmar. **Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. 2013. Diss. (Mestrado). Citado na página 43.
- RUDOLF, Hilfer. **Applications of fractional calculus in physics**. [S.l.]: World Scientific, 2000. Citado na página 27.
- SABATIER, Jocelyn et al. Fractional order differentiation and robust control design. In: CRONE, H-infinity and Motion Control. [S.l.]: Springer, 2015. Citado nas páginas 30, 32, 35, 36, 38, 40.
- SAHU, Rabindra Kumar et al. Design and analysis of tilt integral derivative controller with filter for load frequency control of multi-area interconnected power systems. **Isa Transactions**, Elsevier, v. 61, p. 251–264, 2016. Citado nas páginas 32, 34.
- SAIN, Debdoot; SWAIN, Subrat Kumar; MISHRA, Sudhansu Kumar. TID and I-TD controller design for magnetic levitation system using genetic algorithm. **Perspectives in Science**, Elsevier, v. 8, p. 370–373, 2016. Citado na página 34.
- SALAS, Vicente et al. Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-alone Photovoltaic Systems. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 90, n. 11, p. 1555–1578, 2006. Citado na página 43.
- SCHONBERGER, John; DUKE, Richard; ROUND, Simon D. DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid. University of Canterbury. Electrical e Computer Engineering., 2006. Citado na página 21.

SILVA, Rutelly Marques da. Energia solar no Brasil: dos incentivos ao desafios. Brasília: Senado Federal, Consultoria Legislativa, 2015. Citado nas páginas 18, 23.

SILVA, SAO da et al. Sistema Fotovoltaico com Condicionamento Ativo de Energia Usando MPPT Baseado em PSO e Malha Feed-Forward de Controle de Tensão do Barramento CC. **Eletrônica de Potência**, v. 21, n. 2, p. 105–116, 2016. Citado na página 22.

SONDHI, Swati; HOTE, Yogesh V. Fractional order PID controller for load frequency control. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 85, p. 343–353, 2014. Citado nas páginas 22, 27, 32, 33.

SUAREZ SOLANO, Diego Leandro. **Sistema de supervisão e controle de geração solar fotovoltaica para aplicação em microrredes inteligentes**. 2015. Diss. (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC. Citado na página 43.

SUN, Kai et al. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 26, n. 10, p. 3032–3045, 2011. Citado nas páginas 43, 45.

TAVAZOEI, Mohammad Saleh; HAERI, Mohammad. A note on the stability of fractional order systems. **Mathematics and Computers in Simulation**, Elsevier, v. 79, n. 5, p. 1566–1576, 2009. Citado na página 32.

TRIGEASSOU, J.C.; MAAMRI, N. Initial conditions and initialization of linear fractional differential equations. **Signal Processing**, v. 91, n. 3, p. 427–436, 2011. Advances in Fractional Signals and Systems. Citado na página 31.

WU, Tsai-Fu et al. DC-bus voltage control with a three-phase bidirectional inverter for DC distribution systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 28, n. 4, p. 1890–1899, 2012. Citado na página 22.

XIAO, Weidong et al. Application of centered differentiation and steepest descent to maximum power point tracking. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 54, n. 5, p. 2539–2549, 2007. Citado na página 43.

XUE, Dingyu; ZHAO, Chunna; CHEN, YangQuan. Fractional order PID control of a DC-motor with elastic shaft: a case study. In: IEEE. 2006 American control conference. [S.l.: s.n.], 2006. 6–pp. Citado na página 33.

YU, Gwo-Ruey; HSU, Pei-Kai. Regulation of DC-bus voltage in photovoltaic power systems. In: IEEE. 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). [S.l.: s.n.], 2012. p. 1646–1651. Citado na página 43.