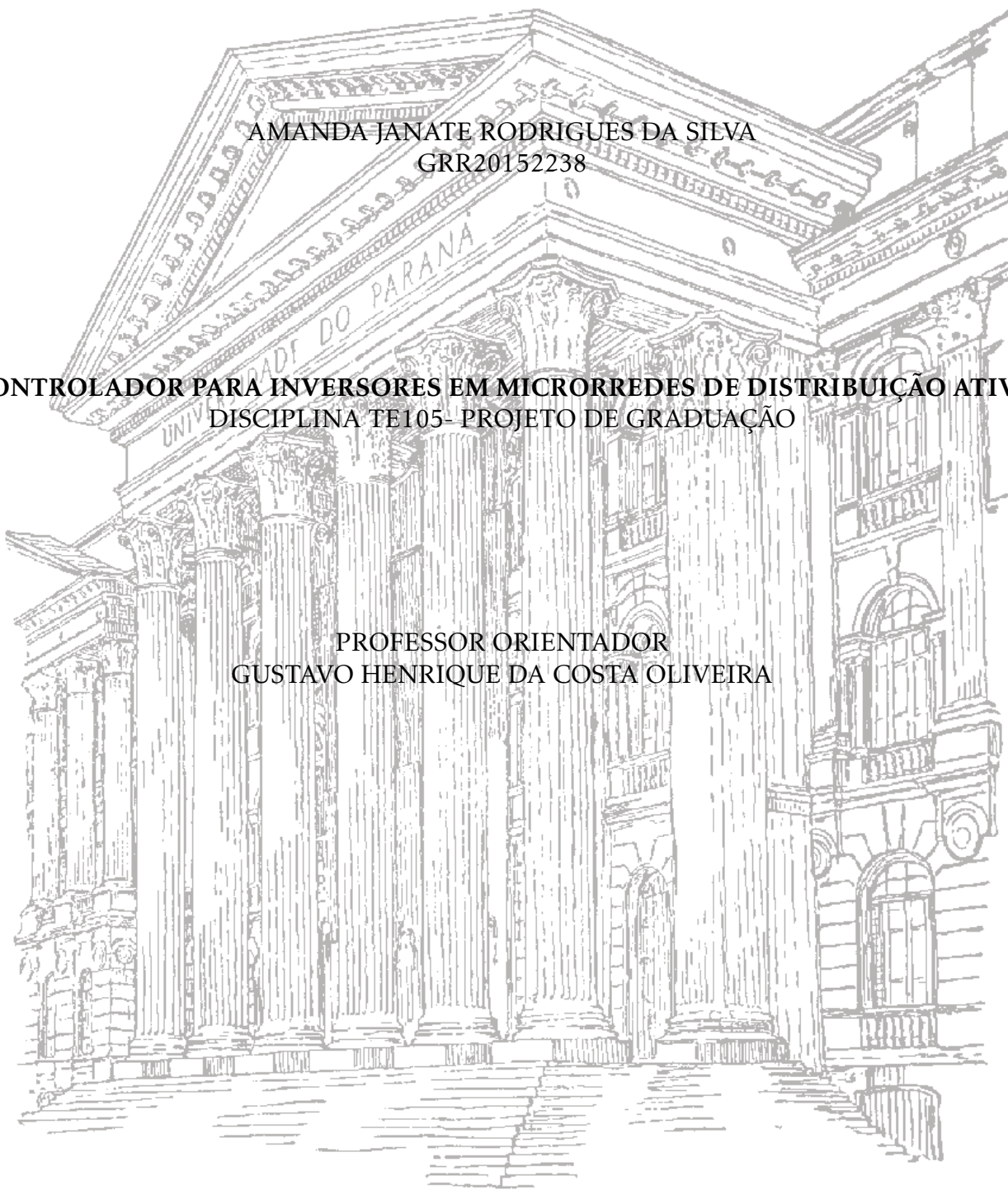


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AMANDA JANATE RODRIGUES DA SILVA
GRR20152238

CONTROLADOR PARA INVERSORES EM MICRORREDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVA
DISCIPLINA TE105- PROJETO DE GRADUAÇÃO

PROFESSOR ORIENTADOR
GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA



CURITIBA
2019

AMANDA JANATE RODRIGUES DA SILVA
GRR20152238

CONTROLADOR PARA INVERSORES EM MICRORREDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVA

Projeto de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, realizado sob orientação do Professor Gustavo Henrique da Costa Oliveira.

CURITIBA
2019

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Gustavo Oliveira, e ao meu co-orientador, doutorando Douglas Pelacini, que me guiaram no desenvolvimento deste trabalho, com diversos ensinamentos, dicas e discussões indispensáveis ao projeto.

À minha família que me apoiou durante toda a faculdade, e me proporcionou a melhor educação.

Por fim, à todos que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento.

Resumo

A utilização de geração solar como fonte de energia vem apresentando um crescimento acelerado no cenário nacional, e isto gera uma necessidade de estudos voltados para um item indispensável quando se fala desta fonte: Os Inversores. Assim, o foco deste projeto de conclusão de curso é o estudo de controladores aplicados aos inversores.

Os métodos convencionais de controle, atualmente aplicados, são funcionais, mas apresentam muitos problemas, entre eles, erros gerados a partir de distúrbios na própria rede elétrica, além de respostas mais lentas do que as esperadas. Por isso, este projeto visa aplicar um método recente de controle, o método por ordem não inteira, que vem apresentando em outros tipos de projetos uma melhora notável no quesito desempenho e robustez. Este método ainda é pouco pesquisado na área de geração ativa e inversores.

Por isso, dois tipos de controladores foram testados e simulados, utilizando como planta um inversor existente na microrrede localizada no departamento de engenharia elétrica da UFPR, campus centro politécnico. Um deles foi desenvolvido pelo método convencional de controladores para inversores, e outro desenvolvido através do método por ordem não inteira.

Palavras-chave

Geração ativa, Microrrede, Distribuição Ativa, Inversores, Energia Solar, Controle fracionário, FOPID, CRONE, Domínio da frequência.

Lista de Figuras

1	Exemplo de microrrede [3].	7
2	Rede de Distribuição Passiva [9].	9
3	Rede convencional X Rede Ativa [9].	10
4	Inversor com um estágio de processamento de energia Fonte: Adaptado de [12].	10
5	Inversor com dois estágios de processamento de energia Fonte: Adaptado de [12].	11
6	Inversor com múltiplos estágios de processamento de energia Fonte: Adaptado de [12].	11
7	Arranjo fotovoltaico conectado à um inversor Fonte: Adaptado de [12].	12
8	Arranjo conectado em configuração CC paralelo Fonte: Adaptado de [12]	12
9	Arranjo conectado em configuração CA paralelo Fonte: Adaptado de [12]	13
10	Painel fotovoltaico com inversor integrado Fonte: Adaptado de [12]	13
11	Exemplo de microrrede Fonte: Adaptado de [6]	14
12	Inversor básico em H-ponte.[2]	15
13	Inversor monofásico em ponte completa.[2]	15
14	Circuito inversor trifásico em ponte completa.[2]	16
15	Tensão V_{AB} com modulação PWM à três níveis.	17
16	Circuito elétrico equivalente do sistema com inversor.	17
17	Sinal trifásico alternado no sistema abc , $\alpha\beta 0$ e $dq0$, respectivamente.	18
18	Malhas de controle do inversor.	20
19	Diagrama de Blocos para malha de corrente e de tensão.	21
20	FOPID genérico.	23
21	Esquemático de controle.	24
22	Microrrede da UFPR.	24
23	Placas solares que compoem a microrrede do DELT.	25
24	Gráfico de bode do inversor.	26
25	Gráfico de bode do inversor com compensação de corrente.	27
26	Esquemático base utilizado para simulação.	28
27	Simulação no Simulink.	28
28	Detalhes da simulação.	29
29	Tensão e corrente no barramento CC.	30
30	Tensão e corrente no barramento CA.	31
31	Tensão e corrente no barramento CA, sinal aumentado.	31
32	Sinal de erro sob o compensador de tensão e corrente de saída do compensador de tensão.	32
33	Corrente de saída do compensador de corrente.	32
34	Tensão e corrente no barramento CC.	33
35	Controladores CRONE projetados.	34
36	Tensão e corrente no barramento CC.	34
37	Tensão e corrente no barramento CA.	35
38	Tensão e corrente no barramento CA, sinal aumentado.	35
39	Sinal de erro sob o compensador de tensão e corrente de saída do compensador de tensão.	36
40	Corrente de saída do compensador de corrente.	36
41	Tensão e corrente no barramento CC.	37
42	Tensão e corrente no barramento CA.	38

43	Sinal de erro do compensador de corrente.	38
44	Tela 1: comando crone_control.	42
45	Tela 2: comando crone_control3.	42

Lista de Tabelas

1	Tensões de saída de acordo com ordem de chaveamento.[2]	16
---	---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Motivação	7
1.2	Objetivos	7
1.3	Estruturação do Projeto	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Microrredes de Distribuição Ativa	9
2.2	Inversores	14
2.2.1	Circuitos Inversores	14
2.2.2	Modelagem de Inversores	16
2.3	Cálculo Fracionário	19
2.4	Técnica de controle: Método Convencional	20
2.5	Técnica de controle: Método por Ordem não Inteira	23
2.5.1	FOPID	23
2.5.2	CRONE	23
3	DESENVOLVIMENTO	24
3.1	Controlador pelo método convencional	25
3.2	Validação do modelo convencional	30
3.3	Controlador CRONE	33
3.4	Validação do modelo CRONE	33
4	COMPARATIVO	37
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
5.1	Conclusão	39
5.2	Sugestões para trabalhos Futuros	39
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo caracteriza-se o tema da pesquisa, bem como sua motivação e objetivo. Ao final, é apresentada a estruturação do trabalho, com suas respectivas descrições.

1.1 Motivação

O crescimento acelerado do mercado de geração ativa de energia é explícito. A utilização de energia solar, por exemplo, teve um crescimento de 316,2% de 2017 para 2018 [13] e isso se deu devido à incentivos para produção de energias renováveis e a diminuição de fontes convencionais existentes.

Sabe-se que a qualidade da energia elétrica é afetada por distúrbios de tensão na rede, com sobre e sub tensões, afundamentos e elevações de tensão, sendo em sua maioria causados por uma classe dos próprios consumidores, geralmente caracterizados como cargas críticas. Estas cargas, no geral, estão relacionadas à acionamento de motores, chaveamentos de disjuntores e fusíveis, descargas atmosféricas e etc [10].

Com isso, encontra-se o problema fundamental deste projeto, sendo este de desenvolver e implementar diferentes métodos de controle para conversores CC/CA, que são responsáveis por injetar a energia elétrica ativa (CC) na rede (CA), de maneira a garantir a melhor qualidade de energia, já que os métodos clássicos de controle utilizados desprezam tais distúrbios, sendo ineficientes [2].

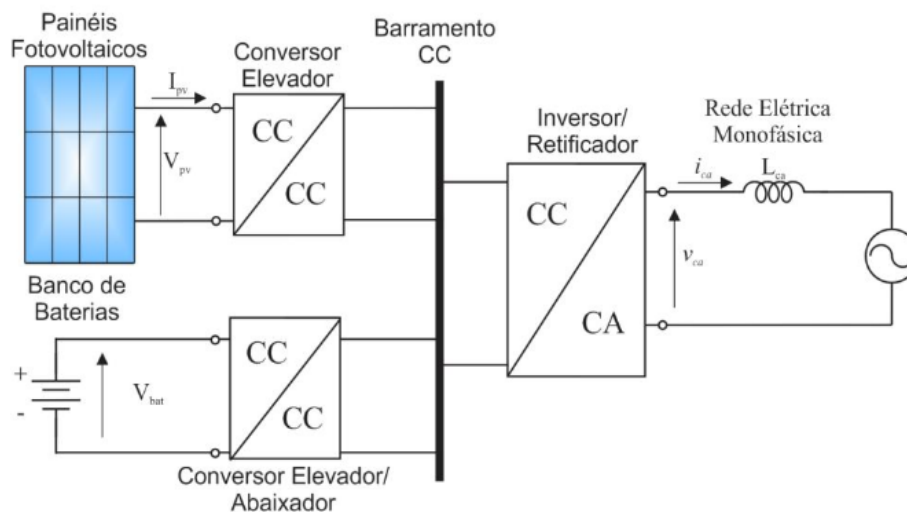


Figura 1: Exemplo de microrrede [3].

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal implementar um método de controle para barramento CC em sistemas conectados à rede elétrica e analisar seu desempenho, comparando-o à técnicas convencionais. Não cabe à este projeto o estudo de sistemas ilhados, bem como a análise do controlador projetado neste cenário.

Para tal finalidade serão abordados os seguintes passos metodológicos:

- Modelar o inversor que será base de estudos.
- Obter as malhas de controle desejadas, e aplicá-las ao modelo encontrado.
- Através de simulações, validar o modelo encontrado, analisando-o.
- Comparar, através de simulações, o funcionamento do modelo encontrado com o modelo desenvolvido a partir dos métodos convencionais.

1.3 Estruturação do Projeto

A seguir, são mostrados os capítulos deste trabalho, bem como suas respectivas descrições.

- **Capítulo 1:** Neste capítulo inicial, trata-se a introdução ao projeto, ou seja, a motivação do projeto, bem como sua caracterização e os objetivos gerais e específicos.
- **Capítulo 2:** Cabe aqui a relação e descrição de todo o material usado como base para realização do projeto.
 - **Subcapítulo 2.1:** Este item caracteriza as microrredes de distribuição ativa, mostrando seus diferentes tipos e configurações.
 - **Subcapítulo 2.2:** É tratado a teoria sobre inversores, mostrando seus tipos, seu funcionamento, e sua modelagem matemática.
 - **Subcapítulo 2.3:** Aqui é definido e apresentado a definição de cálculo fracionário.
 - **Subcapítulo 2.4:** Nele é explicitado o método convencional de controle para inversores.
 - **Subcapítulo 2.5:** Esta etapa apresenta o método de controle por ordem não inteira para inversores instalados em microrredes a ser estudado durante o projeto.
- **Capítulo 3:** Esta seção será separada em sub seções, e nele será desenvolvido o projeto em si.
 - **Subcapítulo 3.1:** Cabe a esta subseção o desenvolvimento da planta desejada e do controlador através do método convencional.
 - **Subcapítulo 3.2:** Aqui estão apresentados os resultados das simulações realizadas através dos cálculos do subcapítulo anterior.
 - **Subcapítulo 3.3:** Desenvolvimento do controlador pelo método da ordem não inteira.
 - **Subcapítulo 3.4:** Através de simulações, será feita a validação do controlador encontrado, assim como a validação do método estudado.
- **Capítulo 4:** Ainda para fins de validação, serão feitas comparações com métodos convencionais de controle, através de simulações.
- **Capítulo 5:** Este capítulo aborda, por fim, a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Microrredes de Distribuição Ativa

Inicialmente o sistema de distribuição convencional era unidirecional, pois a geração era centralizada, e a distribuição fluía somente em um sentido, como é mostrado na figura 2.

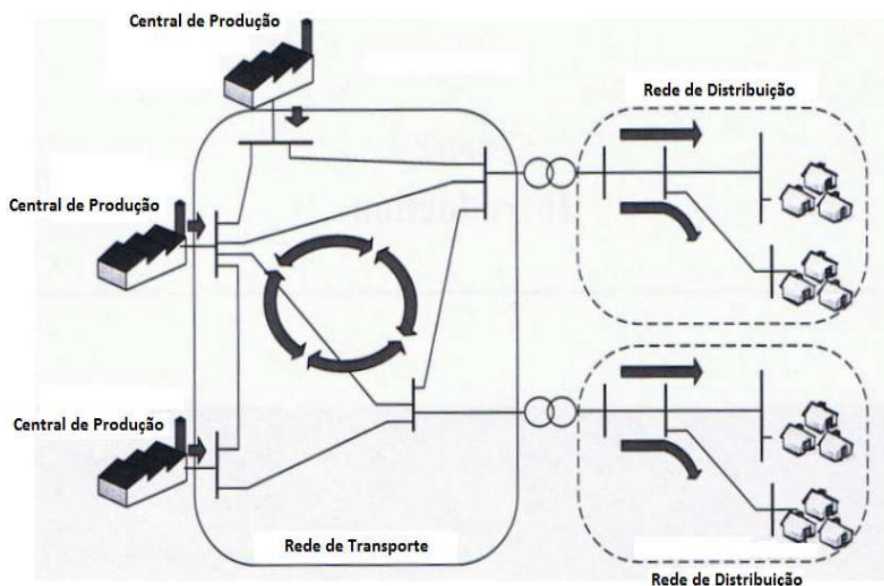


Figura 2: Rede de Distribuição Passiva [9].

Porém, nos anos 90, iniciou-se a integração de sistemas de geração dispersas à rede de distribuição, gerando assim, uma mudança no comportamento da rede, ou seja, tornando-a bidirecional [11]. Na figura 3, a seguir, é possível ver uma comparação entre os dois sistemas de distribuição apresentados, onde "PD" é produção dispersa de energia elétrica.

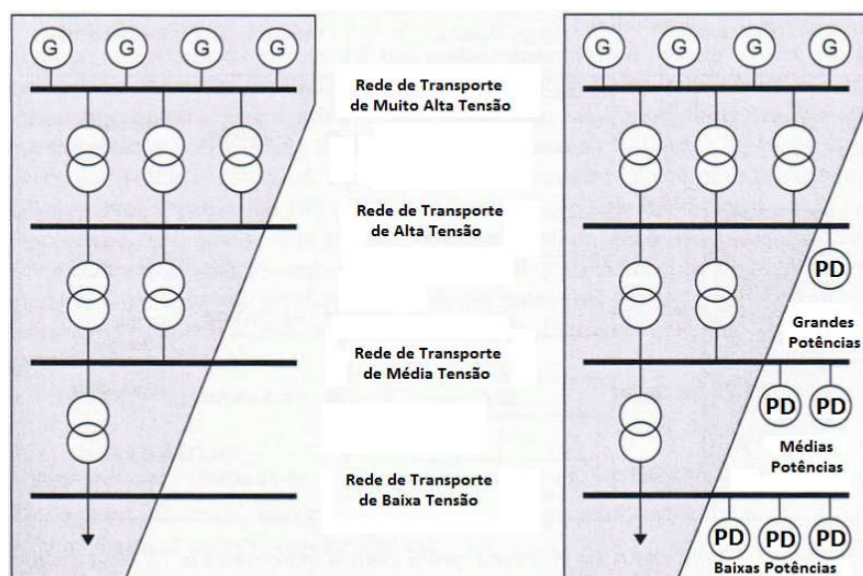


Figura 3: Rede convencional X Rede Ativa [9].

Por definição, microrredes são sistemas onde ocorrem a integração de vários recursos de geração distribuída, que operam conectados a rede elétrica de baixa ou média tensão, mas, caso haja uma parada inesperada ou até mesmo programada, possui capacidade de operar isoladamente. [7]

As microrredes podem envolver diversos componentes, e um desses componentes são as placas fotovoltaicas que, para este projeto, tem importância fundamental. Por isso, foi desenvolvido um estudo das configurações possíveis para este componente, e é apresentado a seguir.

Um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica pode ser configurado de diversas maneiras. A seguir estão algumas dessas configurações:

- **Inversor de um estágio.** Todos os processamentos (controle de corrente e de potência máxima injetada) são feitos pelo conversor CC/CA.

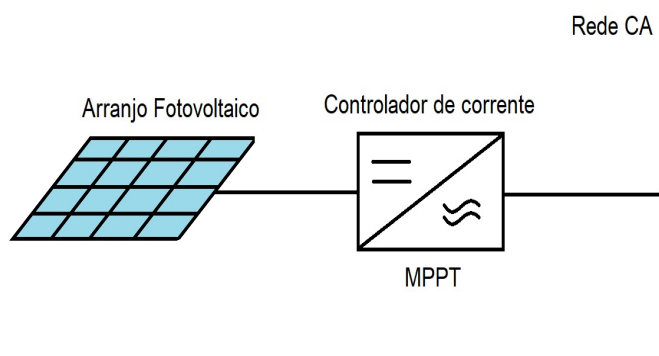


Figura 4: Inversor com um estágio de processamento de energia
Fonte: Adaptado de [12].

- **Inversor de dois estágios.** O controle de potência máxima injetada é feito pelo conversor CC/CC e o controle de corrente é realizado pelo conversor CC/CA.

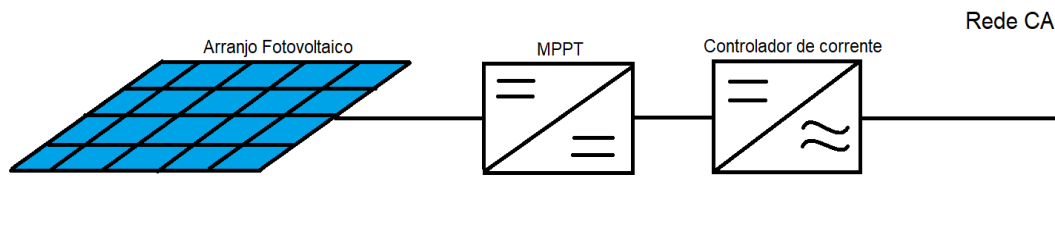


Figura 5: Inversor com dois estágios de processamento de energia
Fonte: Adaptado de [12].

- **Inversor com múltiplos estágios.** O controle de potência máxima injetada é feito pelos conversores CC/CC de cada estágio e o controle de corrente é realizado pelo conversor CC/CA.

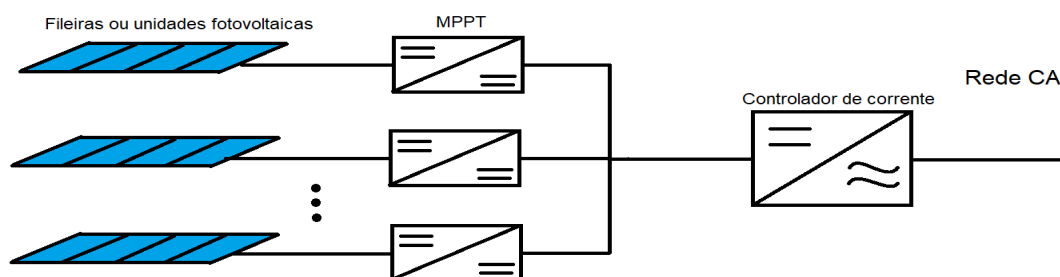


Figura 6: Inversor com múltiplos estágios de processamento de energia
Fonte: Adaptado de [12].

Além disso, quando necessário, é preciso realizar um arranjo fotovoltaico, que pode ser configurado de algumas formas, como:

- **Inversor centralizado.** Painéis fotovoltaicos são conectados em série entre si, formando fileiras, e as fileiras são conectadas em paralelo entre si, formando o arranjo, que é conectado a um único inversor.

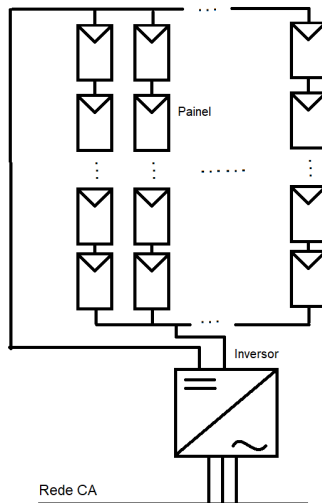


Figura 7: Arranjo fotovoltaico conectado à um inversor
Fonte: Adaptado de [12].

- **Configuração CC paralelo.** Cada fileira de painéis fotovoltaicos é conectada a um conversor CC/CC, e estes conversores são conectados a um barramento CC comum, que alimenta o inversor.

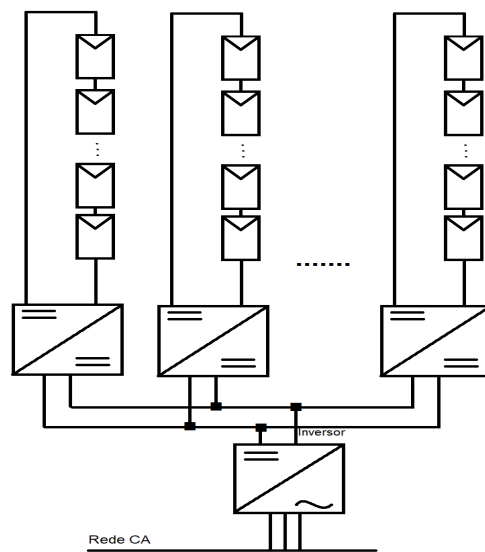


Figura 8: Arranjo conectado em configuração CC paralelo
Fonte: Adaptado de [12]

- **Configuração CA paralelo.** Cada fileira de painéis fotovoltaicos é conectada a um conversor CC/CA independente, sendo depois conectado a um barramento CA.

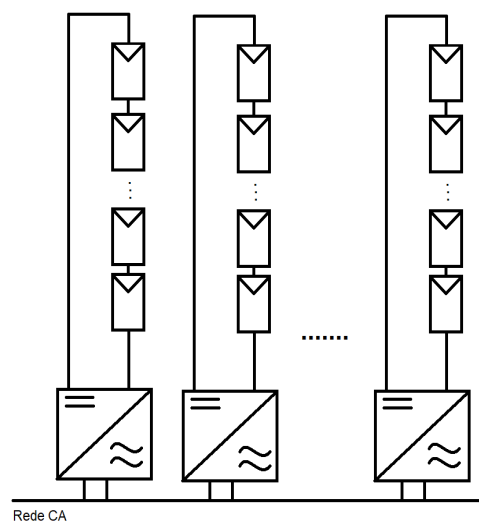


Figura 9: Arranjo conectado em configuração CA paralelo
Fonte: Adaptado de [12]

- **Configuração com inversor integrado.** Cada painel fotovoltaico é conectado a um conversor CC/CA independente, sendo depois conectado a um barramento CA.

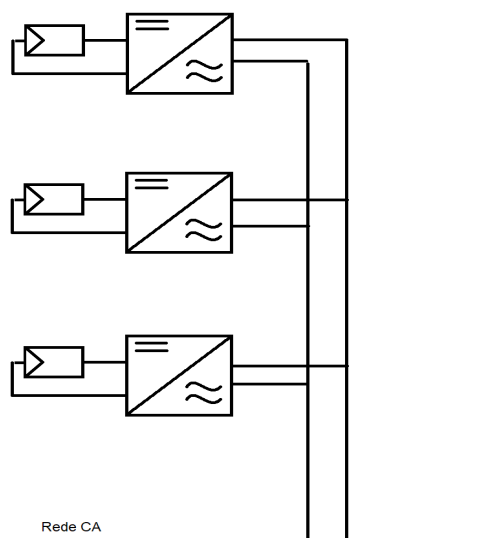


Figura 10: Painel fotovoltaico com inversor integrado
Fonte: Adaptado de [12]

Além das células fotovoltaicas, existem diversos componentes que podem ser conectados às microrredes, como baterias, geradores e outras formas de microgeração.

Ao possuir sistemas com diferentes formas de geração, como nas figuras 11 e 1, em situações de ilhamento, o sistema tem capacidade de auto alimentação.

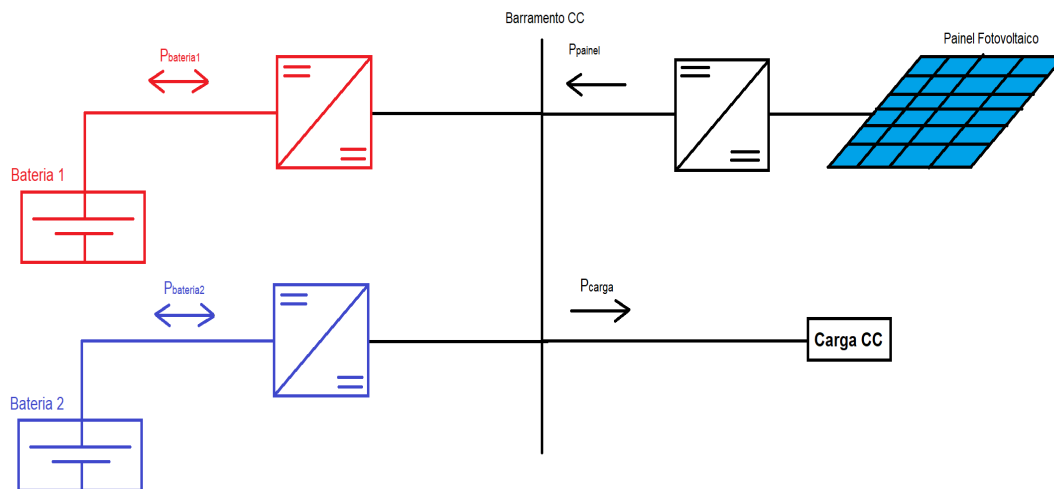


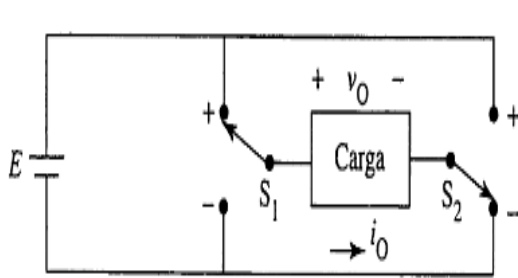
Figura 11: Exemplo de microrrede
Fonte: Adaptado de [6]

2.2 Inversores

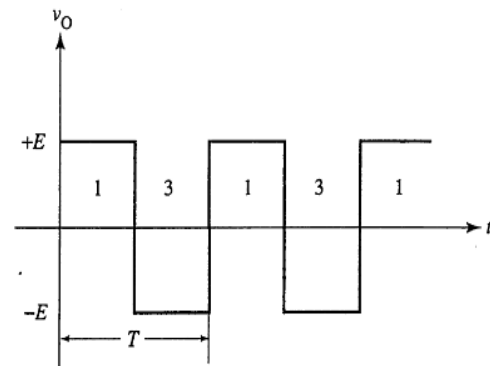
2.2.1 Circuitos Inversores

Inversores são conversores de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), onde é possível controlar a tensão e frequência ou a corrente na sua saída. Além disso, outra característica marcante é referente ao fato da tensão de saída possuir uma forma quase senoidal, ou seja, com pequenas distorções.

O inversor básico, mostrado na figura 13a opera de acordo com duas chaves que ligam e desligam a tensão de uma fonte V_{cc} de acordo com uma frequência $f = 1/T$ (Hz), gerando na saída uma tensão alternada, com forma parecida com a de uma onda quadrada, alternando entre os estados $+V_{cc}$, 0, $-V_{cc}$ e novamente 0, dentro do período T , como é possível observar na figura 13b.



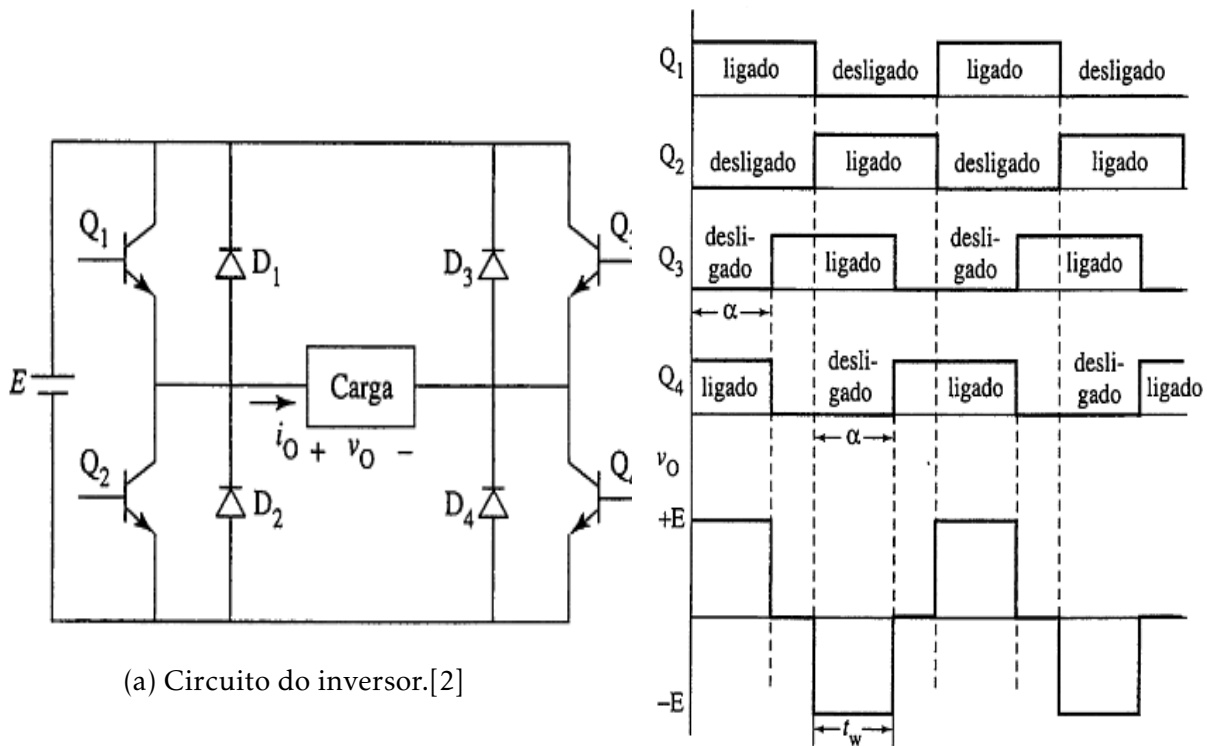
(a) Inversor básico em meia-ponte.[2]



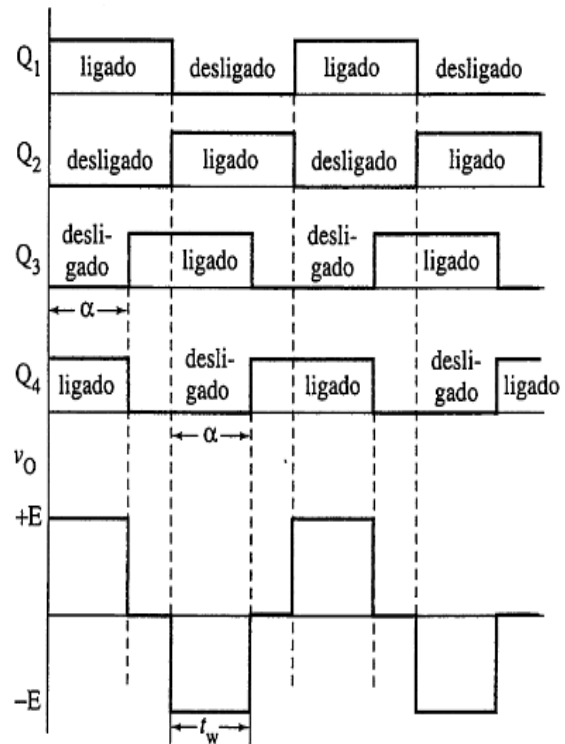
(b) Tensão de saída do inversor em meia-ponte. [2]

Figura 12: Inversor básico em H-ponte.[2]

Para a maioria das aplicações, tal forma na onda de saída não é suficiente. Por isso, foram desenvolvidos alguns métodos para que tal onda possua o formato próximo à uma onda senoidal. Assim, o método escolhido, que será alvo de estudo neste capítulo, são os inversores modulados por largura de pulso (*pulse width modulation - PWM*) em ponte completa. A seguir são mostrados o circuito monofásico e sua respectiva forma de onda na saída no PWM.



(a) Circuito do inversor.[2]



(b) Tensão de saída no PWM.[2]

Figura 13: Inversor monofásico em ponte completa.[2]

Desta maneira, a mesma análise é feita para os inversores trifásicos em ponte completa, e seu esquemático assim como suas tensões de saída são mostradas respectivamente na figura 14, e na tabela 1.

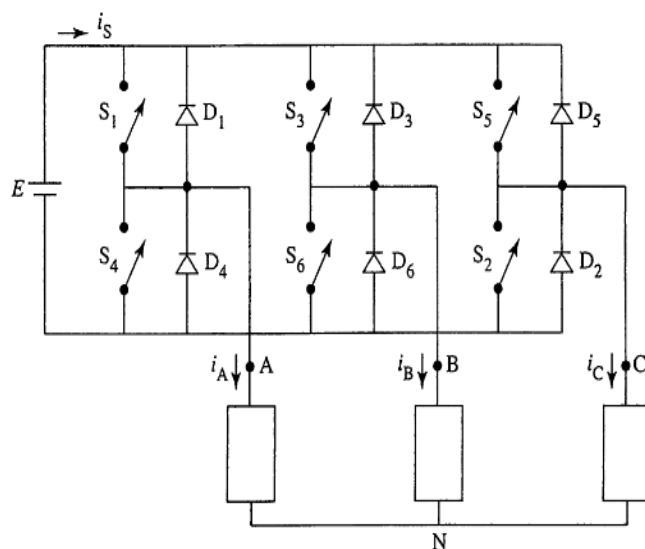


Figura 14: Circuito inversor trifásico em ponte completa.[2]

<i>Intervalo</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>	<i>S6</i>	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}
0° a 60°	on	off	off	off	off	on	+E/2	-E/2	0
60° a 120°	on	on	off	off	off	off	+E/2	0	-E/2
120° a 180°	off	on	on	off	off	off	0	+E/2	-E/2
180° a 240°	off	off	on	on	off	off	-E/2	+E/2	0
240° a 300°	off	off	off	on	on	off	-E/2	0	+E/2
300° a 360°	off	off	off	off	on	on	0	-E/2	+E/2

Tabela 1: Tensões de saída de acordo com ordem de chaveamento.[2]

2.2.2 Modelagem de Inversores

Na modelagem clássica de um inversor, é preciso levar em consideração que as componentes das tensões da rede elétrica estejam equilibradas e permaneçam assim. Além disso, também é preciso considerar a tensão no barramento CC constante, sem ondulações.

Desta forma, para o inversor **monofásico**, é utilizado o modelo por valores médios instantâneos aplicado à tensão V_{AB} , que possui comportamento conforme a figura 15.

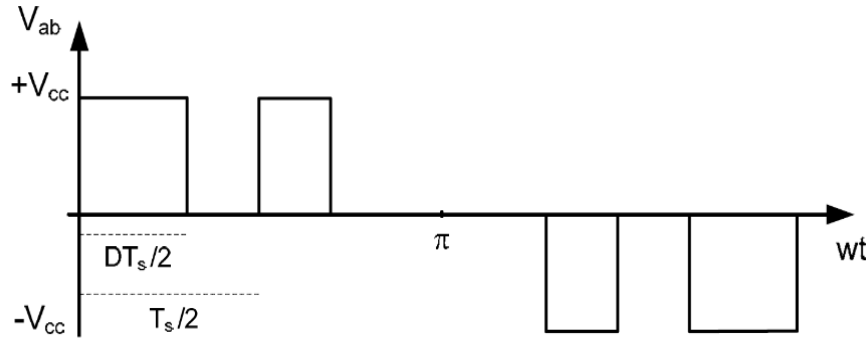


Figura 15: Tensão V_{AB} com modulação PWM à três níveis.

Utilizando-se o período de comutação, é encontrada a partir da análise da figura 15, a equação abaixo.

$$V_{AB_{mdia}} = \frac{1}{\frac{T_s}{2}} \cdot \int_0^{D \cdot \frac{T_s}{2}} +V_{CC} \cdot dt \quad (1)$$

Logo,

$$V_{AB_{mdia}} = D \cdot (+V_{CC}) \quad (2)$$

A partir disso, encontra-se o modelo equivalente representado na figura 16.

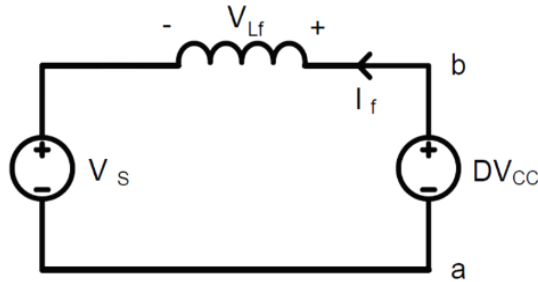


Figura 16: Circuito elétrico equivalente do sistema com inversor.

Ao aplicar a lei de kichhoff nele, encontra-se a seguinte equação:

$$V_s + V_{Lf} = D \cdot V_{CC} \quad (3)$$

E sabendo que

$$V_{Lf} = \frac{\partial I_f(t)}{\partial t} \quad (4)$$

é possível manipular as equações acima, e assim, encontrar a função transferência apontada a seguir:

$$G_i(s) = \frac{\delta I_f(t)}{\delta D(s)} = \frac{V_{CC}}{s \cdot L_f} \quad (5)$$

Na sequência é mostrada a modelagem do inversor **trifásico**. Para isso, é preciso utilizar o sistema $dq0$ de coordenadas, uma vez que o este sistema é girante na mesma velocidade w

que o vetor resultante no sistema abc . Assim, para realizar a troca do sistema abc para $dq0$, é utilizado as transformadas de Park, que transforma o sistema abc para o sistema de duas coordenadas $\alpha\beta0$, e Clarke, que trás do sistema $\alpha\beta0$ para o $dq0$. As duas transformadas juntas geram as equações mostradas a seguir.

$$\mu_d = \frac{2}{3} \cdot [\cos(wt) \cdot \mu_a + \cos(wt - 120) \cdot \mu_b + \cos(wt + 120) \cdot \mu_c] \quad (6)$$

$$\mu_q = \frac{2}{3} \cdot [-\sin(wt) \cdot \mu_a - \sin(wt - 120) \cdot \mu_b - \sin(wt + 120) \cdot \mu_c] \quad (7)$$

$$\mu_0 = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \mu_a + \frac{1}{2} \cdot \mu_b + \frac{1}{2} \cdot \mu_c \right] \quad (8)$$

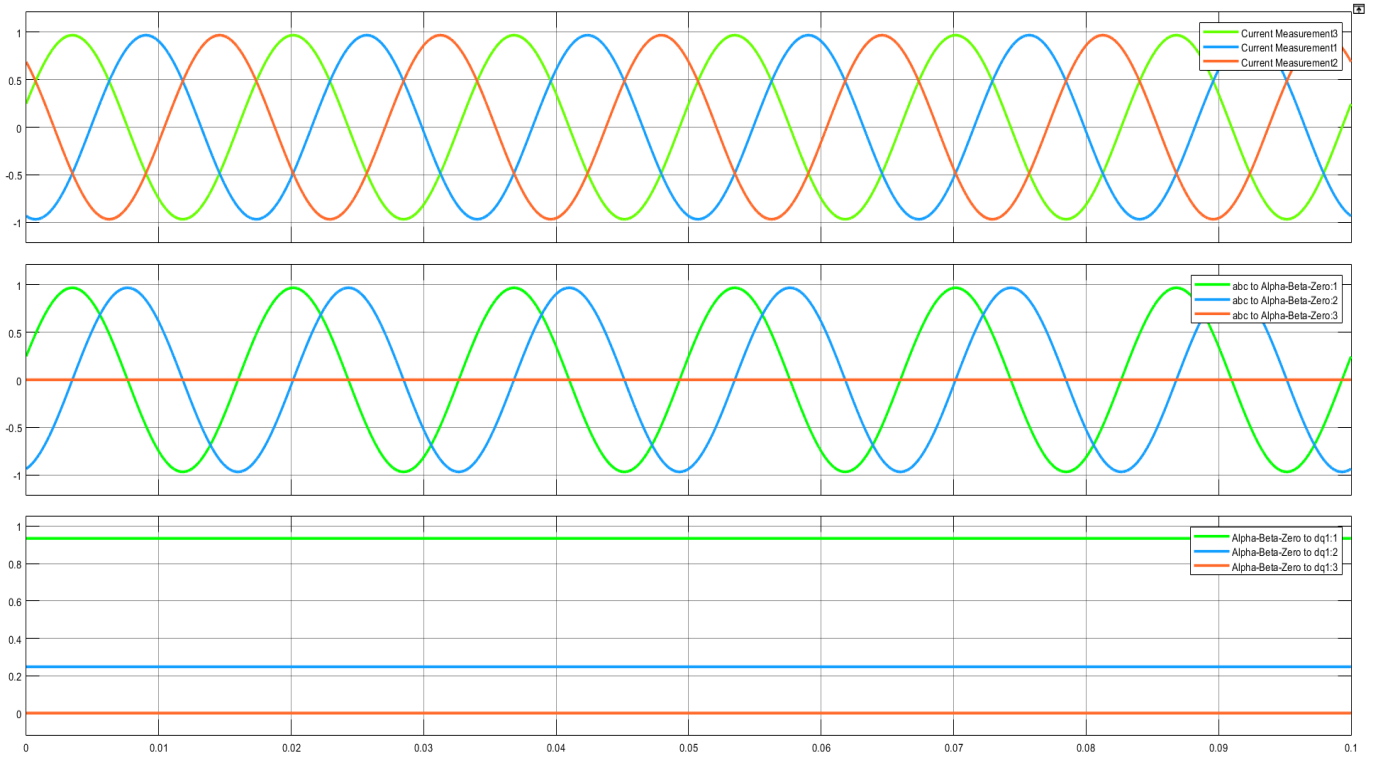


Figura 17: Sinal trifásico alternado no sistema abc , $\alpha\beta0$ e $dq0$, respectivamente.

Analisando um inversor em ponte completa de 3 braços, tem-se três equações, mostradas a baixo.

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_P = -L_F \cdot w \cdot i_q(t) + L_F \cdot \frac{\delta i_d(t)}{\delta t} + R_F \cdot i_d(t) + V_F \cdot D_d(t) \quad (9)$$

$$0 = L_F \cdot w \cdot i_d(t) + L_F \cdot \frac{\delta i_q(t)}{\delta t} + R_F \cdot i_q(t) + V_F \cdot D_q(t) \quad (10)$$

$$0 = L_F \cdot \frac{\delta i_0(t)}{\delta t} + R_F \cdot i_0(t) + V_F \cdot D_0(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_F \quad (11)$$

Assim, por ser um inversor a três fios (sem neutro), a componente de sequência zero é nula, e consequentemente $i_0(t) = 0$. Ao aplicar isso na equação 11, encontramos o valor da razão cíclica da componente zero:

$$D_0(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (12)$$

Para evitar interferências, é preciso desacoplar as equações. Por isso, são definidas duas variáveis, apresentadas a seguir.

$$D'_d(t) = D_d(t) - \frac{L_F \cdot w}{V_F} \cdot i_q(t) \quad (13)$$

$$D'_q(t) = D_q(t) - \frac{L_F \cdot w}{V_F} \cdot i_d(t) \quad (14)$$

Após aplicar as equações 13 e 14, nas equações 9, 10 e 11 do inversor, encontra-se as funções de transferência:

$$G_d(s) = \frac{i_d(s)}{d'_d(s)} = -\frac{V_F}{s \cdot L_F + R_F} \quad (15)$$

$$G_q(s) = \frac{i_q(s)}{d'_q(s)} = -\frac{V_F}{s \cdot L_F + R_F} \quad (16)$$

Onde: V_F é o valor de tensão no baramento CC, L_F é o indutor de entrada e R_F é a resistência do indutor de entrada. E, quando a onda triangular não é unitária, o ganho de desacoplamento e a razão cíclica da componente zero deve ser:

$$K_{des} = \frac{L_F \cdot w}{V_P} \cdot \frac{V_{triangular}}{K_{med_{corrente}}} \quad (17)$$

$$D_0(t) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_T \quad (18)$$

2.3 Cálculo Fracionário

Sabendo que o cálculo fracionário é a base para controladores de ordem não inteira, será feito uma breve revisão dos principais conceitos para aplicação no método de controle.

O cálculo fracionário é uma generalização dos processos de integração e derivação para ordens não inteiras, assim o operador integral-derivativo de ordem fracionária ${}_{t_0}D_t^\alpha$ pode ser definido como:

$${}_{t_0}D^\alpha = \begin{cases} \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau^{-\alpha}, & \alpha < 0 \\ f(t), & \alpha = 0 \\ \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} f(t), & \alpha > 0 \end{cases} \quad (19)$$

Onde a ordem de integração ou derivação α geralmente $\alpha \in \mathbb{R}$, mas também pode ser um número complexo [8], e t e t_0 são os limites do operador [15]. Porém, ainda não foi definida a operação de integral-derivação fracionária, assim, as três definições mais aceitas são as de Caputo, Riemann-Liouville, e Grunwald-Letnikov.

A primeira definição apresentada foi a de Riemann-Liouville [5] representada a seguir.

Integral de Riemann-Liouville:

$$J_c^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_c^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau \quad (20)$$

Derivada de Riemann-Liouville:

$$D^\alpha f(t) = D^m J^{m-\alpha} f(t) = \frac{d^m}{dt^m} \left[\frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha+1-m}} d\tau \right] \quad (21)$$

Então, foi demonstrada a definição de Grunwald-Letnikov [5].

Integral de Grunwald-Letnikov:

$$D^{-\alpha} f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^\alpha \sum_{m=0}^{\frac{t-\alpha}{h}} \frac{\Gamma(\alpha+m)}{m! \Gamma(\alpha)} f(t-mh) \quad (22)$$

Derivada de Grunwald-Letnikov:

$$D^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{m=0}^{\frac{t-\alpha}{h}} (-1)^m \frac{\Gamma(\alpha+1)}{m! \Gamma(\alpha-m+1)} f(t-mh) \quad (23)$$

E por último, a definição dada por Caputo[5].

$$D_*^\alpha f(t) = J^{m-\alpha} D^m f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t \frac{f^m(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha+1-m}} d\tau \quad (24)$$

2.4 Técnica de controle: Método Convencional

Neste capítulo será apresentado o método convencional de cálculo para controladores de inversores. Este método baseia-se na existência de dois controladores, o de corrente, ou malha interna, e o de tensão, ou malha externa, e utiliza alocação de polos para calculá-los.

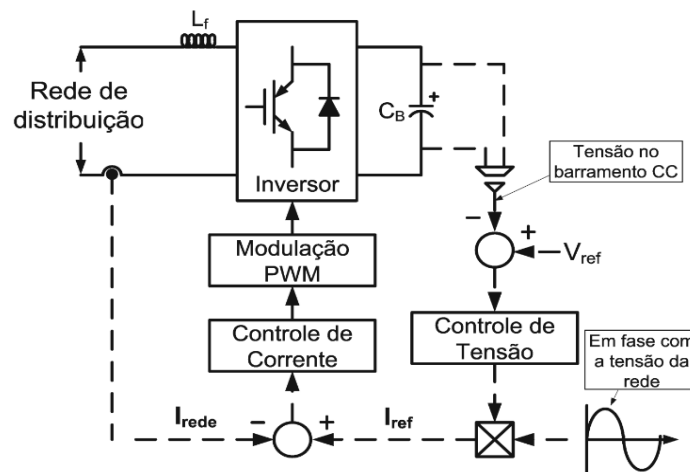


Figura 18: Malhas de controle do inversor.

A malha de tensão, dá como resposta a corrente de referência que será utilizada pela malha de corrente, e por isso possui uma característica lenta, se comparado à malha de corrente. Desta forma, a malha de corrente é calculada primeiramente, considerando um valor fixo para referência de corrente. Na figura 19, o circuito da figura 18 é representado por um diagrama de blocos, onde é mais facilmente identificadas as malhas de controle citadas.

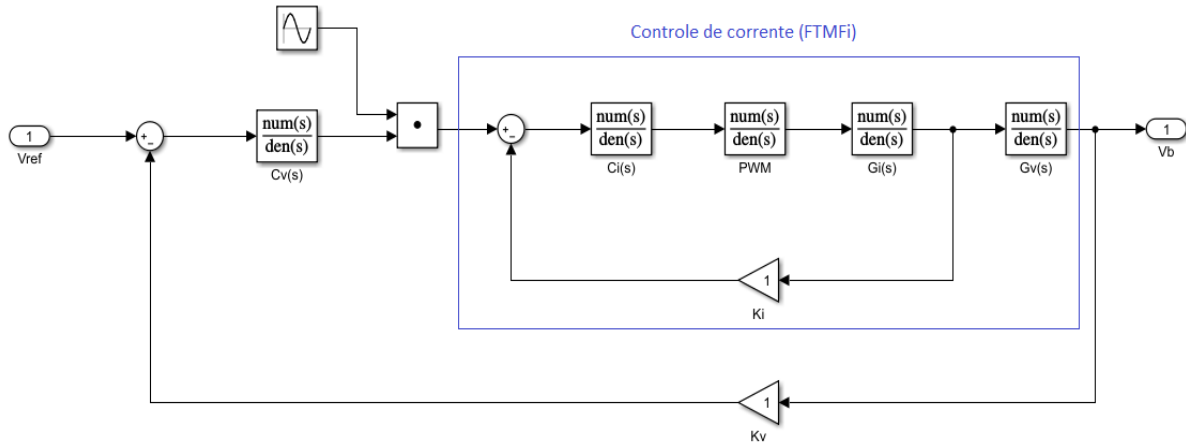


Figura 19: Diagrama de Blocos para malha de corrente e de tensão.

Assim, ao possuir a modelagem matemática do inversor, indicado na equação 15, é plotado o gráfico de bode deste, utilizando os parâmetros desejados de V_F, L_F e R_F . Após isso, é preciso selecionar a frequência de corte desejada, onde $f_c = \left(\frac{1}{5} * f_{chaveamento}\right)$, e com este valor, é identificado no gráfico de bode os valores de módulo, $|G|_{f_c}$, e ângulo, $\angle G|_{f_c}$, em f_c . Também é necessário selecionar um valor de margem de fase ideal para o projeto, que deve ser próximo de $MF_{desejada} = 60^\circ$, pois valores menores causam um elevado fator de sobretensão e oscilação, e valores maiores causam lentidão acentuada na resposta. Com isso, o avanço de fase $\phi_{advance}$ será calculado segundo a equação a seguir.

$$\phi_{advance} = -90^\circ + MF_{desejada} - \angle G|_{f_c} \quad (25)$$

Sabendo o valor de $\phi_{advance}$, é encontrado o valor de k_{pz} , através da fórmula apresentada na sequência.

$$k_{pz} = \tan\left(\frac{-\phi_{advance}}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (26)$$

Além disso, é preciso calcular, através da margem de ganho, o valor G_c , utilizando a fórmula abaixo.

$$|G_c| * |G_{pwm}| * |G|_{f_c} * k_{SensorCorrente} = 1 \quad (27)$$

Onde $k_{SensorCorrente}$ é o ganho relacionado ao sensor de corrente utilizado nas medições. A partir disso, são calculados os parâmetros f_z , f_p e k_c , conforme a seguir:

$$f_z = \frac{f_c}{k_{pz}} \quad (28)$$

$$f_p = f_c * k_{pz} \quad (29)$$

$$k_c = |G_c| * 2 * \pi * f_z \quad (30)$$

Sabendo os parâmetros apresentados acima, é possível encontrar a função de transferência do controlador de corrente desejado, identificado como C_i .

$$C_i = \frac{k_c}{s} * \left(\frac{1 + \frac{s}{2 * \pi * f_z}}{1 + \frac{s}{2 * \pi * f_p}} \right) \quad (31)$$

Assim, têm-se agora a malha de controle interna do inversor. Para realizar o cálculo da malha externa, é necessário levar os seguintes pontos em consideração:

- Como dito anteriormente, a malha de corrente é muito mais rápida que a de tensão, e por isso, para realizar os cálculos da malha externa de controle, é possível considerar que a resposta da malha interna é um valor constante.
- A frequência de corte para a malha externa não deve ser maior que 15Hz, de forma a evitar harmônicos.

Sabendo disso, a malha de corrente é incorporada ao inversor, e assim, é gerado uma nova função de transferência, conforme a equação abaixo:

$$\frac{\widetilde{v}_f}{\widetilde{i}_d} = \sqrt{\frac{3}{2}} * \frac{V_P}{V_F} * \left(\frac{1 - \frac{2}{3} * \frac{P}{V_P^2} * (L_F * s + 2 * R_F)}{s * C_F} \right) \quad (32)$$

Onde:

- V_P : Tensão de entrada eficaz no conversor;
- V_F : Tensão no barramento CC;
- P : Potência nominal do conversor;
- L_F : Indutor de entrada;
- R_F : Resistor de entrada;
- C_F : Capacitor de barramento CC.

A partir disso, o método é o mesmo:

- Plotar o gráfico de bode;
- Escolher a frequência de corte f_c , e a margem de fase desejada $MF_{desejada}$;
- Encontrar os valores de $|G|_{f_c}$ e $\angle G|_{f_c}$;
- Encontrar $\phi_{advance}$ e $|G_c|$;
- Calcular os valores de k_{pz} , f_z , f_p e k_c ;
- E por fim, calcular o compensador de tensão através da equação abaixo:

$$C_v = \frac{k_c}{s} * \left(\frac{1 + \frac{s}{2 * \pi * f_z}}{1 + \frac{s}{2 * \pi * f_p}} \right) \quad (33)$$

2.5 Técnica de controle: Método por Ordem não Inteira

2.5.1 FOPID

Os controladores FOPID, PID de ordem fracionária, foram criados por Podlubny [14] para controlar processos modelados por funções de transferência de ordem fracionária, nada mais é que uma generalização de controladores PID. A fórmula genérica de um controlador FOPID está descrita na equação 34.

$$FOPID = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d \cdot s^\mu \quad (34)$$

Onde o coeficiente de integração $\lambda \in \mathbb{R}^+$ e o de derivação $\mu \in \mathbb{R}^+$, e caso sejam números inteiros, tem-se o PID convencional, e K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral e K_d é o ganho derivativo. Na figura abaixo, está o diagrama de blocos desse modelo genérico.

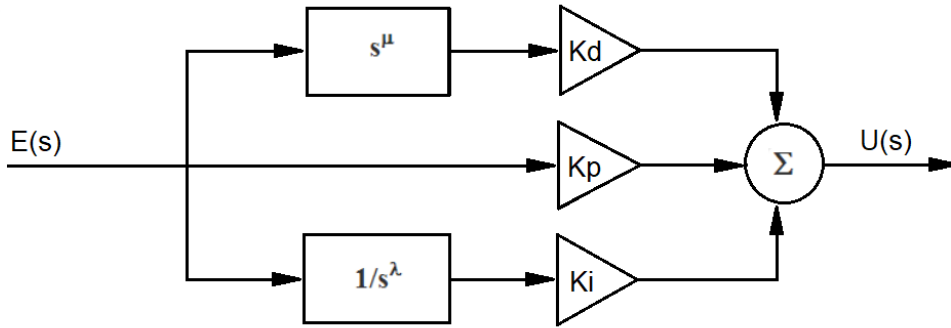


Figura 20: FOPID genérico.

2.5.2 CRONE

O CRONE, que em francês significa "Commande Robuste d'Ordre Non Entier", ou seja, controlador robusto de ordem não inteira, foi proposto por Oustaloup pela primeira vez em 1975, chamado de primeira geração, neste a principal aplicação era para plantas com modelo de perturbação do tipo ganho, e fase constante em torno de w_{cg} , sendo assim a ordem fracionária do controlador real. Depois disso, Oustaloup propôs também a segunda geração, que é aplicado à plantas com modelo de perturbação do tipo ganho, e a terceira geração, que é a forma de perturbação geral [1]. Neste trabalho, será utilizado a terceira geração, onde a função transferência em malha aberta $\beta_F(s)$ é calculada pela equação 35.

$$\beta_F(s) = K \left(\frac{w_{-N^-}}{s} + 1 \right)^{n1} \prod_{K=-N^-}^{N^+} \left[\left(\frac{1 + \frac{s}{w_{k+1}}}{1 + \frac{s}{w_k}} \right)^{\alpha_k} \left(\Re_{e/i} \left\{ \left(C_k \frac{1 + \frac{s}{w_{k+1}}}{1 + \frac{s}{w_k}} \right)^{ib_k} \right\} \right)^{-q_k \text{sign}(b_k)} \right] \frac{1}{1 + \frac{s}{(w_{N^++1})^{n_h}}} \quad (35)$$

Onde:

$$C_k = \begin{cases} \left(\frac{1 + \left(\frac{w_r}{w_0} \right)^2}{1 + \left(\frac{w_r}{w_1} \right)^2} \right)^{\frac{1}{2}}, & k = 0 \\ \left(\frac{w_{k+1}}{w_k} \right)^{\frac{1}{2}}, & k \neq 0 \end{cases} \quad (36)$$

E w_k e $K \in \mathbb{R}^+$, a_k e $b_k \in \mathbb{R}$, e n_1 e $n_h \in \mathbb{N}^+ .x$

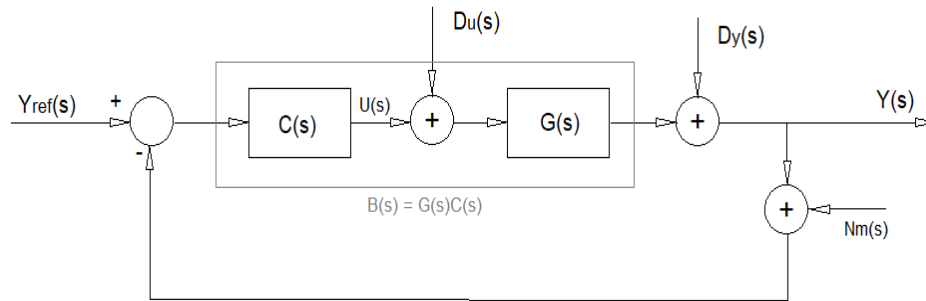


Figura 21: Esquemático de controle.

3 DESENVOLVIMENTO

O projeto dos controladores, tanto pelo método convencional, quanto pelo método CRONE, foi realizado idealizando a microrrede já existente na UFPR, campus centro politécnico, no departamento de engenharia elétrica (DELT), via simulações. Na figura 22, é mostrado um esquemático desta microrrede.

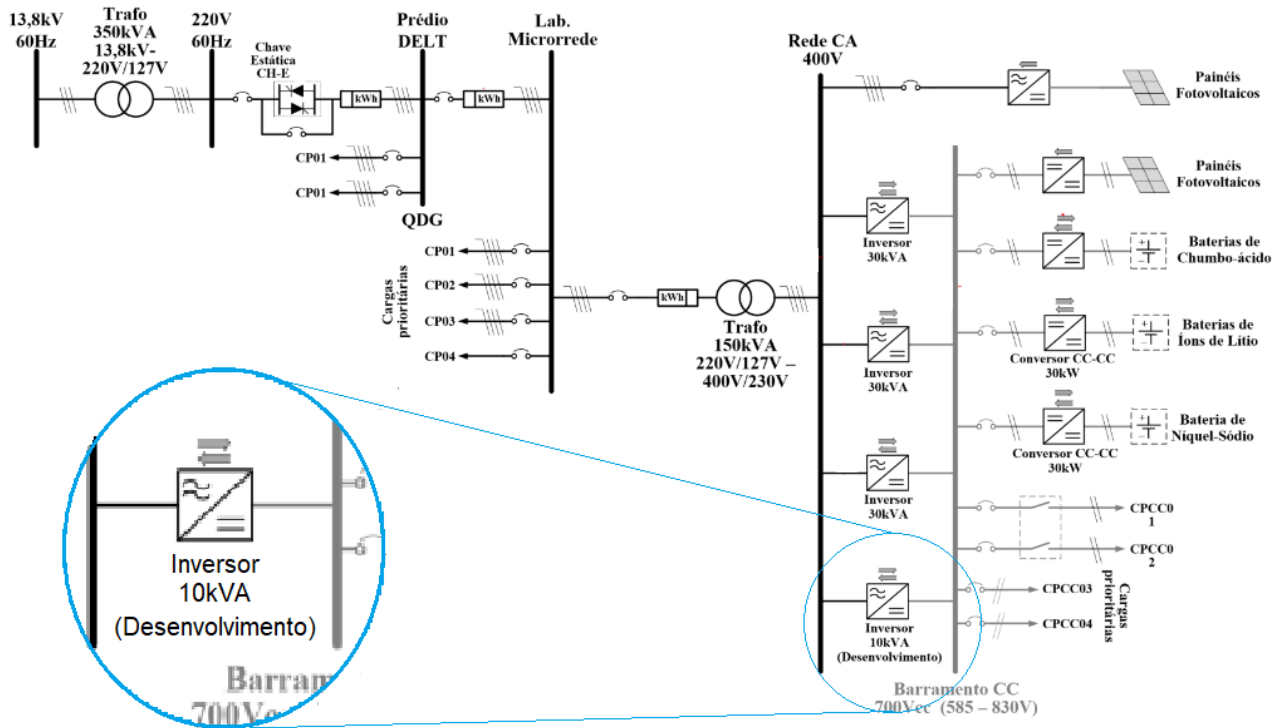


Figura 22: Microrrede da UFPR.

O objeto de estudo deste projeto de conclusão de curso será o inversor solar, modelo PVS-100-TL, da marca ABB, destacado na figura 22, mas a microrrede dispõe também de 268 placas solares do modelo CS3W-400P, além de cargas que serão apresentadas ao longo do desenvolvimento deste capítulo, além de baterias e outros modelos de inversores, que não serão alvo de estudo aqui. O arranjo fotovoltaico existente é apresentado na figura 23, a seguir.



Figura 23: Placas solares que compoem a microrrede do DELT.

3.1 Controlador pelo método convencional

Através do método apresentado no capítulo 2.3, foi desenvolvido controladores para a microrrede apresentada, e por isso, os seguintes parâmetros foram levados em consideração:

- A tensão de entrada V_p é 400V;
- A tensão no barramento CC V_F pode variar entre 585 e 830V, portanto foi considerado um valor médio de 720V;
- A potência nominal do inversor é $P = 10kW$;
- A resistência de entrada foi considerada $R_F = 0,1\Omega$;
- Para a indutância de entrada do inversor foi utilizado um valor de $L_F = 700\mu H$;
- Para a capacitância do barramento CC foi aproximado em $C_F = 128,8\mu F$;
- O ganho do sensor de corrente utilizado foi $k_{SensorCorrente} = 500mV/A$;
- E para o sensor de tensão foi considerado um ganho de $k_{SensorTenso} = 1000mV/V$;
- A frequência de corte selecionada foi $f_c = 10kHz$;
- A margem de fase escolhida para o projeto foi de $MF_{desejada} = 60^\circ$.

Assim, segundo a equação 15, foi encontrada a função de transferência do inversor, mostrada na equação 37, e seu gráfico de bode está plotado na sequência.

$$G_d(s) = -\frac{720}{0,0007s + 0,1} \quad (37)$$

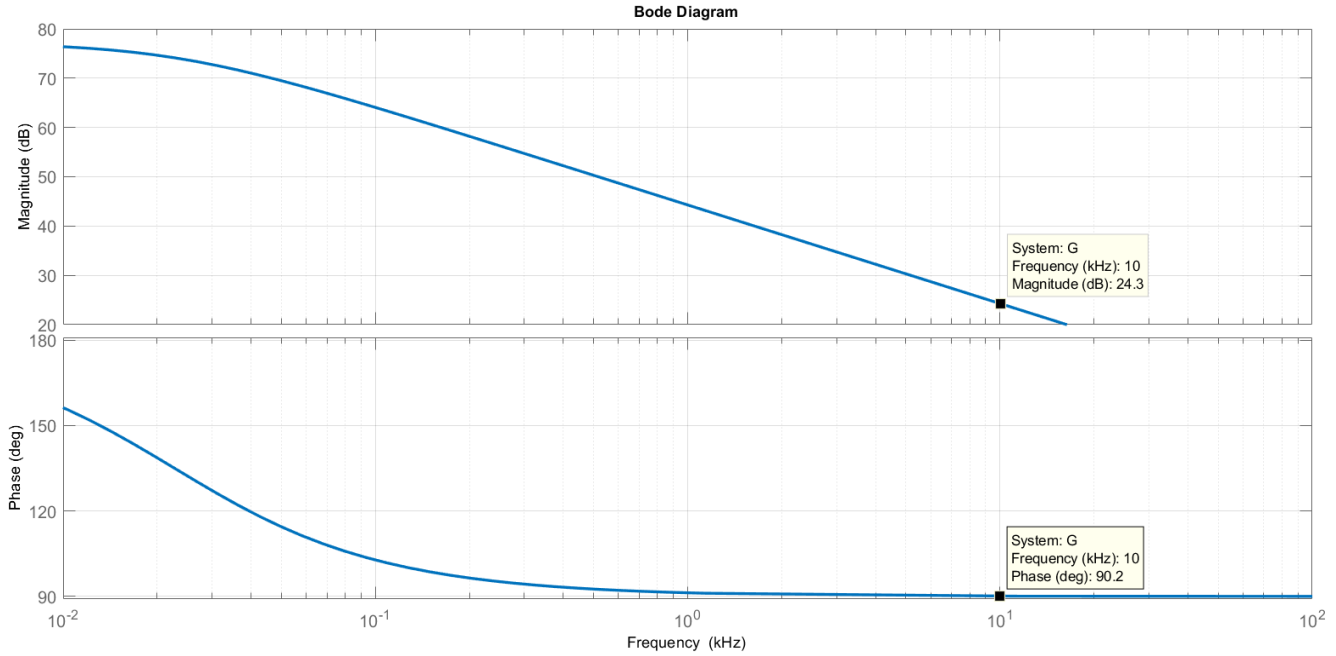


Figura 24: Gráfico de bode do inversor.

Desta maneira, na frequência de corte f_c escolhida, foram encontrados $|G|_{f_c=10kHz} = 24,2dB$ e $\angle G|_{f_c=10kHz} = 90,2^\circ$. Com esses valores, tem-se que $\phi_{advance} = 60,2^\circ$, $|G_c| = 1,233$ e $k_{pz} = 3,758$. Com isso, encontra-se os valores de f_z , f_p e k_c , sendo estes $2,66 * 10^3$, $3,76 * 10^4$ e $3,19 * 10^5$, respectivamente. E, a partir destes, é calculado o compensador de corrente, mostrado na equação 38.

$$C_i = \frac{1,233s + 2,091 * 10^4}{4,294 * 10^{-6}s^2 + s} \quad (38)$$

Tendo esta equação em vista, o próximo passo é encontrar a função de transferência do inversor com a compensação de corrente inclusa. De acordo com a equação 32, chega-se à seguinte fórmula:

$$G_t = \frac{-0,1541s + 5240}{s} \quad (39)$$

Que gerou o gráfico de bode apresentado na figura 25, abaixo. Nele, foi encontrado os valores de $|G_t|_{f_c=15Hz} = 34,9dB$ e $\angle G_t|_{f_c=15Hz} = 270^\circ$.

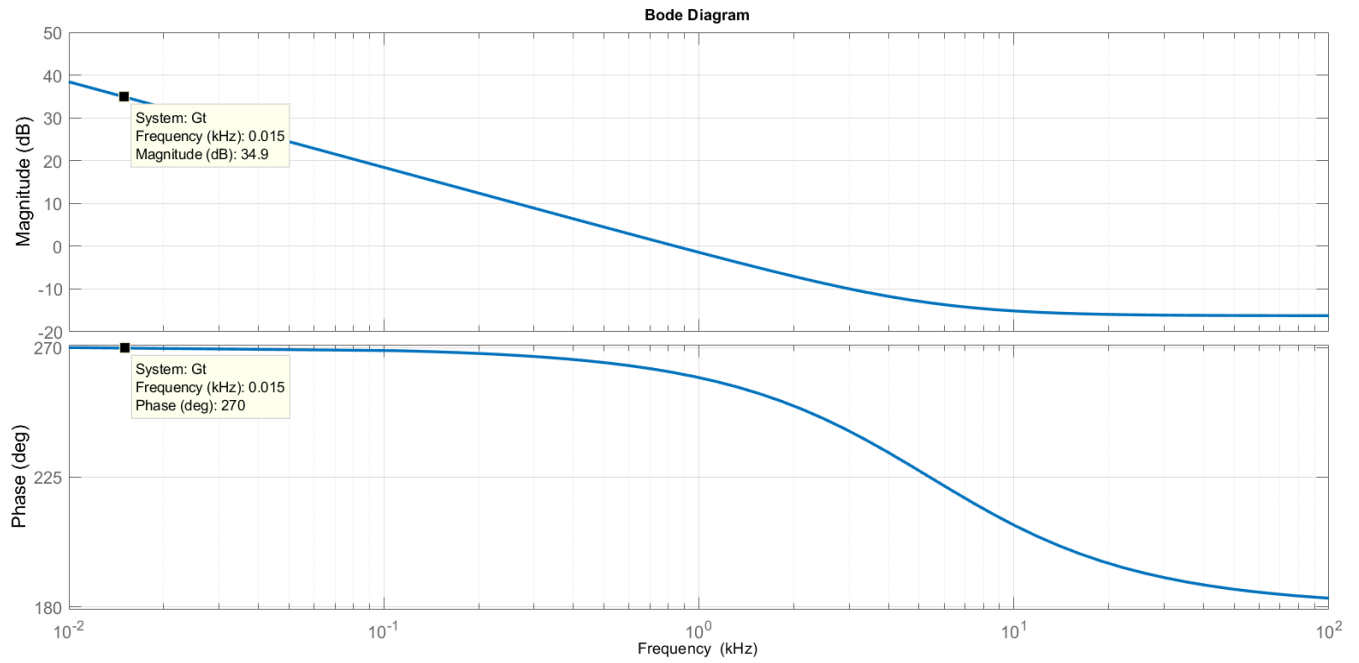


Figura 25: Gráfico de bode do inversor com compensação de corrente.

Da mesma forma foram encontrados os valores de $\phi_{advance} = 60^\circ$, $|G_{c_t}| = 0,1799$ e $k_{pz_t} = 3,732$. E em seguida, os valores de $f_z = 4,0192$, $f_p = 55,981$ e $k_c = 4,543$.

Finalmente, é calculada o controlador de tensão de acordo com a equação 33, mostrado a seguir.

$$C_v = \frac{0,1799s + 4,543}{0,002843s^2 + s} \quad (40)$$

Desta maneira, para realizar as simulações necessárias para testar os controladores desenvolvidos, foi criada uma simulação via Simulink (Matlab), mostrada nas figuras 27, baseado no esquemático a seguir.

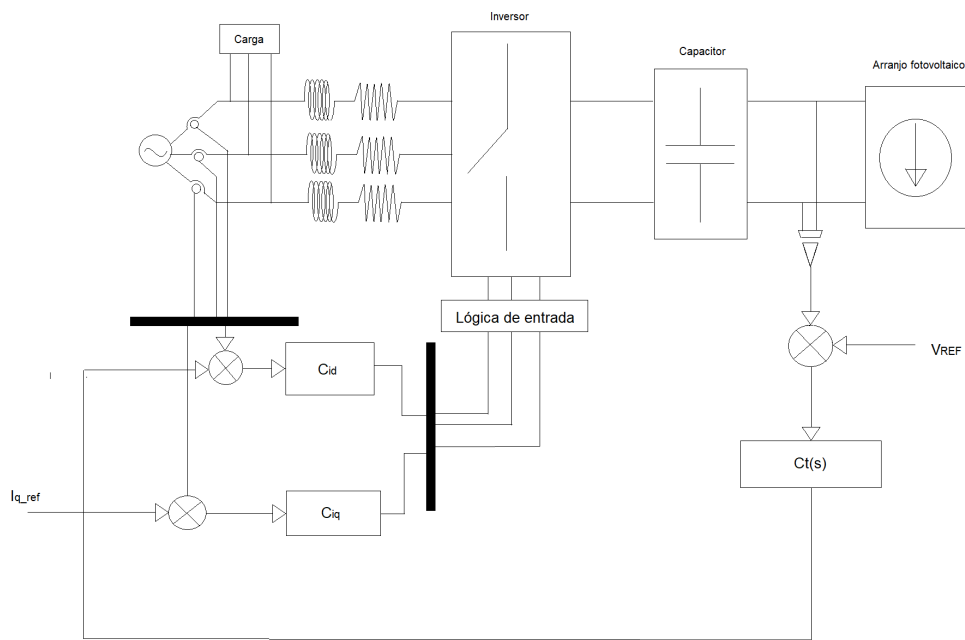


Figura 26: Esquemático base utilizado para simulação.

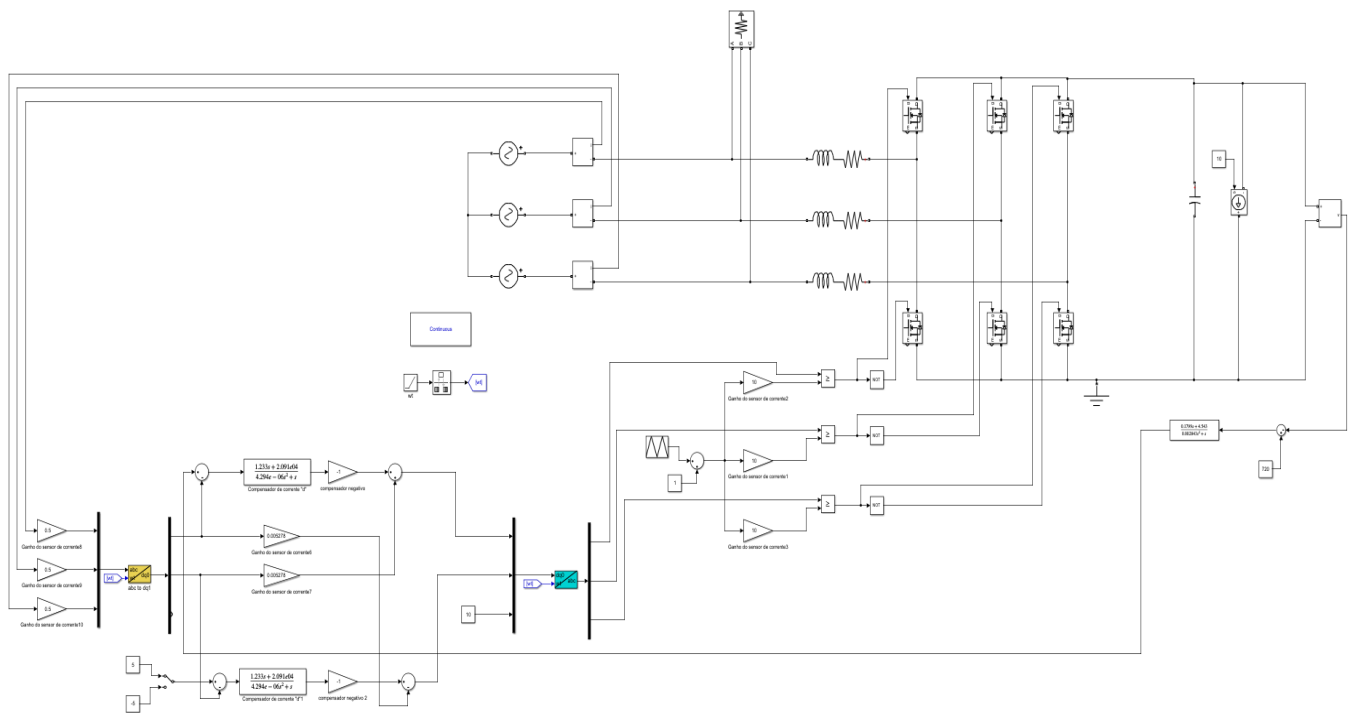
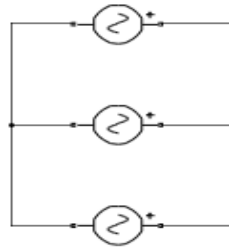
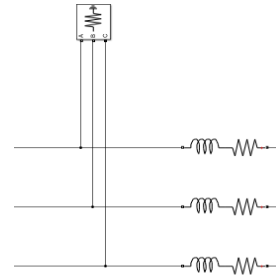


Figura 27: Simulação no Simulink.

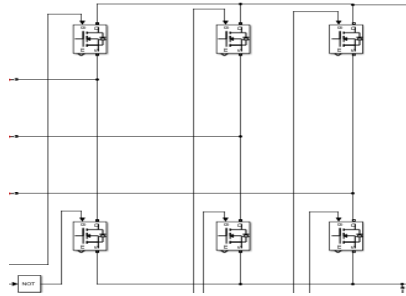
A seguir, serão mostrados detalhes da simulação na figura 35.



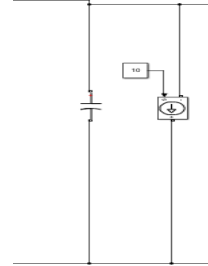
(a) Rede elétrica.



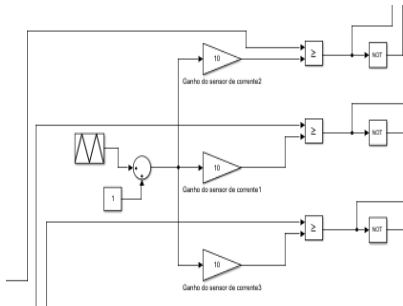
(b) Carga, e indutâncias e capacitâncias de entrada.



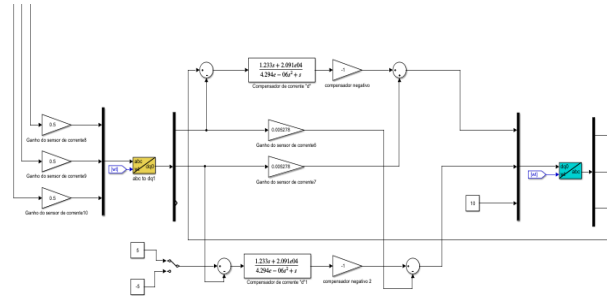
(c) Inversor.



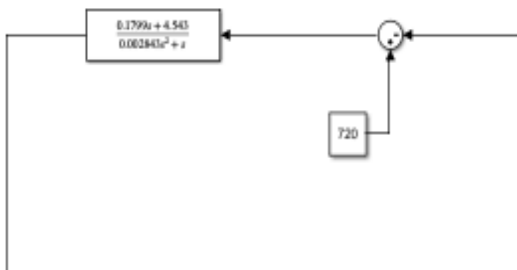
(d) Capacitância do barramento CC e fonte de corrente simulando o arranjo fotovoltaico.



(e) Lógica de entrada.



(f) Circuito de controle de corrente com compensação.



(g) Circuito de controle de tensão com compensação.

Figura 28: Detalhes da simulação.

Os resultados da simulação podem ser encontrados na próxima seção, denominada "Validação do modelo convencional".

3.2 Validação do modelo convencional

Neste subcapítulo, serão mostradas as respostas encontradas na simulação proposta anteriormente.

Na figura 29, é apresentada a tensão e corrente medidas ao longo de um ciclo. Nela, podemos verificar a operação correta dos controladores, elevando a tensão no capacitor do barramento até 720V, valor setado inicialmente como parâmetro.

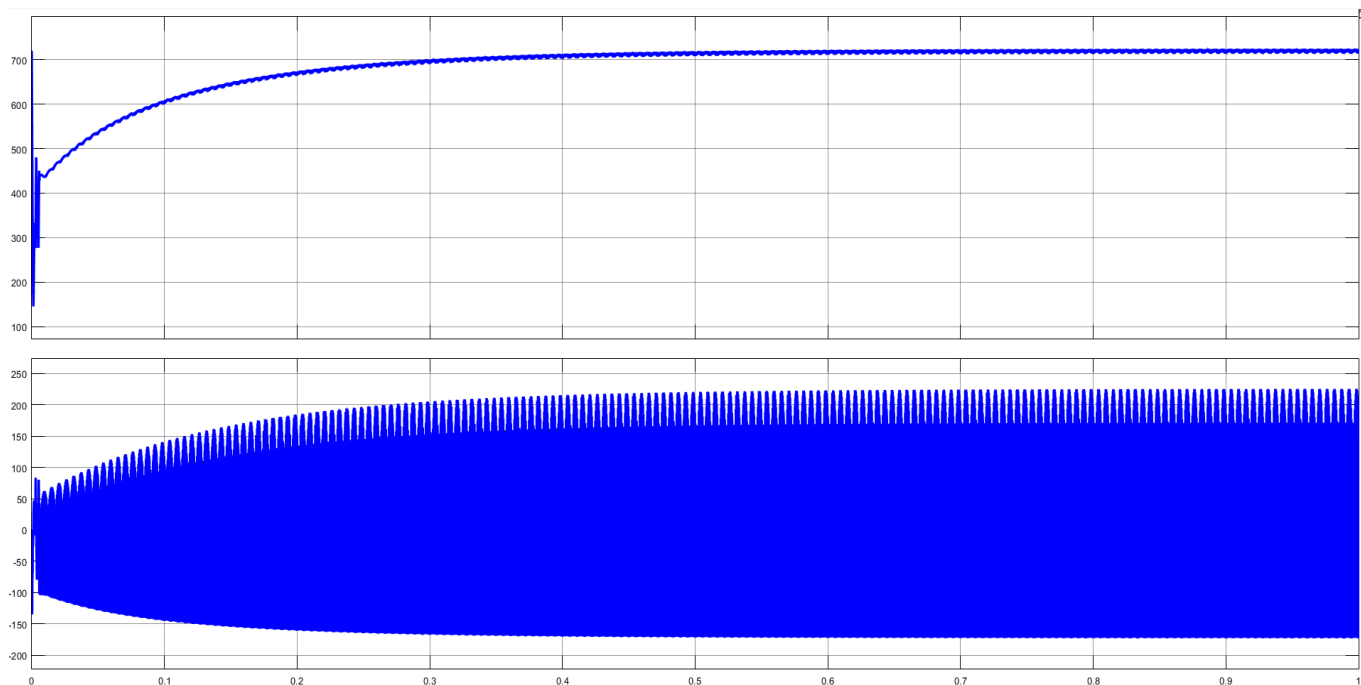


Figura 29: Tensão e corrente no barramento CC.

Nas figuras abaixo, é mostrada as curvas de tensão e corrente, no barramento CA, ou seja, entre as cargas e a rede. Ao ver a imagem com maior proximidade, mostrado na figura 31, é notado que a corrente está em fase com a tensão da rede.

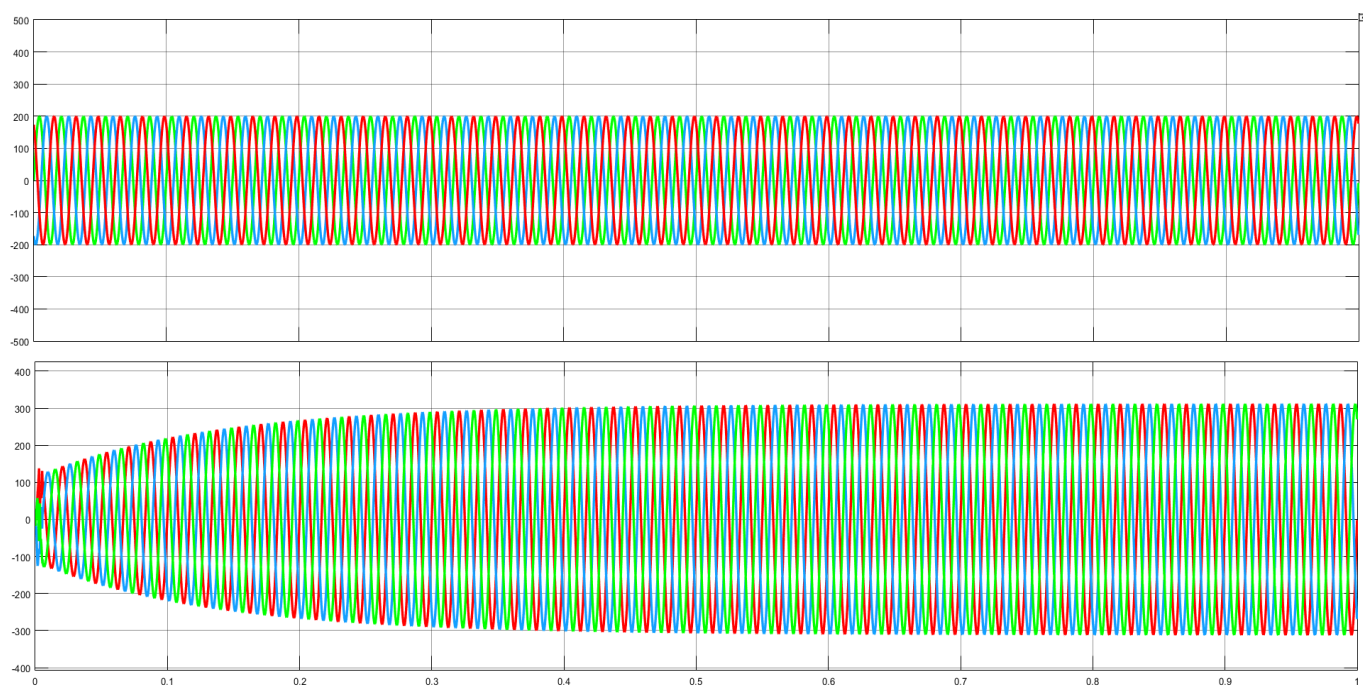


Figura 30: Tensão e corrente no barramento CA.

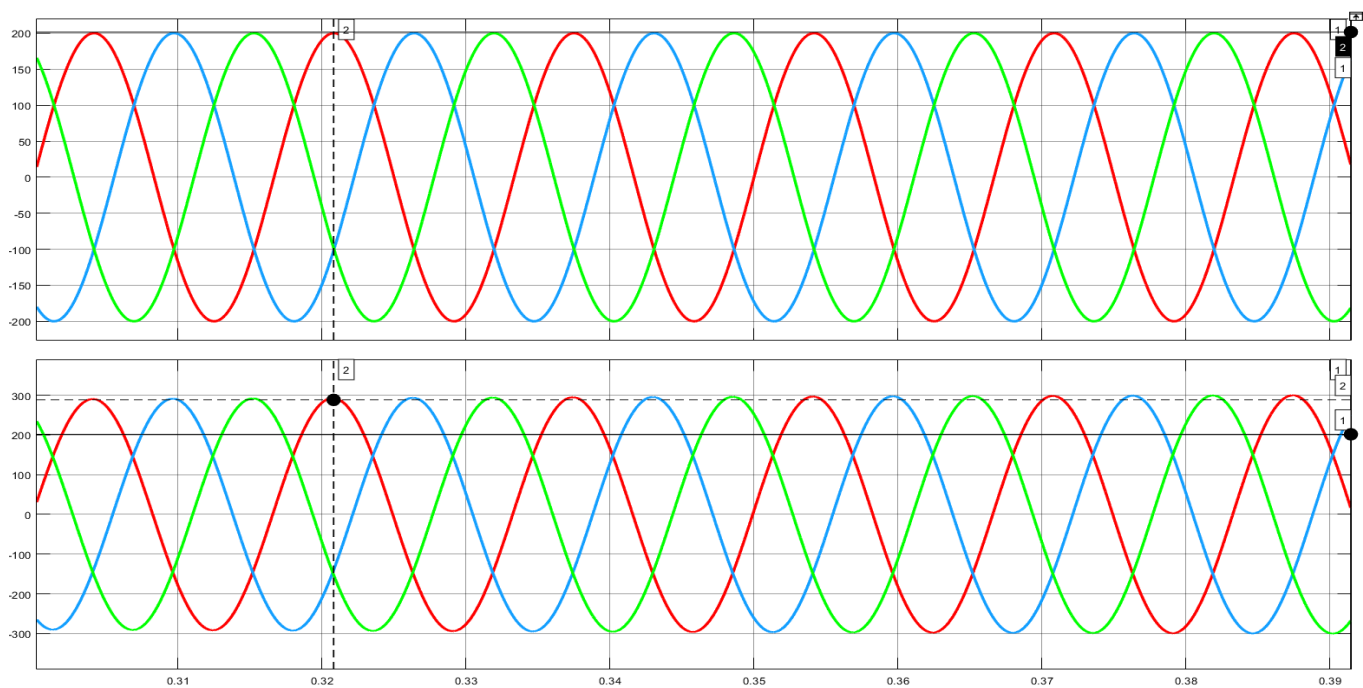


Figura 31: Tensão e corrente no barramento CA, sinal aumentado.

A seguir, são apresentados os sinais encontrados na entrada e na saída do compensador de tensão, respectivamente.

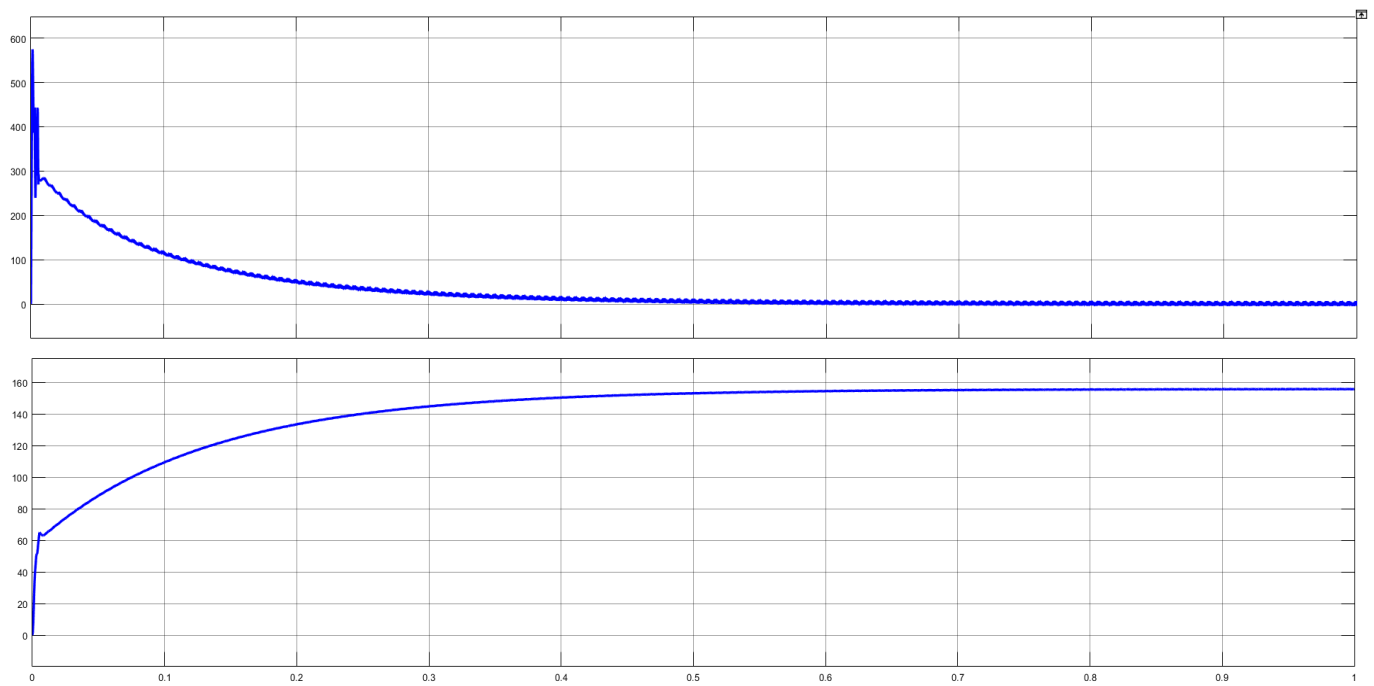


Figura 32: Sinal de erro sob o compensador de tensão e corrente de saída do compensador de tensão.

Na figura 33, está a resposta do compensador de corrente, mostrando novamente o funcionamento esperado deste.

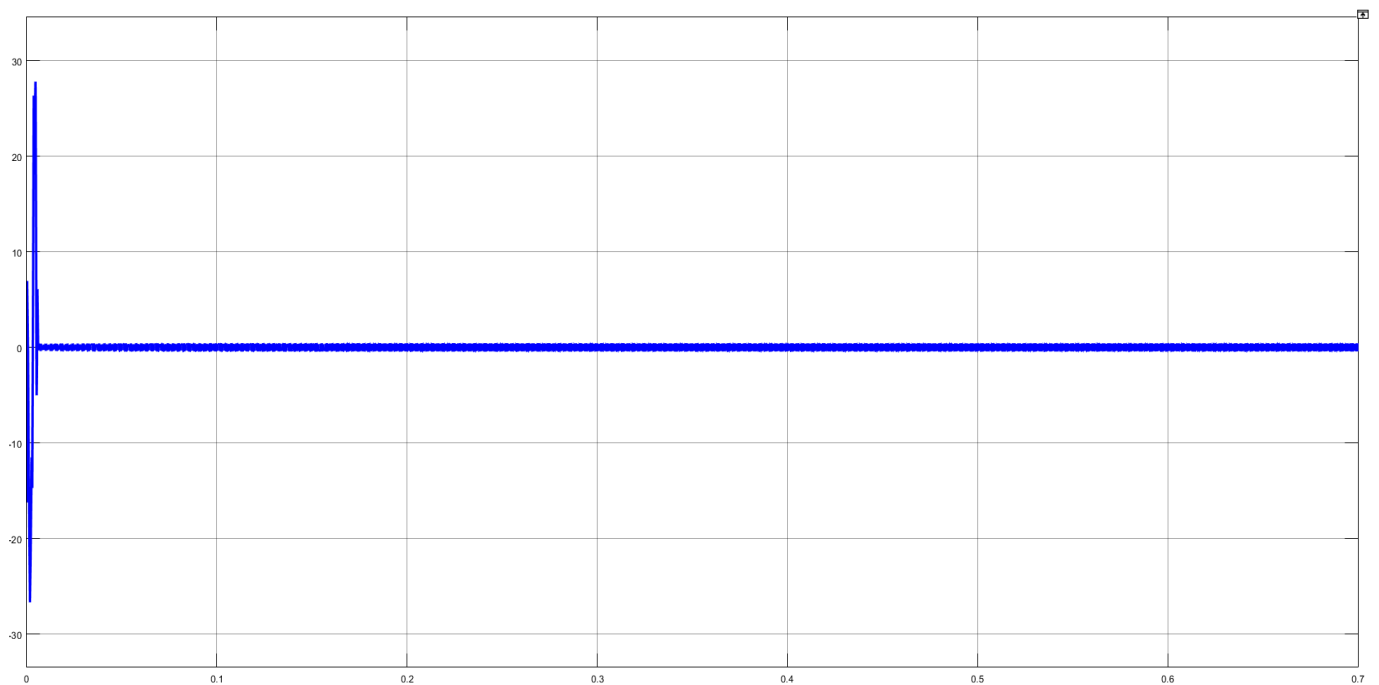


Figura 33: Corrente de saída do compensador de corrente.

Ao analisar os gráficos apresentados anteriormente, pode-se perceber que os controladores projetados funcionam, porém tem respostas mais lentas do que as ideais, e possuem um

erro de regime permanente, por mais que pequeno.

3.3 Controlador CRONE

Para desenvolver o controlador CRONE necessário para este projeto, foi utilizado a CRONE Toolbox, para Matlab.

Inicialmente, foi utilizada a mesma planta do inversor, onde seu gráfico de bode é mostrado na figura 24, para encontrar os parâmetros iniciais. São estes a frequência de ressonância $W_n = 152rad/s$, e o pico de ressonância nominal, sendo este $73,8dB$. A partir destes dados, foram definidos os valores de $n_1 = 72dB$, e $n_h = 75dB$, como margem. Assim, os parâmetros necessários foram setados na função utilizada da toolbox citada anteriormente, cujo esquemático é apresentado no apêndice A, e foram encontrados os seguintes dados: $w_0 = 0,6rad/s$, $w_1 = 15rad/s$, $a_0 = -22,95$ e $b_0 = 4,82$, além dos parâmetros variáveis $w_r = 3rad/s$ e $Y_0 = 2$.

Da mesma maneira, o procedimento foi realizado para o compensador de tensão. A planta utilizada foi a mesma apresentada na figura 25, utilizando agora os seguintes parâmetros $w_n = 3,46.10^4rad/s$, com pico de ressonância em $-13,3dB$. Disso, foram definidos $n_1 = -14dB$, e $n_h = -11dB$, e na sequência foram encontrados os valores de $w_0 = 0,6rad/s$, $w_1 = 15rad/s$, $a_0 = 5,47$ e $b_0 = 0,46$, além dos parâmetros variáveis $w_r = 15rad/s$ e $Y_0 = 3$.

3.4 Validação do modelo CRONE

Inicialmente, foi utilizado o controlador encontrado no capítulo anterior, e a seguir encontra-se o resultado da simulação.

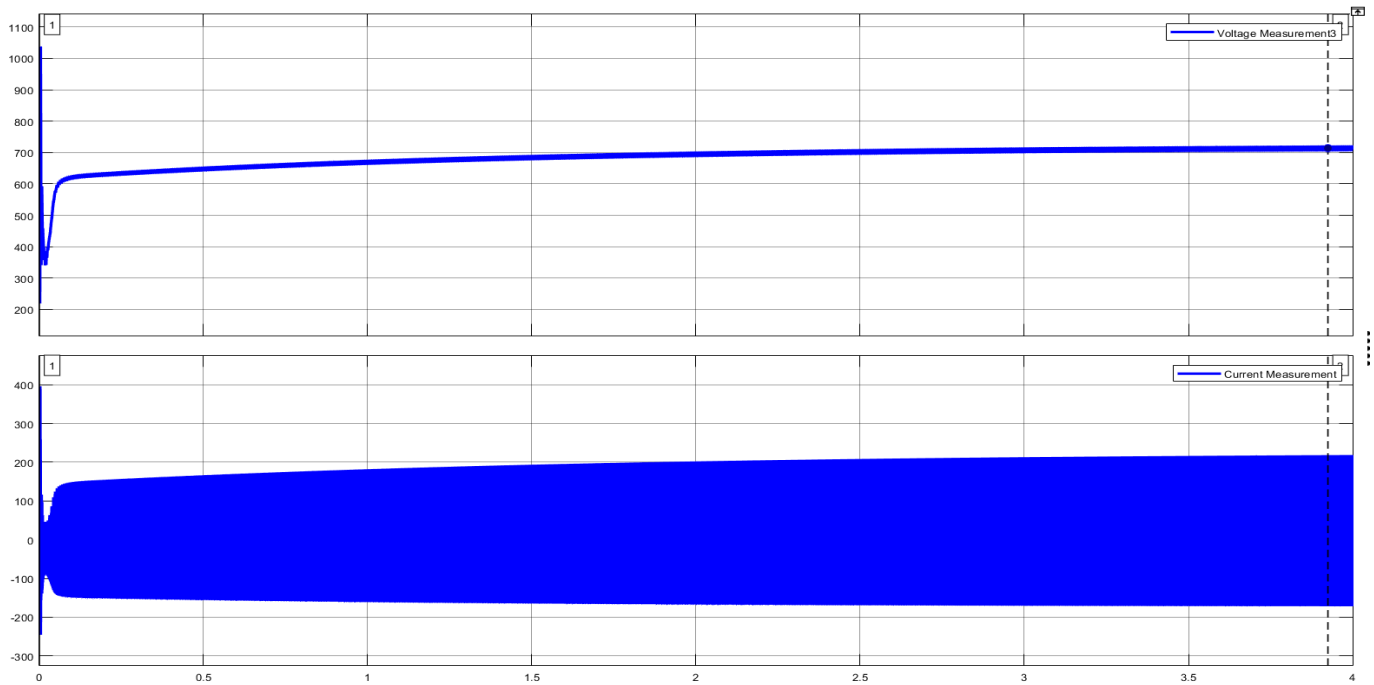


Figura 34: Tensão e corrente no barramento CC.

Porém, ao analisar a figura 34, é percebido que o controlador CRONE apresenta um comportamento comparável à um controlador PD (proporcional diferencial), apresentando um longo tempo de subida, em torno de $t_r = 3,6s$, e um pequeno erro em regime permanente, por ser um modelo de maior robustez [4]. Assim, para o modelo de controlador ser melhor adequado ao resultado esperado, foi somado um integrador ao seu funcionamento, mostrando assim, melhores respostas. Na figura 35, estão dispostos os controladores finais.

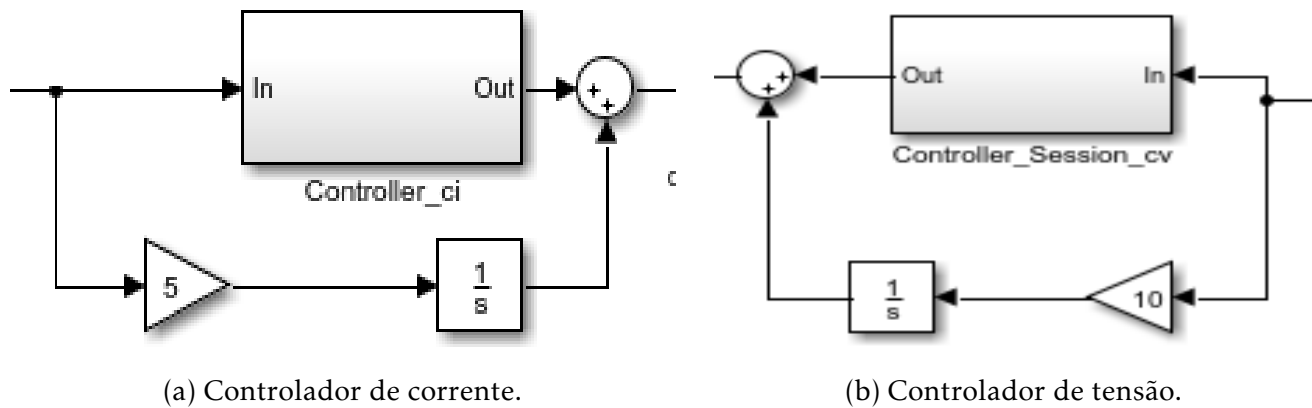


Figura 35: Controladores CRONE projetados.

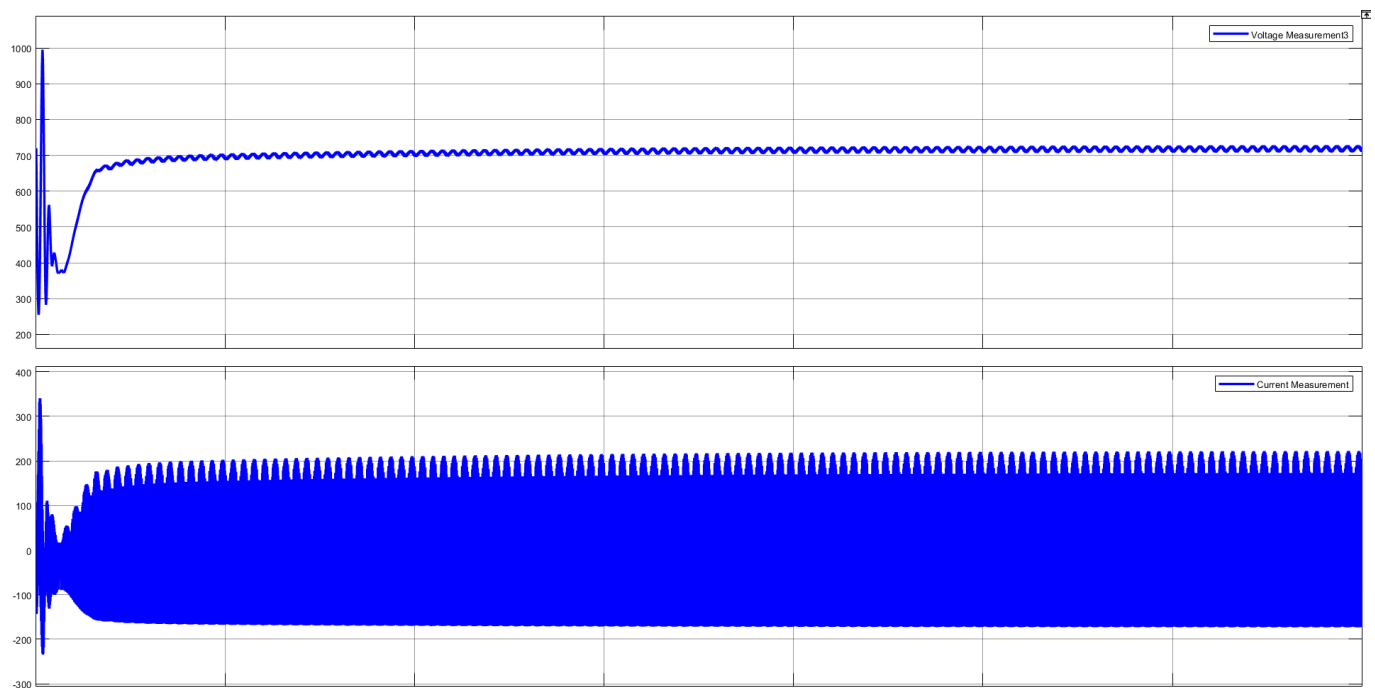


Figura 36: Tensão e corrente no barramento CC.

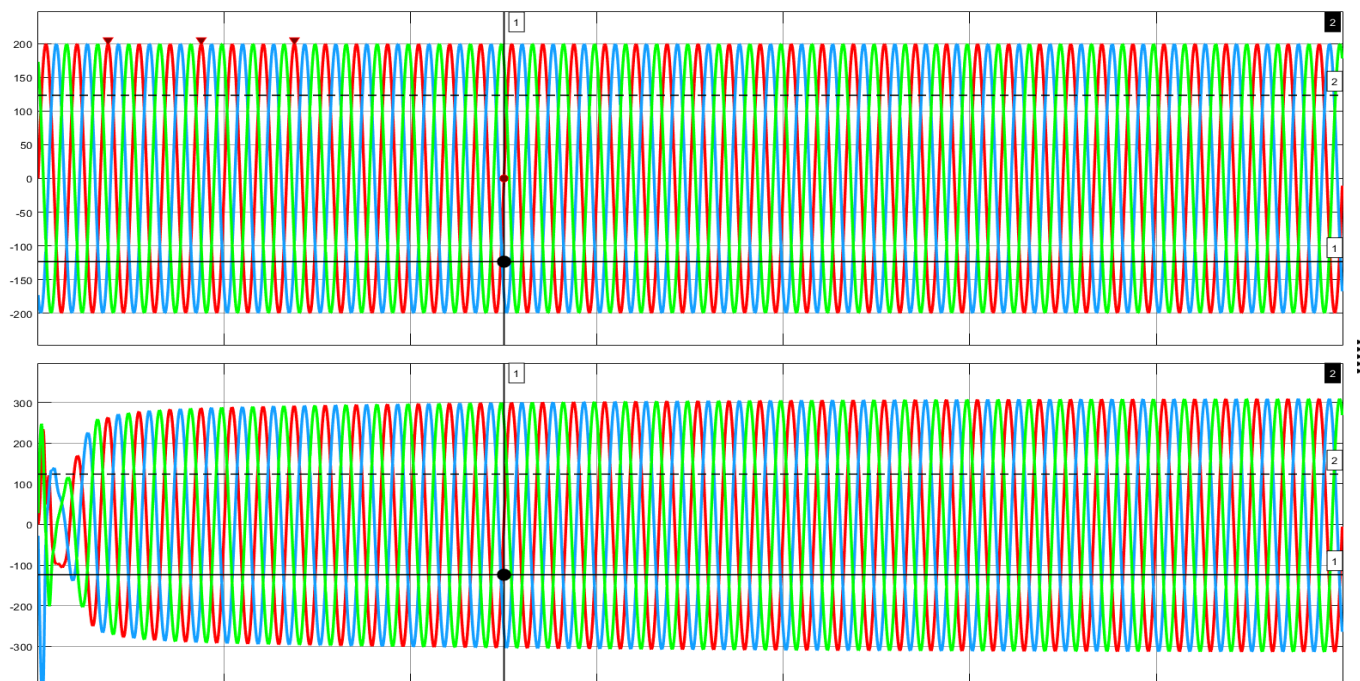


Figura 37: Tensão e corrente no barramento CA.

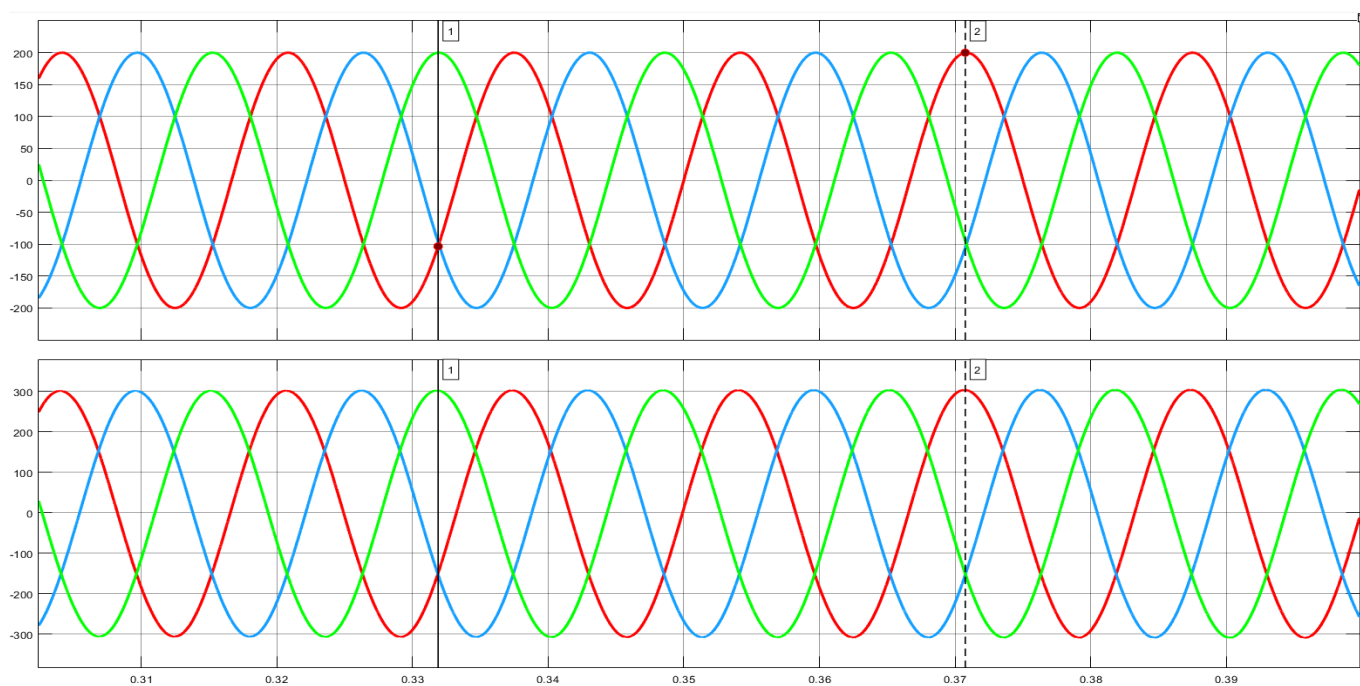


Figura 38: Tensão e corrente no barramento CA, sinal aumentado.

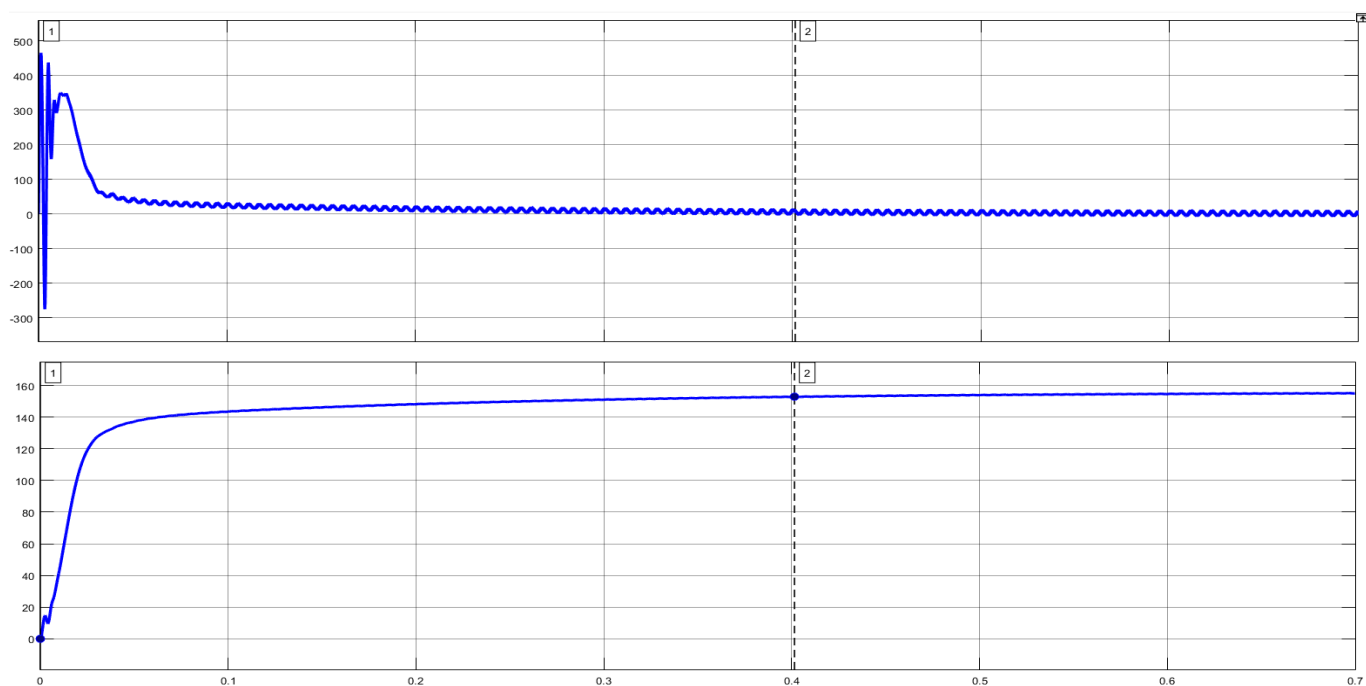


Figura 39: Sinal de erro sob o compensador de tensão e corrente de saída do compensador de tensão.

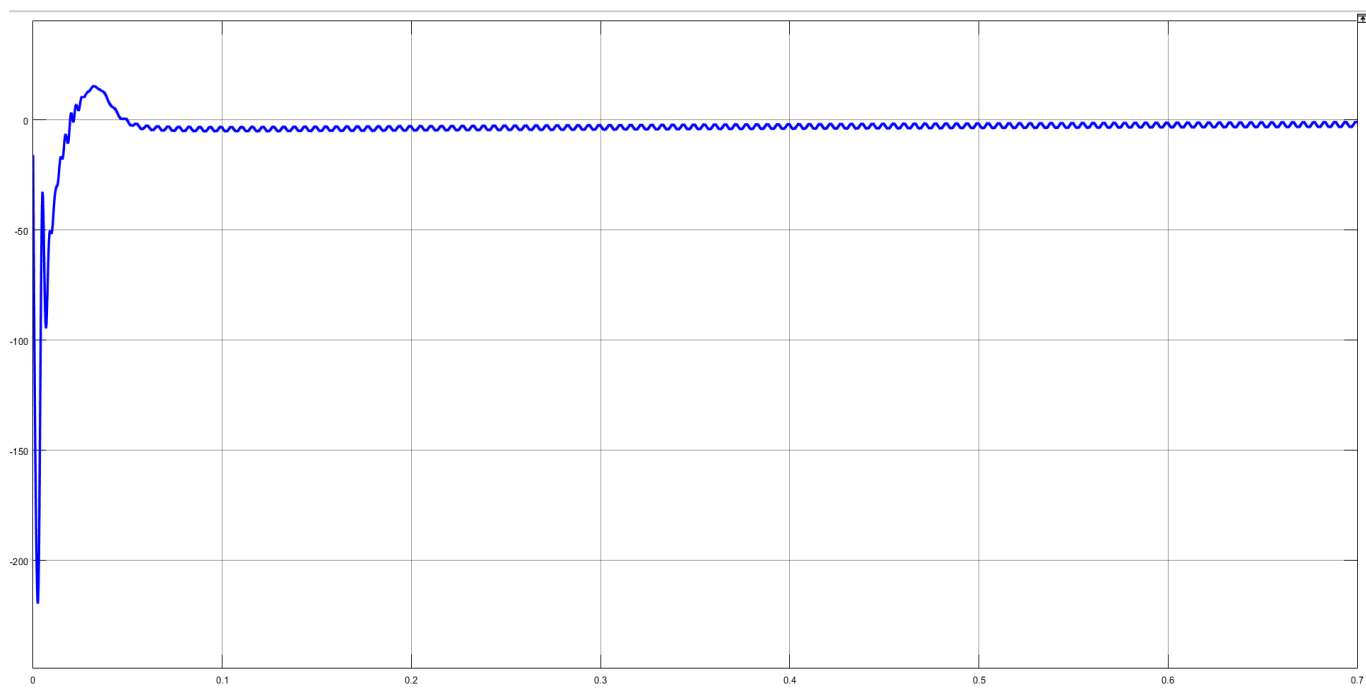


Figura 40: Corrente de saída do compensador de corrente.

4 COMPARATIVO

Tendo em vista ambos controladores desenvolvidos neste projeto, foi realizada simulações mostradas no capítulo 3, e abaixo serão mostrados os resultados comparados.

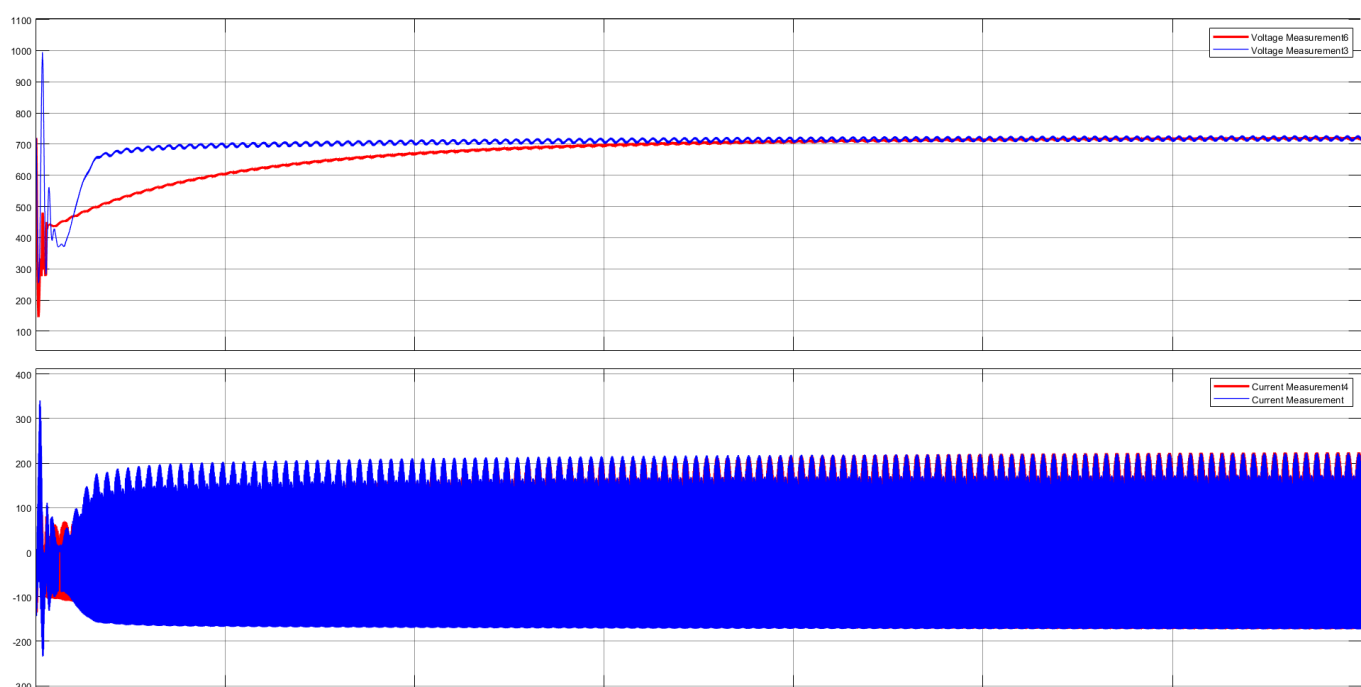


Figura 41: Tensão e corrente no barramento CC.

Após analisar o gráfico das duas tensões no barramento CC, é notado que o controlador CRONE com integrador apresentou uma melhora significativa de tempo de subida.

Na figura 42 a seguir, é apresentado os gráficos de tensão e corrente no barramento CA. No de corrente está evidenciado apenas as fases A, para facilitar a visualização de comparação.

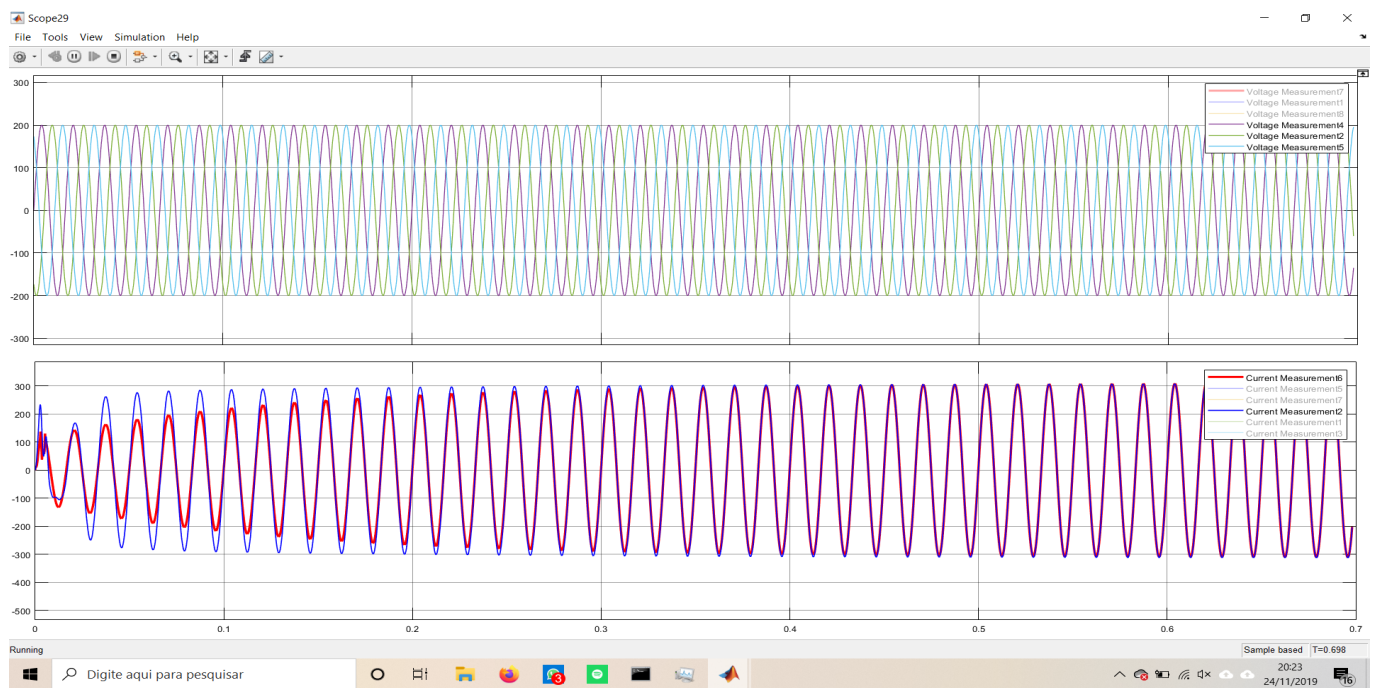


Figura 42: Tensão e corrente no barramento CA.

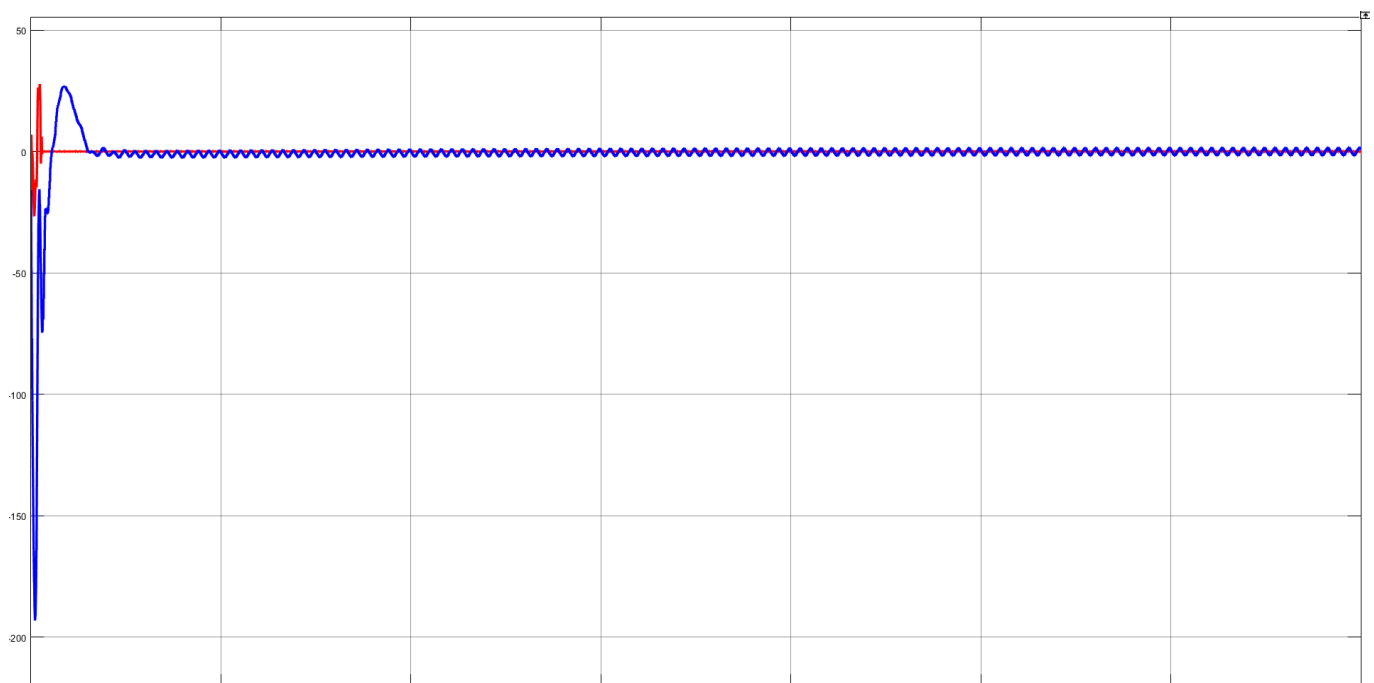


Figura 43: Sinal de erro do compensador de corrente.

Tendo em vista o gráfico mostrado acima, na figura 43 é notado que o compensador de corrente CRONE projetado teve uma oscilação em regime permanente maior que o compensador convencional, além de apresentar um pequeno erro em regime permanente.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Tendo em foco a pequena quantidade de pesquisas relacionadas à inversores aplicados a microrredes, neste trabalho foi proposto a implementação do método de ordem fracionária para desenvolver controladores referentes à estes conversores CC/CA, pois este método apresentou em diversas plantas resultados mais eficazes e robustos. Durante o desenvolvimento deste projeto, foi utilizado o CRONE (controlador robusto de ordem não inteira), geralmente aplicado à sistemas de elevado tempo morto, que apresentou uma característica de resposta semelhante aos controladores PD (Proporcional Derivativo), gerando um obstáculo ao projeto. Assim, foi preciso somar à este um controlador PI (Proporcional Integral), de forma a reduzir erros em regime permanente. Além disso, a planta utilizada como alvo de estudos foi modelada a partir de um inversor presente na microrrede do departamento de engenharia elétrica da universidade federal do paraná.

Assim, tendo a planta modelada, foi projetado dois controladores, o primeiro utilizando o método convencional, conhecido como alocação de polos, e o segundo através de um CRONE acompanhado de um integrador somado. Foram feitas simulações comparando o desempenho de ambos em diferentes parâmetros, e os principais critérios de avaliação foram as tensões e correntes nos barramentos CC e CA. No barramento CC, a função dos controladores é manter a tensão no capacitor do barramento o mais próximo da referência, já no barramento CA não deve haver harmônicos, e a corrente deve estar em fase com as tensões da rede.

O controlador CRONE, como já dito anteriormente, por si só não apresentou uma boa resposta em relação ao controlador convencional. Apesar de funcional o controlador de tensão projetado por este método apresentou um tempo de subida extremamente longo na tensão do barramento CC, de $t_r = 3,6s$ provando sua principal característica, a de robustez, enquanto o convencional apresentou $t_r = 500ms$. Porém, ao adicionar o controlador PI, a resposta no barramento CC se tornou vantajosa, apresentando tempo de subida de $t_r = 300ms$, menor que o apresentado pelo modelo convencional. A resposta dos controladores de corrente mostrou que o controlador CRONE gera maior oscilação em regime permanente, chegando à um valor quase 300% maior em relação ao controlador convencional, e também maior tempo de subida equivalente à $t_r = 30ms$, enquanto o modelo convencional apresentou $t_r = 6ms$.

5.2 Sugestões para trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram notados pontos que podem ser desenvolvidos para trabalhos futuros nassa linha de pesquisa. A seguir, eles serão listados.

- Utilizar um controlador $PI^\lambda D^\mu$ (ou FOPID), pois o maior obstáculo encontrado no projeto foi a falta da ação integral do controlador. Além de que o FOPID apresenta melhor

desempenho, com sinais de erro muito próximos a zero, ou nulos, e rápido tempo de assentamento.

- Utilizar o controlador Droop para referência de tensão, possibilitando o estudo de microrredes ilhadas, e avaliar seu desempenho em ambos cenários. Criar perturbações na rede, e na própria fonte de energia CC, verificando o comportamento dos compensadores numa situação mais próxima à realidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Oustaloup, F. Levron, B. Mathieu, F.M. Nanot. "Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis". Em: *IEEE Transactions on Circuit and Systems -I: Fundamental Theory and Application* 47.1 (2000).
- [2] Ashfaq Ahmed. *Eletrônica de Potência*. Vol. 1. Prentice Hall, 1999.
- [3] Túlio Albuquerque Dias. "Estratégias de controle de fluxo de potência associadas à utilização de banco de baterias em sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica". 2016.
- [4] E.C. Association. *European Control Conference 1993: Volume 2*. 1993. ISBN: 9789036703741. URL: <https://books.google.com.br/books?id=18SCmLiF00oC>.
- [5] Donato Cafagna. "Fractional Calculus: A Mathematical Tool From The Past For Present Engineers". Em: *IEEE Industrial Electronics Magazine* (2007).
- [6] Wagner Coelho Leal. "Sistema de controle para compartilhamento de corrente de baterias em microrredes CC". 2018.
- [7] CPFL. *Microrredes - Estudo dos Impactos da Inserção de Microrredes e Microgeração em Sistemas de Distribuição*. URL: <https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/inovacao/projetos/Paginas/pb026-estudos-dos-impactos-da-insercao-de-microrredes-e-microgeracao-em-sistemas-de-distribuicao.aspx>.
- [8] Gabriel Lapa Grandi. "Comparação entre controladores PID e FOPID baseada em novo método de ajuste". 2018.
- [9] G. Strbac (Eds.) Jenkins J.B. Ekanayake. *Distributed Generation, Renewable Energy Series*. IET - The Institution of Engineering e Technology, 2010.
- [10] Álvaro Jorge Rodrigues. "Estudo comparativo de estratégias de controle para inversores de fontes ininterruptas de energia". 2010.
- [11] Vitor Manuel Miguel Preto. "Redes de distribuição ativas". 2012.
- [12] e Denizar Cruz Martins Marcio Mendes Casaro. "Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica". Em: *Sba Controle Automação* 21.2 (2010). doi: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592010000200005.
- [13] Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2019*. URL: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%5C%C3%5CB3rio%5C%20S%5C%C3%5CADntese%5C%20BEN%5C%202019%5C%20Ano%5C%20Base%5C%202018.pdf>.
- [14] Igor Podlubny. "Fractional-order systems and PI^{α} -controllers". Em: *IEEE Transactions on Automatic Control* 44.1 (1999).
- [15] Lu Liu e Shuo Zhang. "Robust Fractional-Order PID Controller Tuning Based on Bode's Optimal Loop Shaping". Em: *Complexity* (2018). doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6570560>.

Apêndice A

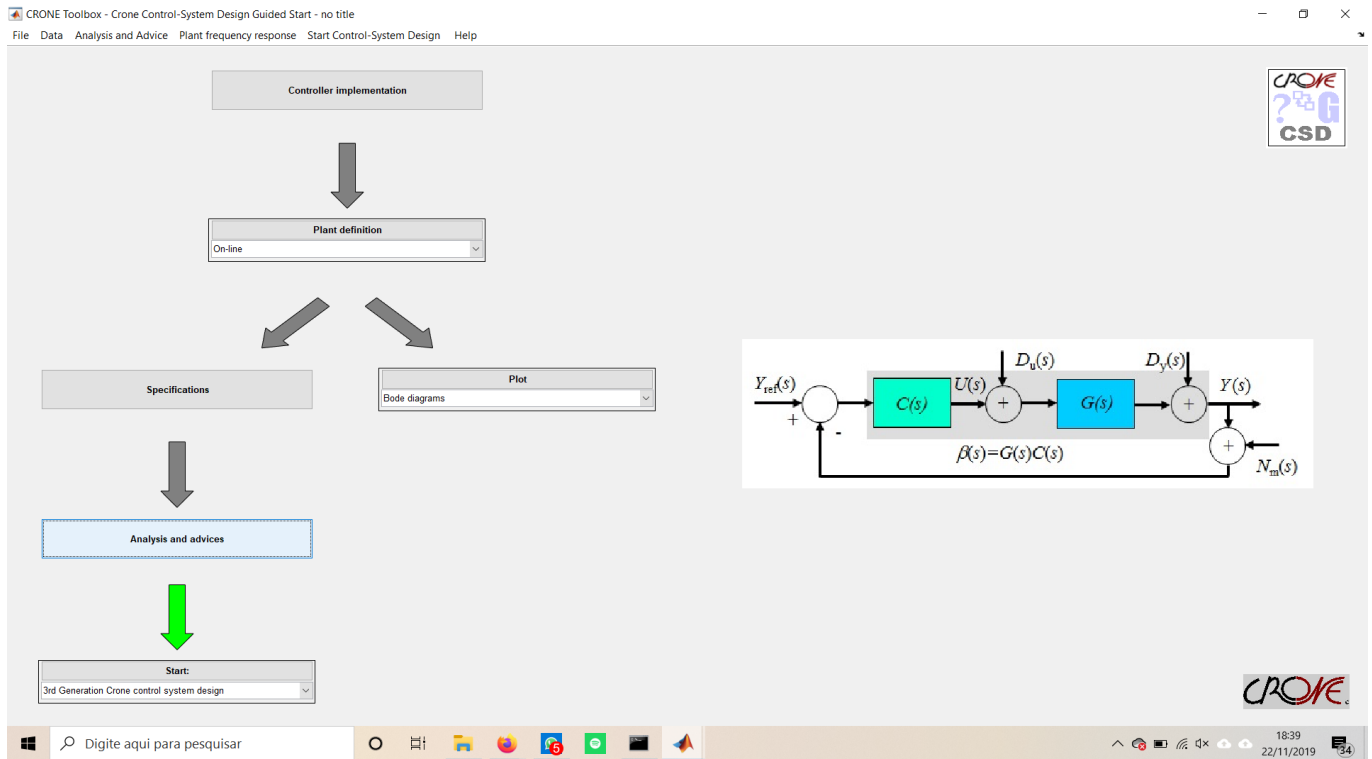


Figura 44: Tela 1: comando crone_control.

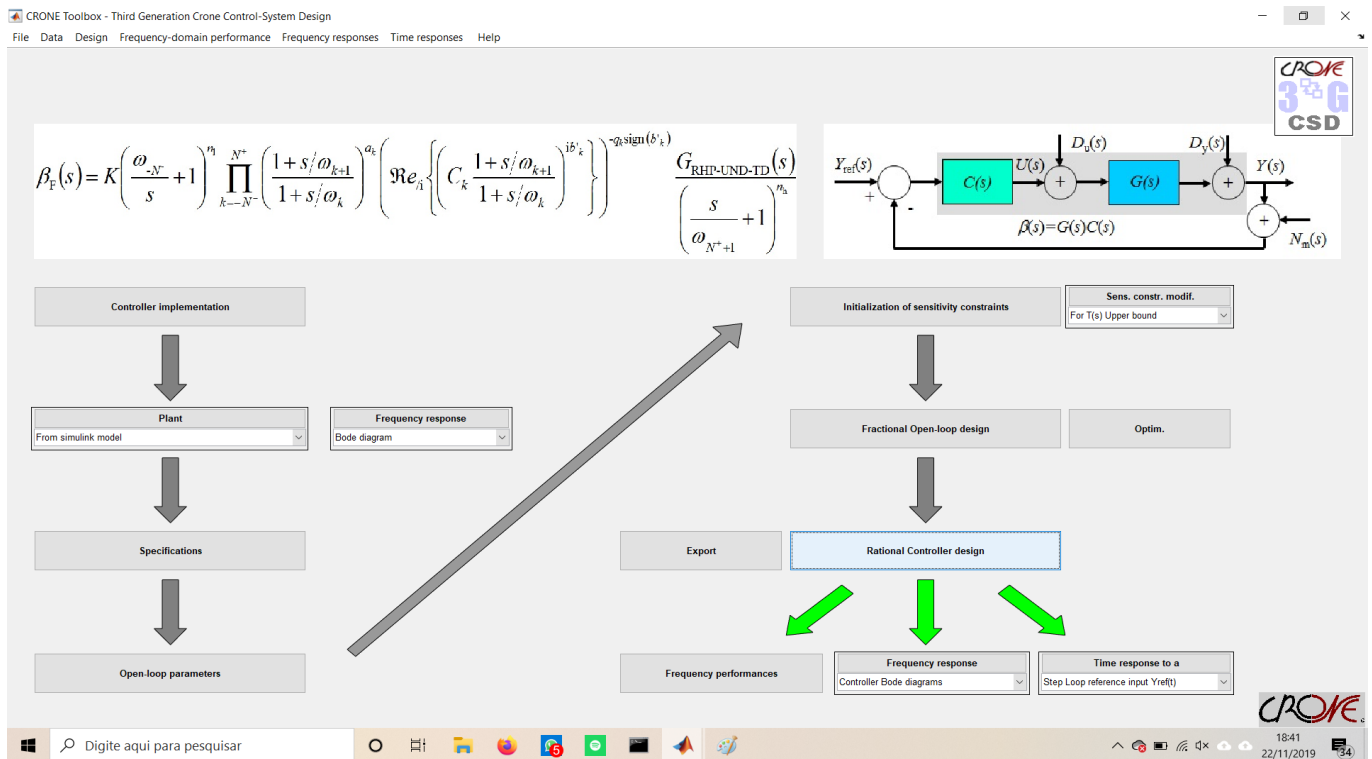


Figura 45: Tela 2: comando crone_control3.