

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Desempenho de Preditores para Controle de
Filtro Ativo em Paralelo

Juan Pereira Silva

João Pessoa, PB
Dezembro 2022

Juan Pereira Silva

**DESEMPENHO DE PREDITORES PARA CONTROLE DE FILTRO ATIVO EM
PARALELO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Darlan, Alexandria Fernandes,
Dr.

Coorientador: Prof. Nady Rocha, Dr.

João Pessoa, PB

Dezembro 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586d Silva, Juan Pereira.

Desempenho de preditores para o controle de filtro ativo em paralelo / Juan Pereira Silva. - João Pessoa, 2023.

91 f. : il.

Orientação: Darlan Alexandria Fernandes.

Coorientação: Nady Rocha.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Engenharia elétrica. 2. Cálculo de preditores. 3. Filtro ativo de potência. 4. Controle preditivo. I. Fernandes, Darlan Alexandria. II. Rocha, Nady. III. Título.

UFPB/BC

CDU 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**DESEMPENHO DE PREDITORES PARA CONTROLE DE FILTRO ATIVO EM
PARALELO**

Elaborada por

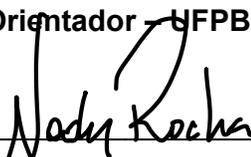
JUAN PEREIRA SILVA

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA



PROF. DR. DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES
Orientador – UFPB



PROF. DR. NADY ROCHA
Coorientador – UFPB



PROF. DR. FABIANO SALVADORI
Examinador Interno – UFPB



PROF. DR. ALFEU JOAOZINHO SGUAREZI FILHO
Examinador Externo – UFABC

Dedico esse trabalho a todos que me encorajaram e me deram suporte em persistir no meu desenvolvimento profissional

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por guiar minha caminhada nessa vida.

Aos meus pais, pela educação, companhia e conselhos dados durante essa caminhada.

A minha eterna companheira e esposa Ana Karine que nos momentos mais difíceis me encorajou e me manteve firme para concluir essa missão.

Ao Professor Darlan e Professor Nady pela paciência, atenção e pelas sugestões de melhoria da pesquisa durante a orientação do trabalho.

Aos professores Fabiano e Alfeu, por aceitarem o convite para fazer parte da banca examinadora e por contribuírem de forma significativa para a melhoria deste trabalho através de suas sugestões.

Ao meu amigo Moisés Hamssés, que me incentivou a me inscrever no programa de pós-graduação da UFPB.

Ao meu amigo de infância, Cleuton Jr que me ajudou bastante na caminhada dentro da engenharia e da vida.

Ao meu amigo Gabriel, que me deu apoio no início desse programa com todo seu conhecimento em Matlab.

Ao meu amigo Jefferson, que ajudou bastante na validação da pesquisa com todo o seu conhecimento na plataforma OPAL.

Aos meus amigos, Paulo e Wellington, que fiz dentro do programa de pós-graduação.

E a todos que direta e indiretamente me deram forças na conclusão deste trabalho.

*“O investimento em conhecimento é aquele que traz maiores retornos”
(Benjamin Franklin)*

RESUMO

Este trabalho apresenta diferentes técnicas de cálculo dos preditores para o controle preditivo de filtro ativo conectado em paralelo, para uma posterior análise de desempenho de cada método que é desenvolvido. Além disso, a modelagem matemática e o controle preditivo do sistema de filtragem ativa são apresentados. O filtro ativo em paralelo tem como função eliminar as componentes harmônicas de corrente presente na rede elétrica por meio de injeção de correntes complementares ao da carga não linear, reduzindo, assim, as distorções harmônicas na rede e melhorando o fator de potência da instalação. Para tanto, foram utilizados quatro métodos de discretização de cálculo dos preditores, são eles: Euler Regressivo; Trapezoidal; Forma Centrada e Dois Passos de Tempo (DPT). Esses métodos foram detalhados e aplicados no controle preditivo. A fim de comprovar a eficiência destas técnicas de discretização aplicadas no controle do filtro, inicialmente foi utilizado o ambiente de simulação Simulink/MATLAB para observar os resultados e compará-los entre si. E posteriormente para validação da pesquisa foi utilizado o simulador em tempo real OP5700 da OPAL-RT *Technologies*.

Palavras-chave: Cálculo de Preditores, Filtro Ativo Paralelo, Controle Preditivo.

ABSTRACT

This work presents different techniques for calculating predictors for the application of predictive control as a regulator system of an shunt active power filter (SAPF), which supplies distorted current grid. From that, some performance are analyzed for each presented method. Four discretization techniques were used: Euler's Backward; trapezoidal; centered form and TSA (two-step ahead) The SAPF has the function of eliminating the current harmonic components present in the electrical grid by injecting currents, thus reducing distortions in the grid and improving the power factor of the installation. The mathematical modeling, discretization models , and the development of predictive control algorithm are discussed and presented in simulation using the Simulink/MATLAB platform. The validation of the system was presented and carried out through real-time simulations in the OP5700 simulator from OPAL-RT Technologies.

Keywords: Calculation of Predictors, Active Power Filter, Predictive Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conexão do filtro em série.	19
Figura 2 – Conexão do filtro em paralelo.	19
Figura 3 – Conexão do filtro série-paralelo.	19
Figura 4 – Princípio de funcionamento do controle preditivo.	21
Figura 5 – Filtro ativo paralelo.	25
Figura 6 – Vetor e tensão para cada estado de chaveamento do inversor.	26
Figura 7 – Diagrama de blocos do sistema de controle preditivo do filtro ativo.	28
Figura 8 – Fluxograma do controle preditivo.	30
Figura 9 – Descrição matemática da regra do trapézio.	34
Figura 10 – Descrição geométrica regra do trapézio.	34
Figura 11 – Composição método trapezoidal composto.	35
Figura 12 – Esquemático de simulação do sistema.	39
Figura 13 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente da rede.	41
Figura 14 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente da rede em janela de tempo menor.	42
Figura 15 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Tensão e corrente fase A.	42
Figura 16 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Tensão e corrente fase B.	43
Figura 17 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente do filtro.	43
Figura 18 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente da carga.	44
Figura 19 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Tensão barramento CC.	44
Figura 20 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Corrente da rede.	45
Figura 21 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Corrente da rede em janela de tempo menor.	46
Figura 22 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Tensão e corrente fase A.	46
Figura 23 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Tensão e corrente fase B.	47
Figura 24 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Corrente do filtro.	47
Figura 25 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Tensão barramento CC.	48
Figura 26 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Corrente da rede.	49
Figura 27 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Corrente da rede em janela de tempo menor.	49
Figura 28 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Tensão e corrente fase A.	50
Figura 29 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Tensão e corrente fase B.	50
Figura 30 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Corrente do filtro.	51
Figura 31 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Tensão barramento CC.	51
Figura 32 – Resultado Simulink método DPT - Corrente da rede.	52
Figura 33 – Resultado Simulink método DPT - Corrente da rede aproximado.	53
Figura 34 – Resultado Simulink método DPT - Tensão e corrente da rede fase A.	53

Figura 35 – Resultado Simulink método DPT - Tensão e corrente da rede fase B.	54
Figura 36 – Resultado Simulink método DPT - Corrente do filtro.	54
Figura 37 – Resultado Simulink método DPT - Tensão barramento CC.	55
Figura 38 – Tempo de assentamento método Euler Regressivo.	56
Figura 39 – Função custo método Euler Regressivo.	57
Figura 40 – Função custo aproximada método Euler Regressivo.	57
Figura 41 – THD método Euler Regressivo.	58
Figura 42 – Tempo de assentamento método Trapezoidal.	59
Figura 43 – Função custo método Trapezoidal.	59
Figura 44 – Função custo aproximada método Trapezoidal.	60
Figura 45 – THD método Trapezoidal.	60
Figura 46 – Tempo de assentamento método Forma Centrada.	61
Figura 47 – Função custo método Forma Centrada.	61
Figura 48 – Função custo aproximada método Forma Centrada.	62
Figura 49 – THD método Forma Centrada.	62
Figura 50 – Tempo de assentamento método DPT.	63
Figura 51 – Função custo método DPT.	63
Figura 52 – Função custo aproximada método DPT.	64
Figura 53 – THD método DPT.	64
Figura 54 – Foto do simulador em tempo real OP5700.	66
Figura 55 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente da rede.	67
Figura 56 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente da rede em janela de tempo menor.	68
Figura 57 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente da carga.	68
Figura 58 – Resultado de simulação OP5700- Método Euler Regressivo - Corrente do filtro.	69
Figura 59 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente e tensão fase A.	69
Figura 60 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente e tensão fase B.	70
Figura 61 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Tensão Barramento CC.	70
Figura 62 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente da rede. .	71
Figura 63 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente da rede em janela de tempo menor.	72
Figura 64 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente da carga. .	72
Figura 65 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente do filtro. .	73
Figura 66 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente e tensão fase A.	73

Figura 67 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente e tensão fase B.	74
Figura 68 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Tensão barramento CC.	74
Figura 69 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente da rede.	75
Figura 70 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente da rede em janela de tempo menor.	75
Figura 71 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente da carga.	76
Figura 72 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente do filtro.	76
Figura 73 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente e tensão fase A.	77
Figura 74 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente e tensão fase B.	77
Figura 75 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Tensão barramento CC.	78
Figura 76 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente da rede.	79
Figura 77 – Resultado de simulação OP5700 método DPT corrente da rede aproximada.	79
Figura 78 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente da carga.	80
Figura 79 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente do filtro.	80
Figura 80 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente e tensão fase A.	81
Figura 81 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente e tensão fase B.	81
Figura 82 – Resultado de simulação OP5700 método DPT tensão barramento CC.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de simulação.	40
Tabela 2 – Resultados Figuras de Mérito.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DPT	Dois Passos de Tempo
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador de Sinal Digital)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Internacional de Eletrotécnica)
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PI	<i>Proportional - Integral</i> (Proporcional- Integral)
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> (Malha de Captura de Fase)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)

LISTA DE SÍMBOLOS

κ	Índice das fases 1, 2 e 3
e_g	Tensão da Rede
i_l	Corrente da carga
i_f	Corrente do filtro
i_g	Corrente da rede
*	Valor de referência
T_s	Tempo de amostragem
h	Horizonte de Previsão
g	Função custo
x	Variável genérica
p	Valor futuro de variável
α	Parte real de determinada variável
β	Parte imaginária de determinada variável
g	Neutro da rede
R	Resistência do filtro passivo
L	Indutância do filtro passivo
A	Fase a
B	Fase b
C	Fase c
q_1	Chaveamento do braço a do inversor
q_2	Chaveamento do braço b do inversor
q_3	Chaveamento do braço c do inversor
—	Negação
C	Capacitância do barramento CC
E	Tensão do barramento CC

0	Ponto central do barramento CC
N	Ponto neutro do inversor
S_a	Braço a do inversor
S_b	Braço b do inversor
S_c	Braço c do inversor
V_{aN}	Tensão do braço a em relação ao ponto neutro
V_{bN}	Tensão do braço b em relação ao ponto neutro
V_{cN}	Tensão do braço c em relação ao ponto neutro
N	Número de estados de chaveamento do inversor
y	Quantidade de braços do inversor
x	Número de estados de chaveamentos possíveis para cada braço do inversor
$\frac{d}{dt}$	Derivada
v_{fa}	Tensão filtro fase a
v_{fb}	Tensão filtro fase b
v_{fc}	Tensão filtro fase c
v_{k0}	Tensão dos polos do inversor
v_{0g}	Tensão entre o ponto central do barramento CC e o neutro da rede
$x_{\alpha\beta}$	Variável no referencial $\alpha\beta$
x_α	Componente do eixo α
x_β	Componente do eixo β
x_{123}	Variável no referencial 123
$\alpha\beta$	Referência no plano $\alpha\beta$
P_s	Matriz de transformação para o modelo $\alpha\beta$
t	Matriz transposta
I^*	Amplitude da corrente de referência
θ	Ângulo de defasagem da corrente

G	Bloco que determina as correntes de referência
j	Estado de chaveamento do inversor
\hat{j}_{timo}	Vetor do estado de chaveamento que minimiza a função custo
g_{timo}	Menor valor da função de custo
h	Altura do trapézio
$f(a)$	Função no ponto a
$f(b)$	Função no ponto b
$f(x)$	Função no ponto x
$f(t)$	Função no ponto t
$f(x_n)$	função no ponto x_n
I_t	Integração metodo Trapezoidal
'	Primeira derivada
"	Segunda derivada
!	Fatorial
Σ	Somatório
f	Frequência da rede

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	17
1.2	REVISÃO DA LITERATURA	18
1.2.1	Filtros e Suas Definições	18
1.2.2	Filtro Ativo Paralelo	19
1.2.3	Controle dos Filtros Ativos	20
1.2.4	Controle Preditivo em Filtros Ativos de Potência	22
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO	23
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	24
1.5	PUBLICAÇÃO DO AUTOR	24
2	FILTRO ATIVO PARALELO COM UM INVERSOR	25
2.1	MODELO DO FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA	25
2.2	APLICAÇÃO DO CONTROLE NO FILTRO ATIVO PARALELO	28
2.3	CONCLUSÃO	31
3	TÉCNICAS PREDITORAS APLICADAS AO FAP	32
3.1	MÉTODO DE EULER REGRESSIVO	32
3.2	MÉTODO TRAPEZOIDAL	33
3.3	MÉTODO DA FORMA CENTRADA	36
3.4	MÉTODO DPT	37
3.5	CONCLUSÃO	38
4	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	39
4.1	INTRODUÇÃO	39
4.2	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	40
4.3	RESULTADOS SIMULINK/MATLAB	41
4.3.1	Método de Euler Regressivo	41
4.3.2	Método Trapezoidal	44
4.3.3	Método da Forma Centrada	48
4.3.4	Método DPT	51
4.4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	55
4.4.1	Método de Euler Regressivo	55
4.4.2	Método Trapezoidal	58
4.4.3	Método Forma Centrada	60
4.4.4	Método DPT	62
4.5	RESULTADOS – SIMULADOR EM TEMPO REAL – OP5700	65
4.5.1	Método Euler Regressivo	67

4.5.2	Método Trapezoidal	70
4.5.3	Método Forma Centrada	74
4.5.4	Método DPT	78
4.6	CONCLUSÃO	82
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	83
5.1	CONCLUSÃO	83
5.2	TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	85

APÊNDICES

APÊNDICE A – MODELO SIMULINK CIRCUITO DE POTÊNCIA E CONTROLE DO FILTRO ATIVO PARALELO . .	89
APÊNDICE B – MODELO SIMULINK CIRCUITO DE CONTROLE DO FILTRO ATIVO PARALELO	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Nos últimos anos, a eletrônica de potência vem se desenvolvendo devido à convergência de vários fatores, dentre eles destacam-se o avanço da microeletrônica, o aprimoramento na tecnologia de fabricação dos dispositivos semicondutores, além da eficiência do processo de conversão de energia elétrica. Dessa forma, esses dispositivos passaram a ser utilizados em diversos ambientes como indústrias, comércios e até mesmo em residências (RODRIGUEZ et al., 2007).

No entanto, Oliveira et al. (2003) e Bett, Maina e Hinga (2020) inferem que as utilizações dos conversores de potência causam problemas na rede elétrica, tanto que alteram as formas de ondas da corrente e da tensão, que deveriam ter formas de onda senoidais e elevado fator de potência. Nada obstante, a presença de dispositivos semicondutores responsáveis pelo chaveamento do circuito gera a descontinuidade da rede. Dessa maneira, esses dispositivos são classificados como cargas não lineares e responsáveis direto pelo surgimento de componentes harmônicas no circuito, afetando diretamente a qualidade de energia do sistema (LUBIS et al., 2018; MANSOOR et al., 1995).

Os problemas relacionados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) são definidos na literatura como qualquer deformidade na forma de onda da tensão ou da corrente, ou alteração de frequência que cause falha ou mau funcionamento dos equipamentos, gerando perdas ao sistema elétrico como redução do fator de potência, aumento de ruídos e do pico de corrente da rede, superaquecimento e sobrecarga da rede, e, conseqüentemente, gerando impactos econômicos para o consumidor (ZHANG; YAN, 2020). Dessa forma, há uma preocupação tanto das empresas fornecedoras de energia elétrica quanto dos seus consumidores com os indicadores de QEE, principalmente no que se refere aos consumidores de grande porte.

Assim, com o intuito de melhorar a qualidade de energia do sistema e controlar não só os níveis de distorções da rede elétrica como também afundamentos, elevações, transitórios, flicker e entre outras complicações, normas foram criadas para regulamentar procedimentos e recomendações aplicáveis quanto ao uso eficiente da energia elétrica. Para o âmbito internacional, tem-se normas como IEE 519 e TEC EM 61000-3 (RAHMANI; MENDALEK; AL-HADDAD, 2010). E para o âmbito nacional tem-se o módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) que regulamenta a qualidade de energia e estabelece limites para a taxa de Distorção Harmônica Total (THD do inglês *Total Harmonic Distortion*).

Além das normativas, a utilização de dispositivos responsáveis para mitigar distúrbios que afetam a QEE tornaram-se cada vez mais comuns. Dentre esses mecanismos, uma das maneiras mais encontradas para suprimir harmônicas da rede é a utilização de filtros de potência.

Os filtros de potência podem ser classificados de três maneiras: passivo, ativo e híbrido. No entanto, de acordo com o modelo de circuito, filtros ativos, muitas das vezes, tornam-se a melhor alternativa para a solução dos problemas causados na rede elétrica. Basicamente, esses filtros funcionam como uma fonte de corrente controlada, injetando ou drenando a corrente do sistema com intuito de eliminar ou reduzir as componentes harmônicas presentes. As técnicas utilizadas para exercer o controle do filtro ativo são de suma importância, uma vez que, são estratégias determinantes para que os dispositivos exerçam o seu controle de forma eficiente, isto é, compensando as correntes harmônicas da melhor forma possível e elevando a qualidade de energia do sistema.

Portanto, neste trabalho será mostrado o funcionamento de um filtro ativo paralelo utilizando o controle preditivo como estratégia de redução/eliminação desses distúrbios. Contudo, o foco do trabalho será nas diversas aplicações de métodos matemáticos de discretização das variáveis do sistema que podem auxiliar em um melhor desempenho de funcionamento do controle preditivo para o filtro ativo.

1.2 REVISÃO DA LITERATURA

1.2.1 Filtros e Suas Definições

Os filtros de potência podem ser classificados de acordo com os componentes que os constituem. Filtros passivos, por exemplo, podem ser formados por combinações de elementos passivos como: resistências, capacitores e indutores (FUJITA; AKAGI, 1991). São utilizados tanto para suprimir as correntes harmônicas, criando caminhos de alta impedância entre a fonte e a carga, como empregados para confinar essas correntes, gerando, assim, caminhos de baixa impedância durante a sua circulação (AKAGI, 2006). Os filtros passivos podem ser usados como ferramentas de baixo custo para compensação de energia reativa.

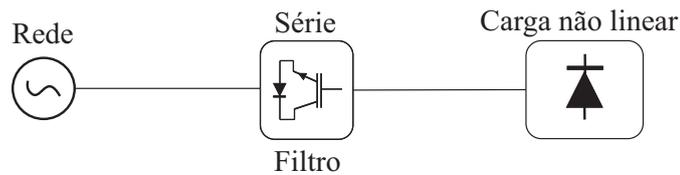
No entanto, o uso desses filtros não é adequado quando há uma elevada impedância no sistema, podendo também causar ressonância em série ou em paralelo que amplificarão as correntes harmônicas. Esses componentes possuem limites na redução de harmônicos, quanto maior a sua ordem menor sua eficiência (AKAGI, 2006; FUJITA; AKAGI, 1991). Reconhecendo tais limitações, uma solução alternativa para resolver esse problema é a utilização de filtros ativos de potência (GREEN; MARKS, 2005).

Os filtros ativos são formados por dispositivos semicondutores com uma alta frequência de chaveamento. Seu princípio de funcionamento baseia-se na injeção de corrente de compensação no sistema para eliminar as componentes harmônicas geradas pelas cargas não lineares, garantindo, assim, um melhor fator de potência e, conseqüentemente, uma melhor qualidade de energia elétrica do sistema (BOUSSAID et al., 2015; JOHNSON, 2001).

Contudo, seus custos iniciais e de funcionamento são elevados, além de ser difícil construir uma fonte de corrente de grande capacidade e com uma resposta rápida. Destarte, tanto

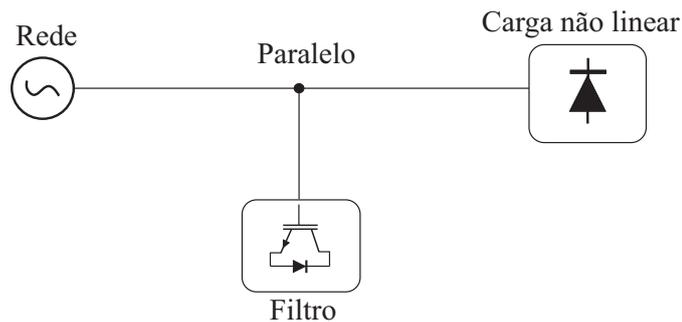
filtros ativos quanto filtros passivos podem ser conectados no mesmo sistema e, dependendo do objetivo do circuito, passam a serem chamados de filtro híbrido. Além disso, de acordo com Fujita e Akagi (1991), Mohan et al. (2017), esses filtros podem ser conectados nos sistemas das seguintes formas: série; paralelo e série-paralelo. As Figuras 1, 2 e 3 ilustram as possíveis formas de conexões dos filtros:

Figura 1 – Conexão do filtro em série.



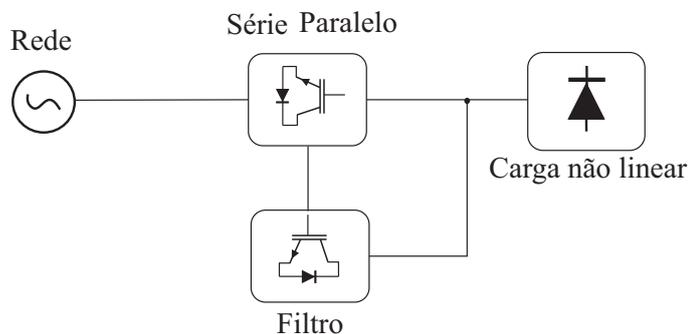
Fonte: Próprio Autor.

Figura 2 – Conexão do filtro em paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 3 – Conexão do filtro série-paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

1.2.2 Filtro Ativo Paralelo

Conforme Bekakra, Zellouma e Malik (2021) e Kunjumammed e Mishra (2006), o filtro ativo em paralelo – também conhecido como filtro *shunt* – constitui a configuração mais

importante e mais utilizadas em processos industriais. Conectado em paralelo ao circuito de alimentação principal, conforme seu objetivo, este filtro cancela as componentes harmônicas de corrente de carga alimentados à fonte. Além disso, pode contribuir para a compensação de potência reativa, visto que o mesmo não processa potência ativa, balanceamento de correntes trifásicas e eliminação de corrente no neutro.

Dessa forma, conforme Ghadbane et al. (2012), a corrente de compensação da carga $i_{l\kappa}$ é obtida a partir da equação (1.1):

$$i_{l\kappa} = i_{g\kappa} + i_{f\kappa} \quad (1.1)$$

sendo, $i_{g\kappa}$ a corrente da rede, $i_{f\kappa}$ a corrente do filtro, e k representa as fases A, B e C.

O sistema composto pelo filtro, mais a carga não-linear, serão detectados pela rede elétrica como uma carga puramente resistiva e sem nenhuma distorção harmônica, isto é, a forma de onda da corrente que circula no circuito será a sua componente fundamental. Vale ressaltar que, é possível conectar vários filtros em paralelo para atender correntes com valores elevados, o que torna este tipo de circuito adequado para uma ampla faixa de potência (EL-HABROUK; DARWISH; MEHTA, 2000; LEE et al., 2008).

Segundo Lindeke et al. (2003) Zhu et al. (2014), uma das vantagens do filtro em paralelo é que ele pode deixar de operar sem que haja uma interrupção na alimentação da rede elétrica para a carga. Além disso, outro fator importante, está no fato desse filtro se adaptar adequadamente as diferentes mudanças de cargas, o que facilita para inserir uma possível estratégia de controle no sistema.

1.2.3 Controle dos Filtros Ativos

Com o advento da eletrônica de potência, o controle de corrente de um inversor tornou-se um assunto importante e vem sendo amplamente estudados nas últimas décadas conforme Panigrahi, Subudhi e Panda (2015) e Abdusalam, Poure e Saadate (2007). Métodos lineares como o controle integral-proporcional (PI do inglês *Proportional Integral*) e modulação por largura de pulso PWM (do inglês *Pulse-Width Modulation*), bem como métodos não-lineares, como o controle de histerese são bastantes documentados na literatura (RODRIGUEZ et al., 2007).

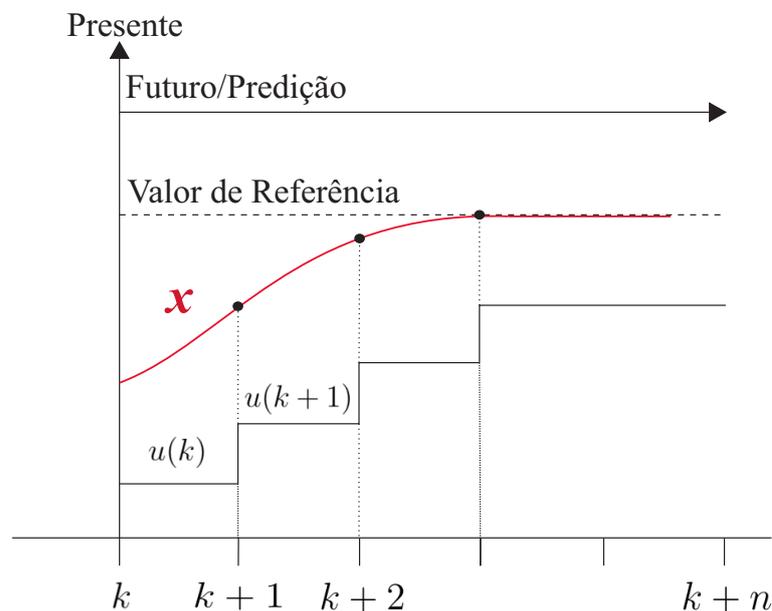
Com os avanços tecnológicos, mais precisamente com o desenvolvimento de microprocessadores mais eficientes e com uma alta velocidade de processamento de dados, foi o que difundiu e propiciou o crescimento desse controle. Devido ao alto poder de funcionamento desses equipamentos, com o tempo foi possível permitir a implementação de técnicas de controle mais avançadas (RODRIGUEZ et al., 2007; KENNEL; LINDER, 2000). Rodriguez e Cortes (2012) justificam que a utilização do controle preditivo, em conversores de potência, ocorreu devido algumas características inerentes, não só aos conversores como também às estratégias

de controle, que utilizadas nos dias atuais, convergiram em um caminho natural para utilização dessa ferramenta.

Conforme Adam, Chen e Deng (2018), a vantagem da utilização do controle preditivo está em poder controlar muitas variáveis ao mesmo tempo. Além disso, tanto os dados de entrada quanto os de saída são controlados de forma independente no sistema. Portanto, o controle preditivo prevê o comportamento futuro das variáveis a serem controladas e determina o melhor controle, baseando-se em um procedimento de minimização do erro por meio de uma função custo para um horizonte de tempo pré-definido (TARISCIOTTI et al., 2016).

Conforme ilustrado na Figura 4, no princípio básico de funcionamento do modelo do controle preditivo, a variável x representa valores medidos no instante atual. Observa-se que a curva busca o valor de referência mostrado no gráfico. Enquanto o valor medido não for igual ao valor de referência, o controle continua a ser aplicado. Os valores futuros do sistema são previstos até um horizonte pré-definido no tempo $k + n$. Assim, no instante k a função custo passa a ser calculada para o tempo $(k + 1)$. Em seguida, no instante $(k + 1)$ pode-se prever a resposta para o momento $(k + 2)$, e assim por diante até o instante $(k + n)$, ou seja, sempre calculando a variável um passo a frente do momento atual.

Figura 4 – Princípio de funcionamento do controle preditivo.



Fonte: Adaptado de Rodriguez e Cortes (2012) .

Logo, como o modelo do sistema é utilizado para prever ações de controle que minimizam uma função custo e o menor elemento da sequência é aplicado na próxima etapa, todo este processo se torna repetido para cada instante de amostragem, mas sempre considerando os novos dados medidos (RODRIGUEZ; CORTES, 2012). De acordo com Adam, Chen e Deng (2018), a função custo aplicada no controle de corrente, busca mensurar o erro entre um valor de referência

em relação ao valor medido, conforme expressa a equação (1.2).

$$g = |x_{\alpha}^* - x_{\alpha}^p| + |x_{\beta}^* - x_{\beta}^p| \quad (1.2)$$

onde x_{α}^* são os dados reais de referência e x_{α}^p são os dados reais medidos. E x_{β}^* são os dados imaginários de referência e x_{β}^p são os dados imaginários das grandezas medidas.

Com isso, de acordo com Rivera et al. (2011) o menor valor medido pela função custo garante dois objetivos principais: que a corrente de saída siga a sua referência e as correntes de entrada tenham a forma senoidal e com fator de potência unitário.

Diante do exposto, o controle preditivo baseia-se no modelo do sistema a ser analisado ao longo de um horizonte de predição, sendo que as variáveis de controle são medidas para aplicação de uma função custo que busca minimizar o erro e otimizar as atividades planejadas. Todavia, vale ressaltar que é de suma importância a aplicação adequada nesses preditores de técnicas matemáticas de discretização para a melhor implementação dessa ferramenta.

1.2.4 Controle Preditivo em Filtros Ativos de Potência

O método de discretização mais utilizado, para fins de controle dos sistemas analisados, é o método de Euler Regressivo, haja vista sua simplicidade e praticidade na aplicação matemática (CHERIF; HICHAM; KAMEL, 2018; ZHOU; YUAN; DONG, 2020).

No trabalho dos autores Zhou, Yuan e Dong (2020), foi proposto um controle de tensão do barramento CC de um filtro ativo em paralelo, com isso avaliaram: a variação de tensão do barramento CC de acordo com a mudança da carga do sistema; o comportamento das correntes harmônicas em relação a corrente de compensação do sistema e, por fim, o comportamento da tensão do barramento CC, conforme as variações sofrida pela tensão da rede. O método de discretização utilizado neste trabalho foi validado levando em consideração as componentes harmônicas que foram reduzidas e a tensão de barramento CC do filtro que se adaptou conforme variação de tensão da carga e da rede.

Cherif, Hicham e Kamel (2018), no seus estudos sobre implementação de controle preditivo de corrente por modelo de conjunto finito para filtro ativo *shunt*, observaram que as distorções geradas pela carga não linear foram compensadas no sistema de filtragem. Além disso, notaram que não só as correntes estavam em fase com a tensão do sistema, como também o sistema se comportou conforme o esperado diante das variações de carga. Com isso, concluíram que o método de discretização utilizado mostrou-se eficiente, visto que o sistema obteve resultados positivos diante dos testes realizados.

Tarisciotti et al. (2016), por sua vez, analisaram o comportamento de um filtro ativo mediante controle preditivo. Testado em bancada experimental, os autores observaram que antes do processo de filtragem, as correntes da rede apareceram altamente distorcidas e com um valor de THD elevado. Com isso, ao ativar o procedimento de filtragem, as correntes da rede

apareceram em uma forma senoidal, em fase com as tensões da rede e com um baixo valor de THD.

Além da análise das formas de onda da tensão e corrente da rede, Tarisciotti et al. (2016) observaram, antes e depois do processo de filtragem, a atuação da tensão do barramento CC em relação a sua referência, o que acarretou na conclusão de que o método de discretização utilizado foi eficiente, uma vez que os resultados experimentais comprovaram o desempenho satisfatório do sistema.

De acordo com Taher, Alae e Arani (2017), foi realizada uma comparação entre o controle de histerese e controle preditivo para filtro *shunt* instalados em sistemas de geração de energia fotovoltaica. Neste estudo, o controle preditivo atuou conforme o esperado, gerando uma corrente de compensação mais eficiente que a do controle de histerese e, conseqüentemente, apresentou uma melhor redução da taxa de distorção harmônica. Ademais, diante dos resultados, a utilização do modelo matemático de discretização por método de Euler Regressivo, utilizado no controle preditivo do filtro, mostrou-se ferramenta útil no processo de discretização do sistema.

Com resultados analisados em uma bancada experimental e via *software* (PSIM), Al-Othman et al. (2016), observaram o comportamento do circuito, antes e depois do funcionamento do filtro. Os autores constataram ainda que, mesmo com o filtro em funcionamento, as correntes da rede apresentaram formas senoidais. Além disso, inserindo um degrau na corrente de carga, o modelo de controle desenvolvido pelos autores acompanha as mudanças de carga, continuando senoidais, e ajustando-se dinamicamente para o seu novo ponto operacional. Por fim, os autores entenderam que o controlador preditivo foi capaz de lidar com uma mudança de etapa e se ajustar para as novas condições de operação para alcançar a estabilidade.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é aplicar diferentes técnicas de cálculo dos preditores (método de Euler Regressivo, Trapezoidal, Forma Centrada e DPT) para o controle preditivo de um filtro ativo de potência conectado em paralelo, e além disso, analisar o desempenho dos quatro métodos de discretização aplicados. Para um melhor entendimento do objetivo principal deve-se atender os seguintes objetivos específicos:

1. Compreender o princípio de funcionamento de filtro ativo paralelo (FAP);
2. Modelar matematicamente o sistema onde está incluso o FAP;
3. Compreender e desenvolver o algoritmo de controle preditivo, e aplicar ao FAP;
4. Desenvolver os métodos matemáticos dos processos de discretização de cálculo dos preditores utilizando as quatro técnicas propostas neste trabalho;
5. Eliminar as componentes harmônicas de corrente da rede e melhorar o fator de potência;

6. Analisar os resultados obtidos de tensão e corrente do sistema e apresentar as figuras de mérito mediante simulação na plataforma Simulink/Matlab para análise de desempenhos entre as técnicas propostas;
7. Apresentar os resultados do simulador de tempo real OPAL-RT.
8. Comparar os resultados obtidos entre as simulação do Simulink/MATLAB e o OPAL-RT

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho foi organizado da seguinte maneira:

O Capítulo 1, nomeado Revisão Bibliográfica, apresentou as principais teorias relacionadas ao tema do trabalho, abrangeu os conceitos básicos sobre filtros, suas classificações e conexões. Além disso, foi abordado o conceito sobre controle preditivo e a suas aplicações.

O Capítulo 2 abordou sobre a modelagem matemática e a descrição das equações que regem o funcionamento de um filtro ativo conectado em paralelo ao sistema, bem como o desenvolvimento da aplicação do controle preditivo nesse tipo de configuração.

No Capítulo 3 encontra-se a descrição do método de Euler Regressivo, que foi utilizado no processo de discretização para aplicação do controle preditivo, bem como no desenvolvimento matemático de mais três técnicas de discretização (Trapezoidal, Forma Centrada e DPT).

O estudo de simulação e a análise dos resultados obtidos, tanto utilizando a plataforma Simulink/MATLAB quanto o simulador em tempo real, estão contidos no Capítulo 4. Por fim, o trabalho é finalizado com as considerações finais, propostas de trabalhos futuros e referências utilizadas no desenvolvimento do texto.

1.5 PUBLICAÇÃO DO AUTOR

Durante o período de realização do curso de mestrado o seguinte artigo foi aceito e já inscrito:

- SILVA, JUAN P; DE ASSIS, JEFFERSON; FERNANDES, DARLAN A.; ROCHA, NADY; SGUAREZI FILHO, ALFEU J. "Performance of Predictive Control Applied to Active Power Filter".IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), 2023.

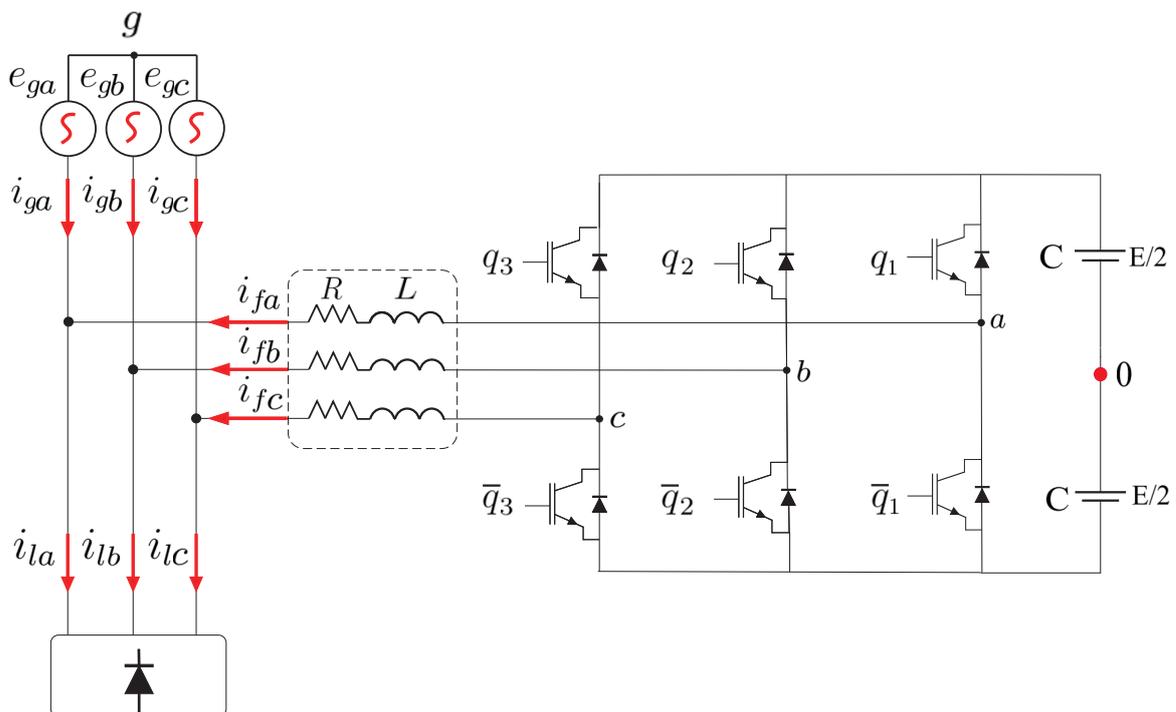
2 FILTRO ATIVO PARALELO COM UM INVERSOR

Este capítulo demonstra as equações e o princípio básico de funcionamento do inversor trifásico operando como um filtro ativo paralelo. Nele será apresentada as equações que relacionam as tensões e correntes que regem seu modelo matemático e que conectado em paralelo à rede elétrica trifásica e a uma carga trifásica não linear, objetiva controlar a corrente da rede, mantendo-a o mais próximo possível dos seus valores de referência. Além disso, também objetiva eliminar componentes harmônicas de corrente gerada pelas cargas não lineares.

2.1 MODELO DO FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA

O modelo de filtro a ser analisado consiste em um inversor trifásico, funcionando como fonte de corrente, conectado em série com um filtro passivo, formado por uma resistência R e um indutor L , que injeta, no ponto de conexão da rede elétrica com a carga, correntes de compensação capazes de atenuar ou eliminar as componentes harmônicas (BOUKEZATA et al., 2017). A Figura 5 ilustra o esquema de filtro ativo paralelo.

Figura 5 – Filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio autor.

A estrutura do filtro ativo consiste em um conversor CC/CA, cujo lado CA é conectado à rede elétrica e o lado CC sendo constituído por um banco de capacitores que tem como função manter a tensão CC maior que a amplitude das tensões do lado CA. Além disso, os inversores trifásicos são formados por um total de seis chaves de potência ($q_1, q_2, q_3, \bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3$), geralmente IGBT's (do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*), que compõem cada braço (S_a, S_b, S_c)

com duas chaves que funcionam de forma complementar, isto é, quando uma está aberta a outra permanece fechada (RODRIGUEZ; CORTES, 2012).

O modelo mais simples desses dispositivos de chaveamento apresenta duas condições: fechado ou aberto. Esses estados em que as chaves se apresentam são referenciados por dois números: um e zero, visto que, quando uma chave está fechada o estado de chaveamento é 1, e quando a outra chave está aberta o seu estado de chaveamento é 0 (MARTINEZ; KENNEL; GEYER, 2010).

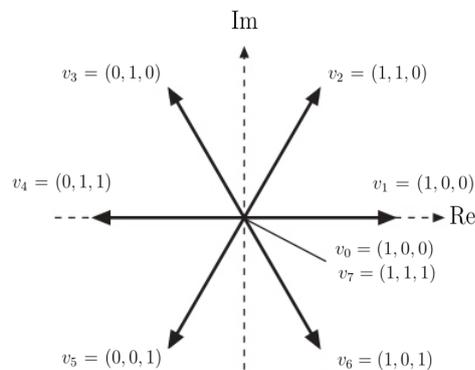
Dado os estados que se encontram, o número total de combinações de comutação do inversor passa a ser igual ao número de diferentes combinações dos três braços, exceto aquelas que causam curto circuito no sistema. Portanto, o número de combinações que um conversor pode obter é expresso na equação (2.1):

$$N = x^y \quad (2.1)$$

onde x é o número de estados possíveis de cada braço do conversor e y o número de braços do conversor. Assim, um conversor trifásico de dois níveis (zero e um), com $N = 2^3$, apresenta oito estados de comutação possíveis.

Esses estados de chaveamento resultam em oito vetores de tensão. Vale ressaltar que v_0 e v_7 são vetores nulos, conforme apresenta a Figura 6.

Figura 6 – Vetor e tensão para cada estado de chaveamento do inversor.



Fonte: Próprio autor.

Como observado na análise do circuito da Figura 5, por meio da lei de Kirchhoff das tensões é possível definir as equações que modelam a carga de cada fase do sistema conforme Cherif, Hicham e Kamel (2018) e Souza et al. (2021).

$$e_{ga} = -Ri_{fa} - L \frac{di_{fa}}{dt} + v_{fa} \quad (2.2)$$

$$e_{gb} = -Ri_{fb} - L \frac{di_{fb}}{dt} + v_{fb} \quad (2.3)$$

$$e_{gc} = -Ri_{fc} - L\frac{di_{fc}}{dt} + v_{fc} \quad (2.4)$$

$$v_{fk} = v_{k0} + v_{0g} \quad (2.5)$$

onde, k são as fases (A, B e C), R e L são a resistência e a indutância do filtro, respectivamente. v_f representa a tensão do filtro para cada fase, v_{k0} tensão dos polos do inversor e v_{0g} representa a diferença de potencial entre o ponto central do barramento CC "0" e o neutro da rede g . A equação (2.6) estabelece a corrente da rede, como:

$$i_{gk} = i_{lk} - i_{fk} \quad (2.6)$$

sendo, k a representação das correntes de cada fase (a, b, c) e a corrente da rede representada pela diferença entre a corrente da carga com a corrente do filtro.

Com o intuito de facilitar os cálculos de controle, as equações (2.2), (2.3) e (2.4) foram transformadas do seu referencial trifásico para o referencial no plano $\alpha\beta$. A equação (2.7) representa a transformada $\alpha\beta$, a partir de:

$$x_{\alpha\beta} = P_s x_{123} \quad (2.7)$$

onde, $x_{\alpha\beta}$ são os valores desejados no referencial $\alpha\beta$ e x_{123} retratam as variáveis no seu valor trifásico. A variável P_s representa a matriz de transformação definida como:

$$P_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

as componentes $\alpha\beta$ referentes a tensão de fase da rede passam a ser demonstradas a partir das equações (2.9) e (2.10)

$$e_{g\alpha} = -Ri_{f\alpha} - L\frac{di_{f\alpha}}{dt} + v_{f\alpha} \quad (2.9)$$

$$e_{g\beta} = -Ri_{f\beta} - L\frac{di_{f\beta}}{dt} + v_{f\beta}. \quad (2.10)$$

As tensões de chaveamento do inversor com nível de tensão E no barramento CC também podem ser expressas em suas referências $\alpha\beta$, conforme (2.11) e (2.12)

$$v_{f\alpha} = E\sqrt{\frac{2}{3}}\left(q_1 - \frac{q_2}{2} - \frac{q_3}{2}\right) \quad (2.11)$$

$$v_{f\beta} = \frac{E}{\sqrt{2}}(q_2 - q_3). \quad (2.12)$$

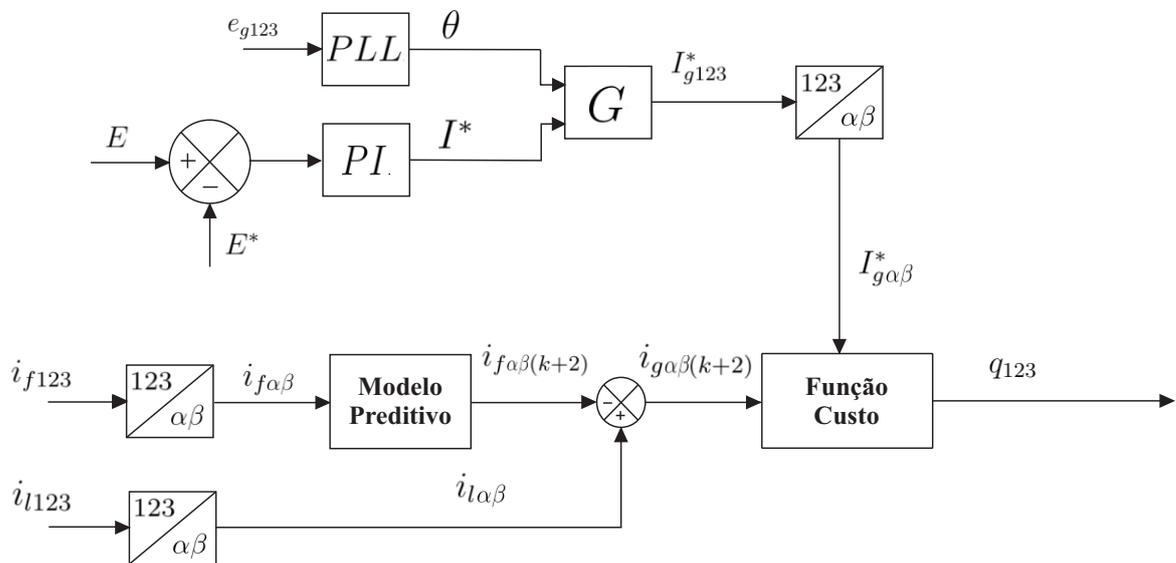
Assim, com a elaboração do modelo matemático do inversor, torna-se possível desenvolver o controle preditivo que será utilizado neste sistema.

2.2 APLICAÇÃO DO CONTROLE NO FILTRO ATIVO PARALELO

Como o filtro ativo paralelo deste trabalho tem como característica oito possíveis estados de chaveamento, a estratégia de controle consiste em monitorar a corrente de carga e a corrente do filtro, buscando gerar, assim, uma corrente senoidal na rede elétrica. Dessa forma, por meio da função custo, representada pela equação (1.2), é previsto o melhor desempenho dentro dos oito estados de chaveamento do inversor para ser aplicado no próximo período de amostragem (RODRIGUEZ et al., 2007).

A Figura 7 ilustra um diagrama esquemático do processo de controle do sistema. Neste, o controle de barramento CC inicia a partir do controlador PI (*Proporcional –Integral*) que recebe em sua entrada a relação do erro da tensão do barramento CC do inversor com a tensão de referência, nomeada E^* . Enquanto na saída do controlador PI foi gerada a amplitude da corrente de referência da rede, denominada I^* . No bloco PLL (*Phase Locked Loop*) foi gerado o ângulo de defasagem das correntes θ para as três fases. Assim, com ambos valores obtidos, o bloco G passa a determinar as correntes de referência com as suas defasagens, que em seguida, são transformadas em suas componentes $\alpha\beta$. Para implementar o controle preditivo na entrada

Figura 7 – Diagrama de blocos do sistema de controle preditivo do filtro ativo.



Fonte: Próprio autor.

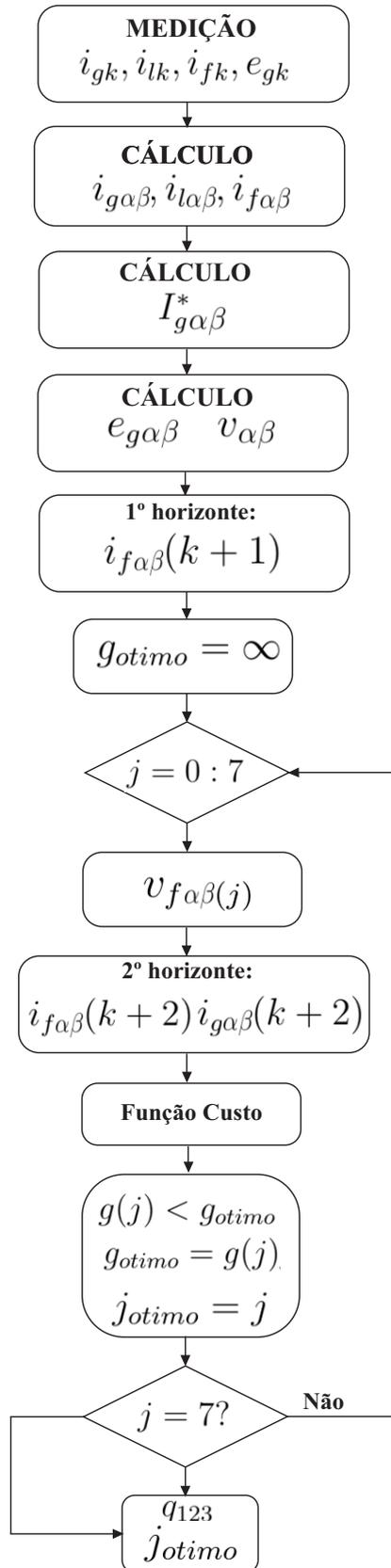
do bloco do modelo foi inserido a corrente das fases do filtro e realizado a transformação nas componentes $\alpha\beta$. Na saída do bloco preditivo, as correntes do filtro foram calculadas para dois horizontes de predição, $(k + 2)$. Concomitantemente, as correntes de carga também foram transformadas no seu referencial $\alpha\beta$, onde, juntando com as correntes do filtro, geraram a corrente da rede no seu segundo horizonte de predição.

Isto posto, com os valores de corrente de referência da rede juntamente com o seu valor preditivo, foi possível gerar a função custo para obtenção do menor erro dentro dos oito estados de chaveamento do inversor e gerar, também, a corrente de referência para a compensação dos harmônicos.

O fluxograma da Figura 8 ilustra o processo de funcionamento do algoritmo do controle preditivo, que se inicia com a medição das correntes da rede (i_{gk}), do filtro (i_{fk}) e da carga (i_{lk}), além da tensão da rede (e_{gk}), onde k representa os índices das fases. Em seguida, é realizada a transformada $\alpha\beta$ para as correntes medidas anteriormente, juntamente com o valor de referência da corrente da rede $I_{g\alpha\beta}^*$. Logo após, calcula-se a transformada $\alpha\beta$ para a tensão da rede ($e_{g\alpha\beta}$) e tensão do filtro ($v_{f\alpha\beta}$). Com isso, é obtido a corrente do filtro para o primeiro horizonte de predição $i_{g\alpha\beta}(k+1)$ e atribuído um valor para o *g*otimo.

Dessa forma, com esses valores já calculados, o próximo passo é análise das condições de chaveamento do inversor. Com isso, a estrutura de repetição *for* é utilizada no algoritmo, indo de zero a sete, condição representada pelo vetor (j). Assim, é analisado a tensão do filtro ($v_{fd\alpha\beta}$), que depende do estado de chaveamento atual. Diante disso, não só a corrente do filtro para o segundo horizonte de predição $i_{f\alpha\beta}(k+2)$ como também a corrente da rede para o mesmo instante $i_{g\alpha\beta}(k+2)$ podem ser calculadas.

Figura 8 – Fluxograma do controle preditivo.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, encontra-se a função custo, sendo a diferença entre a corrente de referência com a corrente da rede para o segundo horizonte, e o resultado é comparado com o g_{otimo} atribuído inicialmente, caso o g calculado seja menor que o g_{otimo} , esse valor será armazenado e comparado com o próximo. Caso contrário g_{otimo} se mantém como parâmetro e o for continuará em seu processo de testes até que todos os vetores sejam analisados.

Por fim, a função custo irá armazenar o menor valor dos vetores até o próximo instante de amostragem, buscando, assim, propiciar ao filtro o melhor desempenho dentro de todas as possibilidades de chaveamento.

2.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foi apresentado o modelo matemático de um filtro ativo de potência conectado em paralelo entre a rede trifásica e uma carga não linear, além do desenvolvimento do controle preditivo aplicado para filtros ativos. Para a modelagem matemática do filtro foram obtidas as equações que relacionam as tensões e correntes da rede, do filtro e da carga não linear. As equações que modelam o filtro são utilizadas para implementação adequada do algoritmo do controle preditivo. Vale ressaltar que é considerado para este algoritmo os oitos possíveis estados de chaveamento que são avaliados pela função custo com o objetivo de minimizar o valor da função, chegando no menor erro entre a corrente de referência e a corrente medida para o funcionamento adequado do controle.

3 TÉCNICAS PREDITORAS APLICADAS AO FAP

Este capítulo tem como objetivo apresentar a técnica de discretização de corrente de controle do filtro ativo paralelo, para um tempo de amostragem T_s , utilizada no algoritmo de controle. Além disso, apresenta novas possibilidades de modelos numéricos para construção de preditores que possam ser implementados no controle preditivo na intenção de melhorar o seu desempenho.

3.1 MÉTODO DE EULER REGRESSIVO

O método de Euler Regressivo é um método usual e bastante utilizado para o propósito de discretização das correntes de filtro e, conseqüentemente, para a construção do modelo preditor (CHERIF; HICHAM; KAMEL, 2018). Aplicando a discretização de Euler Regressivo para a derivada da corrente do filtro em dq, tem-se:

$$\frac{di_{f\alpha\beta}}{dt} = \frac{i_{f\alpha\beta}(k) - i_{f\alpha\beta}(k-1)}{T_s} \quad (3.1)$$

onde, T_s é o período de amostragem e, $i_{f\alpha\beta}(k)$ e $i_{f\alpha\beta}(k-1)$ são as correntes nos tempos de amostragem presente e com um passo anterior, respectivamente. Isolando o termo da derivada da corrente do filtro nas equações (2.9) e (2.10), obtêm-se a seguinte relação:

$$\frac{di_{f\alpha\beta}}{dt} = \frac{e_{g\alpha\beta} - Ri_{f\alpha\beta} + v_{f\alpha\beta}}{L} \quad (3.2)$$

Aplicando a discretização para (3.2) e igualando com (3.1), tem-se:

$$\frac{i_{f\alpha\beta}(k) - i_{f\alpha\beta}(k-1)}{T_s} = \frac{e_{g\alpha\beta}(k) - Ri_{f\alpha\beta}(k) + v_{f\alpha\beta}(k)}{L} \quad (3.3)$$

com a aplicação da discretização para o primeiro horizonte de corrente de filtro, a forma obtida é expressa como:

$$\frac{i_{f\alpha\beta}(k+1) - i_{f\alpha\beta}(k)}{T_s} = \frac{e_{g\alpha\beta}(k+1) - Ri_{f\alpha\beta}(k+1) + v_{f\alpha\beta}(k+1)}{L} \quad (3.4)$$

assim, isolando o termo da corrente de filtro da equação (3.4) e e fazendo manipulações algébricas adequadas, obtêm-se a seguinte equação:

$$i_{f\alpha\beta}(k+1) = \frac{-Li_{f\alpha\beta}(k) - v_{f\alpha\beta}(k+1)T_s + e_{g\alpha\beta}(k+1)T_s}{-RT_s - L} \quad (3.5)$$

onde, $i_{f\alpha\beta}(k+1)$ é a corrente de filtro para o instante $(k+1)$, $i_{f\alpha\beta}(k)$ a corrente de filtro no instante atual, $v_{f\alpha\beta}(k+1)$ a tensão do filtro no instante $(k+1)$ e $e_{g\alpha\beta}(k+1)$ a tensão da rede no instante $(k+1)$.

Dessa forma, observou-se que a corrente do filtro, previsto no primeiro horizonte $(k+1)$, depende do valor no instante anterior k e foi aplicado da mesma forma para as demais grandezas

do sistema. Conforme Kouro et al. (2008) e Souza et al. (2021) devido aos atrasados relacionados ao tempo de cálculo dos microprocessadores (DSP – do inglês *Digital Signal Processor*), fez-se necessário que a equação (3.5) sofresse atraso no passo de cálculo e passasse para dois passos de amostragens:

$$i_{f\alpha\beta}(k+2) = \frac{-Li_{f\alpha\beta}(k+1) - v_{f\alpha\beta}(k+2)T_s + e_{g\alpha\beta}(k+2)T_s}{-RT_s - L} \quad (3.6)$$

onde:

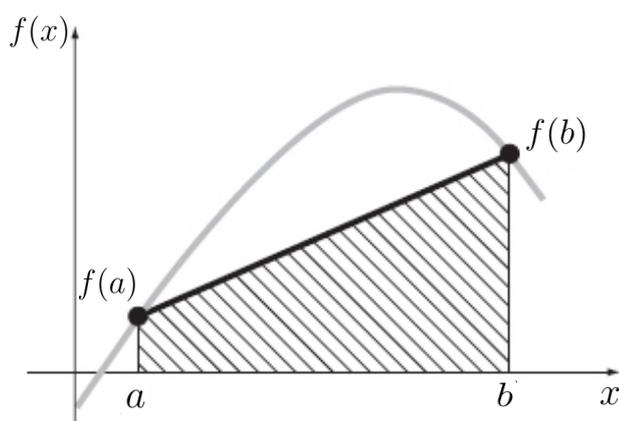
- $i_{f\alpha\beta}(k+1)$: é a corrente de filtro para o instante $(k+1)$ de amostragem;
- $i_{f\alpha\beta}(k+2)$: é a corrente do filtro para o instante $(k+2)$ de amostragem;
- $e_{g\alpha\beta}(k+2)$: é a tensão da rede para o instante $(k+2)$ de amostragem;
- $v_{f\alpha\beta}(k+2)$: é a tensão do filtro para o instante $(k+2)$ de amostragem.

Vale ressaltar que todas essas grandezas foram calculadas para o horizonte de previsão $(k+2)$ de amostragem. Assim, para fins de precisão, considera-se o tempo de cálculo do microprocessador objetivando a compensação do tempo de atraso que este necessitava para testar os vetores de chaveamento. Contudo, a discretização utilizando o método de Euler Regressivo não é a única ferramenta que auxilia na aplicação do controle preditivo. Existem outros métodos que também podem ser aplicados nesse controle.

3.2 MÉTODO TRAPEZOIDAL

As fórmulas de Newton-Cotes são métodos bem conhecidos para uso na integração numérica. Como são baseado na estratégia de substituir uma função mais trabalhosa por uma função simples e de fácil integração, as fórmulas podem ser classificadas nas formas abertas e fechadas. As fórmulas fechadas são aquelas nas quais os dados de início e fim de integração estão disponíveis. Dentre essas fórmulas fechadas têm-se o método Trapezoidal (CHAPRA; CANALE, 2016). No método Trapezoidal há a formação de uma área abaixo de um gráfico, decorrente das retas de $f(a)$ e $f(b)$, que constitui a forma geométrica de um trapézio, conforme ilustra a Figura 9.

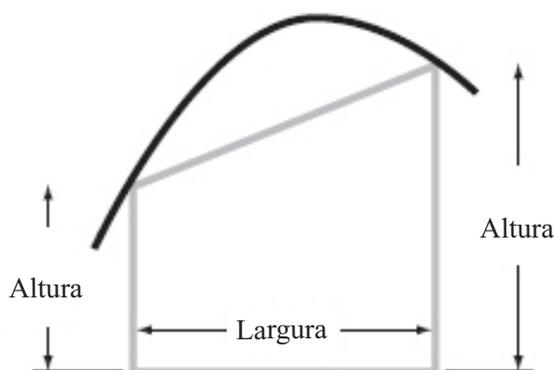
Figura 9 – Descrição matemática da regra do trapézio.



Fonte: CHAPRA; CANALE, 2016.

O cálculo da área, no método trapezoidal, é representada por largura vezes altura média. Conforme ilustra a forma geométrica na Figura 10.

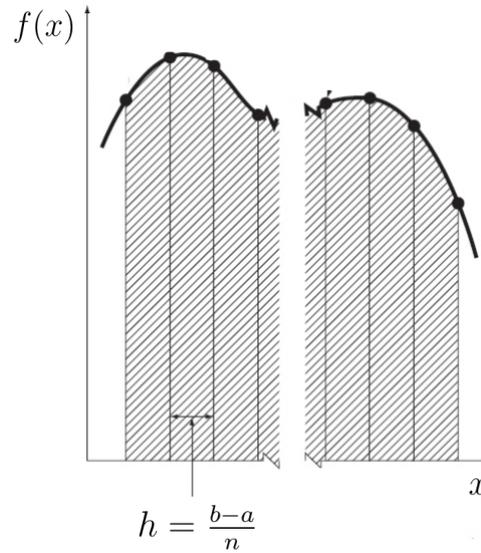
Figura 10 – Descrição geométrica regra do trapézio.



Fonte: CHAPRA; CANALE, 2016.

De acordo com Ruggiero e Lopes (1997), para obter um melhor nível de precisão nos cálculos, essa área pode ser dividida em vários trapézios possuindo o mesmo valor de espaçamento. Essa técnica também é conhecida como método Trapezoidal composto. Conforme ilustra a Figura 11:

Figura 11 – Composição método trapezoidal composto.



Fonte: CHAPRA; CANALE, 2016.

Como h representa a largura do trapézio, a e b representam os comprimentos laterais do mesmo. Aplicando a integração para o intervalo da Figura 11, tem-se como resultado a equação (3.7):

$$I_t = \frac{h}{2} [f(x_0) + 2 \sum_{n=1}^{n-1} f(x_n) + f(x_n)]. \quad (3.7)$$

Assim, adotando a técnica para discretizar a equação (3.2) com um intervalo de t até $t + h$, para as componentes α e β , têm-se:

$$di_{f\alpha\beta}(t) = \frac{1}{L} [e_{g\alpha\beta} - Ri_{f\alpha\beta}(t) + v_{f\alpha\beta}]. \quad (3.8)$$

Aplicando a integração em ambos os lados da equação com os limites de integração especificados:

$$\int_t^{t+h} di_{f\alpha\beta} = \int_t^{t+h} \left[\frac{e_{g\alpha\beta} - Ri_{f\alpha\beta} + v_{f\alpha\beta}}{L} \right] dt. \quad (3.9)$$

Para uma melhor representação das variáveis discretas os instantes t e $(t + h)$ serão substituídos por k e $(k + 1)$, respectivamente. E quando existirem amostras em instantes anteriores, como por exemplo, $(t - h)$ a substituição será $(k - 1)$. Estas notações irão se repetir nas demais partes do texto. Portanto, para a componente α tem-se a equação (3.10):

$$\begin{aligned} i_{f\alpha}(k + 1) - i_{f\alpha}(k) &= \frac{1}{L} [[e_{g\alpha}(k + 1) + e_{g\alpha}(k)] \frac{h}{2} \\ &- R[i_{g\alpha}(k + 1) + i_{g\alpha}(k)] \frac{h}{2} + [v_{g\alpha}(k + 1) + v_{g\alpha}(k)] \frac{h}{2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

e para a componente β :

$$i_{f\beta}(k + 1) - i_{f\beta}(k) = \frac{1}{L} [[e_{g\beta}(k + 1) + e_{g\beta}(k)] \frac{h}{2}$$

$$-R[i_{g\beta}(k+1) + i_{g\beta}(k)]\frac{h}{2} + [v_{g\beta}(k+1) + v_{g\beta}(k)]\frac{h}{2} \quad (3.11)$$

substituindo h por T_s (tempo de amostragem) e isolando o termo i_{fdq} para o instante $(k+1)$ obtém-se o modelo de discretização dado nas equações (3.12) e (3.13) para o primeiro horizonte de predição:

$$i_{f\alpha}(k+1) = \frac{2i_{f\alpha}(k) + T_s[e_{g\alpha}(k+1) + v_{g\alpha}(k+1)]}{2L + RT_s} - \frac{e_{g\alpha}(k) - Ri_{f\alpha}(k) + v_{g\alpha}(k)}{2L + RT_s} \quad (3.12)$$

$$i_{f\beta}(k+1) = \frac{2i_{f\beta}(k) + T_s[e_{g\beta}(k+1) + v_{g\beta}(k+1)]}{2L + RT_s} - \frac{e_{g\beta}(k) - Ri_{f\beta}(k) + v_{g\beta}(k)}{2L + RT_s} \quad (3.13)$$

e para o segundo horizonte predição tem-se as equações (3.14) e (3.15) para as componentes α e β :

$$i_{f\alpha}(k+2) = \frac{2i_{f\alpha}(k+1) + T_s[e_{g\alpha}(k+2) + v_{g\alpha}(k+2)]}{2L + RT_s} - \frac{e_{g\alpha}(k+1) - Ri_{f\alpha}(k+1) + v_{g\alpha}(k+1)}{2L + RT_s} \quad (3.14)$$

$$i_{f\beta}(k+2) = \frac{2i_{f\beta}(k+1) + T_s[e_{g\beta}(k+2) + v_{g\beta}(k+2)]}{2L + RT_s} - \frac{e_{g\beta}(k+1) - Ri_{f\beta}(k+1) + v_{g\beta}(k+1)}{2L + RT_s} \quad (3.15)$$

3.3 MÉTODO DA FORMA CENTRADA

Uma determinada função $f(x)$ pode ser aproximada por uma soma infinita de parcelas como indicado pela série de Taylor, e em torno de um ponto a . (CHAPRA; CANALE, 2016). Em particular, o teorema afirma que qualquer função derivável de ordem n pode ser aproximada por um polinômio:

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n \quad (3.16)$$

Assim, a é um ponto qualquer da função, considerando que o polinômio tende ao infinito, tem-se a expressão da série de Taylor da seguinte forma:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(t-a)^n \quad (3.17)$$

Diante disso, a série de Taylor pode ser uma outra opção para a implementação do processo de discretização no controle preditivo. Após algumas considerações, pode-se reescrever a série da seguinte forma:

$$y(x+h) = y(x) + [(x+h) - x]y'(x) + [(x+h) - x]^2 \frac{y''(x)}{2} + \dots + [(x+h) - x]^n \frac{y^n(x)}{n!} \quad (3.18)$$

Desenvolvendo a expressão:

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{h^2}{2}y''(x) + \dots + \frac{h}{n!}y^n(x). \quad (3.19)$$

Para extrair a expressão da Forma Centrada, trunca-se a série em $n = 2$, logo tem-se:

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{h^2}{2}y''(x) \quad (3.20)$$

$$y(x-h) = y(x) - hy'(x) + \frac{h^2}{2}y''(x). \quad (3.21)$$

Subtraindo as expressões (3.21) de (3.20):

$$y' = \frac{y(x+h) - y(x-h)}{2h} \quad (3.22)$$

substituindo $y(x)$ por $i_{f\alpha\beta}(k)$, e em seguida igualando as equações (3.22) e (3.2) obtém-se:

$$\left[\frac{i_{f\alpha\beta}(k+1) - i_{f\alpha\beta}(k-1)}{2h} \right] = \left[\frac{e_{g\alpha\beta}(k) - Ri_{f\alpha\beta}(k) + v_{f\alpha\beta}(k)}{L} \right]. \quad (3.23)$$

Substituindo h por T_s e isolando a corrente do filtro, tem-se a corrente para o primeiro horizonte de predição:

$$i_{f\alpha\beta}(k+1) = 2T_s \left[\frac{-e_{g\alpha\beta}(k) - Ri_{f\alpha\beta}(k) + v_{f\alpha\beta}(k)}{L} \right] + i_{f\alpha\beta}(k-1). \quad (3.24)$$

Por fim, aplicando o segundo horizonte de predição para a equação (3.24)

$$i_{f\alpha\beta}(k+2) = 2T_s \left[\frac{-e_{g\alpha\beta}(k+1) - Ri_{f\alpha\beta}(k+1) + v_{f\alpha\beta}(k+1)}{L} \right] + i_{f\alpha\beta}(k) \quad (3.25)$$

3.4 MÉTODO DPT

Ainda utilizando a série de Taylor é possível extrair outras expressões para a primeira derivada da função. Logo:

$$y(x+2h) = y(x) + 2hy'(x) + \frac{4h^2}{2}y''(x) \quad (3.26)$$

multiplicando a equação (3.20) por quatro:

$$4y(x+h) = 4y(x) + 4hy'(x) + \frac{4h^2}{2}y''(x) \quad (3.27)$$

subtraindo (3.26) de (3.27), tem-se:

$$y(x + 2h) - 4y(x + h) = -3y(x) - 2hy'(x) \quad (3.28)$$

isolando o termo y' :

$$y'(x) = \frac{-3y(x) + 4y(x + h) - 4y(x + 2h)}{2h}. \quad (3.29)$$

Igulando as expressões (3.29) e (3.2), e substituindo y por $i_{f\alpha\beta}$ e h por T_s :

$$\frac{-e_{g\alpha\beta}(k) - Ri_{f\alpha\beta}(k) + v_{f\alpha\beta}(k)}{L} = \frac{-3i_{f\alpha\beta}(k) + 4i_{f\alpha\beta}(k + 1) - i_{f\alpha\beta}(k + 2)}{2T_s}. \quad (3.30)$$

Por fim, isolando o termo de $i_{f\alpha\beta}(k + 2)$, resulta em:

$$i_{f\alpha\beta}(k + 2) = 2T_s \left[\frac{-e_{g\alpha\beta}(k) - Ri_{f\alpha\beta}(k) + v_{f\alpha\beta}(k)}{L} \right] + [4i_{f\alpha\beta}(k + 1) - 3i_{f\alpha\beta}(k)] \quad (3.31)$$

3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas de cálculos dos preditores utilizados no controle preditivo aplicado ao sistema do controle. A primeira técnica apresentada foi o método de Euler Regressivo. Este é o mais utilizado e encontrado na literatura, muito disso deve-se a sua simplicidade de aplicação.

Outra técnica desenvolvida foi o método Trapezoidal que consiste na estratégia de substituir uma função trabalhosa por uma mais simples e de fácil integração. Esta técnica possui este nome pois o seu desenvolvimento gera uma área abaixo de uma curva que tem a forma geométrica de um trapézio, possuindo um nível de precisão em seus cálculos maiores do que o método de Euler Regressivo.

As outras duas técnicas, Forma Centrada e DPT, partem da aproximação por meio da série de Taylor, sendo uma série de funções que é utilizada para reescrever uma função na forma de polinômio. No entanto, a Forma Centrada trata-se de uma técnica mais ampla em termos de amostras pois abarca um intervalo maior de três instantes, já para o método DPT utiliza-se dois passos de tempo a frente sem que haja a necessidade de calcular a corrente para o primeiro horizonte de predição.

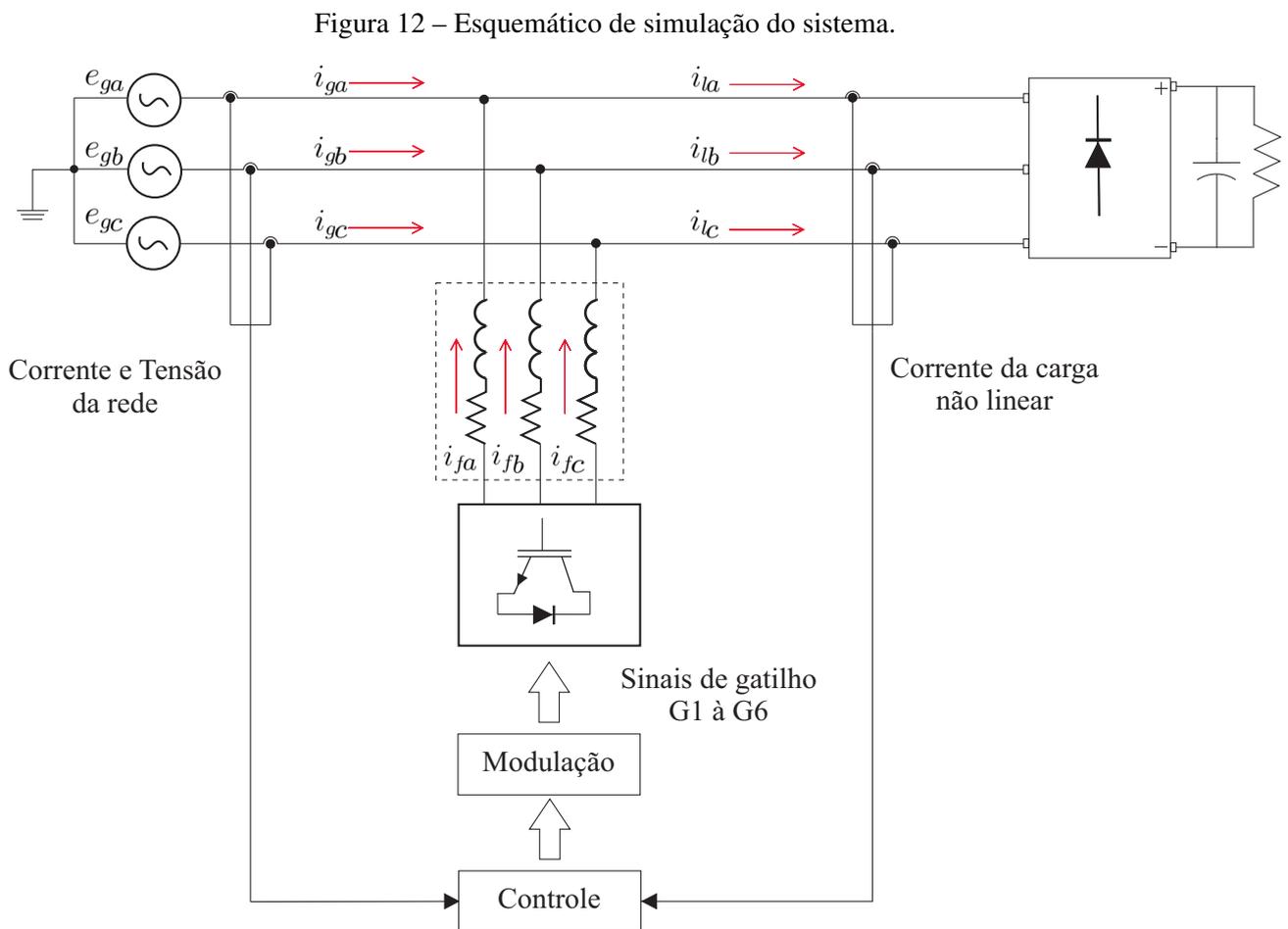
Dessa forma, foi desenvolvido matematicamente métodos de cálculo dos preditores para a aplicação do controle do filtro utilizando como base as equações matemáticas que regem o funcionamento desse sistema.

4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações obtidas dos diferentes métodos de cálculo do preditores aplicados no controle preditivo do filtro ativo de potência. Para tanto, foi construída, inicialmente, uma plataforma de simulação em ambiente Simulink/MATLAB. A plataforma construída também foi utilizada para uma futura realização de simulações em tempo real utilizando o simulador OP5700 com objetivo de validar os resultados obtidos.

Na Figura 12 é ilustrado o diagrama esquemático de funcionamento do sistema.



Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, serão apresentados os resultados obtidos no Simulink para cada método de discretização. Em seguida serão analisadas algumas figuras de mérito utilizadas para avaliar o desempenho de cada método.

Serão apresentados ao longo deste capítulo os resultados para os seguintes métodos de discretização:

- Euler Regressivo;
- Trapezoidal;
- Forma centrada;
- DPT.

Além disso, para uma posterior análise de desempenho dos métodos utilizados foram aplicadas as seguintes figuras de mérito:

- Teste de Dinâmica: no qual foi analisado o comportamento da tensão de barramento CC de acordo com a mudança da tensão de referência do sistema;
- Nível de THD: verificou-se as taxas de distorções harmônicas totais para cada método;
- Tempo de simulação: aplicou-se uma ferramenta de contagem no Simulink que verificou o tempo gasto para cada método realizar a simulação dentro do ambiente virtual;
- Evolução do erro: foi observado o desenvolvimento da função custo dentro do controle preditivo, analisando o comportamento do erro entre as correntes de referência e as correntes medidas.

4.2 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Com o intuito de observar o desempenho das variáveis do sistema em regime permanente, utilizou-se na plataforma Simulink um passo de cálculo (T_s) de 30 ms, tempo de amostragem de $1 \mu s$ e o tempo total de simulação de 1s. Os parâmetros do sistema utilizados na simulação estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros de simulação.

	Parâmetro	Valor
e_g	Tensão de pico da rede	140 V
E^*	Tensão barramento CC	300 V
C	Capacitância barramento CC	2200 μF
R	Resistência do filtro	0,5 Ω
L	Indutância do filtro	7 mH
f	Frequência da rede	60 Hz
C_L	Capacitância da carga	5 μF
R_L	Resistência da carga	0,2 Ω

Fonte: Próprio autor.

4.3 RESULTADOS SIMULINK/MATLAB

4.3.1 Método de Euler Regressivo

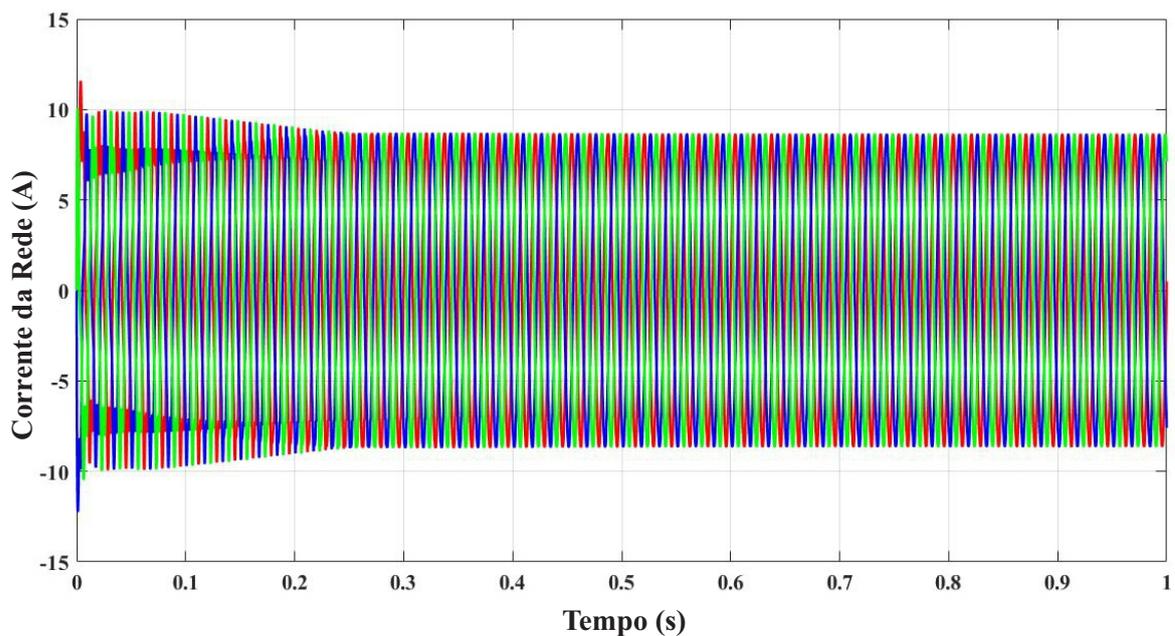
Esta subseção trata à respeito dos resultados obtidos por meio do método de discretização Euler Regressivo. As Figuras 13 e 14 ilustram o resultado da corrente da rede que foi gerada com a aplicação do controle. Observa-se que a corrente apresenta uma forma senoidal com amplitude de aproximadamente 8,5 A. No entanto, ainda se faz perceptível a presença de pequenas distorções em alguns pontos das curvas. Além disso na Figura 13 percebe-se que o tempo de acomodação da corrente está em torno de 0,2 s.

As Figuras 15 e 16 ilustram o comportamento da tensão da rede com a corrente gerada nas fases A e B. Nota-se que há alinhamento entre as duas curvas, o que indica a correção do fator de potência, um dos problemas a ser mitigado por essa estratégia de controle.

Por sua vez, a Figura 17 ilustra as correntes, nas três fases, que foram injetadas na rede. Essas correntes geradas pelo filtro têm uma amplitude de aproximadamente 5 A. A corrente da carga é ilustrada na Figura 18 na qual mostra como seriam as correntes da rede sem a presença do filtro ativo de potência.

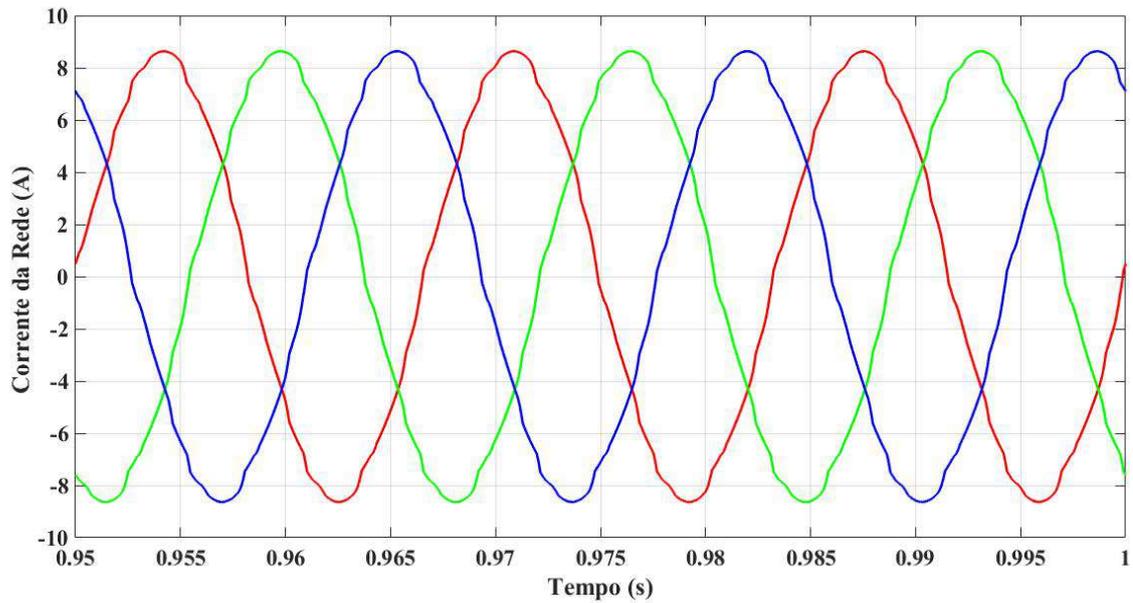
Além disso, outro ponto analisado, é ilustrado na Figura 19 que representa o controle do barramento CC do filtro. Observa-se que o controle necessita de aproximadamente 0,6 s para fazer com que a tensão do filtro comece a seguir o seu valor de referência que é de 300 V.

Figura 13 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente da rede.



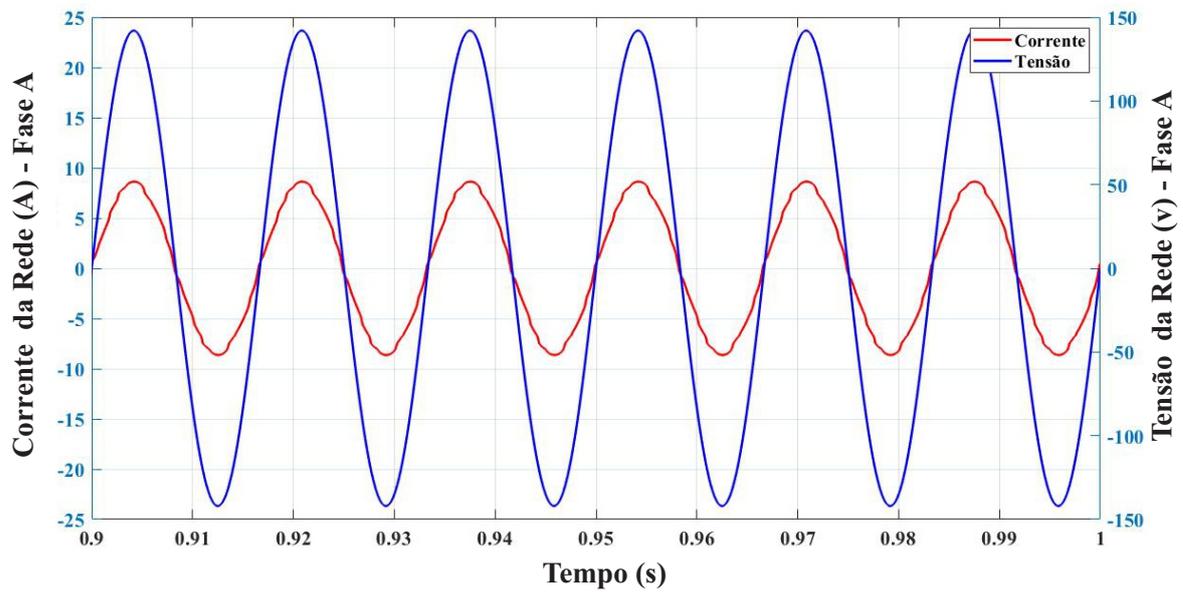
Fonte: Próprio Autor.

Figura 14 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente da rede em janela de tempo menor.



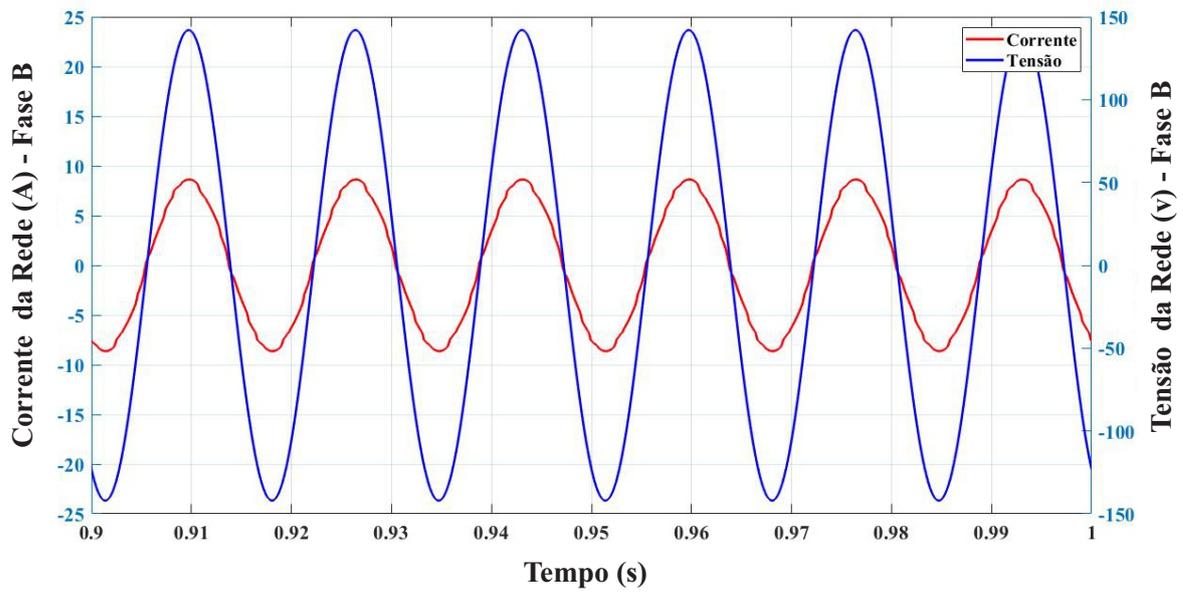
Fonte: Próprio Autor.

Figura 15 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Tensão e corrente fase A.



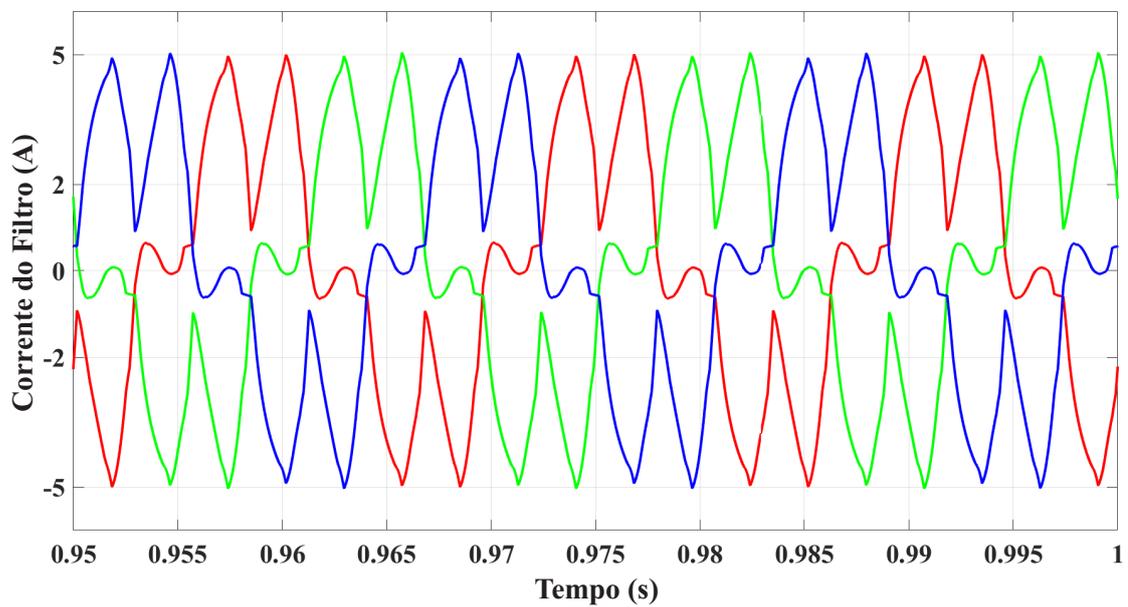
Fonte: Próprio Autor.

Figura 16 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Tensão e corrente fase B.



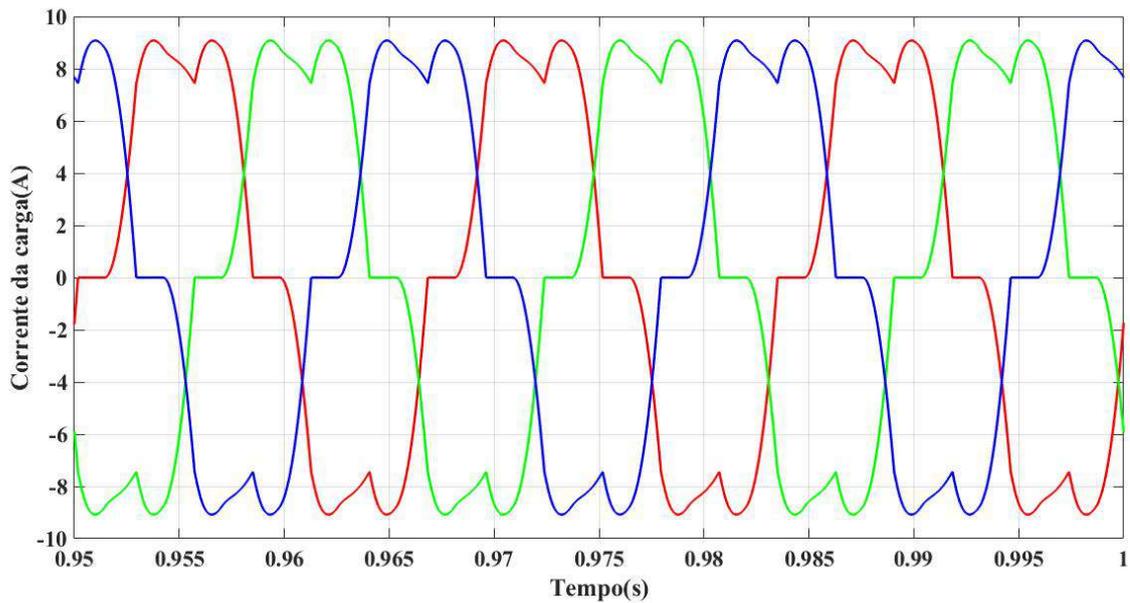
Fonte: Próprio Autor.

Figura 17 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente do filtro.



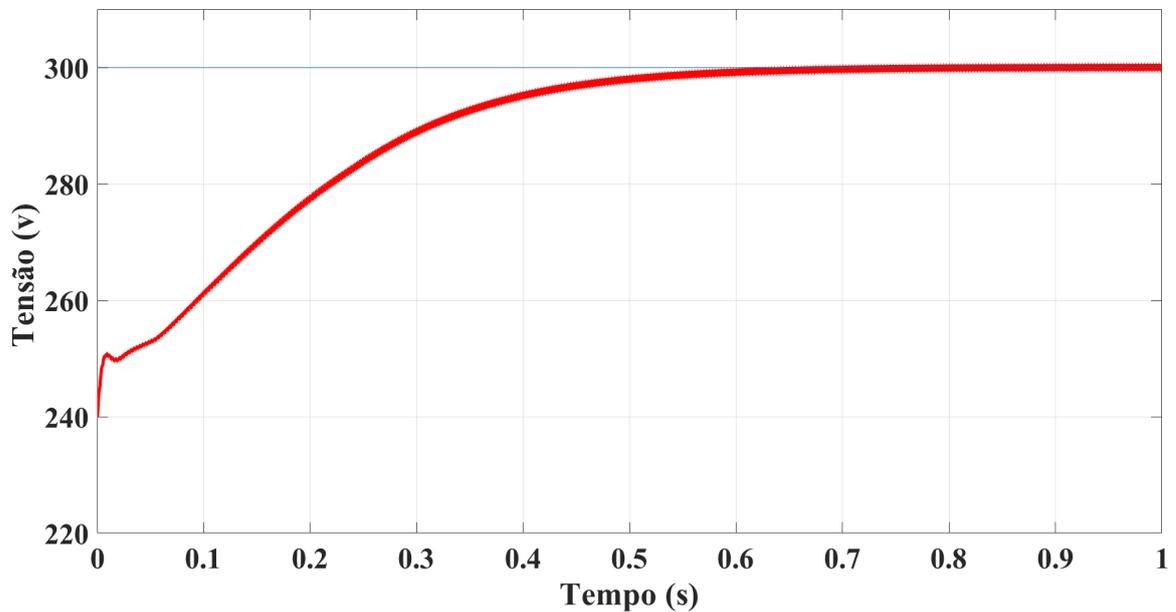
Fonte: Próprio Autor.

Figura 18 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Corrente da carga.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 19 – Resultado Simulink método Euler Regressivo - Tensão barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

4.3.2 Método Trapezoidal

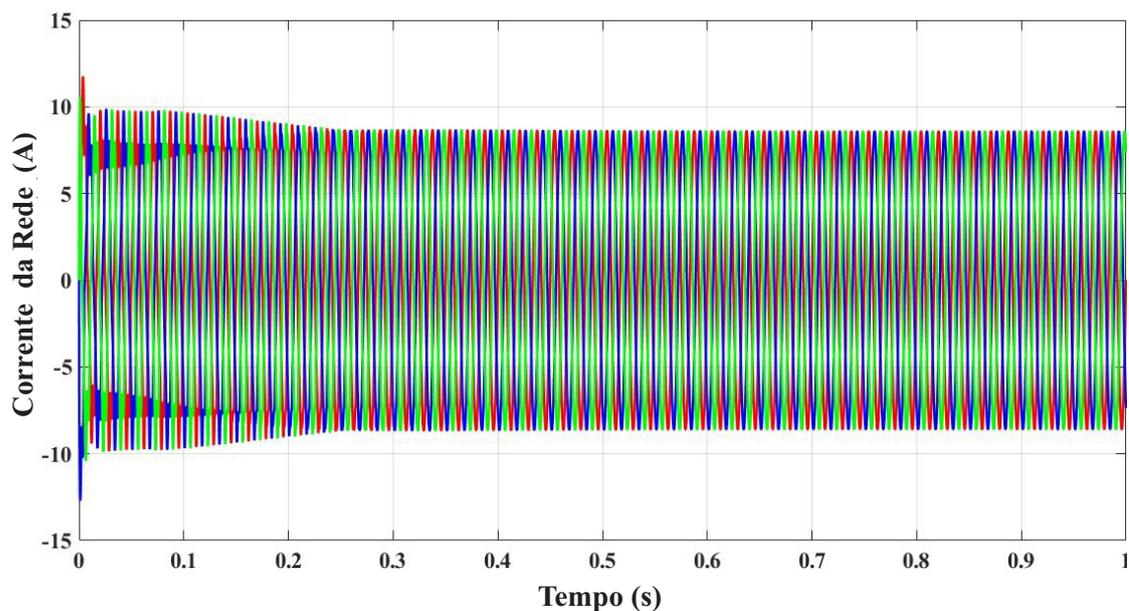
No método Trapezoidal também foram analisadas as correntes da rede, fator de potência, corrente do filtro e corrente da carga, além da tensão do barramento CC do filtro. Na Figura 20 é ilustrado a corrente da rede para as três fases após aplicação do controle. É possível perceber que próximo de 0,2 s as correntes se estabilizam.

A Figura 21 mostra a corrente da rede num intervalo de 0,95 s a 1 s para uma melhor visualização da sua forma de onda e, ao se comparar com o método de Euler, observa-se a presença de uma quantidade menor de ruídos. Isso ocorre devido o método Trapezoidal ser uma técnica que possui uma precisão maior que o método de Euler Regressivo.

As Figuras 22 e 23 ilustram o alinhamento das correntes das fases A e B com as suas respectivas tensões, mostrando que ambas estão fase. As correntes geradas pelo filtro que são injetadas no sistema estão ilustradas na figura 24. Assim como no método de Euler a corrente da carga não linear se mantém visto que a mesma independe do método de discretização aplicado. Portanto, a Figura já foi ilustrada no método anterior não sendo necessária apresentá-la novamente.

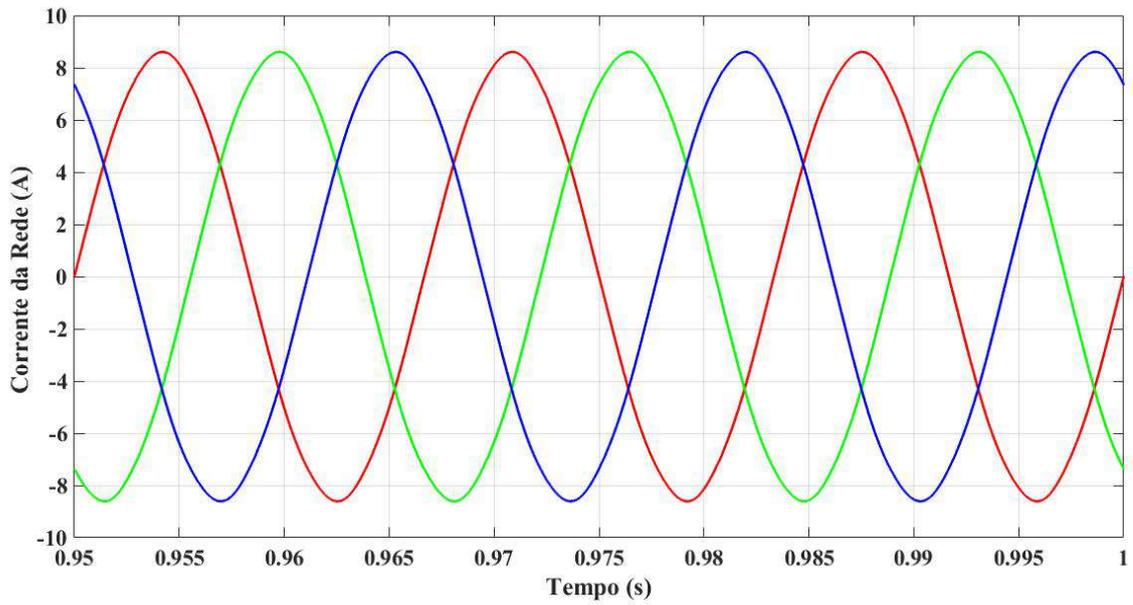
Por fim, a tensão do barramento CC é ilustrada na Figura 25, representando a aplicação do controle seguindo o seu valor de referência de 300 V com um tempo de acomodação em aproximadamente 0,6 s.

Figura 20 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Corrente da rede.



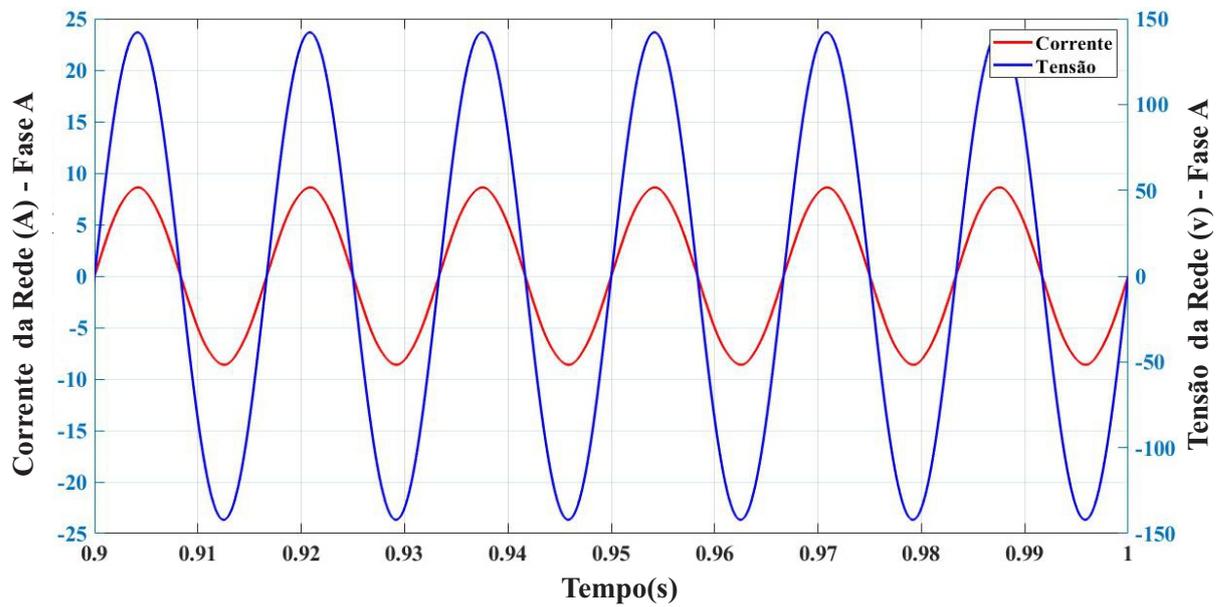
Fonte: Próprio Autor.

Figura 21 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Corrente da rede em janela de tempo menor.



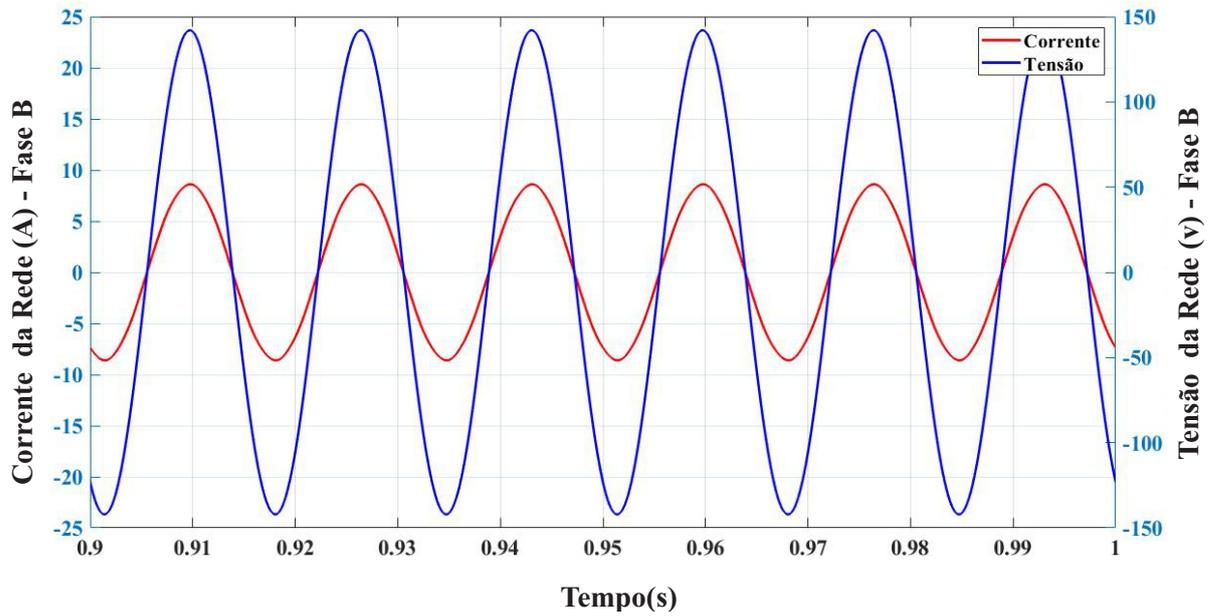
Fonte: Próprio Autor.

Figura 22 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Tensão e corrente fase A.



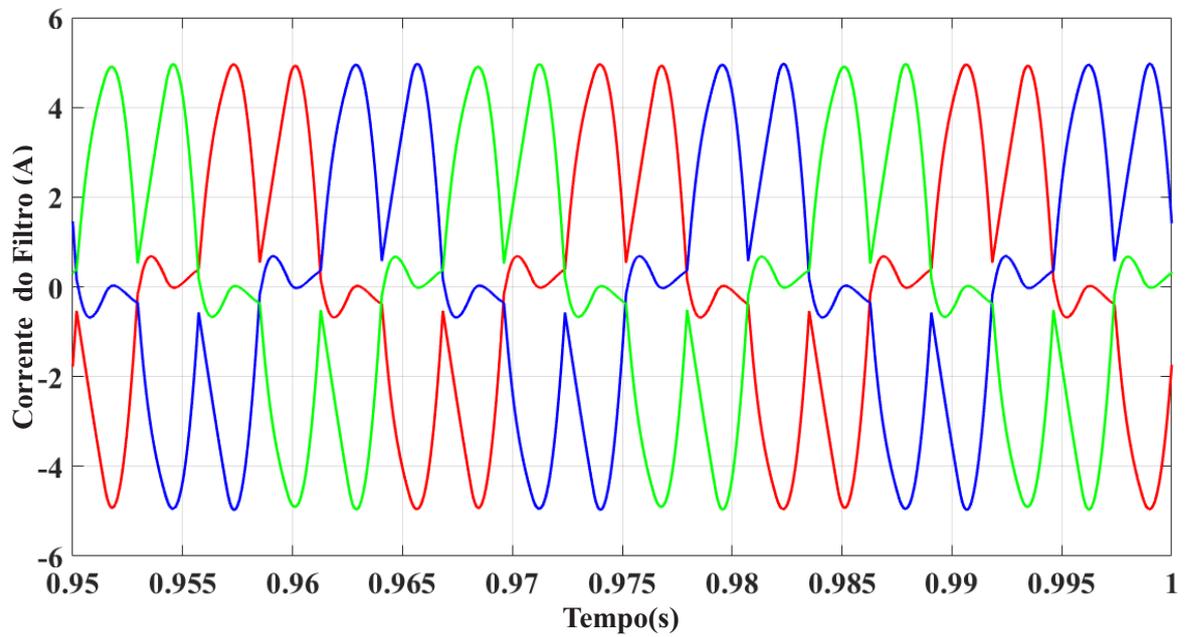
Fonte: Próprio Autor.

Figura 23 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Tensão e corrente fase B.



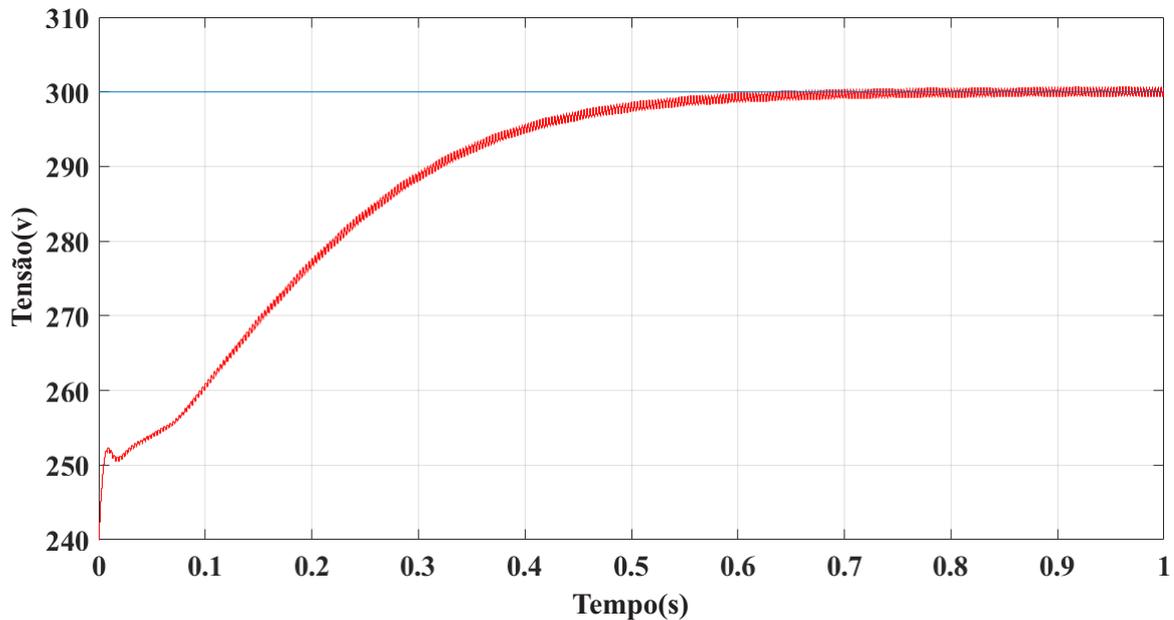
Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Resultado Simulink método Trapezoidal - Corrente do filtro.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 25 – Resultado Simulink método Trapezoidal -Tensão barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

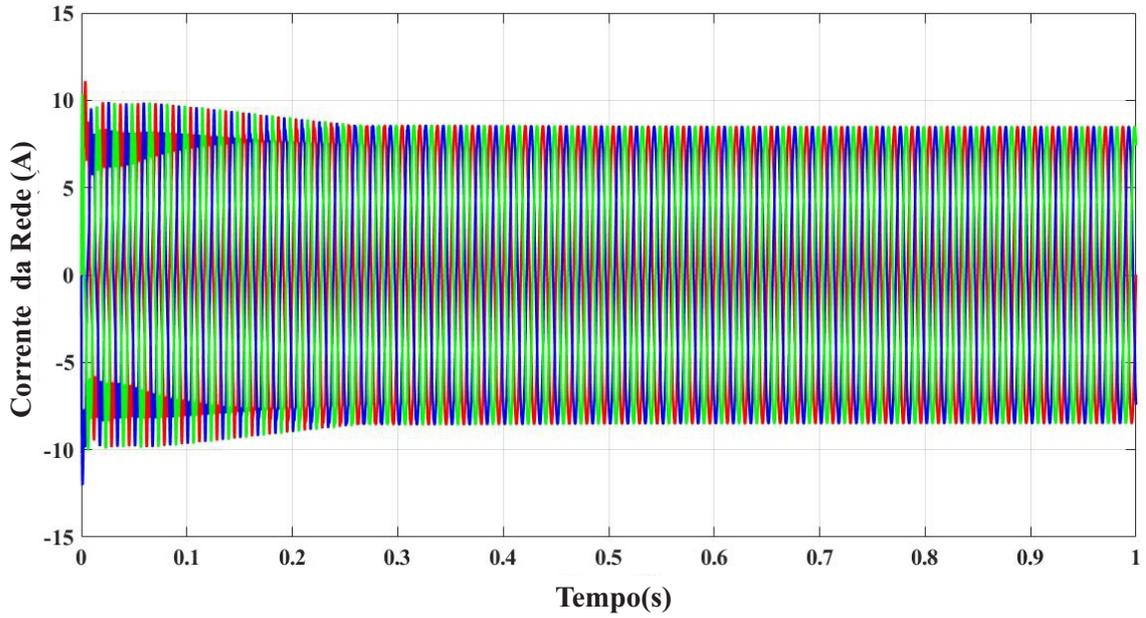
4.3.3 Método da Forma Centrada

Para a Forma Centrada, a corrente da rede resultante nas três fases são ilustradas na Figura 26, possuindo um tempo de acomodação por volta de 0,2 s. Na Figura 27 as correntes para as três fase são ilustradas em uma janela de tempo menor, observa-se ainda a presença de interferências na forma de onda das mesmas. No entanto apresentam também uma forma senoidal. As amplitudes encontram-se em valores próximos de 8,5 A.

Nas Figuras 28 e 29, são ilustradas as correntes e tensões nas fases A e B. É perceptível que ambas as correntes estão em fase com os seus valores de tensão, caracterizando um fator de potência adequado.

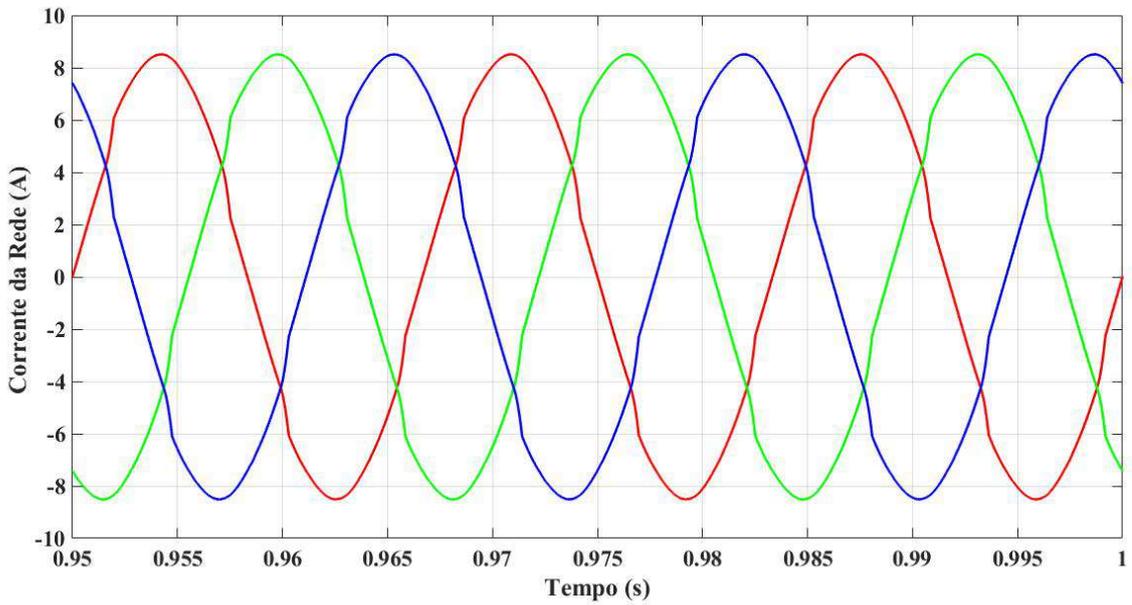
A corrente trifásica injetada no sistema é representada na Figura 30 e possui uma amplitude de aproximadamente 5,2 A, sendo responsável por anular as componentes harmônicas de corrente causadas pela carga não linear conectada ao sistema. No barramento CC a tensão gerada é ilustrada na Figura 31. Assim como nos métodos anteriores o tempo de acomodação da curva está em torno de 0,6 s.

Figura 26 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Corrente da rede.



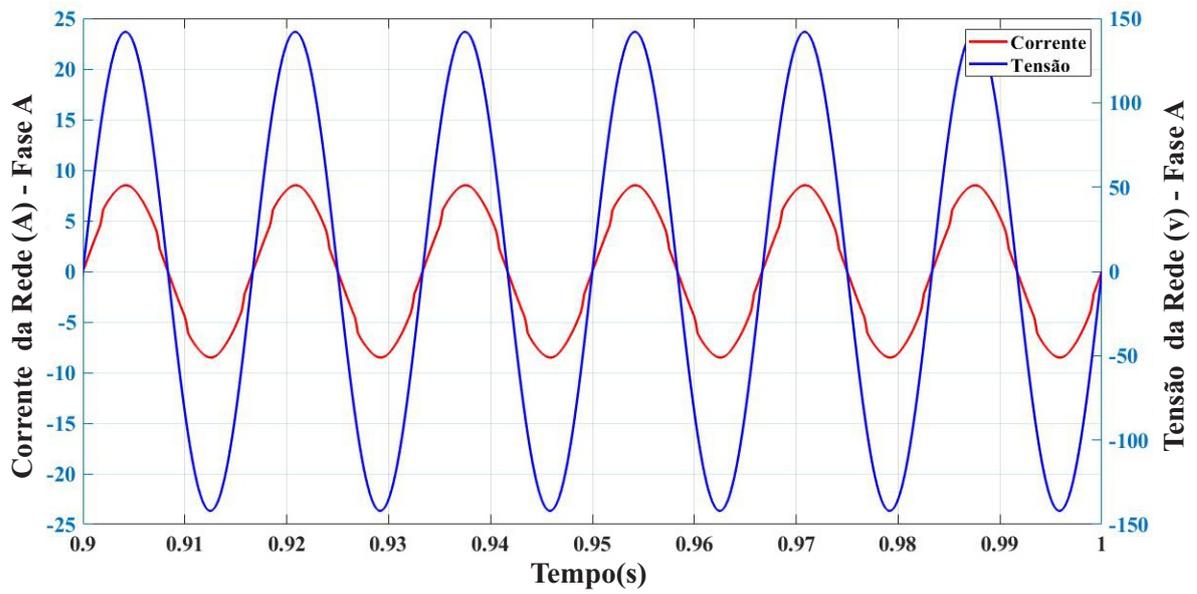
Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Corrente da rede em janela de tempo menor.



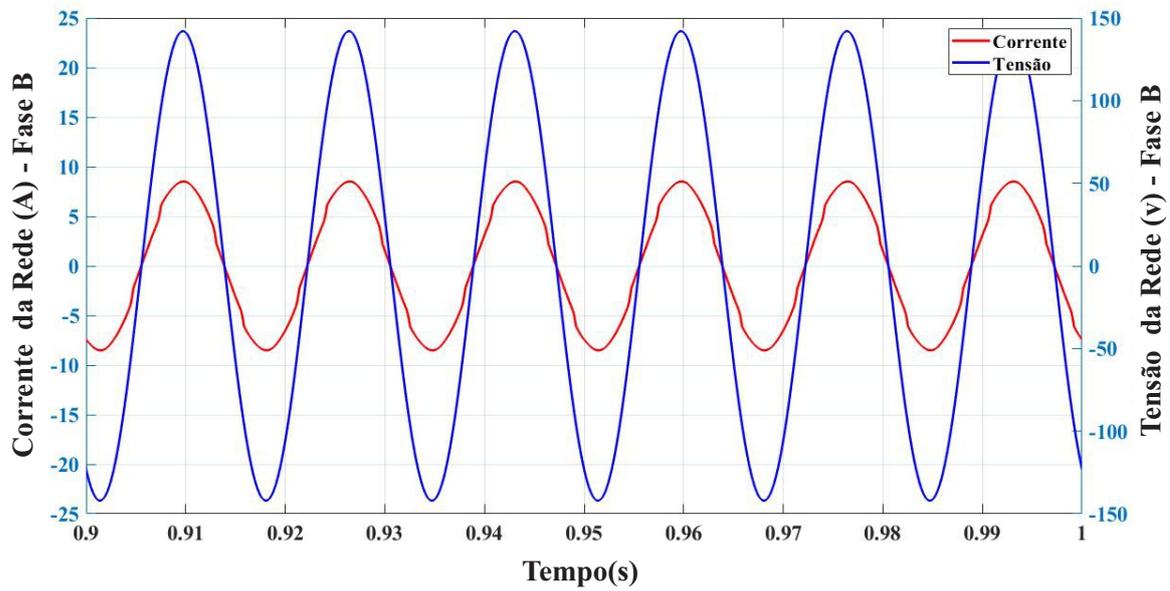
Fonte: Próprio Autor.

Figura 28 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Tensão e corrente fase A.



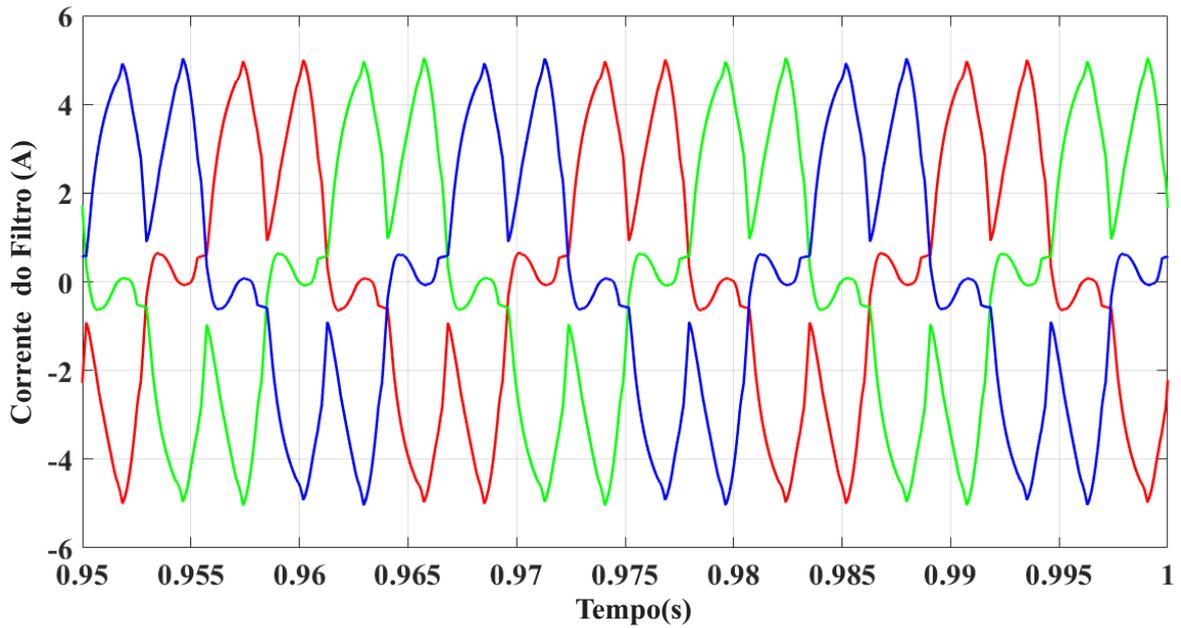
Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Tensão e corrente fase B.



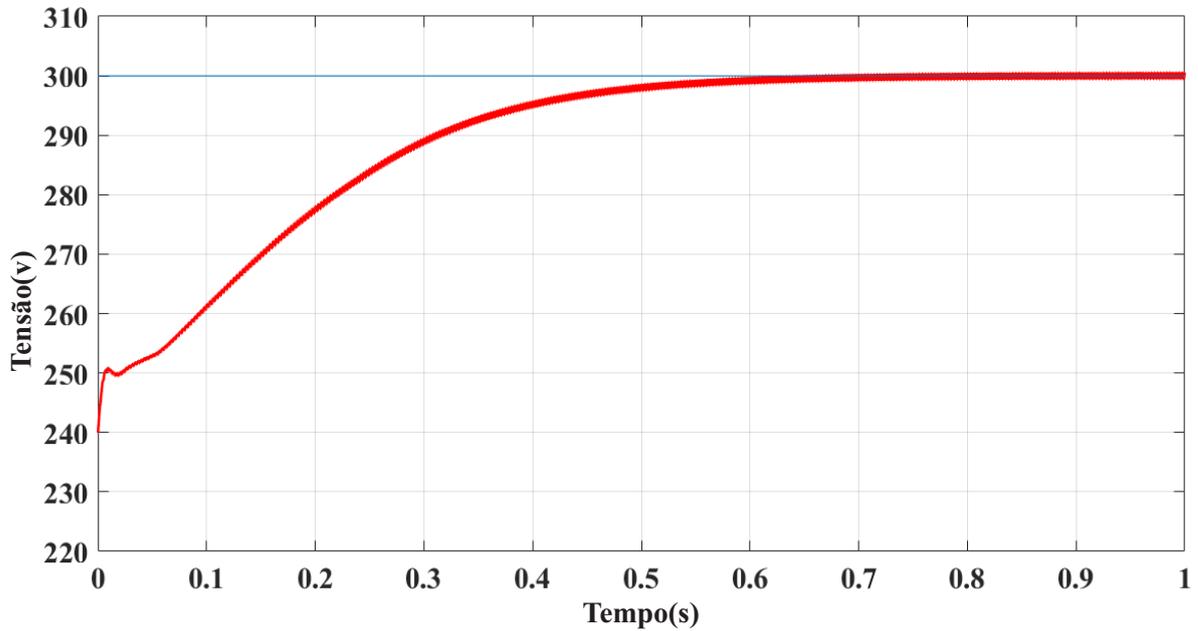
Fonte: Próprio Autor.

Figura 30 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Corrente do filtro.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 31 – Resultado Simulink método Forma Centrada - Tensão barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

4.3.4 Método DPT

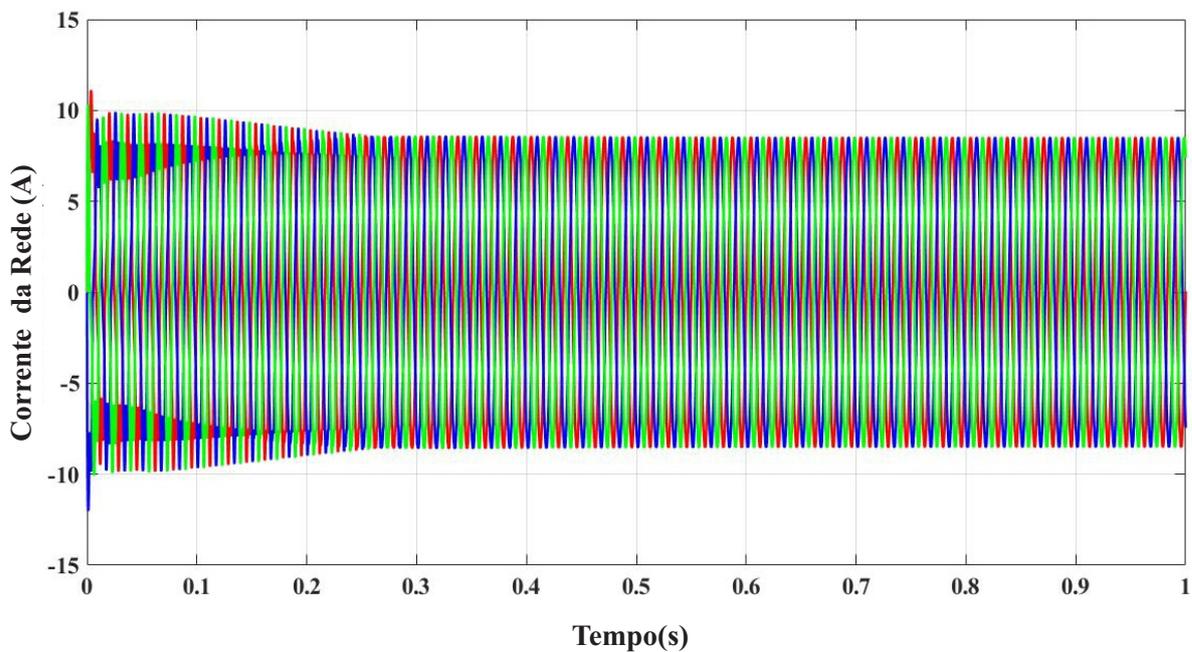
A Figura 32 mostra o resultado das correntes nas três fases gerada pela aplicação do controle utilizando o método de discretização DPT. Na figura 33 é perceptível a presença

de pequenas distorções na forma de onda das correntes, no entanto, as mesmas, ainda sim, apresentam aspectos senoidais.

O fator de potência está representado nas Figuras 34 e 35, na qual nota-se que as correntes nas fases A e B estão alinhadas com os seus respectivos valores de tensão. As correntes geradas pelo filtro estão representadas na Figura 36, assim como as anteriores também possui uma amplitude de aproximadamente 5 A para cada fase.

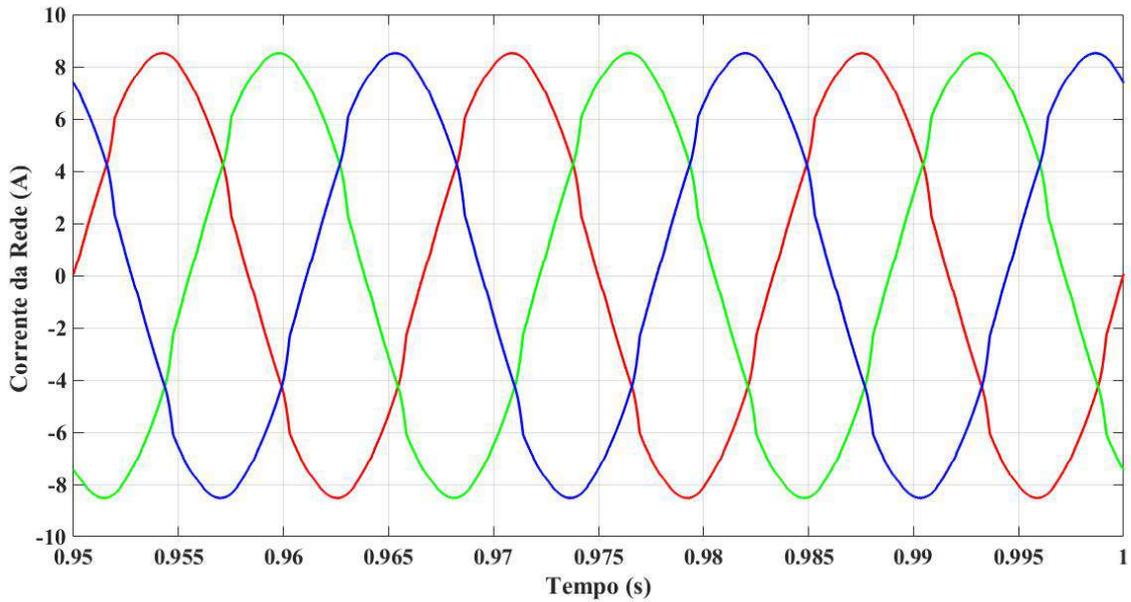
A tensão do barramento CC do filtro é representada na Figura 37, indicando um bom desempenho do controle, pois por volta dos 0,6 s de simulação a tensão passa a seguir o seu valor de referência. A corrente da carga não foi representada pois independe do controle e já foi mostrada na Figura 19.

Figura 32 – Resultado Simulink método DPT - Corrente da rede.



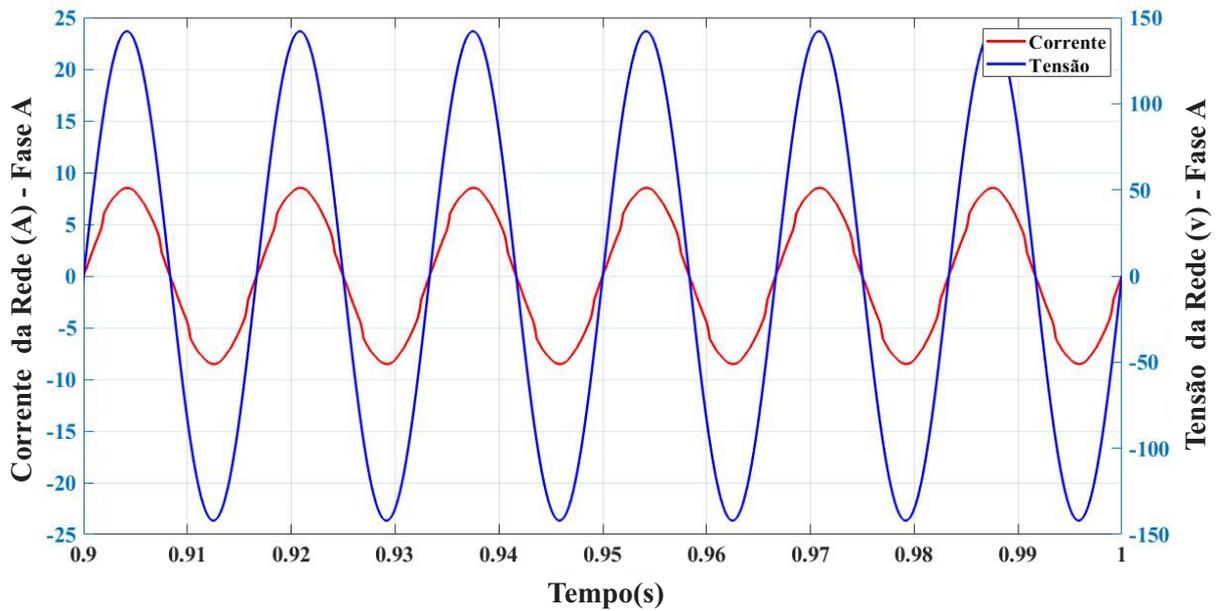
Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 – Resultado Simulink método DPT - Corrente da rede aproximado.



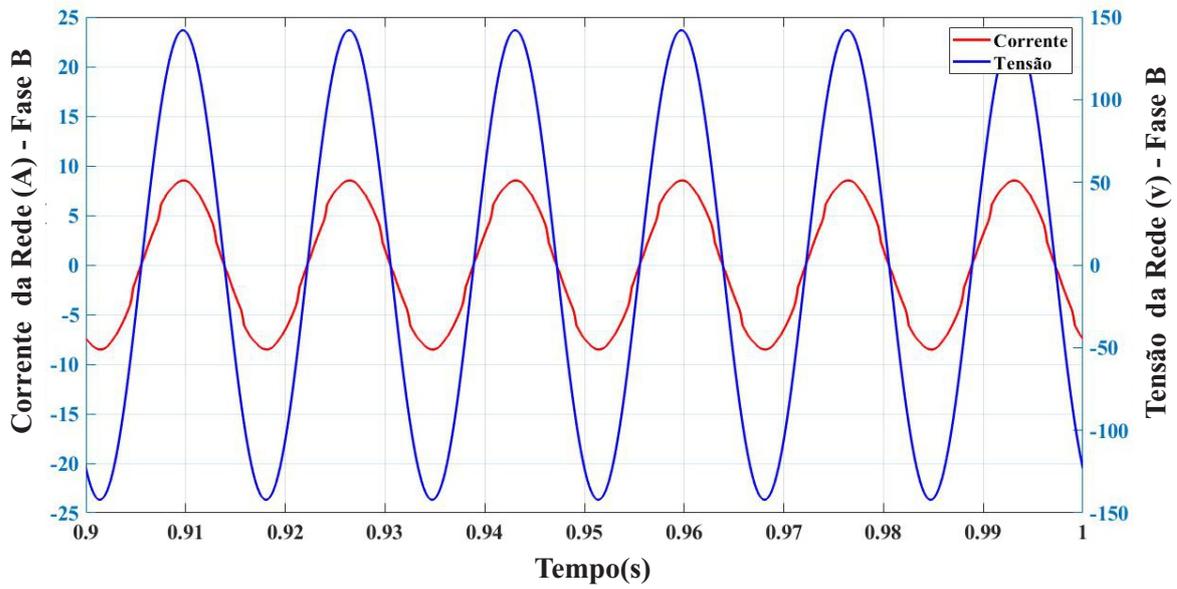
Fonte: Próprio Autor.

Figura 34 – Resultado Simulink método DPT - Tensão e corrente da rede fase A.



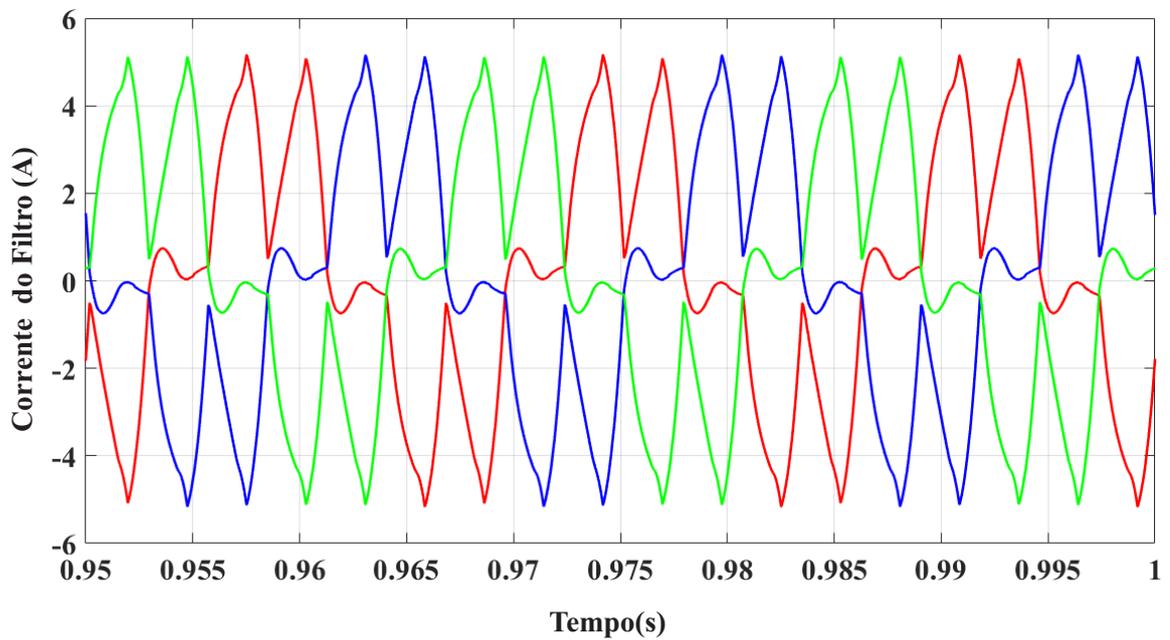
Fonte: Próprio Autor.

Figura 35 – Resultado Simulink método DPT - Tensão e corrente da rede fase B.



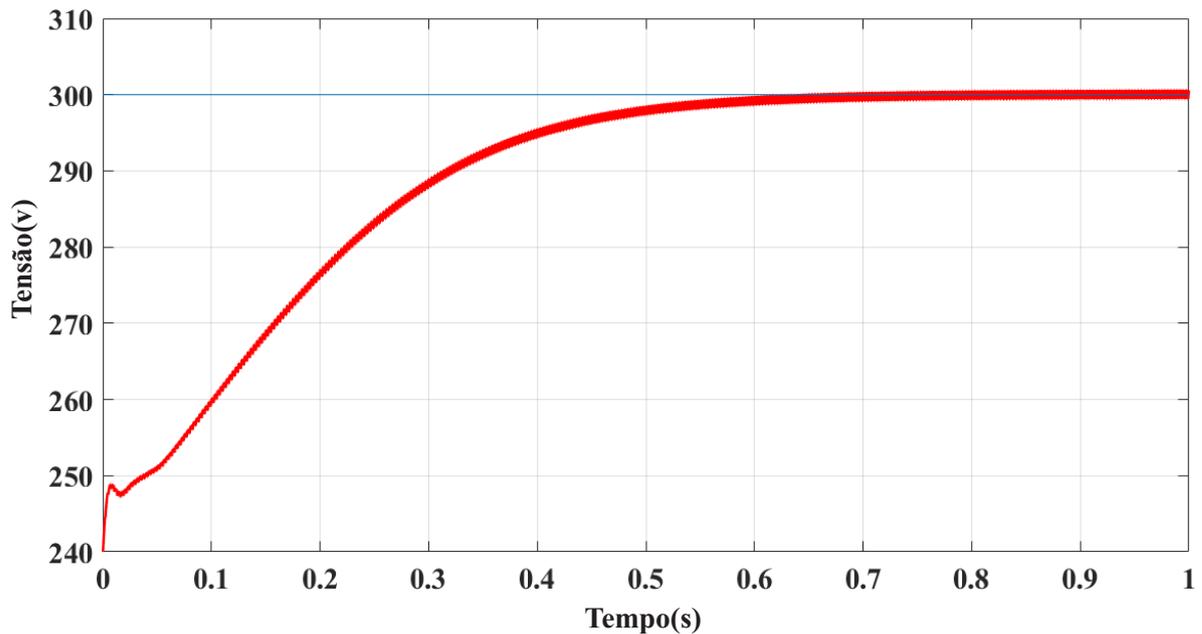
Fonte: Próprio Autor.

Figura 36 – Resultado Simulink método DPT - Corrente do filtro.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 37 – Resultado Simulink método DPT - Tensão barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

Portanto, as diferentes técnicas aplicadas para os cálculos de discretização dos preditores obtiveram sucesso em suas aplicações visto que todos os métodos alcançaram o objetivo principal apresentado pelo controle preditivo do filtro que é da redução das componentes harmônicas presentes na corrente da rede elétrica. Além disso, vale ressaltar que em todos os métodos não só o controle exercido melhorou o fator de potência do circuito como também a tensão de barramento CC seguiu a sua referência de forma satisfatória.

4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção serão apresentados os resultados de desempenho para cada método de discretização utilizados nesta pesquisa. Foram aplicadas algumas figuras de mérito, já citadas anteriormente, para avaliar o comportamento desses métodos.

4.4.1 Método de Euler Regressivo

Para o método de Euler Regressivo, a primeira figura de mérito aplicada foi o teste de dinâmica da tensão do barramento CC. Para tanto, a referência de tensão é alterada em um determinado instante de regime permanente. Neste caso, a alteração foi de 300 V para 290 V, no instante de 1s.

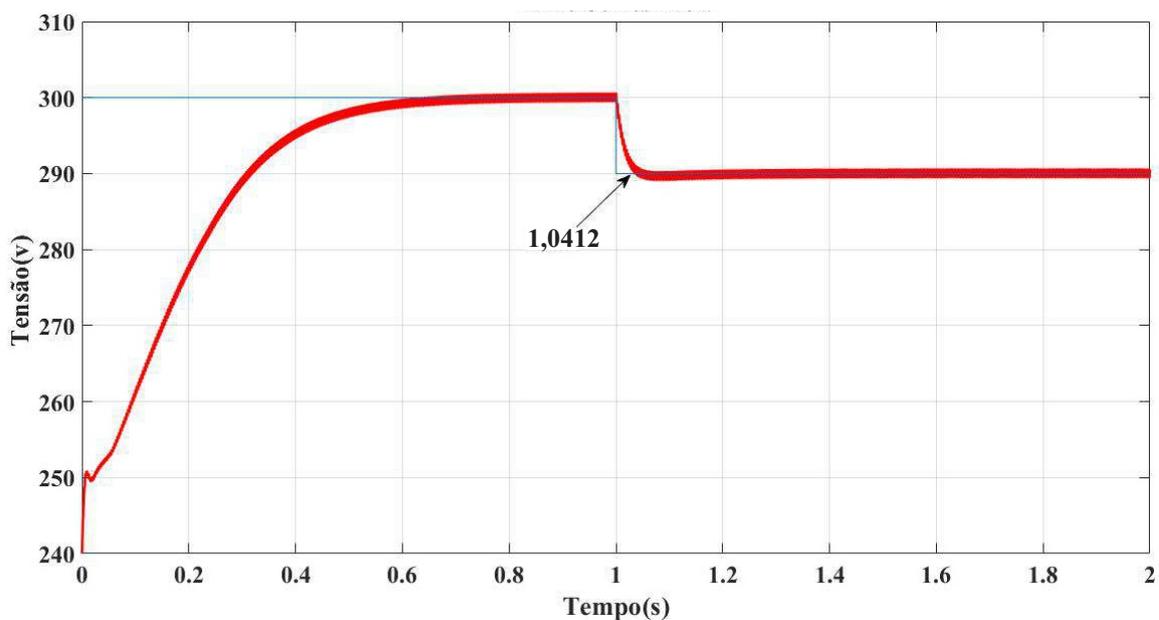
Além disso, ainda no controle do barramento CC, foi analisado também o tempo de assentamento, ou seja, o tempo que levou para a tensão estabelecer o seu valor em regime permanente. A Figura 38 ilustra essa alteração. Observa-se que por volta de 1,041 s a tensão atinge o seu valor que é de 290,2 V.

Outro ponto observado foi o comportamento da função custo, ou seja, analisou-se a diferença entre a corrente de referência da rede e a corrente medida. A Figura 39 ilustra o comportamento desta função. Nota-se que o erro está entre 0,5 e 0,7, uma margem de erro de 0,2 em valor absoluto. Pode-se visualizar melhor essa situação na Figura 40.

Utilizando o comando tic toc do Simulink foi medido o tempo de simulação para cada método aplicado. Vale ressaltar que o tempo de simulação depende bastante da velocidade de processamento computacional, podendo ser variável de acordo com o computador utilizado. Para o método de Euler o tempo de simulação foi de 1,12 s, obtendo um dos melhores resultados entre as que forma testadas.

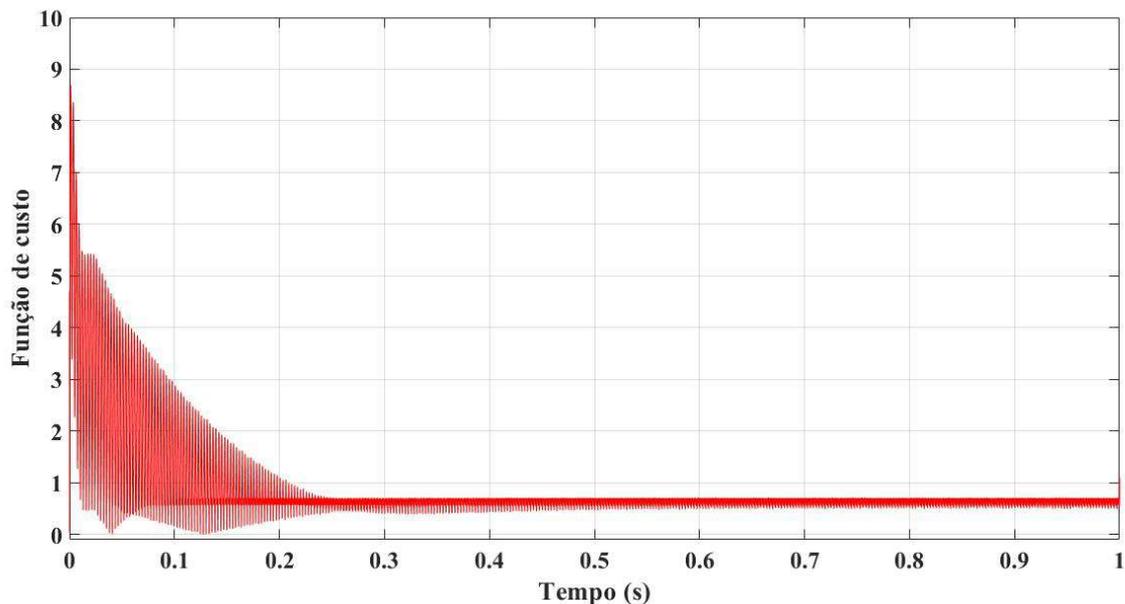
Por fim, foi medida a taxa de distorção harmônica total da rede (THD). Para a corrente da rede a THD média foi de 2,90%, garantindo bons índices de qualidade de energia, conforme ilustra a Figura 41.

Figura 38 – Tempo de assentamento método Euler Regressivo.



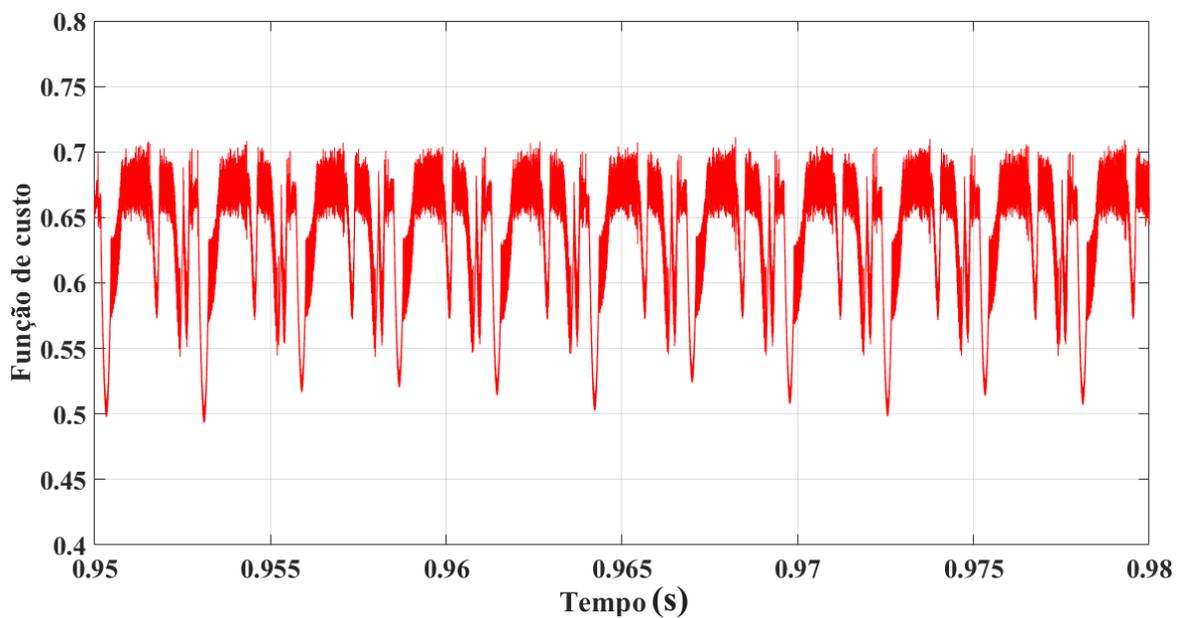
Fonte: Próprio Autor.

Figura 39 – Função custo método Euler Regressivo.



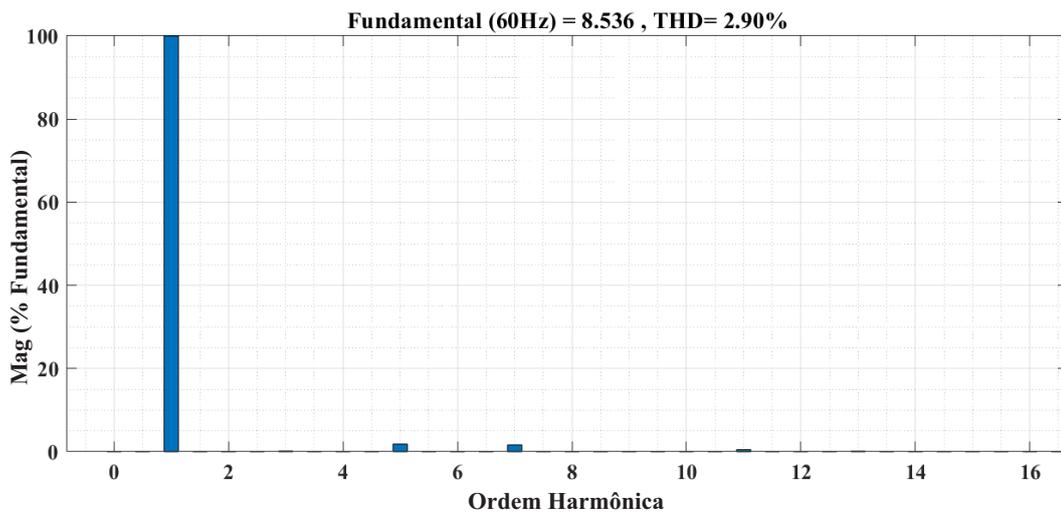
Fonte: Próprio Autor.

Figura 40 – Função custo aproximada método Euler Regressivo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 41 – THD método Euler Regressivo.



Fonte: Próprio Autor.

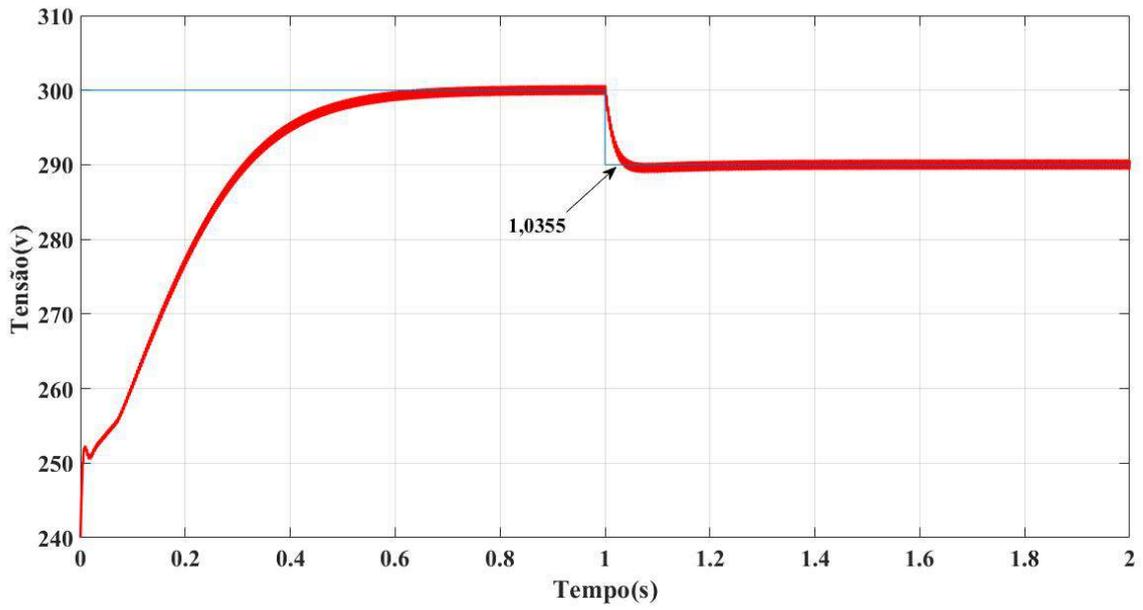
4.4.2 Método Trapezoidal

Para o método Trapezoidal, o controle do barramento também CC foi monitorado. Nota-se que a tensão de barramento CC seguiu a mudança da tensão de referência de 300 V para 290 V. Na figura 42 é ilustrado o tempo de assentamento, em torno de 1,035 s.

A função custo é ilustrada na Figura 43, na qual observa-se que a diferença entre a corrente de referência e a corrente medida é aproximadamente 0,06, conforme ilustra a Figura 44, representando um erro menor se comparado ao método de Euler.

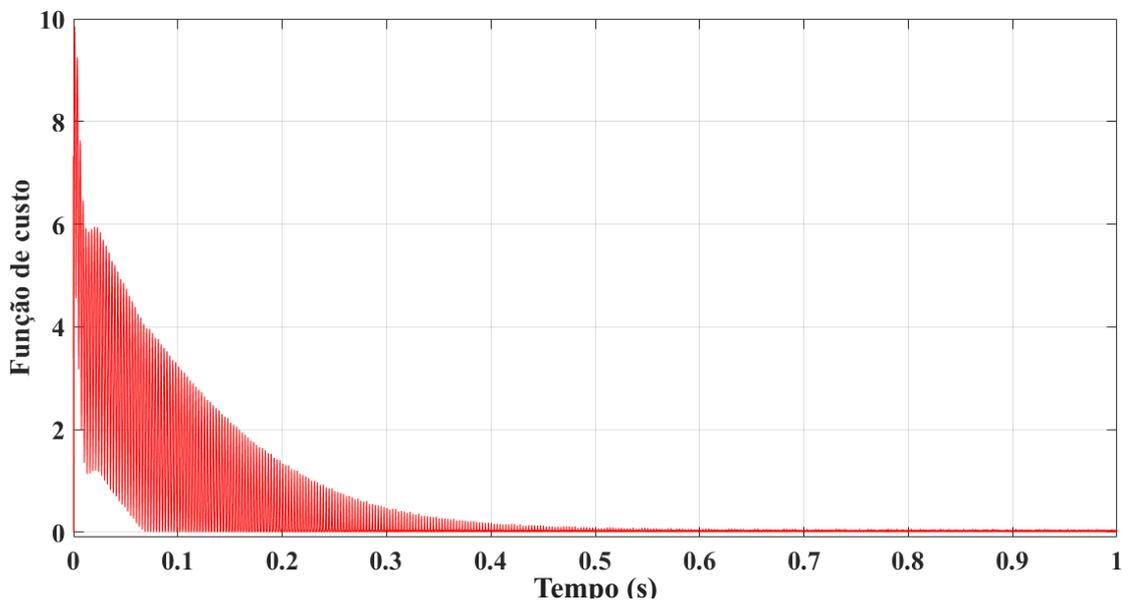
Para o tempo de simulação o resultado foi de 1,423 s. O valor da THD média da corrente da rede, como mostra a Figura 45, foi de 0,54%, o que demonstra o bom desempenho da aplicação deste método no que se refere a mitigação de componentes harmônicas no sistema.

Figura 42 – Tempo de assentamento método Trapezoidal.



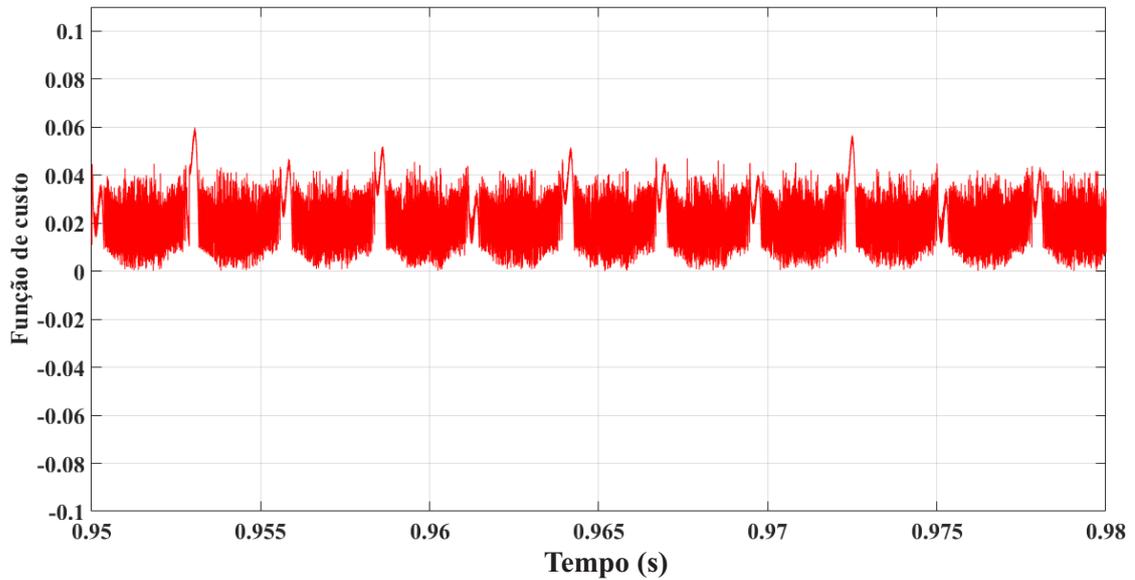
Fonte: Próprio Autor.

Figura 43 – Função custo método Trapezoidal.



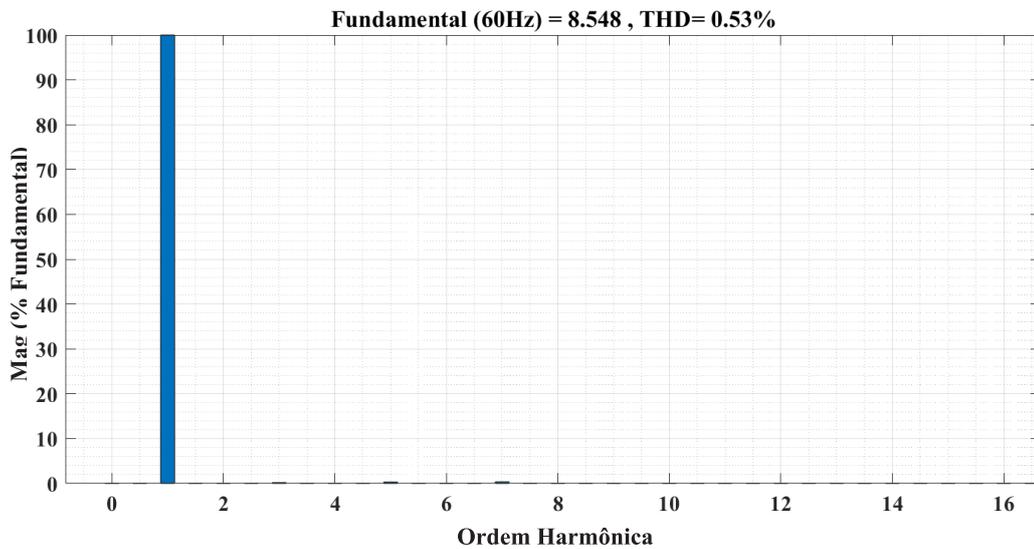
Fonte: Próprio Autor.

Figura 44 – Função custo aproximada método Trapezoidal.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 45 – THD método Trapezoidal.



Fonte: Próprio Autor.

4.4.3 Método Forma Centrada

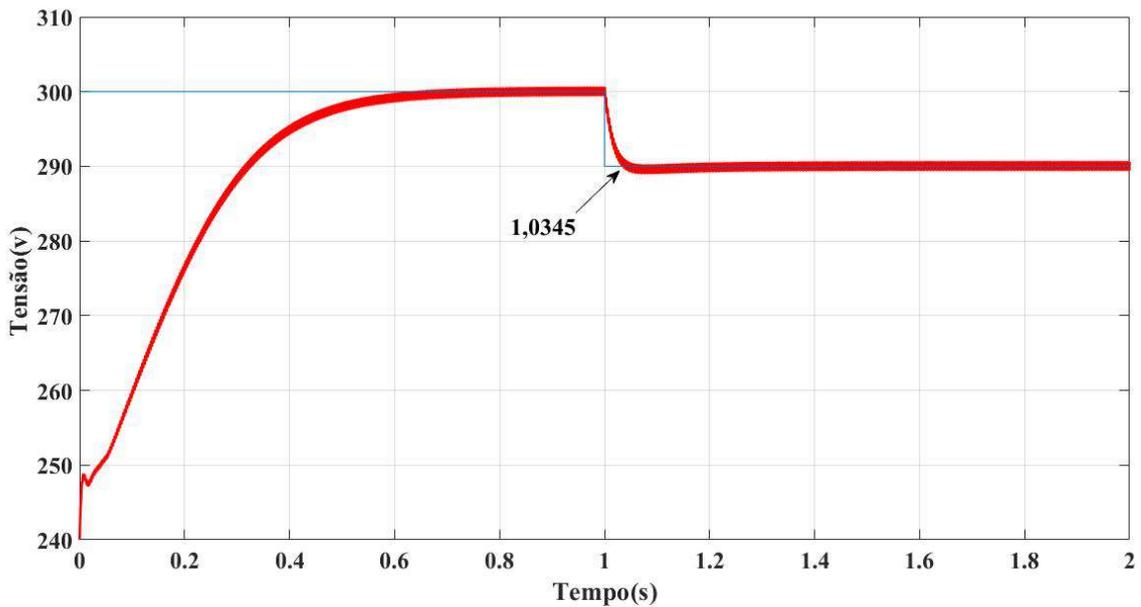
Na Forma Centrada, a tensão do barramento CC também seguiu a mudança no seu valor de referência, passando de 300 V para 290 V. Em relação ao tempo de assentamento, a Figura 46 ilustra o tempo utilizado para que a tensão atinja o seu valor em regime permanente, aproximadamente 1,034 s.

A função custo é ilustrada na Figura 47, e nota-se que o erro entre as correntes de referência e a medida está em torno de 1,4 e 1,15 sendo ilustrado na Figura 48. Já o tempo total

de simulação foi de 1,412 s demonstrando um tempo maior de processamento do algoritmo se comparado ao método de Euler.

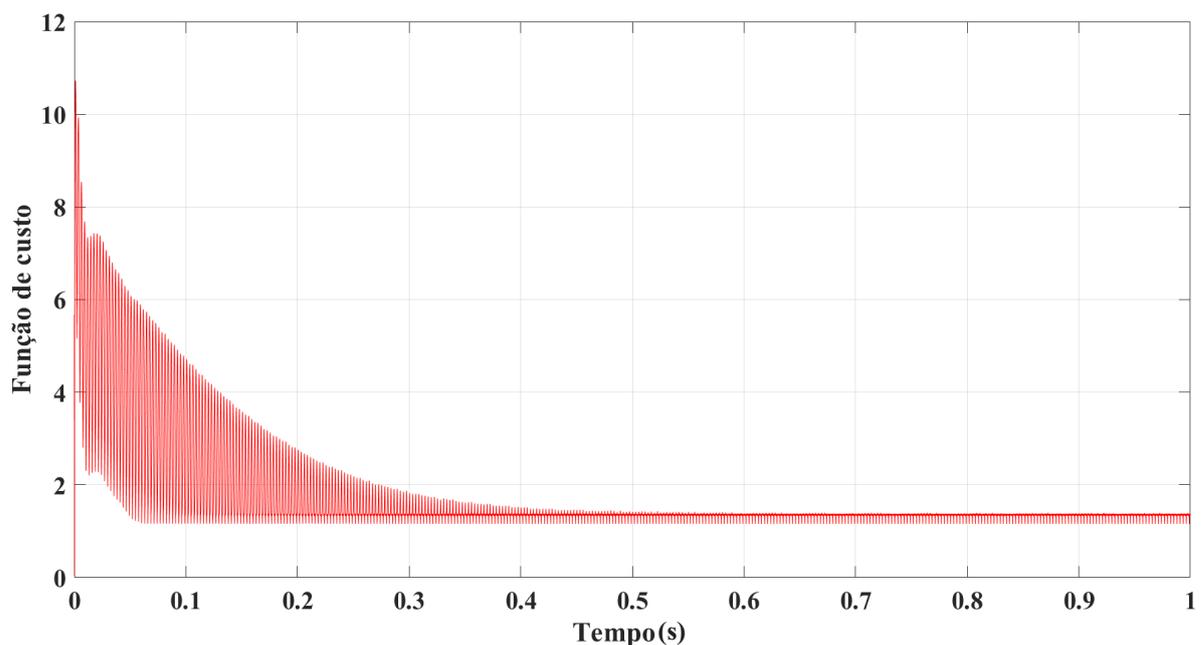
Por fim, o nível de THD médio da corrente da rede foi de 3,36%, valor mais elevado quando comparado com os métodos anteriores, no entanto, ainda sim é considerado adequado, conforme mostra a Figura 49.

Figura 46 – Tempo de assentamento método Forma Centrada.



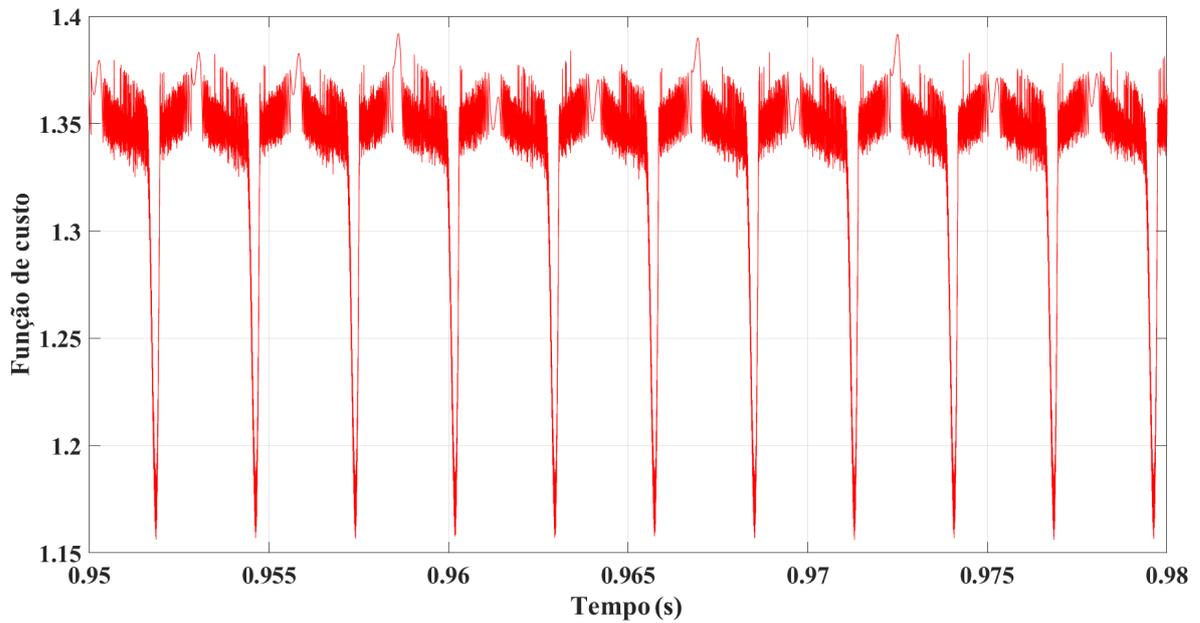
Fonte: Próprio Autor.

Figura 47 – Função custo método Forma Centrada.



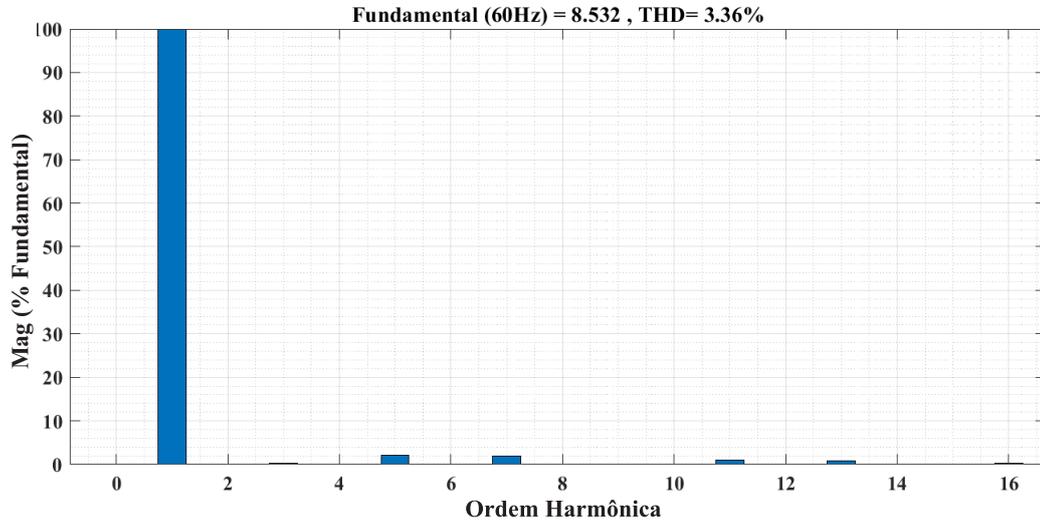
Fonte: Próprio Autor.

Figura 48 – Função custo aproximada método Forma Centrada.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 49 – THD método Forma Centrada.



Fonte: Próprio Autor.

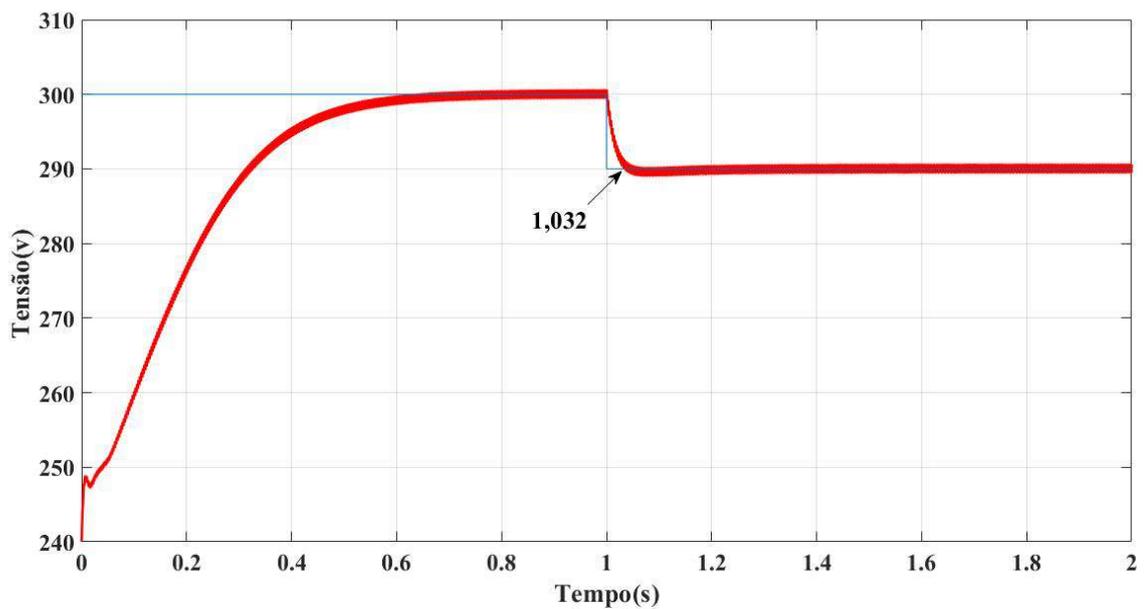
4.4.4 Método DPT

Para o método DPT, a Figura 50 ilustra o comportamento da tensão do barramento CC em relação a mudança do seu valor de referência. É perceptível que a mesma segue a alteração de 300 V para 290 V quando o tempo atinge 1 s. A Figura 50 demonstra também o tempo de assentamento necessário para que a tensão se estabeleça dentro dos valores de regime permanente, que é de 1,032 s.

O comportamento da função custo é representado na Figura 51 e o seu valor varia, aproximadamente, de 1,35 a 1, conforme ilustra a Figura 52.

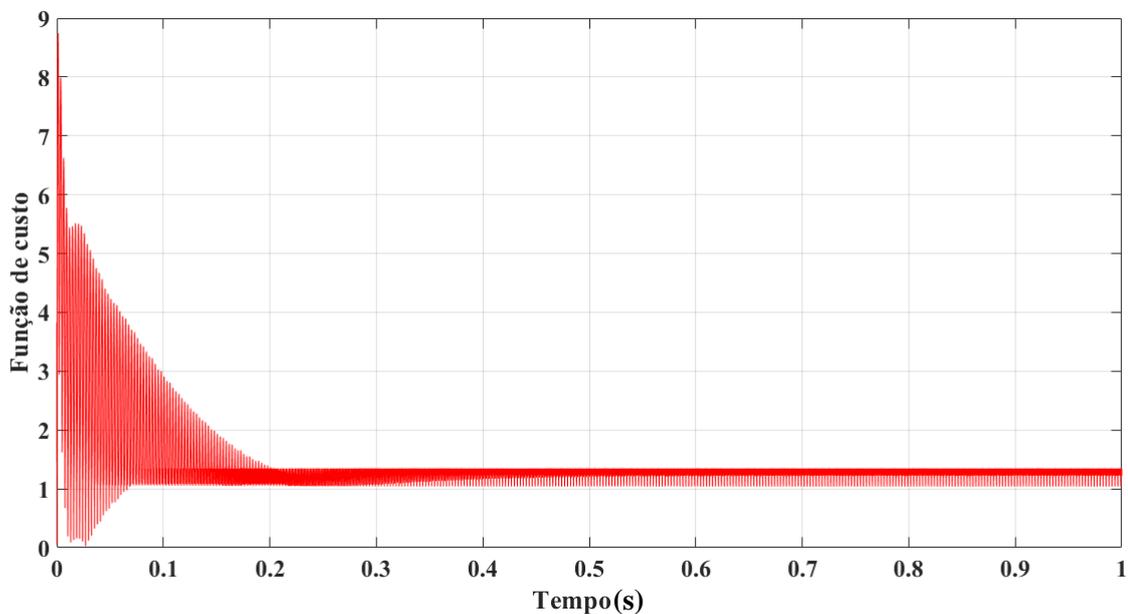
Em relação ao tempo de processamento de simulação, foram necessários 1,475 s para o Simulink compilar a programação, o que demonstra um esforço computacional maior na aplicação deste método. Já o nível de THD médio da corrente da rede foi de 3,40% sendo ilustrado na Figura 53.

Figura 50 – Tempo de assentamento método DPT.



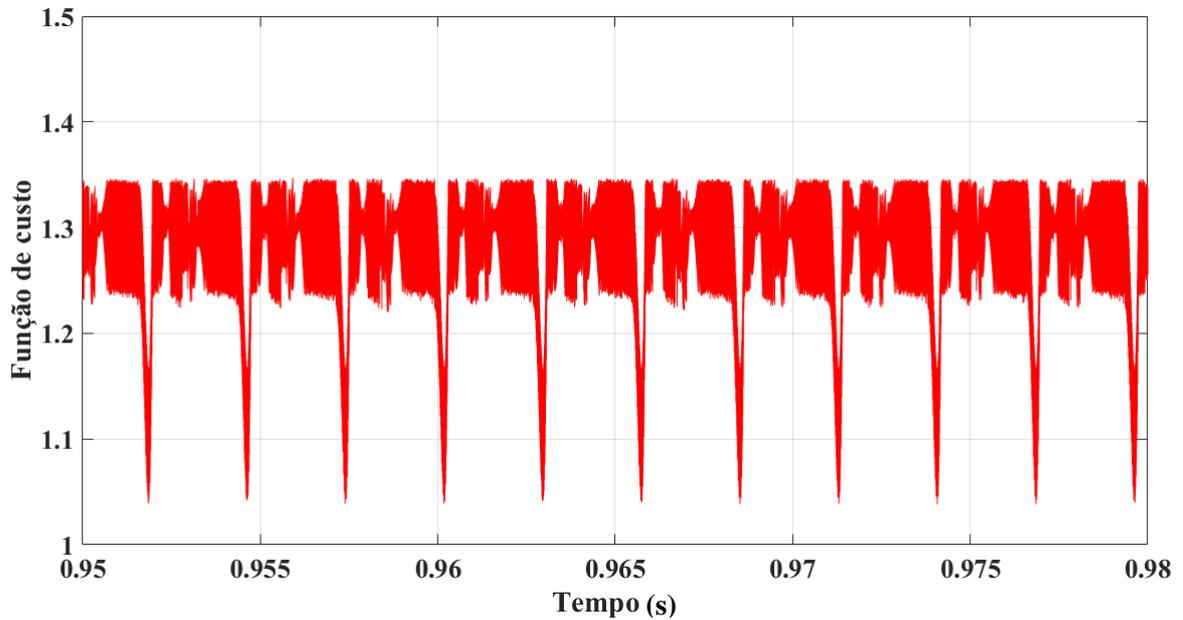
Fonte: Próprio Autor.

Figura 51 – Função custo método DPT.



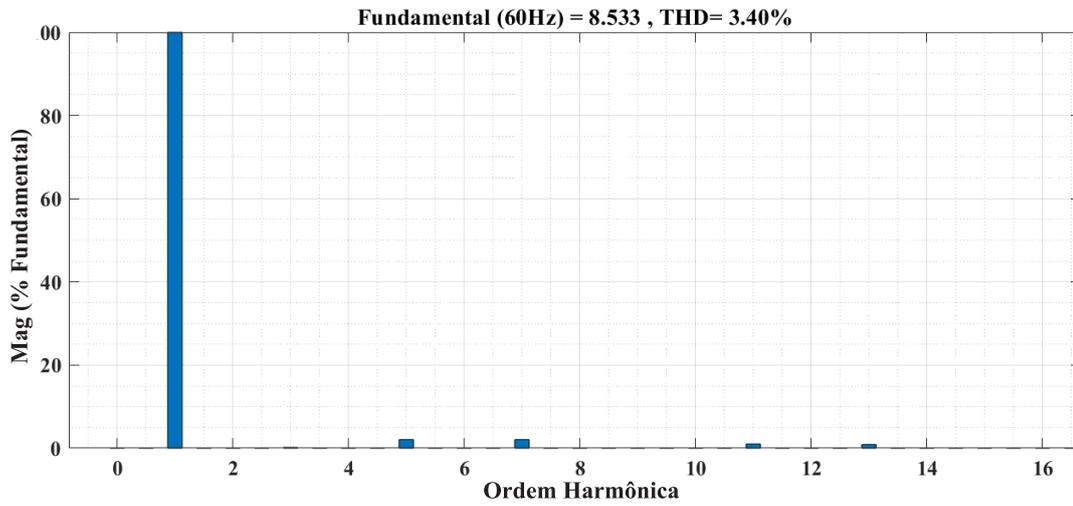
Fonte: Próprio Autor.

Figura 52 – Função custo aproximada método DPT.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 53 – THD método DPT.



Fonte: Próprio Autor.

Para uma melhor visualização dos resultados, algumas figuras de mérito foram inseridas na Tabela 2 com o intuito de comparar os resultados de cada técnica de cálculo de preditores aplicados.

Tabela 2 – Resultados Figuras de Mérito.

Método de discretização	THD	Tempo de assentamento(s)	Tempo de simulação(s)
Euler	2,90%	1,041	1,286
Trapezoidal	0,54%	1,035	1,423
Forma centrada	3,36%	1,034	1,412
DPT	3,40%	1,032	1,475

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Tabela 2, o menor valor de THD foi gerado com a aplicação do método Trapezoidal, reduzindo consideravelmente os níveis de distorções harmônicas presente na rede elétrica se comparado com os demais métodos, com um valor resultante de 0,54%. Em contrapartida, os métodos da Forma Centrada e DPT apresentaram os maiores valores de THD, estando bem próximos (3,36% e 3,40% respectivamente).

Para o tempo de assentamento foi considerado o momento que a curva de tensão atinge um valor de 290,2 V. Diante disso, nota-se que os valores apresentados na tabela estão bem próximos, principalmente quando aplicados os métodos Trapezoidal, Forma Centrada e DPT. Dessa forma, o comportamento de todos os métodos é semelhante e isso pode ser notado nas figuras apresentadas no desenvolvimento desta seção.

Além das figuras de méritos já citadas, outra característica analisada para cada método de cálculo dos preditores foi o tempo de simulação. Por meio do comando *tic toc* do Simulink/MATLAB foi realizado uma contagem de tempo para saber quantos segundos cada método necessita para realizar a simulação. No entanto, vale ressaltar que os valores obtidos na tabela não são fixos, pois o desenvolvimento de cada método varia bastante de acordo com a velocidade de processamento computacional de cada máquina. Diante disso, conforme os dados apresentados na Tabela 2, nota-se que o método de Euler Regressivo possui o melhor desempenho com um tempo de 1,286 s, estando à frente do método da Forma Centrada que ficou com o segundo melhor tempo de 1,412 s. No entanto, os métodos Trapezoidal e DPT ficaram com um desempenho bem semelhante ao da Forma Centrada com 1,423 s e 1,475 s, respectivamente. Isso demonstra que as técnicas de cálculo dos preditores utilizadas possuem um tempo de simulação aceitável.

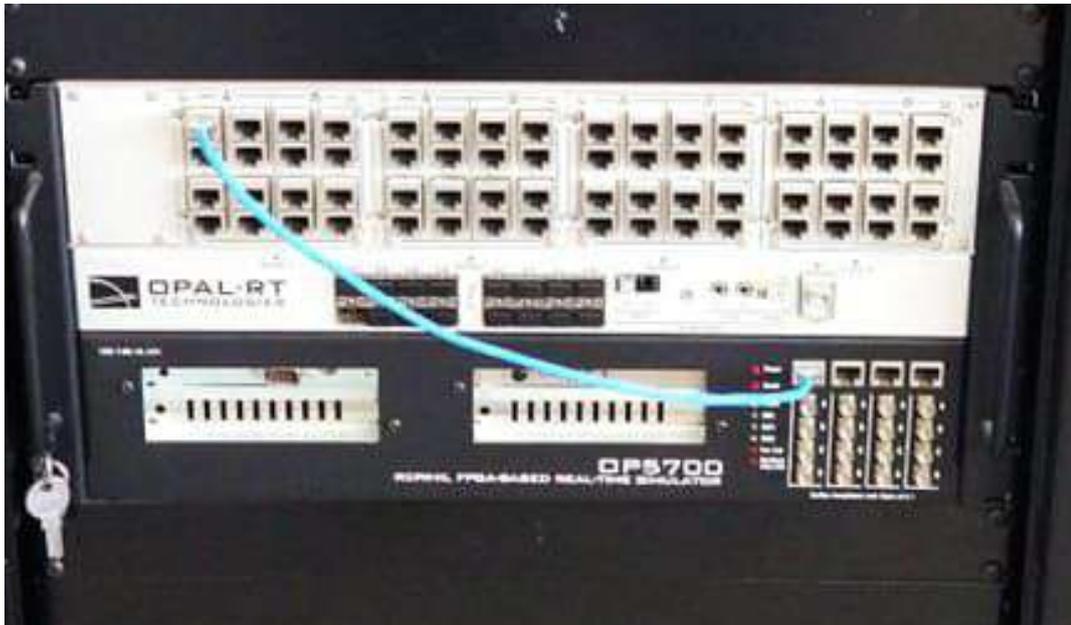
Por fim, foi realizado a comparação do comportamento da função custo para cada método. Nota-se por meio dos resultados que o método Trapezoidal apresenta o menor valor de erro, estando entre 0,4 a 0,2 enquanto que nos demais houve uma maior variação entre a corrente de referencia e a corrente da rede. Esse resultado reflete diretamente no níveis de THD da corrente da rede elétrica, uma vez que ao obter o menor erro, o controle atua na sua melhor forma.

4.5 RESULTADOS – SIMULADOR EM TEMPO REAL – OP5700

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando o simulador em tempo real OP5700. Esta ferramenta tem a função de realizar a compilação do modelo criado pelo usuário

e efetuar o carregamento do mesmo no simulador. Para realizar a simulação em tempo real utilizando o OP5700 é necessário que o *software* RT-LAB (também da OPAL-RT Technologies) esteja disponível na estação de trabalho a qual o simulador esteja interligado. A Figura 54 ilustra foto do equipamento.

Figura 54 – Foto do simulador em tempo real OP5700.



Fonte: Próprio Autor.

A metodologia aplicada para a validação desta pesquisa consiste na elaboração de modelos em ambiente Simulink/MATLAB e um posterior carregamento de dados no OP5700. Em seguida realizar a coleta de dados de todas as variáveis a serem observadas. Vale ressaltar que, para o simulador em tempo real, a escolha do tamanho do passo de cálculo das simulações foi de 20 μ s, tendo sido motivada por ser o menor valor possível que não produz *overruns* no simulador em tempo real. Estes dados, são posteriormente utilizados para elaborar todas as análises de comportamento do sistema, bem como, para confecção de gráficos e obtenção de conclusões pertinentes. Dessa forma, foram analisados os seguintes pontos:

- Corrente da rede;
- Corrente do filtro;
- Corrente da carga;
- Fator de potência;
- Tensão de barramento CC.

4.5.1 Método Euler Regressivo

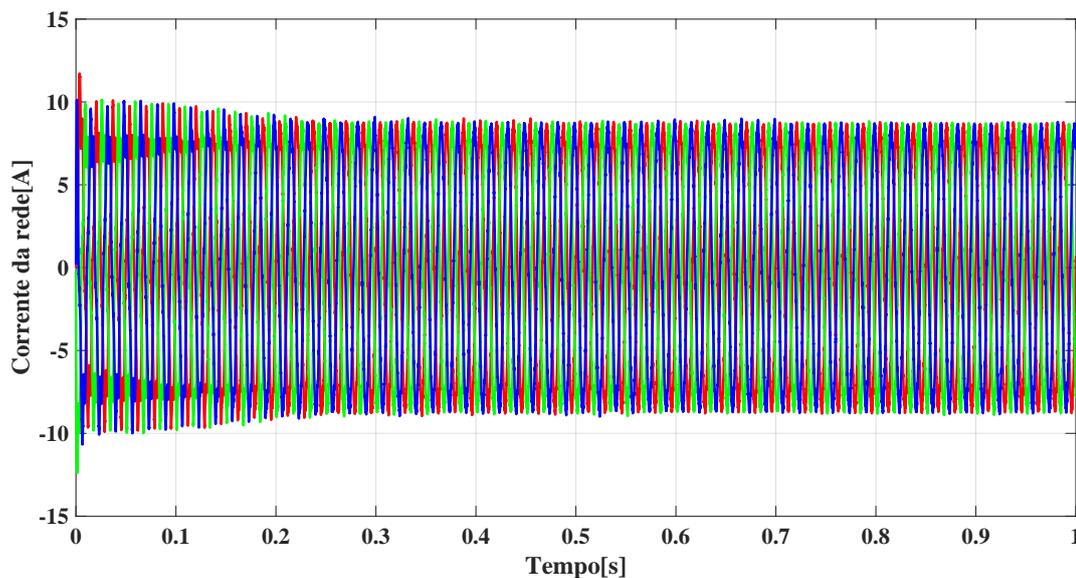
Para o método de Euler Regressivo, a corrente da rede gerada nas três fases é ilustrada na Figura 55. A forma de onda da rede é senoidal, no entanto, ainda se faz perceptível a presença de deformidades em suas curvas, conforme mostra a Figura 56. Observa-se, também, que o valor de amplitude é aproximadamente de 9 A.

A Figura 57 ilustra a corrente da carga que possui um valor de pico de aproximadamente 9 A, sendo claramente visíveis as distorções harmônicas típicas de cargas não lineares. A corrente injetada na rede gerada pelo filtro é representada na Figura 58.

As Figuras 59 e 60 ilustram as tensões e correntes para as fases A e B, sendo que ambas as correntes de fase estão alinhadas com as suas respectivas tensões, indicando a atuação do controle e correção do fator de potência.

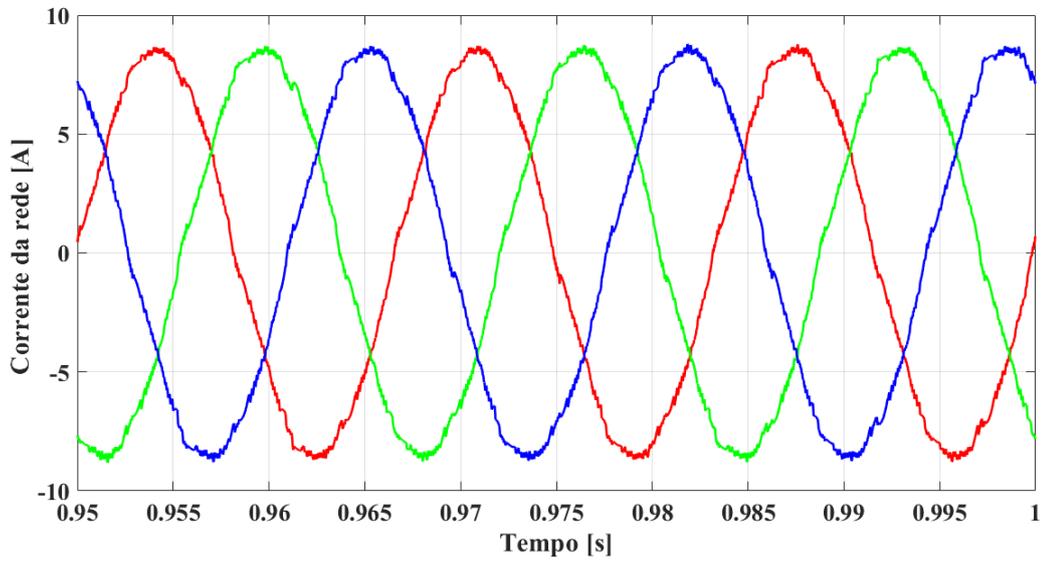
O controle do barramento CC foi monitorado e apresentado na Figura 61. Nota-se que a curva de tensão gerada pelo filtro segue a sua referência de 300V em aproximadamente 0,6 s, indicando que o controle foi exercido de forma satisfatória.

Figura 55 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente da rede.



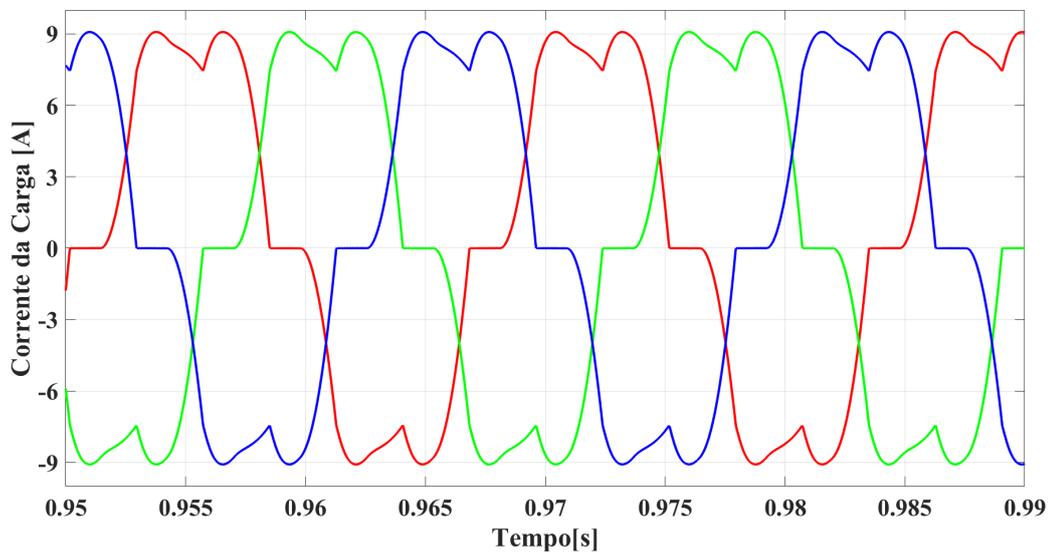
Fonte: Próprio Autor.

Figura 56 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente da rede em janela de tempo menor.



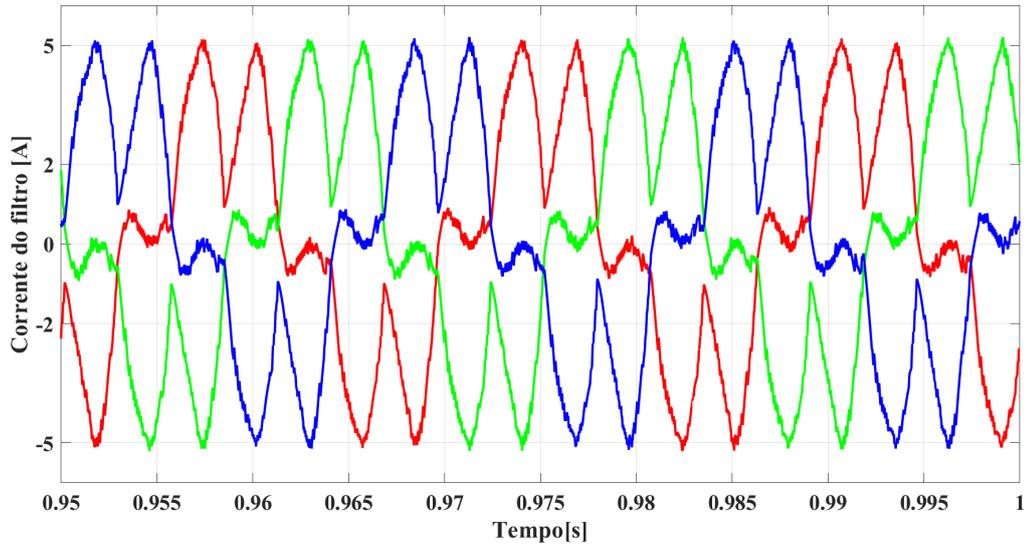
Fonte: Próprio Autor.

Figura 57 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente da carga.



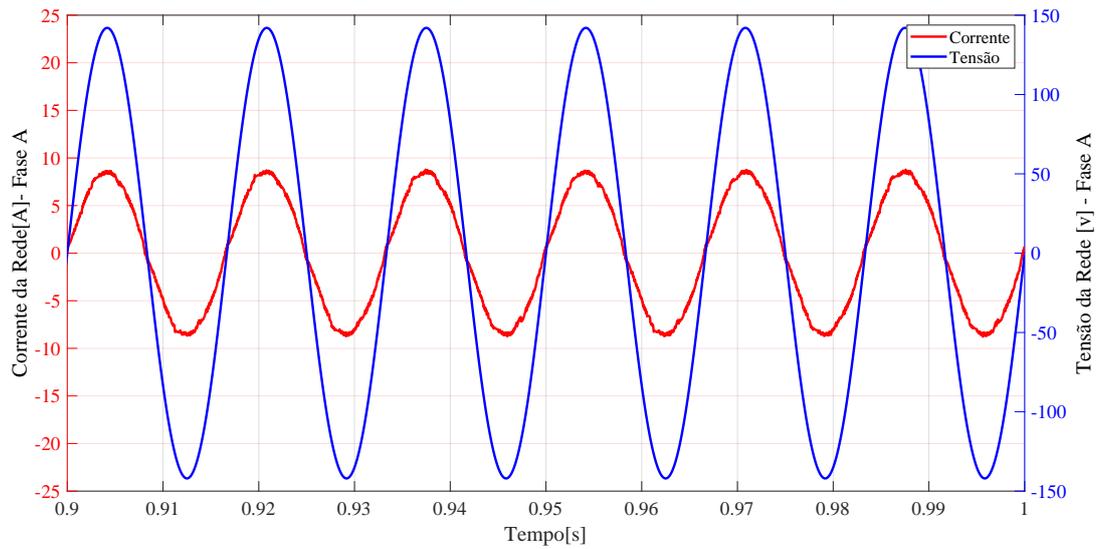
Fonte: Próprio Autor.

Figura 58 – Resultado de simulação OP5700- Método Euler Regressivo - Corrente do filtro.



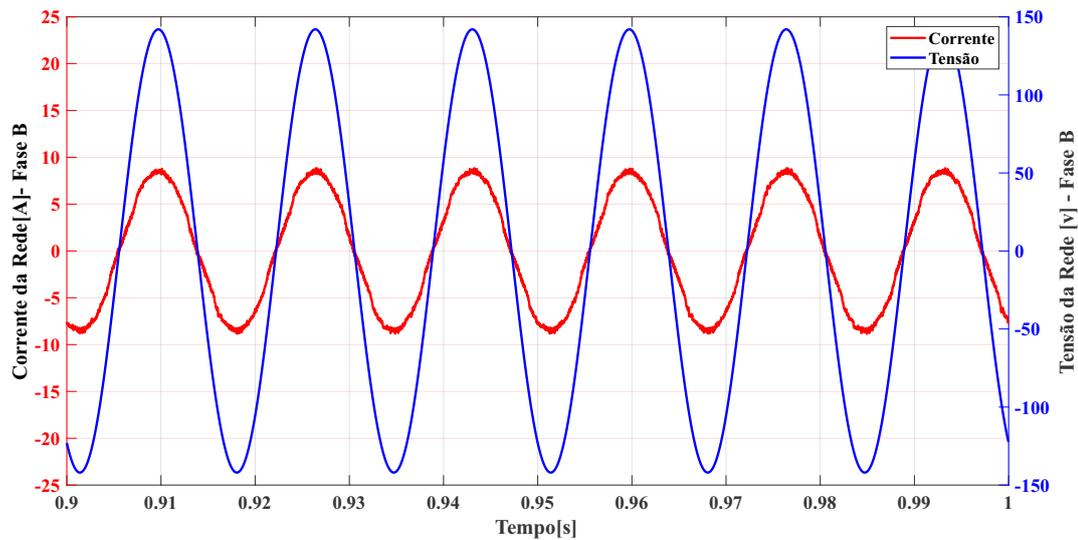
Fonte: Próprio Autor.

Figura 59 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente e tensão fase A.



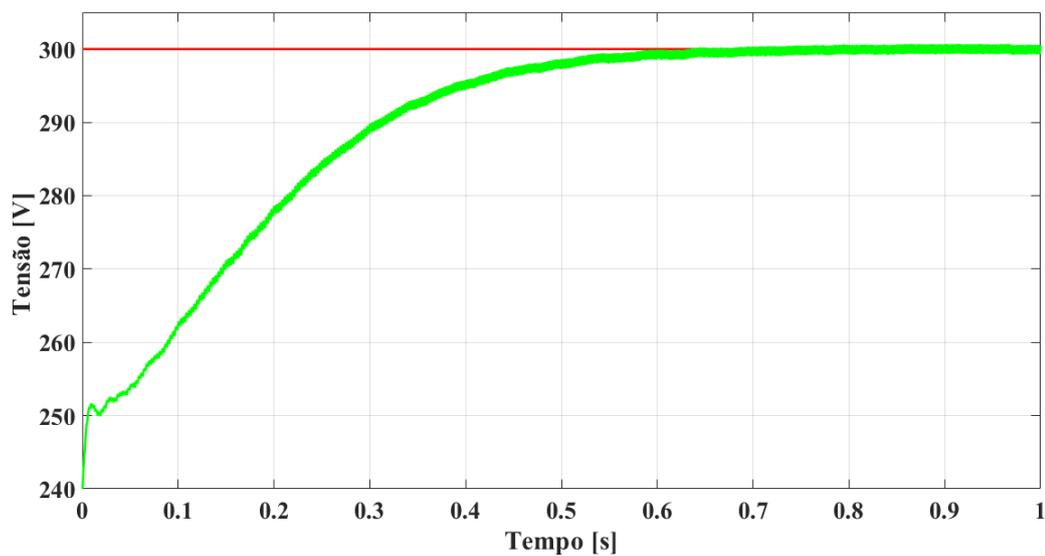
Fonte: Próprio Autor.

Figura 60 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Corrente e tensão fase B.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 61 – Resultado de simulação OP5700 - Método Euler Regressivo - Tensão Barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

4.5.2 Método Trapezoidal

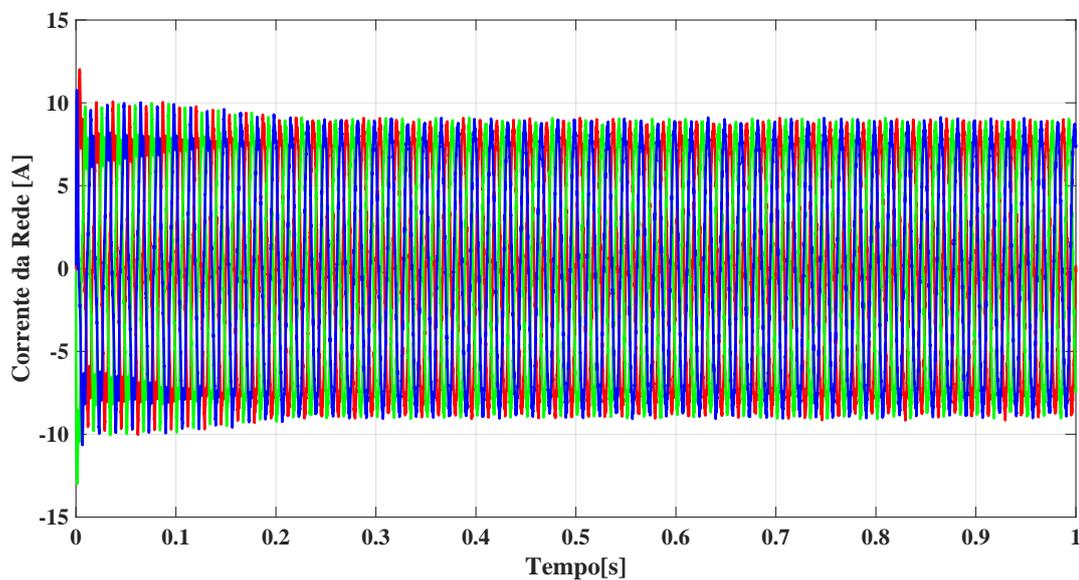
Para o método Trapezoidal, a corrente da rede gerada por meio do controle preditivo é ilustrada na Figura 62. É visível algumas imperfeições na sua forma, no entanto, ainda sim apresenta uma forma senoidal com valor de amplitude de aproximadamente 9 A, conforme ilustra a Figura 63.

A Figura 64 apresenta a forma de onda das corrente gerada pela carga não linear e a Figura 65 ilustra as corrente gerada pelo filtro ativo, que tem como objetivo reduzir as componentes harmônicas na rede, com amplitude em torno de 5A.

Além disso, outro ponto analisado foi o fator de potência da rede. As Figuras 66 e 67 ilustram o comportamento das tensões e correntes para as fases A e B. Nota-se que ambas as correntes estão alinhadas com as suas respectivas tensões.

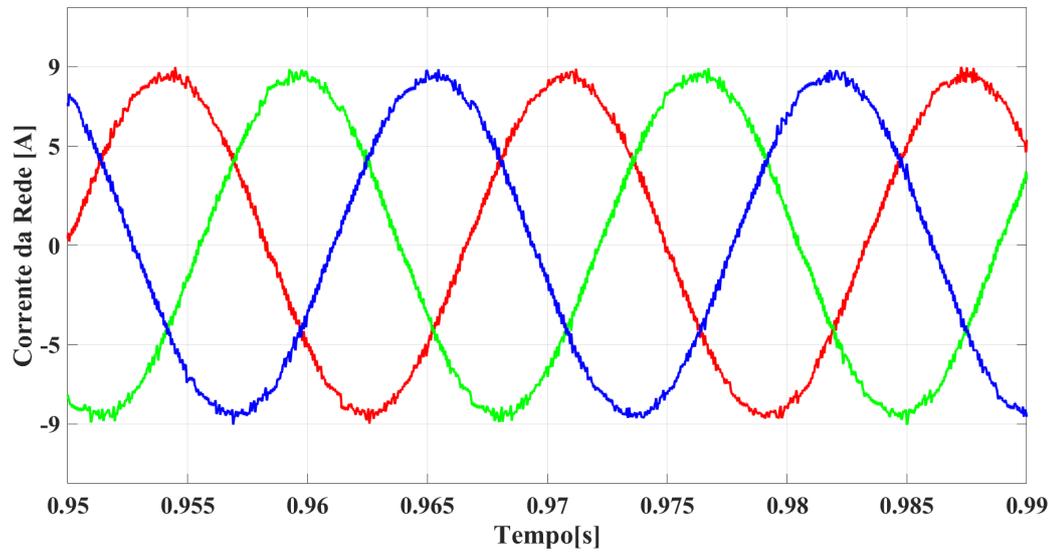
Por fim, o desempenho da tensão do barramento CC do filtro também é analisado e apresentado na Figura 68. Observa-se que o tempo de acomodação da tensão é em torno de 0,6 s quando a tensão segue a sua referência de 300 V.

Figura 62 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente da rede.



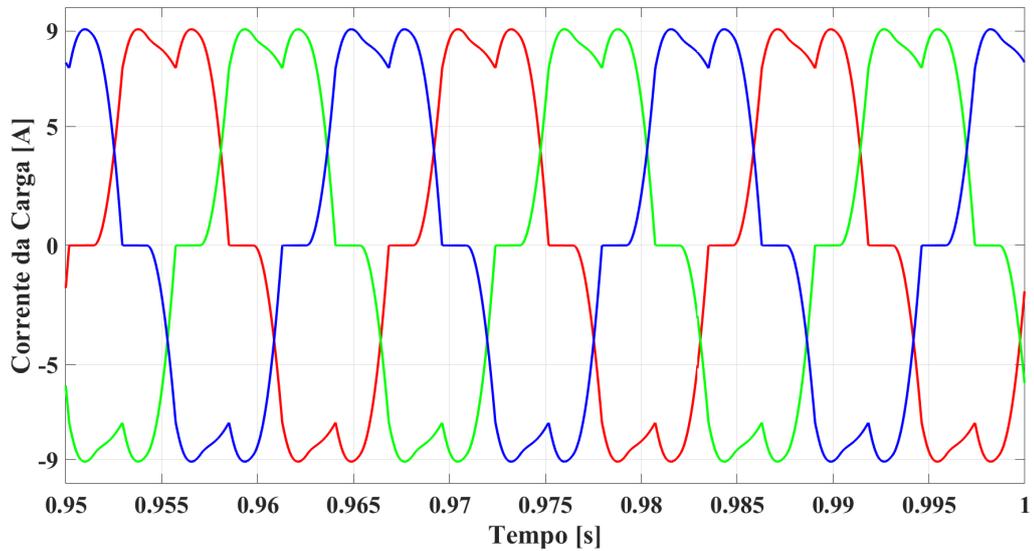
Fonte: Próprio Autor.

Figura 63 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente da rede em janela de tempo menor.



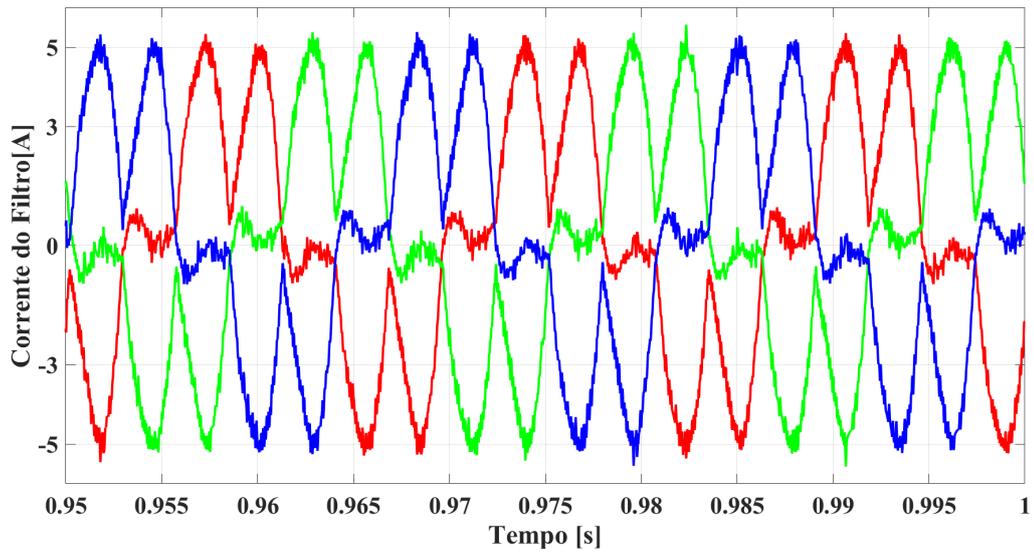
Fonte: Próprio Autor.

Figura 64 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente da carga.



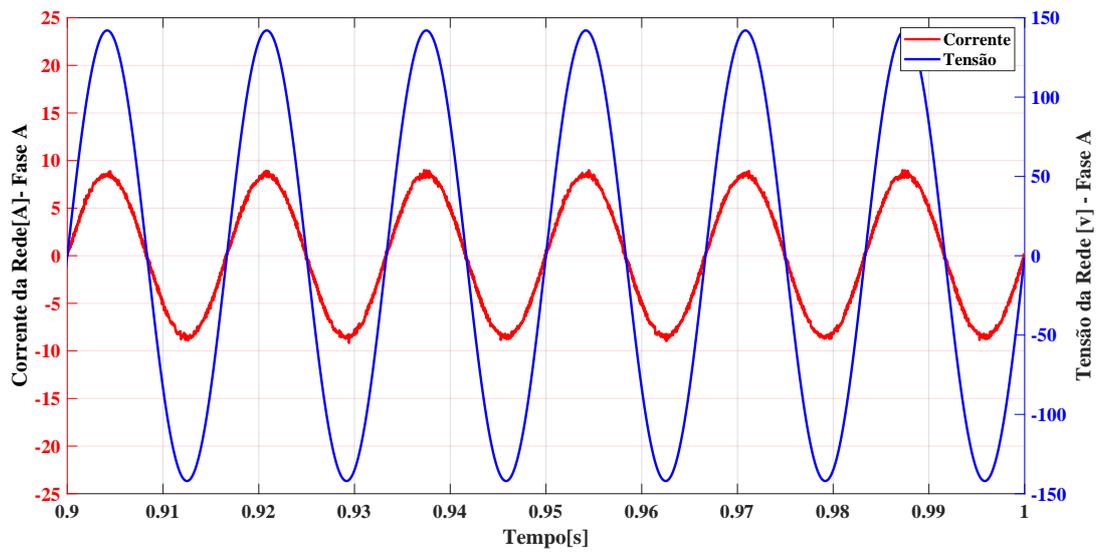
Fonte: Próprio Autor.

Figura 65 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente do filtro.



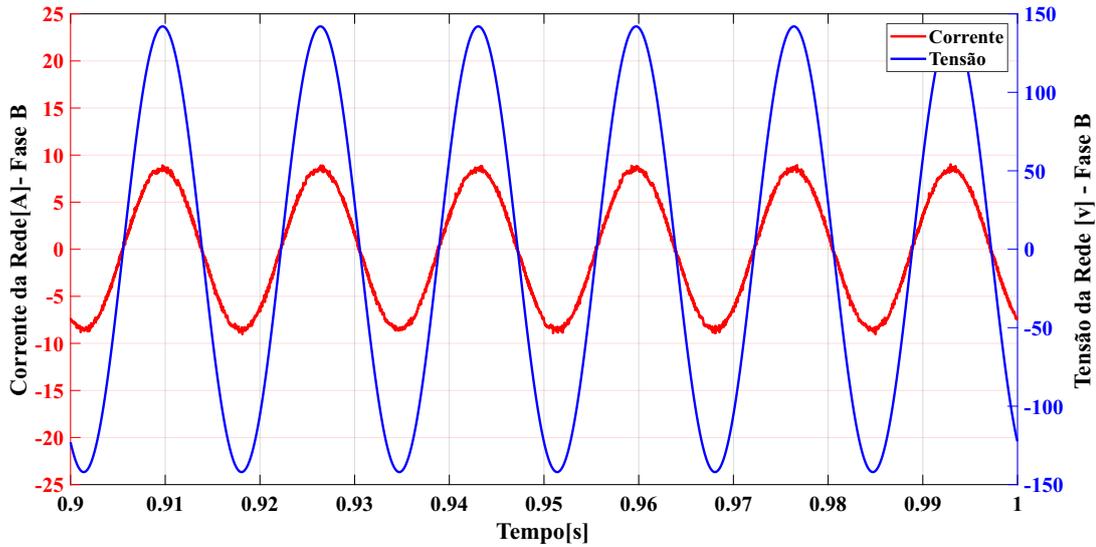
Fonte: Próprio Autor.

Figura 66 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente e tensão fase A.



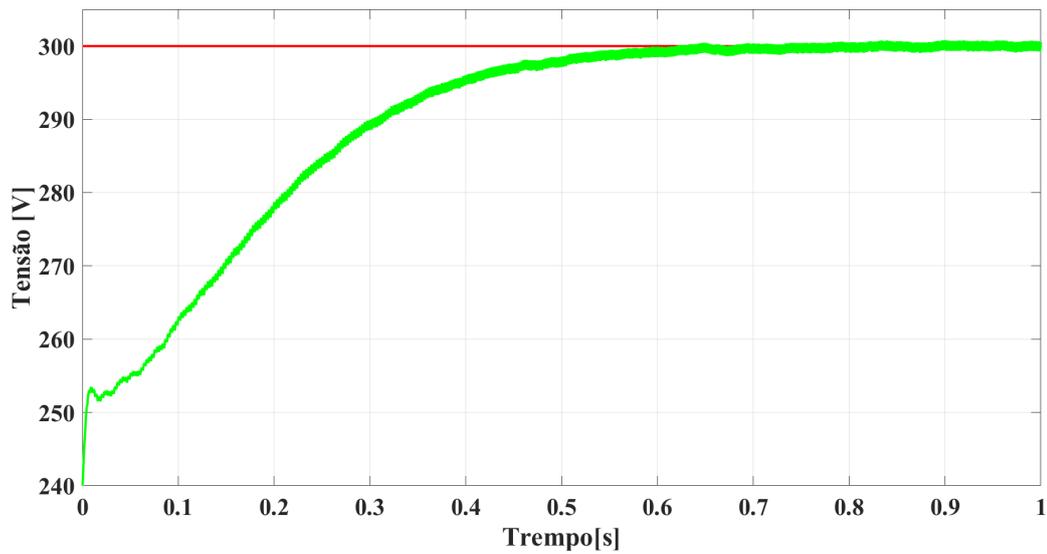
Fonte: Próprio Autor.

Figura 67 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Corrente e tensão fase B.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 68 – Resultado de simulação OP5700 - Método Trapezoidal - Tensão barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

4.5.3 Método Forma Centrada

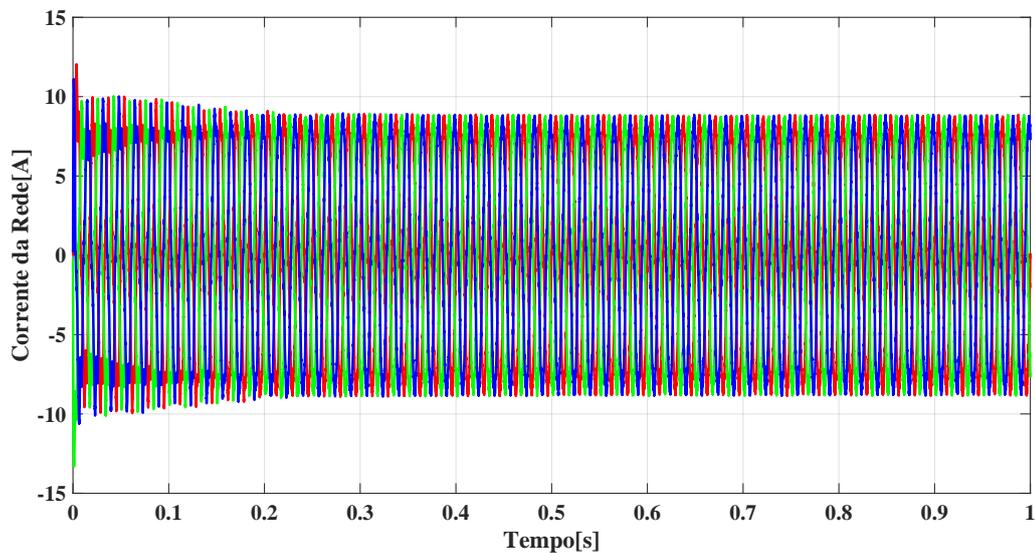
Para a Forma Centrada, o primeiro resultado analisado encontra-se na Figura 69 que ilustra a corrente da rede para as três fases. Observa-se que a onda tem a forma senoidal, no entanto é perceptível a presença de pequenos ruídos na corrente conforme ilustra a Figura 70. A corrente gerada na rede tem amplitude máxima de aproximadamente 8,8 A.

A corrente injetada pelo filtro e a corrente da carga não linear são representadas nas Figuras 71 e 72, com amplitudes máximas de aproximadamente 5,5 A e 9 A, respectivamente.

Outro ponto a ser analisado é o comportamento da tensão e da corrente das fases, com o intuito de observar o fator de potência visto que é necessário que as duas grandezas estejam alinhadas entre si. As Figuras 73 e 74 ilustram o comportamento dessas grandezas para a fase A e fase B, nota-se que ambas estão em fase, caracterizando um bom fator de potência.

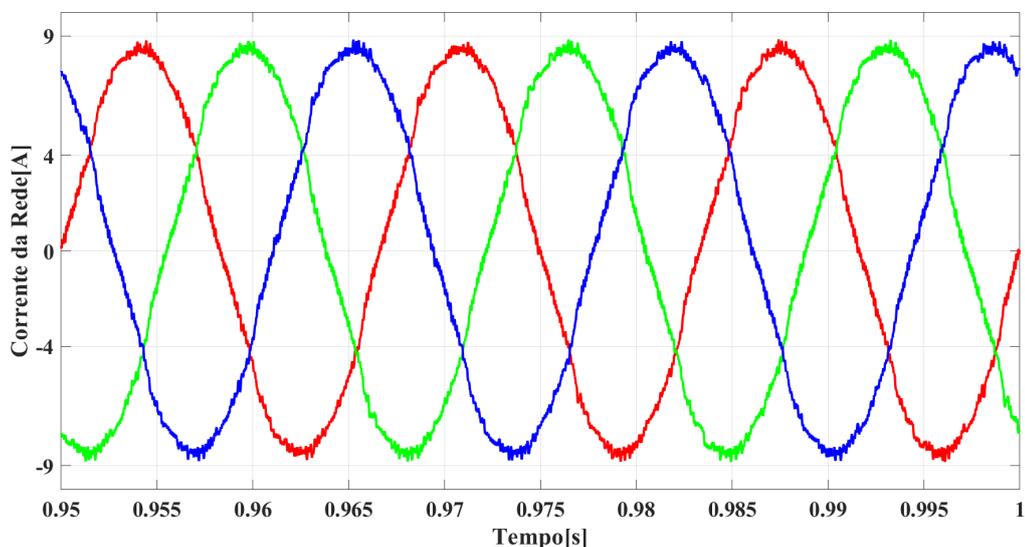
O controle do barramento CC é exercido com sucesso. Observa-se na Figura 75 que a tensão segue o seu valor de referência fixado em 300 V, caracterizando o funcionamento correto do controle. Assim como nos métodos anteriores o tempo de acomodação ficou em torno de 0,6 s.

Figura 69 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente da rede.



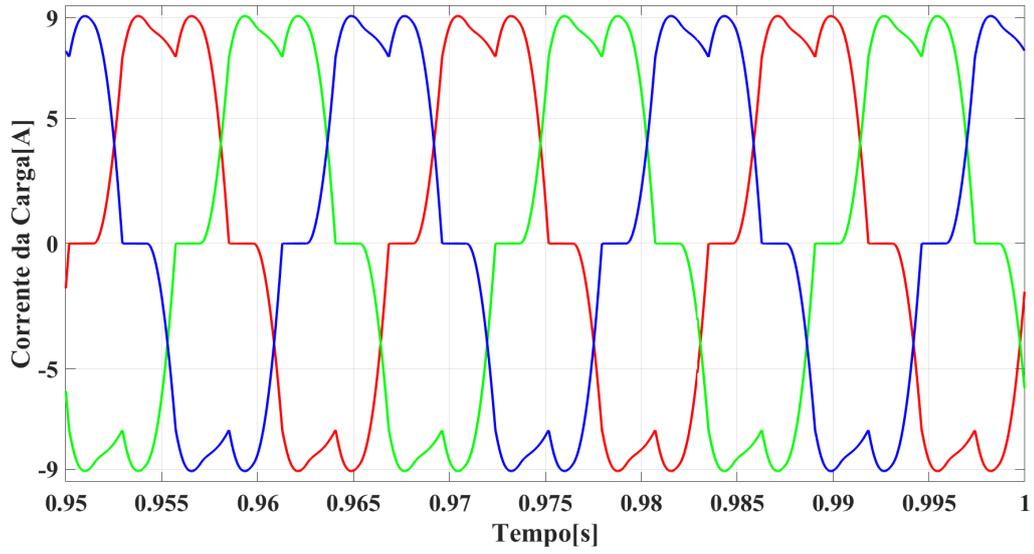
Fonte: Próprio Autor.

Figura 70 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente da rede em janela de tempo menor.



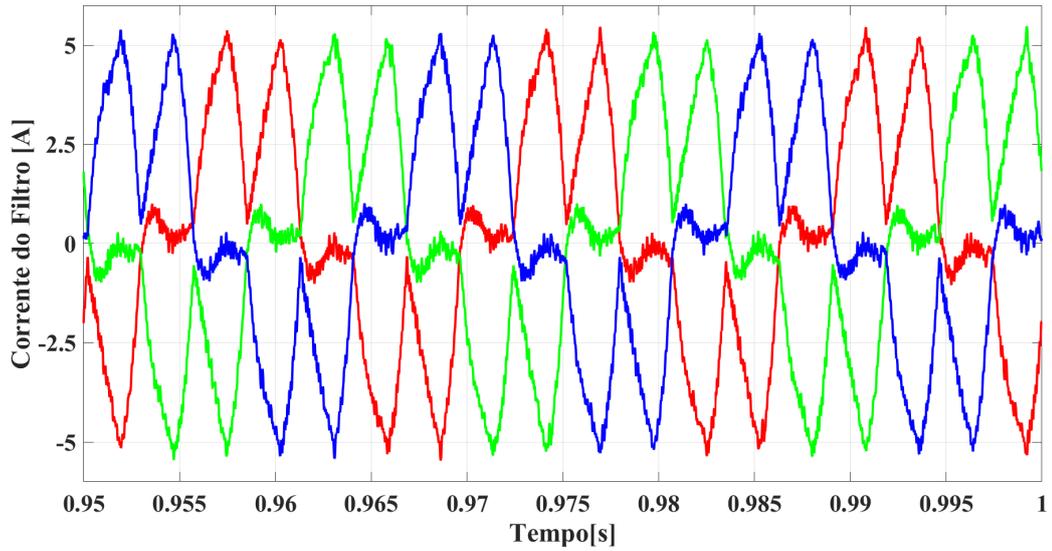
Fonte: Próprio Autor.

Figura 71 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente da carga.



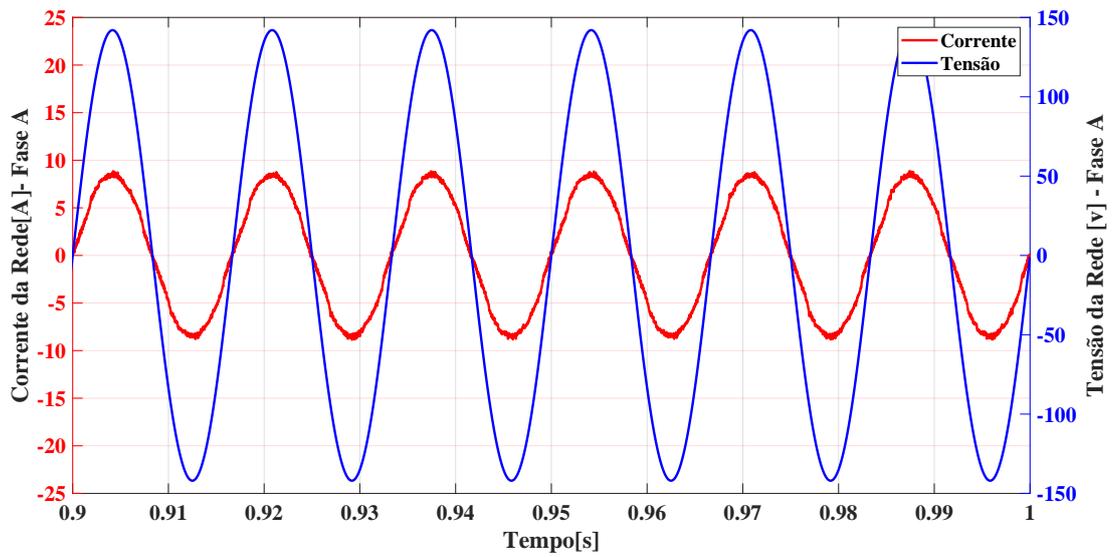
Fonte: Próprio Autor.

Figura 72 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente do filtro.



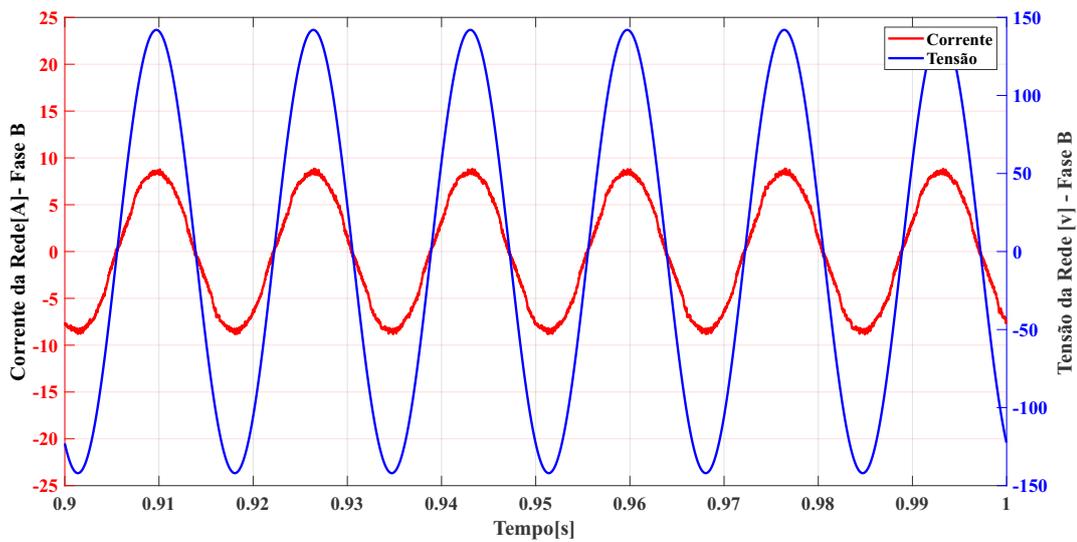
Fonte: Próprio Autor.

Figura 73 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente e tensão fase A.



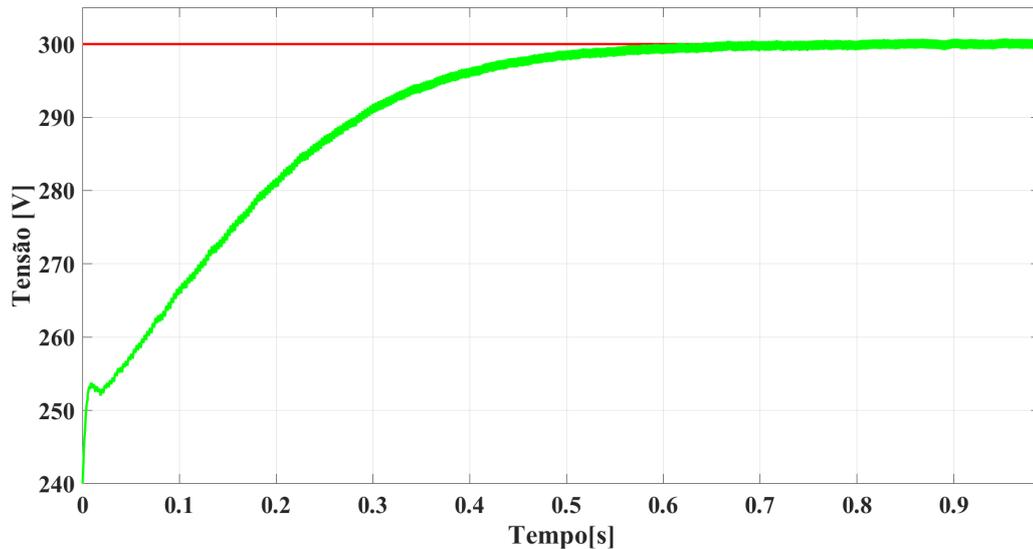
Fonte: Próprio Autor.

Figura 74 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Corrente e tensão fase B.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 75 – Resultado de simulação OP5700 - Método Forma Centrada - Tensão barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

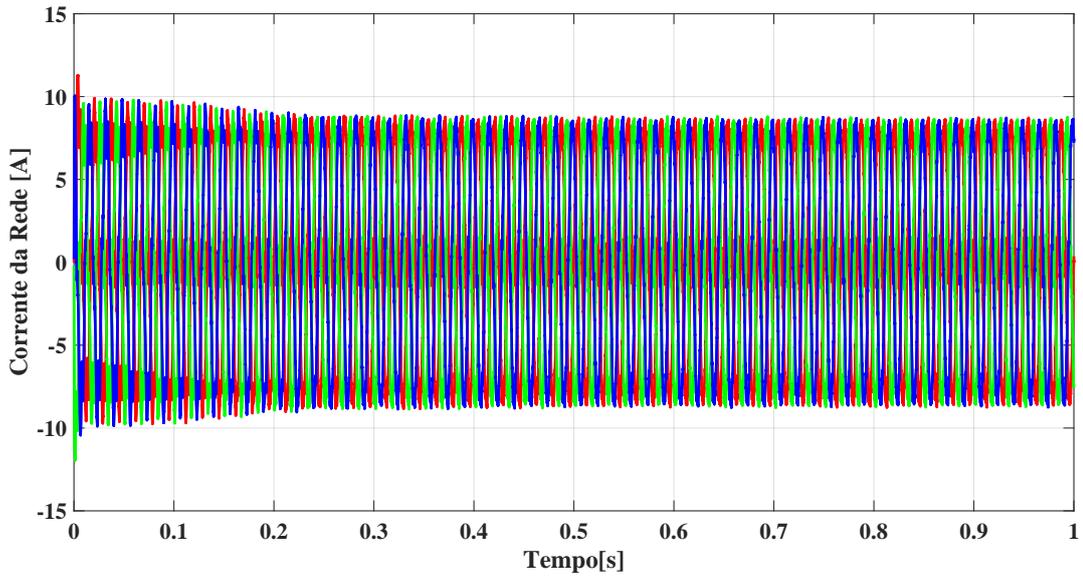
4.5.4 Método DPT

Para o método DPT, a corrente gerada na rede é representada na Figura 76, nota-se a sua forma senoidal com a presença de ruídos. O seu valor de amplitude máxima é de aproximadamente 8,7 A conforme ilustra a Figura 81.

A corrente do filtro e a corrente gerada pela carga são ilustradas, respectivamente, nas Figuras 78 e 79. A corrente do filtro tem como amplitude um valor aproximado de 5 A e a corrente da carga, assim como os exemplos anteriores, tem valor de pico de aproximadamente 9 A. As Figuras 80 e 81 mostram a atuação do controle na correção do fator de potência do sistema, nas quais as correntes estão alinhadas com as tensões nas fases A e B.

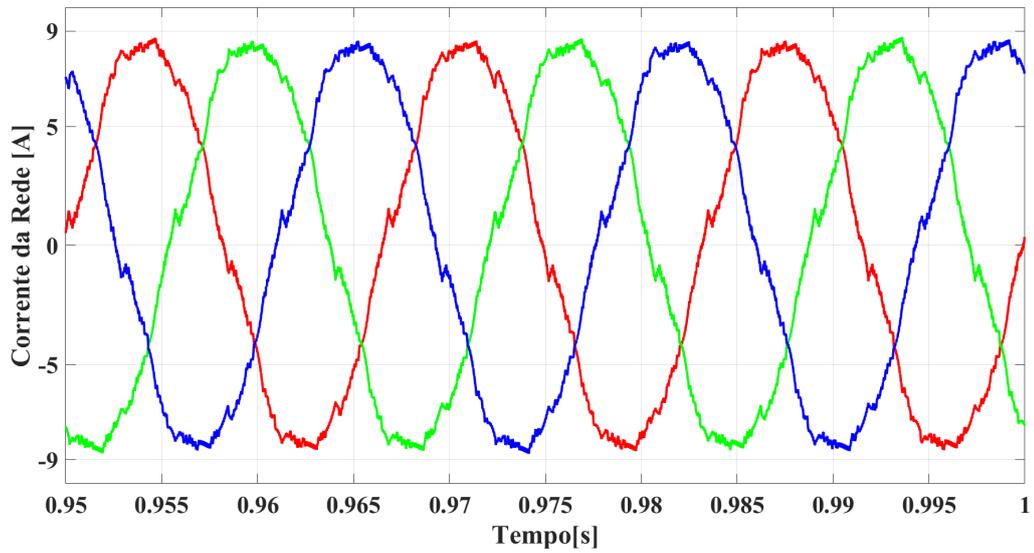
O controle do barramento CC do filtro é representado na Figura 82. Nota-se que a tensão do barramento segue a sua referência de 300V, e o seu tempo de acomodação encontra-se em torno de 0,6s, assim como nos métodos anteriores.

Figura 76 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente da rede.



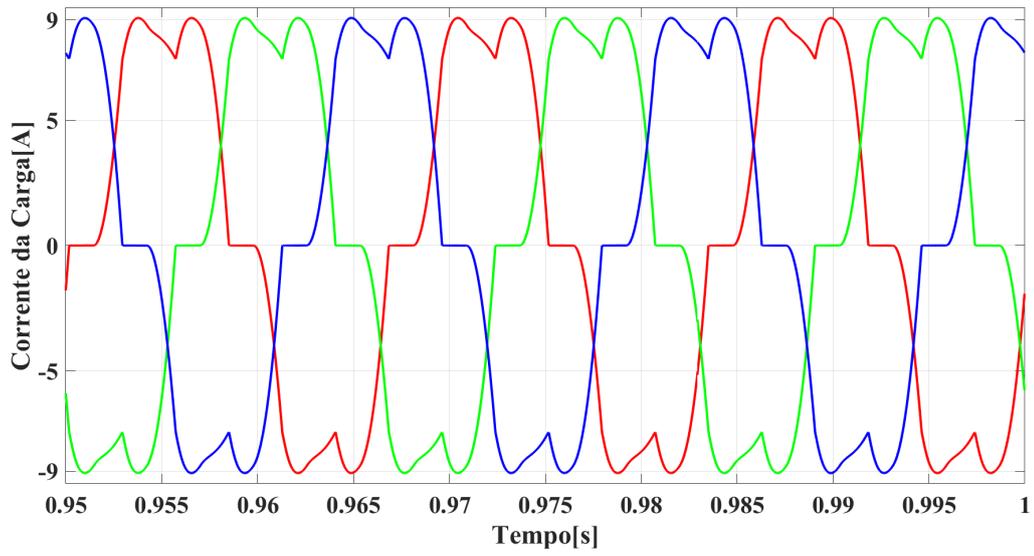
Fonte: Próprio Autor.

Figura 77 – Resultado de simulação OP5700 método DPT corrente da rede aproximada.



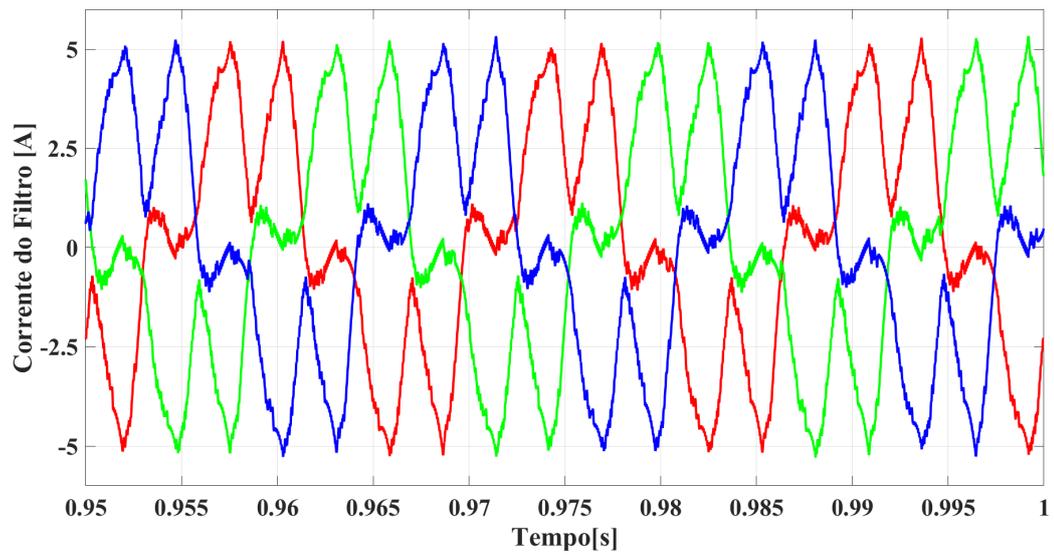
Fonte: Próprio Autor.

Figura 78 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente da carga.



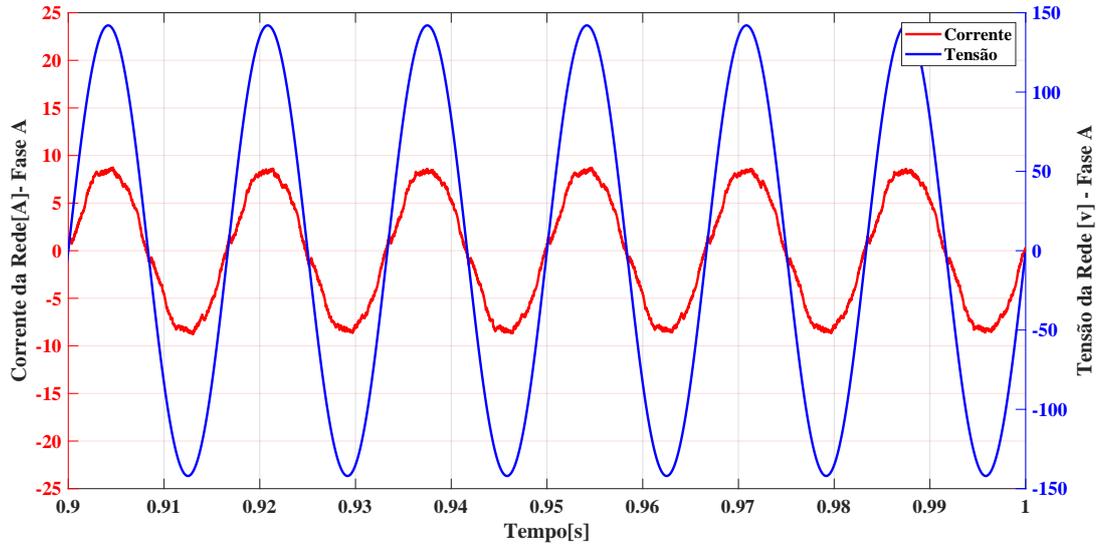
Fonte: Próprio Autor.

Figura 79 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente do filtro.



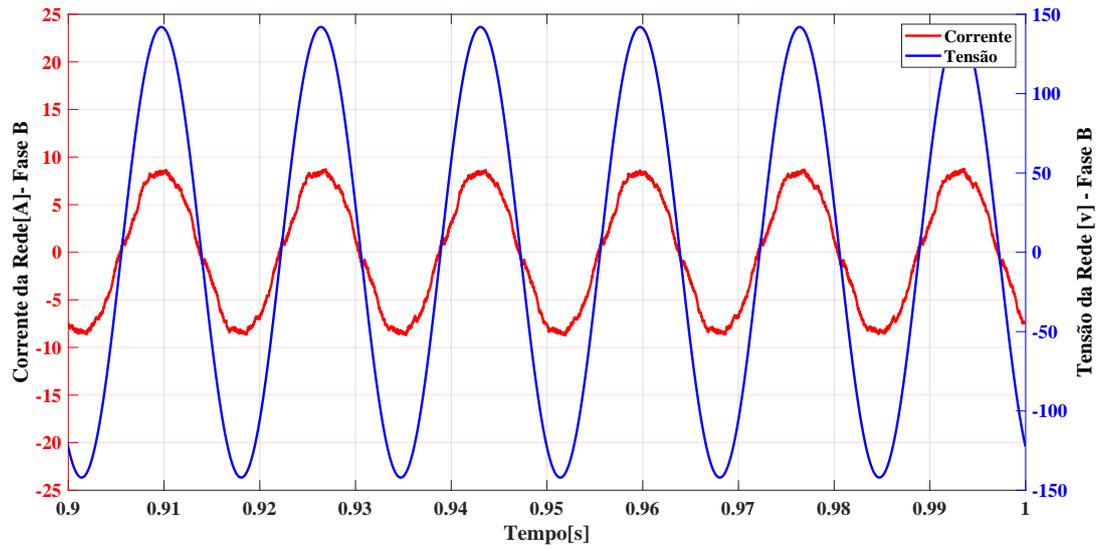
Fonte: Próprio Autor.

Figura 80 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente e tensão fase A.



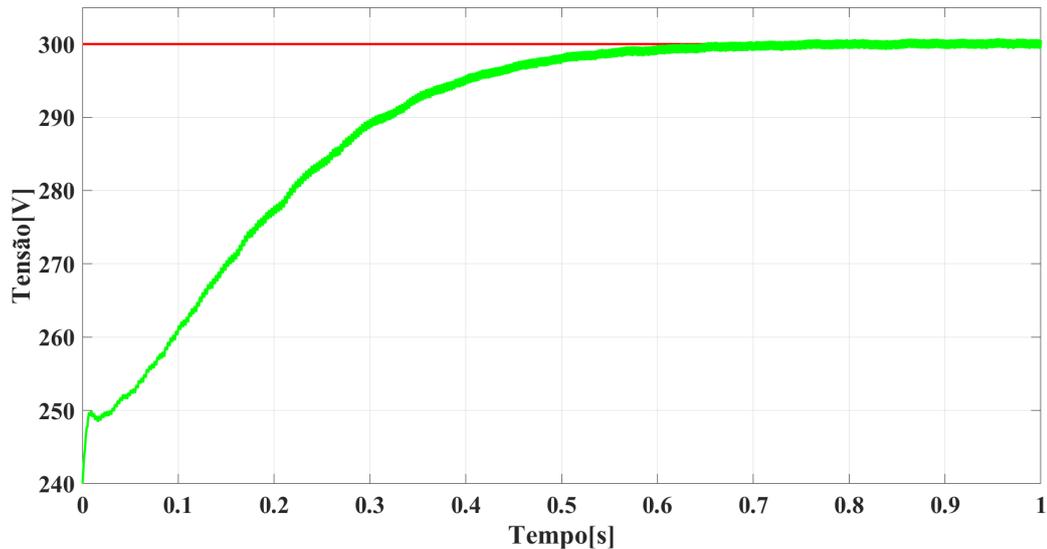
Fonte: Próprio Autor.

Figura 81 – Resultado de simulação OP5700 - Método DPT - Corrente e tensão fase B.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 82 – Resultado de simulação OP5700 método DPT tensão barramento CC.



Fonte: Próprio Autor.

4.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das simulações obtidos para os diferentes métodos de cálculo dos preditores para o controle de um filtro ativo paralelo. Inicialmente, em ambiente Simulink foram simulados as quatro técnicas desenvolvidas nesta pesquisa: método de Euler Regressivo, Trapezoidal, Forma Centrada e Dois Passos de Tempo. Foram analisadas também as seguintes grandezas: corrente e tensão da rede, fator de potência, corrente do filtro e da carga não linear além do controle do barramento CC do filtro.

Além disso, para uma melhor avaliação de desempenho para cada técnica foram aplicadas figuras de mérito para observar o comportamento do controle do barramento CC, o tempo de assentamento, o comportamento da função custo, o tempo de processamento de simulação, e por fim, os níveis de THD da corrente elétrica da rede.

Após esta análise, foram reproduzidos os quatro métodos já aplicados no Simulink e repassados para o simulador em tempo real OP5700. Dessa forma, os dados das grandezas analisadas foram extraídos e reproduzidos graficamente para a realização de comparação entre os resultados obtidos com o Simulink. Assim, os resultados apresentados com o simulador em tempo real OP5700 obtiveram respostas semelhantes às encontrados nas simulações realizadas com o Simulink, corroborando com a fundamentação teórica desenvolvida nesta pesquisa.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou quatro diferentes métodos de discretização (Euler Regressivo, Trapezoidal, Forma Centrada e DPT) para aplicação do controle preditivo de um filtro ativo de potência conectado em paralelo entre uma rede trifásica e um carga não linear. A utilização desse filtro tem como objetivo melhorar a qualidade de energia do sistema, buscando mitigar as componentes harmônicas de corrente geradas pela carga não linear, fazendo com que a corrente da rede tenha uma forma senoidal sem a presença de distorções. Além disso, o controle também busca corrigir o fator de potência da rede. Dessa forma, foram analisados os comportamentos da tensão e da corrente do sistema para cada técnica de cálculo dos preditores aplicadas nesta pesquisa.

O propósito principal deste trabalho foi não só avaliar os resultados da corrente da rede, corrente da carga, corrente e tensão do filtro como também analisar desempenho do controle por meio da análise de figuras de mérito para os quatro métodos utilizados. Para isso, foram desenvolvidos matematicamente métodos numéricos para os cálculos de preditores do controle preditivo. O sistema sob análise é constituído por uma rede trifásica, carga não linear além do filtro conectado em paralelo. A validação dessa abordagem foi realizada via simulações no Simulink e no simulador em tempo real OP5700.

Inicialmente o modelo do sistema foi desenvolvido no Simulink/MATLAB para aquisição dos dados iniciais de tensão e corrente do circuito para cada técnica de cálculo dos preditores. Após obtenção dos resultados iniciais foram aplicadas figuras de mérito para analisar o comportamento de cada técnica, sendo uma delas o controle do barramento CC fazendo com que a tensão de referência altere-se de 300V para 290V, vale ressaltar que todas as técnicas obtiveram um bom comportamento. Outra figura de mérito analisada, foi a função custo, ou seja, a diferença entre a corrente medida e a corrente de referência, para essa figura de mérito o método Trapezoidal foi o que apresentou o menor erro. Além disso, o nível de THD da corrente da rede foi analisado e o método Trapezoidal também apresentou o melhor resultado. Por fim, o tempo de simulação foi observado utilizando o comando *tic toc* do Simulink e o método de Euler apresentou o melhor desempenho, no entanto os demais métodos apresentaram resultados bem semelhantes caracterizando um bom comportamento no tempo de simulação.

Ao comparar os resultados obtidos no Simulink e no simulador em tempo real OP5700, notou-se que as grandezas elétricas analisadas obtiveram perfis de formas de onda com bastante similaridade. Assim, visto que o objetivo principal do filtro ativo paralelo é eliminar as componentes harmônicas de corrente da rede, o método Trapezoidal foi o que obteve o melhor resultado com um nível de THD mais baixo dentre as quatro técnicas (0,54%). Este método também apresentou resultados com bons desempenhos nas outras figuras de mérito quando comparado as

demais técnicas aplicadas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listados possíveis trabalhos futuros:

- Utilização do módulo eHS (*electrical Hardware Solver*) do Opal para uso do *Hardware-in-the-Loop* (HIL) do sistema proposto;
- Aplicação de técnicas de cálculo de preditores para dois filtros ativos conectados em paralelo;
- Aplicação de outro método numérico para cálculo dos preditores, como a Matriz Derivada.

REFERÊNCIAS

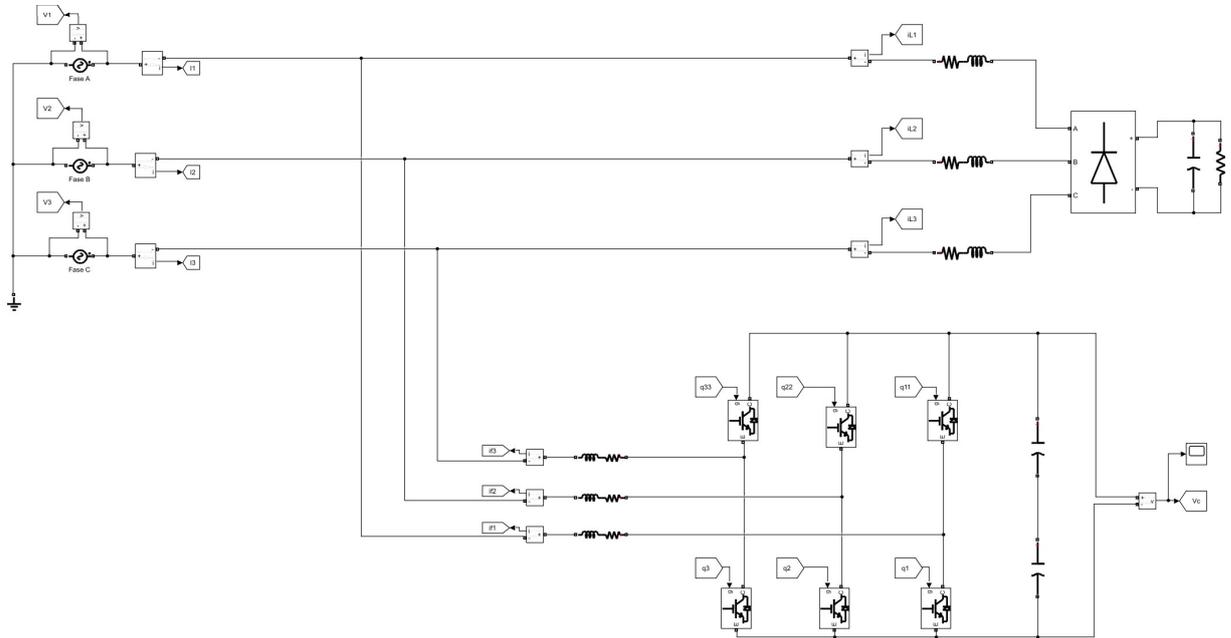
- ABDUSALAM, M.; POURE, P.; SAADATE, S. A new control method of hybrid active filter using a feedforward loop tuned at 5 th and 7 th harmonic frequency. In: IEEE. *2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. Marraquexe, Marrocos, 2007. p. 1191–1194.
- ADAM, M.; CHEN, Y.; DENG, X. Harmonic current compensation using active power filter based on model predictive control technology. *Journal of Power Electronics*, The Korean Institute of Power Electronics, v. 18, n. 6, p. 1889–1900, 2018.
- AKAGI, H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, p. 255–269, 2006.
- AL-OTHMAN, A. et al. Model predictive control for shunt active power filter in synchronous reference frame. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, The Korean Institute of Electrical Engineers, v. 11, n. 2, p. 405–415, 2016.
- BEKAKRA, Y.; ZELLOUMA, L.; MALIK, O. Improved predictive direct power control of shunt active power filter using gwo and alo—simulation and experimental study. *Ain Shams Engineering Journal*, Elsevier, v. 12, n. 4, p. 3859–3877, 2021.
- BETT, N. K.; MAINA, C. C.; HINGA, P. K. New approach for design of shunt active power filter for power quality improvement in a three phase three wire system. In: IEEE. *2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. Nairóbi, Quenia, 2020. p. 1–4.
- BOUKEZATA, B. et al. Implementation of predictive current control for shunt active power filter. In: IEEE. *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*. Batna, Argélia, 2017. p. 133–138.
- BOUSSAID, A. et al. A novel strategy for shunt active filter control. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 123, p. 154–163, 2015.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. *Métodos Numéricos para Engenharia-7ª Edição*. Porto Alegre, Brasil: McGraw Hill Brasil, 2016.
- CHERIF, A. Y.; HICHAM, L.; KAMEL, B. Implementation of finite set model predictive current control for shunt active filter. In: IEEE. Hammamet, Tunísia, 2018. p. 1–6.
- EL-HABROUK, M.; DARWISH, M.; MEHTA, P. Active power filters: A review. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, IET, v. 147, n. 5, p. 403–413, 2000.
- FUJITA, H.; AKAGI, H. A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 27, n. 6, p. 1020–1025, 1991.
- GARCIA, C. E.; PRETT, D. M.; MORARI, M. Model predictive control: Theory and practice—a survey. *Automatica*, Elsevier, v. 25, n. 3, p. 335–348, 1989.
- GHADBANE, I. et al. Three-phase shunt active power filter for power improvement quality using sliding mode controller. In: IEEE. *CCCA12*. Marseille, França, 2012. p. 1–6.

- GREEN, T. C.; MARKS, J. H. Control techniques for active power filters. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, v. 152, n. 2, p. 369–381, 2005.
- JOHNSON, J. R. Proper use of active harmonic filters to benefit pulp and paper mills. In: IEEE. *Conference Record of 2001 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No. 01CH37209)*. Portland, EUA, 2001. p. 21–30.
- KENNEL, R.; LINDER, A. Predictive control of inverter supplied electrical drives. In: IEEE. *2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37018)*. Galway, Irlanda, 2000. v. 2, p. 761–766.
- KOURO, S. et al. Model predictive control—a simple and powerful method to control power converters. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 56, n. 6, p. 1826–1838, 2008.
- KUNJUMHAMMED, L. P.; MISHRA, M. K. Comparison of single phase shunt active power filter algorithms. In: IEEE. *2006 IEEE Power India Conference*. Nova Deli, Índia, 2006. p. 8–pp.
- LEE, T.-L. et al. A dynamic tuning method for distributed active filter systems. *IEEE Transactions on industry applications*, IEEE, v. 44, n. 2, p. 612–623, 2008.
- LINDEKE, D. et al. Projeto de um filtro ativo paralelo de 1kva usando técnicas de controle analógico e digital. Florianópolis, SC, 2003.
- LUBIS, A. R. et al. Harmonic meter design using arduino'. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, v. 7, n. 2.13, p. 381–384, 2018.
- MANSOOR, A. et al. Predicting the net harmonic currents produced by large numbers of distributed single-phase computer loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 2001–2006, 1995.
- MARTINEZ, J. C. R.; KENNEL, R. M.; GEYER, T. Model predictive direct current control. In: . Via del Mar, Chile: 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2010. p. 1808–1813.
- MOHAN, N. et al. Active filters for AC harmonic suppression. In: . Nova York, EUA: IEEE Power Eng Soc, Winter Meeting, 2017.
- OLIVEIRA, A. et al. Internal model control for chemical recovery. *Instituto de tecnologia para o desenvolvimento -LACTEC*, p. 853–856, 2003.
- PANIGRAHI, R.; SUBUDHI, B.; PANDA, P. C. Model predictive-based shunt active power filter with a new reference current estimation strategy. *IET Power Electronics*, IET, v. 8, n. 2, p. 221–233, 2015.
- RAHMANI, S.; MENDALEK, N.; AL-HADDAD, K. Experimental design of a nonlinear control technique for three-phase shunt active power filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 57, n. 10, p. 3364–3375, 2010.
- RICHALET, J. Algorithmic control of industrial processes. *Proc. of the 4th IFAC Sympo. on Identification and System Parameter Estimation*, p. 1119–1167, 1976.
- RIVERA, M. et al. Predictive current control with input filter resonance mitigation for a direct matrix converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 26, n. 10, p. 2794–2803, 2011.

- RODRIGUEZ, J.; CORTES, P. *Predictive control of power converters and electrical drives*. Valparaiso, Chile: John Wiley & Sons, 2012.
- RODRIGUEZ, J. et al. Predictive current control of a voltage source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 1, p. 495–503, 2007.
- RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. d. R. *Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1997.
- SOUZA, L. L. de et al. Grid harmonic current correction based on parallel three-phase shunt active power filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 37, n. 2, p. 1422–1434, 2021.
- TAHER, S. A.; ALAEE, M. H.; ARANI, Z. D. Model predictive control of pv-based shunt active power filter in single phase low voltage grid using conservative power theory. In: IEEE. *2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*. Mashhad, Irã, 2017. p. 253–258.
- TARISCIOTTI, L. et al. Model predictive control for shunt active filters with fixed switching frequency. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 53, n. 1, p. 296–304, 2016.
- ZHANG, X.-P.; YAN, Z. Energy quality: A definition. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, IEEE, v. 7, p. 430–440, 2020.
- ZHOU, J.; YUAN, Y.; DONG, H. Adaptive dc-link voltage control for shunt active power filters based on model predictive control. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 208348–208357, 2020.
- ZHU, H. et al. Five-level diode-clamped active power filter using voltage space vector-based indirect current and predictive harmonic control. *IET Power Electronics*, IET, v. 7, n. 3, p. 713–723, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MODELO SIMULINK CIRCUITO DE POTÊNCIA E CONTROLE DO FILTRO ATIVO PARALELO



APÊNDICE B – MODELO SIMULINK CIRCUITO DE CONTROLE DO FILTRO ATIVO PARALELO

