



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU**

**OPERAÇÃO FLEXÍVEL DE CONVERSORES TRIFÁSICOS
CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**

Bauru - SP
Janeiro/2018

ALESSANDRO LUCINDO DA LUZ

OPERAÇÃO FLEXÍVEL DE CONVERSORES TRIFÁSICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Bauru da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação

Linha de Pesquisa: Sistemas de energia

Orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes

Bauru - SP

Janeiro/2018

Luz, Alessandro Lucindo da.

Operação flexível de conversores trifásicos
conectados à rede elétrica / Alessandro Lucindo
da Luz, 2017

122 f.

Orientador: Helmo Kelis Morales Paredes

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Conversor eletrônico multifuncional e flexível.
2. Qualidade de energia elétrica. 3. Teoria da
Potência Conservativa - CPT. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALESSANDRO LUCINDO DA LUZ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 13 dias do mês de novembro do ano de 2017, às 09:30 horas, no(a) Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba-UNESP, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES - Orientador(a) do(a) Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP/Sorocaba, Prof. Dr. FLAVIO ALESSANDRO SERRAO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP, Prof. Dr. WESLEY ANGELINO DE SOUZA do(a) Departamento de Computação / Universidade Federal de São Carlos - Campus de Sorocaba / SP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ALESSANDRO LUCINDO DA LUZ, intitulada **OPERAÇÃO FLEXÍVEL DE CONVERSORES TRIFÁSICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: --- Aprovado ---. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES

Prof. Dr. FLAVIO ALESSANDRO SERRAO GONÇALVES

Prof. Dr. WESLEY ANGELINO DE SOUZA

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por me dar força, saúde e perseverança nesta minha caminhada para a obtenção do título de Mestrado, muitos momentos tive que dividir os meus pensamentos e preocupações no meu trabalho, esposa e filhos para mais esta conquista de minha vida.

À minha família que constitui durante esta fase, à esposa Fabiana que pode compreender meus esforços e me dando apoio nas dificuldades, aos meus filhos João Victor e Matheus. Agradeço também aos meus pais Milton e Izabel que tanto se esforçaram financeiramente e psicologicamente com os meus estudos desde a minha infância, o meu muito OBRIGADO!

Ao meu Orientador professor Helmo pelo suporte técnico neste trabalho e a disposição para me conduzir nesta aprendizagem. Aos meus professores da Unesp Sorocaba, Fernando Pinhabel Marafão e Flávio Alessandro Serrão Gonçalves pelo apoio nas disciplinas do curso e por também fazerem parte da minha banca, em especial ao Wesley Angelino de Souza, professor convidado da UFSCAR, as suas contribuições enriqueceram em muito este trabalho.

A UNESP Campus de Sorocaba em especial ao laboratório GASI, que me cedeu o espaço alguns dias da semana para que eu pudesse trabalhar nesta dissertação.

E por fim, não menos importante, ao FIT – Instituto Flextronics de Tecnologia que me ajudou nos custos de viagem para apresentação do artigo em um congresso em Campina Grande.

“Ouça mais – Fale Menos
Faça mais do que os outros
Faça sempre o melhor que puder
Aplique o conhecimento
Atue sempre na causa
Persista
Não tema riscos
Aceite responsabilidades
Acredite na sua intuição
Sempre trabalhe pela “Metodologia do exemplo”
Faça de suas palavras as suas ações
Contratar pela atitude e treinar pela habilidade”

(Professor Weberson Eduardo G. Abreu)

Resumo

Este trabalho de mestrado descreve uma estratégia de operação multifuncional e flexível aplicado a conversores trifásicos CC-CA (inversores) conectados à rede de distribuição de energia elétrica. A estratégia proposta é capaz de injetar potência ativa na rede e compensar correntes de distúrbios (reativos, desbalanço e harmônicos) simultaneamente. O maior objetivo desta operação flexível é de melhorar a Qualidade de Energia Elétrica em um ponto de acoplamento comum (PAC) permitindo a compensação total ou parcial destes distúrbios ou fatores que degradam a Qualidade de Energia Elétrica.

O fator de potência é o principal fator de qualidade a ser observado e ele é calculado através da Teoria da Potência Conservativa – CPT. Entretanto, com base no fator de potência medido pelo lado da rede de distribuição e o fator de potência desejado, um coeficiente de compensação – k é calculado para o ajuste das correntes de compensação dos distúrbios que geram a potência não ativa.

Palavras-chave – Conversor eletrônico CC-CA de potência, Qualidade da energia elétrica, Fontes renováveis de energia, Teoria da Potência Conservativa, Sistema trifásico, Redes de distribuição de energia elétrica.

Abstract

This paper depicts a multifunctional and flexible control strategy applied in three-phase inverters, which are connected to the distribution network. The proposed strategy is able to inject active power into the electrical grid and compensate current disturbances (reactive, harmonics and unbalance) simultaneously. The main goal of this flexible strategy is to improve the Power Quality at the point of common coupling (PCC) allowing full or partial compensation of disturbances. Power factor is the main quality index observed and it is calculated according to Conservative Power Theory - CPT. Therefore, based on the power factor measured in the grid side and the desired value for the power factor, a compensation coefficient - k is calculated continuously adjusting the amplitude of the compensation current.

Keywords – Electronic power converter DC-AC, Quality energy, Renewable sources of energy, Three-phase system, Power distribution system.

Lista de Figuras

Figura 1 - Níveis de hierarquia para todo o processo da energia em uma rede elétrica.	27
Figura 2 - Esquemático geral de um sistema trifásico de fonte renovável na rede elétrica.	29
Figura 3 - Topologia de um filtro L.	30
Figura 4 - Diagrama de bode do filtro L.	31
Figura 5 – Curva de Resposta em degrau do filtro L.	31
Figura 6 – Topologia de um filtro LC.	32
Figura 7 – Diagrama de bode do filtro LC para a dada função de transferência.	33
Figura 8 - Curva da Resposta em degrau do filtro LC.	33
Figura 9 – Topologia de um filtro LCL.	34
Figura 10 – Diagrama de bode do filtro LCL para a dada função de transferência.	36
Figura 11 – Curva de Resposta em degrau do filtro LCL.	37
Figura 12 - Filtro LCL em estrela (Y)	40
Figura 13 - Filtro LCL em triângulo (Δ)	40
Figura 14 - Circuito trifásico de simulação Matlab® para resultados dos filtros.	43
Figura 15 - Tensão da fase A e corrente trifásica da carga para o circuito sem filtro.	44
Figura 16 – Tensões e correntes para o filtro do tipo L.	44
Figura 17 - Tensões e correntes para o filtro LC.	45
Figura 18 - Curva de resposta conforme diagrama de bode para a variação do indutor L_g no filtro LCL.	46
Figura 19 - Tensões e correntes para o filtro do tipo LCL e tensão do Link CC.	47
Figura 20 – Análise da FFT para Tensão e Corrente sem filtro no inversor.	48
Figura 21 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro L.	48
Figura 22 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro LC.	48
Figura 23 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro LCL- Y.	49
Figura 24 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro LCL- Δ	49
Figura 25 – Diagrama esquemático do sistema trifásico com controle flexível para a compensação dos distúrbios de correntes não ativas.	58
Figura 26 – Forma de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões da rede V_a , V_b e V_c	60
Figura 27 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (i_{ba}), correntes balanceadas reativas (i_{br}), correntes de desbalanço (i_u) e correntes residual (i_v), por fase nos instantes de compensação.	61
Figura 28 – Potência ativa e Energia reativa instantânea no lado da rede.	62
Figura 29 – Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).	63
Figura 30 – Formas de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da rede, i_F como corrente do FAP e as tensões V_a , V_b e V_c , com os detalhes em destaque.	65
Figura 31 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (i_{ba}), correntes balanceadas reativas (i_{br}), correntes de desbalanço (i_u) e correntes residual (i_v) nos instantes de compensação do controle flexível.	66
Figura 32 – Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).	67
Figura 33 – Potência ativa e Energia reativa instantânea da rede durante os intervalos de compensação.	68
Figura 34 – Forma de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões V_a , V_b e V_c , com os devidos destaques.	69

Figura 35 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (i_{ba}), correntes reativas (i_r), correntes de desbalanço (i_u) e correntes residual (i_v) nos instantes de compensação.	70
Figura 36 – Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).	71
Figura 37 – Formas de onda de i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões distorcidas da rede V_a , V_b e V_c	73
Figura 38 – Forma de onda da tensão x corrente da fase A, ao longo do tempo na compensação do filtro ativo de compensação.	74
Figura 39 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (i_{ba}), correntes balanceadas reativas (i_{br}), correntes de desbalanço (i_u) e correntes residual (i_v) nos devidos instantes de compensação.	74
Figura 40 - Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e coeficiente de compensação (k_r , k_n e k_v).	75
Figura 41 – Potencia ativa (P) e Energia Reativa (W) instantânea no lado da rede com os devidos instantes de compensação do FAP.	76
Figura 42 – Forma de onda de i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte geradora, i_F como corrente do FAP e as tensões da rede V_a , V_b e V_c	77
Figura 43 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (i_{ba}), correntes balanceadas reativas (i_{br}), correntes de desbalanço (i_u) e correntes residual (i_v) nos instantes de compensação.	78
Figura 44 - Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).	79
Figura 45 – Forma de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões da rede V_a , V_b e V_c , com os trechos em detalhe.	80
Figura 46 – Forma de onda da tensão da rede (V_a) e da corrente de rede (i_a), durante o intervalo de compensação do filtro.	81
Figura 47 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (i_{ba}), correntes balanceadas reativas (i_{br}), correntes de desbalanço (i_u) e correntes residual (i_v) nos instantes de compensação.	82
Figura 48 – FFT da corrente balanceada ativa (i_{ba}) e da corrente residual (i_v) com as devidas frequências harmônicas de 5ª e 7ª ordem impostas pela tensão.	83
Figura 49 – Representação do fator de potência da rede (λ_S), do fator de potência da carga (λ_L) e dos coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).	83
Figura 50 - Potência ativa (P) e Energia reativa (W) instantânea no lado da rede durante os instantes de compensação dos distúrbios.	84
Figura 51 – Diagrama de blocos funcionais do controle flexível proposto.	87
Figura 52 – Resposta em frequência para o controlador PI na malha de tensão.	89
Figura 53 – Resposta em frequência do controlador PI ressonante harmônico da malha de corrente.	91
Figura 54 – Circuito comparador das tensões por fase do controle flexível e da portadora triangular para a modulação 3 níveis.	92
Figura 55 – Conversor CC/CA (inversor) trifásico com as devidas tensões de saída (V_{a_inv} , V_{b_inv} e V_{c_inv}).	92
Figura 56 – Sinal da portadora triangular utilizada na modulação PWM.	93
Figura 57 – Tensões de fase do inversor trifásico antes e após o filtro LCL.	93
Figura 58 – Conversor eletrônico de potência trifásico conectado à rede elétrica.	95
Figura 59 – Dinâmica das tensões e correntes trifásicas do controle flexível proposto na simulação para filtro LCL-Y.	97

Figura 60 – Dinâmica dos fatores de potência de rede e carga, com o coeficiente de compensação do controle e as potências ativas do controle flexível.	99
Figura 61 – Análise FFT para as correntes de rede ($i_{S_a,b,c}$) <u>antes</u> da compensação do controle flexível.	100
Figura 62 – Análise FFT para as correntes de rede ($i_{S_a,b,c}$) <u>depois</u> de 100% da compensação dos distúrbios (reativos, desbalanço e harmônicos) pelo controle flexível, com somente a frequência fundamental.	100
Figura 63 - Dinâmica das tensões e correntes trifásicas do controle flexível proposto na simulação para filtro LCL- Δ	101
Figura 64 – Circuito de simulação em Matlab do Filtro LCL em estrela.	115
Figura 65 – Circuito de simulação em Matlab do Filtro LCL em triângulo.	116
Figura 66 – Circuito de simulação em Matlab do conversor CC/CA com modulação PWM.	117
Figura 67 – Circuito de simulação em PSIM do sistema trifásico com fonte de corrente controlada.	118
Figura 68 – Circuito de simulação em Matlab da fonte de corrente controlada para cada fase.	119
Figura 69 – Circuito de simulação em PSIM do sistema trifásico com filtro LCL-Y e conversor CC/CA trifásico.	120

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do sistema trifásico considerados para o cálculo dos filtros.	38
Tabela 2 – Parâmetros do sistema trifásico para simulação do sistema trifásico.....	42
Tabela 3 - Valores dos componentes utilizados na simulação dos filtros.	43
Tabela 4 - Valores de DHTv e DHTi para os filtros utilizados na simulação.	47
Tabela 5 - Tempos da simulação para a compensação pelo controle flexível utilizado, em todos os casos a serem citados a seguir.	59
Tabela 6 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 1.....	63
Tabela 7 - Valores de tensão na rede de alimentação para o caso 2.	64
Tabela 8 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 2.....	68
Tabela 9 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 3.....	72
Tabela 10 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 4.....	76
Tabela 11 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 5.....	79
Tabela 12 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 6.....	85
Tabela 13 - Parâmetros utilizados na simulação do controle flexível.	94
Tabela 14 - Tempos da simulação da operação do sistema trifásico de controle flexível utilizado.....	96
Tabela 15 – Valores de DHT e dos Fatores para o filtro LCL-Y.	102
Tabela 16 - Valores de DHT e dos Fatores para o filtro LCL- Δ	102

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEP	Conversor Eletrônico de Potência
CPT	Teoria de Potência Conservativa, do inglês: <i>Conservative Power Theory</i>
DHT _i	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHT _v	Distorção Harmônica Total de Tensão
FAP	Filtro Ativo de Potência
FFT	do inglês: <i>Fast Fourier Transform</i>
FLE	Fonte Local de Energia
FRE	Fonte Renovável de Energia
GD	Geração Distribuída
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IMF	Inversor Multifuncional
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PFV	Painel Fotovoltaico
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PR	Proporcional Ressonante
PR + H	Proporcional Ressonante e Harmônico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	Modulação por largura de pulso, do inglês: <i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica

Lista de Símbolos

A	Potência Aparente
C_f	Capacitor do filtro de entrada
D	Potência Residual/Harmônica
f_{res}	Frequência de ressonância
i_F	Corrente no filtro ativo de potência
i_L	Corrente na carga (consumidor)
I_{RMS}	Corrente eficaz
i_S	Corrente na rede
k	Coeficiente de compensação
K_I	Valor do controlador integrador
K_P	Valor do controlador proporcional
L	Filtro L (Indutor)
LC	Filtro LC (Indutor e Capacitor)
LCL	Filtro LCL (Indutor, Capacitor e Indutor)
L_f	Indutor do filtro de entrada
L_g	Indutor do filtro de saída
m_a	Razão da modulação de amplitude
m_f	Razão da modulação de frequência
N	Potência de Desbalanço
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
R_d	Resistor de amortecimento
$R_{desb.}$	Resistor de desbalanço
RL	Carga resistiva indutiva
s	Tempo em segundos
V	Tensão eficaz ou instantânea
V_{PAC}	Tensão no ponto de acoplamento comum
W	Energia Reativa
λ	Fator de potência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVO:	17
1.2. MOTIVAÇÃO	18
1.3. ESTRUTURA e CONTEÚDO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	20
3. FILTROS L, LC e LCL EM CONVERSORES DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS.	28
3.1. TOPOLOGIAS DOS FILTROS	29
3.2. FILTRO L	29
3.3. FILTRO LC	32
3.4. FILTRO LCL	34
3.5. DEFININDO OS PARÂMETROS DE PROJETO E CÁLCULO DOS VALORES DOS FILTROS.	38
3.6. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E COMPARATIVO DOS FILTROS L, LC e LCL-Y e LCL- Δ .	42
4. COMPENSAÇÃO DE CORRENTES DE REFERÊNCIA PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS UTILIZANDO FONTE DE CORRENTE CONTROLADA	50
4.1. DECOMPOSIÇÃO DAS CORRENTES DE REFERÊNCIA	50
4.2. ESTRATÉGIA DE CONTROLE FLEXÍVEL PROPOSTA.	55
4.3. SIMULAÇÃO E RESULTADOS PARA UM SISTEMA TRIFÁSICO COM UM CONTROLE FLEXÍVEL.	57
4.3.1. CASO 1: Fonte de tensão puramente senoidal, Carga RL balanceada.	60
4.3.2. CASO 2: Fonte de tensão não-senoidal, carga RL balanceada.	64
4.3.3. CASO 3: Fonte de tensão senoidal, Carga RL desbalanceada.	69
4.3.4. CASO 4: Fonte de tensão não-senoidal, Carga RL desbalanceada.	72
4.3.5. CASO 5: Fonte de tensão senoidal, Carga RL balanceada, Carga não-linear	77
4.3.6. CASO 6: Fonte de tensão não-senoidal, Carga RL desbalanceada, Carga não-linear.	80
5. CONVERSOR TRIFÁSICO PARA INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS POR MEIO DO CONTROLE FLEXIVEL.	86
5.1. Modelagem do sistema de controle	87
5.2. Malhas de Controle	88
5.3. Conversor CC/CA trifásico PWM	91
5.4. Resultados da Simulação	94
5.5. Avaliação do filtro LCL trifásico para conexão Estrela (Y) e Triângulo (Δ).	101
6. CONCLUSÕES GERAIS	104
6.1. Trabalhos futuros	106
6.2. Publicações realizadas e submissões.	107
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	108
Anexos	117

1. INTRODUÇÃO

Devido a uma série de acontecimentos relacionados ao incentivo da redução de emissões de gases de efeito estufa em diversos países (RELATÓRIO DO MCTI, 2014), têm aumentado nos últimos anos, o número de unidades de geração distribuída – GD, conectadas ao sistema elétrico de potência (RELATÓRIO DO EPE, 2017). Atualmente, um dos principais focos do governo brasileiro é a política de incentivos na pesquisa, desenvolvimento e instalação da tecnologia em GD (ANEEL–PRODIST, 2017). A energia renovável e não poluente vem desempenhando um papel cada vez mais importante dentro da geração de energia elétrica no país. Sua inserção no sistema elétrico brasileiro está diretamente ligada, principalmente, às preocupações no âmbito energético e ambiental. De maneira, a organizar e regulamentar a inserção de novas fontes de geração de energia elétrica, a Agência Nacional de Energia no Brasil (ANEEL) criou padrões e regras para estabelecer certos critérios e vantagens ao consumidor para este segmento (ANEEL REN 687, 2015).

O conceito de geração distribuída – GD, pode ser definido como uma geração de energia elétrica em uma rede de distribuição (média tensão) ou de um consumidor na rede (baixa tensão), com o propósito de disponibilizar para esta geração de energia somente potência elétrica ativa (VENKATARAMANN; MARNAY, 2008, p.78). Neste contexto, uma evolução do termo de GD tem sido relacionado com sistema de geração fotovoltaica, geração eólica, turbinas a gás, geradores diesel ou biodiesel, termogeradores à biomassa, dentre outros, operando de forma isolada ou cooperativamente com o sistema de potência tradicional, tais como usinas hidroelétricas, térmicas e nucleares (VENKATARAMANN et al., 2008; MARNAY et al., 2008; IPAKCHI et al., 2008; HEYDT, 2001). Atualmente existem grandes parques

de geração solar e pilotos que estão ocorrendo no país, que poderão incentivar o uso de pequenos geradores distribuídos (GD) conectados ao sistema elétrico (PORTAL REDES INTELIGENTES BRASIL, 2017).

1.1.OBJETIVO:

Este trabalho de mestrado tem como objetivo apresentar o levantamento e a análise dos resultados encontrados por meio de um software de simulação (PSIM), para uma metodologia de controle flexível em conversores eletrônicos associados às fontes de geração distribuída para, além de gerar potência ativa, simultaneamente realizar a compensação de distúrbios. Aborda também o assunto de filtros passivos no acoplamento do conversor na rede elétrica para minimizar as distorções de tensão e corrente ao sistema elétrico, utilizando o software de simulação em Matlab (Simulink). Para o controle flexível, os sinais de referência são obtidos a partir da decomposição da corrente de carga através da Teoria de Potência Conservativa, do inglês *Conservative Power Theory* - CPT (PAREDES, 2011). Por meio deste controle, o conversor eletrônico da Fonte Renovável de Energia, poderá ser capaz de minimizar determinados distúrbios (individualmente ou coletivamente) para alcançar um valor determinado do fator de potência, incluindo a redução da distorção harmônica de corrente e até o fator de desequilíbrio da corrente entre as fases, de forma a atender o sistema de GD, para um sistema trifásico, para uma operação segura e confiável no ponto de vista de Qualidade de Energia Elétrica.

1.2. MOTIVAÇÃO

O trabalho pode fornecer algumas contribuições no ponto de vista de melhoria da QEE para as concessionárias de energia elétrica e aos usuários (micro e minigeração de energia) para a conexão e operação de geradores distribuídos na rede elétrica. Podendo até, dependendo do controle do sistema de compensação, melhorar a qualidade da energia elétrica, com a redução dos distúrbios e com o aumento do fator de potência em um ponto de acoplamento comum.

Como resultado final deste trabalho, tem-se a apresentação da simulação e seus resultados deste controle flexível por meio de uma Fonte de Energia Renovável - FRE de maneira a atender aos limites mínimos estabelecidos por normas nacionais ou internacionais conforme a sua regulamentação - PRODIST, IEEE ou IEC (ANEEL-PRODIST, 2017; IEEE STD1459, 2010).

1.3. ESTRUTURA e CONTEÚDO

O capítulo 2, apresenta a revisão bibliográfica realizada na qual aborda os aspectos para as fontes renováveis de energia e algumas definições técnicas dos autores das publicações, as diversas definições de um sistema multifuncional e flexível conforme a pesquisa levantada, a metodologia dos controladores utilizados em um conversor eletrônico, os filtros passivos de potência para atenuar a frequência de chaveamento dos conversores CC/CA (inversores) e pôr fim a hierarquia de uma microrrede de distribuição de energia.

No capítulo 3, são relatados os filtros L, LC e LCL utilizados nos conversores CC/CA trifásicos, suas topologias, os aspectos técnicos e os resultados de simulação em Matlab para um comparativo de performance entre eles.

O capítulo 4, explora a compensação de reativos e distúrbios em um sistema trifásico simulado em PSIM, utilizando fonte de corrente controlada, para diversos cenários (casos) de cargas, avaliando o comportamento do conversor eletrônico na compensação parcial ou total no Ponto de Acoplamento Comum - PAC.

O capítulo 5, apresenta a metodologia de um conversor trifásico com controlador de tensão e corrente, que além de injetar potência ativa, realiza a compensação de distúrbios de corrente, caracterizando um sistema de controle multifuncional e flexível para a rede elétrica.

No capítulo 6, são apresentados as conclusões gerais e os resultados encontrados neste trabalho de mestrado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia fotovoltaica (FV) é largamente empregada em sistemas de potência de pequena escala, para conexão na rede de energia elétrica. Um painel fotovoltaico (PFV) gera energia elétrica em seus terminais de saída (tensão CC) através da conversão direta dos raios solares que o incidem. Um sistema de geração de energia fotovoltaica consiste em combinações série-paralela das células fotovoltaicas a fim de obter a tensão e a corrente de saída determinada. Estas combinações conhecidas como arranjo de PFV, geram potência elétrica em corrente contínua (CC) que deve ser convertida para uma potência em corrente alternada (CA) e uma frequência de operação padronizada a fim de alimentar as devidas cargas presentes na rede elétrica (CHOWDHURY et al., 2007; VILLALVA et al., 2009).

O Inversor ou Conversor CC/CA, nos sistemas de conversão de energia, possui um papel muito importante na aplicação de geração de energia, pois além de transformar a tensão contínua em uma tensão alternada, padroniza a frequência de operação para conexão direta à rede elétrica, empregando outras tecnologias que ajudaram a tornar o sistema mais confiável e robusto. O artigo (BLAABJERG et al., 2005, p.1292), classifica os inversores de geração de energia em quatro (4) categorias:

- 1) O número de estágios de processamento de potência gerada em níveis de cascata, conforme o seu incremento da geração até a tensão na rede;
- 2) O tipo do acoplamento da transferência de energia entre o painel fotovoltaico e a rede elétrica;
- 3) No caso dos inversores utilizarem transformadores, a frequência de operação do PWM empregado sendo de baixa ou de alta modulação;

- 4) E o tipo de conexão com a rede elétrica para a interface com o estágio de potência do inversor de energia.

Os inversores que são conectados à rede elétrica (conhecidos por “*Grid-Tie*”) precisam ser sincronizados com a tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) de modo que seja possível interagir com os parâmetros da rede como a corrente que circula pela linha. O artigo (TONIN et al., 2013, p.387) relata como são usualmente os sensores de medida dos inversores conectados à rede elétrica. Basicamente, tem-se 3 tipos de sensores de medida, tais como:

- a) Sensor de tensão CC conectado normalmente no capacitor de link-CC;
- b) Sensor de corrente na linha CA e;
- c) Sensor de tensão na linha CA.

Os conversores CC/CA (ou inversores) PWM diferenciados, com múltiplas funcionalidades e configurações são chamados de Inversores Multifuncionais - IMF. No artigo (TEKE et al., 2014, p.14), apresenta-se uma coletânea de pesquisas e estudos desenvolvidos listados em diferentes categorias de IMF e tipos de topologias de conversores com suas aplicações. As capacidades Multifuncionais de um inversor de PFV, conforme o artigo (GEIBEL et al., 2009), poderá contribuir para a melhoria da Qualidade de Energia Elétrica - QEE em um sistema de geração distribuída de forma a obter uma melhoria significativa do sistema elétrico para as cargas sensíveis dentro de uma sub-rede local, com a melhoria da confiabilidade do sistema através das instabilidades que as cargas de uma sub-rede podem provocar, outro ponto é a redução dos picos de corrente e oscilações devido a demanda energética pela indústria e consumidores na rede elétrica, além da compensação de harmônicos presentes na rede, e da potência reativa que causa a redução do fator de potência e finalmente o fornecimento de potência ativa contribuindo assim para a

redução de geração de energia pelo lado das concessionárias de distribuição (GEIBEL et al., 2009).

Um ponto de vista interessante é a definição do artigo (CARNIELETTO et al., 2009, p.1) para “Inversores Inteligentes” (“Smart Inverters”), no qual refere-se ao controle inteligente dos inversores sobre as suas funcionalidades, sendo elas: distribuir a potência gerada para as cargas locais, fornecer potência para as outras cargas conectadas a rede elétrica, disponibilizar suporte de tensão para apoio no ponto de acoplamento comum (PAC), disponibilizar opções de controle para o consumidor baseado nas informações elétricas próximas do “tempo real” do consumo para os equipamentos de medidas avançados e até futuras tomadas de decisões do usuário no sistema de energia. O artigo (SINGH et al., 2011, p.307) define-se como inversor multifuncional as funções em um sistema elétrico de geração distribuída como: a transferência de potência ativa gerada através de fontes renováveis de energia (solar ou eólica), o suporte em demanda de cargas reativas conectadas a rede elétrica, a compensação de harmônicos de corrente presentes no PAC e por fim para sistemas trifásicos a compensação de corrente desbalanceada a 3 fios (3F) e de neutro para sistema a 4 fios (3F+1N).

Entretanto nos artigos (BLAABJERG et al., 2016; MARAFAO et al., 2014; JINWEI et al., 2012; YANG et al., 2014), atribuem para os inversores multifuncionais conectados à rede elétrica, os serviços de manter o controle na variação da tensão da rede através da potência reativa sendo compensada, o controle da frequência da rede pela regulação da potência ativa injetada, a dinâmica e comportamento da rede com a inserção de pequenas fontes geradoras de energia, a operação inteligente com a compensação de reativos à noite quando não há irradiação solar através de elementos armazenadores de energia (bateria), a integração flexível de outros

sistemas de geração como eólico, biomassa, carros elétricos, pequenos geradores, etc., onde a comunicação entre eles reduziria o custo total da energia gerada e aumentaria a eficiência do sistema elétrico como um todo.

No algoritmo de controle apresentado no artigo (CARNIELETTO et al., 2009, p.1), pode-se habilitar um Inversor Inteligente, programando assim o fornecimento de energia para as cargas locais e determinando quando a energia armazenada através de sua geração local poderá ser vendida para a rede elétrica. Neste caso a bateria tem um papel importante nesta aplicação, pois traz flexibilidade ao sistema de geração local. O algoritmo de controle do inversor inteligente determina o modo de operação ótimo conforme as leis regulamentadoras do país, isto está baseado na medição avançada em “tempo real” do sistema elétrico, para a precificação da energia naquele dado instante.

O artigo (ZENG et al., 2015, p.1255), apresenta um algoritmo de objeto-orientado assim definido pelos autores, para inversores multifuncionais, utiliza técnicas de Método de Análise Hierárquico do inglês (“Analytic Hierarchy Process” – AHP) para tomada de decisão em como limitar a capacidade do inversor numa rede de distribuição, a compensação de fatores para a qualidade de energia e o mercado futuro de precificação de venda.

Outros algoritmos podem ser utilizados conforme indicam os artigos (AHMADI; WANG, 2014; JIANZE et al., 2004) tais como: Controlador Integral-Proporcional Fuzzy, Algoritmo de Controle Adaptativo, Algoritmo Genético e o Método de 4-Equações em que os resultados são apresentados para a definição do cálculo do ângulo de chaveamento dos inversores e para a detecção das componentes harmônicas para compensação do sistema.

O controle de tensão do conversor está baseado no rastreamento das referências, como por exemplo: a tensão de saída de um inversor de fonte de tensão precisa seguir a referência senoidal a qual está submetida. No artigo (SAMPAIO et al., 2013, p.1039), apresenta-se um dos compensadores mais utilizados para operar em modo linear, o controlador Proporcional-Integral-Derivativo - PID. Em alguns casos, o conversor pode operar fora deste limite, no qual o sistema pode produzir resultados indesejados e no pior caso, o sistema irá operar fora da região de estabilidade.

Nos artigos (SURU et al., 2014; BONALDO et al., 2016; BONALDO, 2015; BRANDÃO et al., 2013a; BRANDÃO, 2013b) tem-se a utilização da Teoria da Potência Conservativa - CPT, propondo uma estratégia de controle de inversor multifuncional, para sistemas de GD. Baseado nas definições de domínio do tempo, para a extração da corrente ativa, reativa e residual que podem ser injetados seletivamente na rede elétrica. Com a decomposição das correntes pela CPT, pode-se aplicar o controle das correntes de referências do conversor de potência, de maneira a mitigar os distúrbios como as harmônicas, o desbalanço e a potência reativa em circuitos com cargas não lineares. No artigo (MARAFÃO et al., 2013; MARAFÃO et al., 2010) tem-se as estratégias de compensação seletiva que são utilizadas para se compensar as cargas reativas, a presença de harmônicas na rede e o desbalanço entre as fases da corrente, sendo elas algumas das decisões que devem ser levadas em consideração como a estratégia do compensador e a sua topologia de construção.

Os artigos (ZAMMIT et al., 2017; BLAABJERG et al., 2006) fornecem conteúdos técnicos e servem como guias de desenvolvimento para controladores de corrente como o Proporcional Ressonante (PR) com compensadores harmônicos

utilizados em sistemas de compensação de harmônicas geradas pelos inversores fotovoltaicos, incluindo o acoplamento realizado com o filtro LCL na rede elétrica.

No estágio de saída dos conversores CC/CA, antes de serem conectados à rede elétrica, utiliza-se filtros passivos para a atenuação da frequência de chaveamento destes semicondutores e também para diminuir as distorções harmônicas em relação a frequência fundamental da rede elétrica. Estes filtros podem ser do tipo L, LC e LCL, conforme apresenta os artigos (FILHO et al., 2014; TANG et al., 2012; LISERRE et al., 2005; ALZOLA et al., 2013; RENZHONG et al., 2013), podendo ser considerados junto com o conversor uma interface de conexão entre o sistema de geração distribuída e a rede principal. Os filtros LCL neste caso (LISERRE et al., 2005; ALZOLA et al., 2013; RENZHONG et al., 2013) ajudam a mitigar o chaveamento das frequências harmônicas injetados na rede elétrica durante a operação dos inversores estáticos. A grande maioria dos inversores empregam filtros do tipo LC, devido a sua facilidade de construção e custo para os sistemas de GD. Entretanto, o filtro LCL pode adicionar para o sistema picos de ressonância e a redução do amortecimento dos controladores, causando problemas de estabilidade no sistema, deteriorando assim a operação do conversor e gerando problemas ainda maiores de QEE para a rede, se estes fatores não forem devidamente tratados no desenvolvimento do filtro LCL (RENZHONG et al., 2013, p.322). Estes problemas podem ser resolvidos com a inserção de resistores de amortecimento em série com os capacitores do filtro LCL, entretanto esta solução reduz a eficiência do conversor devido as perdas por efeito Joule pelo resistor. A melhor solução para este caso é o uso apropriado de técnicas de controle de corrente, que eletronicamente podem emular a resistência e com isto aumentar ou diminuir o amortecimento do sistema e assim mitigar inconvenientes do filtro LCL,

neste caso utilizando um controlador PI juntamente com um conversor PWM proposto no artigo (DANNEHL et al., 2014, p.132) ou um controlador PR proposto no artigo (BLAABJERG et al., 2006).

O artigo (AZOLA et al., 2013, p.2642), apresenta os resultados das perdas passivas pelo efeito “amortecimento” relacionado a perda ôhmica dos capacitores do filtro LCL, sua resistência não deve comprometer a estabilidade e eficiência do filtro. Além de se fazer uma análise das perdas das componentes fundamentais e harmônicas presente no sistema. No artigo (REZNIK et al., 2014), apresenta o desenvolvimento e os resultados do protótipo de um filtro LCL aplicado em um sistema FRE (fonte renovável de energia) com os benefícios que este filtro LCL reflete em um sistema de GD em termos de melhoria de distorção harmônica na rede elétrica.

E por fim, aborda-se o assunto da rede elétrica para os sistemas de GD através de fontes renováveis serão interligados. No artigo (JUSTO et al., 2013; CHAKRABORTY et al., 2015), uma rede inteligente de energia deve possuir as seguintes características como eficiência, sustentabilidade energética e a capacidade de receber diversas FRE, a confiabilidade, segurança e até possibilitando a armazenagem de energia elétrica. Outros fatores a serem levantados como o sensoramento e medições por meio de métodos de controle mais avançados (ex. sem fio), a consciência do uso de cargas, sistemas de gerenciamento de energia em tempo real, a capacidade de reconhecer algumas cargas específicas como: carro elétrico, drives de motores industriais, cargas reativas, além de tomar decisões para conexão na rede ou o ilhamento do sistema de abastecimento pela rede geração e por fim uma informação integrada da

infraestrutura de comunicação sendo ela robusta e segura (JUSTO et al., 2013; CHAKRABORTY et al., 2015).

O artigo (PALIZBAN et al., 2014, p.428), apresenta uma hierarquia baseada na IEC/ISA 62264 para quatro níveis de aplicações no contexto de uma microrrede, conforme apresenta a ilustração na Figura 1.

Figura 1 - Níveis de hierarquia para todo o processo da energia em uma rede elétrica.



A pesquisa bibliográfica realizada neste capítulo, primeiramente trouxe maiores conhecimentos técnicos de cada etapa de um sistema fotovoltaico de geração distribuída em uma rede elétrica, a definição técnica de diferentes autores com relação as funcionalidades que um inversor multifuncional - IMF ou inteligente ao se conectar em uma GD, colocando a definição de multifuncionalidade para um inversor de FRE muito abrangente em relação as aplicações diversas. Outro ponto são as técnicas de controle ou algoritmos utilizados para a melhoria da qualidade da energia elétrica - QEE e o avanço dos filtros passivos na saída dos conversores eletrônicos e seus benefícios. Os próximos capítulos deste trabalho irão tratar da simulação elétrica e os resultados para um sistema trifásico para 3 condutores, onde

a geração da energia pode ser uma FRE, que conectado à rede elétrica opera de forma flexível ou multifuncional para a melhoria da QEE.

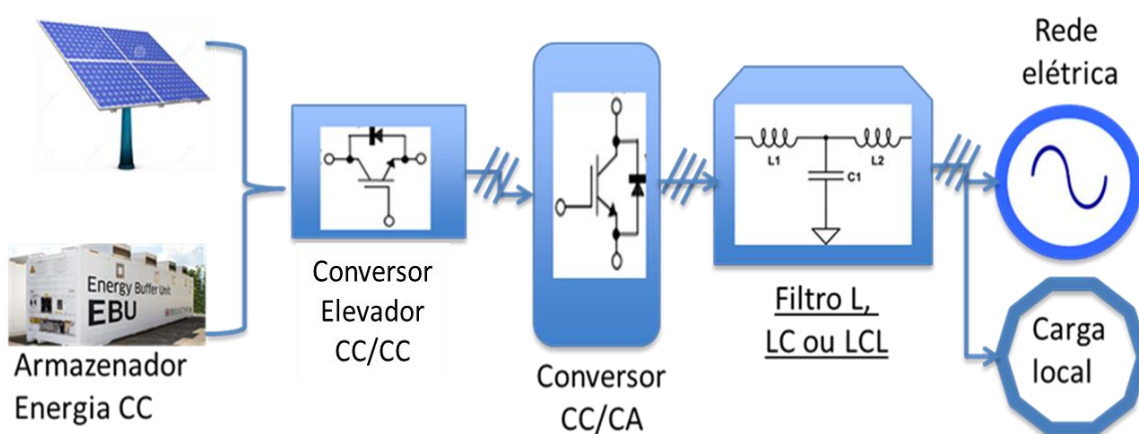
3. FILTROS L, LC e LCL EM CONVERSORES DE POTÊNCIA CC/CA PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS.

Como discutido no capítulo anterior, os conversores de potência são utilizados para a transferência da potência gerada, através de fontes de energias renováveis tais como: solar e vento que poderão ser conectadas a rede elétrica ou operar como sistemas isolados da rede de transmissão. Estes conversores de potência são os responsáveis por gerar componentes harmônicas devido ao chaveamento dos semicondutores através da modulação do circuito conversor de energia, afetando assim a qualidade da energia elétrica no sistema. Para minimizar este efeito, utilizam-se os filtros de ressonância do tipo LC ou LCL largamente empregados para reduzir as componentes harmônicas de alta frequência, (em relação à frequência da rede), quando um inversor CC/CA está conectado ao sistema elétrico. Atualmente, todos os inversores comerciais devem passar por testes avaliatórios, conforme normas técnicas nacionais (RENZHONG et al., 2013, p.322) e internacionais, comprovando assim que estes equipamentos não geram maiores interferências que são estabelecidos, para manter a qualidade da energia elétrica. Neste capítulo, tem-se a avaliação dos resultados encontrados por meio da simulação Matlab® de um circuito trifásico para filtros do tipo L (1ª ordem), LC (2ª ordem) e LCL (3ª ordem) em relação a atenuação das harmônicas para as correntes de *ripple* com diferentes valores de indutância do filtro e a resposta dinâmica quando conectado a uma rede elétrica.

3.1. TOPOLOGIAS DOS FILTROS

Os filtros são a interface de conexão entre o conversor eletrônico de potência CC/CA e a rede elétrica de energia. Durante algum tempo, as pesquisas relacionadas neste tema foram aprofundadas para a investigação destes filtros, de maneira a minimizar os efeitos da distorção harmônica na rede elétrica. A Figura 2 apresenta o esquemático da conexão dos filtros entre os dois sistemas.

Figura 2 - Esquemático geral de um sistema trifásico de fonte renovável na rede elétrica.

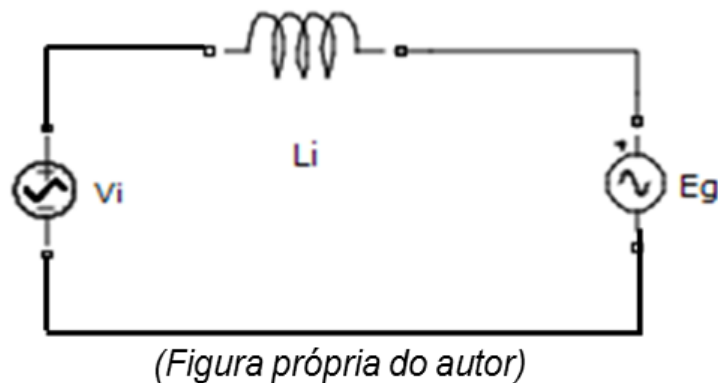


(Figura própria do autor)

3.2. FILTRO L

Este tipo de filtro consiste em apenas um indutor entre o conversor eletrônico e a rede elétrica, sendo um filtro de 1ª ordem com atenuação de aproximadamente 20dB/década. Normalmente emprega-se valores elevados de indutância para alcançar-se a filtragem da frequência de corte desejada. Na Figura 3, tem-se a topologia empregada para um filtro do tipo L, sendo V_i a tensão de entrada e E_g a tensão de saída.

Figura 3 - Topologia de um filtro L.



Na Figura 4 o diagrama de bode apresenta a curva de resposta em frequência e na Figura 5 a dinâmica do filtro com o gráfico de “step response” para o tempo de resposta do filtro. Uma das desvantagens desta topologia é a baixa dinâmica no sistema com relação a queda de tensão no indutor, que ocasiona um grande tempo de resposta do filtro ao sistema. Neste caso, o diagrama de bode é construído a partir da função de transferência do indutor, sendo $Li = 50mH$ no espaço do tempo (s) para a função de transferência do indutor:

$$L(s) = \frac{1}{s.L+1} \quad (1)$$

Figura 4 - Diagrama de bode do filtro L.

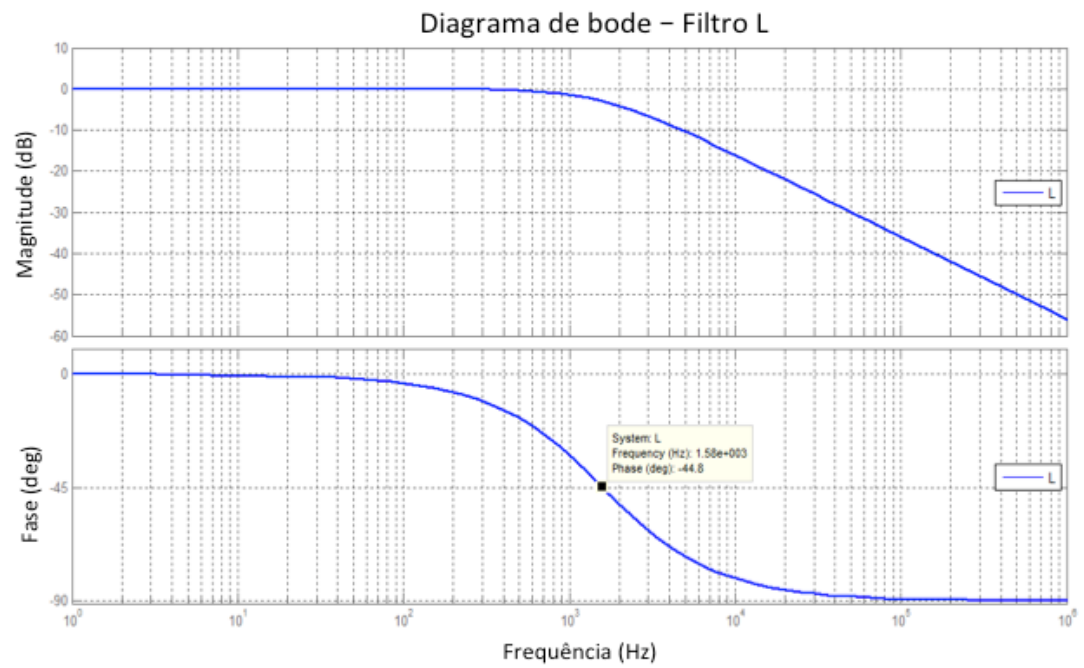
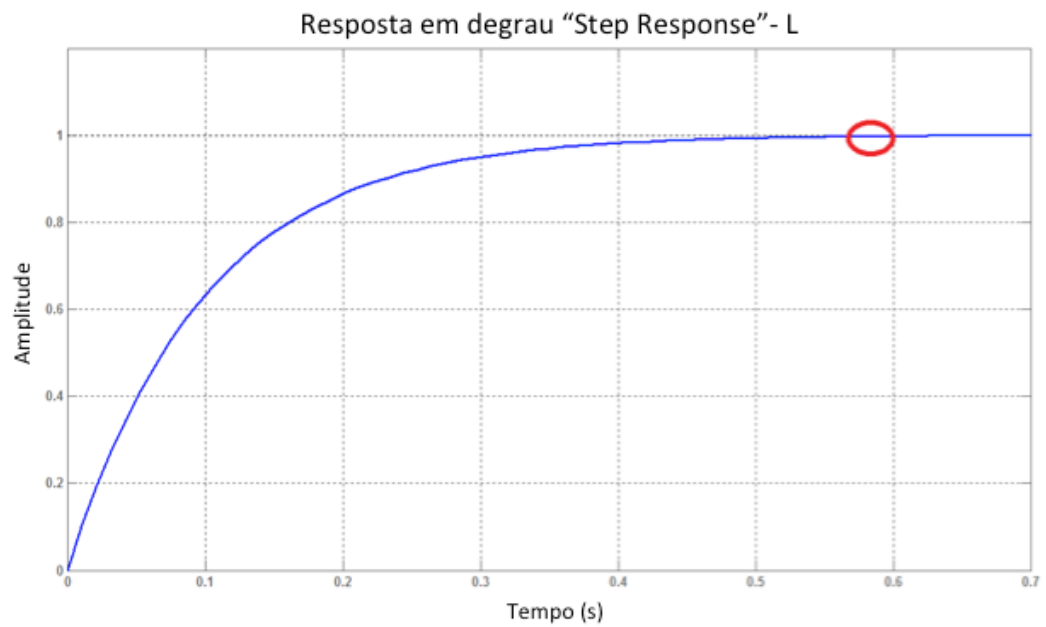


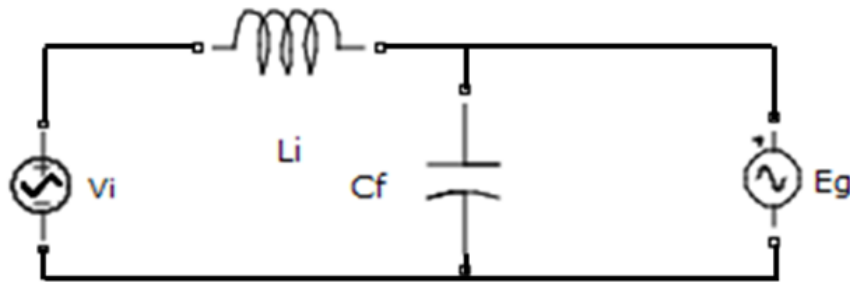
Figura 5 – Curva de Resposta em degrau do filtro L.



3.3. FILTRO LC

Este filtro consiste em um indutor em série com o inversor (CC/CA) e um capacitor em paralelo, sendo assim um filtro de 2ª ordem, conforme ilustra a Figura 6. Este filtro apresenta uma maior atenuação após determinada frequência de corte.

Figura 6 – Topologia de um filtro LC.



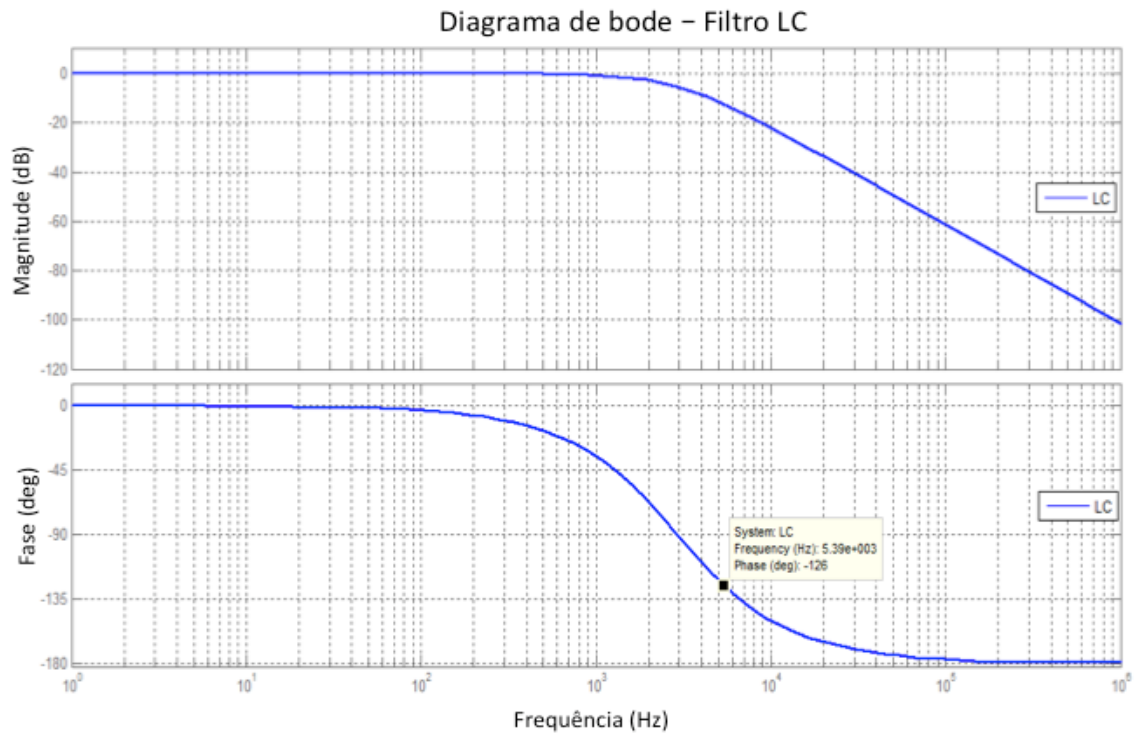
(Figura própria do autor)

Valores altos de capacitância podem ocasionar problemas como grandes picos de corrente - “inrush” na linha. A conexão no sistema depende da tensão na rede, da frequência de ressonância do filtro LC e da impedância característica da rede elétrica. A Eq. 2 demonstra a função de transferência do filtro LC.

$$LC(s) = \frac{1}{s^2 \cdot L_f \cdot C_f + sL_f + 1} \quad (2)$$

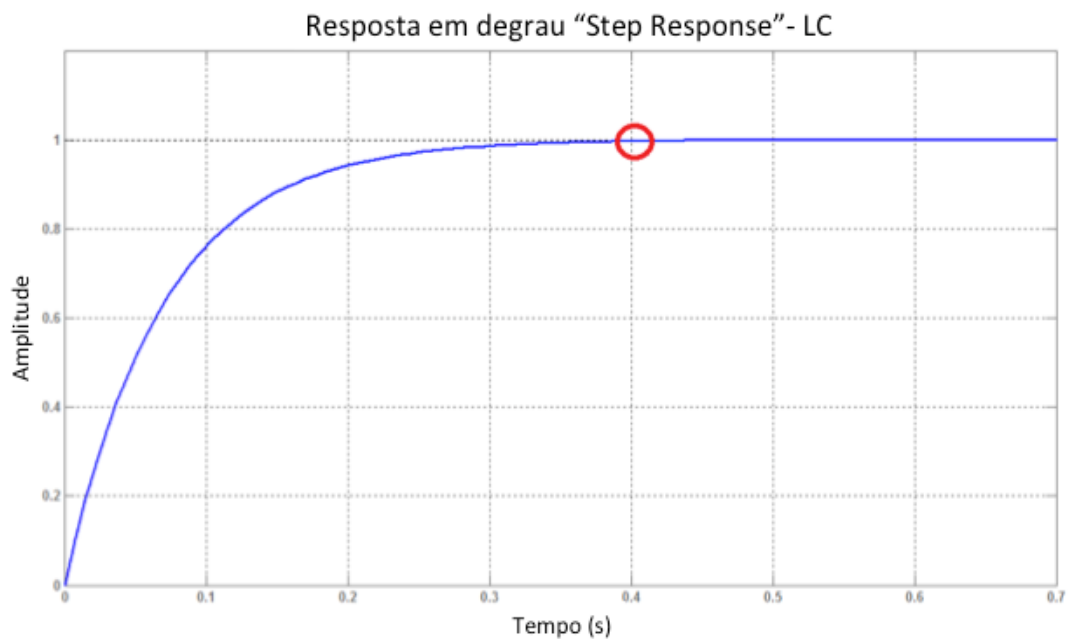
Na Figura 7, tem-se a resposta de frequência e a mudança de fase representado pelo diagrama de bode do filtro LC, a partir da função da transferência (2), para $L_i = 1mH$ e $C_f = 30\mu F$.

Figura 7 – Diagrama de bode do filtro LC para a dada função de transferência.



No diagrama da Figura 8, temos uma resposta adiantada quando comparada em relação ao filtro L, onde em 40ms o filtro já estabilizou a sua resposta no tempo.

Figura 8 - Curva da Resposta em degrau do filtro LC.



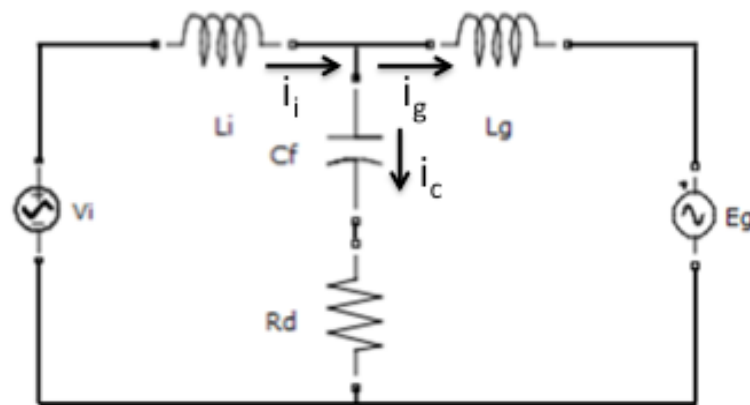
Por ser um circuito LC série, as suas reatâncias (indutivas e capacitivas) em uma dada frequência particular serão iguais em magnitudes, porém com sinais opostos ($X_L = -X_C$), definindo assim como a frequência de ressonância ($-f_0$), conforme a equação (3).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (3)$$

3.4. FILTRO LCL

Este filtro consiste em um indutor em série com o inversor que irá limitar as correntes de *ripple*, um capacitor em paralelo que fará a função de filtro para uma determinada frequência calculada e por fim um segundo indutor em série com a rede melhorando a atenuação do filtro para baixas frequências. Na Figura 9 tem-se a representação elétrica de um filtro do tipo LCL.

Figura 9 – Topologia de um filtro LCL.



(Figura própria do autor)

Um filtro LCL permite a operação com baixas frequências de chaveamento devido a sua atenuação ser de 60dB/década para as harmônicas de chaveamento dos semicondutores, com a vantagem de empregar valores baixos de indutores para uma boa redução do ripple de corrente. Entretanto, este filtro pode trazer alguns efeitos de instabilidade no sistema, caso os parâmetros do conversor não sejam

levados em conta. Para o desenvolvimento de um filtro LCL robusto são necessários os seguintes dados:

- Tensão eficaz de conexão do inversor na rede elétrica;
- Tensão do Link-CC para o capacitor no inversor;
- Potência ativa;
- Frequência da rede em operação;
- Frequência de chaveamento dos semicondutores.

Com relação a topologia do filtro LCL, utiliza-se um resistor de amortecimento em série com o capacitor, para amortecer os picos de corrente na frequência de ressonância do sistema e suavizar a resposta da mudança de fase. Uma outra sistemática de conexão do filtro LCL na rede elétrica é a conexão em estrela (Y) ou em delta (Δ) que será apresentado nos próximos itens. A resposta em frequência do filtro LCL conforme o circuito elétrico da topologia da Figura 9, deve ser levado em consideração a tensão de entrada V_i e a tensão do lado da rede E_g , conforme a Eq. (4):

$$LCL = \frac{ig}{vi} \quad (4)$$

Utilizando as leis de Kirchoff's tem-se que:

$$i_i - i_c - i_g = 0 \quad (5)$$

Levando as correntes e seus componentes para o domínio da frequência tem-se que:

$$v_i - v_c = i_i(sL_i) \quad (6)$$

$$v_c - e_g = i_g(sL_g) \quad (7)$$

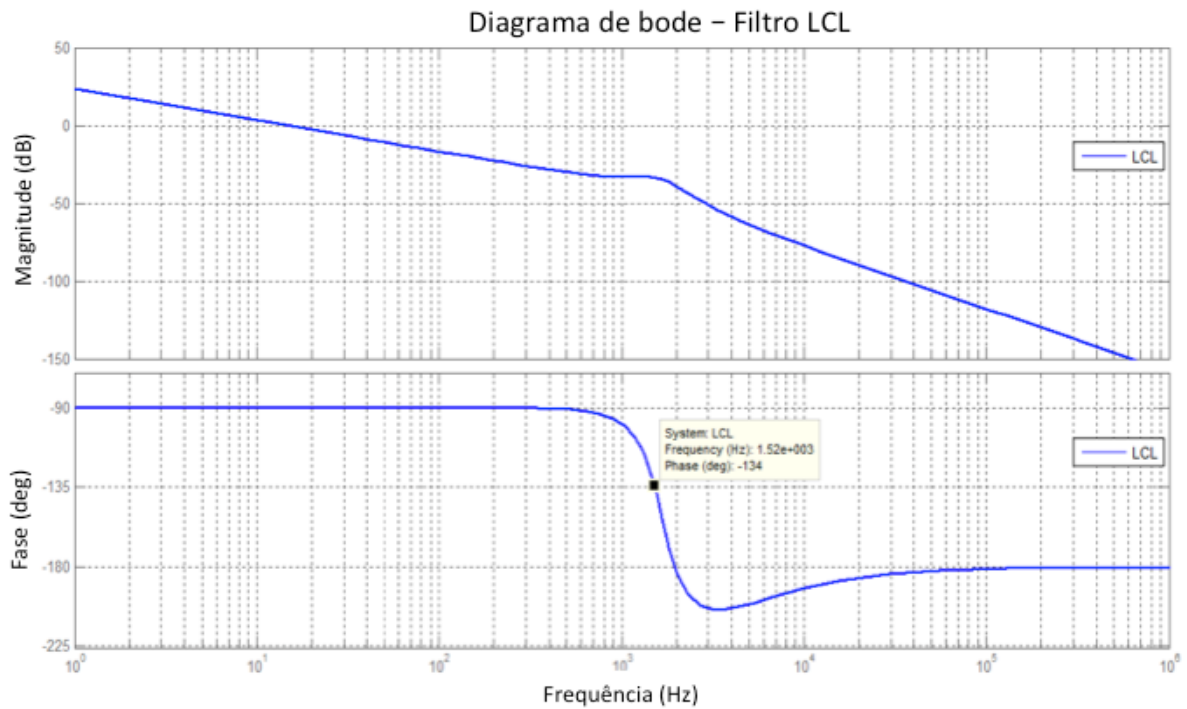
$$v_c = i_c \left(\frac{1}{sC_f} + R_d \right) \quad (8)$$

Substituindo as equações (6), (7) e (8) para a função de transferência do filtro LCL e com algumas manipulações algébricas tem-se que:

$$LCL(s) = \frac{C_f R_f s + 1}{L_1 C_f L_2 s^3 + C_f (L_1 + L_2) R_f s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (9)$$

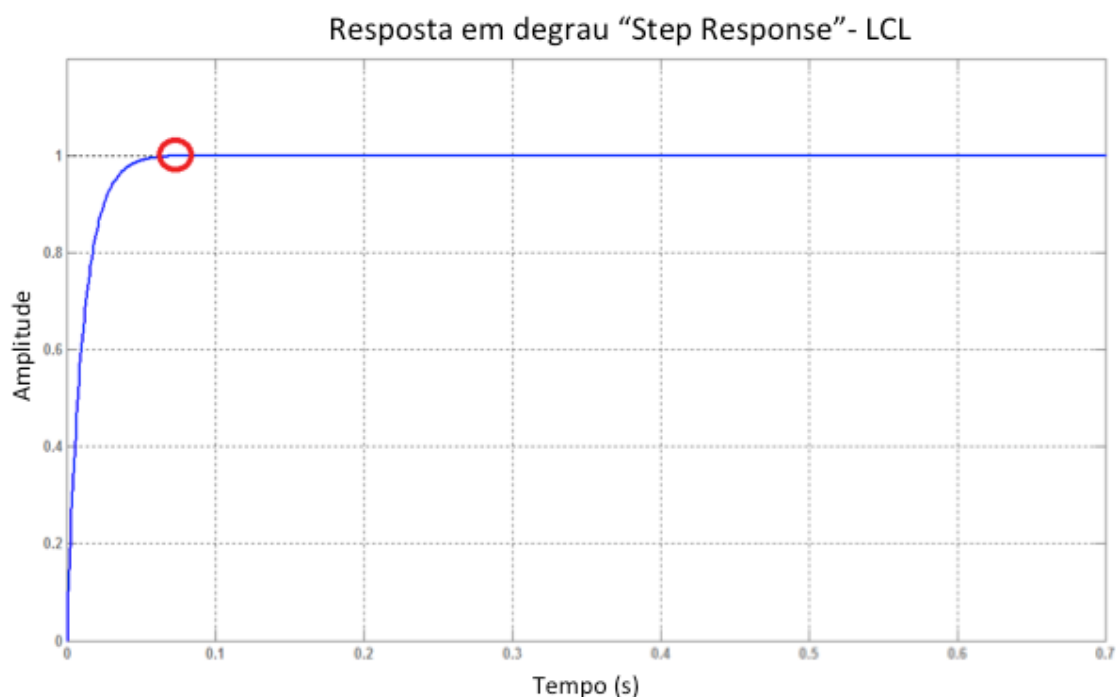
A Figura 10 apresenta o diagrama de bode do filtro LCL com a resposta de frequência característica, onde $L_1 = 10\text{mH}$, $L_2 = 1\text{mH}$, $C_f = 10\mu\text{F}$ e o resistor de amortecimento $R_f = 5\Omega$ para eliminar o pico da corrente de partida - *inrush* do capacitor no instante da transição da frequência de ressonância do filtro. Outro ponto a destacar é a rápida mudança de fase na transição da frequência conforme apresenta o diagrama de bode da Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de bode do filtro LCL para a dada função de transferência.



No diagrama de resposta em degrau da Figura 11, pode-se avaliar uma resposta deste filtro mais rápida comparado ao filtro L, sem ocorrências de oscilações ou instabilidade ao longo do tempo no sistema.

Figura 11 – Curva de Resposta em degrau do filtro LCL.



Conforme pode-se observar nos diagramas de bode dos filtros L, LC e LCL dada as funções de transferência característica deles, os filtros possuem um comportamento diferenciado para a atenuação da frequência de corte conforme apresentam nos diagramas de bode. Outro fator relevante é o gráfico de resposta em degrau de cada um deles, no qual a estabilização do filtro LCL é mais rápido comparado aos filtros L e LC. Na seção a seguir, apresenta-se a definição dos parâmetros do filtro LCL para um sistema elétrico de carga RL e carga não-linear em conjunto.

3.5. DEFININDO OS PARÂMETROS DE PROJETO E CÁLCULO DOS VALORES DOS FILTROS.

Para um sistema trifásico com os parâmetros definidos na Tabela 1, realiza-se o procedimento de cálculo dos valores dos componentes para um filtro LCL em uma potência estimada de 5kVA. A metodologia utilizada nos cálculos foi base das pesquisas realizadas nos artigos (BLAABJERG, 2005, 2006, 2013).

Tabela 1 – Parâmetros do sistema trifásico considerados para o cálculo dos filtros.

Potência nominal do inversor	4Kva
Tensão de linha da rede (V_{rede})	220VCA
Tensão do Link-CC (V_{linkcc})	400VCC
Frequência de chaveamento (f_{chav})	10kHz
Frequência da rede (f_{rede})	60Hz

a) O valor do filtro deve ser definido com base nas características do sistema.

$$Z_b = \frac{(V_{rede})^2}{S_n} = \frac{(220)^2}{4 \cdot 10^3} \cong 12,1\Omega \quad (10)$$

$$L_b = \frac{Z_b}{\omega_n} = \frac{12,1}{2 \cdot \pi \cdot 60} \cong 32mH \quad (11)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_n \cdot Z_b} = \frac{1}{(2\pi)(60)(12,1)} \cong 220\mu F \quad (12)$$

b) Com isto, pode-se calcular o indutor do lado do inversor - L_i , no qual o limite do ripple da corrente de saída é de 20% da sua amplitude nominal. Com isto tem-se a variação da corrente de ripple em:

$$\Delta I_l = 20\% \frac{P_n \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot V_{rede}} = 0,2 \cdot \frac{4000 \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot 220} \cong 1,7A \quad (13)$$

$$L_i = \frac{V_{linkCC}}{20.F_{chav}.\Delta I_i} = \frac{400}{(20).(10.10^3)(1,7)} \cong 1mH \quad (14)$$

- c) O indutor do lado da rede - L_g pode ser calculado por meio de uma relação - r , entre o indutor principal - L_i . Pode-se verificar a influência dos resultados do filtro LCL com a variação do fator " r ", para a definição do L_g , com a demonstração dos resultados em um diagrama de bode. Na equação tem-se estas definições:

$$L_g = r.L_i \quad (15)$$

$$r = 1 \text{ tem-se } L_{g1} = L_i ; L_{g1} = 1mH$$

$$r = 0,5 \text{ tem-se: } L_{g2} = 0,5mH$$

$$r = 0,1 \text{ tem-se: } L_{g3} = 0,1mH$$

- d) O capacitor de filtro - C_f é calculado por meio da variação do fator de potência pelo lado da rede sendo este de 5%. Com isto, o capacitor do filtro pode ser encontrado pela capacitância base - C_b , onde:

$$C_f = 5\% . C_b = 0,05 . 220\mu F \cong 10\mu F \text{ (Valores comerciais)} \quad (16)$$

- e) Com estes valores pode-se encontrar a frequência de ressonância do filtro LCL que tem como característica ter a $f_{res} < f_{chav}$, para o filtro LCL. Com a equação (17) tem-se:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i.L_g.C_f}} \quad (17)$$

Com a variação do indutor - L_g tem-se os seguintes valores respectivamente de f_{res} :

$$f_{res1} = 2,0kHz (L_{g1} = 1mH)$$

$$f_{res2} = 3,2kHz (L_{g2} = 0,5mH)$$

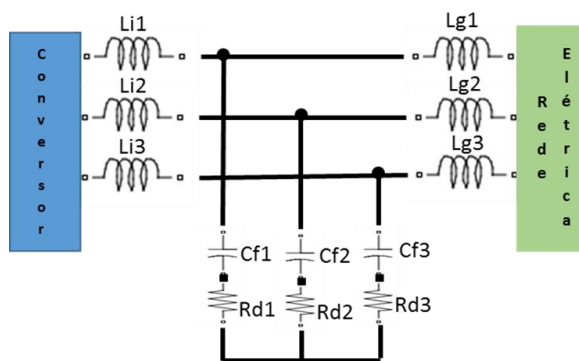
$$f_{res3} = 5,1kHz (L_{g3} = 0,1mH)$$

f) E por fim o resistor de amortecimento (“damping”) pode ser calculado por meio da frequência de ressonância, de maneira a reduzir a oscilação e manter a estabilidade do filtro. Segue equação do R_d :

$$\begin{aligned} Rd_1 &= \frac{1}{3.\omega_{res_1}.C_f} = \frac{1}{3.6356,4.10.10^{-6}} = 3,5\Omega \\ Rd_2 &= \frac{1}{3.\omega_{res_2}.C_f} = \frac{1}{3.7735,8.10.10^{-6}} = 2,8\Omega \\ Rd_3 &= \frac{1}{3.\omega_{res_3}.C_f} = \frac{1}{3.14907,1.10.10^{-6}} = 1,5\Omega \end{aligned} \quad (18)$$

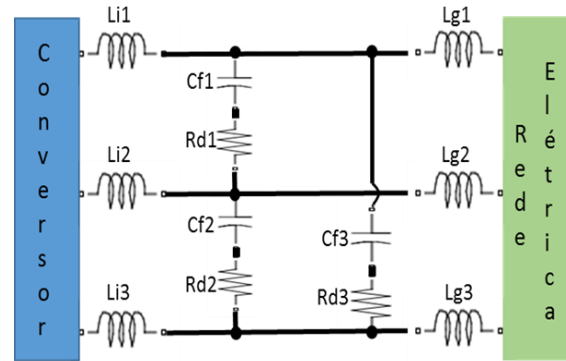
A definição dos valores dos componentes do filtro LCL foi determinado para uma conexão em estrela (Y) dos capacitores - C_f . Entretanto existem duas maneiras de conectar um filtro LCL para um sistema trifásico, no qual está condicionado na maneira em conectar este capacitor de filtro para um sistema trifásico. A Figuras 12 e 13 a seguir, demonstram estas duas maneiras prováveis de conexão estrela ou em triângulo na rede, podendo executar assim a mesma função pretendida, embora tenham algumas vantagens e desvantagens entre estas ligações.

Figura 12 - Filtro LCL em estrela (Y)



(Figura própria do autor)

Figura 13 - Filtro LCL em triângulo (Δ)



(Figura própria do autor)

O procedimento de cálculo e dimensionamento dos componentes do filtro LCL apresentados anteriormente são válidos para ambas as conexões, com exceção do capacitor - C_f e do resistor de amortecimento - R_d . Os valores destas ligações estão relacionados com aspectos como custo do projeto devido ao dimensionamento do capacitor ou com a eficiência do filtro quando aplicado a rede elétrica. Com isto, tem-se dois casos que definem qual topologia da ligação (Y ou Δ) será empregado no filtro LCL.

a) Determinação do capacitor de filtro - C_f e do resistor de amortecimento - R_d .

Os valores do capacitor de filtro C_f e do resistor R_d são baseados na transformação da ligação (Y ou Δ). De acordo com esta transformação, a relação entre o capacitor de filtro e o resistor de amortecimento para as duas ligações são apresentados nas equações (19) e (20).

$$C_{f\Delta} = \frac{C_{fY}}{3} \quad (19)$$

$$R_{d\Delta} = 3.R_{dY} \quad (20)$$

b) Relação da frequência de ressonância (f_{res}) e da Potência reativa (Q).

Na transformação das ligações outro fator que sofre influência devido a alteração do capacitor de filtro é a frequência de ressonância - f_{res} onde a topologia em triângulo reduz numa razão de $\sqrt{3}$ comparado na topologia em estrela. Como consequência, um sistema com topologia triângulo poderá atenuar mais as harmônicas, podendo resultar em um valor de DHT de corrente menor na rede elétrica. Entretanto, a potência reativa - Q devido a variação do capacitor ter aumentado de 3 vezes para a conexão em triângulo, pode resultar em um valor

de fator de potência inferior quando comparado a topologia estrela. Nas equações (21) e (22) tem-se estas relações.

$$f_{res\Delta} = \frac{f_{resY}}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

$$Q_{c\Delta} = 3.Q_{cY} \quad (22)$$

3.6. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E COMPARATIVO DOS FILTROS L, LC e LCL-Y e LCL-Δ.

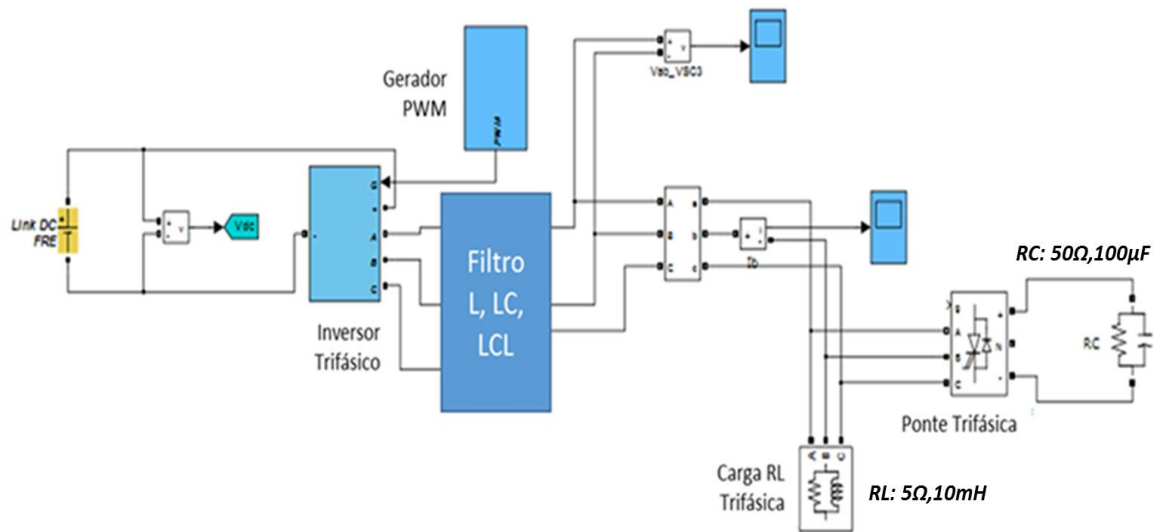
Para a implementação de um circuito trifásico para a simulação dos filtros utilizou-se o software Matlab®. Os parâmetros utilizados nesta simulação estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do sistema trifásico para simulação do sistema trifásico.

Tensão da Rede CA	220V
Tensão CC	400V
Frequência da rede	60Hz
Frequência de chaveamento (f_{chav})	10kHz
Carga RL	5Ω, 10mH
Carga não linear	50Ω, 100μF

A Figura 14, tem-se o circuito de simulação em Matlab utilizado para análise dos resultados para os mesmos parâmetros da tabela 2, onde os filtros do tipo L, LC, LCL-Y e LCL- Δ, obteve-se os resultados para distorção harmônica para tensão e corrente entre as fases.

Figura 14 - Circuito trifásico de simulação Matlab® para resultados dos filtros.



A tabela 3 apresenta os valores utilizados para os filtros L, LC e LCL no circuito de simulação representado na Figura 14.

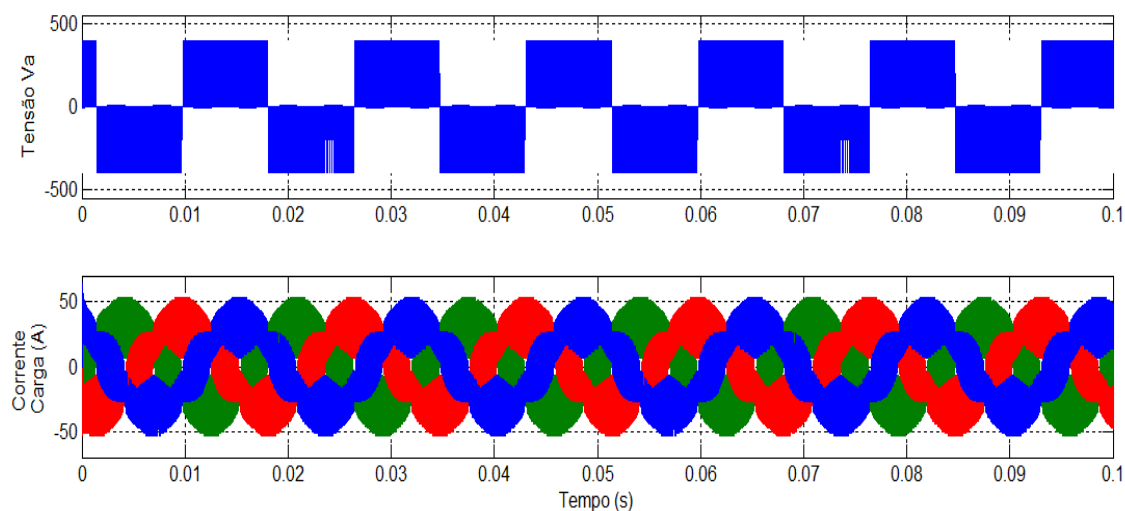
Tabela 3 - Valores dos componentes utilizados na simulação dos filtros.

	<i>Filtro L</i>	<i>Filtro LC</i>	<i>Filtro LCL- Y</i>	<i>Filtro LCL- Δ</i>
Valores utilizados na simulação do Filtro	$L = 1,0\text{mH}$	$L = 1,0\text{mH}$	$L_i = 1,0\text{mH}$	$L_i = 1,0\text{mH}$
		$C = 10\ \mu\text{F}$	$C_{fY} = 10\ \mu\text{F}$	$C_{f\Delta} = 3\ \mu\text{F}$
			$L_g = 0,1\text{mH}$	$L_g = 0,1\text{mH}$
			$R_{dY} = 3\ \Omega$	$R_{d\Delta} = 9\ \Omega$

O filtro passivo, logo após a saída do inversor trifásico, reduz as harmônicas de tensão e corrente, principalmente na atenuação da frequência de chaveamento - f_{chav} , inclusive nas suas múltiplas harmônicas indesejáveis. A Figura 15, apresenta os resultados de tensão e corrente de carga, porém sem nenhum tipo de filtro, resultando assim na presença da frequência de chaveamento do PWM inserido na

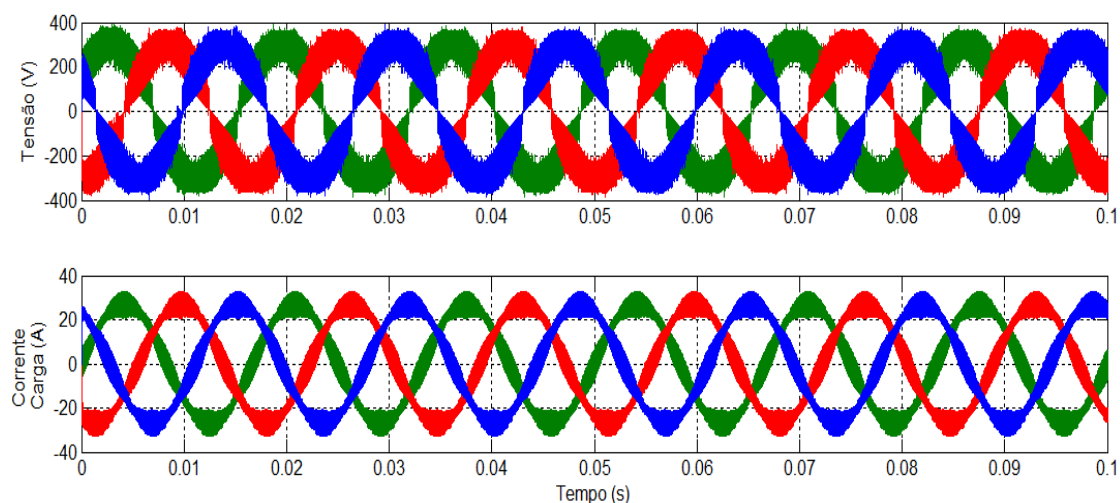
tensão CA, na saída do inversor trifásico, causando uma distorção do sinal conforme a Figura 15.

Figura 15 - Tensão da fase A e corrente trifásica da carga para o circuito sem filtro.



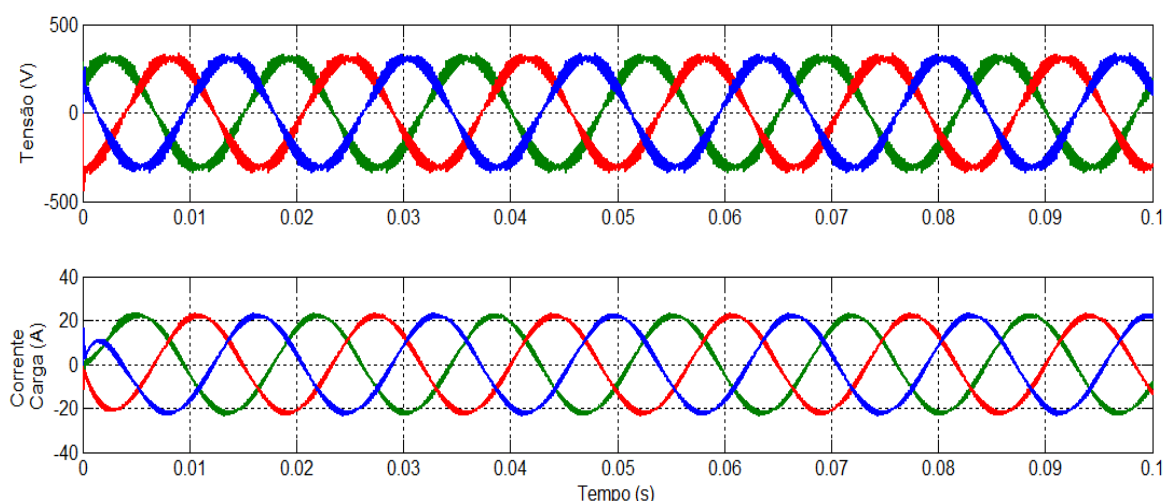
Para o circuito da Figura 14, simulado em Matlab®, o filtro do tipo L reduziu as correntes harmônicas provenientes do chaveamento (10kHz) do inversor trifásico, comparado com a forma de onda da tensão na Figura 15, obtendo assim uma distorção menor para a tensão e corrente na rede elétrica, conforme é possível verificar na Figura 16.

Figura 16 – Tensões e correntes para o filtro do tipo L.



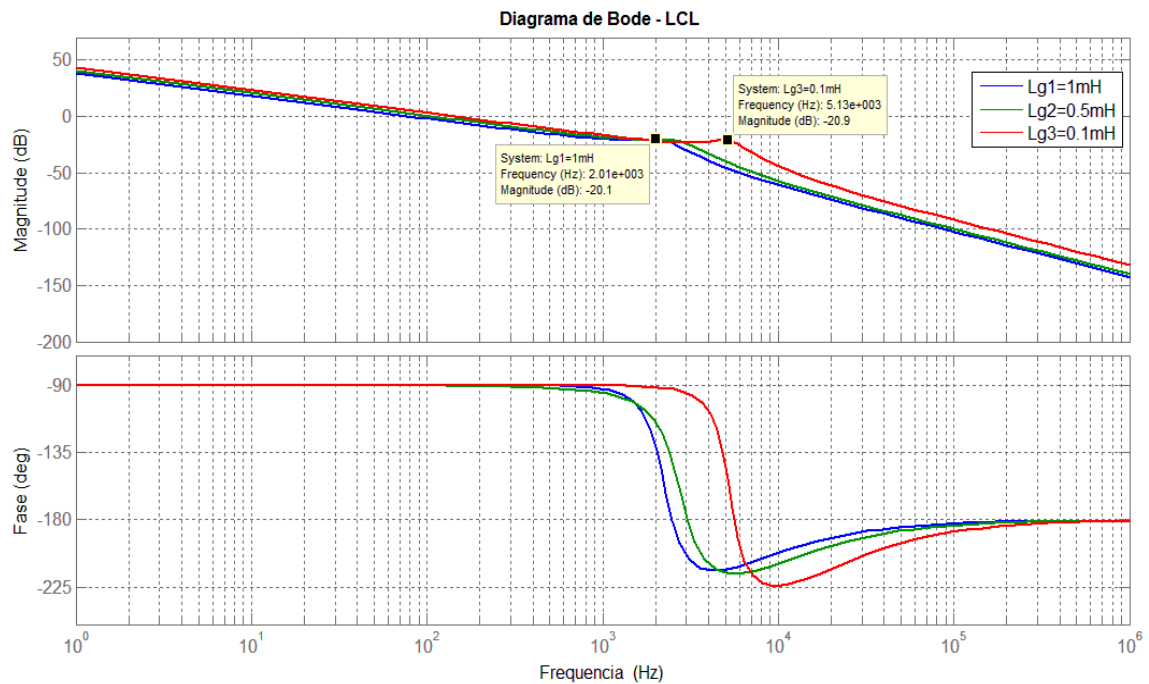
Para os resultados encontrados no filtro LC, obteve-se uma melhor atenuação da distorção quando comparado ao filtro L para a frequência de chaveamento do PWM, no qual é calculado os componentes L_i e C_f deste tipo de filtro, formando assim um circuito ressonante. Este filtro é largamente empregado em conversores CC/CA, devido ser um circuito de 2ª ordem onde as reatâncias indutivas e capacitivas se anulam para uma determinada frequência - f_o . A Figura 17 apresenta o resultado da tensão e corrente para o filtro LC.

Figura 17 - Tensões e correntes para o filtro LC.



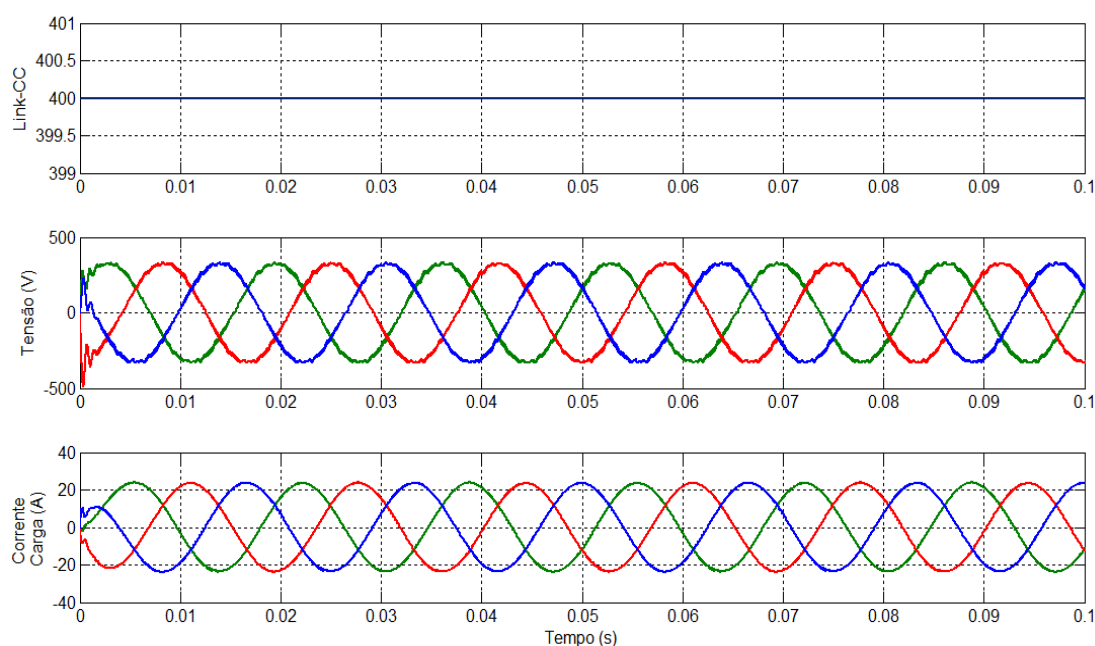
Para o filtro LCL temos duas configurações possíveis: Ligação em Estrela (Y) e em Triângulo (Δ), em que o capacitor - C_f e o resistor - R_d tem seus valores alterados para estas configurações. Com relação a frequência de chaveamento do inversor, o filtro LCL emprega grande atenuação em sua magnitude para a tensão e corrente de linha. O indutor do lado da rede - L_g , pode ser utilizado com o mesmo valor de L_i , ou uma relação com o fator - r para o cálculo de L_g , que irá afetar diretamente a frequência de ressonância do filtro LCL e poderá agir na atenuação da distorção harmônica final, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Curva de resposta conforme diagrama de bode para a variação do indutor L_g no filtro LCL.



Um aspecto importante é que a frequência de ressonância neste filtro é menor que a frequência de chaveamento do circuito PWM, ($f_{\text{res}} \ll f_{\text{chav}}$), aumentando assim a robustez do sistema para a sua estabilidade. O capacitor - C_f é baseado em 5% do valor da capacitância base da rede. E por fim, o resistor de amortecimento - R_d , a fim de evitar picos de corrente na linha do capacitor (i_{rush}) aumentando a estabilidade do filtro. No resultado das tensões de linha e correntes de carga para o Filtro LCL, percebe-se quase a ausência de frequência harmônica na forma de onda com relação ao filtro L, inclusive com menor valor de pico de corrente para uma mesma carga utilizada na simulação.

Figura 19 - Tensões e correntes para o filtro do tipo LCL e tensão do Link CC.



Na tabela 4 tem-se os resultados encontrados para a distorção harmônica da tensão e corrente dos filtros L, LC e LCL utilizando a ferramenta de análise do Matlab® – powergui (FFT Analysis). Avaliando-se as grandezas de tensão de linha e corrente de carga em menos 12 ciclos (0.2s) e uma frequência maior que o chaveamento do PWM de 10kHz para visualização das harmônicas.

Tabela 4 - Valores de DHT_v e DHT_i para os filtros utilizados na simulação.

	<i>Sem filtro</i>	<i>Filtro L</i>	<i>Filtro LC</i>	<i>Filtro LCL- Y</i>	<i>Filtro LCL- Δ</i>
DHT_v (%)	30,4%	8,5%	2,7%	1,8%	1,9%
DHT_i (%)	11,4%	3,9%	1,3%	0,5%	0,4%

Nas Figuras 20 a 24, tem-se as análises das FFT correspondentes a cada filtro para valores de tensão CA e corrente de carga. As cargas utilizadas (RL e Não-linear) permaneceram inalteradas para todos os casos de filtro durante a simulação.

Figura 20 – Análise da FFT para Tensão e Corrente sem filtro no inversor.

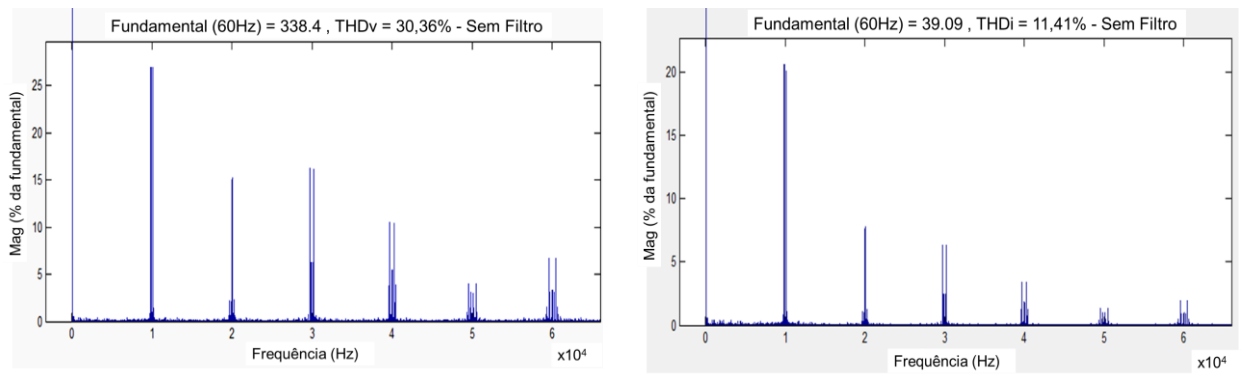


Figura 21 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro L.

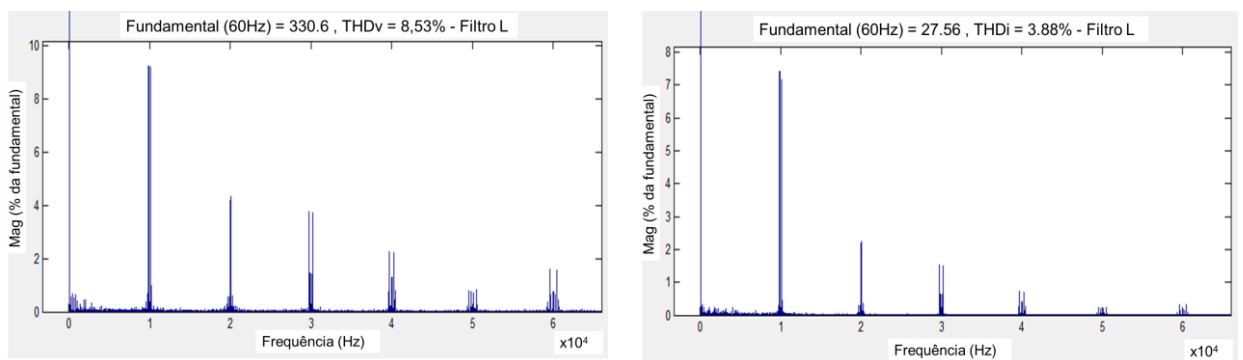


Figura 22 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro LC.

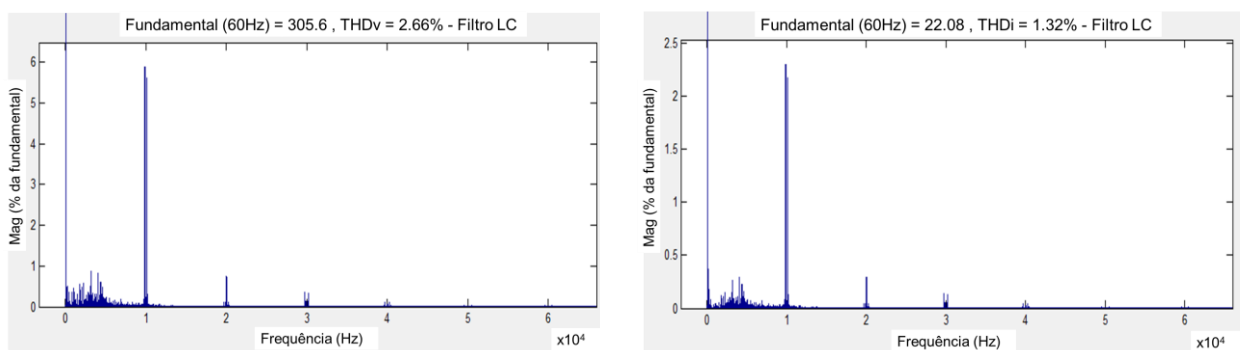


Figura 23 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro LCL- Y.

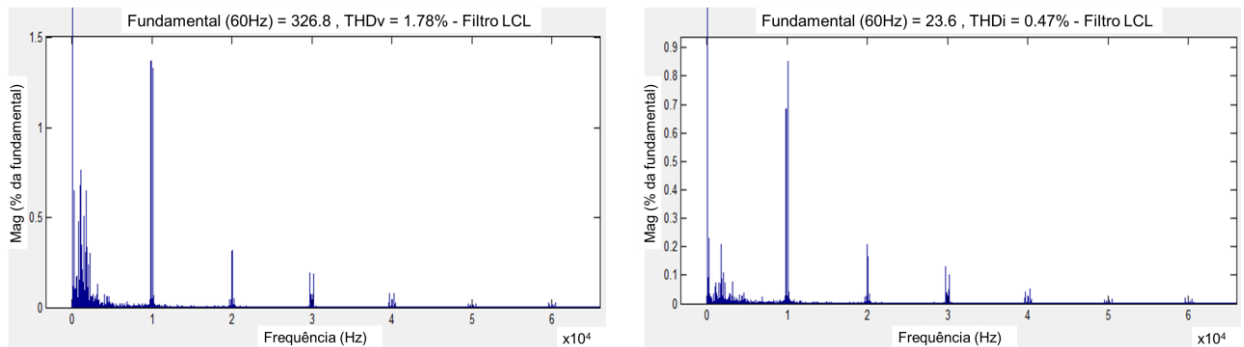
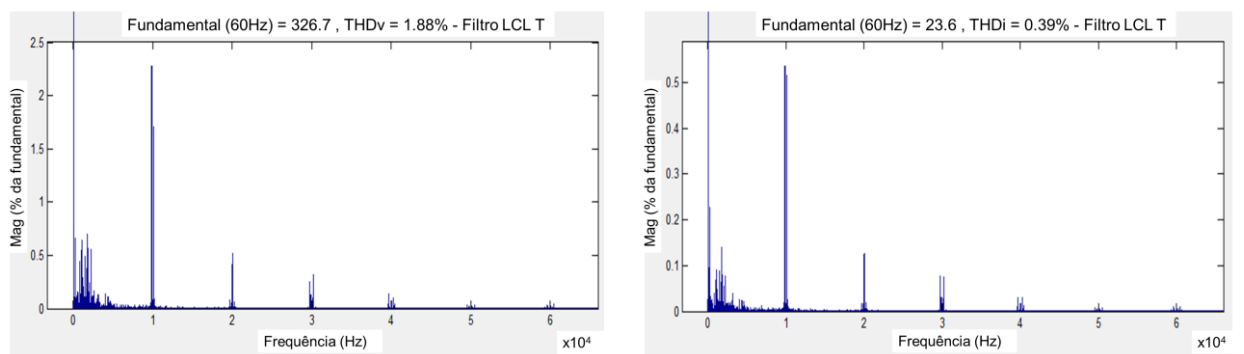


Figura 24 – Análise da FFT para Tensão e Corrente para o filtro LCL- Δ.



Neste capítulo, pode-se verificar os filtros passivos utilizados em um conversor trifásico CC-CA, que ao ser conectado na rede elétrica, pode provocar diferentes valores de distorção harmônica de tensão e corrente (DHTv e DHTi), no qual o projeto do conversor deverá atender a legislação vigente de cada região/país para a inserção de DHT na rede de fornecimento de energia. Com a metodologia de desenvolvimento do filtro LCL aqui utilizado, que será empregado nos próximos capítulos deste trabalho, para a avaliação de um conversor trifásico que realiza a injeção de potência ativa na rede elétrica, além da compensação de distúrbios presentes devido as cargas do consumidor.

4. COMPENSAÇÃO DE CORRENTES DE REFERÊNCIA PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS UTILIZANDO FONTE DE CORRENTE CONTROLADA

Este capítulo apresenta um sistema trifásico de controle flexível, que fará a compensação de correntes indesejáveis que impactam diretamente na Qualidade da Energia Elétrica - QEE, utilizando um modelo de fonte de corrente controlada. Esta análise do controle flexível com a injeção das correntes de referência, por meio desta fonte de corrente controlada é realizada de maneira a isolar as possíveis interferências em que um sistema de controle e o conversor CC/CA possam influenciar negativamente o resultado final da compensação dos distúrbios. Para a decomposição das correntes de referência: corrente reativa balanceada - i_{rm}^b , corrente de desbalanceamento - i_m^u e corrente residual - i_{vm} , sendo todas elas decompostas por fase - m , utilizou-se a Teoria de Potência Conservativa - CPT, em um dado sistema trifásico com um fator de potência não ideal ($\lambda \neq 1$), devido as suas cargas reativas, desbalanceadas e não lineares, presentes no sistema que aqui será avaliado.

4.1. DECOMPOSIÇÃO DAS CORRENTES DE REFERÊNCIA

A CPT (PAREDES,2011) é definida no domínio do tempo e pode ser aplicada em sistemas monofásicos e polifásicos, com ou sem condutor de retorno, com formas de onda senoidais ou não, equilibradas ou não, de período T e frequência angular $\omega = 2\pi/T$. Assim, duas grandezas conservativas principais são definidas, a primeira é a *potência ativa* - (P) , a qual é expressa por:

$$P = \langle \underline{v}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt \quad (21)$$

Na equação (21) a operação $\langle \rangle$ representa o produto interno entre os vetores de tensão $\underline{v}$ e corrente $\underline{i}$, o que pode ser calculado por um filtro de média móvel. A segunda grandeza é a *energia reativa* - dada por W_r :

$$W_r = \langle \underline{\hat{v}}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T (\hat{v}_a i_a + \hat{v}_b i_b + \hat{v}_c i_c) dt \quad (22)$$

Na equação (22), $\underline{\hat{v}}$ é o vetor das integrais das tensões de fase, com valor médio removido. Com base nas definições de potência ativa e energia reativa, a CPT propõe uma decomposição da corrente em parcelas ortogonais que visam representar os fenômenos físicos (características do circuito), provocados pelas cargas (elementos lineares e não lineares). Tais parcelas são descritas a seguir:

- Corrente ativa balanceada - i_{am}^b

$$i_{am}^b = \frac{P}{V^2} v_m = \left(\frac{P}{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \right) \cdot v_m = G^b \cdot v_m \quad (23)$$

Sendo: G^b é a condutância equivalente balanceada (igual para cada fase), medidas em Siemens - S. Já $V = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}$ é o valor eficaz coletivo da tensão e as fases $m \in \{a, b, c\}$.

A corrente ativa i_{am}^b é definida como a corrente de norma mínima (ou seja, com mínimo valor eficaz) necessária para transportar potência ativa P através dos terminais da carga.

- Corrente reativa balanceada - i_{rm}^b

$$i_{rm}^b = \frac{W_r}{\hat{V}^2} \hat{v}_m = \left(\frac{W_r}{\hat{V}_a^2 + \hat{V}_b^2 + \hat{V}_c^2} \right) \cdot \hat{v}_m = B^b \hat{v}_m \quad (24)$$

Sendo: B^b é a reatividade equivalente balanceada (igual para cada fase), média em (H^{-1}) , sendo ela uma grandeza inversa da indutância. Já

$\hat{V}^2 = \hat{V}_a^2 + \hat{V}_b^2 + \hat{V}_c^2$ é o valor eficaz coletivo da tensão sem valor médio.

A corrente reativa $\hat{i}_r$ é a parcela de corrente de norma mínima (mínimo valor eficaz) necessária para transportar energia reativa através dos terminais da carga.

- Corrente de desbalanço - i_m^u : composta por uma parte ativa e reativa que representam os diferentes valores de condutância e reatividade equivalente por fase, sendo definida como (25).

$$i_m^u = (G_m - G^b)\hat{V}_m + (B_m - B^b)\hat{V}_m \quad (25)$$

Sendo: $G_m = P_m / V_m^2$ e $B_m = W_{rm} / \hat{V}_m^2$, são a condutância e a reatividade equivalente por fase respectivamente. Observa-se que, quando $G_m = G^b$ e $B_m = B^b$, a carga resultante é balanceada ($i_m^u = 0$).

- Corrente residual (distorção): parcela de corrente que não transfere potência ativa nem energia reativa (não linearidades entre a tensão e a corrente da carga), definida conforme (26).

$$i_{vm} = i_m - i_{am}^b - i_{rm}^b - i_m^u \quad (26)$$

Todas as componentes de corrente decompostas da CPT são ortogonais entre si, pois o produto interno entre as componentes resulta nulo. Assim, a corrente medida no PAC de um sistema trifásico qualquer, pode ser decomposta em (27).

$$i_m = i_{am}^b + i_{rm}^b + i_m^u + i_{vm} = i_{am}^b + i_{nam} \quad (27)$$

Tal que, m representa as fases de sistema trifásico, i_{am}^b é o vetor das correntes ativas balanceadas por fase e i_{nam} é o vetor das correntes não ativas por fase. Sendo assim, é possível definir a relação entre os valores eficazes coletivos dessas parcelas e o valor eficaz coletivo da corrente total, conforme (28).

$$I^2 = I_a^{b^2} + I_r^{b^2} + I^{u^2} + I_v^2 = I_a^{b^2} + I_{na}^2 \quad (28)$$

4.2. DECOMPOSIÇÃO DA POTÊNCIA APARENTE E FATOR DE POTÊNCIA

A potência aparente da carga pode ser decomposta, em relação aos vários termos de corrente, da seguinte forma:

$$A = V \sqrt{I_a^{b^2} + I_r^{b^2} + I^{u^2} + I_v^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2} \quad (29)$$

Sendo: P é a potência ativa, Q é a potência não ativa, N é a potência de desbalanço e D é a potência residual (distorção). Observa-se que diferentemente da potência ativa - P , todas as outras parcelas de potência caracterizam um aspecto não ideal da carga. Devido a propriedade de ortogonalidade dos termos de corrente ativa e não ativa é possível definir diferentes fatores, para a caracterização seletiva da rede.

- Fator de reatividade (λ_Q) – é o fator relacionado para a potência reativa - Q , dada pela equação (30). Este fator desaparece, se tornando $\lambda_Q = 0$, quando o sistema é totalmente ausente de elementos armazenadores de energia, isto é, se tornando uma carga puramente resistiva.

$$\lambda_Q = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (30)$$

- Fator de assimetria (λ_N) – é o fator relacionado para a potência de desbalanço – N , dada pela equação (31). Este fator desaparece, se tornando $\lambda_N = 0$, quando o sistema não possuir o desbalanço de correntes entre as fases, devido as cargas trifásicas desbalanceadas.

$$\lambda_N = \frac{N}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2}} \quad (31)$$

- Fator de não linearidade (λ_D) – é o fator relacionado para a potência residual – D , dada pela equação (32). Este fator desaparece, se tornando $\lambda_D = 0$, quando o sistema não possuir distorções harmônicas de corrente, em relação a frequência fundamental da rede.

$$\lambda_D = \frac{D}{A} = \frac{D}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2}} \quad (32)$$

Assim, o fator de potência (λ), resulta em (33).

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_{na}^2}} \quad (33)$$

Sendo: P_{na} é a potência não ativa. Detalhes sobre o equacionamento e as propriedades dos operadores matemáticos associados às definições da CPT são discutidos em (PAREDES, 2011). Note-se que, todas as equações discutidas nos parágrafos precedentes são válidas independentemente da forma de onda da tensão e da corrente.

4.3. ESTRATÉGIA DE CONTROLE FLEXIVEL PROPOSTA.

Com base no fator de potência definido na equação (33), para a decomposição dos fatores indesejáveis em uma potência não ativa - P_{na} , pode-se alcançar o fator de potência ideal ($\lambda = 1$), eliminando as correntes não ativas (reativa, desbalance e residual) em um sistema trifásico com cargas reativas, desbalanceadas e não lineares. Com isto, utilizou-se a técnica de controle flexível de conversores multifuncionais trifásicos, os quais podem ser conectados na rede elétrica com tensões distorcidas e desequilibradas devido as cargas e distúrbios presentes ao longo da distribuição da rede elétrica. As correntes de referência (i_r, i^u, i_v) geradas pela estratégia flexível devem levar à compensação parcial ou total de diferentes distúrbios em um PAC, com o intuito de melhorar a forma de onda de corrente pela rede, possibilitando a obtenção de resultados específicos em função da disponibilidade da energia da fonte local e da capacidade nominal do CEP. Para este efeito, as correntes de referência que se aplicam na compensação de distúrbios da corrente total, caso esteja presente em cada uma das m fases do sistema, pode ser definida como:

- Corrente balanceada reativa por fase:
$$i_{ref_rm}^b = i_{rm}^b - k_r i_{rm}^b = i_{rm}^b (1 - k_r) \quad (34)$$

- Corrente desbalanceada por fase:
$$i_{ref_m}^u = i_m^u - k_n i_m^u = i_m^u (1 - k_n) \quad (35)$$

- Corrente residual por fase:
$$i_{ref_vm} = i_v - k_v i_{vm} = i_{vm} (1 - k_v) \quad (36)$$

Agrupando as correntes não ativas - i_{nam} em uma única expressão tem-se que:

$$i_{ref_nam} = i_{nam} (1 - k) = (i_{rm}^b + i_m^u + i_{vm}) (1 - k) \quad (37)$$

Tal que, k é o coeficiente de compensação para todas as correntes não ativas, k_r o coeficiente de compensação somente para a parte reativa, k_n o coeficiente de

compensação para o desbalanço entre fases e k_v o coeficiente de compensação das distorções harmônicas. Estes coeficientes ponderam a porcentagem do nível da corrente de referência de compensação e podem conter valores que variam entre 0 e 1, proporcionando que cada distúrbio seja compensado em parcial ou total separadamente. Quando estes coeficientes são diferentes de zero ($k_r, k_n, k_v \neq 0$), acontece a compensação parcial e as correntes remanescentes, isto é, não compensadas, resultam em (38), (39) e (40).

$$i_{rm}^* = i_{rm} - i_{ref_rm} = k_r i_{rm} \quad (38)$$

$$i_m^{*u} = i_m^u - i_{ref_m}^u = k_n i_m^u \quad (39)$$

$$i_{vm}^* = i_{vm} - i_{ref_vm} = k_v i_{vm} \quad (40)$$

Os valores eficazes destas componentes são apresentados por (41), (42) e (43).

$$I_r^* = k_r I_r \quad (41)$$

$$I^{*u} = k_n I^u \quad (42)$$

$$I_v^* = k_v I_v \quad (43)$$

Novamente, o valor eficaz de cada componente pode ser substituído por corrente não ativa eficaz - $I_{na} = (I_r + I^u + I_v)$, originando assim a definição (44).

$$I_{na}^* = k I_{na} \quad (44)$$

Com isto, o novo fator de potência (desejado), que indica o quanto o sistema compensado está próximo de se comportar como uma carga resistiva, pode ser calculado por (45):

$$\lambda^* = \frac{I_a^b}{\sqrt{I_a^{b^2} + I_{na}^{*2}}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_{na}^{*2}}} \quad (45)$$

Devido a propriedade de ortogonalidade entre as componentes de corrente, cada fator de conformidade da carga pode ser ajustado de forma independente, em qualquer porcentagem, proporcionando, assim, a devida flexibilidade para cada necessidade de compensação conforme a estratégia assim desejada. Assim, o coeficiente de compensação é obtido a partir de (33), (44) e (45), conforme:

$$k = \frac{\lambda}{\lambda^*} \sqrt{\frac{1 - \lambda^{*2}}{1 - \lambda^2}} \quad (46)$$

Sendo o coeficiente k , representado por (k_r, k_n, k_v) com o devido fator de reatividade - λ_Q , fator de assimetria - λ_N e fator de não linearidade - λ_D , apresentado nas equações (30), (31) e (32), para a faixa de valores de λ^* podendo variar entre λ e 1 para a equação (46).

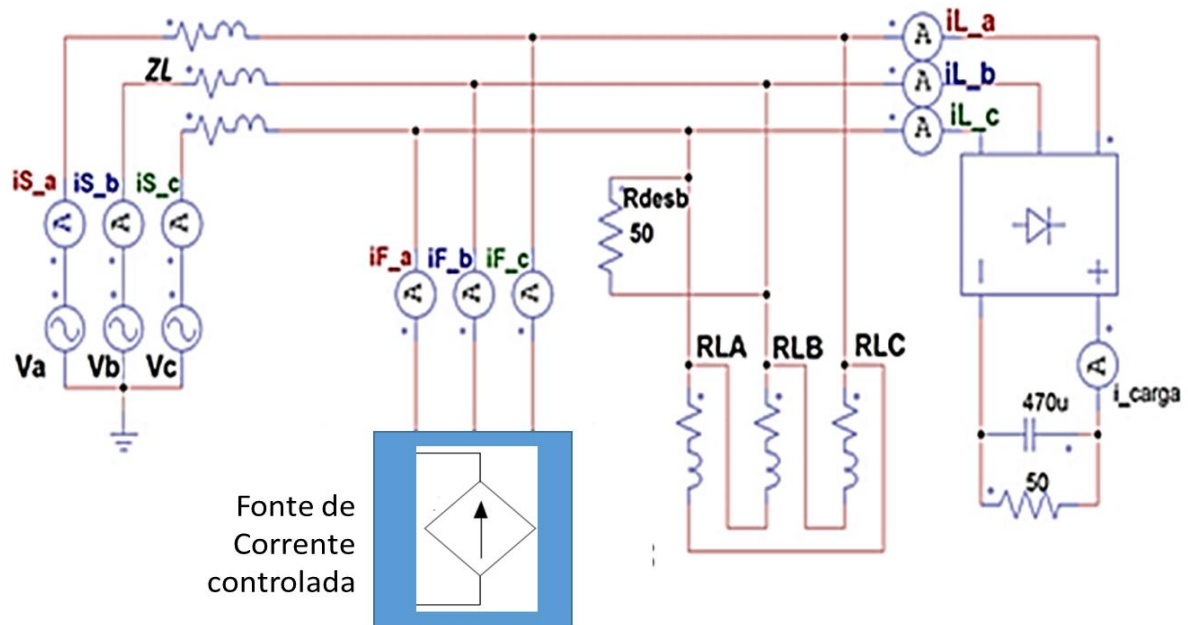
Com estas definições da CPT, tem-se a metodologia de geração dos sinais de referência, com uma estratégia flexível de compensação dos distúrbios (correntes não-ativas), elaborando-se um sistema trifásico para simulação e avaliação dos resultados encontrados para certas situações não lineares.

4.4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS PARA UM SISTEMA TRIFÁSICO COM UM CONTROLE FLEXÍVEL.

As simulações realizadas nesta seção foram implementadas por meio do software Powersim - PSIM®, um circuito trifásico de tensão alternada alimentando cargas reativas e não-lineares foi simulado para um sistema de geração de distribuição de energia elétrica, proporcionando um fator de potência na rede de $\lambda = 0,8$. Inicialmente nenhuma compensação de distúrbios é realizado neste sistema por um Filtro Ativo de Potência (FAP), em um circuito de fonte de corrente controlada que fará a injeção das correntes de referência - iF_m para cada distúrbio de QEE a

ser compensado. O sistema elétrico aqui simulado irá executar a compensação dos fatores reativos, desbalanceamento e residual (k_r, k_n, k_v), parcialmente ou total, conforme a estratégia do controle flexível, contribuindo assim para a fonte de geração de energia na melhoria da QEE e do fator de potência da rede elétrica. Na Figura 25, tem-se o diagrama esquemático da simulação deste sistema trifásico a 3 fios (3F), com cargas reativas, carga desbalanceada entre fase e carga não-linear, que será utilizado para todos os casos de simulação.

Figura 25 – Diagrama esquemático do sistema trifásico com controle flexível para a compensação dos distúrbios de correntes não ativas.



(Figura própria do autor)

Para os diversos tipos de casos de uso utilizados na simulação tem-se:

1. Fonte de tensão puramente senoidal, com carga RL (resistiva-indutiva) balanceada entre as 3 fases;
2. Fonte de tensão não senoidal, com adição de 5% da tensão total de 5ª e 7ª harmônica para cada fase e carga RL balanceada;

3. Fonte de tensão senoidal e com carga RL neste caso desbalanceado;
4. Fonte de tensão não senoidal e carga RL desbalanceada;
5. Fonte de tensão senoidal, carga RL balanceada e a presença de carga não-linear;
6. Fonte de tensão não senoidal, carga RL desbalanceada e carga não-linear.

A tabela 5, apresenta os instantes de simulação para todos os casos, simulados, com a devida estratégia de compensação dos distúrbios para apresentação dos seus resultados.

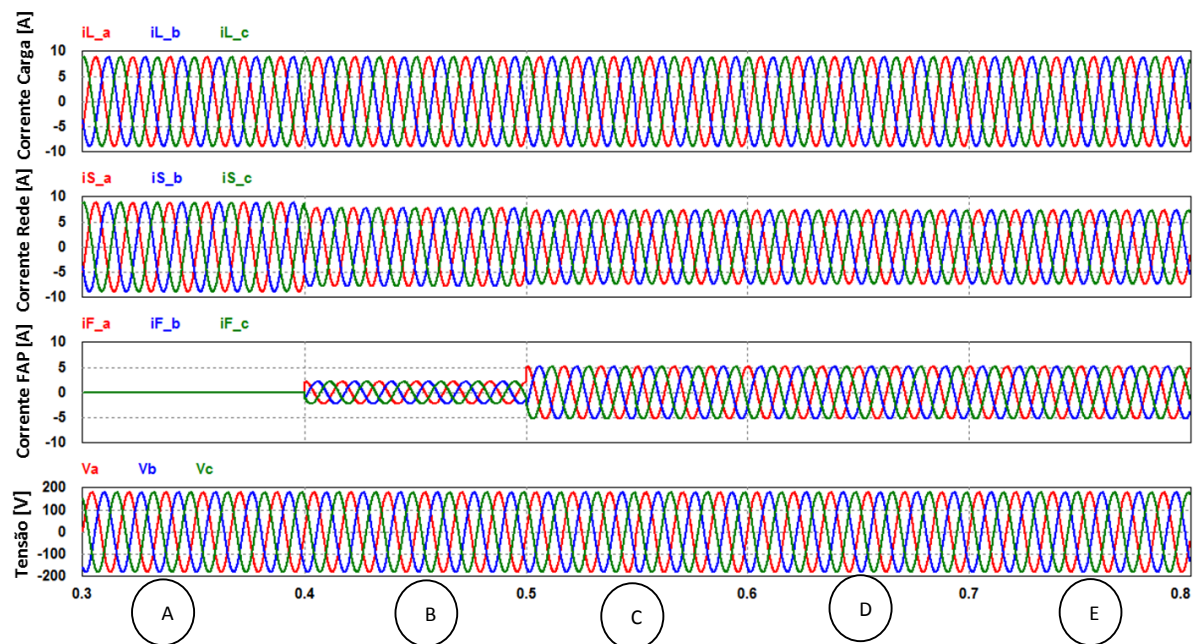
Tabela 5 - Tempos da simulação para a compensação de correntes não ativas pelo controle flexível, para os casos citados.

Marcação	Instante da simulação	Compensação
A	$t < 0,4s$	Sem compensação, instante inicial.
B	$0,4 < t < 0,5s$	50% de compensação de reativos - k_r
C	$0,5 < t < 0,6s$	100% de compensação de reativos - k_r
D	$0,6 < t < 0,7s$	50% de compensação de desbalanço - k_n e mais 100% de k_r
E	$0,7 < t < 0,8s$	100% de compensação de desbalanço - k_n , mais 100% de k_r
F	$0,8 < t < 0,9s$	50% de compensação de residual – k_v e mais 100% de k_r e k_n
G	$t > 0,9s$	100% de compensação (k_r, k_n, k_v)

4.4.1. CASO 1: Fonte de tensão puramente senoidal, Carga RL balanceada.

Neste caso, a fonte de tensão no lado da geração é bem-comportada, sendo puramente senoidal (127V@60Hz), que alimenta uma carga trifásica RL ($40\Omega + 100\text{mH}$) balanceada mediante uma impedância de linha ($20\text{m}\Omega + 0,2\text{mH}$) ocasionando um fator de potência de aproximadamente 0,8. Neste caso, o sistema apresenta somente potência reativa como estratégia de compensação por não haver outros distúrbios como desbalanço e residual. Na Figura 26, pode-se observar as correntes na carga ($i_{L_a,b,c}$), no lado da rede ($i_{S_a,b,c}$), correntes do FAP ($i_{F_a,b,c}$) e a tensão no PAC (V_a, V_b e V_c).

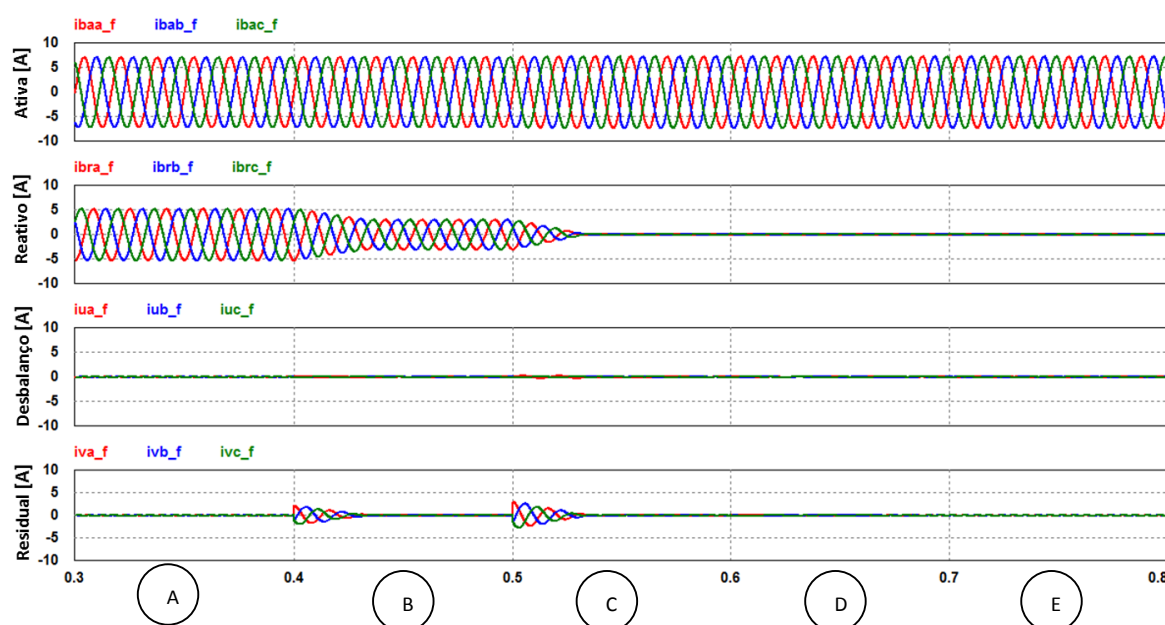
Figura 26 – Forma de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões da rede V_a, V_b e V_c .



Em $t < 0,4\text{s}$, nenhuma compensação é realizada pelo controle flexível, as correntes de carga e de rede se mantêm iguais. Após 0,4s é compensado 50% da corrente reativa balanceada, conforme demonstra a corrente no FAP, diminuindo assim a corrente da rede com a injeção parcial de reativos. Em seguida após 0,5s é

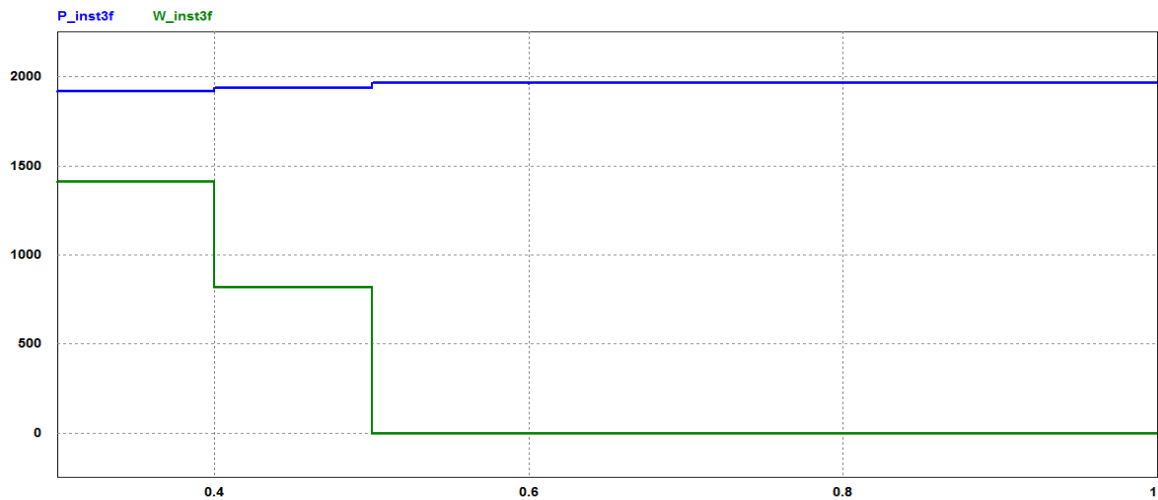
compensado 100% da corrente reativa balanceada, reduzindo assim a corrente da rede (iS). Note que a corrente de carga não varia, durante a compensação de reativos. Na Figura 27, tem-se a decomposição das correntes da CPT provocados pela carga. Neste caso somente as correntes balanceadas reativas (ibr_a,b,c) estão presentes devido a característica indutiva desta carga utilizadas no caso 1.

Figura 27 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (iba), correntes balanceadas reativas (ibr), correntes de desbalanço (iu) e correntes residual (iv), por fase nos instantes de compensação.



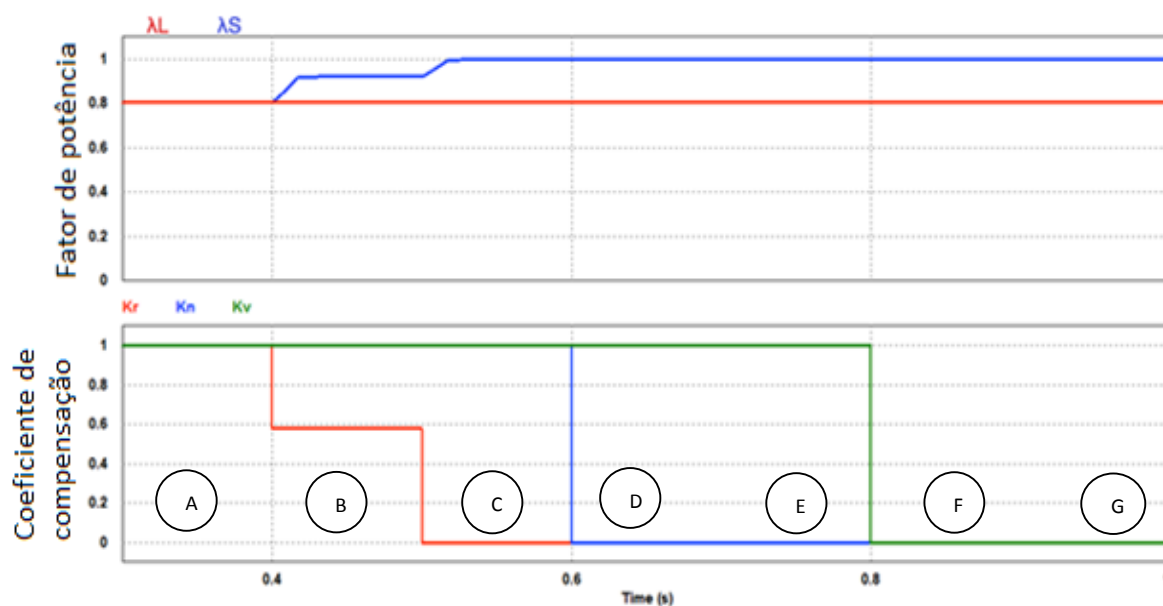
Para a Figura 28, apresenta a potência ativa e reativa instantânea. Nota-se que ao injetar as correntes reativas pelo controle flexível, a energia reativa está convergindo para zero, reduzindo assim a potência aparente por consequência consumindo menos energia da rede elétrica, sem alteração das cargas presentes.

Figura 28 – Potência ativa e Energia reativa instantânea no lado da rede.



Na Figura 29, o λ_L é o fator de potência da carga que não deve ser alterado com a intervenção do controle flexível e o λ_S é o fator de potência da rede. Inicialmente $\lambda_S = 0,8$ para o sistema sem compensação com o coeficiente $k = 1$. A seguir, $\lambda_S = 0,92$ para a compensação parcial de reativos e por fim $\lambda_S = 1$ para a compensação total de reativos, tornando-se para o sistema de geração de energia uma carga puramente resistiva sem alteração das cargas reativas do cliente. Neste caso, não é necessário a compensação de desbalanço e residual (trechos D e G), já que o fator de potência é alcançado somente com a compensação de reativos (trecho C).

Figura 29 – Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).



A tabela 6, apresenta os valores das grandezas da CPT como a Potência aparente (A), ativa (P), reativa (Q), desbalanço (N) e residual (D), como resultado da compensação pelo controle flexível neste caso aqui simulado.

Tabela 6 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 1.

	Sem compensação	50% de reativos	100% de reativos
Potência aparente - A (kVA)	2,38	2,11	1,96
Potência ativa - P (kW)	1,92	1,94	1,96
Potência reativa – Q (kVAr)	1,41	0,82	0,0
Potência de desbalanço – N (kVA)	0,0	0,0	0,0
Potência residual – D (kVA)	0,0	0,0	0,0
Fator de potência (λ_S)	0,80	0,92	1,00
Coeficiente de compensação (k)	$k_r = 1$	$k_r = 0,6$	$k_r = 0$

4.4.2. CASO 2: Fonte de tensão não-senoidal, carga RL balanceada.

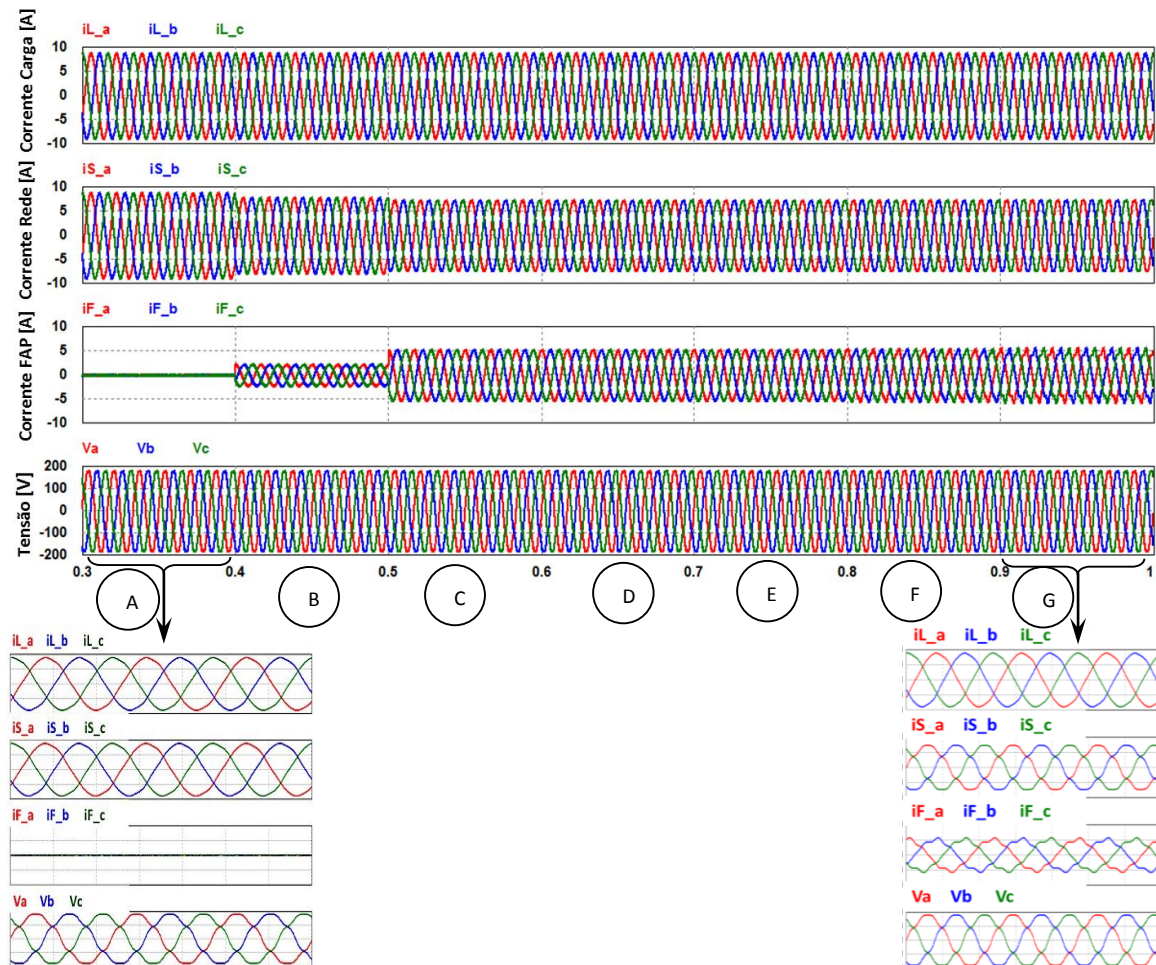
Neste caso as fontes de tensão da simulação do controle flexível apresentam 5% da 5ª harmônica (300Hz) e da 7ª harmônica (420Hz) para cada fase, conforme a tabela 7. A carga continua sendo uma RL trifásica balanceada ($50\Omega + 100\text{mH}$), além da impedância de linha ($20\text{m}\Omega + 0,2\text{mH}$) ocasionando um fator de potência final de aproximadamente 0,8 antes da compensação.

Tabela 7 - Valores de tensão na rede de alimentação para o caso 2.

Tensão na rede de alimentação	$V_a = 127 \angle 0^\circ + \sum V_{ak}$
	$V_b = 127 \angle -120^\circ + \sum V_{bk}$
	$V_c = 127 \angle +120^\circ + \sum V_{ck}$
	Sendo $k = 5\%$ da 5ª e 7ª harmônica da tensão

Na Figura 30, tem-se as correntes da carga ($i_{L_a,b,c}$), na rede ($i_{S_a,b,c}$), correntes do FAP ($i_{F_a,b,c}$) e a tensão no PAC (V_a , V_b e V_c). Nota-se neste caso a variação da corrente do FAP nos diferentes intervalos de compensação dos distúrbios, como reativos e harmônicos. Os detalhes da figura em destaque como no trecho A, mostram a corrente de carga (i_L) semelhante a corrente da rede (i_S), onde não há a compensação pelo filtro ativo (i_F), neste instante tem-se a presença de correntes não ativas na rede ocasionando um fator de potência de 0,8. No trecho G em destaque, a corrente da rede (i_S) já tem o mesmo formato da tensão da rede (V), devido a compensação de correntes não ativas pelo filtro ativo (i_F), tornando assim um sistema “resistivo” pelo lado de vista da rede, sem haver a alteração das cargas indutivas no sistema, ocasionando um fator de potência de 1,0.

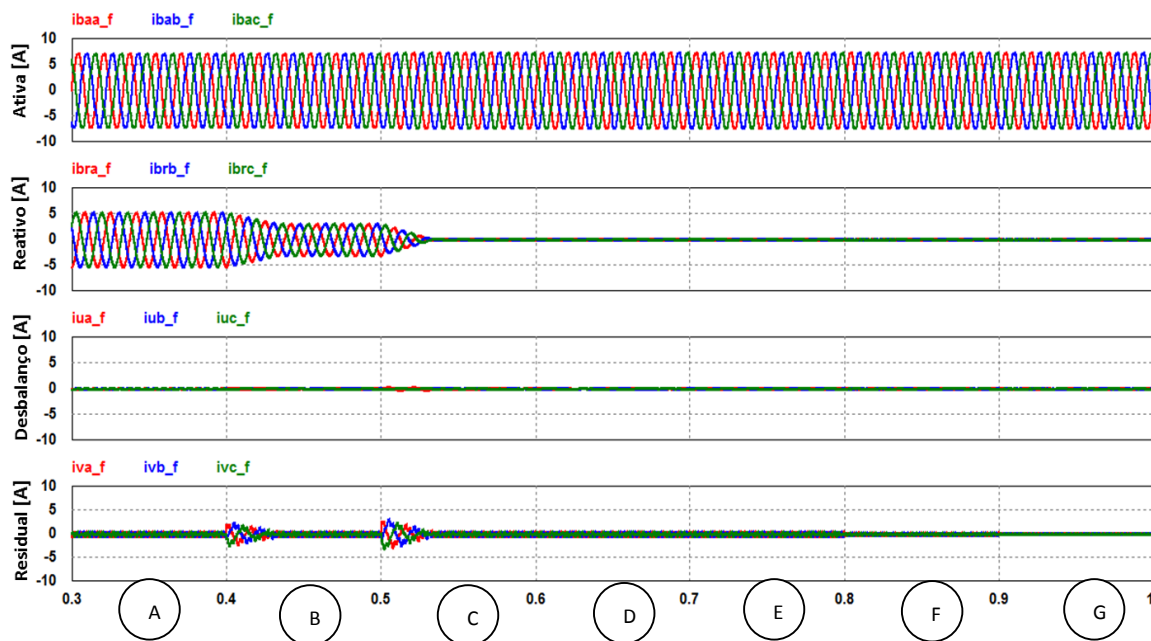
Figura 30 – Formas de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da rede, i_F como corrente do FAP e as tensões V_a , V_b e V_c , com os detalhes em destaque.



Em $t < 0,4s$, nenhuma compensação é realizada, as correntes de carga e de rede se mantêm iguais. Após $0,4s$ é compensado 50% da corrente reativa balanceada, conforme demonstra a corrente do FAP, diminuindo assim a corrente da rede com a injeção de reativos. Em seguida, $0,5s$ é compensado 100% de reativo. Entre $0,6 < t < 0,8s$ nada ocorre devido não ter a presença de desbalanço entre as fases da corrente. Após $0,8s$, é compensado 50% de corrente residual e $t > 0,9s$ é compensado 100% de corrente residual ou distorção. Neste trecho pode-se verificar a inserção de corrente residual no FAP sendo compensado assim a distorção harmônica na corrente de rede, devido a influência da fonte de tensão não-senoidal

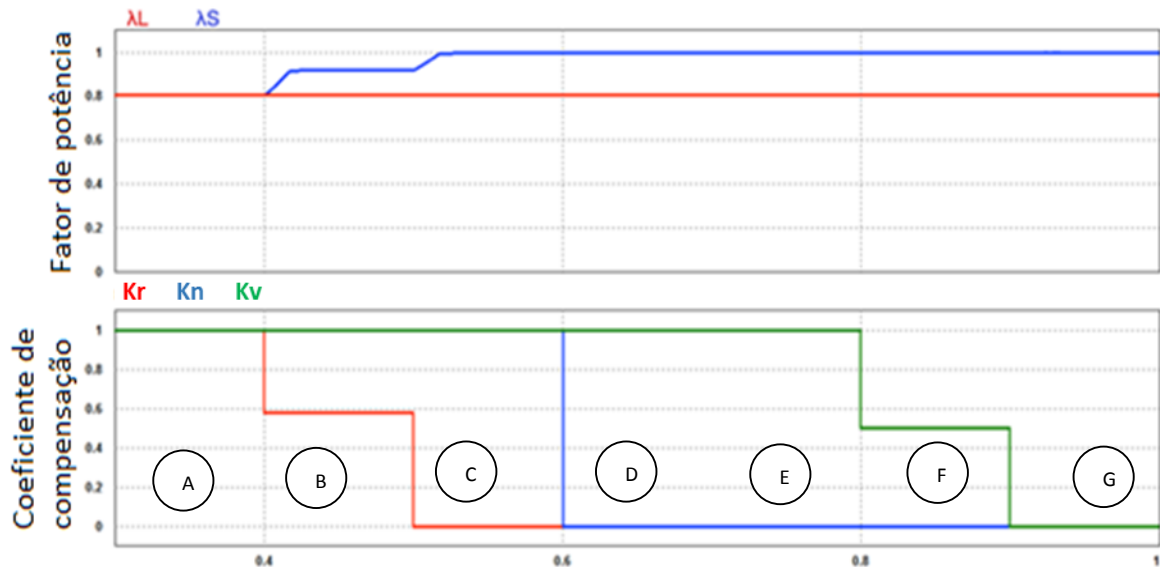
na carga reativa (RL). Na Figura 31, tem-se a decomposição da CPT para a corrente balanceada ativa (iba), corrente balanceada reativa (ibr), corrente de desbalanço (iu) e corrente residual (iv). Nota-se que neste caso tem-se a corrente residual presente devido a distorção harmônica da tensão no sistema.

Figura 31 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (iba), correntes balanceadas reativas (ibr), correntes de desbalanço (iu) e correntes residual (iv) nos instantes de compensação do controle flexível.



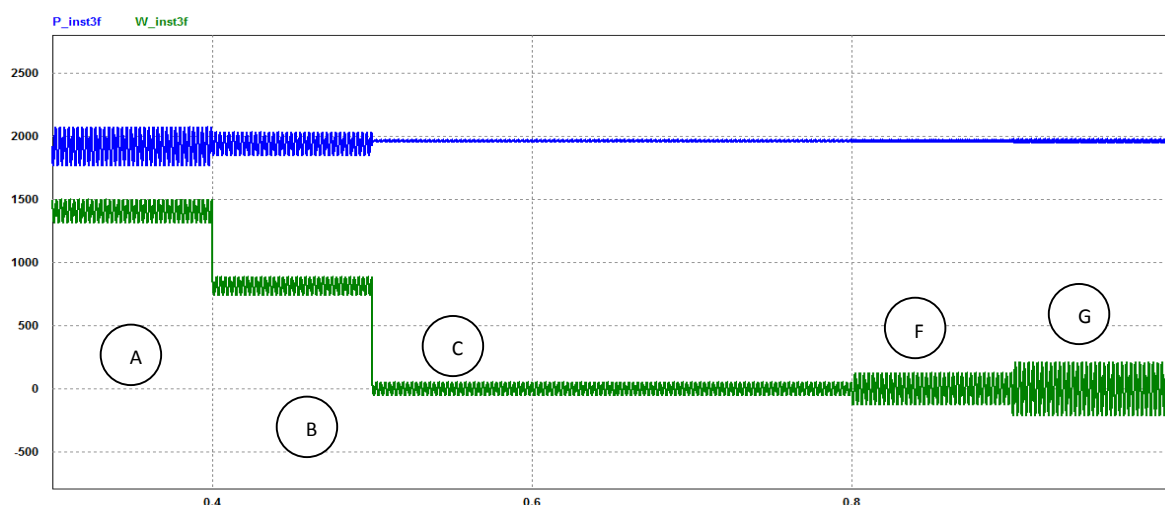
Na Figura 32, o λ_L é o fator de potência da carga que não deve ser alterado com a intervenção do controle flexível e o λ_S é o fator de potência da rede. Inicialmente $\lambda_S = 0,8$ para o sistema sem compensação com o coeficiente $k = 1$, $\lambda_S = 0,92$ para compensação parcial de reativos e $\lambda_S = 0,998$ para compensação total de reativos. Após a compensação de corrente reativa (ibr) total, não há necessidade de compensação da corrente residual (iv), devido a fator de potência (λ) atingir o valor unitário ($\lambda = 1$), conforme observa-se na Figura 32.

Figura 32 – Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).



Na Figura 33, tem-se a potência ativa e energia reativa instantânea no lado da rede, antes e após a compensação do controle flexível em simulação. No instante de 0,4s tem-se somente 50% da compensação de reativos e após 0,5s tem-se 100% da compensação de reativos para a rede elétrica de energia. Nos instantes acima de 0,8s tem-se a compensação das correntes residuais. Note que esta compensação ocasiona uma oscilação na energia reativa instantânea a partir do período de 0,8s, neste trecho a compensação é para as correntes residuais, a fonte de tensão não senoidal está empregando harmônicos de 5ª e 7ª ordem que não pode ser compensando pelo filtro ativo que realiza as compensações da carga, entretanto sua energia média é zero conforme demonstra a forma de onda da Figura 33.

Figura 33 – Potência ativa e Energia reativa instantânea da rede durante os intervalos de compensação.



A tabela 8, apresenta os valores das grandezas da CPT como as Potência aparente (A), ativa (P), reativa (Q), desbalanço (N) e residual (D), como resultado da compensação pelo FAP no caso 2. Neste caso, somente a compensação dos reativos (ibr), resultaria em um fator de potência aproximadamente igual a 1, com pouca contribuição da compensação da parte residual.

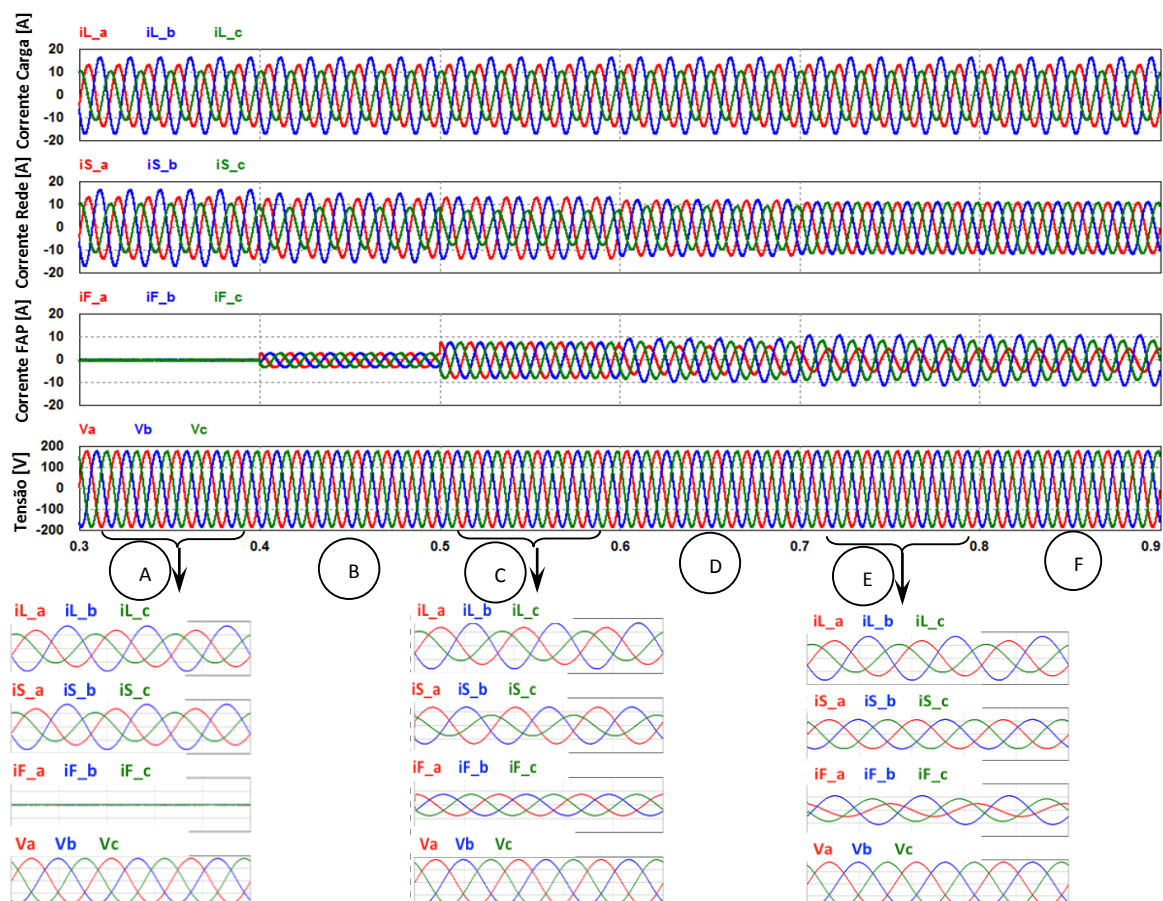
Tabela 8 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 2.

	Sem compensação	50% de reativos	100% de reativos	50% de residual	100% de residual
Potência aparente - A (kVA)	2,39	2,11	1,97	1,96	1,96
Potência ativa – P (kW)	1,92	1,94	1,96	1,96	1,96
Potência reativa – Q (kVAr)	1,41	0,82	0,0	0,0	0,0
Potência de desbalanço – N (KVA)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Potência residual – D (KVA)	0,12	0,12	0,12	0,06	0,02
Fator de potência – (λ_s)	0,81	0,92	0,998	0,999	≈ 1
Coeficientes k_r , k_n e k_v	$k = 0$	$k_r = 0,6$	$k_r = 0,0$	$k_v = 0,5$ $k_r = 0,0$	$k_v = 0,0$ $k_r = 0,0$

4.4.3. CASO 3: Fonte de tensão senoidal, Carga RL desbalanceada.

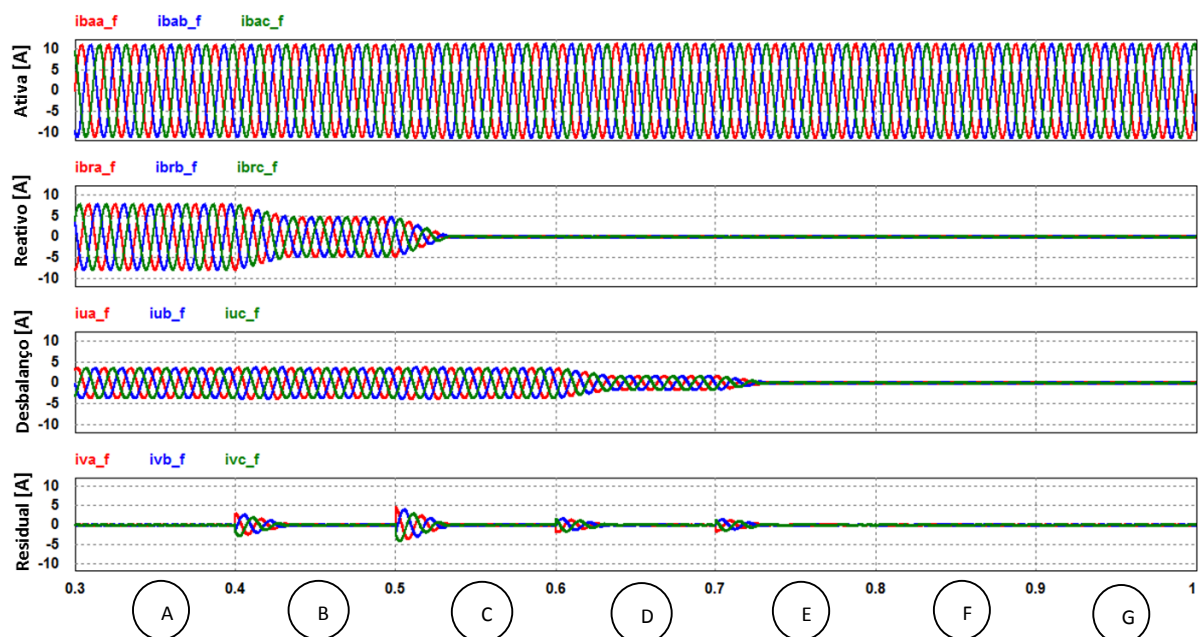
Neste caso, a tensão da rede elétrica é puramente senoidal (@60Hz) e em paralelo com a carga RL tem-se um resistor de 50Ω entre as fases A e B configurando assim uma carga desbalanceada entre fases. Na Figura 34, tem-se as correntes na carga ($i_{L_a,b,c}$), no lado da rede ($i_{S_a,b,c}$), correntes do FAP ($i_{F_a,b,c}$) e a tensão no PAC (V_a , V_b e V_c). Nota-se aqui as correntes trifásicas desbalanceadas entre si devido as cargas existentes (detalhe trecho A), em seguida tem-se a compensação dos reativos (detalhe trecho C), após a inserção de 50% das correntes de desbalanço pelo FAP em 0,6s, as correntes no lado da rede (i_S) são totalmente compensadas a partir de 0,7s (detalhe trecho E) com 100% de inserção pelo FAP.

Figura 34 – Forma de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões V_a , V_b e V_c , com os devidos destaques.



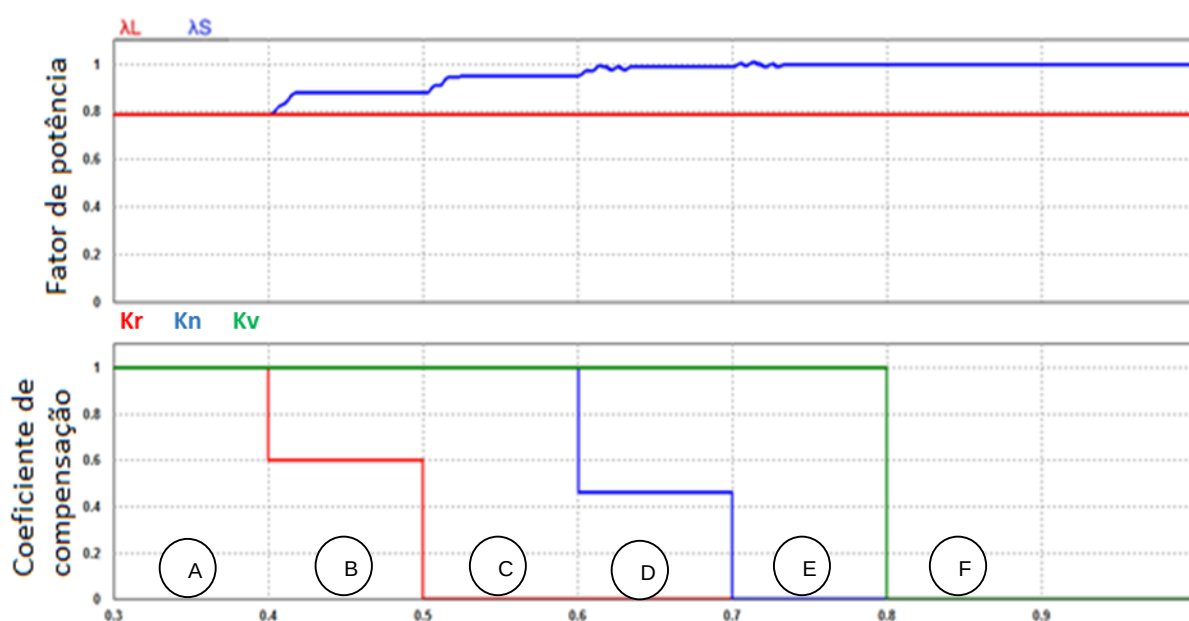
Em $t < 0,4s$, nenhuma compensação é realizada, as correntes de carga e de rede se mantêm iguais (detalhe do trecho A). Após $0,4s$ é compensado 50% da corrente reativa balanceada, conforme apresenta a corrente no filtro ativo, diminuindo assim a corrente da rede com a injeção de reativos. Em seguida, após $0,5s$ são compensados 100% dos reativos (detalhe do trecho C). Após $0,6s$, é compensado 50% da corrente de desbalanço e em $0,7s$ é compensado 100% da corrente de desbalanço. Neste período pode-se verificar a inserção do desbalanço parcial e total pelo conversor flexível, onde as correntes são compensadas na rede – i_s . Entre $0,8 < t < 1,0s$ nada ocorre devido não ter a corrente residual neste caso, não havendo necessidade deste tipo de compensação para este caso específico. Na Figura 35, tem-se a decomposição da CPT para corrente balanceada ativa (iba), corrente balanceada reativa (ibr), corrente de desbalanço (iu) e corrente residual (iv).

Figura 35 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (iba), correntes reativas (ir), correntes de desbalanço (iu) e correntes residual (iv) nos instantes de compensação.



Na Figura 36, o λ_L é o fator de potência da carga e o λ_S é o fator de potência da rede. Inicialmente os coeficientes de compensação $k = 1$ e o $\lambda_S = \lambda_L = 0,8$ não havendo nenhuma compensação. Para o trecho B, λ_S é ajustado para 0,92 com o $k_r = 0,6$ para a compensação parcial dos reativos e em seguida $\lambda_S = 0,95$, em $k_r = 0$ para 100% de compensação de reativos. Para o trecho D, λ_S é ajustado para 0,98 com o $k_n = 0,45$ para a compensação parcial de desbalanço e em seguida $\lambda_S = 1$ para $k_n = 0$ em 100% de compensação de desbalanço, tornando-se ao sistema de geração de energia uma carga puramente resistiva e totalmente balanceada para a concessionária elétrica.

Figura 36 – Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).



Na tabela 9, apresenta os valores de potência e fator de potência ao longo do ajuste dos coeficientes de compensação - k . A potência aparente (A) e ativa (P) praticamente se tornam os mesmos valores ao final das compensações das correntes reativa (ibr) e desbalanço (iu).

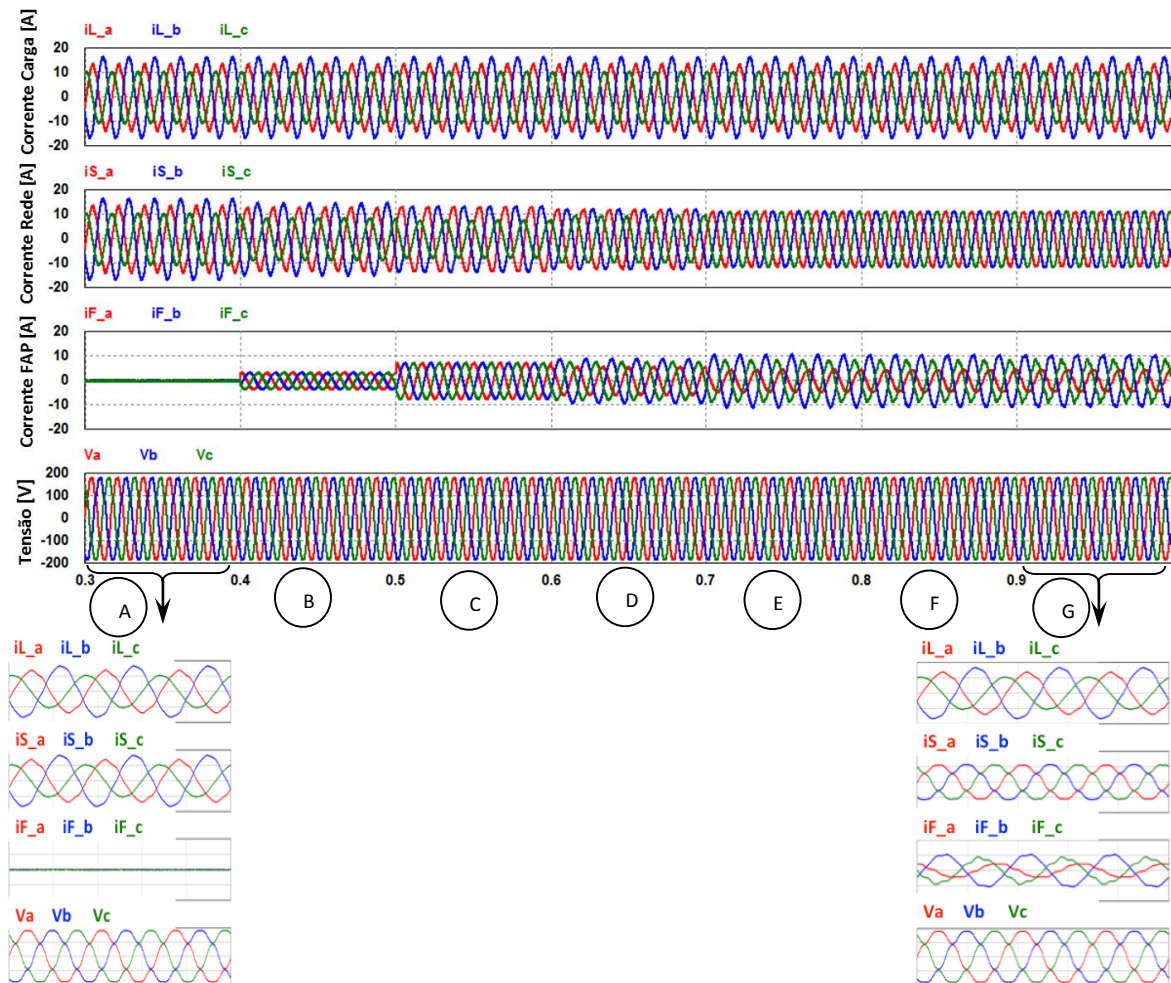
Tabela 9 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 3.

	Sem compensação	50% de reativos	100% de reativos	50% de desbalanço	100% de desbalanço
Potência aparente - A (kVA)	3,6	3,3	3,1	3,0	3,0
Potência ativa - P (kW)	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0
Potência reativa – Q (kVAr)	1,9	1,0	0,0	0,0	0,0
Potência desbalanço – N (kVA)	0,97	0,97	0,97	0,45	0,03
Potência residual – D (kVA)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fator de potência (λ_s)	0,8	0,91	0,95	0,981	0,999
Coeficientes k_r , k_n e k_v	$k = 1$	$k_r = 0,6$	$k_r = 0,0$	$k_n = 0,45$ $k_r = 0,0$	$k_n = 0,0$ $k_r = 0,0$

4.4.4. CASO 4: Fonte de tensão não-senoidal, Carga RL desbalanceada.

Neste caso de simulação, as fontes de tensão da rede elétrica possuem 5% da 5ª e 7ª harmônica e a carga RL com o adicional de 50Ω causando desbalanço em duas fases da rede. A Figura 37, apresenta as formas de onda para as correntes da carga ($i_{L_a,b,c}$), na fonte de geração ($i_{S_a,b,c}$), correntes de referências do FAP ($i_{F_a,b,c}$) e a tensão da rede com as devidas frequências harmônicas mencionadas (V_a , V_b e V_c). Neste caso, pode-se avaliar a distorção da corrente no lado da rede do trecho em A e após as compensações a melhoria da corrente de rede, conforme o detalhe no trecho em G.

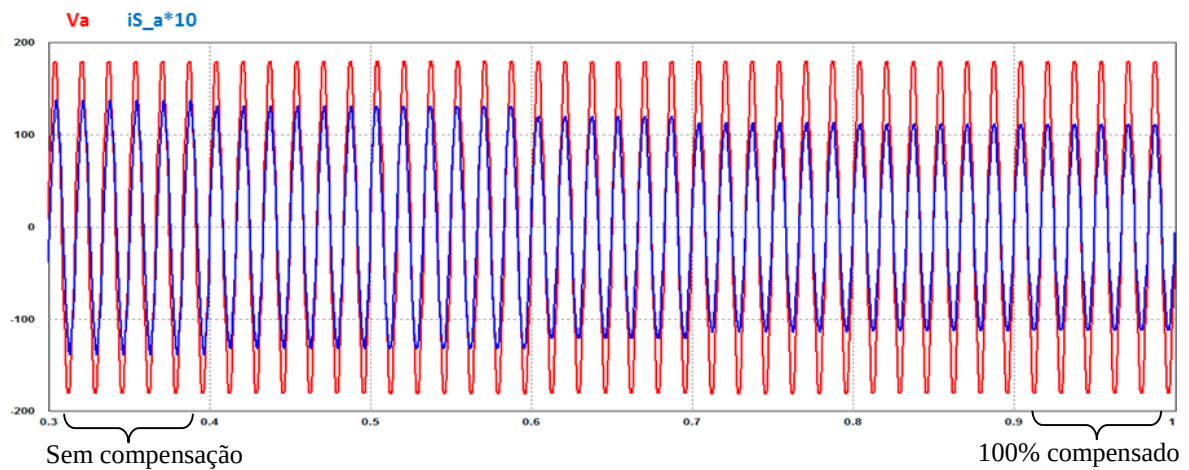
Figura 37 – Formas de onda de i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões distorcidas da rede V_a , V_b e V_c .



Em $t < 0,4s$, nenhuma compensação é realizada pelo controle flexível, as correntes de carga e de rede se mantêm iguais. Após $0,4s$ é compensado parcialmente a corrente reativa balanceada, conforme apresenta a corrente no filtro, diminuindo assim a corrente da rede com a injeção de reativos. Em seguida, após $0,5s$ é compensado 100% dos reativos. Após $0,6s$, é compensado parcialmente a corrente de desbalanço e em $0,7s$ é compensado 100% da corrente de desbalanço. Entre $0,8 < t < 1,0s$ tem-se a compensação dos residuais para a distorção harmônica. Após as compensações, pode-se verificar que as tensões (V_a , V_b e V_c)

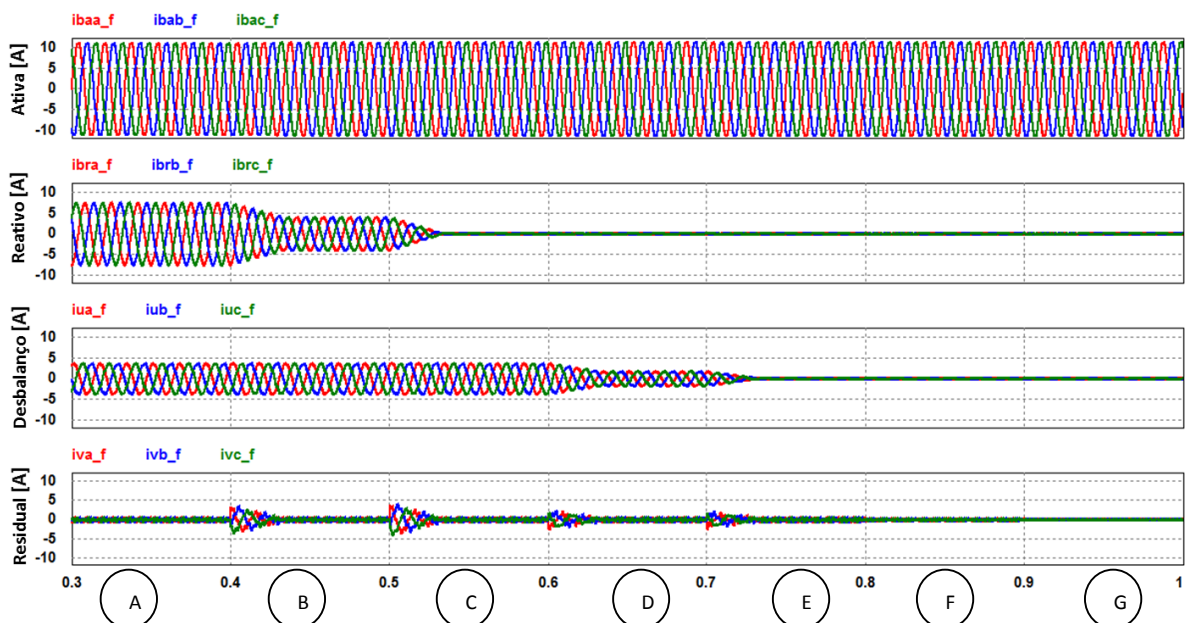
e correntes de rede (iS_a , iS_b e iS_c) assumem a mesma envoltória e fase entre si, conforme pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 – Forma de onda da tensão x corrente da fase A, ao longo do tempo na compensação do filtro ativo de compensação.



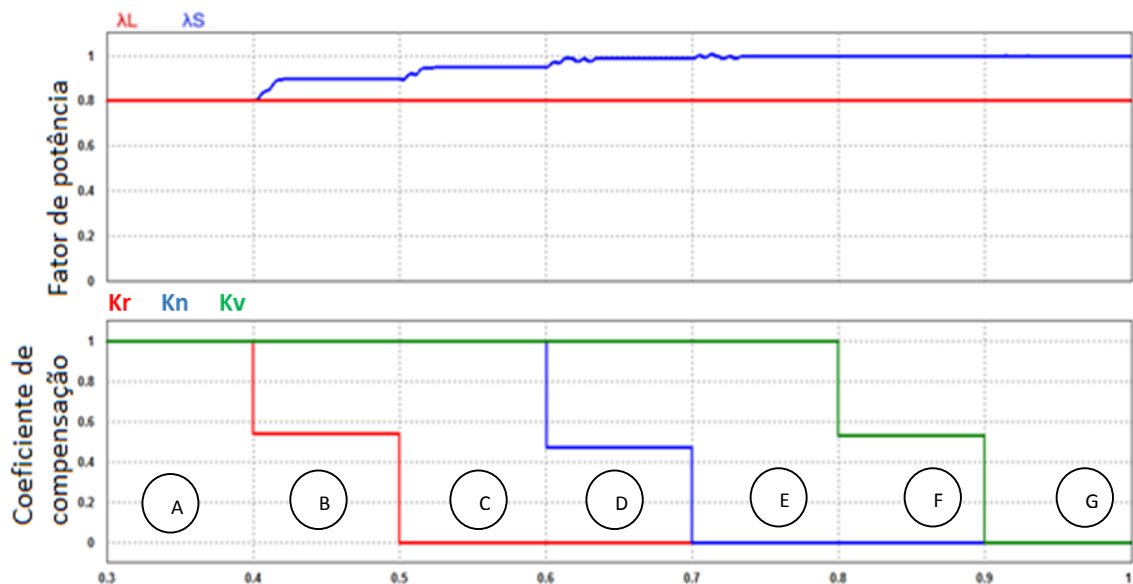
Na Figura 39, tem-se a decomposição da CPT para corrente balanceada ativa (i_{ba}), corrente balanceada reativa (i_{br}), corrente de desbalanço (i_u) e corrente residual (i_v).

Figura 39 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (i_{ba}), correntes balanceadas reativas (i_{br}), correntes de desbalanço (i_u) e correntes residual (i_v) nos devidos instantes de compensação.



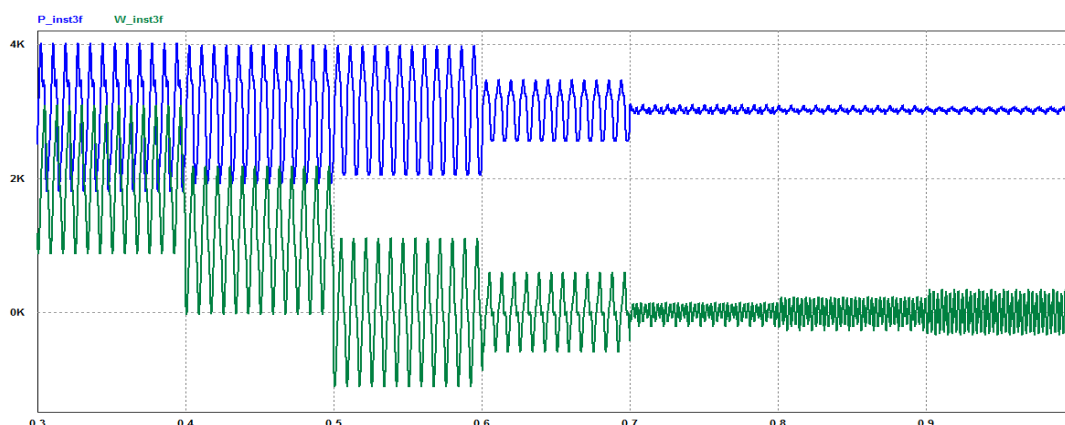
Na Figura 40, o λ_L é o fator de potência da carga que não deve ser alterado com a intervenção do controle flexível e o λ_S é o fator de potência da rede. Inicialmente $\lambda_S = 0,8$ para o sistema sem compensação com o coeficiente $k = 1$. A seguir, $\lambda_S = 0,90$ para a compensação parcial de reativos e por fim $\lambda_S = 0,95$ para a compensação total de reativos. A medida que o desbalanço e os residuais são compensados o λ_S se aproxima de 1, conforme os coeficientes de compensação k .

Figura 40 - Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e coeficiente de compensação (k_r , k_n e k_v).



Na Figura 41, tem-se a potência ativa e energia instantâneas no lado da rede sendo compensada pelo controle flexível antes e após a injeção das correntes de referência, conforme a estratégia de compensação é realizada. Nos instantes de 0,8s tem-se a compensação dos residuais - k_n onde ocasiona uma oscilação na energia reativa instantânea durante o período, entretanto sua média é zero. A figura 41 apresenta a forma de onda e os resultados das grandezas de potência não ativa após a compensação na tabela 10.

Figura 41 – Potência ativa (P) e Energia Reativa (W) instantânea no lado da rede com os devidos instantes de compensação do FAP.



Na tabela 10, apresenta os valores de potência e fator de potência ao longo do ajuste dos coeficientes de compensação - k . A potência aparente (A) e ativa (P) praticamente se tornam os mesmos valores ao final das compensações. Neste caso as compensações de reativos e desbalanço elevam o fator de potência para o valor desejado, sem a necessidade da compensação do residual (iv).

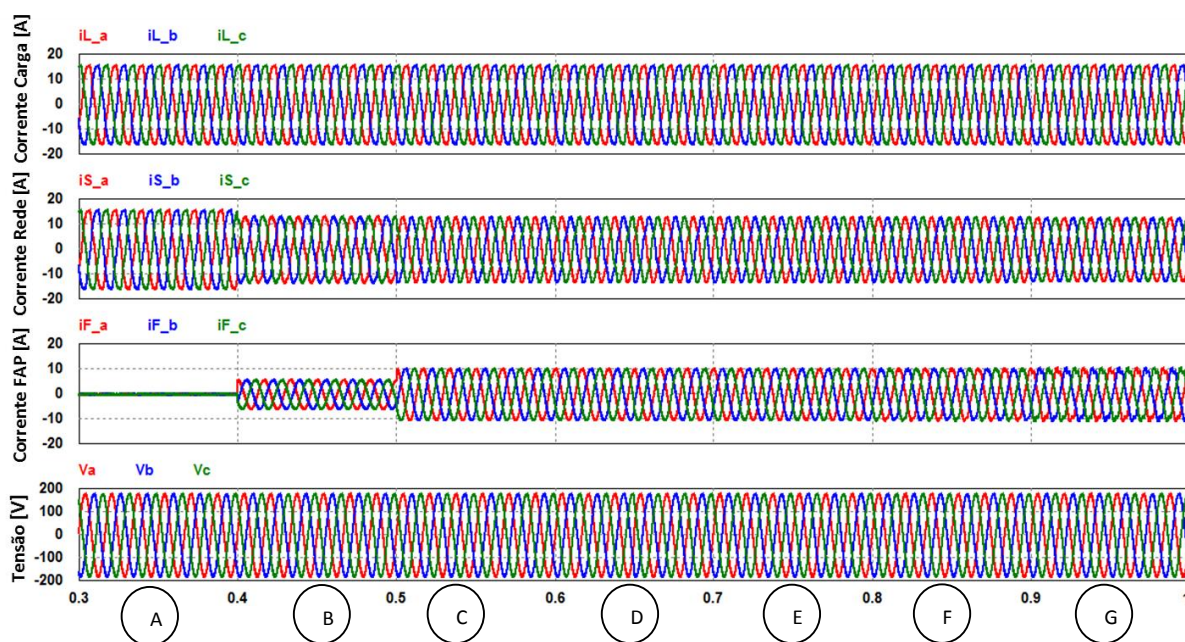
Tabela 10 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 4.

	Sem compensação	50% reativos	100% reativos	50% desbal.	100% desbal.	50% residual	100% residual
Potência aparente - A (kVA)	3,7	3,3	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0
Potência ativa - P (kW)	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Potência reativa – Q (kVAr)	1,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Potência de desbalanço – N (kVA)	0,93	0,93	0,93	0,46	0,03	0,03	0,03
Potência residual D (kVA)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,06	0,02
Fator de potência (λ_s)	0,8	0,9	0,95	0,987	0,998	0,999	0,999
Coeficientes k_r , k_n e k_v	$k = 1$	$k_r = 0,55$	$k_r = 0$	$k_n = 0,45$ $k_r = 0$	$k_n = 0$ $k_r = 0$	$k_v = 0,55$ $k_n = 0$ $k_r = 0$	$k_v = 0$ $k_n = 0$ $k_r = 0$

4.4.5. CASO 5: Fonte de tensão senoidal, Carga RL balanceada, Carga não-linear

Neste caso, a fontes de tensão é puramente senoidal, a carga RL é balanceada nas três fases, porém é adicionado uma carga não linear em paralelo com a carga RL. Esta carga não linear é composta por uma ponte de diodos trifásicas e na saída tem-se um circuito RC em paralelo ($470\mu\text{F} + 50\Omega$), conforme a Figura 25. Com esta carga não-linear no sistema elétrico, aumentam as distorções harmônicas de tensão (DHT) e de corrente (DHI). Na Figura 42 tem-se a dinâmica das tensões e correntes ao longo da compensação dos distúrbios.

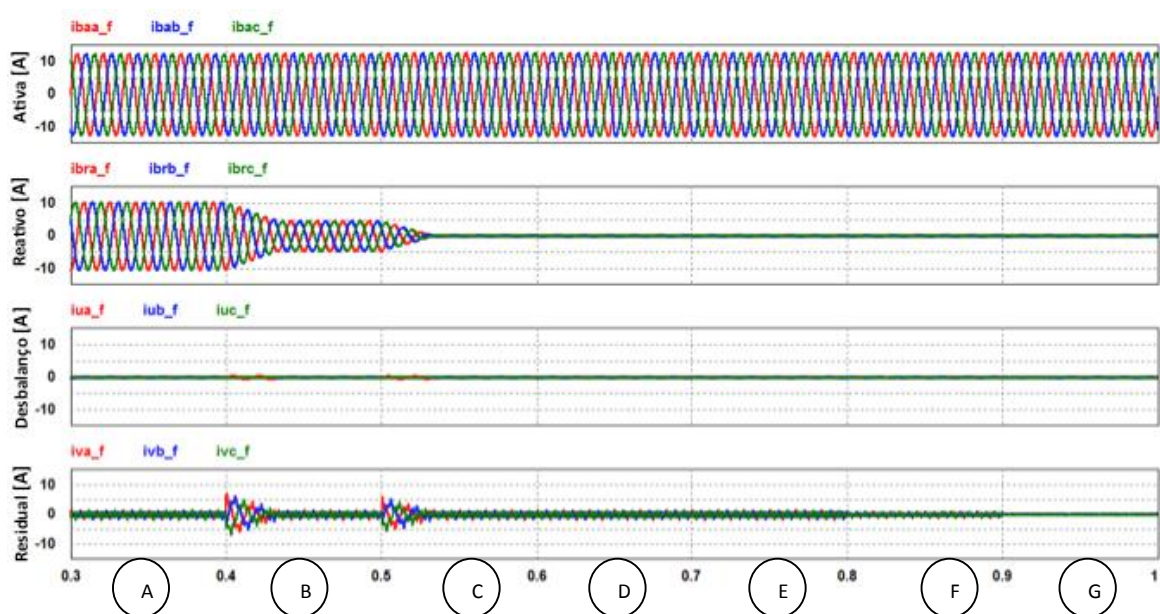
Figura 42 – Forma de onda de i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte geradora, i_F como corrente do FAP e as tensões da rede V_a , V_b e V_c .



Em $t < 0,4\text{s}$, nenhuma compensação é realizada, as correntes de carga e de rede se mantém iguais. Entre $0,4\text{s} < t < 0,5\text{s}$ tem-se as compensações parciais e total para os reativos. Entre $0,6 < t < 0,8\text{s}$, nada ocorre devido não ter corrente de desbalanço e após $0,8\text{s}$, a corrente residual é compensada como pode ser

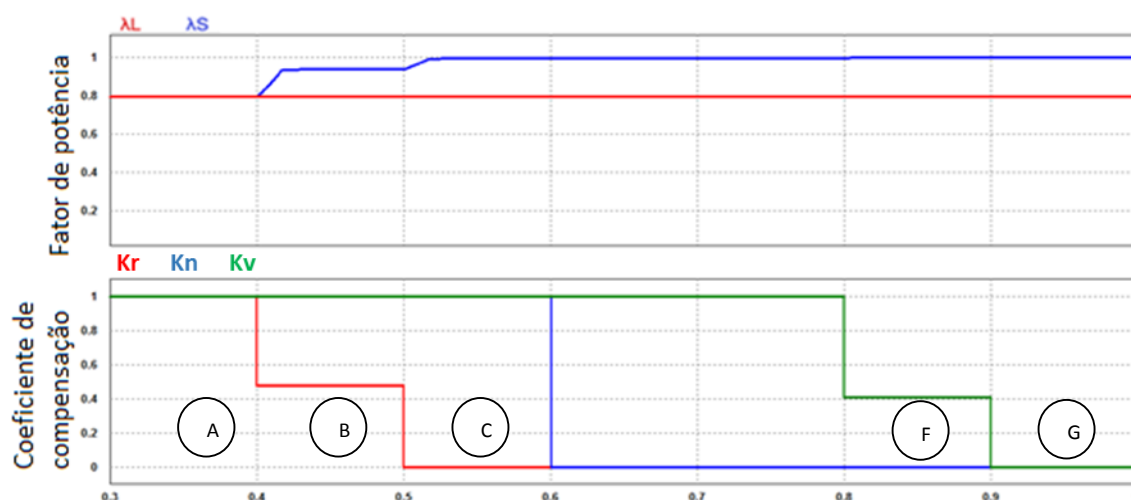
observado pela inserção de corrente pelo FAP. Neste caso, a carga não linear aumenta as distorções harmônicas nas correntes de carga. Na Figura 43, tem-se a decomposição das correntes de referência por fase: balanceada ativa, balanceada reativa, desbalanceada e residual respectivamente, conforme as cargas reativas e não lineares presentes no sistema trifásico.

Figura 43 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (iba), correntes balanceadas reativas (ibr), correntes de desbalanço (iu) e correntes residual (iv) nos instantes de compensação.



Na Figura 44, o λ_L é o fator de potência da carga e o λ_S é o fator de potência da rede. Inicialmente $\lambda_S = 0,8$ para sistema sem compensação, a seguir, $\lambda_S = 0,90$ para a compensação parcial de reativos e por fim $\lambda_S = 0,94$ para a compensação total de reativos. Neste caso de simulação, as correntes de desbalanço são ausentes conforme a figura, não havendo alteração. Para a compensação do residual, o λ_S se aproxima de 1, conforme o ajuste dos coeficientes de compensação k_v (residual) a partir de 0,8s.

Figura 44 - Fator de potência na carga (λ_L), fator de potência na rede (λ_S) e os coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).



Na tabela 11, apresenta os valores de potência e fator de potência ao longo do ajuste dos coeficientes de compensação - k . A potência aparente (A) e ativa (P) praticamente se tornam iguais ao final das compensações. Com a compensação de reativos e residual, o fator de potência se torna próximo do ideal ($\lambda = 1$).

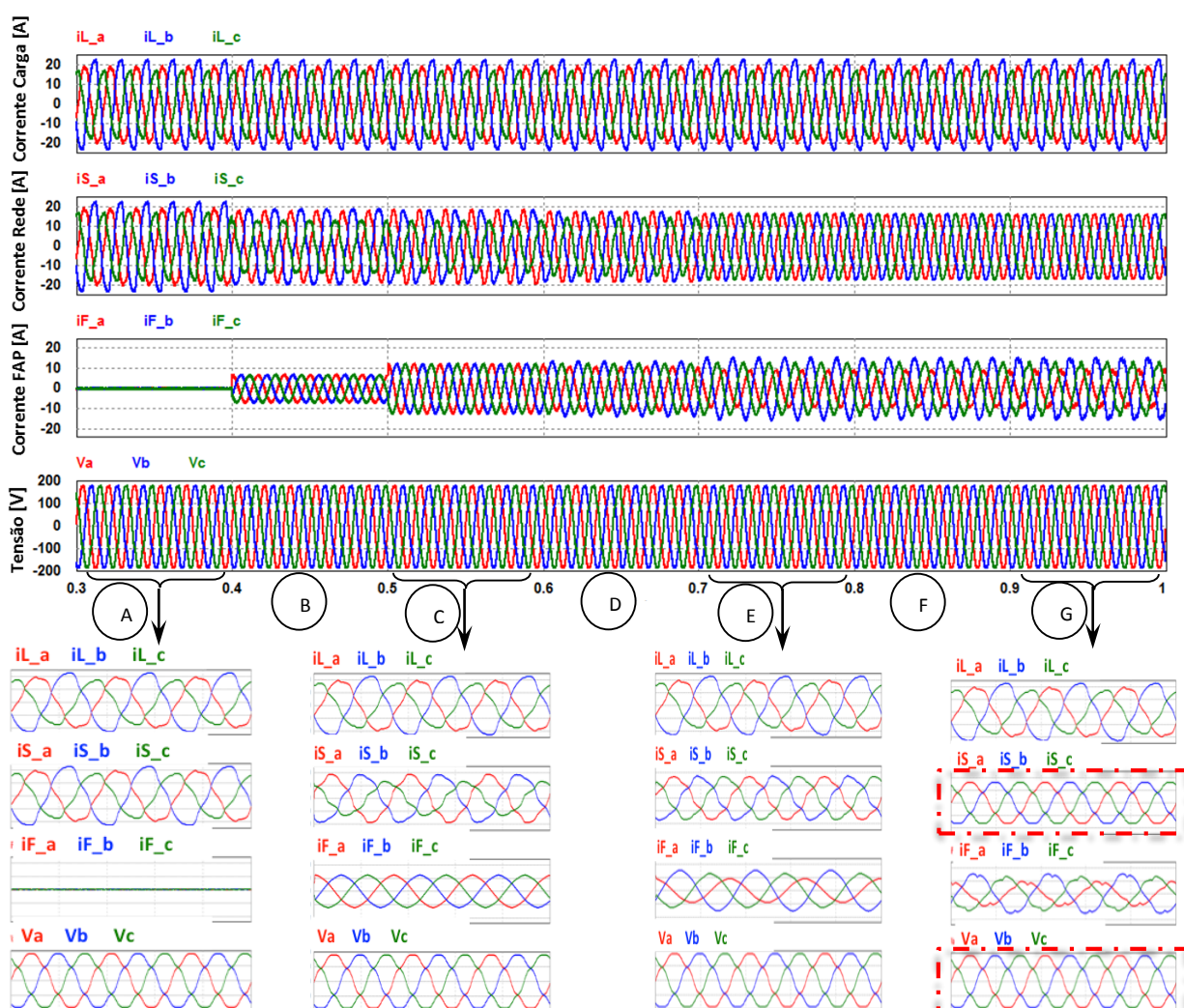
Tabela 11 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 5.

	Sem compensação	50% reativos	100% reativos	50% residual	100% residual
Potência aparente - A (kVA)	4,6	4,2	4,0	3,8	3,8
Potência ativa - P (kW)	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8
Potência reativa - Q (kVAr)	2,5	1,3	0,0	0,0	0,0
Potência desbalanço - N (kVA)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Potência residual - D (kVA)	0,37	0,37	0,37	0,16	0,06
Fator de potência - λ_s	0,8	0,9	0,94	0,994	0,999
Coeficiente k_r , k_n e k_v	$k = 1$	$k_r = 0,45$	$k_r = 0$	$k_v = 0,4$ $k_r = 0$	$k_v = 0$ $k_r = 0$

4.4.6. CASO 6: Fonte de tensão não-senoidal, Carga RL desbalanceada, Carga não-linear

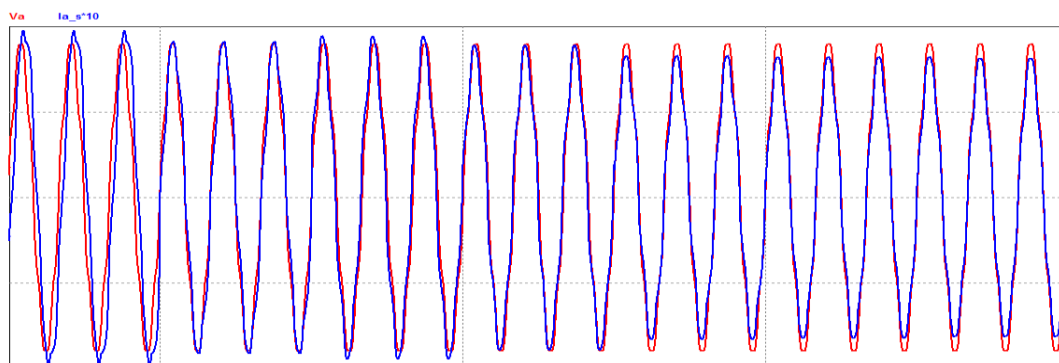
Neste caso de simulação, a fonte de tensão é não senoidal com adição de 5% de 5ª e 7ª Harmônica, a carga RL tem-se uma carga de 50Ω causando desbalanço entre as fases e pôr fim a carga não-linear aumentando a distorção harmônica na corrente. No trecho inicial a corrente da rede possui as 3 componentes de distorção, que ao longo do tempo são compensadas, tornando-se semelhante com a forma de onda da tensão, conforme o detalhe no trecho G em destaque. Neste caso, os três distúrbios para a QEE estão presentes como pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 – Forma de onda: i_L como corrente de carga, i_S como corrente da fonte, i_F como corrente do FAP e as tensões da rede V_a , V_b e V_c , com os trechos em detalhe.



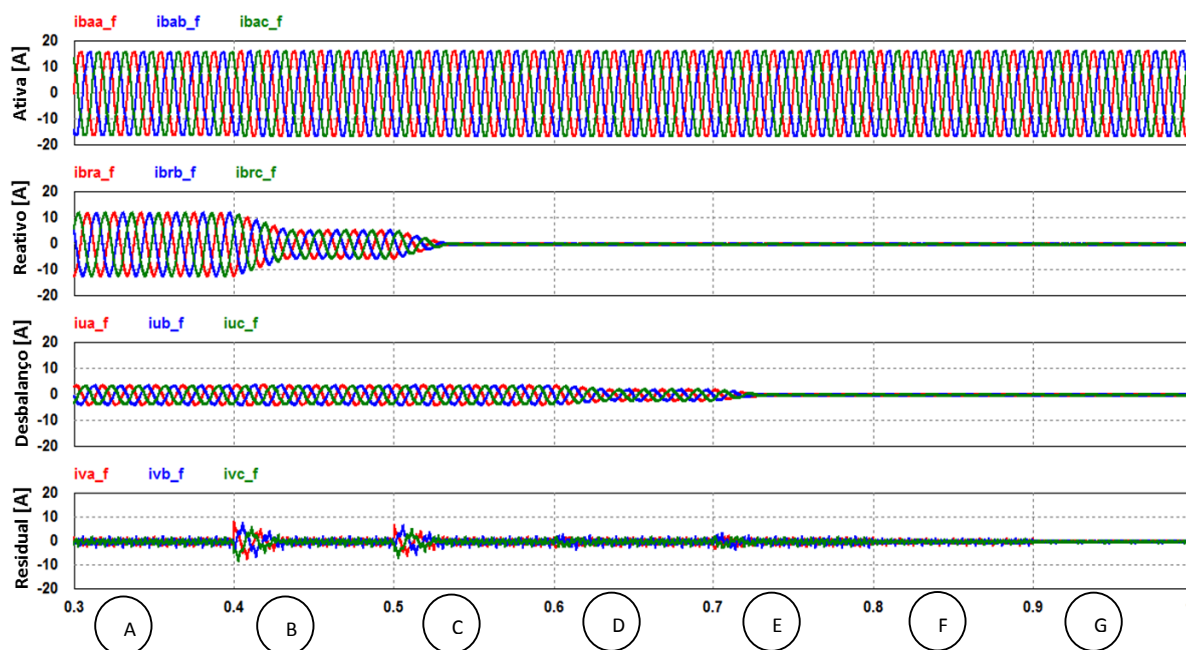
Na Figura 45, as formas de ondas da corrente de carga (i_L), corrente de rede (i_S), corrente de referência do FAP (i_F) e as tensões da rede elétrica (V_a , V_b e V_c) são apresentadas. Em $t < 0,4s$, nenhuma compensação é realizada pelo FAP. A compensação dos reativos é feita parcialmente em $t > 0,4s$ e total em $t > 0,5s$, conforme o detalhe do trecho C na Figura 45. Para a compensação do desbalanço das correntes, em $t > 0,6s$ para parcialmente e para 100% de compensação em $t > 0,7s$, conforme detalhe no trecho E. Por fim, a distorção harmônica é compensada com os residuais a partir de $t > 0,8s$, onde o trecho G tem o detalhe. A Figura 46, apresenta a forma de onda da tensão x corrente na rede com as devidas compensações, elas assumem a mesma envoltória e estão em fase entre si com a compensação total dos distúrbios no final do trecho.

Figura 46 – Forma de onda da tensão da rede (V_a) e da corrente de rede (i_a), durante o intervalo de compensação do filtro.



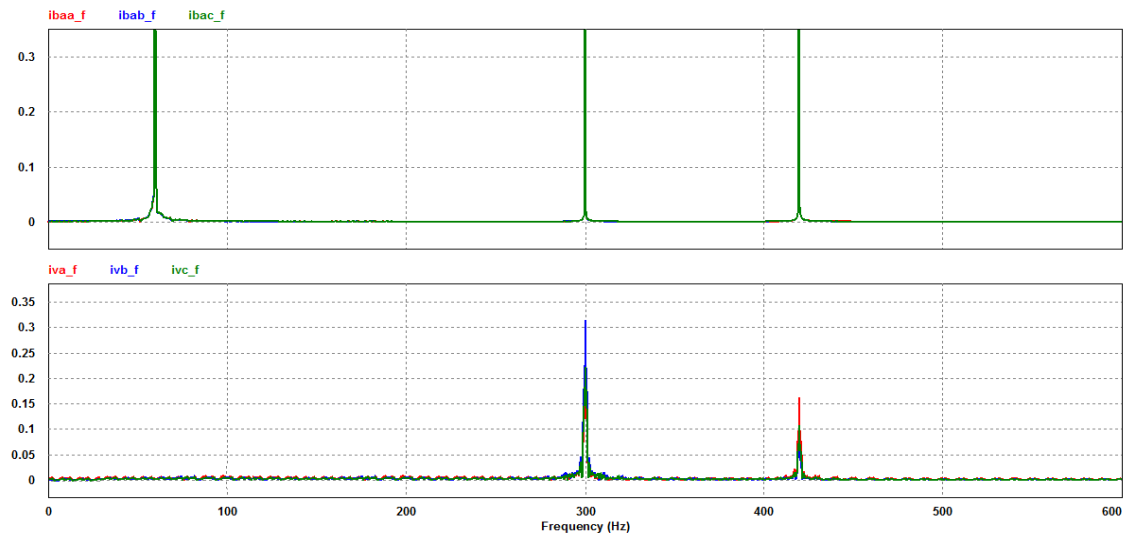
Na Figura 47, tem-se a decomposição das correntes balanceada ativa (i_{ba}), correntes balanceadas reativas (i_{br}), correntes de desbalanço (i_u) e as correntes residuais (i_v) pela CPT, conforme as cargas presentes que geram os devidos distúrbios na rede.

Figura 47 – Gráfico das correntes balanceadas ativas (iba), correntes balanceadas reativas (ibr), correntes de desbalanço (iu) e correntes residual (iv) nos instantes de compensação.



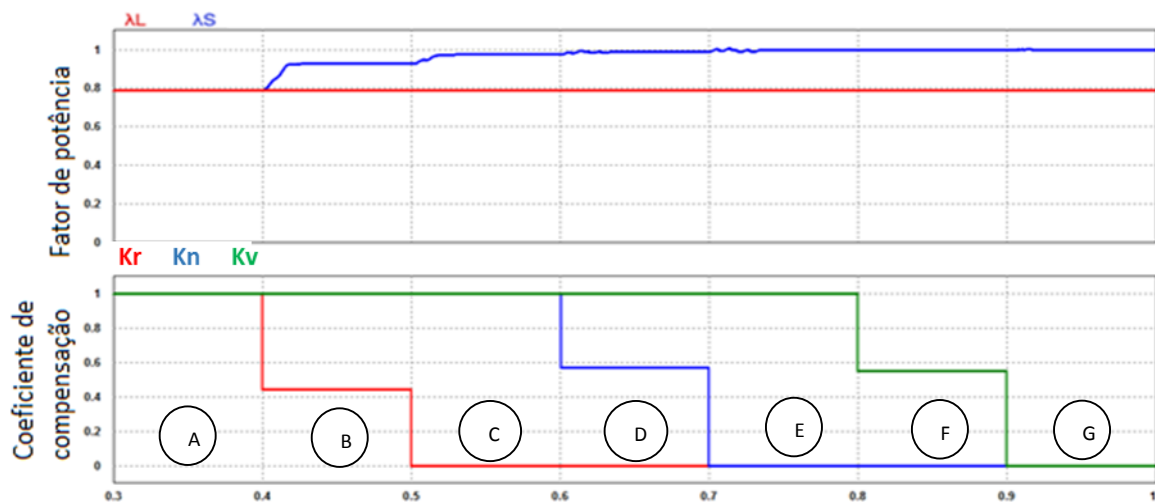
A Figura 48, tem-se a decomposição harmônica da FFT (“Fourier Fast Transformation”) das correntes ativas balanceadas e residuais, demonstrando as frequências harmônicas impostas pela fonte de tensão. Verifica-se que as correntes ativas balanceadas (proporcionais às tensões) apresentam 5ª e 7ª harmônica. Similarmente, estas componentes harmônicas aparecem nas correntes residuais. Neste caso, destaca-se que as correntes residuais refletem a presença de correntes dispersas, devido as harmônicas de tensão e harmônicas de corrente gerados pela carga não-linear. As correntes dispersas representam o comportamento da carga (variação da condutância e reatividade) sobre a tensão distorcida, e normalmente não podem ser compensadas pelo conversor flexível quando impostas pela fonte de geração. Assim, neste caso, apenas as componentes harmônicas geradas pela carga foram compensadas.

Figura 48 – FFT da corrente balanceada ativa (iba) e da corrente residual (iv) com as devidas frequências harmônicas de 5ª e 7ª ordem impostas pela tensão.



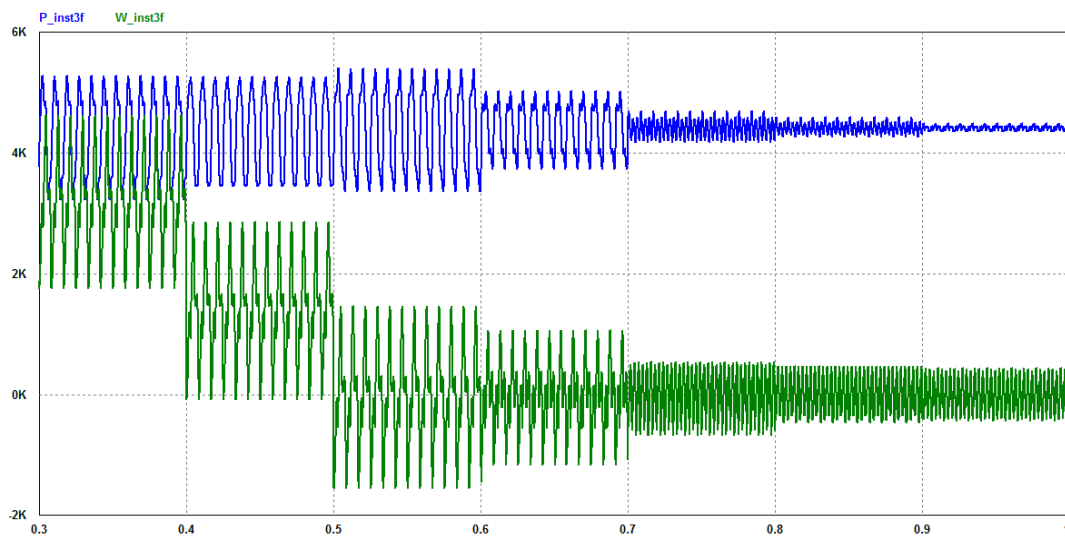
Na Figura 49, o λ_L é o fator de potência da carga e o λ_S é o fator de potência da rede. Inicialmente $\lambda_S = 0,79$ para sistema sem compensação, a seguir, $\lambda_S = 0,89$ para a compensação parcial de reativos e por fim $\lambda_S = 0,93$ para a compensação total de reativos. Com a compensação do desbalanceamento e do residual, o λ_S se aproxima de 1, conforme os coeficientes de compensação k_n e k_v na Figura 49.

Figura 49 – Representação do fator de potência da rede (λ_S), do fator de potência da carga (λ_L) e dos coeficientes de compensação (k_r , k_n e k_v).



A Figura 50, apresenta a forma de onda da potência ativa e da energia reativa instantânea que ao longo do tempo diminui e na compensação total sua média é igual a zero, conforme a tabela de resultado das grandezas de potência não ativas.

Figura 50 - Potência ativa (P) e Energia reativa (W) instantânea no lado da rede durante os instantes de compensação dos distúrbios.



Na tabela 12, apresenta os valores de potência e fator de potência ao longo do ajuste dos coeficientes de compensação - k . A potência aparente (A) e ativa (P) praticamente se tornam os mesmos valores ao final das compensações. Neste caso, com a inserção da carga não-linear ao sistema, incluindo a carga reativa e o desbalanço, se faz necessário a compensação total dos três distúrbios para que o fator de potência se torne próximo do valor ideal pelo conversor flexível, conforme apresenta a tabela 12.

Tabela 12 - Resultados das grandezas do sistema trifásico para o caso 6.

	Sem compensação	50% reativos	100% reativos	50% desbalanço	100% desbal.	50% residual	100% residual
Potência aparente - A (kVA)	5,7	5,1	4,9	4,8	4,8	4,6	4,6
Potência ativa - P (kW)	4,5	4,5	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
Potência reativa – Q (kVAr)	2,9	1,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Potência de Desbalanço – N (kVA)	0,9	0,9	0,9	0,5	0,03	0,03	0,03
Potência de Residual – D (kVA)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	0,6	0,2
Fator de potência - λ_s	0,79	0,89	0,93	0,95	0,96	0,989	0,998
Coeficientes k_r , k_n e k_v	$k = 1$	$k_r = 0,45$	$k_r = 0$	$k_n = 0,57$ $k_r = 0$	$k_n = 0$ $k_r = 0$	$k_v = 0,55$ $k_n = 0$ $k_r = 0$	$k_v = 0$ $k_n = 0$ $k_r = 0$

Concluindo, os estudos de caso das simulações aqui realizadas, demonstraram a eficiência da estratégia de compensação dos distúrbios para diferentes tipos de cargas no lado do consumidor. A decomposição da CPT implementada em um algoritmo em C pelo software PSIM, apresentou estabilidade durante a injeção das correntes de referência pelo conversor nos devidos tempos da compensação flexível, conforme a proposta de utilização da fonte de corrente controlada, aqui empregada, a fim de evitar influências negativas nos resultados das correntes indesejáveis. Através dos ajustes dos coeficientes de compensação – k foi possível controlar o fator de potência - λ , atendendo a normas específicas de QEE, mas também apresentando uma operação flexível dos conversores trifásicos, que podem além de injetar potência ativa na rede, compensar os distúrbios provocados pelas cargas no lado consumidor.

5. CONVERSOR TRIFÁSICO PARA INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS POR MEIO DO CONTROLE FLEXÍVEL.

No capítulo anterior, avaliou-se a estratégia de compensação de reativos e distúrbios para diferentes tipos de cargas no lado do consumidor, por meio de um sistema de fonte de corrente controlada, não havendo assim a influência dos controladores (por ex: Proporcional-Integral) e frequências de chaveamento (PWM) para a análise da decomposição das correntes de referência. Neste capítulo, apresenta-se a metodologia de um controlador flexível para conversores trifásicos associados às fontes de geração distribuída – GD, para além de injetar potência ativa na rede elétrica, realizar a compensação de distúrbios de corrente, caracterizando um sistema de controle multifuncional e flexível, conforme já relatado no capítulo 2 da revisão bibliográfica.

Com base no fator de potência definido pela CPT, o controle flexível aqui utilizado para conversores multifuncionais trifásicos, pode ser conectado em redes de distribuição de energia elétrica com tensões distorcidas e desequilibradas, além disso, as cargas ligadas no PAC podem ser não-lineares e desbalanceadas. Assim, a referência de corrente gerada pelo sistema de controle deve levar à compensação (parcial ou total) do fator de potência e à injeção de potência ativa (potência útil) na rede elétrica. Para isto, as correntes de referência (não ativas) são geradas de maneira a melhorar a forma de onda da corrente na rede elétrica, visando assim a obtenção de resultados específicos, em relação a melhoria total ou parcial da qualidade de energia, em função da disponibilidade de energia da fonte local e da capacidade nominal do conversor eletrônico de potência na compensação destes fatores.

5.1. Modelagem do sistema de controle

A injeção de potência ativa é realizada conforme a equação (23), sendo a corrente ativa balanceada - i_{am}^b , relacionada com a fonte de energia local injetada na rede, mediante a condutância equivalente - G_{GD} , dada pela equação (47).

$$G_{GD} = \frac{P_{GD}}{V^2} \quad (47)$$

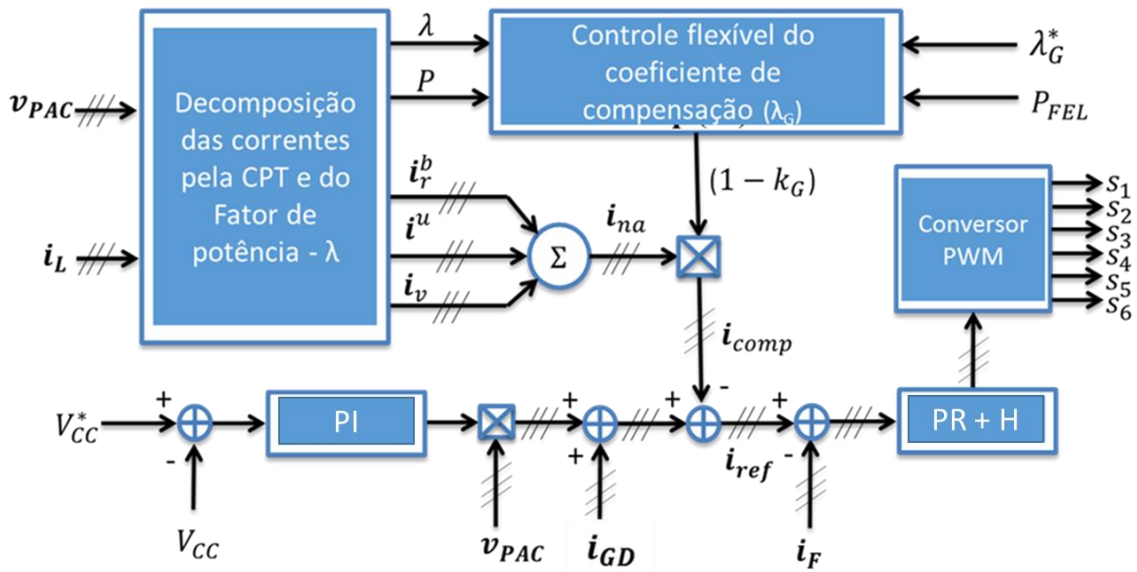
Sendo, P_{GD} o fluxo de potência ativa disponível na fonte de energia local, a ser garantido pelo controle de corrente do conversor de potência. Assim, a corrente instantânea de referência pode ser calculada conforme a equação (48).

$$i_{GD} = v \cdot G_{GD} \quad (48)$$

Sendo, i_{GD} a corrente instantânea que deve ser injetada na rede pela potência disponível da fonte de geração local – FRE.

O diagrama de blocos do sistema de controle flexível proposto é mostrado na Figura 51, conforme as definições para o fluxo de potência ativa - P_{GD} e a corrente instantânea - i_{GD} .

Figura 51 – Diagrama de blocos funcionais do controle flexível proposto.



Inicialmente, conforme a Figura 51, a decomposição da corrente em um PAC é determinada por amostragens da tensão - v_{PAC} e correntes de linha i_L , em componentes ortogonais pela CPT e o fator de potência - λ . Em seguida, os valores dos coeficientes de compensação K_r, K_n e K_v , são ajustados pelo controle flexível de maneira atender o fator de potência da rede desejado para compensar eventuais correntes indesejadas na carga - i_{na} (correntes não-ativas). A corrente de referência - i_{ref} , necessária para manter constante a tensão do barramento CC (através do controlador de tensão) é gerada multiplicando a tensão do ponto de acoplamento comum pela corrente instantânea i_{GD} . Por fim, o controlador de corrente da saída do conversor é baseado no controlador proporcional ressonante com compensador harmônico (PR+H) para o chaveamento de potência da modulação PWM.

5.2. Malhas de Controle

O controle do ganho de tensão é utilizado para regular a tensão do barramento CC, neste caso um controlador do tipo proporcional integral (PI). Para o controle do ganho de corrente, utiliza-se um controlador do tipo proporcional ressonante (PR) com compensador harmônico devido a modulação existente.

Na malha de tensão, a referência de entrada corresponde ao nível de tensão desejado é do link CC - V_{CC}^* . O valor de tensão no link CC é lido através de um controlador PI e comparado com o valor desejado, fechando a malha de controle da tensão. Com isto, o valor K_P pode ser definido levando-se em consideração o balanço da potência da fonte renovável de energia (FRE) contribuindo com uma fonte de tensão contínua de 400VCC para este sistema trifásico. A função de transferência deste controlador PI para a malha de tensão é dada por:

$$G_{PI}(s) = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s} \quad (49)$$

Sendo K_{CC} e K_P :

$$K_{CC} = 3 \cdot \frac{V_{RMS}^2}{V_{linkCC}} \therefore 3 \cdot \frac{127^2}{400} = 120,9 \quad (50)$$

$$K_P = \frac{\omega_{CC}}{K_{CC} \cdot \frac{1}{C_{linkCC} [F]} \cdot K_V} \therefore \frac{(2 \cdot \pi \cdot 10)}{120,9 \cdot \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,002} \cong 1,3 \quad (51)$$

E para o ganho de K_I :

$$K_I = \frac{K_P \cdot \omega_{CC}}{\tan(m_f)} \therefore \frac{1,3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 10)}{\tan(60^\circ)} \cong 47,2 \quad (52)$$

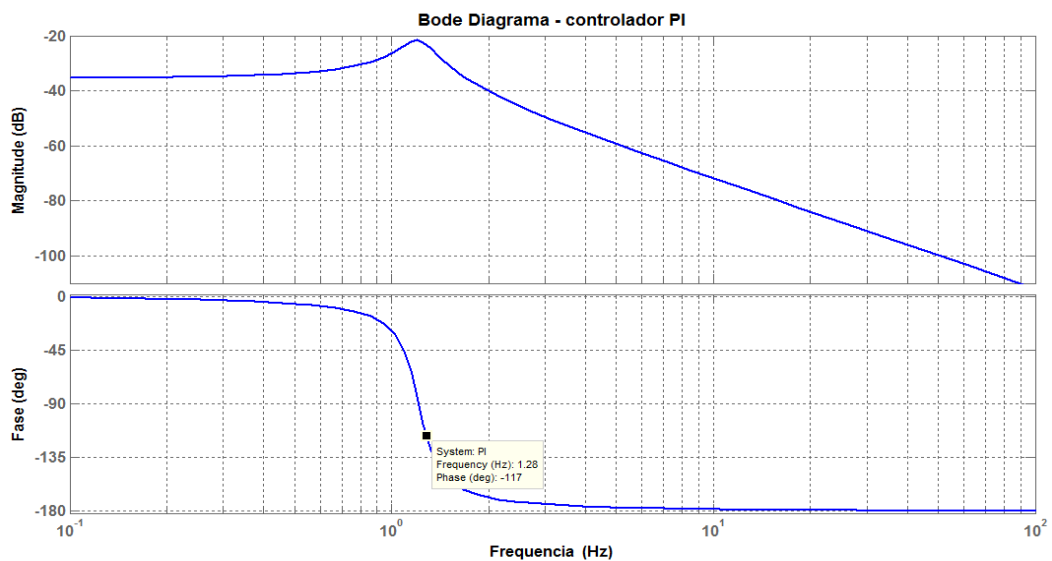
ω_{CC} = frequência de corte do controlador em [rad/s]

$\tan(m_f)$ = margem de fase em graus°

Equacionando assim para a função do controlador PI (s) tem-se a equação (50) e o digrama de bode correspondente, com uma frequência de corte de cerca de 1Hz para uma margem de fase 63° conforme a Figura 52.

$$G_{PI}(s) = \frac{1,3s + 47,2}{s} \quad (53)$$

Figura 52 – Resposta em frequência para o controlador PI na malha de tensão.



Na malha de corrente, tem-se o controlador proporcional ressonante mais um controlador ressonante harmônico, conforme foi avaliado na revisão bibliográfica (ZAMMIT et al., 2017; BLAABJERG et al., 2006) é um controlador que pode ser utilizado neste sistema de compensação seletiva e flexível. As funções de transferência destes controladores na malha de corrente são dadas nas equações (54) e (55).

$$G_{PR}(s) = K_P + K_I \cdot \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_o^2} \quad (54)$$

$$G_H(s) = \sum_{h=3,5,7...} K_h \cdot \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_o)^2} \quad (55)$$

ω_c = frequência de corte natural ($2\pi \cdot f_c$)

ω_o = frequência da rede ou harmônica

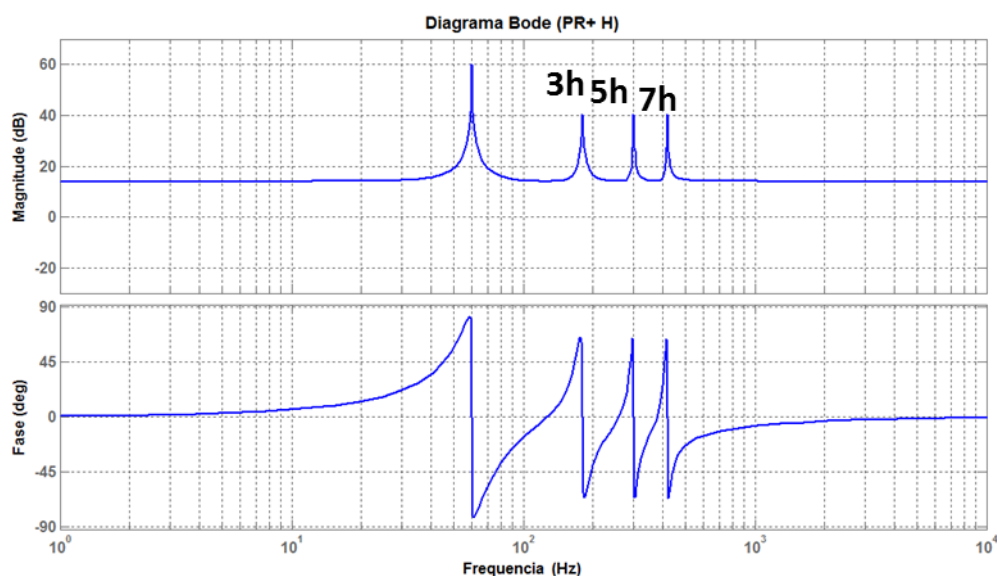
Somando-se os controladores proporcional ressonante na equação (54) e o do ressonante harmônico na equação (55) tem-se o controlador da malha de corrente para atenuação dos harmônicos de 3ª, 5ª e 7ª ordem conforme a equação (56).

$$G_{PR+H}(s) = K_P + K_I \cdot \frac{2(2\pi \cdot 10) s}{s^2 + 2(2\pi \cdot 10)s + (2\pi \cdot 60)^2} + K_{3h} \cdot \frac{2(2\pi \cdot 10) s}{s^2 + 2(2\pi \cdot 10)s + (2\pi \cdot 180)^2} +$$

$$K_{5h} \cdot \frac{2(2\pi \cdot 10) s}{s^2 + 2(2\pi \cdot 10)s + (2\pi \cdot 300)^2} + K_{7h} \cdot \frac{2(2\pi \cdot 10) s}{s^2 + 2(2\pi \cdot 10)s + (2\pi \cdot 420)^2} \quad (56)$$

A ordem harmônica a ser compensada é indicada por h , ω_o é a frequência fundamental da rede, K_P o ganho proporcional, K_I o ganho integral, ω_c a banda passante do controlador ressonante. Na Figura 53 tem-se o diagrama de bode para o controlador em malha aberta onde apresenta a resposta para as frequências harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem do controlador de corrente.

Figura 53 – Resposta em frequência do controlador PI ressonante harmônico da malha de corrente.



5.3. Conversor CC/CA trifásico PWM

A conversão da fonte de energia de corrente contínua para corrente alternada, a fim de que possa ser injetada em um ponto de acoplamento de sinal AC é realizado por um conversor CC/CA trifásico, para as três fases da rede, por meio da Modulação por Largura de Pulso de três níveis (do inglês, *Pulse Width Modulation* – PWM). Operando com uma alta frequência constante de 20kHz no chaveamento dos transistores de potência (Mosfet), uma tensão alternada aparece em seus terminais para cada fase, através da comparação de um sinal de controle modulante em 60Hz, com uma onda periódica chamada de portadora, neste caso uma triangular em 20kHz. Através da modulação de 3 níveis, a portadora com uma forma de onda triangular possui valores de amplitude no lado positivo, negativo e unitário, de modo a apresentar um menor conteúdo harmônico resultante. As Figuras 54 e 55 demonstram o conversor CC/CA trifásico PWM utilizado nesta simulação.

Figura 54 – Circuito comparador das tensões por fase do controle flexível e da portadora triangular para a modulação 3 níveis.

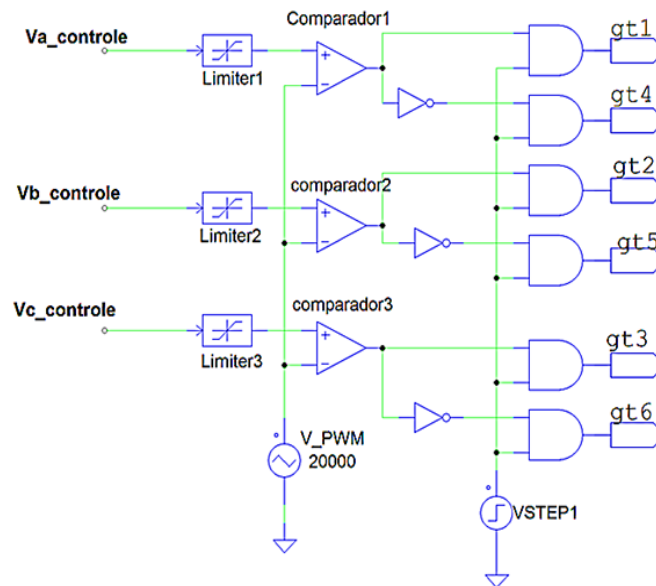
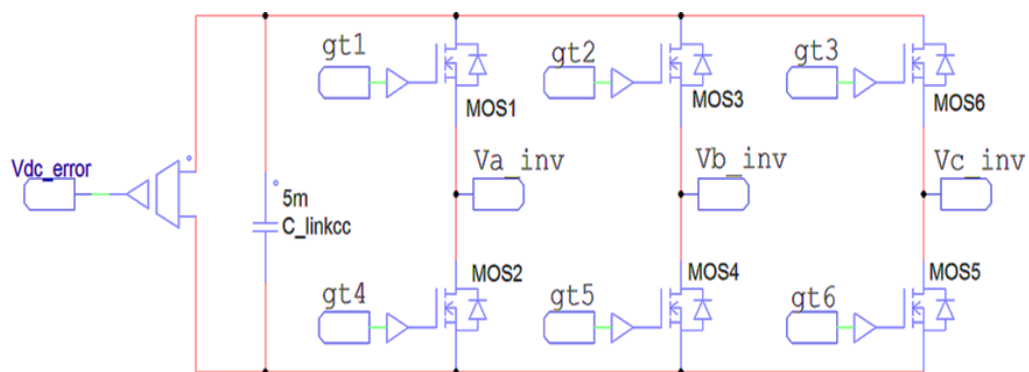


Figura 55 – Conversor CC/CA (inversor) trifásico com as devidas tensões de saída (V_{a_inv} , V_{b_inv} e V_{c_inv}).



A razão da modulação de frequência (m_f) é dada por:

$$m_f = \frac{f_{PWM}}{f_1} \therefore \frac{20 \cdot 10^3}{60} \cong 333,3 \quad (57)$$

Onde: f_{PWM} é a frequência da portadora e f_1 é a frequência da fundamental.

A razão de modulação de amplitude (m_a) é dada por:

$$m_a = \frac{V_{pk \text{ da fase } 60Hz}}{V_{dc}/2} \therefore \frac{127 \cdot \sqrt{2}}{400/2} \cong 0,9 \quad (58)$$

Em seguida, tem-se a formas de onda da portadora triangular com uma frequência fixa de 20kHz, conforme apresenta a Figura 56, para o circuito de modulação por largura de pulso. Na Figura 57 tem-se as tensões por fase, logo na saída do conversor CC/CA, antes do filtro LCL e a forma de onda sobreposta, após o filtro LCL, que elimina a frequência de chaveamento da portadora triangular (e suas harmônicas) no ponto de acoplamento da rede elétrica.

Figura 56 – Sinal da portadora triangular utilizada na modulação PWM.

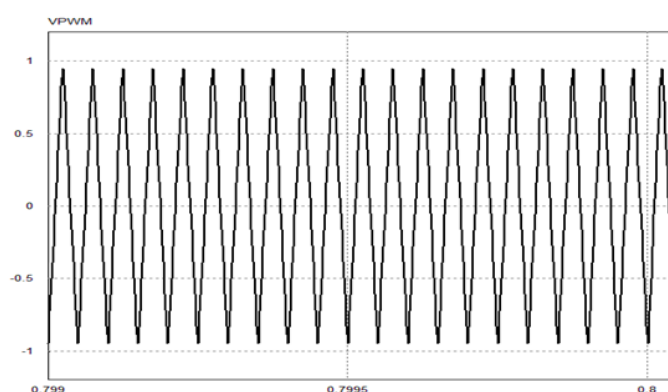
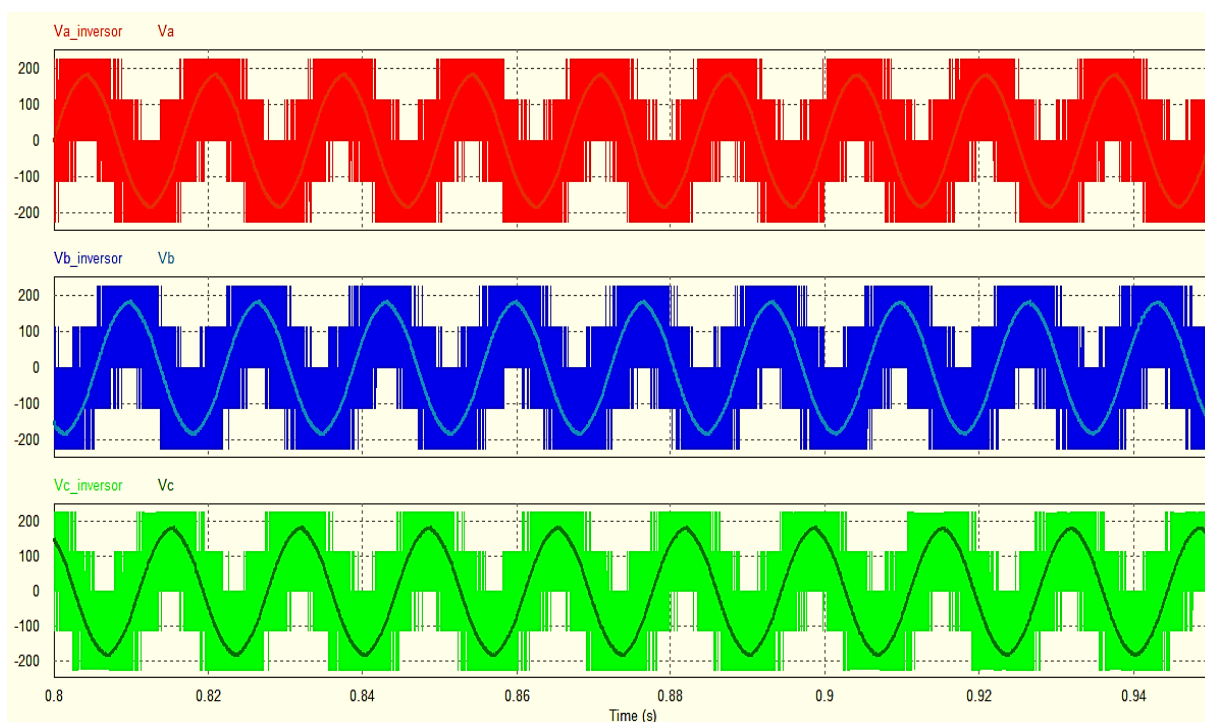


Figura 57 – Tensões de fase do inversor trifásico antes e após o filtro LCL.



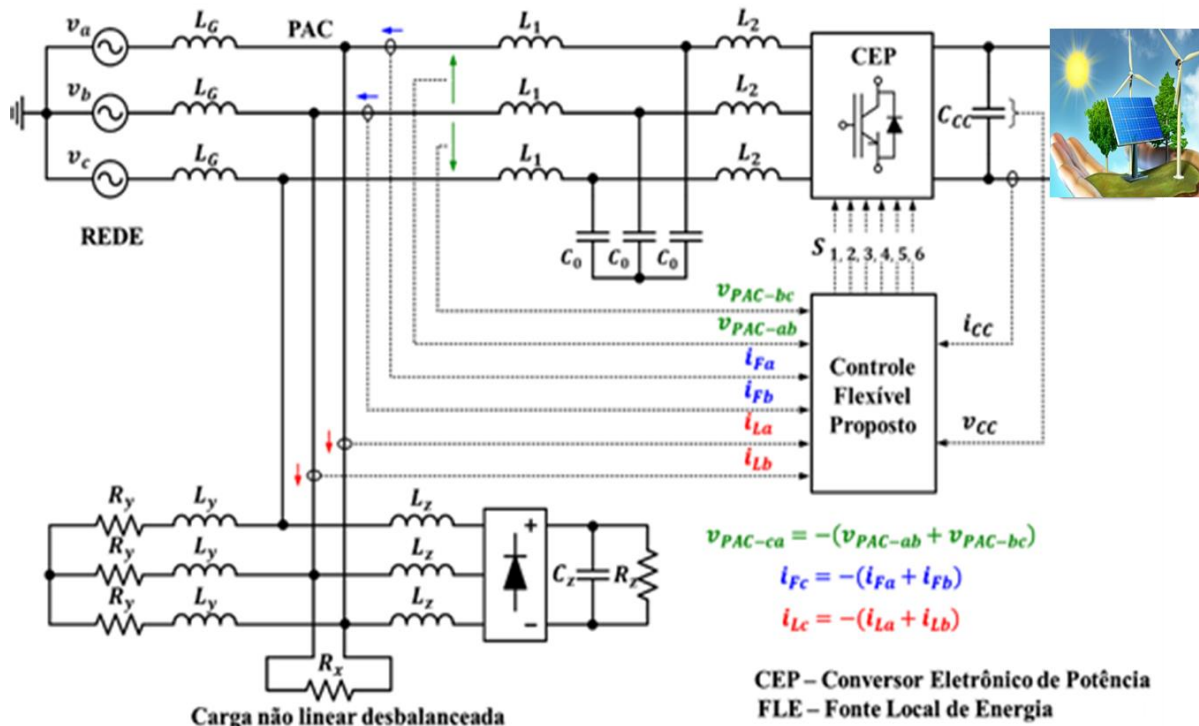
5.4. Resultados da Simulação

De maneira a validar a estratégia deste controle flexível para compensação de distúrbios e aumento do fator de potência devidos as cargas presentes, neste capítulo apresenta-se uma simulação com o controle de tensão e de corrente, além dos conversores CC/CA trifásico para a inserção das correntes de referência, sendo no primeiro instante a injeção de potência ativa e depois a compensação de distúrbios conforme a estratégia proposta. A tabela 13 apresenta os valores dos parâmetros utilizados nesta simulação e na Figura 58 uma ilustração do conversor eletrônico trifásico com a sua topologia de conexão.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados na simulação do controle flexível.

Tensão da rede e impedância de linha	Cargas utilizadas	Filtro LCL e C_{linkCC}	Controladores PI e PR + H
- $V_a = V_b = V_c = 127V_{AC} \text{ rms.}$ - $0,1\Omega + 0,5mH.$	- $R_{an} / R_{bn} / R_{cn} = 2\Omega + 70mH (Y)$ - $R_{ab} \text{ (desbalanço)} = 50\Omega$ - Não linear = $50\Omega // 470\mu F$	- $L_i = 1mH$ - $C_f = 10\mu F$ - $L_g = 0,5mH$ - $R_d = 3\Omega$ - $C_{linkcc} = 5mF$	- $V_{CC} = 400V$ - $V_{PAC} = 127V_{rms}$ - $K_{CC} = 120,9$ - $K_P = 1,3$ - $K_I = 47$ - $\omega_{CC} = 62,83 \text{ [rad/s]}$ - $\omega_o = 377 \text{ [rad/s]}$ - $K_{PR} = 5$ - $K_I = 100$ - $h = 3^a, 5^a \text{ e } 7^a \text{ H}$

Figura 58 – Conversor eletrônico de potência trifásico conectado à rede elétrica.



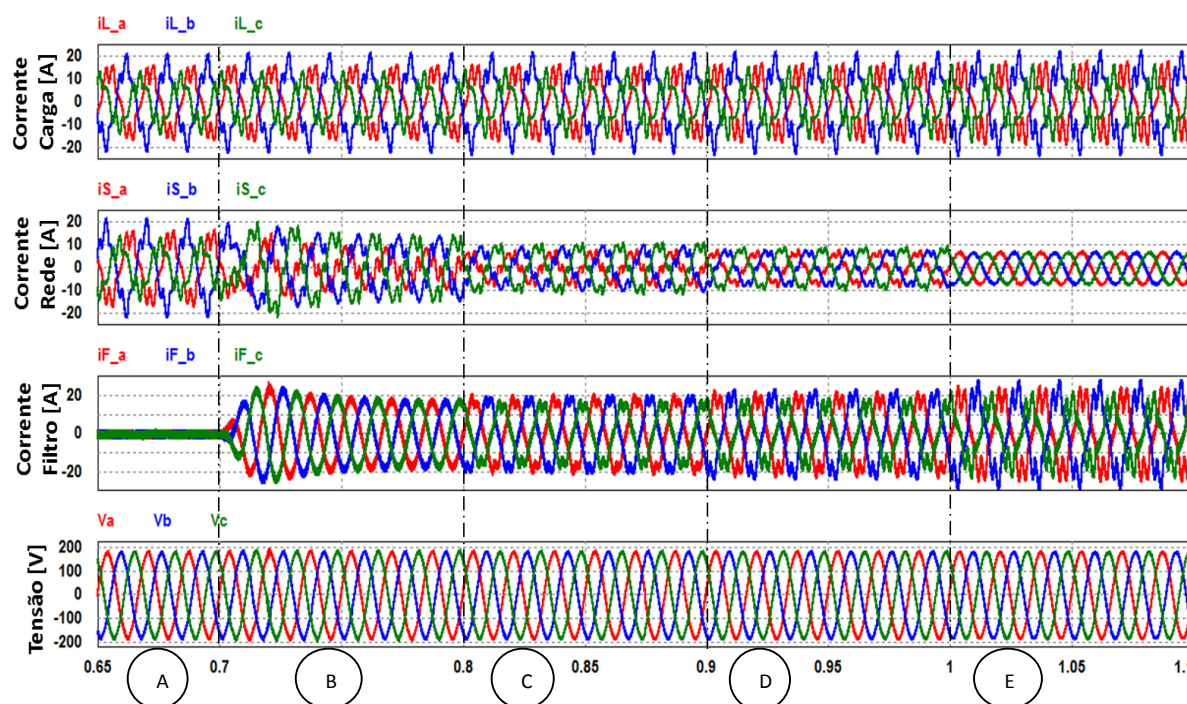
O objetivo da simulação é mostrar a eficiência do método para atingir valores preestabelecidos de fator de potência de rede - λ_s , visando por exemplo, atender aos limites nacionais ou internacionais para normas de QEE como: ANEEL-PRODIST, IEC 61000-3-2, IEEE 519 e de outros países. Neste sentido, o conversor deverá funcionar como um conversor eletrônico injetando potência ativa na rede através de uma fonte de geração de energia renovável por exemplo, solar ou eólica, e também como um sistema de compensação de distúrbios para cargas reativas, desbalanço de corrente entre fases para um sistema trifásico e redução das harmônicas nas correntes da rede elétrica, que são geradas pelas cargas reativas e não lineares do consumidor. Esta operação pode ser controlada pelo responsável da operação, tornando um sistema de controle flexível ou multifuncional, conforme a sequência dos eventos a seguir conforme apresenta a tabela 14.

Tabela 14 - Tempos da simulação da operação do sistema trifásico de controle flexível utilizado.

Marcação	Instante da simulação	Operação do controle flexível
(A)	$t < 0,7s$	Sem compensação, sem injeção de potência ativa.
(B)	$0,7 < t < 0,8s$	Somente injeção de potência ativa pela fonte geradora.
(C)	$0,8 < t < 0,9s$	Compensação parcial dos reativos - K_r com ajuste do λ_{rede} de 0,6 para 0,8.
(D)	$0,9 < t < 1,0s$	Compensação parcial de K_n e K_v , com ajuste de λ_{rede} de 0,8 para 0,92.
(E)	$t > 1,0s$	100% de compensação dos distúrbios, alcançando λ_{rede} de 1,0 (ideal).

A Figura 59 apresenta os resultados do controle flexível do conversor trifásico multifuncional para os instantes iniciais onde o conversor não opera (trecho A), em seguida tem-se a injeção de potência ativa (trecho B) e logo após a ocorrência da compensação parcial (trecho C e D) e pôr fim a compensação total de distúrbios para a rede elétrica (trecho E). Observa-se também que ao final da compensação total, as correntes de rede não possuem a presença de reativos, desbalanço e frequências harmônicas estando em fase com as tensões da rede.

Figura 59 – Dinâmica das tensões e correntes trifásicas do controle flexível proposto na simulação para filtro LCL-Y.



- ✓ Inicialmente no trecho A, o conversor eletrônico de potência – CEP está desligado ($t < 0,7s$). Como pode-se observar na Figura 59, as correntes no lado consumidor ($iL_{a,b,c}$) estão altamente distorcidas, devido às cargas reativas e não-linear no lado do consumidor, além do desbalanço entre as fases da corrente nas linhas. Pode-se verificar que não existe nenhuma corrente saindo do conversor ($iF_{a,b,c}$) confirmando que o CEP está desligado. Neste ponto as correntes da fonte geradora ($iS_{a,b,c}$) são exatamente iguais as correntes da carga ($iL_{a,b,c}$).
- ✓ No trecho B, tem-se a injeção de potência ativa, sem compensação de distúrbios das cargas ($0,7 < t < 0,8s$). Neste período, o conversor eletrônico trifásico CC/CA (ou inversor) injeta potência ativa (P) através dos filtros LCL em um ponto de acoplamento na rede de energia, não havendo neste período

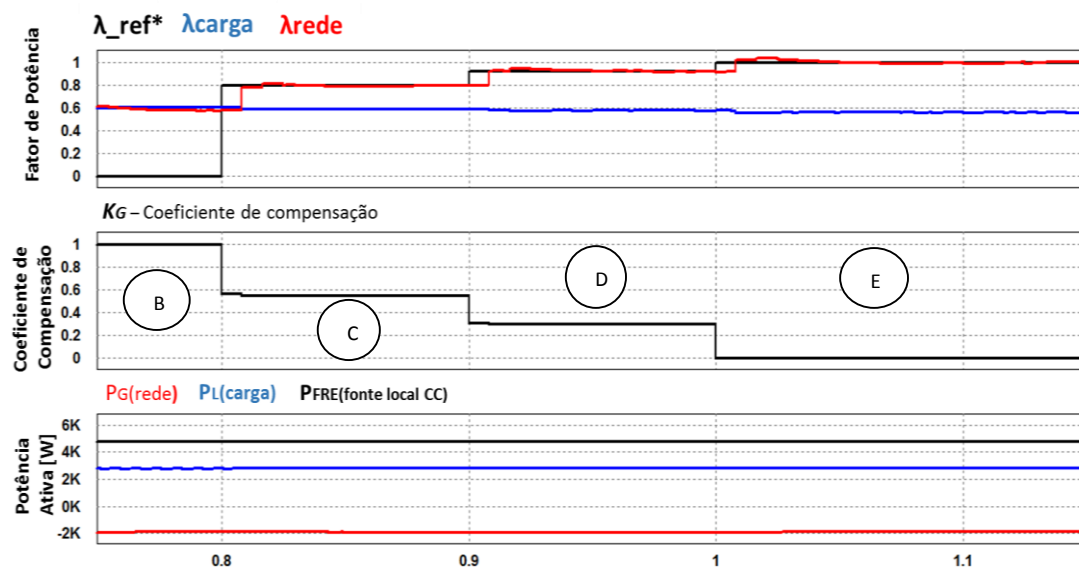
nenhuma compensação de distúrbios gerados pelas cargas presentes, conforme a Figura 59. Neste período, o fator de potência (λ) é de aproximadamente 0,6 conforme demonstra a Figura 60, com o coeficiente de compensação $k_G = 1$.

- ✓ No trecho em C, tem-se a compensação parcial dos reativos com ajuste do fator de potência ($0,8 < t < 0,9s$). Neste caso, o CEP é colocado em operação de modo a atingir valores específicos do fator de potência (λ_{rede} de 0,6 para 0,8), sendo possível com o ajuste do coeficiente de compensação $k_G = 0,57$, conforme a Figura 60. Neste período pode-se observar, a compensação de reativos nas correntes de rede – i_S , comparadas com as correntes de carga – i_L .
- ✓ Em seguida no trecho D, a compensação é de 100% dos reativos e parcialmente dos distúrbios de desbalanço e residual ($0,9 < t < 1,0s$). Neste caso, pode-se verificar na Figura 59 uma melhora nas correntes de rede - i_S com esta compensação parcial. O fator de potência da rede – λ_{rede} é alterado de 0,8 para 0,92 conforme demonstra a Figura 60, com o coeficiente de compensação $k_G = 0,3$. Nota-se que o fator de potência da carga – λ_{carga} , permanece sem alterações já que as cargas não sofrem alterações com o comportamento dinâmico do controle flexível.
- ✓ Finalmente no trecho E tem-se a compensação de 100% dos distúrbios, com o fator de potência ajustado para valor unitário ($t > 1,0s$). Neste período, o coeficiente de compensação $k_G = 0$ injetando pelo CEP todas as correntes

reativas, desbalanço e residual decompostas pela CPT pelo filtro LCL na rede elétrica, tornando assim o sistema atual com “comportamento” de somente cargas resistivas pelo lado da geração de energia, resultando em um fator de potência igual a 1. Observa-se que as correntes da rede – i_S , não possuem mais distorções e estão em fase com a tensão da rede.

Na Figura 60, seguem os resultados do comportamento do fator de potência de rede e da carga com o coeficiente de compensação – K_G , os resultados para a potência ativa visto no lado da rede (P_G), a de potência no lado das cargas (P_L) e pôr fim a potência ativa disponível pela fonte local de energia (P_{FRE}).

Figura 60 – Dinâmica dos fatores de potência de rede e carga, com o coeficiente de compensação do controle e as potências ativas do controle flexível.



Na Figura 61, tem-se a análise FFT (transformada de Fourier) das correntes da rede (i_{S_fase}) no período antes da compensação, com frequências harmônicas presentes de 5ª e 7ª ordem e na Figura 62 a análise FFT das mesmas correntes para o período de 100% compensação, onde verifica-se que não há a presença de harmônicos nas correntes de rede.

Figura 61 – Análise FFT para as correntes de rede ($iS_{a,b,c}$) antes da compensação do controle flexível.

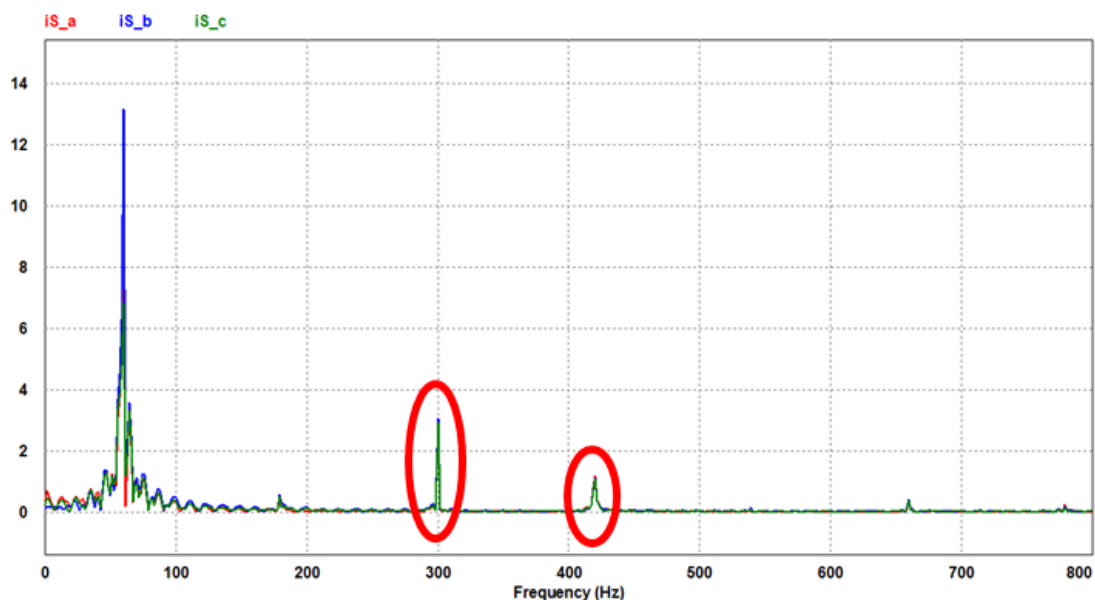
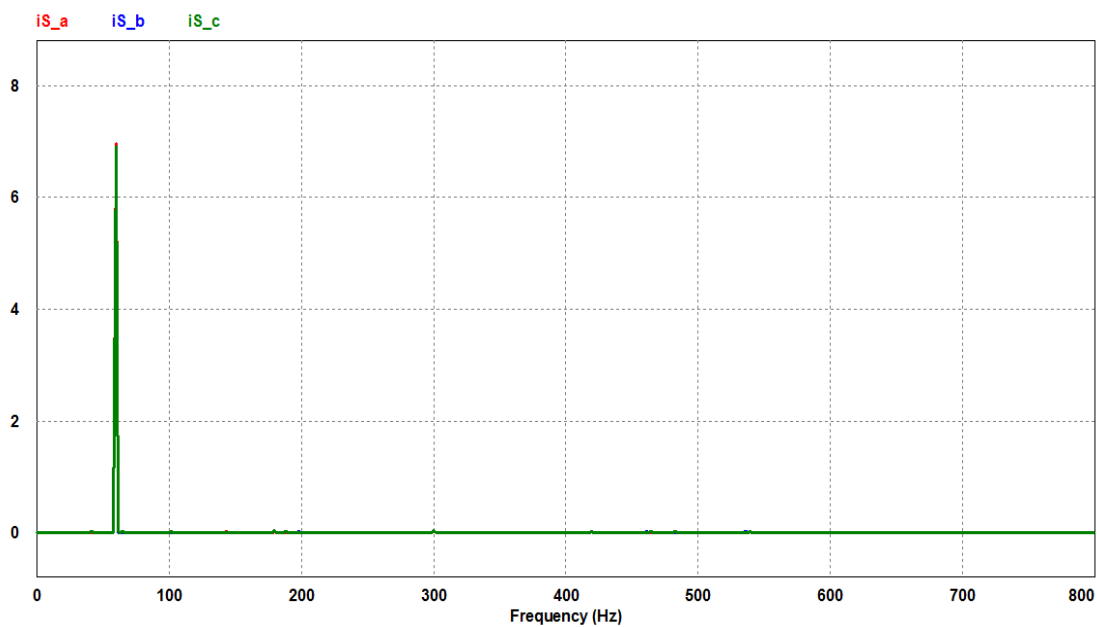


Figura 62 – Análise FFT para as correntes de rede ($iS_{a,b,c}$) depois de 100% da compensação dos distúrbios (reativos, desbalanço e harmônicos) pelo controle flexível, com somente a frequência fundamental.



5.5. Avaliação do filtro LCL trifásico para conexão Estrela (Y) e Triângulo (Δ).

Como discutido no capítulo 3, o filtro LCL trifásico utilizado neste sistema flexível pode ter duas configurações de conexão no PAC: estrela e triângulo. Essa configuração pode trazer algumas vantagens e desvantagens devido a alteração do capacitor de filtro (C_f) e do resistor de amortecimento (R_d) que são alterados para as devidas conexões, afetando assim a frequência de ressonância (f_{res}) do filtro e a potência reativa no acoplamento. As tabelas 15 e 16, apresentam os resultados de DHT de tensão e corrente além do fator de potência para as conexões do filtro LCL-Y e LCL- Δ . O capacitor C_f foi alterado de $10\mu F$ para $3\mu F$ e o resistor R_d de 3Ω para 9Ω para a conexão de estrela para triângulo, conforme as equações (19) e (20). A menor distorção harmônica está na conexão estrela para valores de corrente na fonte de geração do sistema trifásico, na Figura 59 pode-se verificar a dinâmica do filtro LCL-Y e na figura 63 tem-se a dinâmica das correntes e tensão para o filtro LCL- Δ .

Figura 63 - Dinâmica das tensões e correntes trifásicas do controle flexível proposto na simulação para filtro LCL- Δ .

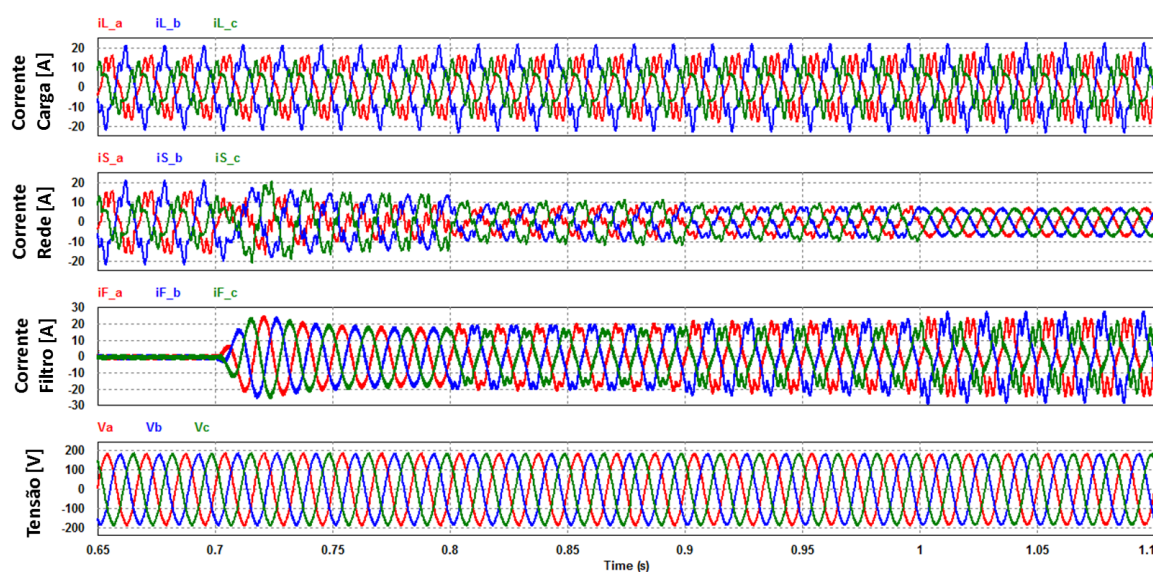


Tabela 15 – Valores de DHT e dos Fatores para o filtro LCL-Y.

DHT (%)	A - $t < 0,7s$	B - $0,7 < t < 0,8s$	C - $0,8 < t < 0,9s$	D - $0,9 < t < 1,0s$	E - $t > 1,0s$
DHTiS_a	26,1%	30,2%	33,3%	19,9%	3,9%
DHTiS_b	21,9%	28,2%	24,9%	17,8%	3,6%
DHTiS_c	34,5%	26,3%	21,1%	15,3%	3,7%
DHTv_a	2,43%	2,41%	1,50%	1,10%	0,98%
DHTv_b	2,48%	2,50%	1,50%	1,10%	0,95%
DHTv_c	2,41%	2,43%	1,51%	1,11%	0,98%
<i>Fatores</i>					
λ_S	0,45	0,59	0,80	0,92	0,99
λ_Q	0,43	0,34	0,15	0,06	0,008
λ_N	0,35	0,34	0,24	0,14	0,02
λ_D	0,32	0,31	0,24	0,17	0,02

Tabela 16 - Valores de DHT e dos Fatores para o filtro LCL- Δ .

DHT (%)	A - $t < 0,7s$	B - $0,7 < t < 0,8s$	C - $0,8 < t < 0,9s$	D - $0,9 < t < 1,0s$	E - $t > 1,0s$
DHTiS_a	26,7%	35,1%	31,9%	21,1%	5,4%
DHTiS_b	22,6%	29,3%	25,7%	17,8%	5,5%
DHTiS_c	35,8%	27,1%	21,5%	15,5%	5,1%
DHTv_a	2,47%	2,41%	1,40%	0,96%	0,96%
DHTv_b	2,54%	2,50%	1,40%	0,97%	0,96%
DHTv_c	2,44%	2,41%	1,40%	0,97%	0,94%
<i>Fatores</i>					
λ_S	0,45	0,60	0,81	0,93	0,99
λ_Q	0,43	0,33	0,14	0,05	0,01
λ_N	0,35	0,35	0,24	0,15	0,07
λ_D	0,32	0,32	0,25	0,17	0,05

Onde:

DHTiS_fase: Distorção Harmônica Total da corrente no lado da fonte_por fase;

DHTv_fase: Distorção Harmônica Total da tensão da rede_por fase;

λ_S : Fator de potência total no lado da fonte geradora;

λ_Q : Fator de reatividade no lado da fonte geradora;

λ_N : Fator de assimetria no lado da fonte geradora;

λ_D : Fator de não linearidade no lado da fonte geradora.

Concluindo, este capítulo apresentou uma abordagem com um sistema de controle para a malha de tensão e corrente (PI e PR+H), em conjunto com um conversor trifásico CC/CA com modulação PWM convertendo uma fonte de tensão contínua que poderia ser por exemplo: uma geração de energia solar, de modo que atue como um sistema que injeta potência ativa na rede e/ou como um sistema de compensação de distúrbios mediante a presença das cargas locais, para a melhoria do fator de potência - λ na rede de distribuição de energia. Nesta abordagem pode-se classificar como um controle flexível ou multifuncional de um conversor trifásico (ou inversor) conforme a estratégia realizada pelo responsável técnico ou administrador do sistema ativo/compensatório. Os resultados da simulação deste trabalho demonstraram a efetividade deste controle flexível trifásico para um cenário de interesse prático, atendendo as normas aqui citadas para regulação do fator de potência, redução da DHT e do desbalanço entre as fases. Para o filtro LCL com conexão em estrela ou triângulo, os resultados das distorções harmônicas foram menores para a conexão estrela, provavelmente devido ao valor do capacitor ser maior nesta configuração, entretanto os valores em triângulo não ficaram muito prejudicados devido a esta redução, ficando assim a critério do projetista para a tomada de decisão relacionando custos de materiais e instalação.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Esta dissertação de mestrado buscou-se apresentar uma nova aplicação ou funcionalidade aos atuais conversores CC/CA (inversores) das fontes renováveis de energia que normalmente convertem uma fonte de energia de corrente contínua para uma fonte de corrente alternada, para que operem de modo multifuncional ou flexível, de maneira a influenciar positivamente os indicadores de QEE para a rede elétrica. Esta metodologia poderá beneficiar um maior aproveitamento do potencial dos conversores eletrônicos de potência (CEP), instalados em uma rede inteligente de energia para atender a limites mínimos estabelecidos por normas nacionais ou internacionais conforme sua regulamentação (PRODIST-módulo 8, IEC 61000-3-2 ou IEEE 519)

No capítulo 2, a revisão bibliográfica buscou os principais artigos científicos e trabalhos de mestrado e doutorado recentes que abordaram o tema aqui apresentado, reforçando a base contextual, aprendizagem de algumas etapas necessárias para este conversor apresentado e até visões diferenciadas para a definição de controle flexível ou multifuncional de conversores para a energia renovável.

No capítulo 3, apresentou-se os filtros ressonantes para reduzir o efeito do chaveamento dos conversores CC/CA com as suas características técnicas, desenvolvimento individual (L, LC, LCL-Y e LCL- Δ) e os resultados comparativos entre eles em uma aplicação de conversão de energia simulado em Matlab®.

No capítulo 4, tem-se a decomposição das correntes de referência para diferentes tipos de cargas, utilizando a CPT (Teoria de Potência Conservativa) neste caso, de maneira a apresentar os resultados encontrados para a melhoria da QEE através de uma simulação em PSIM® com um sistema elétrico trifásico. Neste

tópico, utilizou-se fontes de correntes controlada no sistema, para se evitar influências negativas nos resultados da compensação dos distúrbios (reativos, desbalanço e residual) provenientes de controladores proporcional integral, ressonantes e do chaveamento dos circuitos de potência. Avaliando através dos resultados das simulações apresentadas, a eficácia da compensação para diferentes tipos de distúrbios, conforme a estratégia utilizada sendo ela parcial ou plena, para a melhoria de fatores indesejáveis e do fator de potência na rede elétrica.

No capítulo 5, um CEP trifásico do tipo fonte de tensão com controle proporcional ressonante e harmônico foi simulado e analisado os seus resultados para a compensação parcial e total de distúrbios que afetam a QEE, incluindo a injeção de potência ativa na rede como é usualmente utilizado nos inversores comerciais. O sistema proposto é muito similar com as aplicações de redes inteligentes de energia, com o diferencial da decomposição das correntes da carga e seu devido tratamento como filtro ativo de potência no conversor eletrônico, para além de injetar potência ativa na rede compensar a potência reativa aumentando assim o fator de potência (λ), a redução das perdas da energia reativa, incluindo o desbalanço de correntes entre as fases e os harmônicos gerados pelas cargas não-lineares cada vez mais presente em todos os níveis de consumidores (residencial, comercial e industrial). Esta flexibilidade com a compensação de distúrbios, agrega uma estratégia de somente ajustá-los para os devidos indicadores de QEE de maneira a atender esta legislação pela distribuidora de energia proveniente de cada país ou normas específicas.

6.1. Trabalhos futuros

Dentre as possibilidades que se destaca a continuação desta pesquisa a principal delas seria o desenvolvimento de um protótipo deste sistema trifásico, utilizando um conversor CC/CA, do tipo “Grid-tied” e uma plataforma de processamento digital (DSP) para implementar a decomposição das correntes de referência e o controle flexível, avaliando o impacto real para diferentes tipos de carga e modos de compensação flexível em um PAC.

Avaliar sistemas de comunicação dos dados dos CEP conectados na rede elétrica, através das novas tecnologias de comunicação como LoRaWAN, ZigBee, Wi-SUN, LTE, NB-IoT entre outras conforme o avanço do “SmartGrid” e IoT (Internet of Things) como estrutura de comunicação para supervisão remota, centralização das informações, execuções de compensações de distúrbios e dados técnicos da rede elétrica para avaliação e tomada de decisão do administrador do sistema.

6.2. Publicações realizadas e submissões.

- *CBA2016* – Congresso Brasileiro de Automática, Tema: ***Filtro Ativo de Potência Trifásico para o controle flexível da qualidade de energia elétrica***, apresentado em 6 de outubro de 2016.
- *IEEE SPEC 2016* – Southern Power Electronics Conference, Tema: ***Strategy for Flexible Operation of Three-Phase Converters***, apresentado em 5 de dezembro de 2016.
- *CBQEE 2015* – Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, Tema: ***Operação Flexível de Conversores Trifásicos Conectados a Rede Elétrica***, apresentado em 8 de julho de 2015.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

A. IPAKCHI, F. ALBUYEH. **Grid of the Future**. *IEEE Power Energy Magazine*. Mar./Apr. 2001. vol. 7, no. 2, pp. 52–62.

AHMET TEKE, MOHAMMAD BARGHI LATRANM. BALZANI AND A. REATTI. **Review of Multifunctional Inverter Topologies and Control Schemes Used in Distributed Generation Systems**. *Journal of Power Electronics*, volume:14, March 2014.

ALEKSANDR REZNIK, MARCELO SIMÕES, AHMED AL-DURRA, AND S.M. MUYEEN. **LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems**, 2014 IEEE Transactions on Industry Applications.

ANEEL REN 687. **Resolução Aneel 687 para geração e micro-geração distribuída de energia elétrica**. Aprovada em 24 de novembro de 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acessado em 28 de agosto de 2017.

ANEEL-PRODIST **Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição**. (Revisão 7), Junho de 2017. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-3>. Acessado em 28 de agosto de 2017.

ANEEL-PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – Prodist.

Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>, (Revisão 8), Janeiro 2017.
Acessado em 28 de agosto de 2017.

C. MARNAY, H. ASANO, S. PAPATHANASSIOU, G. STRBAC. **Policymaking for Microgrids: Economic and Regulatory Issues of Microgrid Implementation.** *IEEE Power & Energy Magazine*. May/Jun 2008. pp. 66-77.

CHANDAN CHAKRABORTY, HERBERT IU, DYLAN LU. **Power Converters, Control, and Energy Management for Distributed Generation**, 2015 IEEE Transactions on Industrial Electronics.

CONSTANTIN VLAD SURU, CRISTINA A. PATRASCU, MIHAELA POPESCU, ALEXANDRU BITOLEANU. **Conservative Power Theory application in shunt active power filtering under asymmetric voltage**, 2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), IEEE Transactions. Pages: 647 – 654.

D. GEIBEL, DR. T. DEGNER, C. HARDT, DR. M. ANTCHIEV, DR. A. KRUSTEVA. **Improvement of Power Quality and Reliability with Multifunctional PV-Inverters in Distributed Energy Systems**, Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009. September, 2009, Poland.

DAMOUN AHMADI, AND JIN WANG. **Online Selective Harmonic Compensation and Power Generation with Distributed Energy Resources**, 2014 IEEE Transactions on Power Electronics. Pages: 3738 – 3747, volume: 29.

DANIEL ZAMMIT, CYRIL S. STAINES, MAURICE APAP, JOHN LICARI. **Design of PR current control with selective harmonic compensators using Matlab.** Journal of Electrical Systems and Information Technology 2017.

DANILO I. BRANDÃO, FERNANDO P. MARAFÃO, HELMO K.M. PAREDES, ALESSANDRO COSTABEBER. **Inverter control strategy for DG systems based on the Conservative Power Theory.** 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE Transactions. Pages: 3283 – 3290.

DANILO I. BRANDÃO. **Sistema de geração fotovoltaico multifuncional.** Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista – UNESP/Bauru. Publicado em janeiro de 2013.

F. BLAABJERG, R. TEODORESCU, M. LISERRE AND P. C. LOH. **Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters.** IEEE proceedings – Electrical Power Applications, October 2006.

FERNANDO MARAFÃO, DANILO BRANDÃO, ALESSANDRO COSTABEBER, HELMO K. M. PAREDES. **Multi-task control strategy for grid-tied inverters based on conservative power theory,** 2014 IET Journals Renewable Power Generation. Pages: 154 – 165, volume: 9.

FERNANDO P. MARAFÃO, DANILO I. BRANDÃO, FLÁVIO A. S. GONÇALVES, HELMO K. M. PAREDES. **Decoupled Reference Generator for Shunt Active**

Filters Using the Conservative Power Theory. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. August 2013, pages: 522–534, volume 4.

FERNANDO P. MARAFÃO, HELMO K. M. PAREDES, LUIZ C.P. DA SILVA. **Possible Shunt Compensation Strategies Based on Conservative Power Theory.** 2010 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. Pages: 162 – 167, June, 2010 - Poland.

FREDE BLAABJERG, RAFAEL PEÑA-AZOLA, MARCO LISERRE, RAFAEL SEBASTIAN, JORG DANNEHL, AND FRIEDRICH FUCHS. **Analysis of the Passive Damping Losses in LCL-Filter-Based Grid Converters,** 2013 IEEE Transactions on Power Electronics. Pages: 2642 – 2646, volume: 28.

FREDE BLAABJERG, SOEREN BAEKHOEJ, JOHN K. PEDERSEN. **A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules,** 2005 IEEE Transactions on Industrial Electronics, Pages: 1292 – 1306, Volume: 41.

FREDE BLAABJERG, YONGHENG YANG, HUAI WANG. **Reactive Power Injection Strategies for Single-Phase Photovoltaic Systems Considering Grid Requirements,** 2014 IEEE Transactions on Industry Applications. Pages: 4065 – 4076, volume: 50.

G. T. HEYDT. **The Next Generation of Power Distribution Systems.** *IEEE Transaction on Smart Grid.* Nov. 2001. vol. 1, no. 3, pp. 225–235.

G. VENKATARAMANN, C. MARNAY. **A Large Role for Microgrids: Are Microgrids a Viable Paradigm for Electricity Supply Expansion** - *IEEE power & Energy Magazine*, May/Jun 2008. pp. 78-82.

IEEE STD 1459-2010 - **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. IEEE Standards. March 2010. Pages: 1 - 50.

J. DANNEHL, F.W. FUCHS E P.B. THOGERSEN. **PI State Current Controller LCL-filtered Grid-Connected Inverter Mitigating Grid Voltage Disturbance**, 2014 IEEE Transactions on Industry applications. Pages: 132- 136.

JACKSON JUSTO, FRANCIS MWASILU, JU LEE, JIN-WOO JUNG. **AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review**, 2013 Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume: 24, Pages 387- 405.

JAKSON P. BONALDO, HELMO K.M. PAREDES, JOSÉ A. POMILIO. **Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low-Voltage Distorted Power Systems with Variable Compensation Objectives**, 2016 IEEE Transactions on Power Electronics, volume 31, nº3 March 2016, Pages 2039 - 2052.

JAKSON P. BONALDO. **MULTIFUNCIONALIDADE DE CONVERSORES ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA UTILIZADOS EM MICRORREDES INTELIGENTES**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Publicado em maio de 2015.

JINWEI HE, YUN WEI LI, SHIRAJUM MUNIR. **A Flexible Harmonic Control Approach Through Voltage-Controlled DG-Grid Interfacing Converters**, 2012 IEEE Transactions on Industrial Electronics. Pages: 444 – 455, volume: 59.

LEONARDO POLTRONIERI SAMPAIO, MOACYR A. G. DE BRITO, GUILHERME DE A. E MELO, CARLOS ALBERTO CANESIN. **GRID-TIE THREE-PHASE INVERTER WITH ACTIVE AND REACTIVE POWER FLOW CONTROL CAPABILITY**. 2013 Brazilian Power Electronics Conference, IEEE Proceedings. Pages: 1039 – 1045.

MARCELO GRADELLA VILLALVA, JONAS RAFAEL GAZOLI, ERNESTO RUPPERT FILHO. **MODELING AND CIRCUIT-BASED SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS**, 2009 Brazilian Power Electronics Conference. Pages: 1244 – 1254.

MARCO LISERRE, FREDE BLAABJERG, STEFFAN HANSEN. **Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier**, 2005 IEEE Transactions on Industry Applications, volume: 41, pages 1281 – 1290.

MUKHTIAR SINGH, VINOD KHADKIKAR, AMBRISH CHANDRA, RAJIV K. VARMA. **Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level with Power-Quality Improvement Features**, 2011 IEEE Transactions on Power Delivery. Pages: 307 – 315, volume: 26.

OMID PALIZBAN, KIMMO KAUHANIEMI, JOSEP M. GUERRERO. **Microgrids in active network management – Part I: Hierarchical control, Energy storage, virtual power plants, and market participation**, 2014 Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 36, Agosto de 2014, Pages 428-439.

PAREDES, HELMO K. M. **TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA: UMA NOVA ABORDAGEM PARA O CONTROLE COOPERATIVO DE CONDICIONADORES DE ENERGIA E CONSIDERAÇÕES SOBRE ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, março de 2011.

PAULO SERGIO N. FILHO, TARCIO A. DOS SANTOS BARROS, MARCELO G. VILLALVA, ERNESTO RUPPERT FILHO. **Design Methodology of P-RES Controllers with Harmonic Compensation for Three-phase DC-AC Grid-Tie Inverters with LCL Output Filter**. 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Pages: 1 – 8.

PORTAL REDES INTELIGENTES BRASIL. **Demonstrativo de Projetos piloto no Brasil**. Disponível em: <https://redesinteligentesbrasil.org.br/projetos-piloto-brasil.html>. Acessado em 28 de agosto de 2017.

RAFAEL PEÑA-ALZOLA, MARCO LISERRE, FREDE BLAABJERG, YONGHENG YANG. **Robust Design of LCL-Filters for Active Damping in Grid Converters**, IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE, Publicado em 06 January 2014.

RELATÓRIO EPE. **Síntese [Ano base 2016] Balanço Energético nacional 2017.**

Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/>. Rio de Janeiro, junho de 2017 - Acessado em 28 de agosto de 2017.

RELATÓRIO MCTI: **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2014/11/mcti-lanca-estimativas-anuais-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-no-brasil>.

2ª Edição, novembro de 2014 - Acessado em 28 de agosto de 2017.

RENATA CARNIELETTO, SIDDHARTH SURYANARAYANAN, MARCELO G. SIMÕES, FELIX A. FARRET. **A Multifunctional Single-Phase Voltage Source Inverter in Perspective of the Smart Grid Initiative**, 2009 IEEE Transactions on Power Electronics, Pages: 1 – 7.

RODRIGO G. TONIN, THIAGO BERNARDES, JORGE R. MASSING AND HUMBERTO PINHEIRO. **SLIDING MODE OBSERVER FOR VOLTAGE SENSORLESS CURRENT CONTROL OF GRID-CONNECTED CONVERTERS**, 2013 Brazilian Power Electronics Conference. Pages: 387 – 392.

S.CHOWDHURY, G.A.TAYLOR, S.P.CHOWDBHURY, A.K.SAHA, Y.H.SONG. **MODELLING, SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A PV ARRAY IN A EMBEDDED ENVIRONMENT**. 42nd International Universities Power Engineering Conference. 2007. Pages: 781 – 785.

WANG JIANZE, PENG FENGHUA, WU QITAO ET AL. **A novel Adaptive Hystereis Band Current Controller for Shunt Active Power Filter using SVPWM**, Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting of IEEE. Oct.2004. pp.129-134, volume1,3-7.

XU RENZHONG, XIA LIE, ZHANG JUNJUN, DING JIE. **Design and Research on the LCL Filter in Three-Phase PV Grid-Connected Inverters**, 2013 International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol. 5, June 2013, pages 322 – 325.

YI TANG, POH C. LOH, PENG WANG, FOOK H. CHOO, FENG GAO AND FREDE BLAABJERG. **Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter With Output LCL Filter**, 2012 IEEE Transactions on Industry Applications. Pages: 1443 – 1452, volume: 59.

YONGHENG YANG, FREDE BLAABJERG, HUAI WANG, MARCELO GODOY SIMÕES. **Power control flexibilities for grid-connected multi-functional photovoltaic inverters**, 2016 IET Journals Renewable Power Generation. Pages: 504 – 513, volume:10.

ZHENG ZENG, HUAN YANG, SHENGQING TANG AND RONGXIANG ZHAO. **Objective-Oriented Power Quality Compensation of Multifunctional Grid-Tied Inverters and Its Application in Microgrids**, 2015 IEEE Transactions On Power Electronics. Pages: 1255 – 1265, volume: 30.

Anexos

Figura 64 – Circuito de simulação em Matlab do Filtro LCL em estrela.

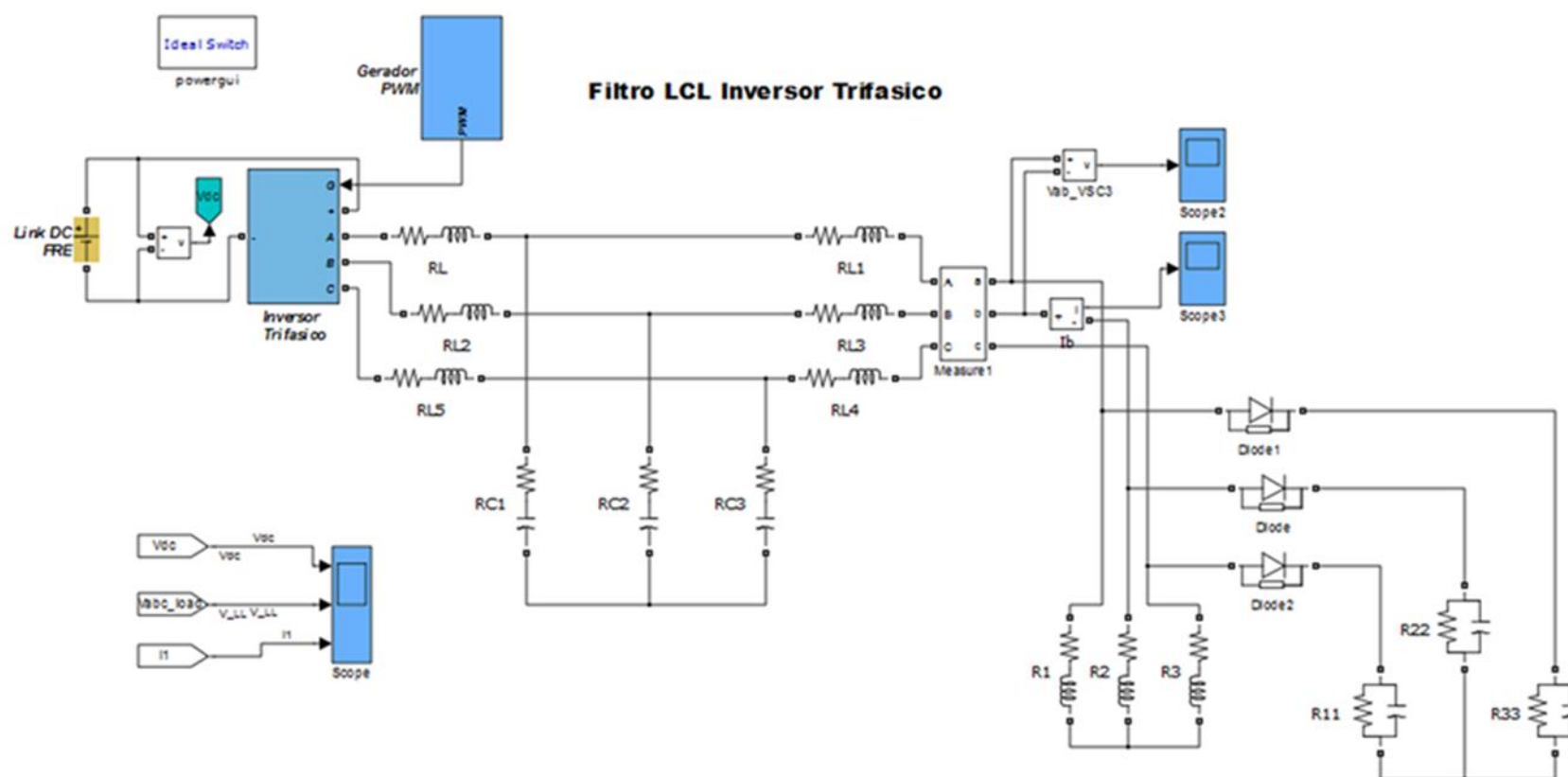


Figura 65 – Circuito de simulação em Matlab do Filtro LCL em triângulo.

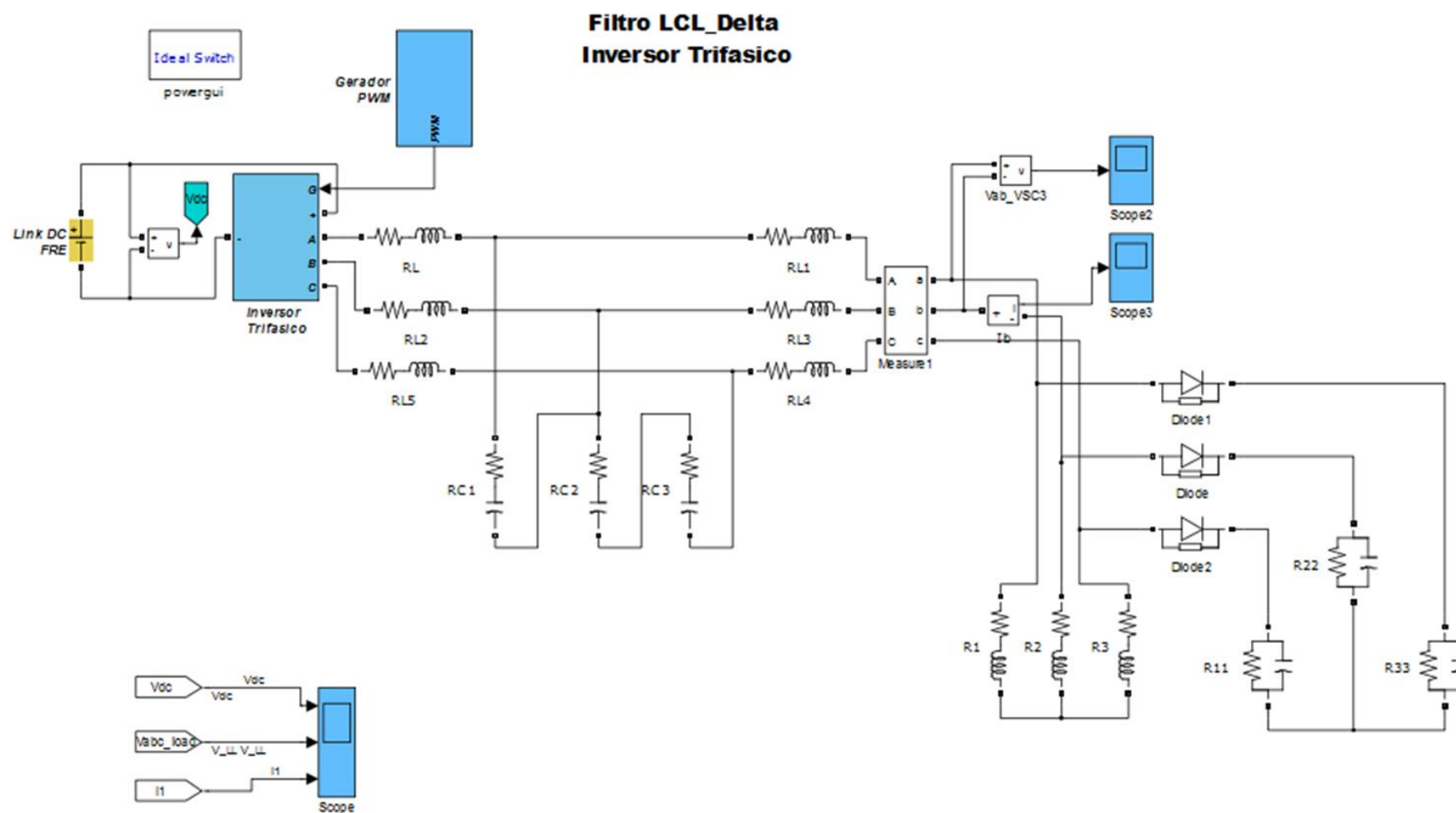


Figura 66 – Circuito de simulação em Matlab do conversor CC/CA com modulação PWM.

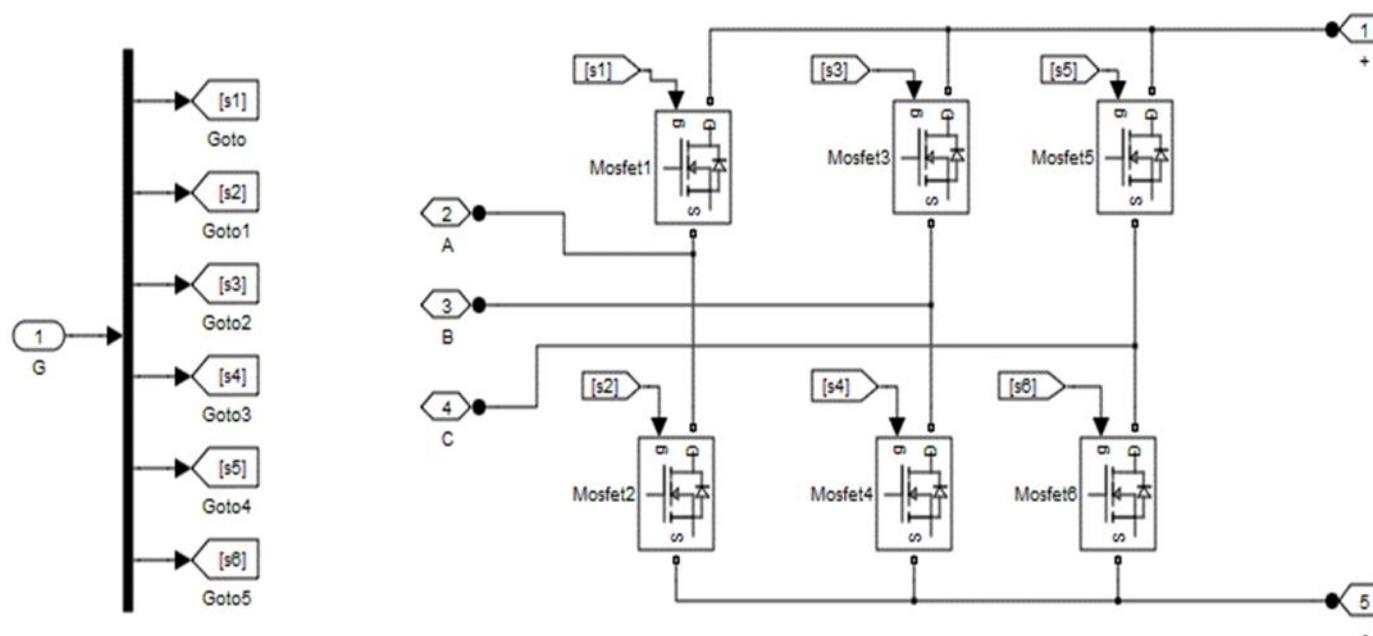


Figura 67 – Circuito de simulação em PSIM do sistema trifásico com fonte de corrente controlada.

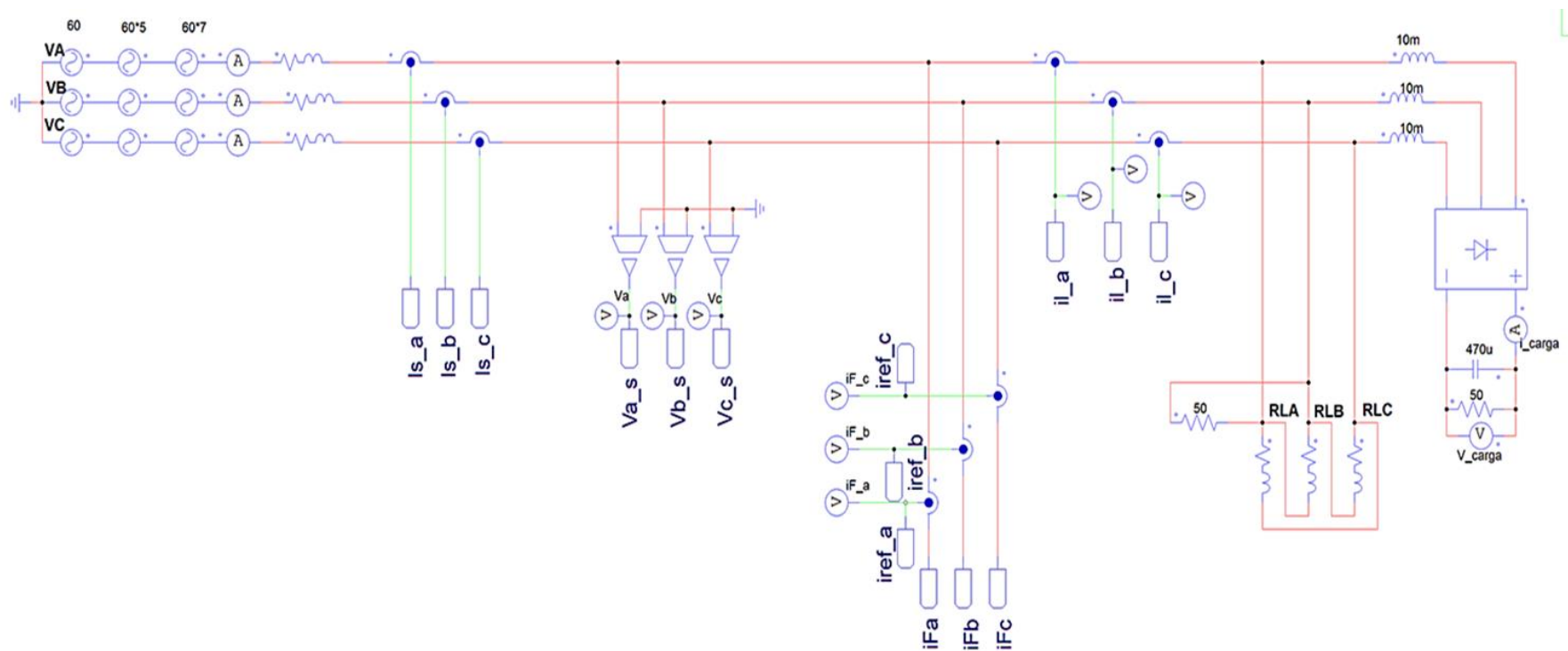


Figura 68 – Circuito de simulação em Matlab da fonte de corrente controlada para cada fase.

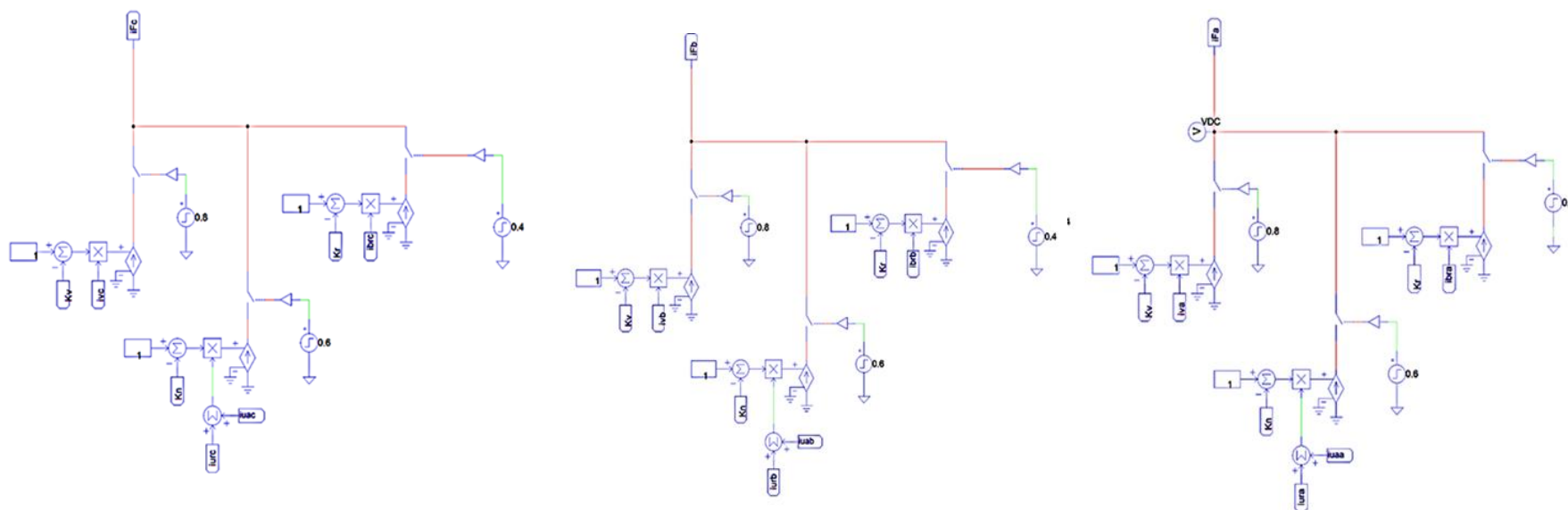
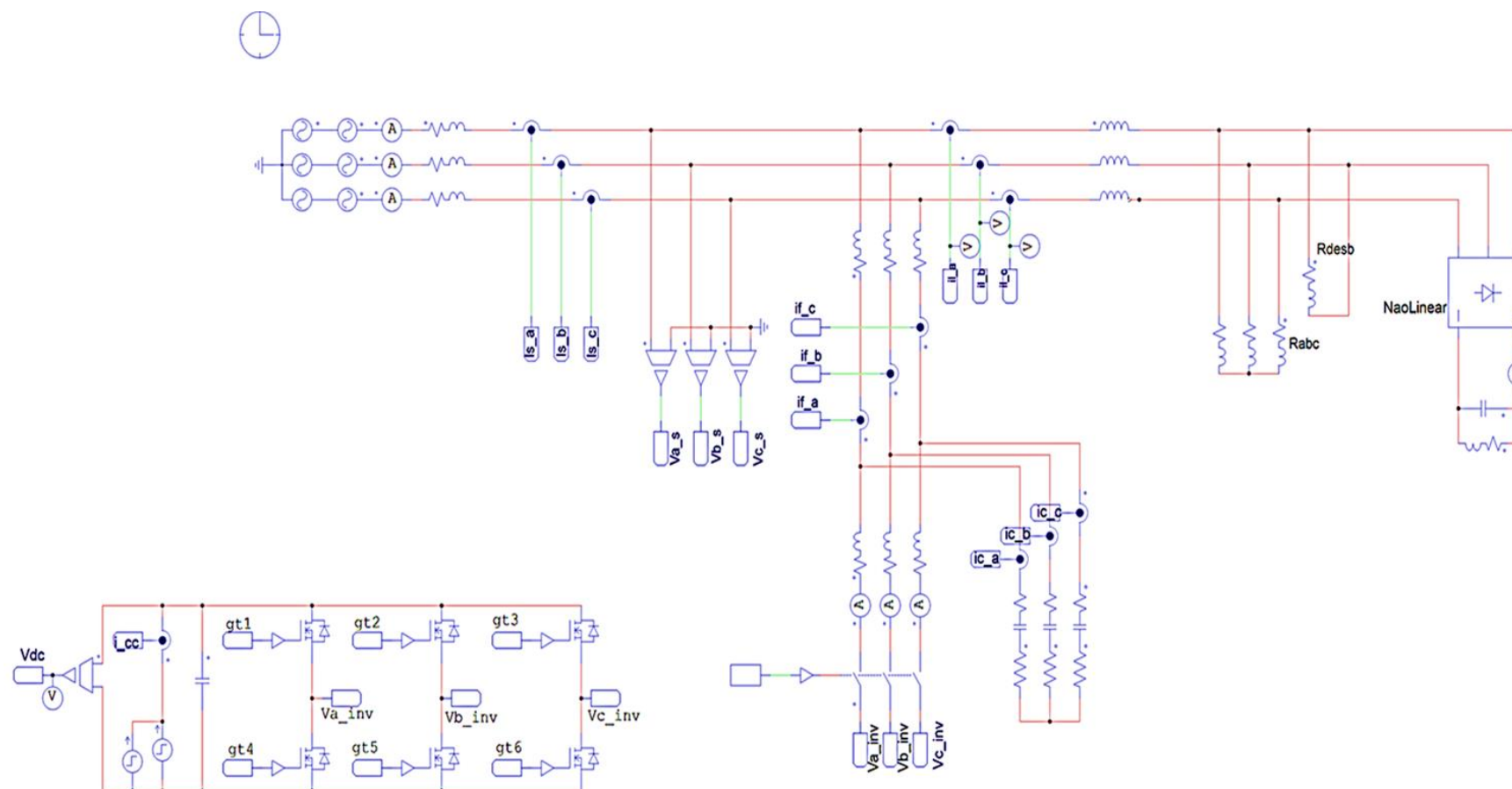


Figura 69 – Circuito de simulação em PSIM do sistema trifásico com filtro LCL-Y e conversor CC/CA trifásico.



Página em branco.