

NELSON HENRIQUE BERTOLLO SANTANA

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES
DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO
UTILIZANDO ALGORITMOS MULTI-OBJETIVO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Cardoso Celeste

Co-Orientador: Prof. Dr. Flavio Duarte Couto Oliveira

SÃO MATEUS

2018

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

S232o Santana, Nelson Henrique Bertollo, 1987-
Otimização dos parâmetros dos controladores de um filtro
ativo de potência paralelo utilizando algoritmos multi-objetivo /
Nelson Henrique Bertollo Santana. – 2018.
87 f. : il.

Orientador: Wanderley Cardoso Celeste.
Coorientador: Flávio Duarte Couto Oliveira.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Redes elétricas. 2. Correntes elétricas. I. Celeste,
Wanderley Cardoso, 1978-. II. Oliveira, Flávio Duarte Couto,
1978-. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

Elaborado por Filipe Briguiet Pereira - CRB-6 ES-000863/O

NELSON HENRIQUE BERTOLLO SANTANA

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES DE UM
FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO UTILIZANDO
ALGORITMOS MULTI-OBJETIVO**

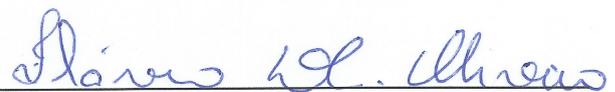
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 05 de julho de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Wanderley Cardoso Celeste
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Flávio Duarte Couto Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador



Prof. Dr. Daniel José Custodio Coura
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Clainer Bravin Donadel
Instituto Federal do Espírito Santo

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as graças que tem concedido a mim e a minha família.

À minha família por todo apoio que sempre dispensou a mim, especialmente a meu pai Nelson, minha mãe Celia e meu irmão Stephan.

Aos meus orientadores Wanderley e Flávio pelos ensinamentos e apoio durante o trabalho.

Ao professor Hélder pelo valioso apoio com a utilização de otimizadores e a elaboração dos artigos, sem os quais, este trabalho não teria se concretizado.

Aos colegas do IFES - Campus São Mateus, especialmente para os membros da Coordenadoria de Eletrotécnica, pelo incentivo, pela troca de conhecimento, pelo engajamento diário no trabalho e, principalmente, pela concessão do afastamento em parte do mestrado.

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes."

Isaac Newton

Resumo

O aumento na utilização de cargas não-lineares na rede elétrica é um fenômeno que se iniciou em meados do século XX e tem aumentado a cada ano. Esse tipo de carga tem como principal característica a emissão de componentes harmônicos em decorrência de seu processo de conversão de energia, o que provoca diversos efeitos nocivos na rede elétrica, tais como aquecimento de condutores e transformadores, mal-funcionamento de equipamentos, inclusive de proteção, entre outros. Dentre as alternativas disponíveis para superar o problema dos harmônicos destacam-se os filtros ativos de potência devido ao seu bom desempenho operacional, principalmente para compensação de harmônicos de baixa ordem. Nesse contexto, diversas técnicas de controle foram desenvolvidas para a operação desses filtros, tais como o controle por histerese, controle Deadbeat e as técnicas de controle de corrente lineares, tais como o controle PI-SRF, controle P-MRI e o controle P-SSI. Essas possuem a vantagem de operar com frequência de chaveamento bem definida e não depender do conhecimento dos parâmetros do sistema para seu bom desempenho. Entretanto, a dificuldade de sintonia dos controladores dessas técnicas é um problema relevante para sua aplicação. Dessa forma, este trabalho propõe a utilização de algoritmos de otimização para a sintonia dos controladores de duas técnicas de controle: PI-SRF e P-SSI. São utilizadas para isso, duas meta-heurísticas distintas, MOPSO e MOABC, para que seja possível comparar o desempenho de cada uma delas para a sintonia de cada um dos métodos utilizados. Os resultados mostram uma superioridade relevante do MOPSO, obtendo resultados até 17% melhores e com um tempo computacional 50% menor em relação ao MOABC. A técnica de controle P-SSI apresentou resultados ligeiramente melhores que a técnica PI-SRF, não convertendo sua maior complexidade em melhoria de desempenho. Os melhores parâmetros são utilizados em uma simulação de *gain scheduling*, permitindo reduzir o THD da fonte para 1,00% quando conectada a uma carga com THD igual a 20,19%.

Abstract

The increment in utilization of non-linear loads by the grid users is a phenomenon that has begun in the middle of 20th century and has increased year after year. That kind of load has as main feature the harmonic current emissions due to its energy conversion process, which causes many nocive effects in the grid, like conductors and transformers heating, equipment malfunctioning, including the protection ones, among others. In the range of available alternatives to overcome the harmonics problem, the active power filters are a good choice, due to its good operational performance, specially for low order harmonics. In this context, many control techniques have been developed for these kind of filters operation, as hysteresis control, deadbeat control and the linear current control techniques, like PI-SRF, P-MRI and P-SSI. The last ones have the advantage of operating with well defined switching frequency and independence of the correct system parameters information to its good performance. However, the tuning of the controllers is a relevant problem to its utilization. Thus, this work proposes the utilization of otimization algorithms for the controllers tuning of two different control techniques: PI-SRF and P-SSI. To this end, two differents metaheuristics, MOPSO and MOABC, were used so it may be possible to compare the performance of each one for tuning each technique. The results shown the superiority of MOPSO, achieving 17% better results and spending 50% less computacional time when compared to MOABC. The best parameters were used in a gain scheduling simulation, wich reduced the source THD to 1.00% with a 20.19% THD connected load.

Lista de Abreviações

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
VSD	Variable Speed Drivers
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
FAPS	Filtro Ativo de Potência Série
FAPP	Filtro Ativo de Potência Paralelo
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>
FAPP	Filtro Ativo de Potência Paralelo
PI	Proporcional Integral
PI-SRF	<i>Proportional Integral - Synchronous Reference Frame</i>
PI-MRI	<i>Proportional Integral - Multiple Rotating Integrators</i>
P-SSI	<i>Proportional - Sinusoidal Signal Integrators</i>
PI-RES	<i>Proportional Integral - Resonant Controllers</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
MOPSO	<i>Multi Objective Particle Swarm Optimization</i>
MOABC	<i>Multi Objective Artificial Bee Colony</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>
CSI	<i>Current Source Inverter</i>

Lista de Símbolos

$I_{maxIGBT}$	Corrente máxima suportada pelos IGBT's	A
$V_{maxIGBT}$	Tensão máxima de operação dos IGBT's	V
V_{IRMS}	Tensão de linha RMS do sistema	V
S_{nom}	Potência Nominal do FAPP	VA
h_{max}	Máximo harmônico Compensado	
p_l	Potência Real Instantânea da Carga	W
q_l	Potência Imaginária Instantânea da Carga	VAi
\bar{p}_l	Componente Contínua da Potência Real Instantânea da Carga	W
\bar{q}_l	Componente Contínua da Potência Imaginária Instantânea da Carga	VAi
\tilde{p}_l	Componente Oscilatória da Potência Real Instantânea da Carga	W
\tilde{q}_l	Componente Oscilatória da Potência Imaginária Instantânea da Carga	VAi
p_{fsaida}	Potência Real Instantânea de saída do FAPP	W
$p_{l(n)}$	Amplitude da Componente Harmônica de Ordem n da Potência Real Instantânea da Carga	W
ω_0	Frequência Angular Fundamental do Sistema	rad/s
$\phi_{(n)}$	Ângulo de Fase da Componente Harmônica de Ordem n	rad
$\hat{\phi}_{(n)}$	Ângulo de Fase da Componente Harmônica de Ordem n	rad
\tilde{p}'_l	Aproximação da Componente Oscilatória da Potência Real Instantânea da Carga	W
$\tilde{p}_{l(h)}$	Amplitude da variável \tilde{p}'_l	W
S_l	Potência Aparente total da Carga	VA
THD_l	Distorção Harmônica Total da Carga	VA
\tilde{i}_{fsaida}	Componente Oscilatória da Corrente de Saída do FAPP	A
\bar{V}_{CC}	Tensão Média do Barramento CC	V
\tilde{v}_{CC}	Componente Oscilatória de Tensão do Barramento CC	V

C_{CC}	Capacitância Total do Barramento CC	μF
f_{chav}	Frequência de Chaveamento do FAPP	Hz
ΔI_{max}	Ripple Máximo da Corrente de Saída do FAPP	A
L	Indutância do Filtro L de saída do FAPP	mH
k_p	Constante Proporcional dos Controladores	
k_{i1}	Constante Integral da Componente Fundamental dos Controladores	
k_{ih}	Constante Integral da Componente Harmônica de Ordem h dos Controladores	
x_i	Componente i de um enxame de partículas	
τ	Número da iteração de um Algoritmo de Otimização	
v_i	Velocidade da Componente i de um enxame de partículas	
w	Fator de Inércia	
c_1	Fator de Aceleração 1	
c_2	Fator de Aceleração 2	
p_i	Melhor Resultado Obtido pela Partícula x_i	
g	Melhor Resultado Obtido pelo Enxame	
ϕ_i	Fator de Aceleração Ajustado	
x_k	Componente k de um enxame de partículas, onde $k \neq i$	
x_i^{LI}	Limite Inferior do Valor de uma Partícula x_i	
x_i^{LS}	Limite Superior do Valor de uma Partícula x_i	
\mathbf{x}	Vetor de Partículas ou Soluções tal que $\mathbf{x} = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$	
$f_m(\mathbf{x})$	m -ésima Função Objetivo de um Algoritmo de Otimização	
$F(\mathbf{x})$	Vetor de Funções Objetivo de um Algoritmo de Otimização	
$y(\mathbf{x})$	Função de Restrição de um Algoritmo de Otimização	
$z(\mathbf{x})$	Função de Restrição de um Algoritmo de Otimização	
I_H	Valor RMS das Correntes Harmônicas	A
I_F	Valor RMS da Corrente Fundamental	A
I_n	Amplitude da Corrente Harmônica de Ordem n	A
T_{total}	Tempo Total do Dado Amostrado	s
$E(t)$	Erro da Tensão do Barramento CC no instante t	V
$E(n)$	Erro da Tensão do Barramento CC na amostra n	V

f_{amost}	Frequência de Amostragem do Sinal	S/s
$\mathbf{x}_{PI-SRF(n)}$	Vetor de Partículas de Algoritmos de Otimização Trabalhando com Controladores PI-SRF para uma Carga n	
$\mathbf{x}_{P-SSI(n)}$	Vetor de Partículas de Algoritmos de Otimização Trabalhando com Controladores P-SSI para uma Carga n	
$THD_{s(n)}$	THD da Corrente da Fonte para um Sistema Alimentando a Carga n	
$EQM_{s(n)}$	EQM da Tensão do Barramento CC para um Sistema Alimentando a Carga n	
$f_{THD[P-SSI]}$	Função Objetivo Resultado da Soma dos THD's das 4 Cargas Otimizadas em um Algoritmo Trabalhando com Controladores P-SSI	
$f_{THD[PI-SRF]}$	Função Objetivo Resultado da Soma dos THD's das 4 Cargas Otimizadas em um Algoritmo Trabalhando com Controladores PI-SRF	
$f_{EQM[P-SSI]}$	Função Objetivo Resultado da Soma dos EQM's das 4 Cargas Otimizadas em um Algoritmo Trabalhando com Controladores P-SSI	
$f_{EQM[PI-SRF]}$	Função Objetivo Resultado da Soma dos EQM's das 4 Cargas Otimizadas em um Algoritmo Trabalhando com Controladores PI-SRF	
$N_{SM(n)}$	Quantidade Relativa de Pontos Sobremodulados da Resposta do Controlador para uma Carga n	
$N_{SMabs(n)}$	Quantidade Absoluta de Pontos Sobremodulados da Resposta do Controlador para uma Carga n	
$N_{Total(n)}$	Quantidade Total de Pontos Amostrados da Resposta do Controlador para uma Carga n	

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática de um sistema de potência alimentando uma carga não-linear, incluindo as formas de onda de corrente da carga e da fonte	18
1.2	Representação esquemática de um sistema de potência alimentando uma carga não-linear com um dispositivo de mitigação de componentes harmônicos em paralelo	19
1.3	Representação dos componentes internos de um Filtro Ativo de Potência Paralelo	20
1.4	Diagrama de blocos da metodologia utilizada	23
2.1	Diagrama esquemático de um Filtro Ativo Paralelo de Potência com controle Indireto PI-SRF	26
2.2	Diagrama de blocos da técnica de controle PI-SRF	36
2.3	Diagrama de blocos da técnica de controle PI-MRI	37
2.4	Diagrama de blocos da técnica de controle PI-SRF	38
3.1	Fluxograma que representa o funcionamento de um algoritmo baseado na metaheurística PSO	41
3.2	Fluxograma que representa o funcionamento de um algoritmo baseado na metaheurística ABC	44
3.3	Gráfico de Pareto de um conjunto de soluções com o conjunto ótimo de Pareto destacado em vermelho	47
3.4	Fluxograma de determinação das soluções dominantes em um algoritmo de otimização multi-objetivo	48
4.1	Representação do circuito de potência utilizado nas simulações	49
4.2	Representação FAPP ligado ao PAC	50
4.3	Malha de Controle de Tensão do Sistema de Controle do FAPP	50
4.4	Malha de Controle de Corrente do Sistema de Controle do FAPP	51
4.5	Esquema das cargas utilizadas neste trabalho	56
4.6	Diagrama de Blocos do <i>gain scheduling</i>	57
4.7	Linha do tempo para a simulação da técnica de <i>gain scheduling</i>	58

5.1	Gráfico de Pareto obtido da execução 1 (algoritmo 1, MOPSO, P-SSI) . . .	62
5.2	Gráfico de Pareto obtido da execução 2 (algoritmo 2, MOPSO, PI-SRF) . .	62
5.3	Gráfico de Pareto obtido da execução 3 (algoritmo 3, MOABC, P-SSI) . .	63
5.4	Gráfico de Pareto obtido da execução 4 (algoritmo 4, MOABC, PI-SRF) .	63
5.5	Gráfico de Pareto explicitando os conjuntos de pontos com melhores THD e melhores EQM	65
5.6	Gráfico de Pareto obtido da execução 5 (algoritmo 1, MOPSO, P-SSI) . . .	66
5.7	Gráfico de Pareto obtido da execução 6 (algoritmo 2, MOABC, PI-SRF) .	67
5.8	Gráfico de Pareto obtido da execução 7 (algoritmo 3, MOABC, P-SSI) . .	67
5.9	Gráfico de Pareto obtido da execução 8 (algoritmo 4, MOABC, PI-SRF) .	68
5.10	THD da Corrente da Fonte para as soluções THD-ÓTIMO	69
5.11	EQM da Tensão no Barramento CC para as soluções EQM-ÓTIMO	70
5.12	Gráfico da tensão do barramento CC para a simulação de <i>gain scheduling</i> com a solução THD-ÓTIMO da execução 1	76
5.13	Gráfico da tensão do barramento CC para a simulação de <i>gain scheduling</i> com a solução THD-ÓTIMO da execução 5	77
5.14	Ponto intermediário utilizado para a nova simulação do <i>gain scheduling</i> . .	78
5.15	Gráfico da tensão do barramento CC para a simulação de <i>gain scheduling</i> com a solução intermediária da execução 1	78
5.16	Gráfico com a forma de onda da corrente da carga utilizada na simulação de <i>gain scheduling</i>	79
5.17	Gráfico da Transformada de Fourier Discreta da corrente da carga utilizada na simulação de <i>gain scheduling</i>	79
5.18	Gráfico com a forma de onda da corrente da fonte após compensação com FAPP utilizando os parâmetros THD-ÓTIMO da Execução 5	80
5.19	Gráfico da Transformada de Fourier Discreta da corrente da fonte após compensação com FAPP utilizando os parâmetros THD-ÓTIMO da Execução 5	80

Lista de Tabelas

2.1	Premissas para o dimensionamento do FAPP	27
4.1	Resumo das configurações utilizadas nos otimizadores	53
4.2	Valores das impedâncias e do THD das cargas utilizadas	56
4.3	Faixas de valores para atuação do <i>gain scheduling</i>	58
4.4	Cargas utilizadas para validação do <i>gain scheduling</i>	58
5.1	Valores de THD e EQM mínimos obtidos pelos algoritmos 1 a 4 com tensão de 550V (execuções 1 a 4)	64
5.2	Valores de THD e EQM mínimos obtidos pelos algoritmos 1 a 4 com tensão de 750V (execuções 5 a 8)	66
5.3	Comparação do desempenho das metaheurísticas de otimização para cada técnica de controle e tensão de operação	71
5.4	Valores de THD e EQM mínimos obtidos pelos algoritmos 1 a 4	72
5.5	Valores de THD obtido pelas melhores soluções para cada carga individualmente	73
5.6	Valores de THD e EQM obtidos após a aplicação do <i>gain scheduling</i> com as soluções THD-ÓTIMO do algoritmo 1 nas execuções 1 e 5	75
5.7	Valores de THD e EQM obtidos após a aplicação do <i>gain scheduling</i> com as soluções THD-ÓTIMO do algoritmo 1 nas execuções 1 e 5	77

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Contextualização do Problema	16
1.2	O Problema da Mitigação dos Harmônicos	17
1.3	O Problema da Sintonia dos Controladores	20
1.4	Objetivo	22
1.5	Organização dos Capítulos	24
2	Dimensionamento do FAPP	26
2.1	Barramento CC	27
2.1.1	Análise da Variação de Tensão no Capacitor	28
2.2	Filtro Passivo de Saída	32
2.3	Sistema de Controle	33
2.3.1	Controle <i>Proportional Integral - Synchronous Reference Frame</i> (PI-SRF)	35
2.3.2	Controle <i>Proportional - Multiple Rotating Integrators</i> (PI-MRI)	36
2.3.3	Controle <i>Proportional - Sinusoidal Signal Integrator</i> (P-SSI)	37
3	Algoritmos de Otimização	39
3.1	<i>Particle Swarm Optimization</i> - PSO	39
3.2	<i>Artificial Bee Colony</i> - ABC	42
3.3	Metaheurísticas Multi-Objetivo	43
3.3.1	Definições Matemáticas	45
3.3.2	MOPSO e MOABC	47
4	Materiais e Métodos	49
4.1	Filtro Ativo de Potência Paralelo	49
4.2	Algoritmos de Otimização	51

4.3	Técnica de <i>gain scheduling</i>	57
4.4	Prevenção contra Sobremodulação	59
5	Resultados e Discussões	61
5.1	Otimizações com FAPPs utilizando tensão de 550V	61
5.2	Otimizações com FAPPs utilizando tensão de 750V	66
5.3	Análise dos Algoritmos de Otimização	69
5.4	Análise das Técnicas de Controle	72
5.5	Aplicação da técnica <i>gain scheduling</i>	74
6	Conclusões	81
6.1	Técnicas de Controle P-SSI e PI-SRF aplicadas ao controle de corrente de Filtros Ativos de Potência Paralelos	81
6.2	Meta-heurísticas de otimização MOPSO e MOABC para a otimização dos parâmetros desses controladores	82
6.3	Aplicação da estratégia de <i>gain scheduling</i> para a operação de Filtros Ativos de Potência.	83

1 Introdução

1.1 Contextualização do Problema

O problema dos harmônicos presentes na rede elétrica é conhecido desde o início do século XX. No entanto, os estudos sobre esse tipo de ocorrência se intensificaram a partir da década de 1960, quando a utilização de dispositivos semi-condutores começou a se popularizar (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). Esses dispositivos produzem componentes harmônicos durante seu funcionamento por possuírem uma característica de operação intrinsecamente não-linear. No entanto, devido à vasta gama de aplicações que só existem graças a esses dispositivos, tais como conversores CA-CC e Variable Speed Drivers (VSD's), sua utilização cresce a cada ano, estimulando também o avanço do número de estudos sobre alternativas para sua atenuação, mitigação ou prevenção.

Tais medidas são necessárias devido ao fato de que os componentes harmônicos, que se manifestam em forma de corrente e tensão elétrica, sabidamente provocam diversos efeitos indesejados no sistema elétrico como um todo. Os principais deles são: o sobreaquecimento de condutores e transformadores, acionamento indesejado de dispositivos de proteção, mal-funcionamento de equipamentos sensíveis, erros de medição de energia elétrica, entre outros (DAS, 2015). Tais ocorrências têm seu potencial alavancado pelo fato de que os harmônicos são de difícil detecção se comparados aos demais problemas de qualidade de energia. Como consequência, os harmônicos são apontados como a segunda causa mais custosa no âmbito da qualidade de energia (BAGGINI, 2008).

Devido à significância e ao grande impacto desse tipo de poluição na rede elétrica, no início dos anos 1990 os principais comitês técnicos normativos internacionais, nominalmente o IEC e o IEEE, publicaram as primeiras normas que tratavam da presença de harmônicos de tensão e corrente na rede elétrica (IEEE, 2014; IEC, 2018). Tais documentos foram de fundamental importância para a que os usuários e operadores das redes passassem a se preocupar com esse fenômeno relativamente novo e muitas vezes desconhecido (HANSEN, 2006). Entretanto, por se tratarem de instituições técnicas de referência, essas normas não impõem regras aplicáveis a sistemas elétricos em operação, tarefas que cabem aos órgãos competentes de cada país.

No Brasil, essa responsabilidade compete à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que por meio do PRODIST estabelece apenas os níveis máximos de harmônicos de tensão permitidos, sem especificar os níveis máximos de corrente permitidos nem sequer traz definições sobre as responsabilidades dos consumidores e das concessionárias de energia elétrica (ANEEL, 2017). Tais alterações já foram sugeridas em Consultas Públicas sobre o PRODIST e analisadas por consultoria contratada pela ANEEL, porém, devido à falta de tecnologias confiáveis para a determinação das responsabilidades sobre a injeção de harmônicos na rede, nenhuma delas foi até então implantada (UFU, 2014a; UFU, 2014b). Com isso, a medição da quantidade de harmônicos na rede e, conseqüentemente, as medidas de mitigação desses harmônicos ficam restritas às reclamações dos usuários.

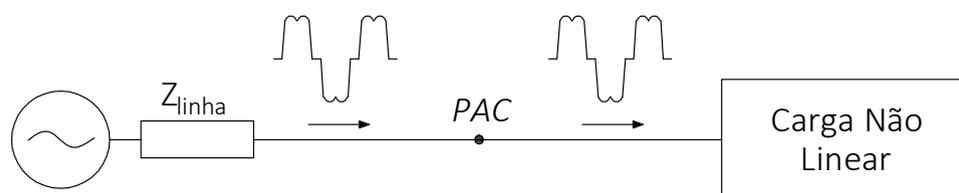
Na literatura não há dados quantitativos disponíveis a respeito do atual estágio de utilização de filtros ativos de potência no Brasil ou em outros países. A única referência obtida foi em Akagi (1996), onde é reportada a utilização de mais de 500 filtros ativos no Japão até o ano de 1996, o que revela uma grande preocupação daquele país com a qualidade da energia elétrica.

Apesar da escassez de dados, pode-se inferir que a utilização de filtros ativos de potência no Brasil não ocorre de forma massiva, bem como a preocupação e a conscientização acerca da poluição harmônica e seus efeitos, que não é de conhecimento dos consumidores em geral. Entretanto, o estudo dos filtros ativos de potência pode contribuir para uma disseminação maior da cultura de cuidado com a qualidade da energia elétrica no país.

1.2 O Problema da Mitigação dos Harmônicos

Para o detalhamento do problema de mitigação dos harmônicos, é considerado o circuito da Figura 1.1. Nesse circuito, uma carga não linear é alimentada por uma fonte de tensão considerada puramente senoidal a 60 Hz, ou seja, sem qualquer componente harmônico. Há também uma impedância, Z_{linha} , que representa a impedância da linha entre o local de geração e o ponto de consumo. Pela forma de onda da corrente representada na figura, nota-se que a corrente drenada pela carga não constitui uma corrente puramente senoidal, possuindo assim componentes harmônicos em sua composição espectral.

FIGURA 1.1: Representação esquemática de um sistema de potência alimentando uma carga não-linear, incluindo as formas de onda de corrente da carga e da fonte



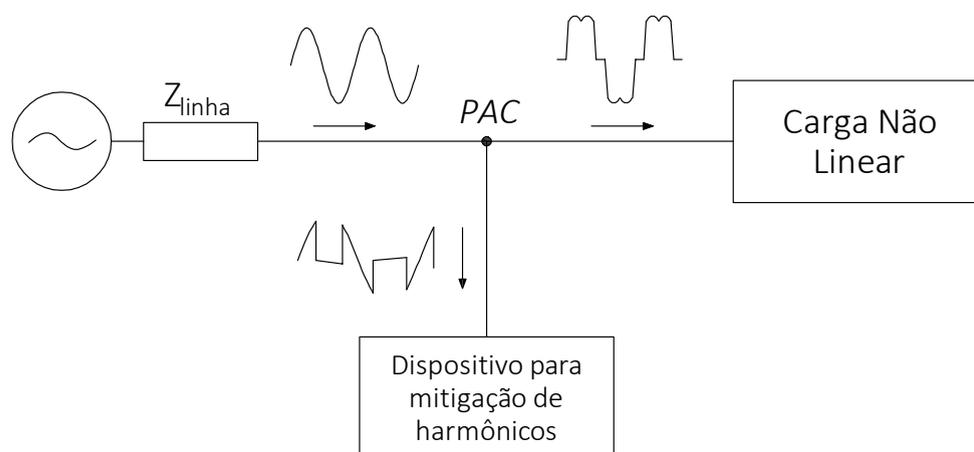
Fonte: O autor

Como o circuito em questão não possui qualquer dispositivo para a mitigação dos componentes harmônicos, fica evidente que a corrente percebida pela fonte também contém os mesmos componentes harmônicos presentes na carga. Esses componentes, ao percorrerem condutores, transformadores e demais equipamentos e materiais que compõem o sistema elétrico podem provocar problemas tais como sobre-aquecimento, mau-funcionamento e acionamento indevido de dispositivos de proteção. Além disso, também podem provocar mau-funcionamento de equipamentos sensíveis e até mesmo de medidores de energia elétrica. Outro efeito danoso provocado pelos harmônicos é o surgimento de componentes harmônicos também na tensão do PAC (Ponto de Acoplamento Comum) como resultado da passagem das correntes harmônicas pela impedância Z_{linha} .

Dessa forma, a utilização de uma solução que possa mitigar ou até mesmo eliminar a propagação desses componentes harmônicos traria muitos benefícios não somente para a unidade consumidora onde a carga não-linear está instalada, mas também para as demais unidades conectadas ao mesmo barramento, uma vez que a tensão de alimentação dessas unidades estaria livre da poluição harmônica. Na Figura 1.2 é representada a inserção de um equipamento em paralelo com a carga não-linear já representada na Figura 1.1 e que é capaz de compensar os componentes harmônicos e, conseqüentemente, tornar a corrente fornecida pela rede puramente senoidal.

Para exercer essa função de mitigação ou até mesmo eliminação dos componentes harmônicos da corrente, a solução mais simples e tradicional é a utilização dos filtros passivos. Esses dispositivos, compostos usualmente por um indutor e um capacitor conectados em paralelo com a carga e adequadamente dimensionados para atuar nas frequências desejadas, constituem uma solução de fácil implementação, porém com um desempenho

FIGURA 1.2: Representação esquemática de um sistema de potência alimentando uma carga não-linear com um dispositivo de mitigação de componentes harmônicos em paralelo



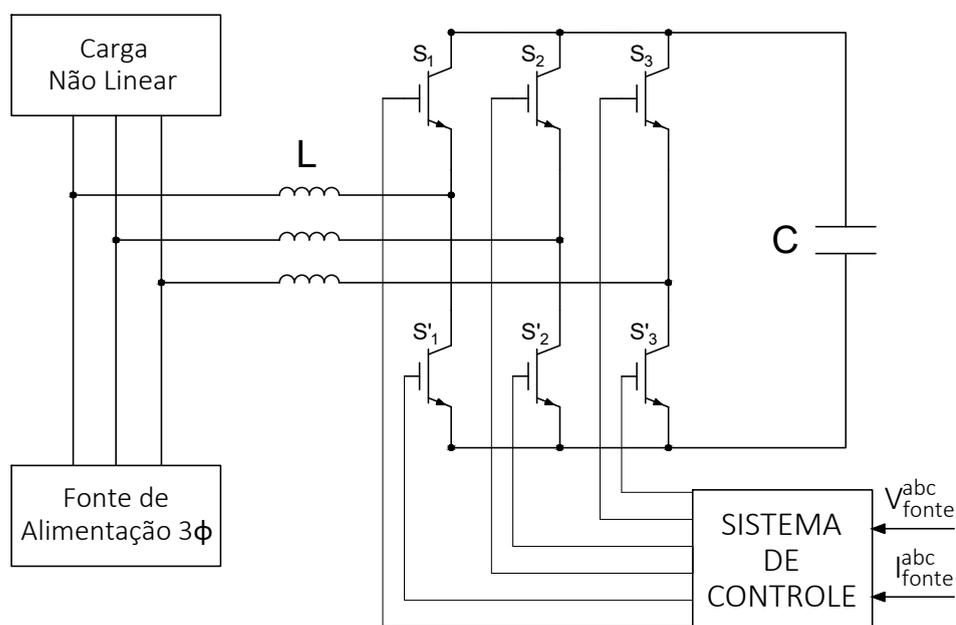
Fonte: O autor

operacional muito baixo, principalmente para a compensação de componentes de baixa ordem, como os de 3^a ordem (180 Hz) e 5^a ordem (300 Hz).

Uma alternativa aos conhecidos filtros passivos encontrada na literatura é a utilização dos Filtros Ativos de Potência, que podem ser do tipo série, os chamados Filtros Ativos de Potência Série (FAPS), do tipo paralelo, chamados Filtros Ativos de Potência Paralelo (FAPP) ou série-paralelo, conhecidos como *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC). Para a compensação das correntes, o dispositivo mais apropriado é o FAPP, que é ligado em paralelo com a carga e sintetiza as correntes harmônicas necessárias para que a fonte forneça uma corrente puramente senoidal.

Na figura 1.3 são mostrados os principais componentes de um FAPP. Nessa figura, são representados a ponte inversora, com seis dispositivos semi-condutores (S_1 , S'_1 , S_2 , S'_2 , S_3 , S'_3), o barramento CC, constituído por um capacitor de capacitância C , um filtro de atenuação das frequências de chaveamento, constituído por um indutor de indutância L e um sistema de controle que recebe como entrada a tensão da rede e a corrente da rede determinando os instantes de chaveamento dos 6 dispositivos semi-condutores que formam a ponte inversora.

FIGURA 1.3: Representação dos componentes internos de um Filtro Ativo de Potência Paralelo



Fonte: O autor

1.3 O Problema da Sintonia dos Controladores

Para que os Filtros Ativos de Potência Paralelos sejam capazes de sintetizar as componentes harmônicas de corrente necessárias para uma correta compensação dessas componentes presentes na corrente da carga, o controle de corrente tem um papel fundamental em seu funcionamento. Por isso, diversas técnicas de controle foram desenvolvidas e testadas, com o objetivo de melhorar o desempenho dos FAPPs.

Dentre essas técnicas, podem ser citadas como principais o controle PI no referencial síncrono, o controle por histerese e o controle *deadbeat*. O controle *deadbeat* consiste em uma estratégia de controle preditivo que apresenta bons resultados, porém possui uma dependência muito grande dos parâmetros do filtro, o que prejudica seu desempenho quando ocorre a variação desses valores (BOJOI et al., 2009; YUAN et al., 2002). Já o controle por histerese foi apontado em Buso, Malesani e Mattavelli (1998) como o que apresentou o melhor desempenho em relação aos demais. Entretanto, esse método possui a desvantagem de não possuir frequência de chaveamento fixa, dificultando o projeto do filtro de saída do FAPP, além de apresentar erro de corrente de duas vezes a banda de

histerese e uma indesejada interação entre as correntes de fase (ASIMINOAEI et al., 2006; YUAN et al., 2002).

Por sua vez, a estratégia de controle PI no referencial síncrono (*Proportional Integral - Synchronous Reference Frame* ou PI-SRF) é uma das mais utilizadas nos trabalhos acadêmicos que abordam o assunto, principalmente devido à sua simplicidade de implementação e bons resultados (BUSO; MALESANI; MATTAVELLI, 1998; GHETTI et al., 2010). Nesta técnica, o referencial síncrono é utilizado para que as componentes fundamentais possam ser representadas por variáveis contínuas, viabilizando assim a utilização de um controlador PI para o controle da corrente. Entretanto, devido à característica intrínseca dos filtros ativos de trabalhar com componentes de diversas frequências múltiplas da fundamental, essas se tornam componentes alternadas no referencial síncrono, fazendo com que o controlador PI apresente erro em estado estacionário ao trabalhar com essas correntes (BOJOI et al., 2009; GHETTI et al., 2010).

Para contornar esse problema, foram desenvolvidas técnicas de controle de corrente harmônico-seletivas, onde cada harmônico de interesse é separadamente detectado e controlado (GHETTI et al., 2010). Embora tais técnicas exijam uma maior quantidade de cálculos computacionais, elas proporcionam uma melhor eficiência na mitigação dos harmônicos, além de uma maior flexibilidade para o sistema de controle (LASCU et al., 2009). Dentre as principais técnicas de controle de corrente harmônico-seletivas, estão a técnica PI-MRI (*Proportional Integral - Multiple Rotating Integrators*) (BOJRUP et al., 1999), a P-SSI (*Proportional - Sinusoidal Signal Integrator*) (YUAN et al., 2002), a PI-SRF-SSI (*Proportional Integral - Synchronous Reference Frame - Sinusoidal Signal Integrator*) (BOJOI et al., 2004) e a PI-RES (*Proportional Integral - Resonant*) (LASCU et al., 2007).

Entretanto, para a implementação das técnicas supracitadas, a sintonia ótima dos parâmetros dos controladores por meio das teorias de controle ainda se apresenta como um fator de dificuldade, uma vez que não há consenso sobre uma metodologia única que satisfaça todas as possíveis condições operacionais a que os filtros são submetidos (TWINING; HOLMES, 2003; YEPES et al., 2014). Dada essa condição, não são raros os trabalhos que tratam sobre o assunto de técnicas de controle e mesmo assim utilizam parâmetros para os controladores sem embasamento metodológico explícito, como em Asiminoaei et al. (2006) e Yuan et al. (2002).

Nesse contexto, os algoritmos de otimização se apresentam como ferramentas bastante eficazes para a sintonia ótima de controladores. Essa afirmação é corroborada por Parsopoulos e Vrahatis (2010, p. X), que dizem:

É possível que uma solução do problema de otimização seja obtida por meio de uma abordagem analítica, que envolva mínimo esforço. Infelizmente, casos como esse normalmente são exceção. Na maioria dos problemas, sistemas complexos são modelados com funções multi-dimensionais complicadas, que não podem ser facilmente solucionadas. Em situações como essas, métodos computacionais que utilizem o poder de modernos sistemas computacionais a seu favor podem ser implementados para resolver o subjacente problema de otimização numericamente.[...]

De fato, na literatura podem ser encontrados trabalhos onde algoritmos de otimização são utilizados para a sintonia dos controladores de filtros ativos paralelos. Em Gowtham e Shankar (2016), foi feita a comparação de desempenho entre um algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) e um *Genetic Algorithm* (GA), buscando minimizar o THD da fonte de sistema com harmônicos compensados por um FAPP. Nesse caso, o PSO obteve melhores resultados com um tempo computacional menor. Em Yamarthi, Rao e Reddy (2016), são utilizados os algoritmos *Artificial Bee Colony* (ABC) e *Genetic Algorithm* (GA) para otimização de um controlador PI utilizando o erro do capacitor do *link* CC como função objetivo. Naquele trabalho, o algoritmo ABC apresentou melhores resultados em comparação com o GA.

1.4 Objetivo

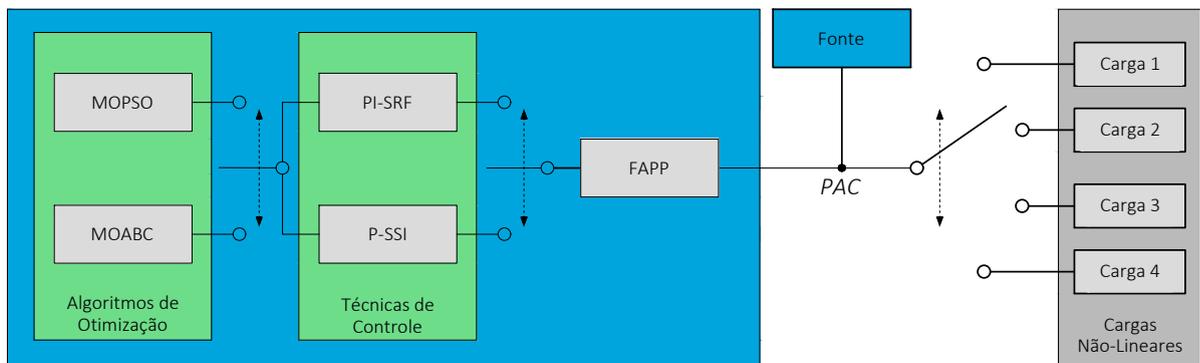
A partir dos problemas mencionados até então e das referências disponíveis na literatura, ficam latentes as vantagens operacionais dos FAPPs para resolver o problema de mitigação dos harmônicos gerados no processo de conversão de energia de cargas não-lineares. Isso porque os filtros passivos, apesar de serem soluções simples e efetivas, não são capazes de realizar uma boa filtragem das componentes harmônicas de baixa frequência sem exercer influência sobre a componente fundamental.

Entretanto, para a utilização de um FAPP, a correta sintonia dos controladores exerce grande influência sobre o desempenho do FAPP. Não há, porém, consenso na literatura

sobre uma técnica de controle que garanta o bom desempenho de um FAPP em todas as situações operacionais a que o mesmo possa estar submetido.

Dadas essas condições, este trabalho tem como objetivo o dimensionamento de um FAPP com foco em seu sistema de controle. Para isso, serão comparados requisitos de desempenhos desse filtro com a utilização de duas diferentes estratégias de controle: PI-SRF e P-SSI. Além disso, os parâmetros dos controladores de ambas as estratégias de controle serão otimizados para quatro diferentes cargas não-lineares. Para a realização dessa otimização, serão utilizados dois algoritmos multi-objetivos: um MOPSO (*Multi-objective Particle Swarm Optimization*) e um MOABC (*Multi-Objective Artificial Bee Colony*), que terão como função objetivo dois requisitos de desempenho conflitantes do FAPP: a minimização do THD (*Total Harmonic Distortion*) da corrente da fonte e a minimização do erro de tensão no capacitor do barramento CC. Na Figura 1.4 é apresentado um diagrama de blocos que resume a metodologia utilizada.

FIGURA 1.4: Diagrama de blocos da metodologia utilizada



Fonte: O autor

Os resultados obtidos a partir desse processo de otimização serão utilizados em uma estratégia de *gain scheduling*. Nessa estratégia, os valores dos parâmetros otimizados ficam armazenados para que o sistema utilize de acordo com condições pré-estabelecidas, que no presente caso será o THD da carga.

Dessa forma, o FAPP será submetido a uma simulação de operação onde serão utilizadas 4 cargas distintas das utilizadas para a otimização dos parâmetros que possuam valores de THD diferentes dos utilizados para a otimização. Essas cargas serão comutadas a cada

1 segundo, fazendo com que o FAPP altere os parâmetros utilizados. Com isso, o desempenho do FAPP com parâmetros otimizados será avaliado para utilização em sistemas elétricos que possam vir a ter cargas distintas daquelas para as quais os parâmetros foram originalmente ajustados.

Por fim, neste trabalho será também utilizada uma técnica de penalização para evitar a ocorrência de sobremodulação do sinal enviado ao modulador PWM. Para isso, durante o processo de otimização, a sobremodulação do sinal será avaliada e, caso ocorra em mais de 10% do sinal amostrado, esse conjunto de parâmetros será penalizado fazendo com que tais valores sejam naturalmente descartados pelo algoritmo de otimização.

1.5 Organização dos Capítulos

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, sendo que neste de introdução foram apresentados os problemas que envolvem a geração de harmônicos por cargas não-lineares e a sintonia dos controladores da malha de controle de corrente dos Filtros Ativos Paralelos de Potência.

No capítulo 2 é realizado o dimensionamento dos principais componentes do FAPP, nominalmente o capacitor do barramento CC e o filtro de saída. A ponte inversora não é dimensionada pois necessita apenas atender os limites de tensão e corrente estabelecidos para o FAPP. Também são apresentados os principais métodos de controle de corrente de FAPPs, cuja sintonia dos parâmetros será efetuada pelos otimizadores.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos básicos das meta-heurísticas de otimização que serão utilizadas neste trabalho, bem como é introduzido o conceito de meta-heurísticas multi-objetivo, incluindo suas definições matemáticas e ferramentas de análise.

No capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos estabelecidos, detalhando os circuitos, as cargas, e detalhes importantes dos algoritmos de otimização. Também é apresentado o conceito do *gain scheduling* e os detalhes de sua implementação neste trabalho.

No capítulo 5, os resultados dos algoritmos de otimização são apresentados, e seus valores tabulados e analisados. Também são apresentados os resultados obtidos após a aplicação da simulação de um sistema que utiliza *gain scheduling* para a determinação dos parâmetros de um FAPP.

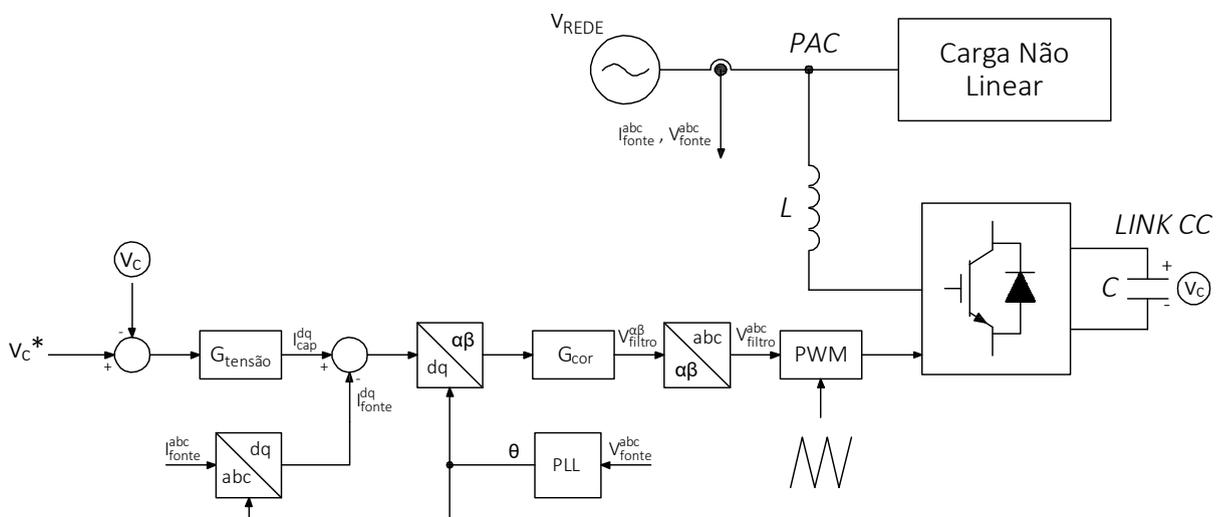
No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e considerações finais deste trabalho.

2 Dimensionamento do FAPP

Os filtros ativos de potência paralelos (FAPPs) são dispositivos construídos para gerarem correntes que sejam capazes de compensar as componentes harmônicas presentes no espectro de corrente de um dado sistema elétrico. Analisando por outro ângulo, o objetivo maior ao se empregar tal dispositivo é o de que a rede elétrica forneça apenas uma corrente senoidal na frequência fundamental independente de qual carga esteja sendo alimentada. Para isso, o FAPP absorve corrente fundamental da fonte para a manutenção da tensão do capacitor do barramento CC e simultaneamente sintetiza correntes nas frequências harmônicas que anulam as harmônicas provenientes do processo de conversão de energia realizado no lado da carga.

Para atingir esse objetivo, os FAPPs são constituídos, basicamente, de uma ponte inversora, um elemento armazenador de energia, chamado de barramento CC, um filtro passivo para atenuação das frequências de chaveamento e um sistema de controle composto por unidade de processamento e sensores, cujo objetivo é coordenar o chaveamento dos dispositivos semi-condutores da ponte inversora. Essa topologia é representada de forma esquemática na Figura 2.1 com a representação, inclusive, do diagrama de blocos de controle.

FIGURA 2.1: Diagrama esquemático de um Filtro Ativo Paralelo de Potência com controle Indireto PI-SRF



Fonte: O autor

Dentre as partes supramencionadas, neste trabalho dimensiona-se e analisa-se o filtro passivo, o barramento CC e o sistema de controle do filtro ativo, por se tratarem de variáveis importantes de projeto quando há intenção em se compensar os harmônicos de uma carga determinada. O dimensionamento da ponte inversora se resume principalmente à escolha da topologia, capacidade de tensão e corrente suportadas pelos dispositivos semi-condutores e será admitida como premissa para o dimensionamento dos demais elementos.

Outra premissa utilizada diz respeito à carga alimentada, cuja corrente máxima instantânea não pode superar a capacidade de corrente dos dispositivos semi-condutores do filtro. Um resumo com todas as premissas deste trabalho é compilado na Tabela 2.1. Nessa tabela, além dos dados dos elementos da ponte inversora e da carga acionada, constam informações sobre a rede elétrica analisada e os requisitos de projeto.

TABELA 2.1: Premissas para o dimensionamento do FAPP

Parâmetro	Símbolo	Valor
Corrente Nominal IGBT's	$I_{maxIGBT}$	100A
Tensão Nominal IGBT's	$V_{maxIGBT}$	1000V
Tensão de Linha	V_{LRMS}	220V
Potência nominal FAPP	S_{nom}	38kVA
Topologia FAPP	-	Trifásico a 3 fios
Harmônico Máximo Compensado	h_{max}	40

2.1 Barramento CC

O barramento CC é o elemento do FAPP responsável por armazenar energia. Durante o regime permanente de operação do filtro ativo, este absorve energia ativa da rede elétrica, de tal forma que parte da corrente, e conseqüentemente da energia, entregue pela fonte é destinada à alimentação do barramento. A energia armazenada é utilizada para suprir a energia demandada para a compensação das componentes harmônicas da corrente da carga e, portanto, é constantemente consumida e também constantemente suprida. Nos inversores fontes de tensão (do inglês Voltage Source Inverter - VSI), essa função é realizada por um capacitor ou um banco de capacitores. No caso de Inversores de fontes de corrente (do inglês Current Source Inverters - CSI), essa função é realizada por um indutor. Entretanto, estes são menos comuns pois além de terem um custo maior,

o armazenamento de energia em forma de corrente implica em um aumento das perdas ôhmicas, principalmente durante o tempo que o dispositivo estiver desligado.

Para o dimensionamento do capacitor do barramento CC, dois critérios operacionais do filtro ativo de potência paralelo devem ser considerados: a tensão de operação do barramento CC e a variação máxima de tensão tolerada. A condição básica da tensão de operação do barramento é que a mesma deve ser maior que a tensão da rede, para que o filtro ativo tenha capacidade de impor uma corrente à rede. Em relação ao valor máximo que essa variável pode assumir, Chaoui et al. (2008) conclui que quanto maior a tensão de operação do filtro, maior também será sua controlabilidade, melhorando, assim, a resposta temporal do dispositivo. Entretanto, como o aumento da tensão reflete no aumento do custo do capacitor ou conjunto de capacitores utilizados no barramento, o autor recomenda que a tensão de operação seja a mais próxima possível do limite de operação das chaves da ponte inversora.

Já em relação à variação de tensão tolerada, não há valores pré-determinados dentro dos quais o projetista deve ajustar seu dispositivo. Entretanto, deve-se levar em consideração que baixos valores de capacitância implicarão em variações maiores de tensão, o que poderá ocasionar em uma operação lenta ou até mesmo na ineficácia do filtro. Por outro lado, altos valores de capacitância implicarão em um maior custo total do sistema. Também pode-se afirmar que maiores tensões de operação do barramento CC podem permitir maiores oscilações de tensão e, conseqüentemente, menores valores de capacitância.

Levando em consideração as diretrizes mencionadas acima, neste trabalho serão utilizados dois valores de tensão para o barramento CC: 550V e 750V. O primeiro valor é adequado para utilização com chaves semi-condutoras de até 600V, valor bastante usual para esse tipo de produto. Já o segundo valor foi escolhido para verificar o desempenho do FAPP com a utilização de tensões maiores, como forma de balizar a escolha da tensão de operação no processo de otimização de um filtro real.

2.1.1 Análise da Variação de Tensão no Capacitor

A variação de tensão no capacitor ocorre em duas situações: quando acontece uma variação na carga atendida pelo dispositivo, tendo portanto caráter ocasional, e a segunda acontece

em caráter contínuo devido à potência \tilde{p} gerada pelos harmônicos da carga e para a qual o filtro é projetado para compensar. Para medir a variação de tensão causada por essa potência, é preciso entender a dinâmica de potências estabelecida entre o filtro ativo, a carga e a rede.

À luz da teoria da potência instantânea, ou teoria PQ, a carga a ser compensada consome as potências instantâneas real p e imaginária q descritas a seguir:

$$p_l = \bar{p}_l + \tilde{p}_l \quad (2.1)$$

$$q_l = \bar{q}_l + \tilde{q}_l \quad (2.2)$$

Onde:

- p_l - potência real instantânea da carga;
- q_l - potência imaginária instantânea da carga;
- \bar{p}_l - componente contínua da potência real instantânea p_l ;
- \tilde{p}_l - componente oscilatória da potência real instantânea p_l ;
- \bar{q}_l - componente contínua da potência imaginária instantânea q_l ;
- \tilde{q}_l - componente oscilatória da potência imaginária instantânea q_l .

O objetivo do filtro ativo é compensar a componente oscilatória da potência real \tilde{p}_l e a potência imaginária q_l . Entretanto, conforme Akagi, Watanabe e Aredes (2007), a potência imaginária pode ser interpretada como uma troca de potência entre as fases do sistema e, assim, não contribui para a transferência de energia entre a fonte e a carga. Dessa forma, pode-se afirmar que a transferência de energia entre o filtro ativo e a carga se resume a \tilde{p}_l . Assim, a relação de potência entre o filtro e a carga é dada por:

$$p_{f\text{saida}} = \tilde{p}_l(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_{l(n)} \cos(n\omega_0 t + \phi_{(n)}) \quad (2.3)$$

Em que:

- $p_{f\text{saída}}$ - potência real instantânea de saída do FAPP;
- $p_{l(n)}$ - amplitude da componente harmônica de ordem n ;
- ω_0 - frequência angular fundamental do sistema;
- $\phi_{(n)}$ - ângulo de fase da componente harmônica de ordem n .

Entretanto, considerando apenas os harmônicos de interesse, para efeito de projeto, a seguinte simplificação, proposta em Azevedo (2011) se torna bastante útil:

$$\tilde{p}_l(t) \approx \sum_{n=1}^h p_{l(n)} \cos(h\omega_0 t + \phi_{(n)}) \approx \tilde{p}'_l(t) = p_{l(h)} \cos(h\omega_0 t + \phi_{(h)}) \quad (2.4)$$

onde:

- h - ordem harmônica máxima considerada para o sistema;
- $\tilde{p}'_l(t)$ - aproximação de $\tilde{p}_l(t)$;
- $p_{l(h)}$ - amplitude da variável $\tilde{p}'_l(t)$;
- $\phi_{(h)}$ - fase da variável $\tilde{p}'_l(t)$.

Na Equação 2.4, $p_{l(h)}$ é a amplitude de uma potência perfeitamente senoidal $\tilde{p}'_l(t)$, utilizada para representar a grandeza $\tilde{p}_l(t)$ que é uma soma de componentes com frequências distintas e fase distintas e, portanto, não-senoidal. Azevedo (2011) ainda determina o valor de $p_{l(h)}$ por meio da Equação 2.5:

$$p_{l(h)} = S_l \cdot THD_l \quad (2.5)$$

onde:

- S_l - Potência aparente total da carga;

- THD_l - Nível de distorção harmônica total da carga.

A corrente de saída do filtro, por sua vez, pode ser determinada pela Equação 2.6:

$$\tilde{i}_{fsaida}(t) = \frac{\tilde{p}_l(t)}{\bar{V}_{CC}} \quad (2.6)$$

onde:

- $\tilde{i}_{fsaida}(t)$ - Corrente total de saída da carga;
- \bar{V}_{CC} - Tensão média do barramento CC.

Da relação de capacitância, chega-se a:

$$\tilde{v}_{CC}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{\tilde{p}_l(t)}{\bar{V}_{CC}} dt \quad (2.7)$$

onde $\tilde{v}_{CC}(t)$ é o *ripple* de tensão do barramento CC.

Essa equação estabelece o valor temporal de $\tilde{v}_{CC}(t)$, que possui um caráter oscilatório. Entretanto, nesta etapa do projeto do capacitor do barramento CC, o maior interesse é na amplitude dessa componente oscilatória, \tilde{V}_{CC} , determinando assim a amplitude da variação da tensão do barramento em regime permanente. Assim, de forma aproximada, chega-se a:

$$\tilde{V}_{CC}(\%) = \frac{S_l THD}{C \bar{V}_{CC}^2 h_{max} \omega_0} \quad (2.8)$$

Entretanto, analisando a equação proposta percebe-se que Azevedo (2011) generalizou o termo $2h_{max}\omega_0$, que deveria ser aplicado a cada componente harmônico h individualmente, para o maior harmônico a ser compensado. Essa simplificação acabou diminuindo excessivamente o valor da capacitância resultante deste método. Dessa forma, para adequar a equação de dimensionamento da capacitância aos valores observados neste trabalho, é proposta a substituição do termo h_{max} pelo valor do menor harmônico a ser compensado

pelo sistema que, se tratando de um sistema trifásico a 3 fios, usualmente consiste no 5º harmônico. Assim, neste trabalho será utilizada a Eq. 2.9.

$$\tilde{V}_{CC}(\%) = \frac{S_i THD}{C_{CC} \bar{V}_{CC}^2 h_{min} \omega_0} \quad (2.9)$$

Com isso, o valor da capacitância do barramento CC pode ser calculado para a tensão de 550V, que configura o pior caso entre as tensões utilizadas neste trabalho. Além disso, são utilizadas as premissas estabelecidas na Tabela 2.1, uma variação máxima de 1% para a tensão no capacitor e um índice de distorção harmônica médio de 20%. Assim, chega-se ao seguinte valor para a capacitância:

$$C_{CC} = \frac{0,2 \cdot 38000}{550^2 \cdot 5 \cdot 2\pi 60 \cdot 0,01} = 1330\mu F \approx 1200\mu F \quad (2.10)$$

2.2 Filtro Passivo de Saída

Para a atenuação das componentes de corrente cujas frequências são múltiplas da frequência de chaveamento da ponte inversora, na saída dos filtros ativos paralelos de potência, é necessária a utilização de um filtro passivo. A configuração de filtro passivo mais utilizada é o filtro L, composto apenas por um indutor por fase em série com a ponte inversora, que possui um desempenho mediano e boa estabilidade operacional quando comparado a outros tipos de filtro (DANNEHL; FUCHS; HANSEN, 2007).

Para seu dimensionamento, diversas abordagens podem ser encontradas na literatura. Em Chaoui et al. (2008), são listadas algumas delas. Nesse trabalho, os autores elencam quatro abordagens de dimensionamento do filtro L, calculam seus valores e ainda realizam testes experimentais em uma faixa de valores de indutância, inclusive extrapolando os valores obtidos pelos métodos elencados. Por meio de análises dos referidos resultados, verifica-se, como era esperado sob o ponto de vista teórico, que para baixos valores de indutância, o THD da corrente da fonte piora, uma vez que as frequências de chaveamento se propagam para a rede, gerando poluição. Por outro lado, para altos valores de indutância, o filtro L passa a atenuar até mesmo componentes de frequências menores, fazendo com que o FAPP não seja capaz de compensar os componentes harmônicos.

Assim, claramente há um ponto ótimo para o dimensionamento do filtro L. Dentre as abordagens que mais se aproximaram do valor ótimo verificado em Chaoui et al. (2008) a escolhida foi a que determina o valor da indutância a partir do *ripple* máximo de corrente desejado. Esse valor é definido por:

$$L = \frac{V_{CC}}{6f_{chav}\Delta I_{max}} \quad (2.11)$$

Em que:

- f_{chav} - Frequência de chaveamento do FAPP;
- ΔI_{max} - Ripple máximo de corrente estabelecido.

A partir da Equação 2.11 e considerando um ripple máximo de corrente igual a 5%, o valor da indutância do filtro dimensionado neste trabalho é dado por:

$$L = \frac{550}{6 \cdot 15000 \cdot 0,05 \cdot 100} \approx 1,2mH \quad (2.12)$$

2.3 Sistema de Controle

O sistema de controle dos filtros ativos de potência constitui uma parte fundamental para seu funcionamento, influenciando diretamente seu desempenho. Isso acontece porque esse sistema é responsável por adquirir as informações do sistema de potência em que o filtro está inserido e, a partir das informações coletadas, determinar em tempo de execução o correto instante de chaveamento dos dispositivos semi-condutores que constituem a ponte inversora (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

Para executar essa importante função, o sistema de controle do FAPP é composto de duas malhas de controles que operam em cascata: a malha de controle da tensão do barramento CC; e a malha de controle de corrente do filtro. A malha de controle de tensão usualmente utiliza um controlador PI simples e tem como característica principal uma resposta mais lenta que o controlador de corrente, de tal forma que o sistema não absorva as variações

de alta frequência inseridas pelos componentes harmônicos sintetizados pelo filtro e nem os inerentes ao chaveamento dos dispositivos semi-condutores, o que poderia interferir no funcionamento da malha de controle de corrente. Dessa forma, a sintonia do controlador dessa malha possui baixa complexidade e baixo impacto no desempenho global do FAPP.

A malha de controle de corrente, por sua vez, deve atuar de forma bastante rápida para permitir a sintetização das correntes harmônicas pela ponte inversora de forma satisfatória e sua sintonia possui grande influência sobre o desempenho global do FAPP. Por esse motivo, na literatura há uma grande diversidade de métodos e estratégias para o controle de corrente do filtro, cada um possuindo características específicas, como eficiência, gasto computacional, *hardware* necessário para sua implantação, entre outros fatores.

Essa diversidade de técnicas de controle de corrente é evidenciada pela grande quantidade de trabalhos comparativos (BOJOI et al., 2009; BUSO; MALESANI; MATTAVELLI, 1998; GHETTI et al., 2010; LASCU et al., 2009; SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 1998; SINGH; AL-HADDAD; CHANDRA, 1999; SONNENSCHNEIN; WEINHOLD, 1999). Dentre essas publicações, Buso, Malesani e Mattavelli (1998) e Singh, Chandra e Al-Haddad (1998) se destacam entre os publicados antes dos anos 2000, por realizarem estudos experimentais comparando o desempenho de diferentes técnicas de controle. Buso, Malesani e Mattavelli (1998) compararam o desempenho de um FAPP utilizando as técnicas de controle por Histerese, controle Deadbeat e controle PI-SRF, apontando uma vantagem do controle por Histerese sobre os demais.

Apesar da superioridade do controle por Histerese, a utilização desses 3 métodos de controle demonstra a relevância do método PI-SRF, que foi utilizado em Buso, Malesani e Mattavelli (1998), devido à sua grande popularidade e, mesmo após o surgimento de diversas técnicas de controle, ainda é utilizado em trabalhos recentes utilizando filtros ativos. Entretanto, o fato de esse controle não superar o controle por Histerese evidencia que, apesar de ser uma técnica clássica, seu desempenho pode ser superado por outros métodos.

Já Singh, Chandra e Al-Haddad (1998) em seu trabalho de comparação de técnicas de controle utilizaram um controlador PI-SRF com duas formas de leitura das correntes do filtro: uma direta, onde o sensor era instalado diretamente na saída do FAPP e outra indireta, onde o sensor era instalado junto à fonte, medindo a corrente proveniente da rede

elétrica. Nesse trabalho, a estratégia de controle indireta foi apontada como superior em relação à direta, tanto em desempenho, quanto em simplicidade e quantidade de *hardware* utilizado.

No final da década de 1990, Bojrup et al. (1999) publicaram pela primeira vez a técnica PI-MRI, que utilizava a transformada de Park para diversos harmônicos separadamente, melhorando o desempenho em relação ao sistema de controle PI-SRF. Já no começo dos anos 2000, Zmood, Holmes e Bode (2001) demonstraram a equivalência matemática entre controladores PI no referencial síncrono e controladores ressonantes no referencial estacionário. Essa equivalência permitiu o desenvolvimento da técnica P-SSI (*Proportional-Sinusoidal Signal Integrators*) em Yuan et al. (2002), que utiliza uma combinação de controladores ressonantes sintonizados nas frequências dos harmônicos de interesse para a compensação harmônica. Essa técnica é matematicamente equivalente à técnica PI-MRI, entretanto possui a vantagem de substituir 2 controladores do sistema PI-MRI por apenas 1 controlador. Nas subseções a seguir, as técnicas de controle PI-SRF, PI-MRI e P-SSI serão mais profundamente analisadas.

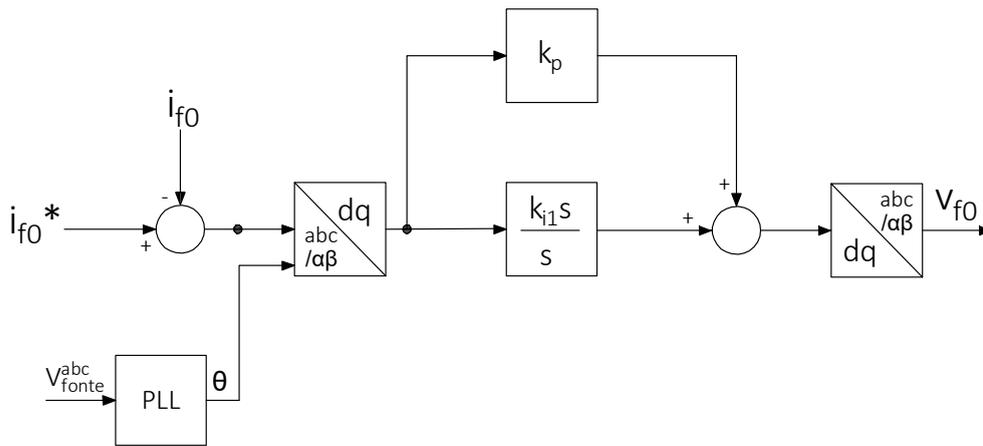
2.3.1 Controle *Proportional Integral - Synchronous Reference Frame* (PI-SRF)

O esquema de controle PI-SRF consiste na utilização da transformação de Park na velocidade síncrona sobre as correntes medidas pelo sistema, fazendo com que as variáveis alternadas assumam, na frequência síncrona, valores constantes, viabilizando, assim, a utilização de controladores PI para seu controle sem o conhecido inconveniente do erro em estado estacionário gerado pela utilização de controladores PI diretamente com variáveis alternadas.

Esse tipo de controle surgiu como uma excelente solução para o controle de corrente em conversores utilizados para o acionamento de motores, para UPSs (*Uninterruptible Power Supplies*) entre outras aplicações que não necessitam de trabalhar com mais de uma frequência simultaneamente. Assim, com o desenvolvimento dos filtros ativos de potência, tornou-se natural a migração dessa solução para o controle de corrente nos FAPPs.

Entretanto, com a intensificação das pesquisas sobre filtros ativos de potência, verificou-se que essa estratégia, utilizando apenas um controlador com transformação de Park na frequência síncrona, não consiste na alternativa mais eficiente para a aplicação em FAPPs. Mesmo assim, devido à sua simplicidade e menor complexidade computacional, esse método ainda é bastante utilizado em diversos trabalhos recentes, como pode ser verificado em Demirdelen, Kayaalp e Tümay (2016), Kumar e Gopalakrishnan (2013), Kumar et al. (2016), Rajasekar et al. (2010), Sundaram e Venugopal (2016). Na Figura 2.2 é mostrado o diagrama de blocos desse método de controle.

FIGURA 2.2: Diagrama de blocos da técnica de controle PI-SRF



Fonte: O autor

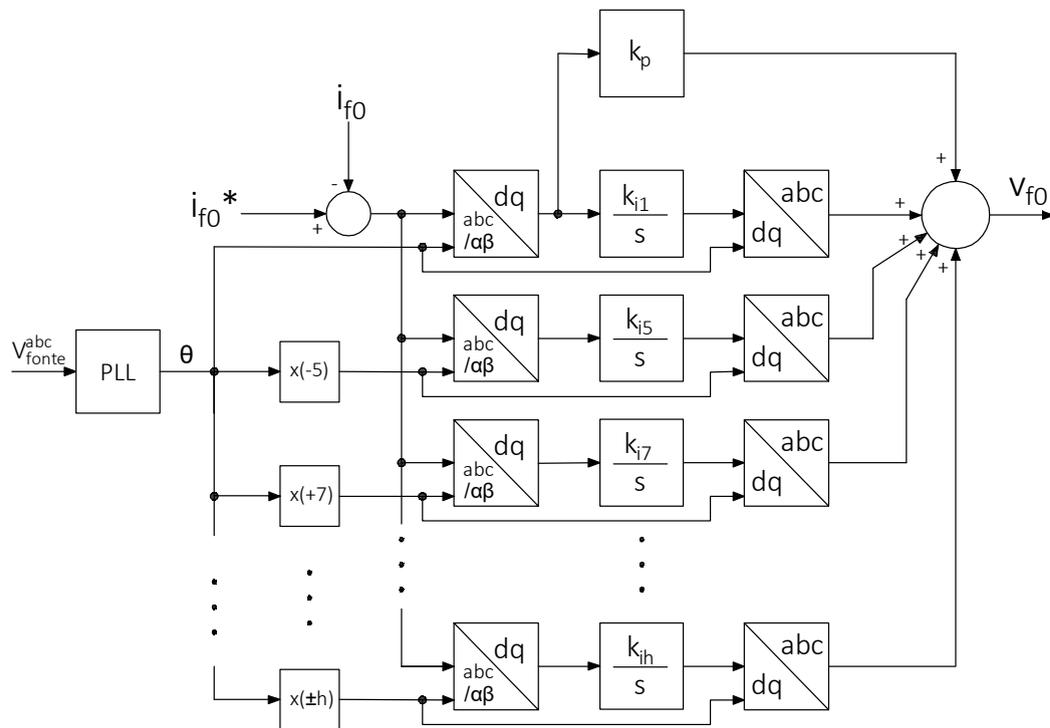
2.3.2 Controle *Proportional - Multiple Rotating Integrators*(PI-MRI)

O controle PI-MRI foi desenvolvido em Bojrup et al. (1999) como alternativa mais eficiente em relação ao controle PI-SRF. O princípio de funcionamento dessa técnica consiste em utilizar a transformação de Park para cada harmônico de interesse do sistema, utilizando assim controladores específicos para cada frequência. Essa alternativa supera um problema dos controladores PI-SRF, que efetuam apenas uma transformação de Park utilizando a frequência fundamental e, portanto, faz com que as harmônicas de interesses sejam componentes alternadas para os controladores, gerando erro em regime permanente.

Na Figura 2.3 é exibido um diagrama de blocos genérico desse tipo de controle, onde são mostradas as transformações de Park para o 5º harmônico, para o 7º harmônico e para

um harmônico genérico h . Pode-se verificar que para o 5º harmônico, a transformação de Park utiliza o ângulo da frequência fundamental multiplicado por (-5). Isso ocorre devido à característica das cargas não-lineares trifásicas, que emitem correntes de 5º harmônico em sequência negativa (BOJOI et al., 2009). Genericamente, as componentes harmônicas iguais a $6 \cdot n \cdot \omega - 1$, onde $n = 1, 2, 3 \dots$ são de sequência negativa, enquanto as componentes harmônicas iguais a $6 \cdot n \cdot \omega + 1$ são de sequência positiva.

FIGURA 2.3: Diagrama de blocos da técnica de controle PI-MRI

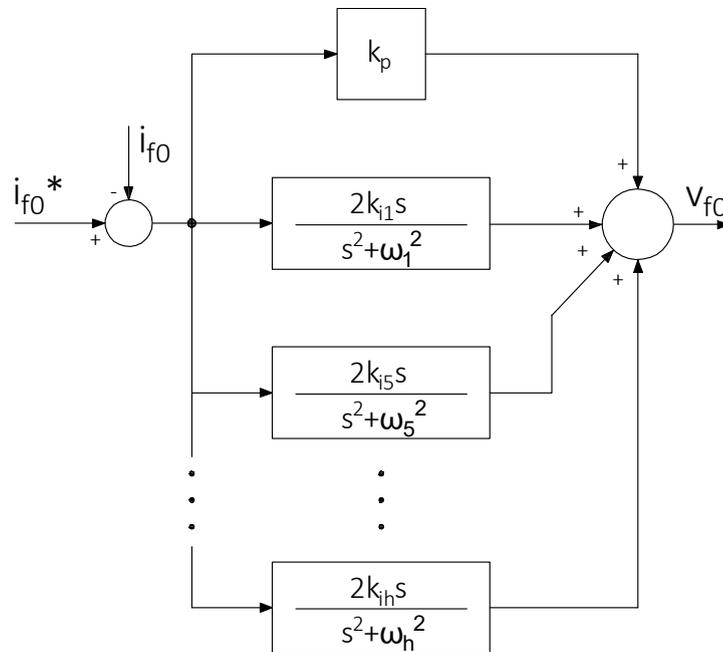


Fonte: O autor

2.3.3 Controle *Proportional - Sinusoidal Signal Integrator*(P-SSI)

O controle P-SSI foi desenvolvido inicialmente em Yuan et al. (2002) e consiste na utilização de diversos controladores ressonantes sintonizados às frequências dos harmônicos de interesse. As principais vantagens dessa estratégia de controle consistem na menor dependência da transformação de Park, além de contemplar em apenas um controlador, componentes de sequência negativa e positiva, o que implica na redução da quantidade de controladores para a compensação de cargas não-lineares desbalanceadas, que emitem componentes harmônicos de sequência positiva e negativa simultaneamente. O diagrama de blocos desse tipo de controle é exibido na Figura 2.4.

FIGURA 2.4: Diagrama de blocos da técnica de controle PI-SRF



Fonte: O autor

Nessa figura, pode-se observar que, analogamente ao controle PI-MRI, esse controlador é formado por diversos controladores em paralelo, cada um sintonizado em uma frequência. A diferença, é que neste caso a sintonia é realizada por meio do uso de controladores ressonantes, ao invés de utilizar a transformação de Park para tal. Ao final, todos os sinais são somados, formando o sinal que será enviado ao modulador PWM.

O desenvolvimento dessa estratégia de controle, que ocorreu após o desenvolvimento da técnica PI-MRI, foi possível principalmente após o trabalho de Zmood, Holmes e Bode (2001), que demonstraram a equivalência entre os controladores PI no referencial síncrono e os controladores ressonantes no referencial estacionário. Devido a essa equivalência, pode-se afirmar que as técnicas de controle PI-MRI e P-SSI são absolutamente idênticas, diferindo apenas dos recursos computacionais necessários para sua implementação (BOJOI et al., 2009; LASCU et al., 2009; ZMOOD; HOLMES, 2003).

3 Algoritmos de Otimização

Otimização é uma área da ciência que lida com a detecção de soluções ótimas para problemas, dentro de um conjunto de alternativas (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010). Para realizar essa detecção, os algoritmos computacionais utilizam as chamadas metaheurísticas, que são procedimentos utilizados em problemas de otimização que empregam estratégias para escapar de mínimos locais em espaços de buscas complexos (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). Dentre essas metaheurísticas, podem ser destacadas as de inteligência em enxames, que realizam a otimização de problemas por meio da interação social entre os componentes de uma "população" de soluções, onde as melhores soluções obtidas influenciam a busca dos demais componentes da população (DEB, 2001).

Nos algoritmos que utilizam esse grupo de metaheurísticas, a interação social entre os membros é inspirada no comportamento de seres vivos na natureza, tais como cardume de peixes, revoada de pássaros, colônias de insetos, etc. Dessa forma, esses métodos traduzem em equações matemáticas a busca por alimento ou o deslocamento em grupo realizados por esses grupos de seres vivos. Como exemplos de algoritmos desenvolvidos com base nessa analogia, podem ser citados o *Ant Colony Optimization* (ACO), *Bacterial Foraging*, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Artificial Bee Colony* (ABC), entre outros.

Para a descrição das metaheurísticas utilizadas neste trabalho, alguns termos empregados se tratam de analogia entre o comportamento dos grupos de animais e os problemas matemáticos a que esses algoritmos se dispõem a resolver. O mais elementar é a função objetivo ou função custo, que são equivalentes às fontes de comida dos seres vivos em questão. Já o conjunto de soluções do problema são análogos ao enxame de partículas ou conjunto de indivíduos de uma população.

3.1 *Particle Swarm Optimization - PSO*

O PSO é um algoritmo de otimização estocástico baseado em modelos de simulação social desenvolvido por Kennedy e Eberhart em 1995 (KENNEDY; EBERHART, 1995; PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010). Seu princípio de funcionamento se baseia na experiência

peçoal de cada indivíduo e pela experiência global da população. Para buscar a solução ótima, a cada iteração, os indivíduos têm sua posição alterada com base em uma ponderação entre sua velocidade anterior, a distância anterior de sua melhor experiência e a distância anterior da melhor experiência do grupo. Matematicamente, a criação do enxame e a atualização das velocidades são determinadas nas Equações 3.1 a 3.3.

$$x_i = x_{min} + rand(-1, 1) * (x_{max} - x_{min}) \quad (3.1)$$

$$v_i(\tau) = w * v_i(\tau - 1) + c_1 * (p_i - x_i(\tau - 1)) + c_2 * (g - x_i(\tau - 1)) \quad (3.2)$$

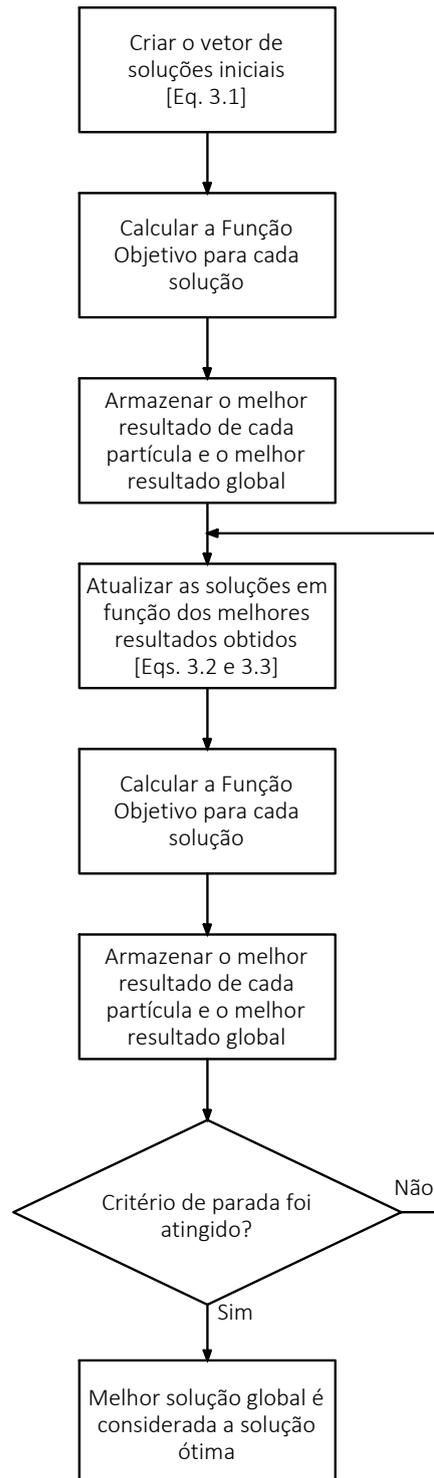
$$x_i = x_i(\tau - 1) + v_i(\tau) \quad (3.3)$$

Em que:

- x_i - componente i do enxame, uma das soluções analisadas;
- x_{max} - valor máximo que pode ser assumido pelos componentes do enxame;
- x_{min} - valor mínimo que pode ser assumido pelos componentes do enxame;
- $rand(-1,1)$ - número aleatório entre -1 e 1;
- τ - número da iteração;
- $v_i(\tau)$ - velocidade do componente i do enxame na iteração τ ;
- w - fator de inércia;
- c_1 - fator de aceleração 1;
- c_2 - fator de aceleração 2;
- p_i - melhor resultado obtido pela partícula x_i ;
- g - melhor resultado obtido pelo enxame.

O funcionamento dos algoritmos que utilizam a metaheurística PSO é demonstrada na figura 3.1.

FIGURA 3.1: Fluxograma que representa o funcionamento de um algoritmo baseado na metaheurística PSO



Fonte: O autor

O critério de parada mencionado no item 5 pode consistir em um limite de erro ou na quantidade de iterações executadas pelo sistema. Ao final do procedimento descrito, o algoritmo terá armazenado a melhor solução e os valores de entrada que geraram essa solução, que pode consistir em um mínimo (ou máximo) local ou um mínimo (ou máximo) global.

3.2 *Artificial Bee Colony - ABC*

O algoritmo ABC foi desenvolvido por Karaboga em 2005 e posteriormente aperfeiçoado por Karaboga e Basturk em 2007, incluindo funcionalidades de restrição das variáveis. Seu funcionamento se baseia na rotina de uma colônia de abelhas que possui regras sociais para a descoberta de comida (KARABOGA, 2005) (KARABOGA; BASTURK, 2007). Para isso, há três grupos de abelhas com funções distintas: abelhas operárias, abelhas espectadoras e abelhas exploradoras. As abelhas exploradoras buscam fontes de alimento aleatoriamente no espaço de busca e, após essa etapa, tornam-se abelhas operárias, que explorarão aquela fonte até que a mesma se esgote. As abelhas espectadoras recebem as informações das abelhas exploradoras e operárias, e, dentre as fontes existentes, tendem a explorar aquelas com a maior quantidade de néctar disponível.

Esse processo continua até que cada fonte seja explorada por completo, quando a abelha operária que estava fazendo buscas na região próxima à fonte esgotada se torna uma abelha exploradora, buscando uma nova fonte. O lançamento inicial das abelhas exploradoras é matematicamente idêntico à inicialização do enxame do PSO, seguindo a Equação 3.1. Já a busca no entorno dos pontos que estão sendo explorados é determinado pelas Equações 3.4 e 3.5.

$$v_i = x_i + \phi_i(x_i - x_k) \quad (3.4)$$

$$\phi_i = a * rand(-1, 1) \quad (3.5)$$

Em que:

- v_i - velocidade do componente i do enxame;
- x_i - componente i do enxame;
- ϕ_i - fator de aceleração ajustado;
- a - fator de aceleração;
- $\text{rand}(-1,1)$ - número aleatório entre -1 e 1;
- x_k - componente aleatório do enxame, diferente de x_i .

O funcionamento dos algoritmos que utilizam a metaheurística ABC é demonstrada na figura 3.2.

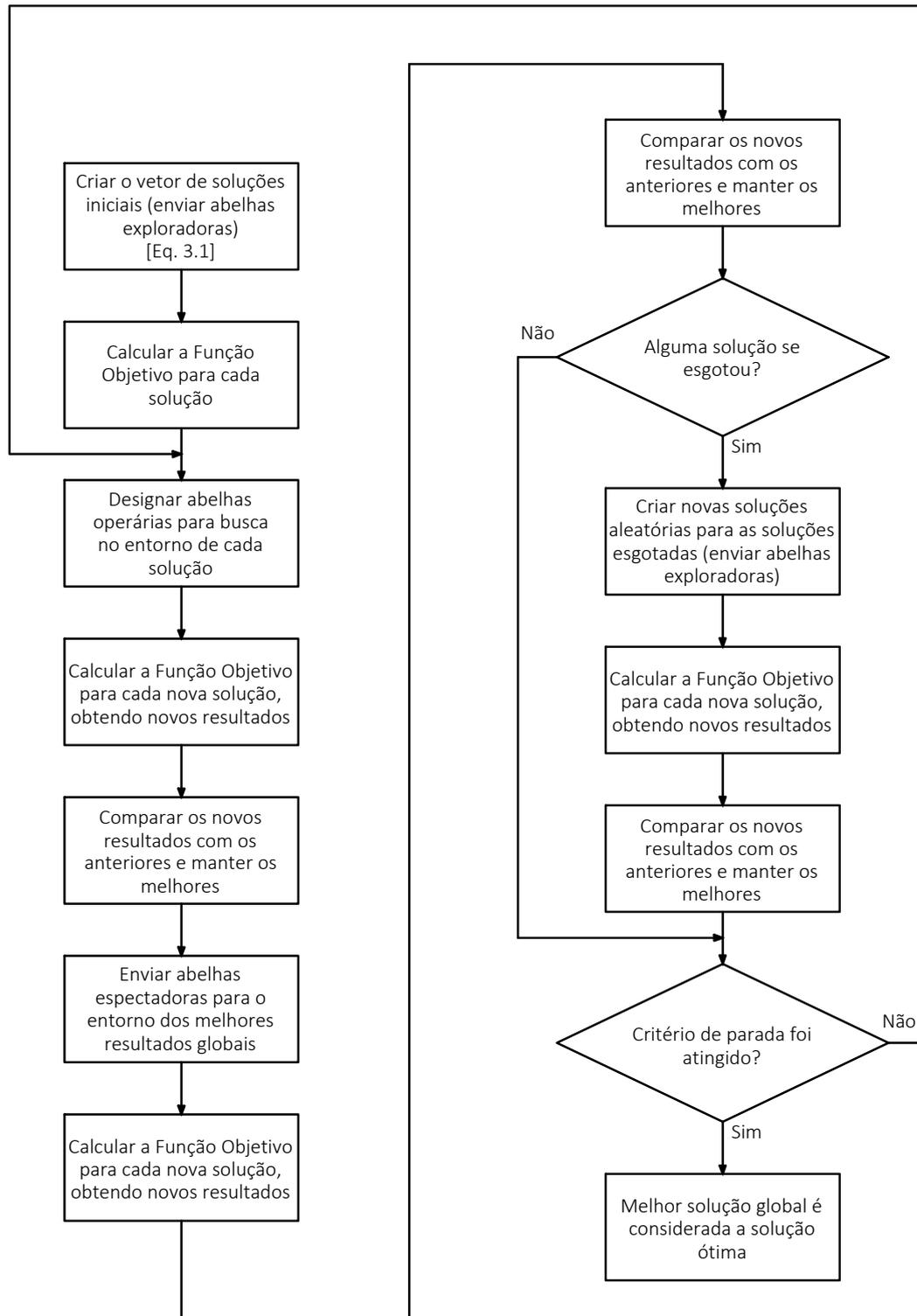
3.3 Metaheurísticas Multi-Objetivo

A maioria dos problemas reais submetidos à otimização possuem mais de um resultado afetado pela modificação dos parâmetros dos sistemas, que usualmente se mostram como escolhas conflitantes ao usuário, uma vez que um melhor resultado em um deles acaba piorando o outro (DEB, 2001). Para exemplificar, podem ser citados casos das mais diversas áreas do conhecimento: desempenho de um carro e consumo de combustível, rentabilidade e risco de um investimento, localização e valor de mercado de um imóvel.

Para a otimização desse tipo de problema, as soluções clássicas mono-objetivo não são capazes de fornecer uma resposta satisfatória, pois estão baseadas no princípio de que há uma única solução ótima para o problema, enquanto nos problemas multi-objetivos comuns necessariamente há mais de uma solução ótima.

Nesse contexto, surgem os algoritmos de otimização multi-objetivo. Esses algoritmos utilizam o conceito de partículas dominantes para determinar as soluções ótimas de um dado problema e orientar a movimentação das demais partículas dentro do espaço de busca. Com isso, ao final do algoritmo de otimização, os pontos dominantes são usualmente exibidos em um gráfico de Pareto, destacando os elementos dominantes, para que então possam ser utilizados outros critérios, que podem até mesmo ter um caráter subjetivo, para a escolha da solução que melhor atenderá o usuário (MACIEL, 2012).

FIGURA 3.2: Fluxograma que representa o funcionamento de um algoritmo baseado na metaheurística ABC



Fonte: O autor

3.3.1 Definições Matemáticas

Os algoritmos de otimização multi-objetivo podem ser definidos pelas equações a seguir (DEB, 2001).

$$\begin{aligned} \text{Minimizar/Maximizar: } \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= [f_1(\mathbf{x}) \ f_2(\mathbf{x}) \ \dots \ f_m(\mathbf{x}) \ \dots \ f_M(\mathbf{x})]^T, \\ \text{Sujeito a: } y_j(\mathbf{x}) &\geq 0, & j=1,2,3,\dots,J; \\ z_k(\mathbf{x}) &= 0, & k=1,2,3,\dots,K; \\ x_i^{LI} &\leq x_i \leq x_i^{LS}, & i=1,2,3,\dots,N; \end{aligned}$$

em que:

- \mathbf{x} - Vetor de soluções ou partículas, tal que $\mathbf{x} = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$;
- x_i^{LI} - Limite inferior da partícula x_i ;
- x_i^{LS} - Limite superior da partícula x_i ;
- $y(x), z(x)$ - funções de restrição;
- $f_m(\mathbf{x})$ - função objetivo.

Das definições acima expostas, tem-se que \mathbf{x} é o conjunto de partículas ou soluções que deve estar dentro do espaço de busca \mathbf{S} , limitado pelos limites superiores x_i^{LS} e os limites inferiores x_i^{LI} , além das funções de restrição $g(x)$ e $h(x)$. Desse conjunto de partículas, pode-se obter o conjunto de funções objetivo $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}) \ f_2(\mathbf{x}) \ \dots \ f_m(\mathbf{x})]$.

A principal diferença entre as funções mono-objetivo e multi-objetivo diz respeito à possibilidade de ordenação das partículas. Nos algoritmos mono-objetivos, para cada partícula x_i existe um único $f(x_i)$ que pode ser comparado aos valores obtidos pelas demais partículas e colocados em ordem, classificando as soluções da melhor para a pior. Já no caso dos algoritmos multi-objetivo, essa comparação se torna mais complexa, uma vez que duas funções distintas não podem ser comparadas. Dessa forma, torna-se fundamental para a compreensão dos algoritmos multi-objetivo a introdução dos conceitos de **Dominância de Pareto** e **Conjunto Ótimo de Pareto**, que são apresentadas a seguir:

Definição - Dominância de Pareto (DEB, 2001):

Uma solução x_1 domina a solução x_2 se atendidas duas condições:

- 1 - A solução x_1 não é pior que x_2 em todas as funções objetivo, ou seja, em um problema de minimização, $f_m(x_1) \leq f_m(x_2)$ para todo m .
- 2 - A solução x_1 é melhor que x_2 em pelo menos uma função objetivo, ou seja, em um problema de minimização, $f_m(x_1) < f_m(x_2)$ em pelo menos um m .

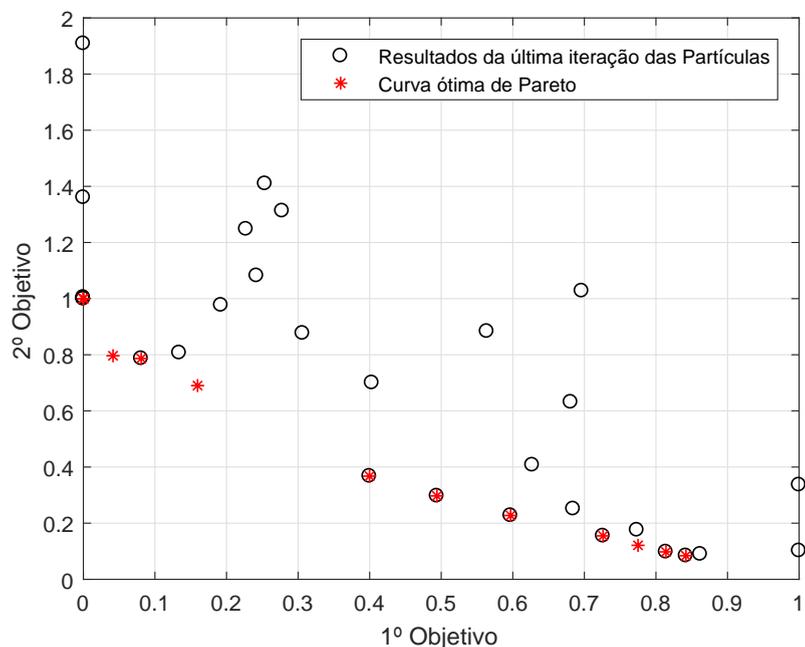
Definição - Conjunto Ótimo de Pareto (DEB, 2001):

Dado um conjunto \mathbf{W} de soluções, tal que $\mathbf{W} = [w_1 w_2 \dots w_r]^T$, \mathbf{W} é considerado um conjunto ótimo de Pareto se não há nenhum $x \in \mathbf{S}$ que domine as partículas de \mathbf{W}

Para a visualização das informações durante a execução dos algoritmos de otimização multi-objetivos, é comum a utilização do gráfico de Pareto. Esse é um gráfico M -dimensional, onde M é o número de funções objetivo utilizadas pelo algoritmo e, portanto, só pode ser utilizado para problemas com 2 ou 3 funções objetivo. Nele, é plotado o conjunto de resultados de todas as funções objetivo para cada partícula, facilitando a visualização do Conjunto de Pareto e a dispersão dos resultados das demais partículas.

Na Figura 3.3 é exibido um gráfico de Pareto como exemplo. Nessa figura há um gráfico de 2 dimensões, onde cada uma representa uma função objetivo imposta ao sistema. Os pontos representados por círculos vazios são os resultados provenientes do conjunto de soluções obtido na última iteração do algoritmo de otimização. Já os pontos representados por asteriscos vermelhos representam o repositório de soluções. Esse repositório é formado por uma quantidade pré-determinada de soluções dominantes, ou seja, soluções que apresentaram melhores resultados que as demais em um dos objetivos e igual ou melhor no outro. Dessa forma, em um problema de minimização, como é o caso do exemplo mostrado nessa figura, o formato típico do conjunto repositório em um gráfico de Pareto é uma parábola com assíntotas situadas nos valores mínimos das funções objetivos em questão.

FIGURA 3.3: Gráfico de Pareto de um conjunto de soluções com o conjunto ótimo de Pareto destacado em vermelho



Fonte: O autor

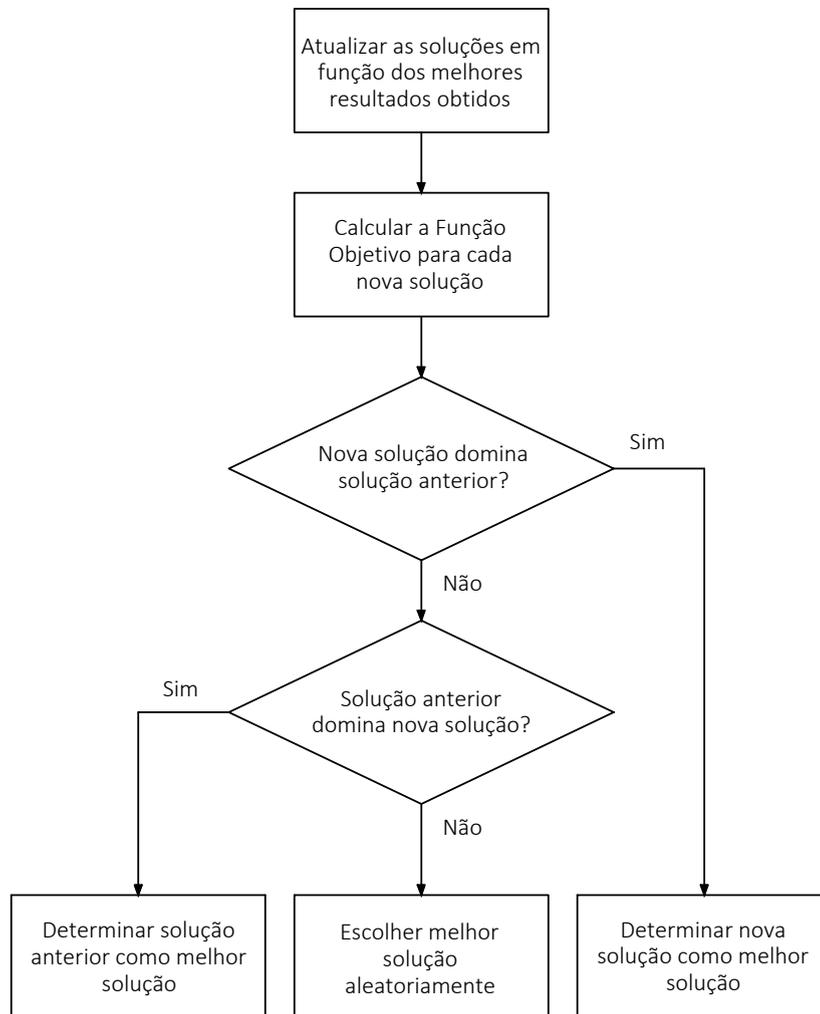
3.3.2 MOPSO e MOABC

O MOPSO e o MOABC são meta-heurísticas multi-objetivo baseadas no PSO e ABC respectivamente e, portanto, possuem definições e dinâmica similares a eles, diferenciando-se pelo número de dimensões da função objetivo e as consequências inerentes a essa mudança. A principal delas, já mencionada neste trabalho, é a impossibilidade de elencar uma única solução como mínima ou máxima, que acaba provocando modificações no código dos algoritmos baseados nessas meta-heurísticas.

Para contornar essa impossibilidade, os algoritmos MOPSO e MOABC utilizam a definição de Dominância de Pareto, explicitada na Seção 3.3. Assim, uma solução é dita melhor que as demais se aquela domina todas as outras. Entretanto, durante a execução dos algoritmos, podem ocorrer casos em que não haja uma partícula que domine as demais. Nesses casos, as melhores partículas são escolhidas aleatoriamente pelo algoritmo. Essa lógica é representada no fluxograma exibido na figura 3.4.

Outra diferença resultante da impossibilidade de se elencar uma única solução ótima na utilização dessas meta-heurísticas é a escolha do melhor resultado global. Como esse valor é fundamental para o cálculo das velocidades no PSO e para o direcionamento

FIGURA 3.4: Fluxograma de determinação das soluções dominantes em um algoritmo de otimização multi-objetivo



Fonte: O autor

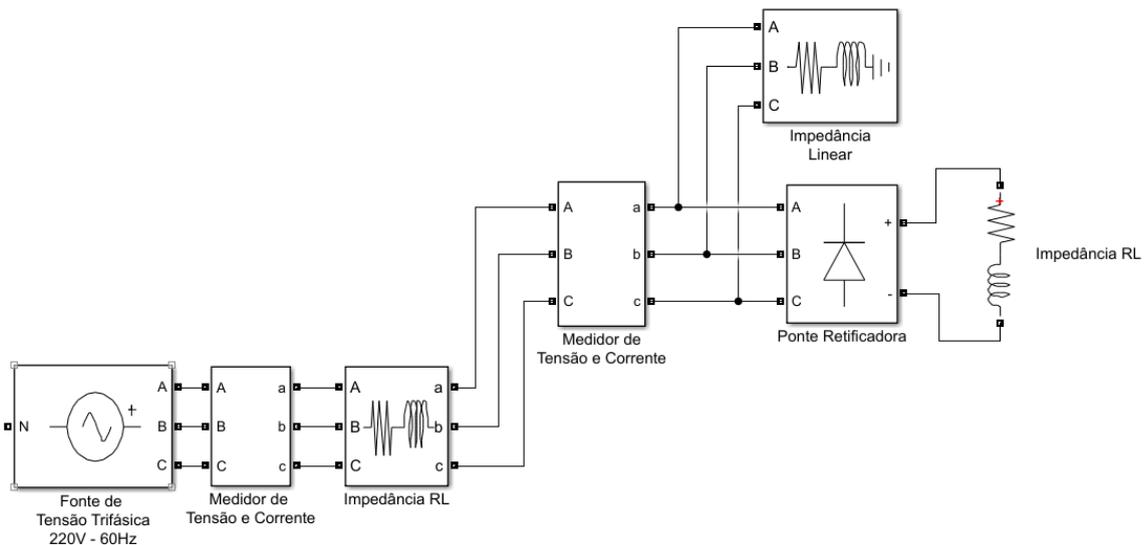
das abelhas expectadoras no ABC, é necessário que se eleja uma partícula para que o algoritmo possa funcionar adequadamente. Esse problema é contornado pelos algoritmos que utilizam MOPSO e MOABC, elegendo aleatoriamente uma partícula dentre as que compõem o conjunto ótimo de Pareto para ser a líder. Esse processo ocorre a cada iteração, alterando-se o líder mas mantendo o deslocamento das partículas em direção às melhores soluções.

4 Materiais e Métodos

4.1 Filtro Ativo de Potência Paralelo

Como base para a realização deste trabalho, foi utilizado um circuito de potência com uma fonte de tensão senoidal, 60Hz, 220V RMS conectada a uma carga não linear em paralelo a uma carga linear, cujos valores de impedância serão variados. A representação desse circuito é mostrada na Figura 4.1.

FIGURA 4.1: Representação do circuito de potência utilizado nas simulações

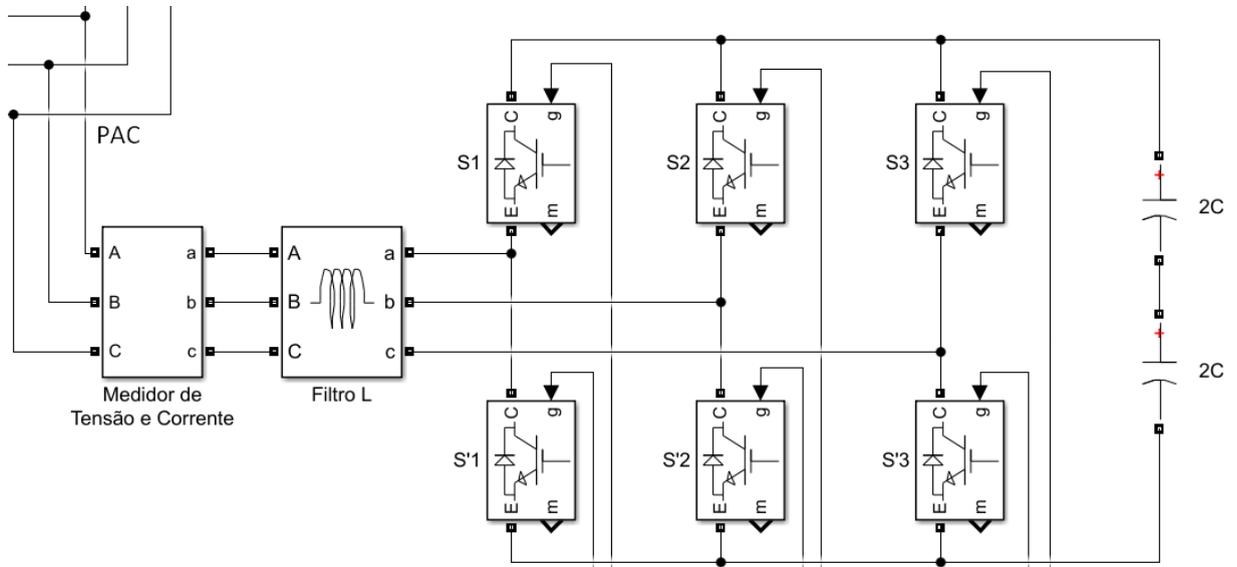


Fonte: O autor

Para a sintetização das formas de onda de corrente necessárias para a diminuição do THD da corrente na fonte, é utilizado um Filtro Ativo de Potência Paralelo, composto por uma ponte inversora com 2 capacitores formando o barramento CC e um filtro L na saída para o PAC (ponto de acoplamento comum), conforme mostrado na Figura 4.2.

O sistema de controle do FAPP é composto por uma malha de tensão e uma malha de corrente, conforme apresentado e explicado no Capítulo 2. A malha de tensão é composta por um sensor de tensão para informar a tensão do barramento CC e um controlador PI, que processa o erro e envia um sinal de corrente para a malha de controle de corrente. Esta, por sua vez, recebe o sinal da malha de tensão e, a partir dele, gera um sinal de corrente sincronizado com a tensão da rede e então compara com a corrente na fonte, gerando

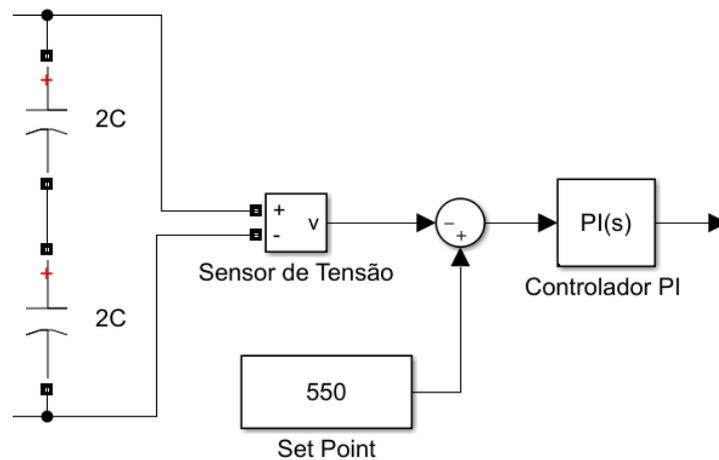
FIGURA 4.2: Representação FAPP ligado ao PAC



Fonte: O autor

o sinal de erro que alimenta o controlador. A malha de controle de tensão utilizada na simulação é mostrada na Figura 4.3 e a malha de controle de corrente na Figura 4.4

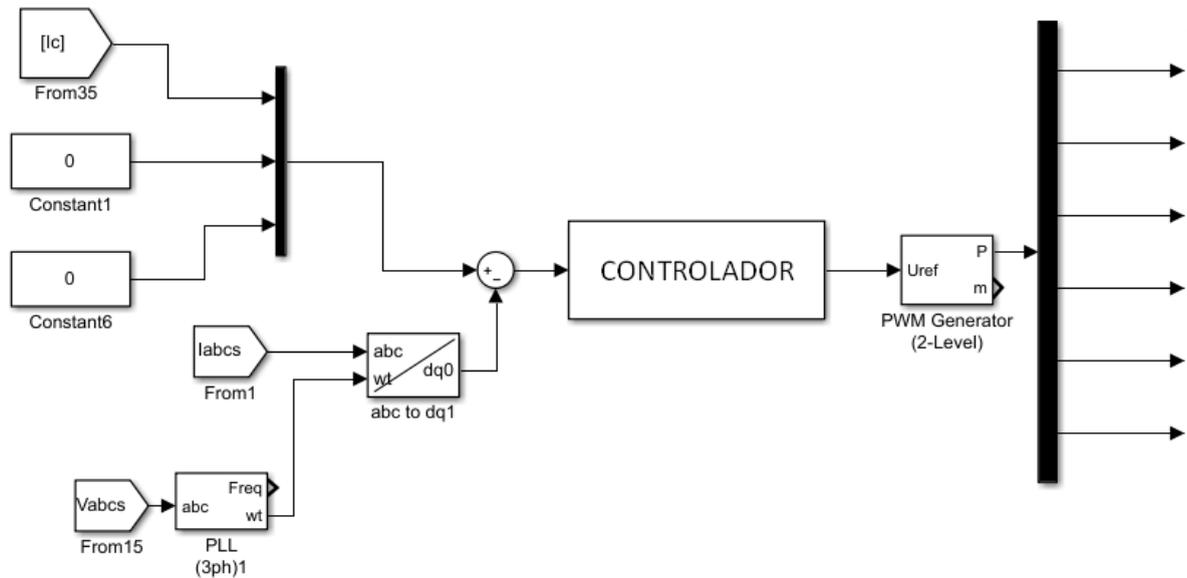
FIGURA 4.3: Malha de Controle de Tensão do Sistema de Controle do FAPP



Fonte: O autor

O bloco genérico "CONTROLADOR" que compõe a malha de controle exibida na Figura 4.4 constitui uma representação única para os dois sistemas de controle utilizados neste trabalho. Um deles é o sistema PI-SRF, explicado na Subseção 2.3.1, que trabalha com variáveis no referencial síncrono, e o outro se trata do P-SSI, abordado na Subseção 2.3.3, que utiliza controladores ressonantes no referencial estacionário.

FIGURA 4.4: Malha de Controle de Corrente do Sistema de Controle do FAPP



Fonte: O autor

4.2 Algoritmos de Otimização

Para a realização deste trabalho, foram executados 4 algoritmos de otimização combinando 2 diferentes meta-heurísticas, MOPSO e MOABC, com 2 estratégias de controle, PI-SRF e P-SSI. Esse arranjo metodológico foi escolhido para permitir a comparação simultânea das estratégias de controle e dos algoritmos de otimização escolhidos para este trabalho.

Todos os 4 algoritmos de otimização citados utilizaram as mesmas funções objetivo: minimizar a distorção harmônica total (THD) da corrente da fonte e o erro quadrático médio (EQM) da tensão do capacitor do barramento CC. Antes do detalhamento das funções objetivo, faz-se necessário apresentar as definições matemáticas das funções THD e EQM, que são trazidas pelas Equações 4.1 e 4.2.

$$THD = \frac{I_H}{I_F} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_F} \quad (4.1)$$

onde:

- I_H - Valor RMS das correntes harmônicas;
- I_F - Valor RMS da corrente fundamental;
- I_n - Valor da amplitude das correntes harmônicas.

$$EQM = \frac{\int_0^{T_{total}} E^2(t) dt}{T_{total}} \quad (4.2)$$

onde:

- T_{total} - Tempo total da simulação ou do dado amostrado;
- $E(t)$ - Erro da tensão do barramento CC em relação ao set-point estabelecido no tempo t .

Como o sistema é simulado em ambiente computacional, a forma discreta da variável EQM fica conforme a definição da Equação 4.3

$$EQM = \frac{\sum_{n=1}^{T_{total} * f_{amost}} E^2(n)}{T_{total} * f_{amost}} \quad (4.3)$$

onde:

- f_{amost} - Tempo total da simulação ou do dado amostrado;
- $E(n)$ - Erro da tensão do barramento CC em relação ao set-point estabelecido na n -ésima amostra.

Para a realização da tarefa de minimizar essas variáveis, foram realizadas 8 diferentes execuções dos algoritmos de otimização, que se encontram listadas na Tabela 4.1. Nessa tabela, pode-se atestar que os 4 algoritmos trabalham com diferentes meta-heurísticas otimizando diferentes técnicas de controle dos filtros e, conseqüentemente, utilizam soluções com diferentes dimensões. Todos esses algoritmos foram executados para a realização

da otimização dos parâmetros dos controladores utilizando diferentes tensões para o set-point do barramento CC, diferindo as 4 primeiras execuções das 4 últimas. Além das informações contidas na tabela, é significativo frisar que todos os algoritmos em todas as execuções utilizaram 30 partículas durante 50 iterações.

TABELA 4.1: Resumo das configurações utilizadas nos otimizadores

# Execução	Tensão Barramento CC	# Algoritmo	Técnica de Controle	Meta-heurística	Dimensão
1	550V	Algoritmo 1	P-SSI	MOPSO	32
2		Algoritmo 2	PI-SRF		16
3		Algoritmo 3	P-SSI	MOABC	32
4		Algoritmo 4	PI-SRF		16
5	750V	Algoritmo 1	P-SSI	MOPSO	32
6		Algoritmo 2	PI-SRF		16
7		Algoritmo 3	P-SSI	MOABC	32
8		Algoritmo 4	PI-SRF		16

Dessa forma, os vetores de partículas ou soluções, definidos na Seção 3.3.1, terão diferentes tamanhos para as diferentes técnicas de controle utilizadas. Isto ocorre devido à diferença da quantidade de parâmetros de controladores existentes em cada uma das técnicas utilizadas. Matematicamente, ficam definidos conforme as equações 4.4 e 4.5.

$$\mathbf{x}_{\text{PI-SRF}} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_{15} \ x_{16}] \quad (4.4)$$

$$\mathbf{x}_{\text{P-SSI}} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_{31} \ x_{32}] \quad (4.5)$$

Onde:

- $\mathbf{x}_{\text{PI-SRF}}$ - Vetor de partículas (ou soluções) dos algoritmos que trabalham com a técnica de controle PI-SRF;
- $\mathbf{x}_{\text{P-SSI}}$ - Vetor de partículas (ou soluções) dos algoritmos que trabalham com a técnica de controle P-SSI;
- x_i - i -ésima partícula de um vetor de partículas.

Esses vetores, podem ainda ser agrupados de acordo com as cargas a que são submetidos:

$$\mathbf{X}_{\text{PI-SRF}} = [\mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(1)} \mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(2)} \mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(3)} \mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(4)}] \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(1)} &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] \\ \mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(2)} &= [x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8] \\ \mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(3)} &= [x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12}] \\ \mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(4)} &= [x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16}] \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{X}_{\text{P-SSI}} = [\mathbf{X}_{\text{P-SSI}(1)} \mathbf{X}_{\text{P-SSI}(2)} \mathbf{X}_{\text{P-SSI}(3)} \mathbf{X}_{\text{P-SSI}(4)}] \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\text{P-SSI}(1)} &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8] \\ \mathbf{X}_{\text{P-SSI}(2)} &= [x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16}] \\ \mathbf{X}_{\text{P-SSI}(3)} &= [x_{17} \ x_{18} \ x_{19} \ x_{20} \ x_{21} \ x_{22} \ x_{23} \ x_{24}] \\ \mathbf{X}_{\text{P-SSI}(4)} &= [x_{25} \ x_{26} \ x_{27} \ x_{28} \ x_{29} \ x_{30} \ x_{31} \ x_{32}] \end{aligned} \quad (4.9)$$

Em que:

- $\mathbf{X}_{\text{PI-SRF}(n)}$ - Vetor de partículas (ou soluções) da n-ésima carga de um algoritmo que trabalha com a técnica de controle PI-SRF;
- $\mathbf{X}_{\text{P-SSI}(n)}$ - Vetor de partículas (ou soluções) da n-ésima carga de um algoritmo que trabalha com a técnica de controle P-SSI.

Com base nessas definições, os objetivos dos algoritmos são definidos a seguir:

Algoritmos 1 e 3: Minimizar $\mathbf{F}_{\text{P-SSI}}(\mathbf{x}) = [f_{\text{THD}[P-SSI]}(\mathbf{x}_{\text{P-SSI}}) f_{\text{EQM}[P-SSI]}(\mathbf{x}_{\text{P-SSI}})]$;

Algoritmos 2 e 4: Minimizar $\mathbf{F}_{\mathbf{PI-SRF}}(\mathbf{x}) = [f_{THD[PI-SRF]}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}}) f_{EQM[PI-SRF]}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}})]$

Onde as funções $f_{THD[P-SSI]}$, $f_{EQM[P-SSI]}$, $f_{THD[PI-SRF]}$ e $f_{EQM[PI-SRF]}$ são definidas nas equações 4.10 a 4.13:

$$\begin{aligned} f_{THD[PI-SRF]}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}}) &= THD_{s(1)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(1)}) + THD_{s(2)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(2)}) \\ &+ THD_{s(3)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(3)}) + THD_{s(4)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(4)}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} f_{THD[P-SSI]}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}}) &= THD_{s(1)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(1)}) + THD_{s(2)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(2)}) \\ &+ THD_{s(3)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(3)}) + THD_{s(4)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(4)}) \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} f_{EQM[PI-SRF]}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}}) &= EQM_{s(1)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(1)}) + EQM_{s(2)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(2)}) \\ &+ EQM_{s(3)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(3)}) + EQM_{s(4)}(\mathbf{x}_{\mathbf{PI-SRF}(4)}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

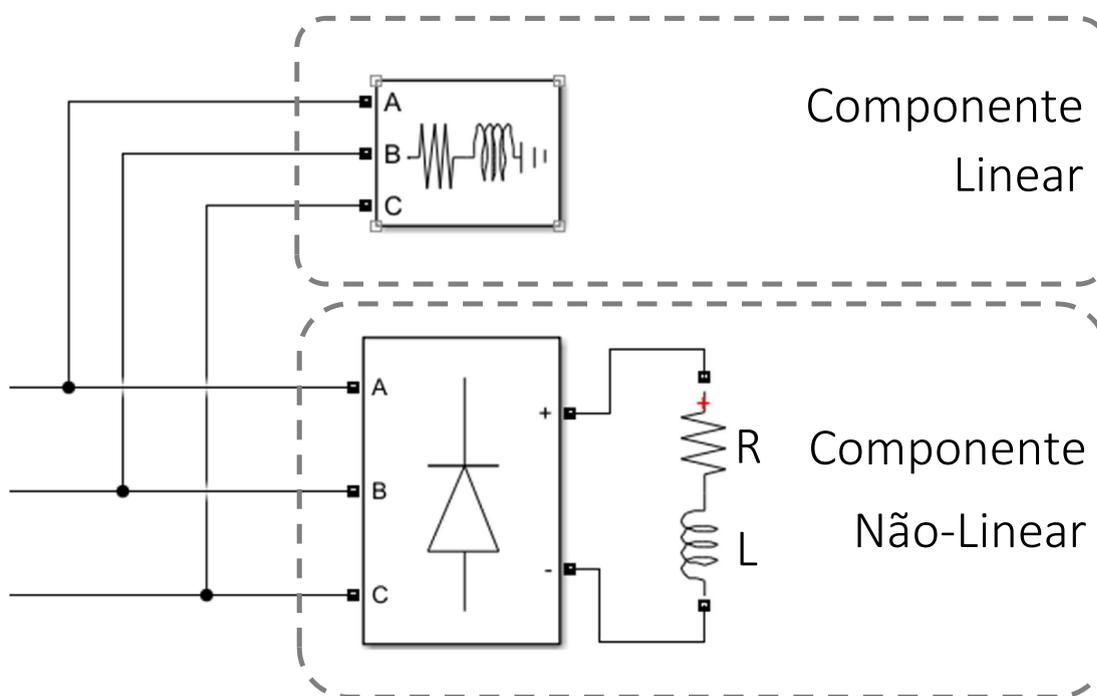
$$\begin{aligned} f_{EQM[P-SSI]}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}}) &= EQM_{s(1)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(1)}) + EQM_{s(2)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(2)}) \\ &+ EQM_{s(3)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(3)}) + EQM_{s(4)}(\mathbf{x}_{\mathbf{P-SSI}(4)}) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Em todas as simulações, todos os elementos x_i dos vetores solução previamente apresentados foram limitados de acordo com a equação 4.14. Na Tabela 4.1 são apresentadas as principais informações a respeito de cada algoritmo.

$$0,01 \leq x_i \leq 1 \quad (4.14)$$

As 4 cargas utilizadas para este trabalho possuem níveis de distorção harmônica total diferentes, variando de aproximadamente 10% com a carga 4 para até 28% na carga 1, com uma diferença de pelo menos 5% de uma carga para outra. Na Figura 4.5 é mostrada a estrutura das cargas utilizadas que, em todos os casos, são compostas por uma componente não-linear e uma componente linear. A componente não-linear é obtida de uma ponte retificadora a diodos alimentando uma carga RL, com resistor de 11,33 Ω e uma indutância de 15 mH. Já a parte linear é variada de uma carga para outra, regulando assim o nível de distorção harmônica total. Os valores utilizados, bem como o THD resultante das cargas são listados na Tabela 4.2.

FIGURA 4.5: Esquema das cargas utilizadas neste trabalho



Fonte: O autor

TABELA 4.2: Valores das impedâncias e do THD das cargas utilizadas

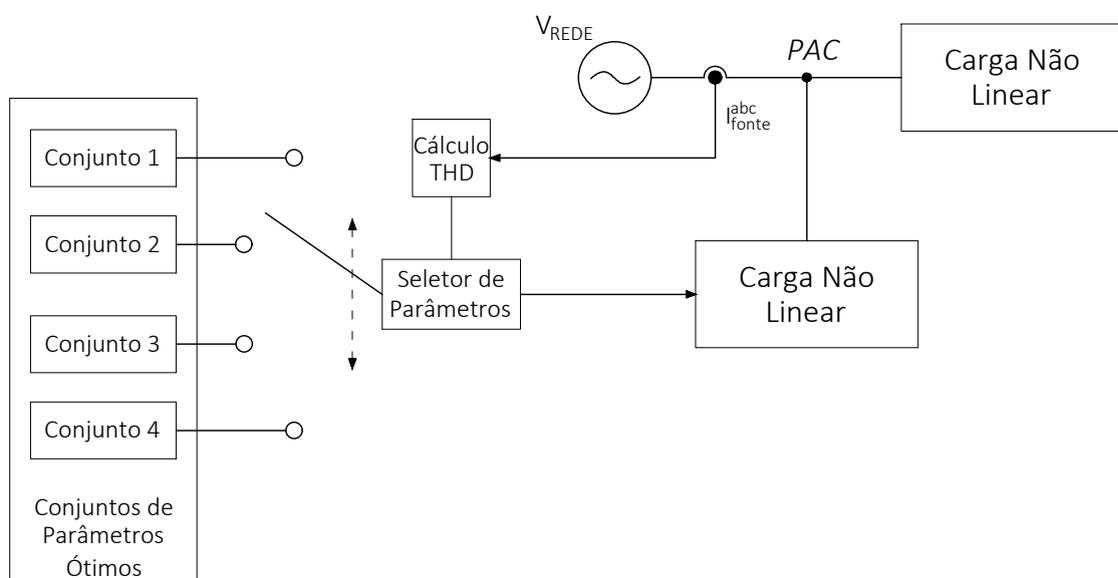
Carga	THD	Impedância Linear
Carga 1	28,67%	∞
Carga 2	20,07%	$14,44 + j \cdot 0,116\Omega$
Carga 3	15,49%	$7,22 + j \cdot 0,029\Omega$
Carga 4	10,66%	$3,61 + j \cdot 0,007\Omega$

Finalmente, para a realização de todas as execuções deste trabalho foi utilizada uma máquina com processador de 4 núcleos e clock de 3,4 GHz, uma memória de 32GB e uma placa de vídeo de 1 GHz.

4.3 Técnica de *gain scheduling*

Após a execução dos algoritmos de otimização dos parâmetros do controlador, os dados obtidos são analisados para a escolha de um conjunto de parâmetros para compor o banco de coeficientes do *gain scheduling* do FAPP. Essa técnica consiste no armazenamento dos parâmetros ótimos selecionados na memória de um controlador que os utiliza de acordo com uma condição pré-estabelecida. No presente caso, a condição analisada pelo sistema é o THD da carga, ou seja, o sistema mede o THD da carga e altera os parâmetros dos controladores caso haja alteração no valor medido. A representação desse sistema de seleção de parâmetros é exibida na Figura 4.6. Nessa figura, pode-se observar que o bloco “Cálculo THD” utiliza a corrente da fonte para seu THD e passar essa informação ao seletor de parâmetros que, por sua vez, seleciona o conjunto de parâmetros armazenados na memória. As faixas de atuação de cada conjunto de parâmetros são exibidas na Tabela 4.3

FIGURA 4.6: Diagrama de Blocos do *gain scheduling*



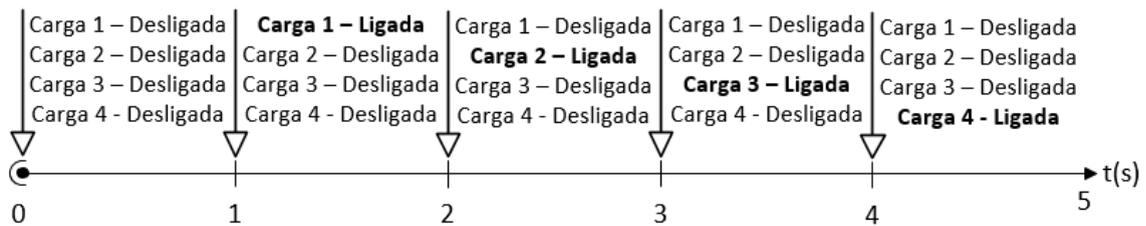
Fonte: O autor

TABELA 4.3: Faixas de valores para atuação do *gain scheduling*

# Faixa	Valores THD
Faixa 1	$\text{THD} \geq 24,00\%$
Faixa 2	$17,50\% \leq \text{THD} < 24,00\%$
Faixa 3	$12,50\% \leq \text{THD} < 17,50\%$
Faixa 4	$\text{THD} < 12,50$

No caso específico deste trabalho, para simular uma situação de aplicação do *gain scheduling*, é realizada uma simulação onde as 4 cargas utilizadas para a otimização dos parâmetros são alternadas a cada 1 segundo, juntamente com os parâmetros dos controladores. O primeiro segundo de simulação é reservado para a carga do capacitor e, portanto, não é considerado para o cálculo do THD. Na Figura 4.7 é mostrada a linha do tempo da simulação executada.

FIGURA 4.7: Linha do tempo para a simulação da técnica de *gain scheduling*



Fonte: O autor

As 4 cargas utilizadas para a aplicação do *gain scheduling* são similares às cargas utilizadas para a otimização, seguindo o modelo exibido na Figura 4.5. A diferença entre elas é a utilização de uma ponte de tiristores com ângulo de disparo fixo em 100° no lugar da ponte de diodos utilizada na otimização. A impedância alimentada pelos tiristores é a mesma carga RL, com resistor de $11,33 \Omega$ e indutância de 15 mH . Já as impedâncias dos componentes lineares utilizados são diferentes para adequar os níveis de THD. Os valores dessas impedâncias e do THD resultante consta na Tabela 4.4.

TABELA 4.4: Cargas utilizadas para validação do *gain scheduling*

Carga	THD	Impedância Linear
Carga 1	35,70%	∞
Carga 2	18,87%	$14,44 + j \cdot 0,116\Omega$
Carga 3	14,46%	$9,63 + j \cdot 0,051\Omega$
Carga 4	11,62%	$7,22 + j \cdot 0,029\Omega$

4.4 Prevenção contra Sobremodulação

Os algoritmos de otimização utilizados neste trabalho ainda utilizam um recurso para não permitir a ocorrência de sobremodulação. Esse artifício foi utilizado após a verificação de que os sistemas sobremodulados apresentam bons resultados e, portanto, os otimizadores poderiam indicar parâmetros que causam sobremodulação como os melhores. Entretanto, a sobremodulação funciona como uma saturação do sistema, deixando-o similar a um controle por histerese. Essa constatação vai de encontro aos resultados apresentados em Buso, Malesani e Mattavelli (1998), que indicaram a superioridade do método de histerese sobre o método PI-SRF. Entretanto, traz problemas para o sistema, como a variação das frequências de chaveamento, possíveis efeitos de ressonância com outras cargas, além de ter seu desempenho afetado pela interações entre as correntes de fase.

Portanto, para superar esse indesejado fenômeno, foi utilizada a técnica de penalização. Essa técnica consiste no incremento do valor da função objetivo dos elementos que, por ventura, provocarem a sobremodulação do sistema. Dessa forma, o algoritmo de otimização irá abandonar essas soluções, uma vez que as partículas tendem a migrar para a proximidade dos melhores resultados obtidos. Matematicamente, a sobremodulação pode ser definida da seguinte forma:

$$N_{SM(n)} = \frac{N_{SMabs(n)}}{N_{Total(n)}} \quad (4.15)$$

Em que:

- $N_{SM(n)}$ - Quantidade relativa de pontos sobremodulados da resposta do controlador para a carga n ;
- $N_{SMabs(n)}$ - Quantidade absoluta de pontos sobremodulados da resposta do controlador para a carga n ;
- $N_{Total(n)}$ - Quantidade total de pontos amostrados do sinal da resposta do controlador para a carga n .

Finalmente, a penalização contra sobremodulação é matematicamente aplicada no algoritmo como demonstrado a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Se } N_{SM(n)} > 0, 1: \quad THD_{(n)}(\mathbf{x}_{\alpha(n)}) &= THD_{(n)}(\mathbf{x}_{\alpha(n)}) + 100 \\ EQM_{(n)}(\mathbf{x}_{\alpha(n)}) &= EQM_{(n)}(\mathbf{x}_{\alpha(n)}) + 100000 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Onde $\mathbf{x}_{\alpha(n)}$ é o vetor de partículas da técnica de controle α e carga n .

5 Resultados e Discussões

Após a realização das 8 execuções dos algoritmos de otimização da forma como foi estabelecido na Tabela 4.1, são obtidos como resultado da otimização realizada pelos algoritmos os gráficos de Pareto, genericamente definidos na Seção 3.3.1, que servem como base para a decisão do usuário sobre quais soluções serão analisadas para a escolha da solução mais apropriada.

Para a análise dos resultados neste trabalho, são recorrentemente utilizados os 2 pontos extremos das curvas de Pareto. Por isso, esses 2 pontos são chamados de THD-ÓTIMO para o extremo da curva de Pareto com menor nível de distorção harmônica na corrente da fonte e EQM-ÓTIMO para o extremo da curva de Pareto com o menor erro quadrático médio da tensão no Capacitor do barramento CC.

Outra informação importante em relação aos resultados apresentados neste capítulo diz respeito aos valores de erro quadrático médio (EQM) da tensão do barramento CC. Como o valor absoluto dessa variável não traz grande contribuição para a compreensão dos resultados, eles são representados de forma normalizada em relação ao maior valor obtido para cada grupo de execuções com tensões de operação diferentes. Assim, espera-se facilitar a interpretação e análise dos resultados.

A apresentação dos resultados será feita a seguir com uma divisão em duas seções. A seção 5.1 trará os resultados das execuções 1 a 4, ou seja, as que utilizaram o set-point da tensão no barramento como 550V, enquanto a seção 5.2 abordará as execuções 5 a 8, que utilizaram 750V como set-point.

5.1 Otimizações com FAPPs utilizando tensão de 550V

Os gráficos de Pareto obtidos para as execuções 1 a 4 são apresentados nas Figuras 5.1 a 5.4. Os pontos THD-ÓTIMO e EQM-ÓTIMO desses gráficos são listados na Tabela 5.1. Como já informado, os valores de EQM serão normalizados em relação ao maior valor. Para este conjunto de resultados, o maior valor obtido foi o do THD-ÓTIMO da execução 1, igual a 22740,68 V^2 . Portanto, todos os demais valores são normalizados em relação a esse.

FIGURA 5.1: Gráfico de Pareto obtido da execução 1 (algoritmo 1, MOPSO, P-SSI)

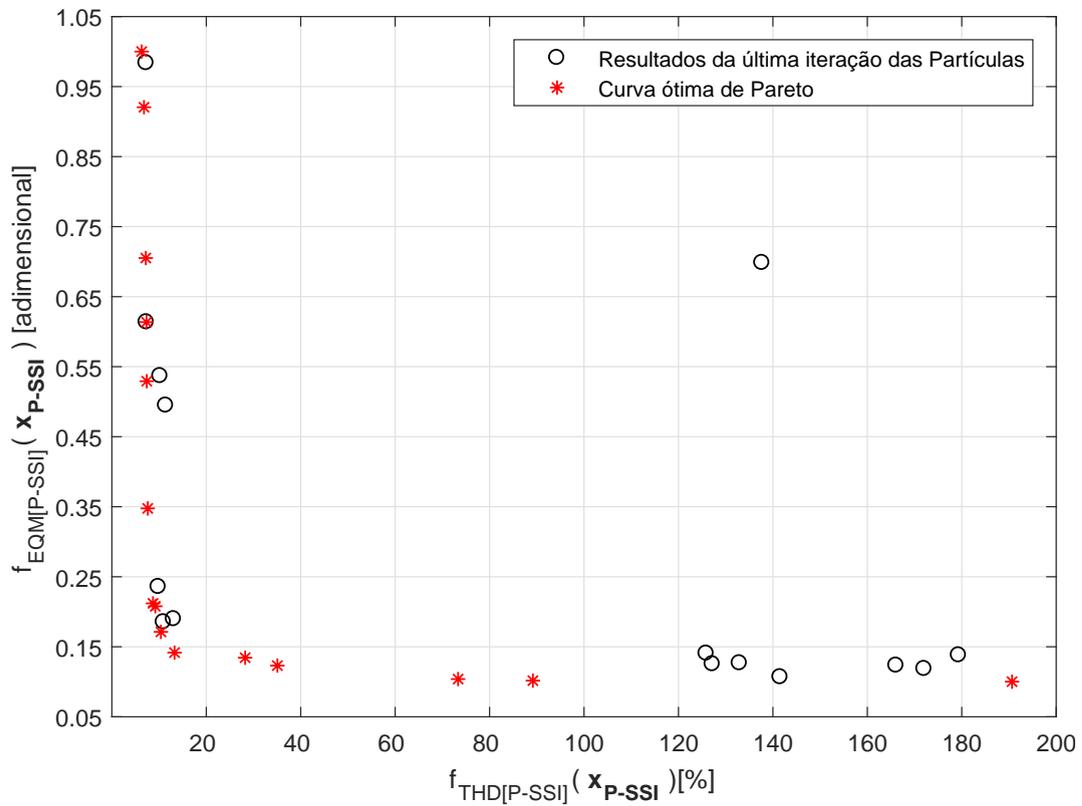


FIGURA 5.2: Gráfico de Pareto obtido da execução 2 (algoritmo 2, MOPSO, PI-SRF)

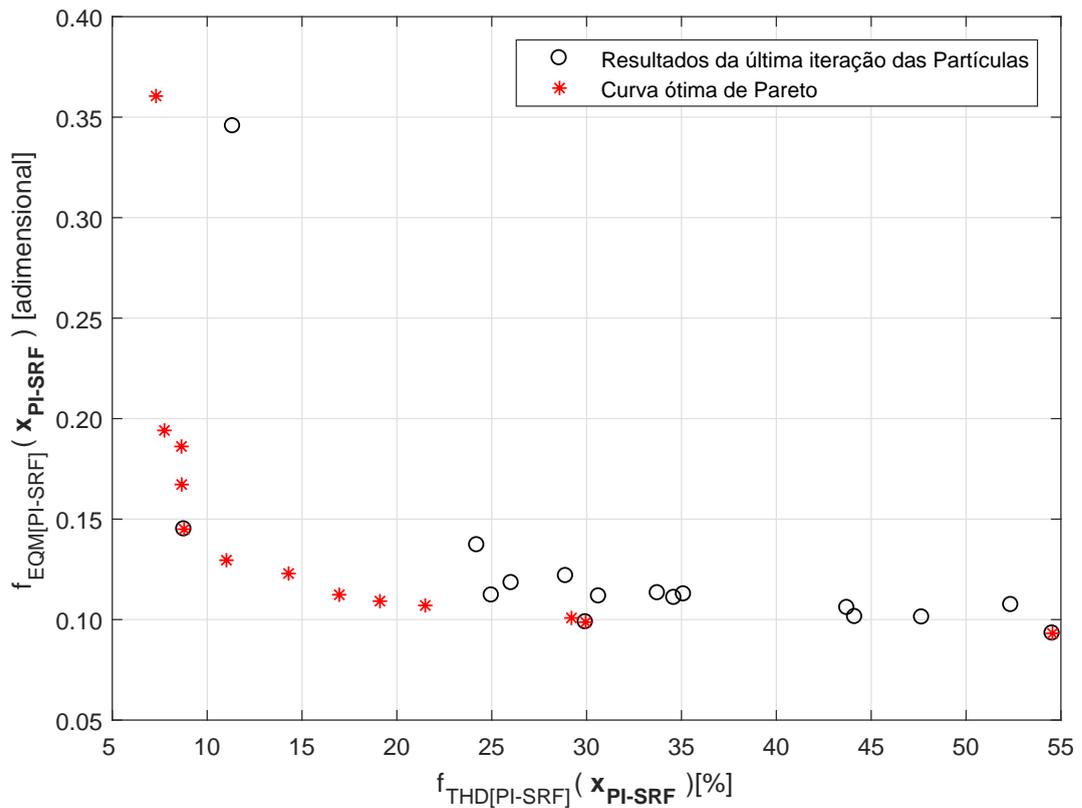
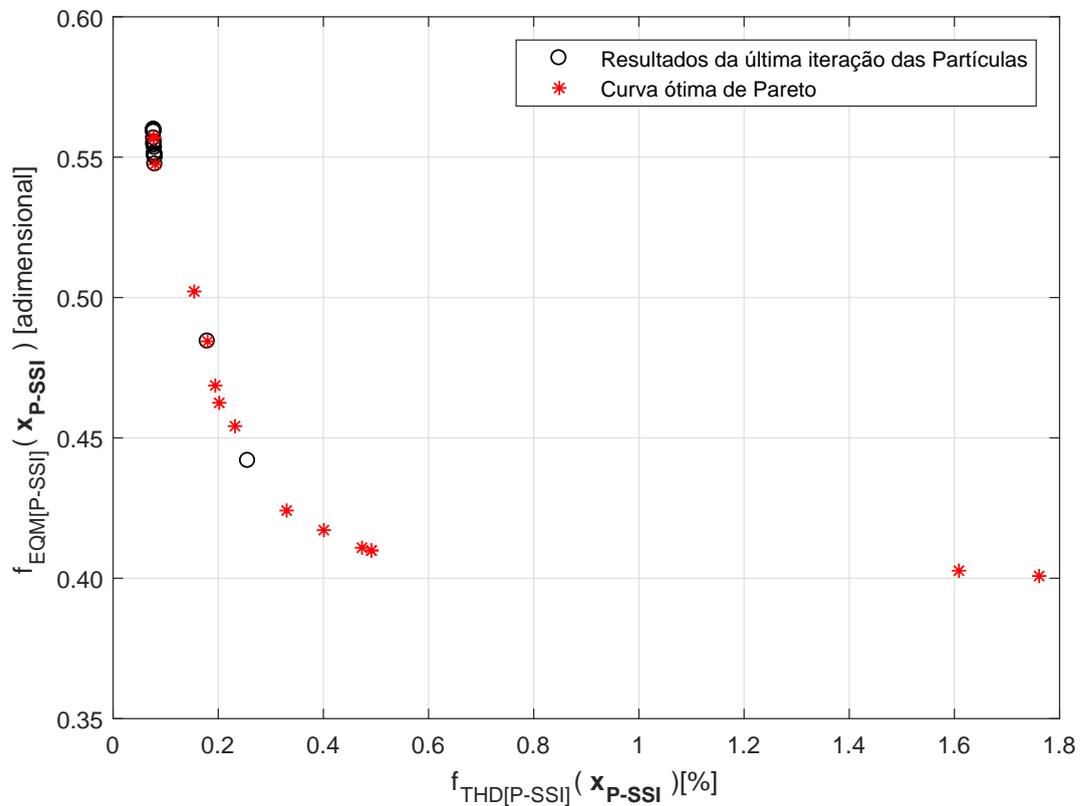
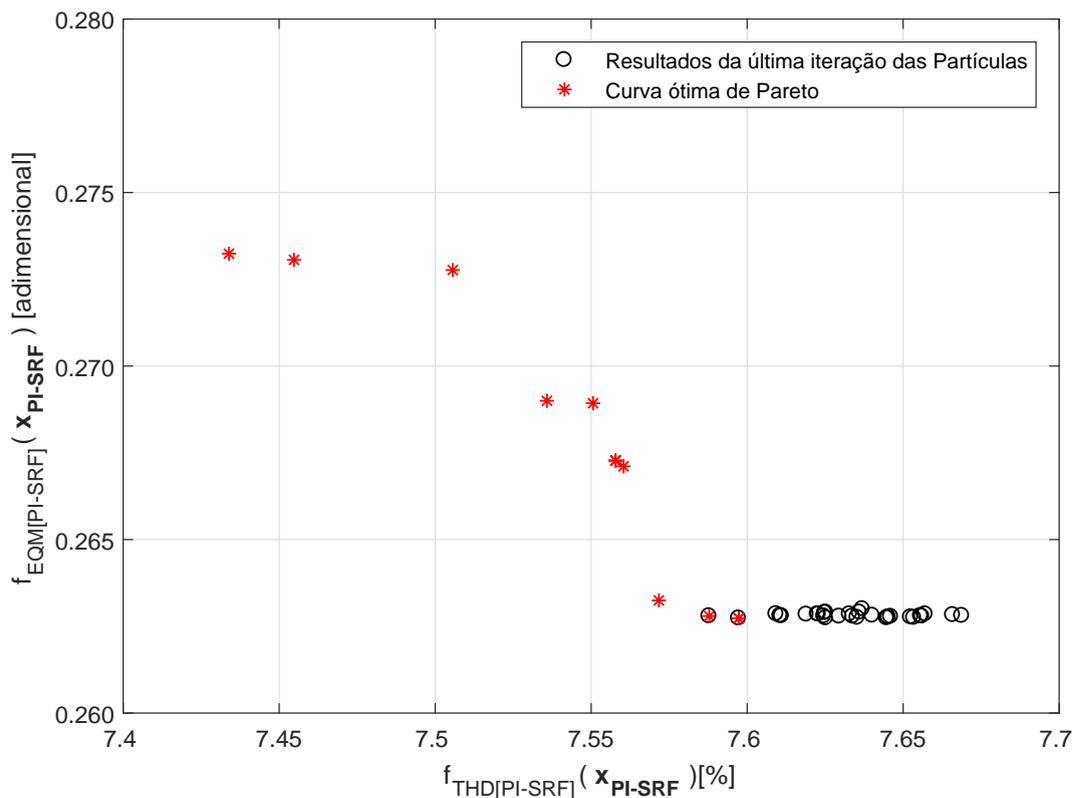


FIGURA 5.3: Gráfico de Pareto obtido da execução 3 (algoritmo 3, MOABC, P-SSI)



Fonte: O autor

FIGURA 5.4: Gráfico de Pareto obtido da execução 4 (algoritmo 4, MOABC, PI-SRF)



Fonte: O autor

TABELA 5.1: Valores de THD e EQM mínimos obtidos pelos algoritmos 1 a 4 com tensão de 550V (execuções 1 a 4)

Algoritmo	Referência	THD	EQM	Tempo Computacional
Algoritmo 1 (MOPSO + P-SSI)	THD-ÓTIMO	6,32%	1	43h 18min 37s
	EQM-ÓTIMO	138,9%	0,1002	
Algoritmo 2 (MOPSO + PI-SRF)	THD-ÓTIMO	7,31%	0,3605	18h 29min 23s
	EQM-ÓTIMO	54,56%	0,0931	
Algoritmo 3 (MOABC + P-SSI)	THD-ÓTIMO	7,69%	0,5571	74h 7min 44s
	EQM-ÓTIMO	176,12%	0,4008	
Algoritmo 4 (MOABC + PI-SRF)	THD-ÓTIMO	7,43%	0,2732	31h 8min 27s
	EQM-ÓTIMO	7,60%	0,2627	

Fazendo uma análise inicial dos gráficos das Figuras 5.1 a 5.4, é possível observar que a curva ótima de Pareto dos três primeiros possuem um formato convexo, como é esperado para problemas de otimização multi-objetivo. Apenas o gráfico da Figura 5.4 possui um formato de "S" invertido, ocasionado aparentemente pelo "acrécimo" de pontos com baixo THD e alto EQM na parte superior esquerda do gráfico.

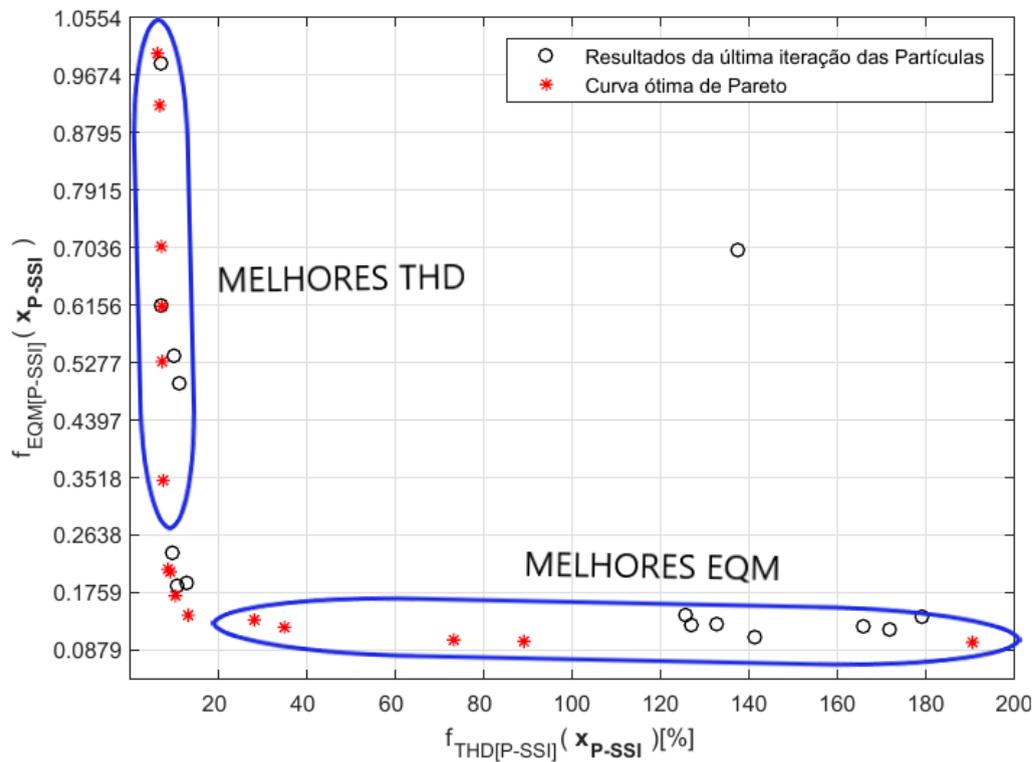
Essa "anomalia" gráfica pode ser explicada pela característica mais aleatória da metaheurística MOABC em relação à MOPSO, devido à atuação das abelhas exploradoras, que buscam melhores soluções aleatoriamente no espaço de busca quando uma solução se esgota, ou seja, não melhora seu próprio resultado após uma determinada quantidade de iterações. Essa diferença faz com que os algoritmos que utilizam essa metaheurística tenham maior probabilidade de obter boas soluções distantes das demais partículas, o que pode "distorcer" a curva ótima de Pareto desses algoritmos, como aconteceu neste caso.

Já analisando a Tabela 5.1, verifica-se que o ponto que conseguiu uma maior redução do THD da corrente da fonte conjunta de todas as cargas foi o THD-ÓTIMO do algoritmo 1, obtendo um valor de 6,32%. Entretanto, esse mesmo ponto apresentou o maior EQM da tensão do barramento CC dentre todas as demais configurações utilizadas, consistindo em um possível impedimento à sua utilização.

Contudo, observando-se o gráfico da Figura 5.1, pode-se fazer a seguinte análise: dividindo-se os pontos da curva ótima de Pareto em dois conjuntos, sendo o primeiro dos pontos com melhores THD e o conjunto dos pontos com melhores EQM, observa-se que ambos possuem um perfil bastante "reto", ou seja, para os pontos com melhor THD, há pouca

variação do EQM, enquanto para os pontos com melhor EQM, há pouca variação do THD. Na Figura 5.5, são explicitados os pontos com melhores THD e os pontos com melhores EQM.

FIGURA 5.5: Gráfico de Pareto explicitando os conjuntos de pontos com melhores THD e melhores EQM



Fonte: O autor

Dessa forma, caso a utilização do ponto THD-ÓTIMO para a aplicação do *gain scheduling*, ocasione em uma variação de tensão excessiva no barramento CC, os demais pontos do conjunto com melhores THD podem ser utilizados para obter uma melhor regulação da tensão no barramento CC sem diminuir consideravelmente o desempenho do FAPP em sua principal tarefa que é a de diminuir o THD da corrente da fonte.

Ademais, esse valor ótimo obtido para a função objetivo f_{THD} de 6,32%, que engloba a soma dos THD's da corrente da fonte para cada uma das 4 cargas utilizadas, representa um valor médio de 1,58% para cada caso. Isso significa uma forte redução, uma vez que o menor valor de THD dentre as cargas utilizadas é de 10,66%. Além disso, também representa um valor bastante baixo sob a luz das principais normas internacionais, IEEE-519 e IEC-61000, que tradicionalmente consideram adequados os valores abaixo de 5% de THD.

5.2 Otimizações com FAPPs utilizando tensão de 750V

Os gráficos de Pareto obtidos para as execuções 5 a 8 são apresentados nas Figuras 5.6 a 5.9. Os pontos THD-ÓTIMO e EQM-ÓTIMO desses gráficos são listados na Tabela 5.2.

FIGURA 5.6: Gráfico de Pareto obtido da execução 5 (algoritmo 1, MOPSO, P-SSI)

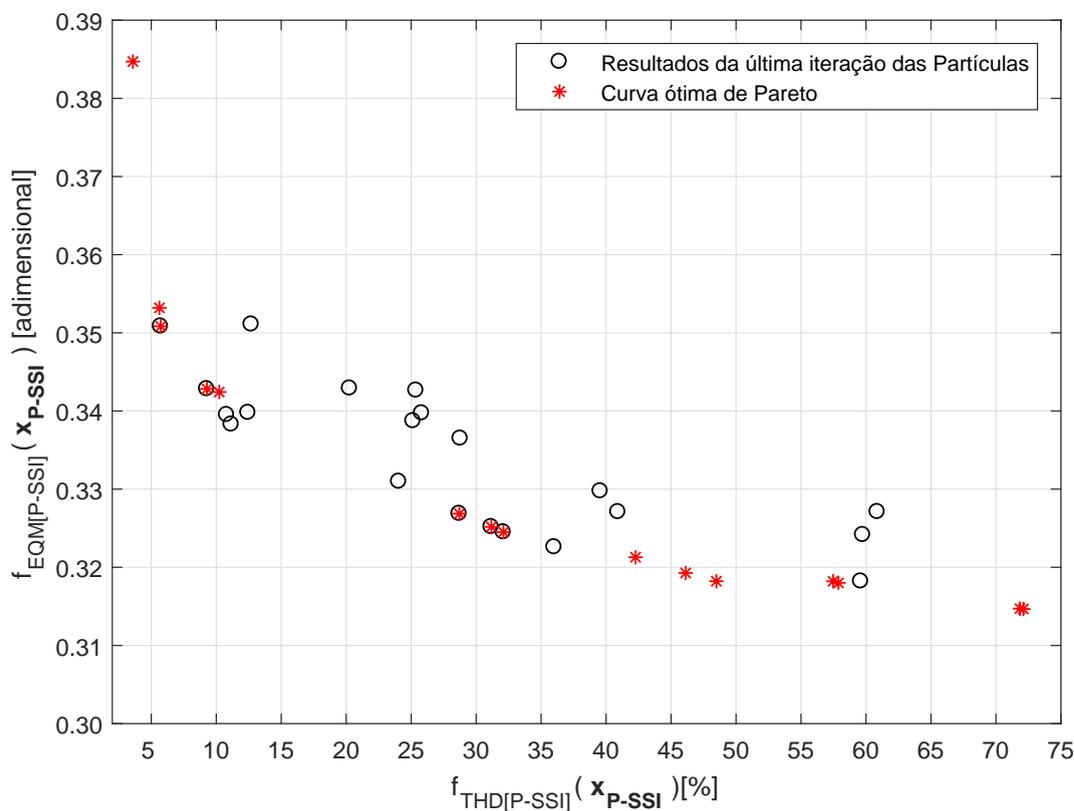
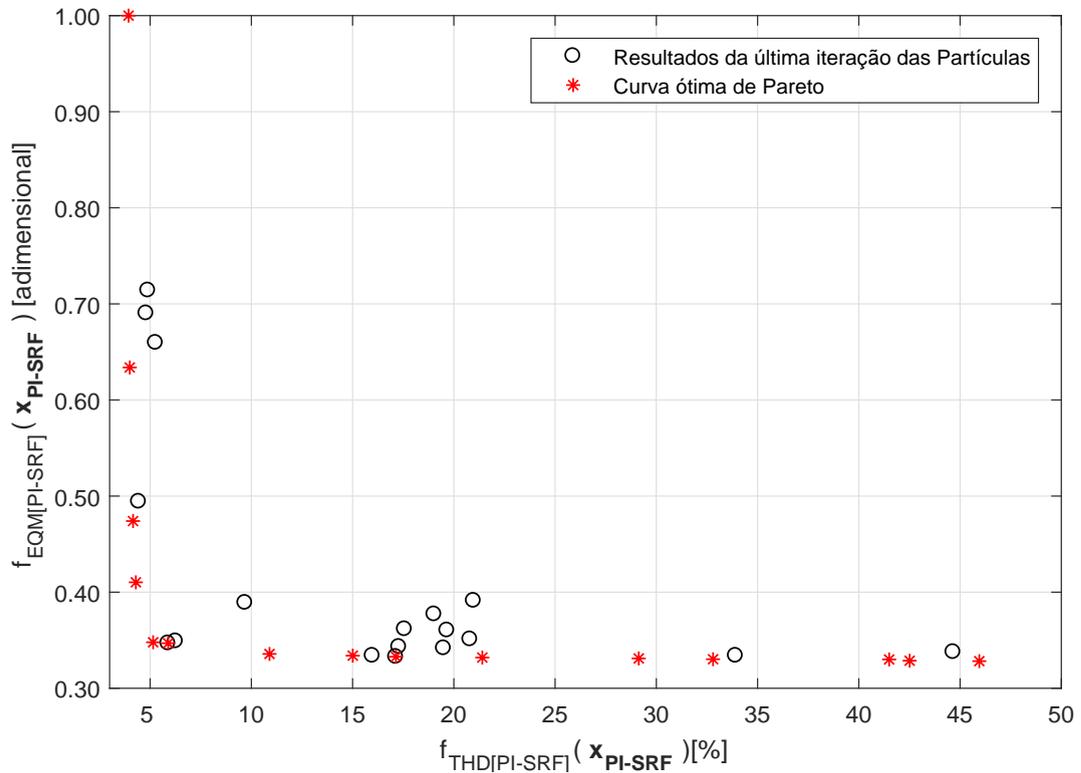


TABELA 5.2: Valores de THD e EQM mínimos obtidos pelos algoritmos 1 a 4 com tensão de 750V (execuções 5 a 8)

Algoritmo	Referência	THD	EQM	Tempo Computacional
Algoritmo 1 (MOPSO + P-SSI)	THD-ÓTIMO	3,58%	0,3847	46h 31min 27s
	EQM-ÓTIMO	72,11%	0,3147	
Algoritmo 2 (MOPSO + PI-SRF)	THD-ÓTIMO	3,94%	1,0000	18h 50min 41s
	EQM-ÓTIMO	45,95%	0,3282	
Algoritmo 3 (MOABC + P-SSI)	THD-ÓTIMO	4,19%	0,6488	94h 17min 17s
	EQM-ÓTIMO	5,17%	0,4346	
Algoritmo 4 (MOABC + PI-SRF)	THD-ÓTIMO	4,05%	0,5022	32h 43min 54s
	EQM-ÓTIMO	4,18%	0,4863	

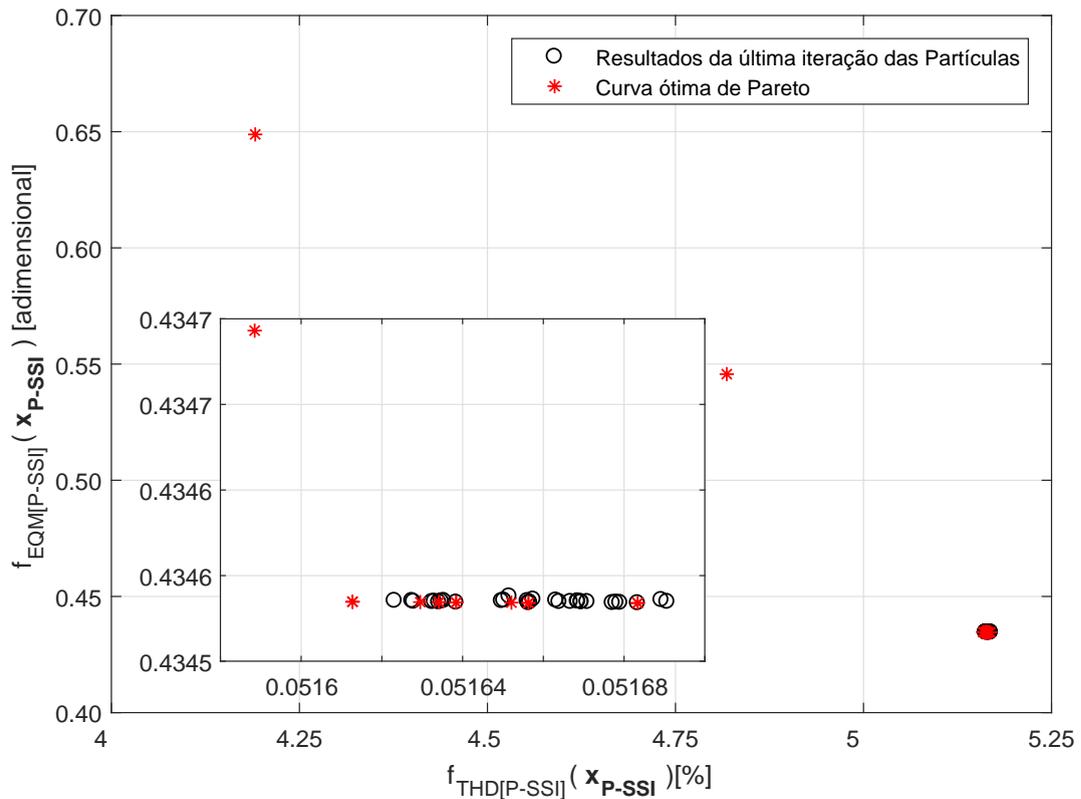
Uma análise da distribuição dos pontos nesses gráficos leva a uma conclusão similar à obtida para os gráficos das execuções 1 a 4. Nos 2 primeiros a curva ótima de Pareto

FIGURA 5.7: Gráfico de Pareto obtido da execução 6 (algoritmo 2, MOABC, PI-SRF)



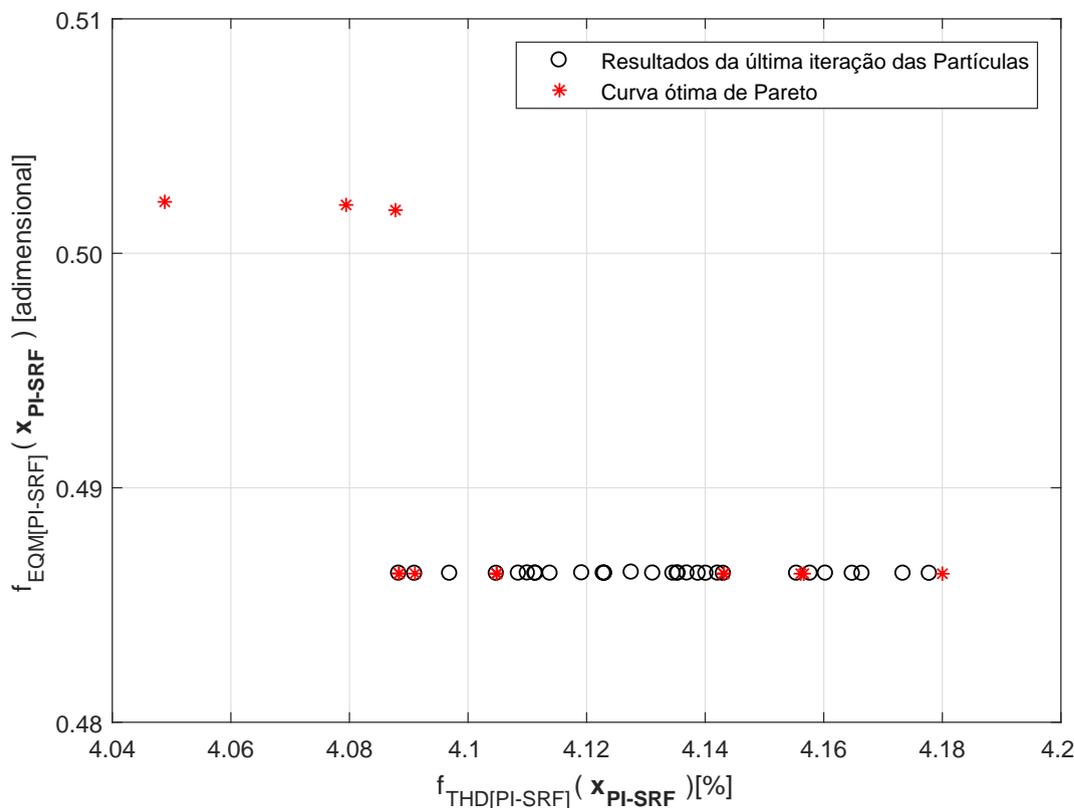
Fonte: O autor

FIGURA 5.8: Gráfico de Pareto obtido da execução 7 (algoritmo 3, MOABC, P-SSI)



Fonte: O autor

FIGURA 5.9: Gráfico de Pareto obtido da execução 8 (algoritmo 4, MOABC, PI-SRF)



Fonte: O autor

possui um formato convexo, enquanto nos gráficos das Figuras 5.8 e 5.9 as curvas ótimas foram um desenho diferente, com vários pontos agrupados e alguns pontos se destacando dos demais no canto superior esquerdo, apresentando portanto menor THD e maior EQM. Analogamente à análise feita na seção 5.1, esses pontos soltos devem-se à característica da metaheurística MOABC, que busca pontos aleatórios durante a execução dos algoritmos. Adicionalmente, pode-se observar na figura 5.6 que alguns pontos dominantes não constam como pontos da curva ótima de Pareto. Esse fato ocorre devido à limitação do número de pontos da curva, que neste trabalho foi de 15. Quando há o acréscimo de mais pontos, outros são retirados aleatoriamente do repositório.

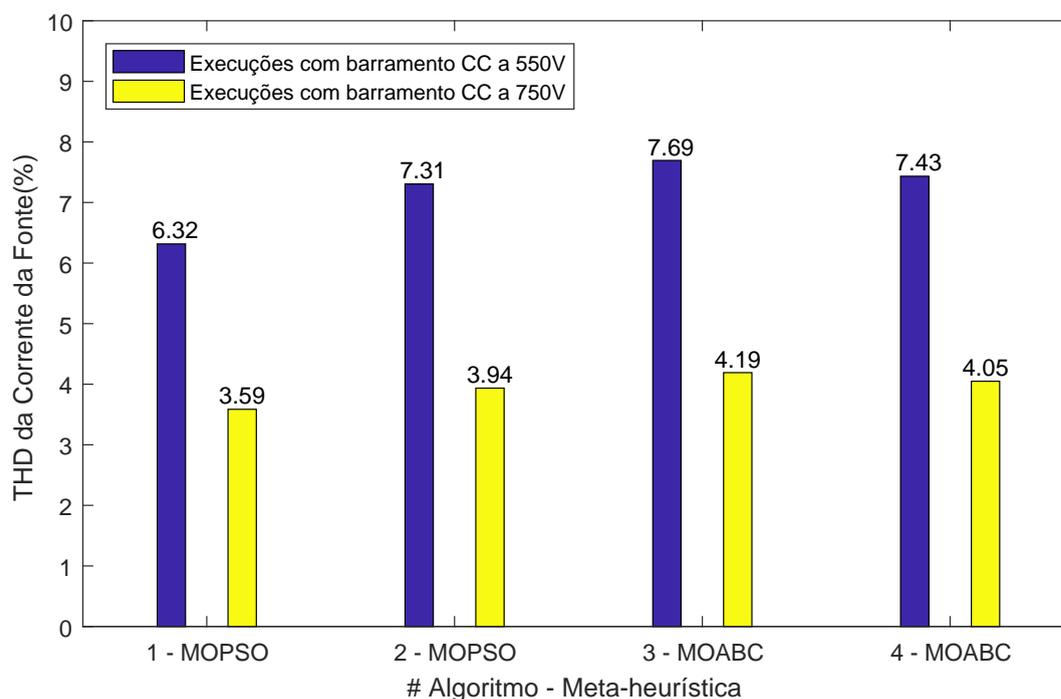
Em relação aos resultados listados na Tabela 5.2, o melhor resultado para o THD foi obtido pelo ponto THD-ÓTIMO do algoritmo 1, com um valor de THD para as 4 cargas em conjunto de 3,58%. Além disso, como aconteceu para os algoritmos executados com tensão de 550V, esse ponto não apresentou o maior valor de EQM, revelando-se uma boa solução para os dois objetivos propostos. Até mesmo comparando seus resultados com o algoritmo 3, que também utilizou a estratégia de controle P-SSI, pode-se verificar que o

algoritmo 1 apresentou melhores resultados tanto para o THD quanto para o EQM.

5.3 Análise dos Algoritmos de Otimização

Os algoritmos de otimização utilizados neste trabalho e descritos no Capítulo 3 utilizam metaheurísticas multi-objetivo e são designados a minimizar 2 funções objetivo: o THD da corrente da fonte e o EQM da tensão do barramento CC de um filtro ativo de potência paralelo por meio da variação dos parâmetros das malhas de controle desse filtro ativo. Nesta seção, será feita uma breve análise do desempenho dos algoritmos. Para isso, serão utilizados os gráficos das Figuras 5.10 e 5.11. No primeiro gráfico, são exibidos os resultados de THD para os pontos THD-ÓTIMOS obtidos por cada algoritmo, enquanto no gráfico da Figura 5.11 são exibidos os valores de EQM dos pontos EQM-ÓTIMOS dos mesmos algoritmos. Vale ressaltar que os valores do EQM nesta seção serão tratados por seus valores absolutos, para permitir uma comparação entre diferentes tensões utilizadas.

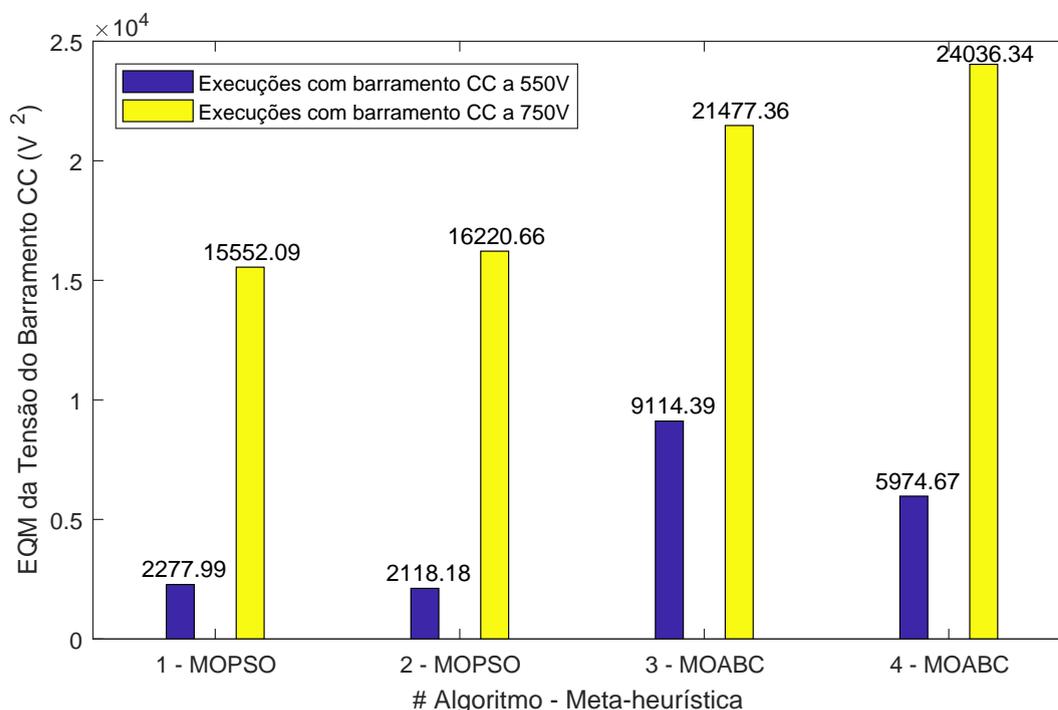
FIGURA 5.10: THD da Corrente da Fonte para as soluções THD-ÓTIMO



Fonte: O autor

Com esses gráficos, busca-se efetuar uma análise do quanto determinado algoritmo foi capaz de obter os menores valores possíveis. Obviamente, para poder fazer uma comparação

FIGURA 5.11: EQM da Tensão no Barramento CC para as soluções EQM-ÓTIMO



Fonte: O autor

do desempenho dos algoritmos e conseqüentemente das metaheurísticas utilizadas, deve-se tomar os resultados dos algoritmos 1 e 3 e dos algoritmos 2 e 4 separadamente, para cada nível de tensão no barramento CC. Dessa forma, é feita uma análise entre sistemas idênticos, cuja única diferença é a metaheurística de otimização utilizada. Para auxiliar essa análise, será utilizada a Tabela 5.3, onde todos os casos que utilizam uma mesma tensão sobre o capacitor e a mesma técnica de controle são agrupados para indicar qual algoritmo de otimização apresenta o melhor resultado.

Nessa tabela, é possível verificar que os algoritmos que utilizaram a MOPSO são superiores em todas as execuções realizadas para todos os objetivos otimizados. Essa característica fica evidenciada também quando se observam os valores do EQM dos pontos THD-ÓTIMOS e os valores do THD dos pontos EQM-ÓTIMOS, nas Tabelas 5.1 e 5.2. Esses pontos assumem valores muito mais altos nos algoritmos que utilizaram o MOPSO em comparação com os algoritmos que utilizaram MOABC. Isso demonstra que os algoritmos que utilizaram MOPSO tiveram a capacidade de atuar em uma faixa maior de valores, possibilitando obter desde os melhores até os piores valores para ambas as funções objetivo.

TABELA 5.3: Comparação do desempenho das metaheurísticas de otimização para cada técnica de controle e tensão de operação

Tensão	Método de Controle	Solução	Meta-heurística	Valor	Melhor Resultado	% Superior
550V	P-SSI (Algoritmos 1 e 3)	THD-ÓTIMO	MOPSO	6,32%	MOPSO	17,82%
			MOABC	7,69%		
		EQM-ÓTIMO	MOPSO	2278,00	MOPSO	75,00%
	MOABC		9114,39			
	MOPSO		7,31%	MOPSO		
	MOABC	7,43%				
750V	P-SSI (Algoritmos 1 e 3)	THD-ÓTIMO	MOPSO	3,59%	MOPSO	14,32%
			MOABC	4,19%		
		EQM-ÓTIMO	MOPSO	15552,09	MOPSO	27,59%
	MOABC		21477,36			
	MOPSO		3,94%	MOPSO		
	MOABC	4,05%				
EQM-ÓTIMO	PI-SRF (Algoritmos 2 e 4)	MOPSO	16220,66	MOPSO	32,51%	
		MOABC	24036,34			
		MOPSO	2118,18			
MOABC	5974,67					

Outro ponto que merece destaque diz respeito ao tempo computacional. Nas Tabelas 5.1 e 5.2, na última coluna são informados os tempos computacionais demandados pelos algoritmos. Analisando esses valores, percebe-se que, para todos os casos, a metaheurística MOPSO demandou tempos em média 40% menores, chegando no caso mais extremo a um tempo 50% menor, quando comparada a execução 5 com a execução 7. Essa superioridade reforça ainda mais prevalência da metaheurística MOPSO em relação à MOABC.

Essa grande vantagem da metaheurística MOPSO corrobora, em parte, com os resultados obtidos em trabalhos que fizeram a otimização mono-objetivo de FAPPs. Em Gowtham e Shankar (2016), foi comparado o desempenho das metaheurísticas algoritmo genético(GA) e PSO para a otimização dos parâmetros dos controladores de um FAPP tomando como função objetivo apenas o THD da corrente da fonte, onde o resultado foi uma superioridade da PSO sobre a GA. Já em Yamarthi, Rao e Reddy (2016), foi feita uma comparação entre as metaheurísticas ABC e GA em um problema similar que, entretanto, utilizou a tensão no capacitor em um esquema de controle indireto como função objetivo, resultando em uma superioridade da ABC sobre a GA. Entretanto, não foi encontrado nenhum trabalho que compare as metaheurísticas mono-objetivo PSO e ABC nem as metaheurísticas multi-objetivo MOPSO e MOABC, não sendo possível estabelecer parâmetros de comparação já obtidos por outros autores.

5.4 Análise das Técnicas de Controle

A análise do desempenho das técnicas de controle é um pouco mais complexa que a análise dos algoritmos de otimização. Isso porque o desempenho dos algoritmos de otimização possui um caráter aleatório, ou seja, o mesmo algoritmo, quando executado mais de uma vez, mesmo utilizando todos os parâmetros idênticos, pode levar a resultados diferentes. Dessa forma, ao tomar duas técnicas de controle e considerar os melhores resultados de um mesmo algoritmo de otimização aplicado a ambas, não se pode afirmar que aqueles resultados sejam os melhores possíveis. Isso ocorre porque a técnica de controle que apresentou pior desempenho pode ainda ter um conjunto de parâmetros melhor mas não testado pelo algoritmo executado. Em outras palavras, o algoritmo de otimização pode ter caído em um mínimo local, não tendo sido capaz de encontrar o valor mínimo global para aquele sistema.

Feita essa ressalva, entretanto, mesmo que não seja possível tomar os resultados dos algoritmos de otimização como ótimos globais, a análise das técnicas de controle se valerá desses resultados. Na Tabela 5.4 são tabulados os valores de THD para os pontos THD-ÓTIMO obtidos pelos algoritmos de controle.

TABELA 5.4: Valores de THD e EQM mínimos obtidos pelos algoritmos 1 a 4

Tensão	Metaheurística	Solução	Técnica de Controle	Valor THD	Melhor Resultado	% Superior
550V	MOPSO	THD-ÓTIMO	P-SSI	6,32%	P-SSI	13,54%
			PI-SRF	7,31%		
	MOABC	THD-ÓTIMO	P-SSI	7,69%	PI-SRF	3,38%
			PI-SRF	7,43%		
750V	MOPSO	THD-ÓTIMO	P-SSI	3,59%	P-SSI	8,88%
			PI-SRF	3,94%		
	MOABC	THD-ÓTIMO	P-SSI	4,19%	PI-SRF	3,34%
			PI-SRF	4,05%		

Nessa tabela, pode-se verificar que os resultados dos algoritmos que utilizaram a técnica de controle P-SSI foram menores do que os dos algoritmos que utilizaram a técnica PI-SRF em 2 dos 4 casos. Nesses 2 casos onde a técnica P-SSI foi superior, percebe-se que a superioridade obtida foi maior (13,54% e 8,88%), enquanto os casos em que a técnica PI-SRF foi melhor, a superioridade foi mais baixa (3,38% e 3,34%). Além disso,

quando são comparadas todas as execuções que utilizaram 550V, independente da meta-heurística de otimização utilizada, a técnica P-SSI otimizada pela MOPSO supera todos os demais resultados. O mesmo se aplica para as execuções feitas com 750V de tensão do barramento. Tais resultados indicam uma leve superioridade da técnica P-SSI em relação à técnica PI-SRF considerando-se apenas o desempenho.

Entretanto, a utilização da técnica P-SSI, envolve a utilização de mais de um controlador e, portanto, possui maior complexidade. Essa complexidade, quando imposta a algoritmos de otimização, como foi o caso neste trabalho, implica em maiores tempos computacionais. Esse aumento dos tempos computacionais, ocasionado pela utilização da técnica de controle P-SSI, fica claro ao se analisar a Tabela 5.3. Nessa tabela, é possível verificar que os tempos computacionais dos algoritmos que otimizaram os parâmetros de controladores P-SSI tiveram o tempo computacional aumentado em mais de 100% quando comparados com os algoritmos que utilizaram a mesma meta-heurística e a mesma tensão.

Ademais, para comparação dos resultados obtidos com trabalhos desenvolvidos por outros autores, os melhores resultados das técnicas PI-SRF e P-SSI para cada nível de tensão serão "abertos", ou seja, serão exibidos os valores de THD da corrente da carga obtido para cada uma das cargas. Esses dados são exibidos na Tabela 5.5

TABELA 5.5: Valores de THD obtido pelas melhores soluções para cada carga individualmente

Tensão	Técnica de Controle	THD Carga 1	THD Carga 2	THD Carga 3	THD Carga 4
550V	P-SSI	2,88%	1,21%	1,25%	0,97%
550V	PI-SRF	2,21%	1,61%	1,61%	1,87%
750V	P-SSI	1,24%	0,58%	0,77%	0,99%
750V	PI-SRF	1,25%	0,88%	1,19%	0,60%

Na literatura, foram verificados trabalhos onde foi feita a compensação de harmônicos para comparação com os resultados aqui obtidos. Em Gowtham e Shankar (2016), é feita uma simulação de FAPP utilizando o método de controle IPT (*Instantaneous Power Theory*), onde as correntes de compensação são obtidas por meio da teoria p-q, desenvolvida por Akagi, Kanazawa e Nabae (1984). Naquele trabalho, os parâmetros dos controladores do FAPP são otimizados por 2 otimizadores: GA e PSO. O THD da carga utilizada não foi

informado e a tensão do capacitor utilizada foi de 550V. Como resultado, o autor apresenta um THD da corrente da fonte de 4,75% obtido por um algoritmo utilizando PSO.

Em Lascu et al. (2009), os autores realizam a implementação prática de um FAPP utilizando diferentes técnicas de controle. O THD da carga utilizada é de 29%, valor próximo ao THD da Carga 1 utilizada neste trabalho, e a tensão no capacitor foi de 700V. Utilizando a técnica P-SSI, os autores reportam que o THD na corrente da fonte foi de 2,8%. Os parâmetros dos controladores utilizados no referido trabalho não foram otimizados e foram iguais para todos os harmônicos.

Já em Bojoi et al. (2009), os autores comparam o desempenho de diversos controladores de corrente implementados em um FAPP físico. O valor do THD da carga não é informado, enquanto a tensão do capacitor utilizada é de 730V. O resultado obtido para a técnica P-SSI foi de 2,59%.

5.5 Aplicação da técnica *gain scheduling*

Após a otimização dos parâmetros dos controladores do FAPP, os melhores resultados obtidos foram utilizados para a aplicação da técnica de *gain scheduling*. Essa técnica consiste no carregamento dos parâmetros ótimos do controlador para um espaço de memória disponível para a utilização pelos controladores, que o fazem de acordo com a variação de um determinado parâmetro ou grandeza do sistema. No presente caso, a variável que determinará qual conjunto de parâmetros deve ser utilizado é o THD da carga, que deve ser constantemente monitorado pelo sistema.

Entretanto, como já mencionado no Capítulo 3, no caso da otimização multi-objetivo, os algoritmos não entregam ao usuário uma única solução ótima, mas sim um conjunto de soluções ótimas. Dessa forma, cabe ao usuário a escolha de qual dos pontos desse conjunto será utilizado.

Neste trabalho, foram utilizadas como funções objetivo para os algoritmos de otimização duas variáveis: THD da corrente da fonte e EQM da tensão do barramento CC, sendo que a primeira constitui uma variável de maior interesse ao usuário de um FAPP, já que esse valor diz respeito ao objetivo do próprio filtro. Já a tensão do barramento CC possui

um caráter secundário ou acessório, ou seja, é importante manter seu valor dentro de uma faixa operacional adequada para o correto funcionamento do filtro. Entretanto, um melhor ou pior desempenho no controle dessa tensão não implica necessariamente em um melhor ou pior desempenho do filtro.

Dessa forma, o critério de escolha dos pontos que serão testados com a técnica de *gain scheduling* é o menor THD. Após a simulação do *gain scheduling*, será analisada a tensão do barramento CC do FAPP. Baseado nesse critério, os pontos utilizados foram o THD-ÓTIMO da execução 1 para a tensão de 550V e o ponto THD-ÓTIMO da execução 5 para a tensão de 750V. Ambos os pontos escolhidos utilizam a técnica de controle P-SSI e foram otimizados por algoritmos que utilizaram meta-heurística MOPSO.

Após a simulação desses pontos, caso haja uma variação de tensão muito grande, esse ponto poderá ser descartado e escolhido um novo ponto, com maior THD porém um menor EQM, ou seja, um conjunto de parâmetros que, mesmo não compensando tão bem as correntes harmônicas, consegue manter de forma mais satisfatória a tensão do barramento CC, garantindo o bom funcionamento do FAPP.

Como já mencionado no Capítulo 4, as cargas que serão utilizadas para a aplicação da técnica de *gain scheduling* são diferentes daquelas utilizadas para otimização e seus valores estão listados na Tabela 4.4.

Após a execução da simulação utilizando a técnica de *gain scheduling*, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.6

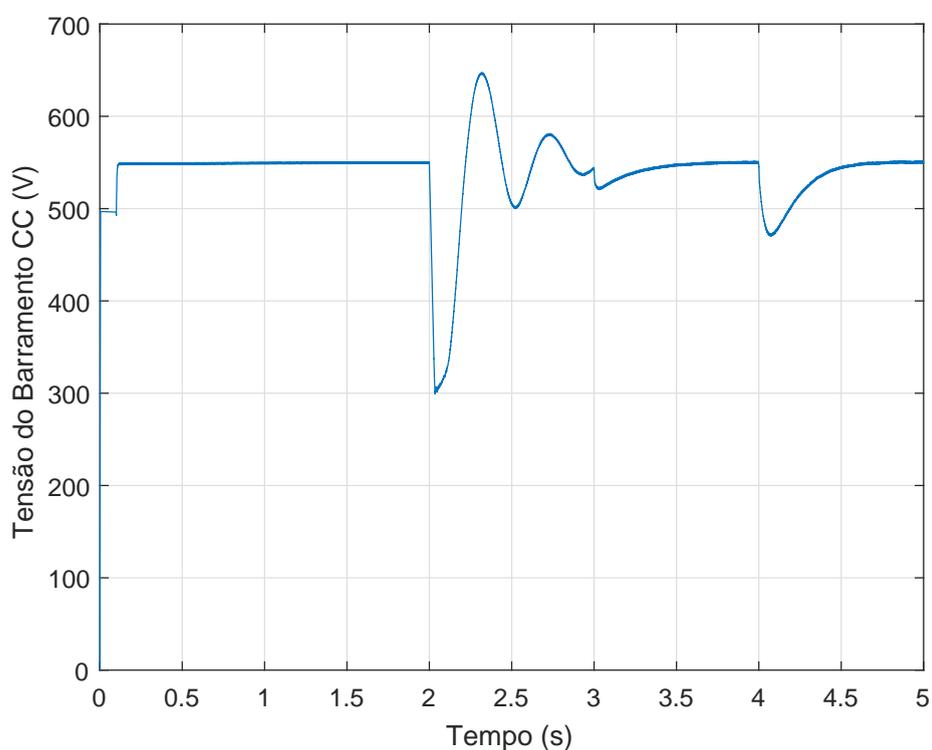
TABELA 5.6: Valores de THD e EQM obtidos após a aplicação do *gain scheduling* com as soluções THD-ÓTIMO do algoritmo 1 nas execuções 1 e 5

# Execução	# Algoritmo	Solução Analisada	THD da Carga	THD da Fonte	EQM
Execução 1	Algoritmo 1	THD-ÓTIMO	20,19%	1,25%	2095,42
Execução 5	Algoritmo 1	THD-ÓTIMO	20,19%	1,00%	1620,97

Analisando a Tabela 5.6, verifica-se, como já era esperado, que com a tensão do barramento CC setada em 750V, o FAPP consegue um desempenho operacional melhor, ou seja, consegue um menor valor de THD da corrente da fonte. Entretanto, chama a atenção o fato de que o EQM com o filtro utilizando uma tensão de 550V foi maior do que quando

utilizando uma tensão de 750V. Assim, conforme já mencionado, deve-se verificar a tensão no barramento CC durante a simulação de *gain scheduling*. Nas Figuras 5.12 e 5.13 são mostrados os gráficos da tensão do barramento CC para a simulação de *gain scheduling* com os pontos da Execução 1 e com os pontos da Execução 5, respectivamente.

FIGURA 5.12: Gráfico da tensão do barramento CC para a simulação de *gain scheduling* com a solução THD-ÓTIMO da execução 1

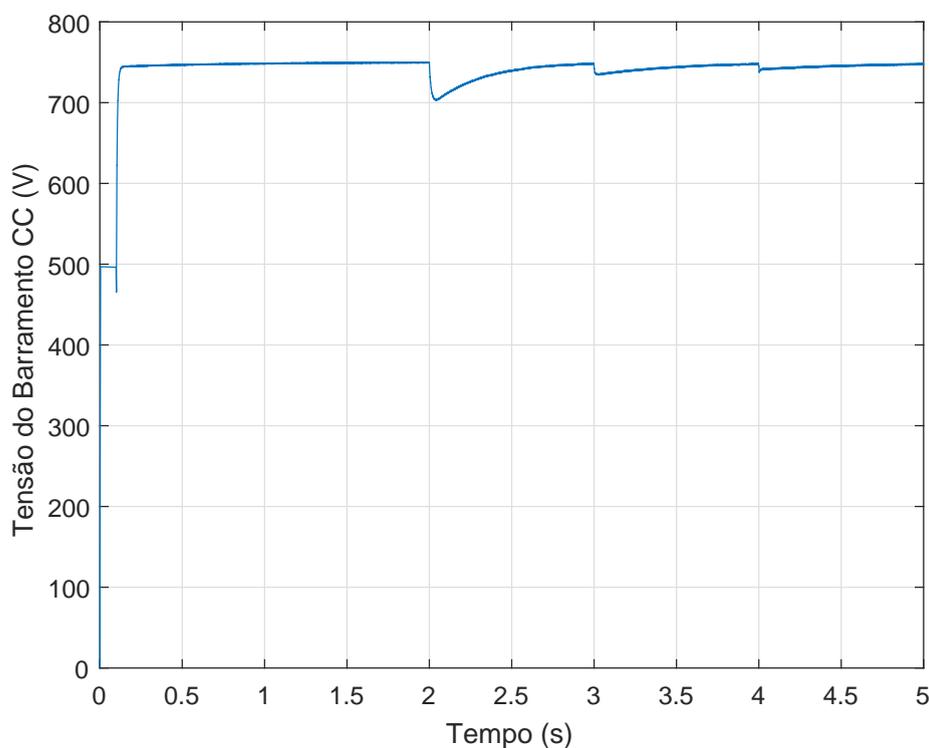


Fonte: O autor

Nesse gráfico, é possível observar que no instante $t=2s$, após a mudança da carga 1 para a carga 2, os parâmetros utilizados para o controle da tensão no barramento CC entregam uma resposta sub-amortecida, provocando uma grande oscilação da tensão do barramento, o que não configura como o comportamento esperado para esse elemento.

Dessa forma, recorre-se à Figura 5.5, onde são delimitados dois conjuntos dentro do conjunto ótimo de Pareto: os que possuem melhores THD e os que possuem melhores EQM. Da Figura 5.1, é possível observar que a diferença do THD entre os pontos que possuem os melhores THDs é baixa, já que nesse gráfico esses pontos não estão muito distantes um do outro em relação ao eixo das abcissas. Assim sendo, será tomado um ponto intermediário que esteja dentro do conjunto de melhores THDs, porém, que apresente um valor de EQM significativamente menor. Esse ponto é o indicado na Figura 5.14 e será

FIGURA 5.13: Gráfico da tensão do barramento CC para a simulação de *gain scheduling* com a solução THD-ÓTIMO da execução 5



Fonte: O autor

chamado de ponto intermediário. Esse ponto representa um THD = 7,60% e um EQM = 7904,79.

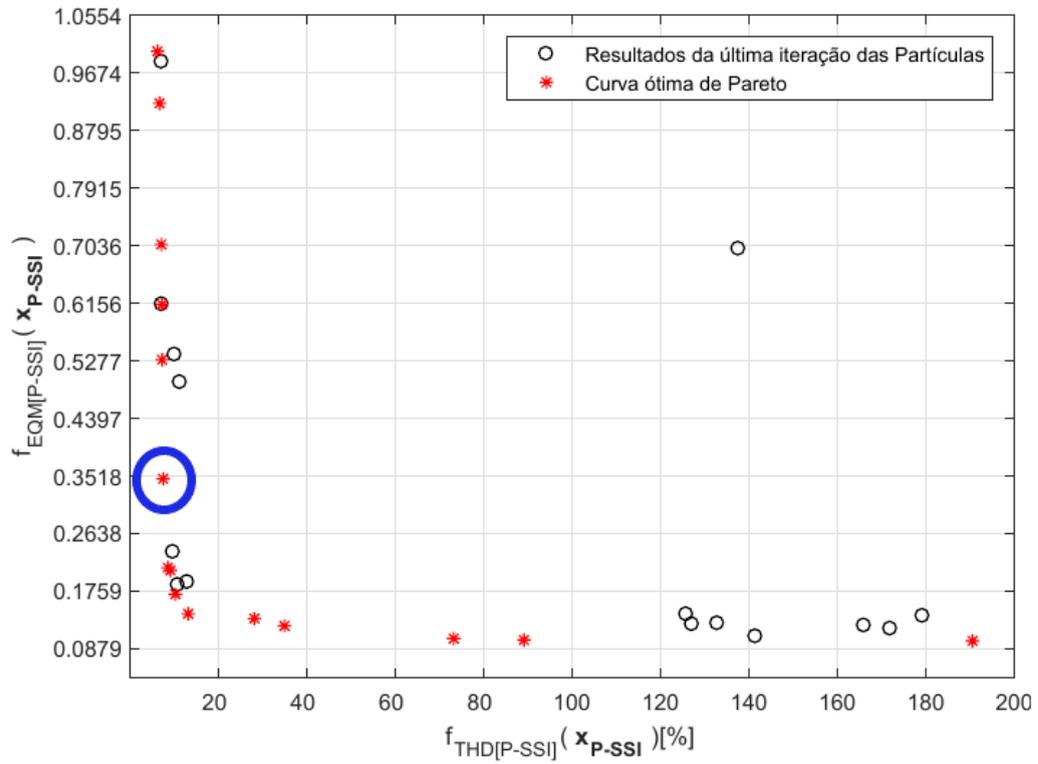
Após a nova simulação, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.7. Pela tabela, é possível verificar que esse ponto, apesar de um THD ligeiramente maior, apresentou um EQM consideravelmente menor. O gráfico da tensão no barramento CC, que poderá confirmar o bom desempenho do controle de tensão desse conjunto de parâmetros é exibido na Figura 5.15.

TABELA 5.7: Valores de THD e EQM obtidos após a aplicação do *gain scheduling* com as soluções THD-ÓTIMO do algoritmo 1 nas execuções 1 e 5

# Execução	# Algoritmo	Solução Analisada	THD	EQM
Execução 1	Algoritmo 1	Intermediário	1,59%	369,63
Execução 5	Algoritmo 1	THD-ÓTIMO	1,00%	1620,97

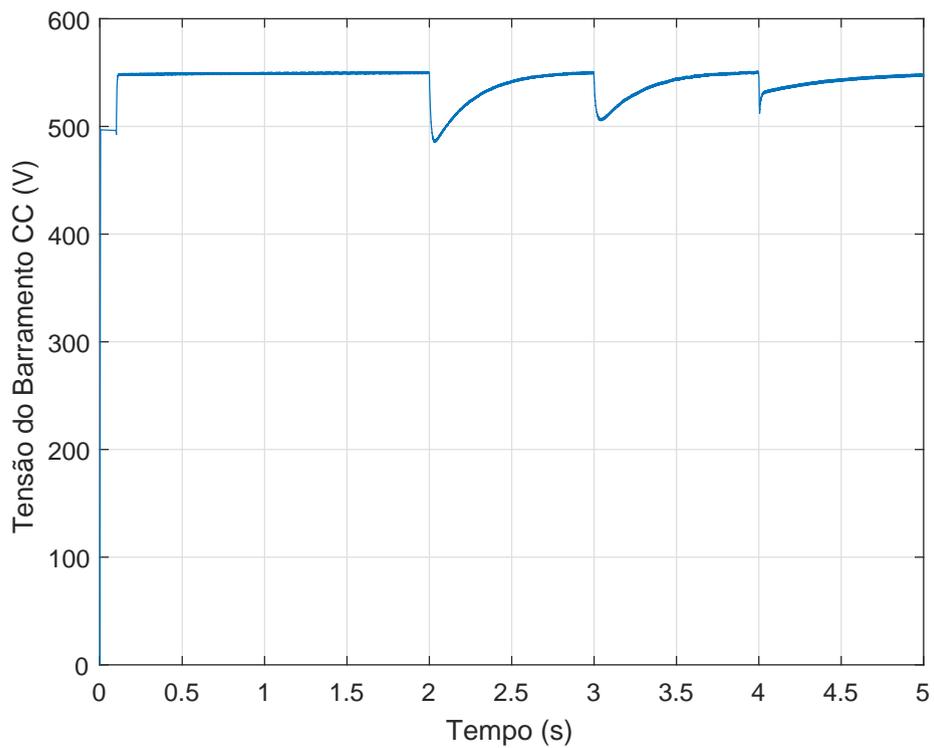
Para evidenciar a eficácia da operação do FAPP, a seguir são apresentadas algumas figuras dos resultados obtidos com a execução do *gain scheduling*. Na Figura 5.16 é mostrado um

FIGURA 5.14: Ponto intermediário utilizado para a nova simulação do *gain scheduling*



Fonte: O autor

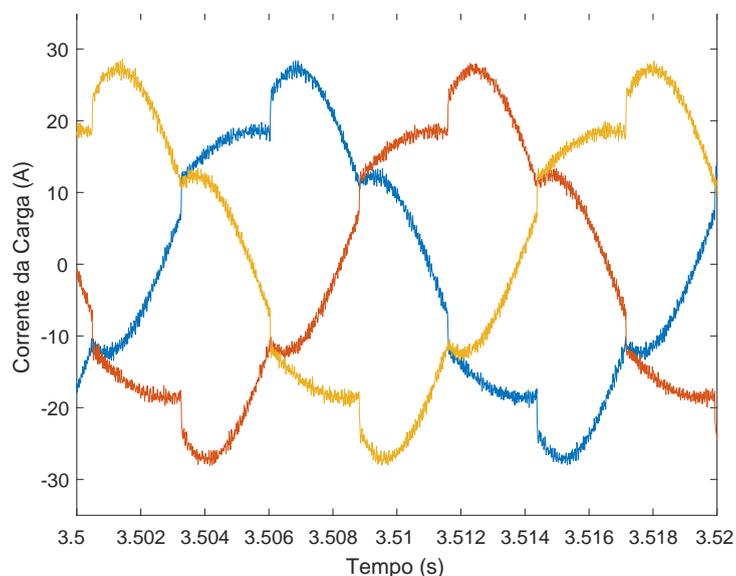
FIGURA 5.15: Gráfico da tensão do barramento CC para a simulação de *gain scheduling* com a solução intermediária da execução 1



Fonte: O autor

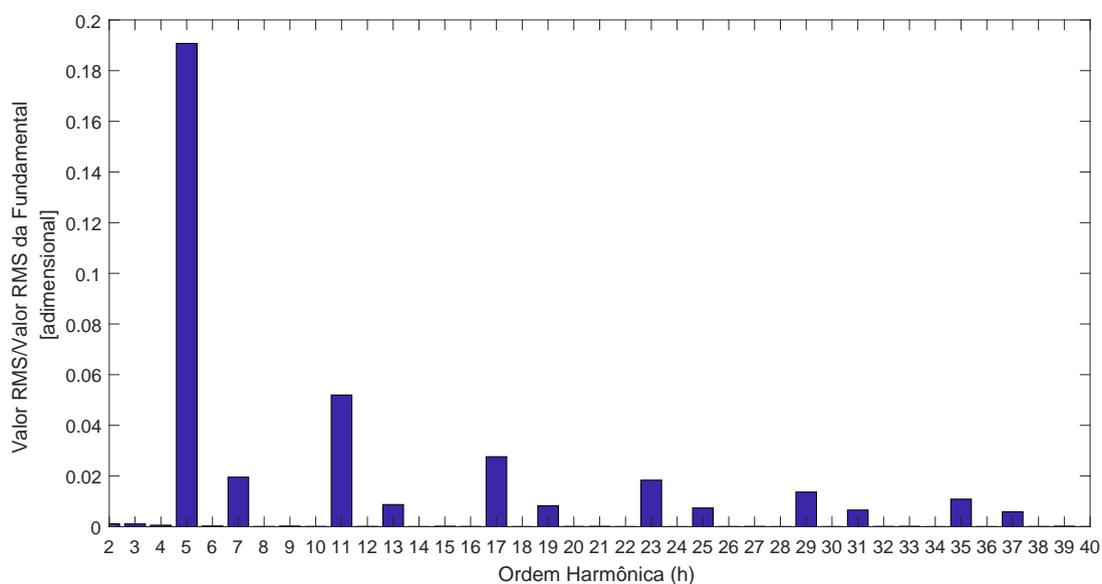
trecho da forma de onda da corrente na carga e na 5.17 é exibido o gráfico da transformada discreta de Fourier dessa corrente. Já na Figura 5.18 é exibida a corrente da fonte com FAPP utilizando os parâmetros da Execução 5 no mesmo intervalo que a corrente da carga anteriormente exibida, enquanto na Figura 5.19 é apresentado o gráfico da transformada de Fourier da corrente da fonte.

FIGURA 5.16: Gráfico com a forma de onda da corrente da carga utilizada na simulação de *gain scheduling*



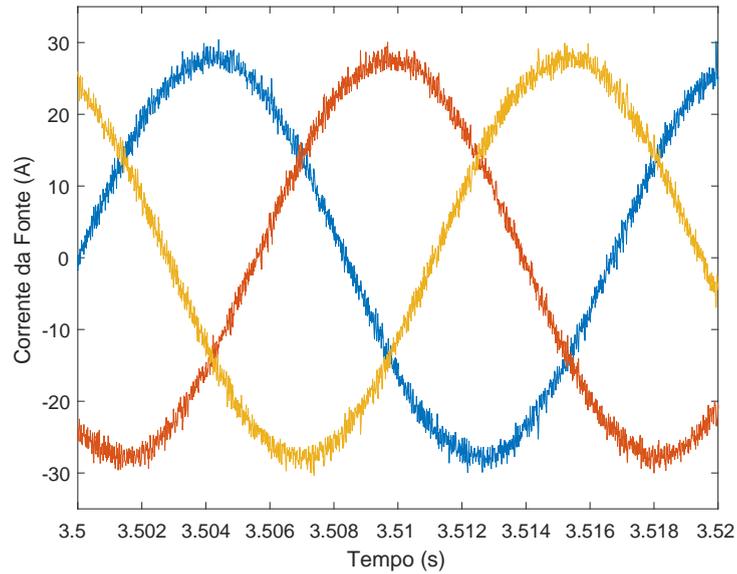
Fonte: O autor

FIGURA 5.17: Gráfico da Transformada de Fourier Discreta da corrente da carga utilizada na simulação de *gain scheduling*



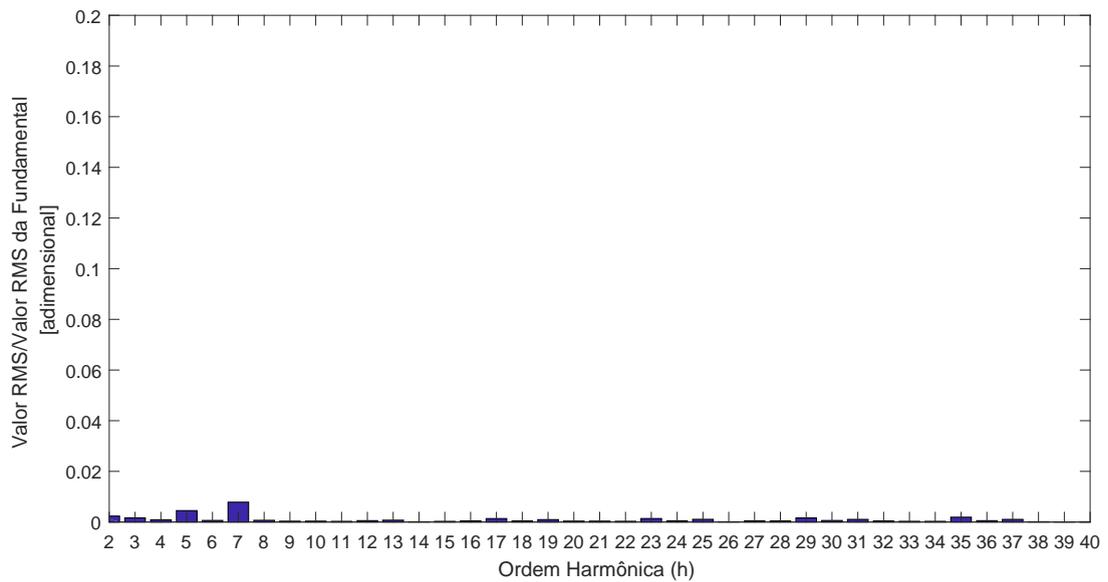
Fonte: O autor

FIGURA 5.18: Gráfico com a forma de onda da corrente da fonte após compensação com FAPP utilizando os parâmetros THD-ÓTIMO da Execução 5



Fonte: O autor

FIGURA 5.19: Gráfico da Transformada de Fourier Discreta da corrente da fonte após compensação com FAPP utilizando os parâmetros THD-ÓTIMO da Execução 5



Fonte: O autor

6 Conclusões

A partir dos resultados apresentados no Capítulo 5, é possível extrair algumas conclusões acerca das técnicas utilizadas neste trabalho, que serão expostas a seguir divididos entre os principais tópicos, sendo nominalmente: técnicas de controle P-SSI e PI-SRF aplicada ao controle de corrente de Filtros Ativos Paralelos de Potência; meta-heurísticas de otimização MOPSO e MOABC para a otimização dos parâmetros desses controladores; aplicação da estratégia de *gain scheduling* para a operação de Filtros Ativos de Potência.

6.1 Técnicas de Controle P-SSI e PI-SRF aplicadas ao controle de corrente de Filtros Ativos de Potência Paralelos

Os resultados obtidos evidenciam uma ligeira superioridade da técnica de controle P-SSI sobre a técnica de controle PI-SRF, já que a primeira obteve os melhores resultados dentre todas as execuções tanto para a tensão de 550V quanto para a tensão de 750V. A técnica PI-SRF, por sua vez, superou a técnica P-SSI quando foram utilizados os algoritmos ABC para otimização dos parâmetros de ambas as estratégias de controle. Porém, nesses casos os valores obtidos pelas duas técnicas foram muito próximos, o que sugere que a técnica PI-SRF não teve facilidade em superar a técnica P-SSI.

Esses resultados contrariam parcialmente a hipótese levantada por alguns autores, como Bojoi et al. (2009), Ghetti et al. (2010) e Yuan et al. (2002) de que a técnica P-SSI, bem como outras técnicas harmônico-seletivas, seja superior à tradicional técnica PI-SRF. Isso porque os resultados obtidos mostram que as técnicas de controle de corrente são fortemente dependentes de seus parâmetros e que mesmo técnicas de controle mais "evoluídas", como a técnica P-SSI, necessitam ter seus parâmetros otimizados para apresentar uma boa resposta.

Além disso, não foram encontrados na literatura trabalhos que façam a comparação entre a técnica de controle PI-SRF e técnicas de controle harmônico-seletivas. Há, sim, muitos trabalhos comparando as diversas técnicas de controle harmônico-seletivas já desenvolvidas. Entretanto, este trabalho mostrou que em algumas situações, a utilização de uma quantidade de parâmetros menor em troca de um desempenho um pouco pior pode ser

uma troca vantajosa ao evidenciar que os tempos computacionais para a otimização dos parâmetros de controladores harmônico-seletivos é maior que 100% maior em todos os casos analisados.

Sobre o desempenho do FAPP de forma geral, comparando os resultados obtidos com os resultados de outros autores, o FAPP aqui dimensionado e simulado apresentou melhores resultados. Entretanto, é necessário aperfeiçoar o sistema e aprofundar as análises para dizer que o sistema é de fato melhor que algum outro apresentado na literatura. O aperfeiçoamento passa primeiramente pela discretização do sistema de controle e posteriormente pela implementação do sistema em um dispositivo físico, para que sejam verificadas possíveis limitações práticas que não foram relatadas em outros trabalhos e, portanto, não foram aqui observadas. Só assim será possível estabelecer um parâmetro de comparação mais plausível.

6.2 Meta-heurísticas de otimização MOPSO e MOABC para a otimização dos parâmetros desses controladores

A respeito das meta-heurísticas utilizadas pelos algoritmos de otimização, fica evidente pelos resultados apresentados que os algoritmos que utilizaram a meta-heurística MOPSO apresentaram superioridade sobre os algoritmos que utilizaram a MOABC em todos os quesitos analisados, sejam eles: otimalidade dos pontos THD-ÓTIMO, otimalidade dos pontos EQM-ÓTIMO e tempo computacional.

Este último quesito representa grande relevância para o trabalho, uma vez que as diferenças de tempo computacionais, em torno de 40% menores para os algoritmos que utilizaram a meta-heurística MOPSO, não implicou em melhora na obtenção de melhores soluções para o problema pelos algoritmos MOABC, que demandaram um tempo maior.

Tendo em vista a operação de Filtros Ativos de Potência, os resultados obtidos para o THD da corrente da fonte neste trabalho indicam que o emprego dos otimizadores aqui utilizados são uma boa alternativa para melhorar o desempenho dos FAPP. Entretanto, como já mencionado, são necessários aperfeiçoamentos no modelo para que possa se afirmar que há alguma superioridade sobre outros modelos utilizados na literatura.

Ademais, a utilização de técnica de penalização para a sobremodulação constitui um assunto não explorado na literatura e, portanto, uma contribuição deste trabalho para o estudo dos controladores de corrente de Inversores PWM em geral. Essa penalização se mostrou muito importante no processo de otimização por impedir que os algoritmos de otimização elencassem como ótimos alguns parâmetros que sobremodulam o sistema, o que constitui uma situação operacional indesejada.

6.3 Aplicação da estratégia de *gain scheduling* para a operação de Filtros Ativos de Potência.

Outra importante conclusão deste trabalho diz respeito à utilização da técnica de *gain scheduling*. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a utilização de parâmetros previamente otimizados e armazenados em um banco de memória que é acessado de acordo com o THD da carga é capaz de realizar a compensação de harmônicos de forma satisfatória, mesmo utilizando cargas com THD distinto e forma de onda distinta.

Entretanto, a utilização dessa técnica em situações práticas requer uma comparação com estratégias de controle *on-line*, ou seja, que sejam realizadas durante a operação do filtro e possa obter valores ótimos para qualquer carga. Além disso, para uma possível implementação prática, a estratégia de *gain scheduling* pode se valer de intervalos de THD melhores, tendo assim maiores possibilidades de oferecer resultados ótimos para qualquer valor de THD.

Referências Bibliográficas

- AKAGI, H. New trends in active filters for power conditioning. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 32, n. 6, p. 1312–1322, 1996. ISSN 0093-9994.
- AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20, n. 3, p. 625–630, 1984. ISSN 19399367.
- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Piscataway, USA: IEEE Press, 2007. 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.
- ANEEL. *Prodist - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica . Revisão 8*. Brasília: ANEEL, 2017. 90 p.
- ASIMINOAEI, L. et al. New Current Control Structure for Shunt Active Power Filters. v. 00, n. c, p. 183–190, 2006.
- AZEVEDO, C. C. D. *Controle Adaptativo Robusto para Filtros Ativos de Potência Paralelo*. 2011.
- BAGGINI, A. *Handbook of Power Quality*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2008. 618 p. ISBN 978-0-470-06561-7.
- BOJOI, R. et al. Analysis of current controllers for active power filters using selective harmonic compensation schemes. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, v. 4, n. 2, p. 139–157, 2009. ISSN 19314981.
- BOJOI, R. I. et al. Current Control Strategy for Power Conditioners Using Sinusoidal Signal Integrators in Synchronous Reference Frame. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, v. 6, n. 6, p. 4623–4629, 2004. ISSN 02759306.
- BOJRUP, M. et al. Multiple rotating integrator controller for active filters. In: *EPE 99 Conference Proceedings*. Lausanne, Switzerland: EPE Association, 1999.
- BUSO, S.; MALESANI, L.; MATTAVELLI, P. Comparison of current control techniques for active filter applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 45, n. 5, p. 722–729, 1998. ISSN 0278-0046.
- CHAOUI, A. et al. On the design of shunt active filter for improving power quality. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 31–37, 2008.
- DANNEHL, J.; FUCHS, F. W.; HANSEN, S. PWM Rectifier with LCL-Filter using different Current Control Structures. In: *European Conference on Power Electronics and Applications*. Aalborg, Denmark: IEEE, 2007. p. 1–10. ISBN 978-92-75815-10-8.
- DAS, J. C. *Power System Harmonics and Passive Filters Design*. Piscataway, USA: John Wiley & Sons, 2015. 844 p. ISBN 9781118861622.

- DEB, K. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. West Sussex, England: John Wiley & sons, LTD, 2001. 497 p. ISSN 1089-778X. ISBN 047187339X.
- DEMIRDELEN, T.; KAYAALP, R. I.; TÜMAY, M. T. PSO-PI Based DC Link Voltage Control Technique for Shunt Hybrid Active Power Filter. In: *2nd International Conference on Systems Informatics, Modelling and Simulation*. Riga, Letônia: [s.n.], 2016. p. 97–102. ISBN 9781509026937.
- GHETTI, F. T. et al. Estudo Comparativo de Técnicas de Controle de Corrente Aplicadas a Filtros Ativos Shunt. In: *XVII Congresso Brasileiro de Automática*. Bonito, MS: SBA, 2010. p. 3701–3708.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of Metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. 557 p. ISBN 1402072635.
- GOWTHAM, N.; SHANKAR, S. PI tuning of Shunt Active Filter using GA and PSO algorithm. *2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, n. Aeeicb 16, p. 207–213, 2016.
- HANSEN, D. J. PacifiCorp's Perspective on Using IEEE 519. In: *2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. Dallas, USA: IEEE, 2006. p. 1–3.
- IEC . *Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*. Geneva, Switzerland: IEC, 2018.
- IEEE. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York, USA: IEEE, 2014.
- KARABOGA, D. An idea based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. *Technical Report TR06, Erciyes University*, n. TR06, p. 10, 2005. ISSN 01406736.
- KARABOGA, D.; BASTURK, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, v. 39, n. 3, p. 459–471, 2007. ISSN 09255001.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, v. 4, p. 1942–1948 vol.4, 1995. ISSN 19353812.
- KUMAR, C. S.; GOPALAKRISHNAN, V. Design of Synchronous Reference Frame Based Harmonic Detection and Space Vector Pulse-Width Modulation Based Switching of Shunt Active Filter. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, v. 10, n. 3, p. 362–370, 2013.
- KUMAR, R. et al. Adaptive Artificial Neural Network Based Control Strategy for Shunt Active Power Filter. In: *International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*. Bhopal, India: IEEE, 2016. p. 194–199. ISBN 9781509024766.
- LASCU, C. et al. High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 5, p. 1826–1835, 2007. ISSN 08858993.

- LASCU, C. et al. Frequency Response Analysis of Current Controllers for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 2, p. 337–347, 2009. ISSN 0278-0046.
- MACIEL, R. S. *Otimização Multiobjetivo na Análise da Integração de Geração Distribuída às Redes de Distribuição*. 144 p. Tese (Doutorado) — UNESP - Ilha Solteira, 2012.
- PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N. *Particle Swarm Optimization and Intelligence*. Hershey, USA: IGI Global, 2010. 373–394 p. ISBN 9781615206667.
- RAJASEKAR, S. et al. Comparative Study of two PWM techniques for Three Phase Shunt Hybrid Active Power Filter to Suppress Line Current Harmonics. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, v. 3, n. 2, p. 183–188, 2010.
- SINGH, B.; AL-HADDAD, K.; CHANDRA, A. A Review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 46, n. 5, p. 960–971, 1999. ISSN 02780046.
- SINGH, B.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K. Performance Comparison of Two Current Control Techniques Applied to an Active Filter. *International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP'98*, p. 133–138, 1998.
- SONNENSCHNEIN, M.; WEINHOLD, M. Comparison of time-domain and frequency-domain control schemes for shunt active filters. *European Transactions on Electrical Power*, v. 9, n. 1, p. 5–16, 1999. ISSN 1430144X.
- SUNDARAM, E.; VENUGOPAL, M. Electrical Power and Energy Systems On design and implementation of three phase three level shunt active power filter for harmonic reduction using synchronous reference frame theory. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier Ltd, v. 81, p. 40–47, 2016. ISSN 0142-0615.
- TWINING, E.; HOLMES, D. G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 3, p. 888–895, 2003. ISSN 08858993.
- UFU. *Nota Técnica SRD-105 - Anexo I - Relatório Técnico 4/8 - Definição de Padrões de Referência*. Uberlândia, 2014. 82 p.
- UFU. *Nota Técnica SRD-105 - Anexo I - Relatório Técnico 5/8 - Definição de Procedimentos para Acompanhamento da Qualidade do Produto*. Uberlândia, 2014. 50 p.
- YAMARTHI, R. B.; RAO, R. S.; REDDY, P. L. Optimal Load Compensation by Shunt Active Power Filter Employing Artificial Bee Colony Optimization. In: *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 2197–2201. ISBN 9781467399395.
- YEPES, A. G. et al. Tuning method aimed at optimized settling time and overshoot for synchronous proportional-integral current control in electric machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 29, n. 6, p. 3041–3054, 2014. ISSN 08858993.

YUAN, X. et al. Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 38, n. 2, p. 523–532, 2002. ISSN 00939994.

ZMOOD, D. N.; HOLMES, D. G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 3, p. 814–822, 2003. ISSN 08858993.

ZMOOD, D. N.; HOLMES, D. G.; BODE, G. H. Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 37, n. 2, p. 601–610, 2001. ISSN 00939994.