

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MAUREN POMALIS COELHO DA SILVA**

**METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE FILTROS PARA  
MITIGAÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS  
DE DISTRIBUIÇÃO**

Porto Alegre

2019

**MAUREN POMALIS COELHO DA SILVA**

**METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE FILTROS PARA  
MITIGAÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS  
DE DISTRIBUIÇÃO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia.

**ORIENTADOR: Roberto Chouhy Leborgne**

Porto Alegre

2019

MAUREN POMALIS COELHO DA SILVA

# **METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE FILTROS PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Esta tese de qualificação foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology -

Gothemburgo, Suécia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Denizar Cruz Martins, UFSC

Doutor pela Institut National Polytechnique de Toulouse, INPT, França

Prof. Dr. Maicon Jaderson Silveira Ramos, UFSM

Doutor pela Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Brasil

Prof. Dr. Renato Gonçalves Ferraz, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil.

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mariana Resener, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil.

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Junior

Porto Alegre, Fevereiro de 2019.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus entes queridos, minha família. Principalmente à minha mãe **Lilian Hering Pomalis**, minha irmã gêmea **Lauren Pomalis Coelho da Silva**, meu segundo pai **Joaquim Pereira de Oliveira Neto**, minha filha **Ana Livia**. E aos que já partiram desta vida, de quem sinto muitas saudades, meu pai **Luiz Coelho da Silva** e minha avó materna **Marina Martha Hering Pomalis**.

Aos queridos **amigos** e demais parentes que torceram por meu sucesso sempre.

A todos vocês citados acima, agradeço a dedicação e apoio nos momentos bons e ruins, fáceis e difíceis desde que escolhi trilhar este caminho: a engenharia, a pesquisa e a docência.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de estudar num programa considerado de excelência e alto padrão internacional, CAPES 6, e realizar meu trabalho em minha área de pesquisa. À Miriam por toda disponibilidade com assuntos acadêmicos e informações administrativas. Ao pessoal da portaria, segurança e demais serviços sempre me recepcionando com boa vontade, zelando pelo bem-estar, bom convívio, limpeza e manutenção do prédio.

Aos colegas do PPGEE pelo companheirismo nas disciplinas desenvolvidas durante o curso, aos amigos do LASEP (Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência) pelo tempo compartilhado, pelos cafés depois do RU, pelas pizzas dos aniversariantes. Principalmente à Andrés Ricardo Herrera Orozco pelo apoio a este trabalho, disponibilidade e todo o auxílio inesgotável, aos companheiros de sala (bairros) no período do doutorado: Andrés Ricardo, Camila Paffrath, César Orozco, Lucas Walantus e Roberto Oswald, pela companhia no dia a dia e pelo compartilhamento do chimarrão, mate ou tererê, e muitos cafés. Aos colegas de pós-graduação Johan Garzon, Juan David, Sérgio Ontiveros, Bibiana Petry, Rochele Albuquerque, Yuri Solis, Aquiles Rossoni, Carlos Vinícius, André Michel, Oscar Becerra, Alessandra Kimura, Roberto Cabral, Guilherme Nicol, Juliana Klas e todos os que passaram pelo PPGEE com quem pude conviver durante o período de mestrado e doutorado na UFRGS. Aos colegas de pós-graduação da *University of Flórida (UF)*, onde fiz um intercâmbio de 4 meses no período final do doutorado, e a todos os amigos que fiz na cidade de Gainesville, brasileiros, americanos e estrangeiros. Aos colegas da Fundação Universidade Federal de Rondônia (UNIR) pela recepção e apoio no início da minha carreira como professora de ensino superior no curso de Engenharia Elétrica.

Ao meu professor orientador Dr. Roberto Chouhy Leborgne por toda dedicação e empenho destinados a mim, eu jamais conseguiria sem todo o esse apoio. Aos professores Dr. Sérgio Haffner e Dr. Gustavo Ferreira por todas as sugestões para melhoria do trabalho durante os Seminários de Andamento, foram essenciais. Ao professor Dr. Arturo Bretas que me recebeu na *UF* durante o período como *research scholar* no laboratório *Power Lab*, pelo auxílio e melhoria na pesquisa.

À CAPES pela provisão da bolsa de doutorado, em parte do tempo de curso.

À UFRGS pela oportunidade de ser aluna de uma excelente instituição, e por todos os serviços estudantis prestados.

À UNIR, desde 2017, pelo apoio à qualificação e obtenção do título.

*“Sobald wir unsere Grenzen akzeptieren, gehen wir über sie hinaus”*

*“Quando aceitamos nossos limites, conseguimos ir além deles”*

*(Albert Einstein)*

## RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para definição dos locais de instalação de filtros passivos dentro de um sistema de distribuição no intuito de mitigar as distorções harmônicas. A alocação de filtros em um sistema elétrico requer atenção, pois, dependendo da escolha do local para instalação deles, existe a possibilidade de deterioração da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) do sistema, que ocorre com o aumento de distorção harmônica em outros pontos devido à modificação do fluxo de corrente no sistema. A presente pesquisa propõe otimizar a instalação dos filtros em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), utilizando a mínima quantidade dos mesmos, visando melhorar a QEE de forma sistêmica com o menor custo possível. A abordagem proposta nesta tese traz uma maneira não usual de alocação dos filtros passivos; onde estes são alocados de forma monofásica ao invés de trifásica. Assim, filtros sintonizados podem ser instalados em apenas uma fase em um determinado ramo do sistema. Devido ao comportamento intrínseco em muitos sistemas de distribuição, desequilibrado, optou-se por esta proposta nesta pesquisa. O procedimento realizado é baseado na interação de dois programas: a modelagem e simulação do SEP é feita no *Alternative Transient Program (ATP)*, que simula o fluxo harmônico do sistema, e em conjunto com o *Matrix Laboratory (MatLab®)*, são verificados os índices de QEE referentes a distorções harmônicas e então realizada a otimização de alocação de filtros. A solução é obtida através de um algoritmo de otimização multiobjetivo, o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)*, que trabalha com o conceito de dominância. Como típico em problemas com multiobjetivo, os objetivos alvos deste problema são conflitantes, as duas funções objetivo do problema visam: diminuição dos indicadores de distorção harmônica e diminuição do custo dos filtros a serem alocados. A solução traz uma gama de opções dentro de uma Fronteira de Pareto, que são consideradas igualmente boas entre si. Este estudo mostrou que a instalação de filtros monofásicos em sistemas de distribuição com presença de ramos monofásicos ou bifásicos é uma boa forma de mitigação de distorções harmônicas sistêmica quando o sistema é poluído de forma dispersa, conseguindo, ainda, compensar a potência reativa do SEP. Com a inserção dos filtros especificamente em ramos monofásicos ou bifásicos em sistemas elétricos há diminuição no custo total dos filtros alocados para a resolução do problema de distorções harmônicas.

**Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica. Distorção Harmônica. Alocação de filtros. ATPDraw. NSGA II.**

## ABSTRACT

This study proposes a methodology for passive filters allocation within an electric distribution system aiming to reduce system harmonic distortion. Allocation of filters in an electrical system requires attention; depending of the choice of filters allocation might harm Power Quality (PQ) increasing harmonic distortion at other nodes due to the modification of the harmonic current flow in the system. Thus, the present research aims to find the optimal filters installation places using the least amount of them, aiming to improve PQ systemically. The approach proposed in this thesis brings an unusual way of allocating passive filters; they are allocated in a single-phase mode instead of three-phase, as is the classic way. So, tuned filters can be installed in one phase only on one branch of the system. Due to the characteristic of the distribution systems, unbalanced loads and lines, it was decided to follow this path in this research, in order to verify the effectiveness. The methodology is based on the interaction of two programs: the modeling and simulation of the electric power system in the Alternative Transient Program (ATP), which simulates the harmonic flow of the system and with the Matrix Laboratory (MatLab<sup>®</sup>) the PQ indexes for harmonic distortions are verified and then the optimization of filter allocation is carried out. The solution is executed through a multiobjective optimization algorithm, the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II), which uses the dominance concept. As typical in multiobjective problems, the objectives are conflicting, the objective functions for the problem are: minimize the number of node/phases that exceed harmonic distortion limits and minimize the cost of the filters to be allocated. The solution brings a range of options within a Pareto frontier, which are considered equally good with each other. This study showed that the installation of single-phase tuned filters in distribution systems with the presence of single-phase or two-phase circuits is a good way of mitigating harmonic distortions systemic when the system is polluted by harmonics in dispersed mode, furthermore getting improving the reactive power of the system. With the insertion of the filters specifically in single-phase and two-phase circuits, it will to decrease the investment of the total filters allocated to solve the problem of harmonic distortions.

**Keywords: Power Quality. Harmonic Distortion. Filters allocation. ATP. NSGA II.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Decomposição de sinal em frequências harmônicas. (Fonte: Dugan <i>et al</i> , 2002). ....	24
Figura 2	Forma de onda de tensão e corrente de uma carga linear. (Fonte: o autor). ....	31
Figura 3	Forma de onda de tensão e corrente de carga não linear. (Fonte: o autor). ....	32
Figura 4	Filtro Passivo sintonizado simples. (Fonte: Akagi, 2006). ....	34
Figura 5	Filtro passivo passa-alta RC. (Fonte: Akagi, 2006). ....	35
Figura 6	Filtros passa-alta de 2ª ordem, 3ª ordem e tipo C. (Fonte: Akagi, 2006). ....	36
Figura 7	Filtro passivo em série. (Fonte: Pomilio, 2012). ....	37
Figura 8	Filtro passivo <i>shunt</i> sintonizado para três frequências harmônicas. (Fonte: Pomilio, 2012). ....	38
Figura 9	Espectro harmônico. (Fonte: Akagi, 2006) ....	43
Figura 10	Fluxograma da metodologia proposta MAFIPAM. (Fonte: o autor). ....	76
Figura 11	Circuito simplificado de um motor. (Fonte: Arrillaga & Watson, 2003). ....	79
Figura 12	Diagrama de blocos <i>NSGA II</i> . (Fonte: o autor). ....	89
Figura 13	Sistema 4 barras(a) e nomenclatura(b). (Fonte: o autor). ....	90
Figura 14	Apresentação de uma Fronteira de Pareto. (Fonte: Eiben, 1998). ....	94
Figura 15	Interface do MatLab® apresentando um vetor indivíduo gerado aleatoriamente ....	97
Figura 16	Diagrama unifilar sistema de 3 nós. (Fonte: o autor). ....	98
Figura 17	Modelo de fonte ACSOURCE. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	99
Figura 18	Modelo de linha LINEPI_3. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	100
Figura 19	Modelo de transformador TRAFO_S. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	101
Figura 20	Modelo de carga linear RL. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	102
Figura 21	Modelo de carga não linear ACSOURCE (corrente). (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	103
Figura 22	Modelo de filtro passivo RLC. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	104
Figura 23	Modelo de filtro passivo RLC monofásico. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	105
Figura 24	Fronteira de Pareto Caso 1. (Fonte: o autor). ....	108
Figura 25	<i>IEEE 13</i> Sistema de Distribuição de 13 nós. (Fonte: <i>Task Force</i> , 1999). ....	109
Figura 26	Modelo de carga distribuída LINEPI_3 e RL. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	111
Figura 27	Modelo de capacitor C. (Fonte: <i>ATPDraw</i> ). ....	112
Figura 28	Vetor indivíduo sistema 13 nós. (Fonte: o autor). ....	116
Figura 29	Fronteira de Pareto Solução 13 nós. (Fonte: o autor). ....	119
Figura 30	<i>IEEE 34</i> Sistema de distribuição de 34 nós. (Fonte: <i>IEEE PES Test Feeders</i> ) ....	122
Figura 31	Fronteira de Pareto Solução <i>IEEE 34</i> nós. (Fonte: o autor). ....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites de distorção harmônica de tensão.....	26
Tabela 2: Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas classificados entre .....	26
Tabela 3: Limite de distorção harmônica total de tensão (PRODIST).....	27
Tabela 4: Limite de distorção harmônica individual de tensão (PRODIST).....	28
Tabela 5: Limite de distorção harmônica total de tensão (PRODIST).....	30
Tabela 6: Valores de $h$ para cálculos de filtros.....	39
Tabela 7: Tabela de comparação de metodologias – Parte 1.....	65
Tabela 8: Tabela de comparação de metodologias – Parte 2.....	66
Tabela 9 Sequência das Ordens Harmônicas.....	80
Tabela 10: Codificação dos Casos.....	92
Tabela 11: <i>THD</i> de tensão sistema teste 3 nós .....	105
Tabela 12: Resultado manual de alocação de filtros no Sistema de 3 nós .....	106
Tabela 13: <i>THD</i> de tensão nas barras analisadas conforme artigo <i>Task Force on Harmonics Modeling and Simulation</i> .....	113
Tabela 14: <i>THD</i> de tensão nas barras analisadas conforme simulação. ....	113
Tabela 15: Correntes harmônicas das cargas não lineares .....	113
Tabela 16: Novos valores de correntes harmônicas das cargas não lineares.....	114
Tabela 17: <i>THD</i> de tensão após incremento de injeção de harmônica.....	114
Tabela 18: Nomeação dos nós .....	115
Tabela 19: Códigos .....	116
Tabela 20: Comparação dos locais fora do limite conforme os filtros instalados no SEP .....	120
Tabela 21: Instalação filtros trifásicos.....	120
Tabela 22: Instalação filtros monofásicos .....	121
Tabela 23: <i>THD</i> de tensão sistema IEEE 34-nós.....	122
Tabela 24: Nomeação dos nós .....	124

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AE: Algoritmo Evolutivo

AG: Algoritmo Genético

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

*ATP: Alternative Transients Program*

*CMOP: Constrained Multi-Objective Problems*

*DEAP: Distributed Evolutionary Algorithms in Python*

DTT: Distorção harmônica total de tensão

DTT<sub>P</sub>: Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3

DTT<sub>I</sub>: Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

DTT<sub>3</sub>: Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

*EMTP: Electromagnetic Transients Program*

*EPRI: Electric Power Research Institute*

*IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

IHD: Distorção Harmônica Individual

IHD<sub>i</sub>: Distorção Harmônica Individual de Corrente

IHD<sub>v</sub>: Distorção Harmônica Individual de Tensão

FFT: Transformada Rápida de Fourier

LASEP: Laboratório de Sistemas de Potência

LED: Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)

MAFIPAM: Metodologia de Alocação de Filtros Passivos Monofásicos

*MATLAB<sup>®</sup>: Matrix Laboratory*

MOEA: Otimização Multiobjetivo usando Algoritmos Evolucionários

*MOP: Multi-Objective Problems*

*NSGA II: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*

*OpenDSS: Open Distribution System Simulator*

POM: Problema de Otimização Multiobjetivo

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE: Qualidade de Energia Elétrica

*RMS: Root Mean Square* (valor eficaz)

SDEE: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SEP: Sistema Elétrico de Potência

SIN: Sistema Interligado Nacional

*TDD: Distorção de Demanda Total*

*THD: Distorção Harmônica Total*

*THDi: Distorção Harmônica Total de Corrente*

*THDv: Distorção Harmônica Total de Tensão*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO/JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	20
1.4	ESTRUTURA DA TESE	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
2.1	DISTORÇÃO HARMÔNICA	23
2.2	QUANTIFICAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA	24
2.3	VALORES LIMITES DOS INDICADORES	26
2.4	CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES	30
2.5	PRINCIPAIS PROBLEMAS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA	32
2.6	FILTROS	33
2.6.1	Filtro Ativo e Filtro Passivo	33
2.6.2	Filtros Série e Filtros Paralelo	36
2.6.3	Cálculo dos Filtros Passivos Paralelos	38
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>42</b>
3.1	ANÁLISE HARMÔNICA - PRINCIPAIS MÉTODOS	42
3.2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA PROBLEMAS MULTIOBJETIVOS	46
3.3	METODOLOGIAS DE MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS COM FILTROS PASSIVOS	48
3.3.1	Metodologias de Alocação de Filtros	48
3.3.2	Metodologias de Projeto de Filtros Passivos	60
3.4	CONSIDERAÇÕES ACERCA DO ESTADO DA ARTE	64
<b>4</b>	<b>PROPOSTA METODOLÓGICA</b>	<b>69</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	69
4.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	71
4.3	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	72
4.3.1	Procedimentos da MAFIPAM	75
<b>5</b>	<b>ESTUDOS DE CASO</b>	<b>98</b>
5.1	CASO 1: SISTEMA DE 3-NÓS	98
5.1.1	Modelagem	98
5.1.2	Análise da distorção harmônica	105
5.1.3	Resultados – Caso 1	106
5.2	CASO 2: SISTEMA IEEE 13-NÓS	109
5.2.1	Modelagem	110
5.2.2	Análise da distorção harmônica	112
5.2.3	Otimização com <i>NSGA II</i>	115
5.2.4	Resultados MAFIPAM – Caso 2: Sistema IEEE 13 nós	117
5.2.5	Outros Resultados - Sistema IEEE 13 nós	120
5.3	CASO 3: SISTEMA IEEE 34-NÓS	121
5.3.1	Modelagem	121
5.3.2	Análise da distorção harmônica	122
5.3.3	Otimização com <i>NSGA II</i>	123
5.3.4	Resultados MAFIPAM – Caso 3: Sistema IEEE 34-nós	125
5.4	TEMPO DE RETORNO DE SOLUÇÃO COM A MAFIPAM	128
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>130</b>

<b>6.1</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>131</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE A: MODELAGEM DO <i>IEEE</i> 13 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DESEQUILBRADO NO <i>ATP</i>DRAW .....</b>	<b>141</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Eficiência energética, geração distribuída, energias alternativas, desenvolvimento sustentável e redes inteligentes encontram-se entre os principais temas de estudos na área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) desde o início do século XXI. Entretanto, a estes temas deparam-se os problemas que afetam seu bom funcionamento. Portanto, a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é um assunto que vem sendo tratado rotineiramente em diversas esferas da área de energia elétrica, como concessionárias, indústrias, órgãos reguladores, nos meios acadêmicos e empresas.

Um dos distúrbios de QEE que interfere no funcionamento do sistema elétrico e que comumente causa prejuízos em partes que o compõem é a distorção harmônica. Esse distúrbio pode gerar ônus para concessionárias e consumidores de energia elétrica. As distorções harmônicas são deformações periódicas na forma de onda da tensão ou da corrente, e são causadas por cargas não lineares que injetam correntes harmônicas no sistema. As correntes harmônicas, conseqüentemente, afetam a tensão do sistema. Em sistemas de distribuição as distorções harmônicas causam problemas, tais como redução de vida útil de equipamentos e falhas no sistema de proteção (Arrillaga, 1997; Dias, 2002; Das, 2012).

O Brasil tem proporção continental, o que implica um sistema de energia elétrica extenso e bastante complexo, por vezes a energia faz um longo percurso desde sua geração até chegar aos consumidores, além disso, hoje em dia o consumidor pode se tornar gerador de energia elétrica, a qual é injetada na rede elétrica, com a micro e mini geração distribuída. Os agentes do setor elétrico fazem esforços constantemente para que se consiga suprir, com qualidade, cada região desse grande país, e ainda, para que a energia produzida e injetada na rede tenha qualidade para uso. Algumas ações desses agentes são acertadas regulando e

padronizando geração, distribuição e transmissão de energia, incluindo indicadores e limites de QEE (ELETROBRÁS, 2006; Brasil, 2014).

### 1.1 MOTIVAÇÃO/JUSTIFICATIVA

Nos sistemas de distribuição, as distorções harmônicas causam preocupação quanto à QEE devido à quantidade de corrente harmônica injetada por equipamentos com característica não linear (cargas não lineares). Com a inserção da geração distribuída (GD) nos SEP, via conversores estáticos, a degradação da QEE se intensificou. Devido ao aumento do uso destes equipamentos nas últimas décadas, foram estipulados limites para a distorção harmônica permitida no sistema. Através dos indicadores de distorção harmônica são quantificadas as taxas de harmônicas e, então, verificada a necessidade de mitigá-las. Os valores limites destes indicadores são definidos em normas ou recomendações, tais como: *IEEE Std. 519/2014* e Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) Módulo 8/2018.

A filtragem é a forma mais natural de se minimizar as distorções harmônicas, portanto, para que se atinja o limite adequado, normalmente é sugerida a instalação de filtros no sistema. Existem filtros passivos, ativos e híbridos, sendo que este último associa características dos dois anteriores. Os filtros passivos são arranjos de elementos passivos, como capacitores, indutores e resistores. Já o filtro ativo utiliza componentes ativos, ou componentes de eletrônica de potência para gerar as correntes e tensões harmônicas que devem ser compensadas. Ambos tipos de filtros apresentam bom desempenho nos sistemas elétricos, nos anos 2000 os filtros passivos eram preferidos por seu menor custo (Akagi, 2006). Atualmente, para sistemas elétricos de alta tensão esta afirmação ainda é válida, pois o custo ainda é muito alto, mas para sistemas de média e baixa tensão, os filtros ativos são considerados mais adequados.

Normalmente os filtros passivos são instalados nos SEP em formato trifásico, esta forma de alocação de filtros impede que em casos de sistemas desequilibrados haja a possibilidade de alocar um filtro em um ramo monofásico, em que a distorção harmônica exceda os limites, bem como em ramos bifásicos, ou ainda em uma fase mais problemática de um ramo trifásico, algo menos comum de ocorrer, mas não impossível.

A presente pesquisa é justificada devido ao fato de que a alocação de filtros em um sistema elétrico não é algo intuitivo, essa escolha demanda pesquisa, pois a solução não é trivial. Apesar de parecer óbvia a instalação de filtros em barras onde encontram-se os maiores indicadores de distorção harmônica ou a maior quantidade de fontes causadoras das distorções no sistema, nem sempre esta é a melhor opção, uma vez que a instalação de filtros pode modificar o fluxo harmônico do sistema e dessa forma agravar as distorções em barramentos vizinhos e ocasionar piora em uma visão global do sistema (Hartana & Richards, 1992; Niquini *et al*, 2010; Variz *et al* 2012). Este comportamento foi demonstrado no estudo de Kovernikova & Thanh (2017) onde mudanças no sistema elétrico resultaram em uma redistribuição das correntes de 5ª harmônica nesse SEP.

A pesquisa pretende também levantar a possibilidade de alocar filtros de forma monofásica, ou seja, filtros independentes das outras fases pertencentes ao ramo, ou então, em outros casos, filtros para ramos monofásicos ou bifásicos do SEP. Ou seja, se um ramo é monofásico de fase A, o filtro será instalado naquela fase, se tem fase A e B, serão dois filtros monofásicos, um na fase A e outro na fase B.

Ainda mais, é verificada a necessidade de pesquisa contínua na área de QEE, devido às modificações que ocorrem no sistema elétrico e na legislação sobre o assunto. Já no início dos anos 2000 Berizzi *et al* (2001) consideravam necessárias as mudanças de metodologias e algoritmos usados para otimização de SEP frente às modificações de mercado, economia e aspectos técnicos. Recentemente pesquisadores da área de distorções harmônicas chamaram

atenção em seu artigo (Bagheri *et al*, 2016) acerca de pesquisas que têm sido feitas nos últimos anos sobre filtros e sua performance na mitigação de distorções harmônicas. Os autores apontam que existe fraca aceitação das metodologias propostas por parte das indústrias e concessionárias de energia elétrica, isto se deve a fatores tais como: alto custo de investimento, desempenho imprevisível a longo prazo e estudos complexos de planejamento. Devido a isto, as concessionárias optam por mitigar distorções harmônicas em certa região ou em um alimentador específico. Por vezes pode ocorrer de os profissionais envolvidos na tomada de decisão não estarem totalmente familiarizados com novos fenômenos decorrentes da interligação de diversos sistemas de natureza diferentes através da eletrônica de potência.

## 1.2 OBJETIVOS

A presente pesquisa trata da otimização da configuração e localização do(s) ponto(s) de instalação de filtro(s) em um sistema elétrico de distribuição. O objetivo geral é:

- Desenvolver uma metodologia para escolha ótima dos locais de instalação de filtros passivos para mitigação de distorções harmônicas em sistemas de distribuição usando a menor quantidade de filtros, por meio de um algoritmo de otimização multiobjetivo e que possibilite melhoria sistêmica quando comparado aos métodos pesquisados a respeito de posicionamento de filtros.

Os objetivos específicos são:

- Modelar e simular um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) desequilibrado, no qual serão incluídas cargas não lineares e representados os demais componentes do sistema no intuito de representar adequadamente um sistema elétrico com tais características. A modelagem e a simulação são feitas através de um *software* denominado *Alternative Transient Program (ATP/EMTP)*;

- Desenvolver uma metodologia de alocação em que os filtros passivos sintonizados possam ser instalados de forma monofásica para contemplar o desequilíbrio inerente aos sistemas de distribuição. Tal ideia é realizada através de otimização heurística multiobjetivo visando minimizar o número de nós/fases que excedem os limites de distorção e o custo de filtros alocados no SEP. A otimização heurística é escolhida devido à complexidade que o problema adquire conforme aumenta o tamanho do sistema e a quantidade de filtros a serem alocados. A função multiobjetivo (Edgeworth, 1881) visa contrabalancear dois objetivos conflitantes;

- Elaborar uma codificação para um Algoritmo Genético (AG) executar a otimização heurística do problema em questão, de forma a garantir uma boa gama de soluções e, assim, um bom resultado final na Fronteira de Pareto (Pareto, 1906), que é parte inerente a este tipo de problema quando utilizada uma função multiobjetivo;

- Estudar e implementar um algoritmo que possibilite melhoria quando comparado aos métodos de posicionamento de filtros pesquisados, visando a diminuição das distorções harmônicas totais e individuais em um sistema de distribuição de forma sistemática. Além disso, busca-se simplificar o processo de análise e resolução do problema. O algoritmo de otimização da alocação dos filtros de harmônicas é implementado no *MatLab*®;

- Aplicar a metodologia para resolver o problema de alocação do filtro em um sistema, cumprindo os limites de tensão estabelecidos pelas recomendações (*IEEE Std. 519/2014* ou *PRODIST Módulo 8/2016 e 2018*);

- Contribuir na análise da atual maneira de regular e parametrizar as distorções harmônicas no Brasil quanto aos limites estipulados pelo PRODIST. O módulo 8 do PRODIST vem sendo atualizado constantemente e é objeto de grande preocupação das concessionárias de energia elétrica e dos consumidores, suas modificações mais agressivas nos últimos dois anos justificam uma análise e discussão sobre o tema.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Com a modelagem usando componentes de fase para sistemas com alimentadores assimétricos e cargas desequilibradas e com a simulação no domínio do tempo, pretende-se entender o comportamento de um SEP quanto à sua resposta ao se alocar filtros passivos monofásicos. Utilizando-se um *software* de modelagem e simulação é possível que se alcance uma solução de fluxo de correntes harmônicas em um sistema de distribuição de energia elétrica. A construção de um sistema dentro da plataforma do *ATPDraw* é uma alternativa prática e útil para obter o fluxo harmônico de um sistema qualquer, sendo ainda, as respostas dadas e analisadas por fase. O melhor conhecimento das respostas do SEP frente a uma nova configuração de alocação de filtros é visto como uma contribuição para a área.

O modelo de otimização é multiobjetivo, visando minimizar o número de nós que excedem os limites de distorção, tais como o *Total Harmonic Distortion (THD)* e o *Individual Harmonic Distortion (IHD)*, e o custo total dos filtros alocados para melhorar a QEE, minimizando a quantidade de filtros instalados no SEP. A codificação elaborada visa fazer com que o algoritmo percorra o universo das possibilidades de solução, chegando a uma gama de soluções ótimas. Quanto à modelagem matemática, além de ser proposta uma Função Objetivo (F.O.) com conceito de Pareto intrínseco, também há preocupação quanto à codificação do cromossomo que define o indivíduo. O mesmo tem a opção de ser constituído de forma a considerar as ordens harmônicas que mais poluem o sistema, fornecendo, assim, uma direção para a busca, quando necessário. A formulação e a codificação para aplicação no problema especificado são vistas como contribuições.

A principal contribuição no que tange a solução de mitigação de distorções harmônicas em SEP é o fato dos filtros passivos serem suscetíveis de alocação monofásica no SDEE. Como anteriormente comentado, cada filtro pode ser alocado em uma fase (A ou B ou C) separadamente, atendendo, assim, sistemas com alto grau de desequilíbrio, os quais necessitam

de uma abordagem independente para cada fase. Filtros monofásicos são verificados apenas em solução com filtros ativos, mas os filtros passivos são muito utilizados, principalmente em sistemas de distribuição.

Dessa forma, é observado que a metodologia pode atender a sistemas elétricos compostos por redes monofásicas, bifásicas e trifásicas, algo não raro em sistemas de distribuição de energia elétrica. Dessa forma, a análise com alocação monofásica ou bifásica de filtros é uma análise necessária a ser executada e, para isso, é importante existir uma forma de fazê-la, que é apresentada nesta proposta de tese.

A contribuição da tese é a alocação de filtros passivos monofásicos em SDEE através da indicação de um algoritmo de otimização heurística que utiliza formulação multiobjetivo.

#### **1.4 ESTRUTURA DA TESE**

Esta proposta de tese está dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo estão incluídos a motivação, os objetivos e as contribuições.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica a respeito da distorção harmônica, incluindo definição e cálculo de distorção harmônica, explanação de cargas lineares e não lineares, tipos de filtros e o cálculo para projetá-los.

No capítulo 3 é apresentado o estado da arte a respeito de metodologias de análise e modelagem de sistemas com presença de harmônicas e metodologias de projeto e alocação ótima de filtros em sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 4 é introduzida a proposta da metodologia desenvolvida, com a apresentação do problema, a formulação multiobjetivo, a codificação das variáveis, o fluxograma da metodologia e o procedimento referente a cada etapa.

No capítulo 5 são apresentados estudos de casos para testar e validar a metodologia, com modelagem, codificação, nomeação das variáveis, e o passo a passo baseado na

metodologia proposta. Ainda, são apresentados os resultados obtidos, fazendo-se a análise e discussão dos mesmos.

No capítulo 6 é apresentada a conclusão deste trabalho de tese e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados: conceitos básicos sobre distorção harmônica, causas da distorção harmônica nos sistemas elétricos e as consequências que podem trazer para a rede, os tipos de filtros para mitigação da distorção harmônica, e finalmente os métodos para análise de distorções harmônicas.

### 2.1 DISTORÇÃO HARMÔNICA

A distorção harmônica é um fenômeno associado a deformações na forma de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A ordem harmônica ( $h$ ) é o número representativo do espectro de frequência associado com uma onda distorcida, onde as frequências harmônicas são múltiplos inteiros ( $h$ ) da frequência fundamental.

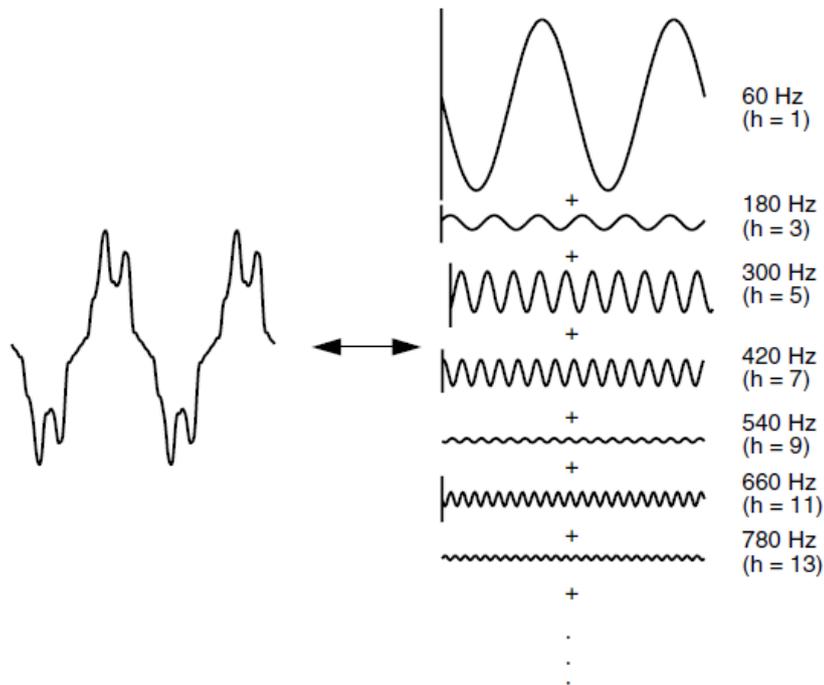
Segundo o teorema de Fourier qualquer função periódica pode ser representada como um somatório de funções senoidais. Através da superposição de ondas senoidais pode-se construir a onda resultante.

A Figura 1 representa visualmente esse conceito, conforme Dugan *et al* (2002). Na figura observa-se do lado direito diversas senóides, cada uma com diferente amplitude e frequência, estas senóides são chamadas harmônicas. A composição de todas elas, ponto a ponto, constitui a onda que aparece do lado esquerdo.

As causas de ocorrência de distorção harmônica em sistemas de potência são basicamente as cargas não lineares e as unidades de geração que utilizam conversores de frequência. Como exemplo tem-se os equipamentos com eletrônica de potência, que utilizam dispositivos eletrônicos de chaveamento (Ranade & Xu, 1998).

Conforme Chang *et al* (1998) elementos com eletrônica de potência podem auxiliar no controle do fluxo de potência e eficiência, mas para isso utilizam as propriedades de cortar,

ajustar ou modelar tensões e correntes senoidais, e as distorções harmônicas são produzidas nos processos, o principal equipamento causador de harmônicas é o conversor estático de potência.



**Figura 1** Decomposição de sinal em frequências harmônicas. (Fonte: Dugan *et al*, 2002).

## 2.2 QUANTIFICAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

Este distúrbio é quantificado em função da distorção harmônica total. Para calcular a distorção harmônica total de tensão ( $THD_V$ ) e corrente ( $THD_I$ ), são utilizadas as equações (1) e (2), respectivamente, conforme *IEEE Std. 519/1992*.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}=\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}=\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Onde  $V_h$  é a tensão harmônica de ordem  $h$ ,  $V_1$  é a tensão fundamental. Analogamente,  $I_h$  é a corrente harmônica de ordem  $h$  e  $I_1$  é a corrente fundamental. Os valores para o cálculo são em RMS, tanto das correntes quanto das tensões.

As frequências de interesse para análise harmônica vão até a 50ª ordem harmônica, portanto o valor de  $h_{\text{máx}}$  utilizada na equação de cálculo de  $THD$  é cinquenta (Chang & Ribeiro, 1998). A norma *IEEE Std. 519/2014* considera que o componente harmônico deve considerar até a 50ª ordem, excluindo as interharmônicas e podendo considerar ordens acima da 50ª, quando necessário, a norma não cita os casos necessários.

No PRODIST Módulo 8 é apresentada a mesma equação dada na equação (1) para cálculo de distorção harmônica total de tensão, porém o termo utilizado em português foi Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT).

A equação para o cálculo da distorção harmônica individual,  $IHD$ , é dada pela equação (3). No PRODIST este indicador foi chamado de Distorção Harmônica Individual de Tensão de ordem  $h$  ( $DIT_h$ ).

$$IHD = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

A equação (3) representa a contribuição percentual de uma determinada ordem harmônica na composição final da distorção harmônica total.

Em relação aos instrumentos de medição de distorção harmônica, a *IEEE Std. 519/2014* determina que a largura da janela de medição de instrumentos digitais que empregam a Transformada Rápida de Fourier ( $FFT$ ) deve ser de 12 ciclos, ou seja, 200 ms, em casos de sistemas com frequência de 60 Hz. Neste sentido, o PRODIST estabelece que cada janela compreenderá uma sequência de 12 a 15 ciclos (200 ms a 250 ms).

### 2.3 VALORES LIMITES DOS INDICADORES

Como já mencionado, duas normas que são relacionadas com as distorções harmônicas são a *IEEE Std. 519/2014*, em âmbito internacional, e o PRODIST - Módulo 8, em âmbito nacional, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que contém os valores máximos permitidos para as distorções harmônicas de tensão. A seguir é apresentada cada recomendação, observando os limites de distorção harmônica impostos.

- *IEEE Std. 519/2014*

Esta norma é a revisão da *IEEE 519* de 1992, os valores limites foram atualizados conforme mostram as tabelas 1 e 2.

**Tabela 1: Limites de distorção harmônica de tensão**

<b>Tensão da barra no PAC (Ponto de Acoplamento Comum)</b>	<b><math>IHD_v</math> (%)</b>	<b><math>THD_v</math> (%)</b>
$V \leq 1.0$ kV	5,0	8,0
<b><math>1001V &lt; V \leq 69</math> kV</b>	3,0	5,0
$69$ kV < $V < 161$ kV	1,5	2,5
$161$ kV < $V$	1,0	1,5

**Tabela 2: Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas classificados entre  
120 V e 69 kV**

<b>Máxima Distorção Harmônica de Corrente em porcentagem de <math>I_L</math> Ordem Harmônica Individual (harmônicas ímpares)<sup>a,b</sup></b>						
<b><math>I_{sc}/I_L</math></b>	<b><math>3 \leq h &lt; 11</math></b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq h &lt; 23</math></b>	<b><math>23 \leq h &lt; 35</math></b>	<b><math>35 \leq h \leq 50</math></b>	<b><math>TDD</math></b>
< 20 <sup>c</sup>	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
25 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

<sup>a</sup> Harmônicas pares estão limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares.

<sup>b</sup> Distorções de corrente que resultam em um deslocamento cc, por exemplo, conversores de meia onda, não são permitidos.

<sup>c</sup> Todos os equipamentos de geração de energia estão limitados a estes valores de distorção de corrente, independentemente da corrente  $I_{sc}/I_L$ .

$I_{sc}$ : corrente máxima de curto-circuito no PAC.

$I_L$ : corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PAC.

- PRODIST Módulo 8/2016

O PRODIST, atualmente, está dividido em onze módulos, sendo o módulo 8 o que trata do assunto de QEE, incluindo a distorção harmônica. Um breve histórico a respeito do Módulo 8 mostra a primeira versão do módulo 8 no PRODIST datada de 2008 (Resolução Normativa nº 345/2008) após esta foram realizadas revisões: a primeira revisão com a Resolução Normativa nº 395/2009, e então a segunda revisão, Resolução Normativa nº 424/2010, e assim por diante, até chegar à décima revisão, Resolução Normativa nº 794/2017, vigente em 2018. Ou seja, são 10 revisões em 10 anos de atuação do Módulo 8 do PRODIST.

Na sétima revisão, utilizada durante o ano de 2016 (Resolução Normativa nº 664/2015), o PRODIST ainda apresentava valores de limites individuais de tensão para as ordens harmônicas, bem como valores limites da distorção harmônica total de tensão. Por se tratar de uma norma para regular as empresas distribuidoras apenas considera a distorção harmônica da tensão, sendo que a qualidade da tensão é responsabilidade da empresa distribuidora. Conforme esse documento, para os cálculos de *THD*, o espectro harmônico considerado deve compreender no mínimo até a 40ª ordem harmônica. As tabelas 3 e 4 a seguir mostram os limites definidos pelo PRODIST para a distorção harmônica de tensão, utilizados em 2016.

**Tabela 3: Limite de distorção harmônica total de tensão (PRODIST)**

<b>Tensão Nominal do Barramento</b>	<b>Distorção Harmônica Total de Tensão (%)</b>
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	3

$V_n =$  Tensão nominal

Tabela 4: Limite de distorção harmônica individual de tensão (PRODIST)

Ordem harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$	
<b>Ímpares não múltiplas de 3</b>	<b>5</b>	7,5	6	4,5	2,5
	<b>7</b>	6,5	5	4	2
	<b>11</b>	4,5	3,5	3	1,5
	<b>13</b>	4	3	2,5	1,5
	<b>17</b>	2,5	2	1,5	1
	<b>19</b>	2	1,5	1,5	1
	<b>23</b>	2	1,5	1,5	1
	<b>25</b>	2	1,5	1,5	1
	<b>&gt;25</b>	1,5	1	1	0,5
<b>Ímpares múltiplas de 3</b>	<b>3</b>	6,5	5	4	2
	<b>9</b>	2	1,5	1,5	1
	<b>15</b>	1	0,5	0,5	0,5
	<b>21</b>	1	0,5	0,5	0,5
	<b>&gt;21</b>	1	0,5	0,5	0,5
<b>Pares</b>	<b>2</b>	2,5	2	1,5	1
	<b>4</b>	1,5	1	1	0,5
	<b>6</b>	1	0,5	0,5	0,5
	<b>8</b>	1	0,5	0,5	0,5
	<b>10</b>	1	0,5	0,5	0,5
	<b>12</b>	1	0,5	0,5	0,5
	<b>&gt;12</b>	1	0,5	0,5	0,5

- PRODIST Módulo 8/2017 e 2018

O PRODIST tem se atualizado constantemente, e no ano de 2017, com a oitava revisão, a análise e sugestão de limites teve grande mudança quando comparado com o apresentado anteriormente.

Aparentemente, ainda não foi totalmente consolidada a nova metodologia e forma de limitação de distorção harmônica pelo PRODIST. Por este motivo, foram apresentadas as tabelas vigentes em 2016, dessa forma, foi possível ter uma ideia de limites individuais de

tensão por ordem harmônica. Porém, a seguir é mostrada a nova metodologia de cálculo e tabela de limites que entrou em vigência em 2017 e seguiu igual com a décima revisão, vigente em 2018, que tem um novo formato de regulação e limites. Na versão de 2017 (Resolução Normativa nº 728/2016) e na vigente, de 2018 (Resolução Normativa nº 794/2017), não constam limites individuais para as ordens harmônicas. A nona revisão foi alterada antes de entrar em vigor.

Na atual versão do módulo 8 do PRODIST, além da distorção total de tensão, denominada DTT, existem mais três tipos de indicadores de qualidade para distorções harmônicas, sendo eles separados em:

- DTT para componentes pares **não** múltiplas de 3 =  $DTT_P$
- DTT para componentes ímpares **não** múltiplas de 3 =  $DTT_I$
- DTT para componentes múltiplas de 3 =  $DTT_3$

O indicador de Distorção Harmônica Individual de Tensão de ordem  $h$  ( $DIT_h$ ) é idêntico na versão atual, conforme equação (3) apresentada anteriormente.

Os cálculos dos três novos indicadores são dados com as equações (4), (5) e (6).

$$DTT_P\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (4)$$

$$DTT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_I} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (5)$$

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (6)$$

Com  $V_h$  sendo a tensão harmônica de ordem  $h$  e  $V_l$  é a tensão fundamental, atentando-se às ordens harmônicas iniciais para o cálculo de cada caso, sendo nos pares  $h=2$ , nos ímpares  $h=5$  e nas múltiplas de 3,  $h=3$ . A  $h_{\text{máx}}$  do cálculo da DTT considerada segue sendo pelo menos a 40ª ordem harmônica, observando-se ordens pares, ímpares ou múltiplas de 3, conforme revisão do módulo 8 do PRODIST.

Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição para cada indicador.

A Tabela 5 mostra os limites definidos pelo PRODIST para a distorção harmônica de tensão, para cada caso.

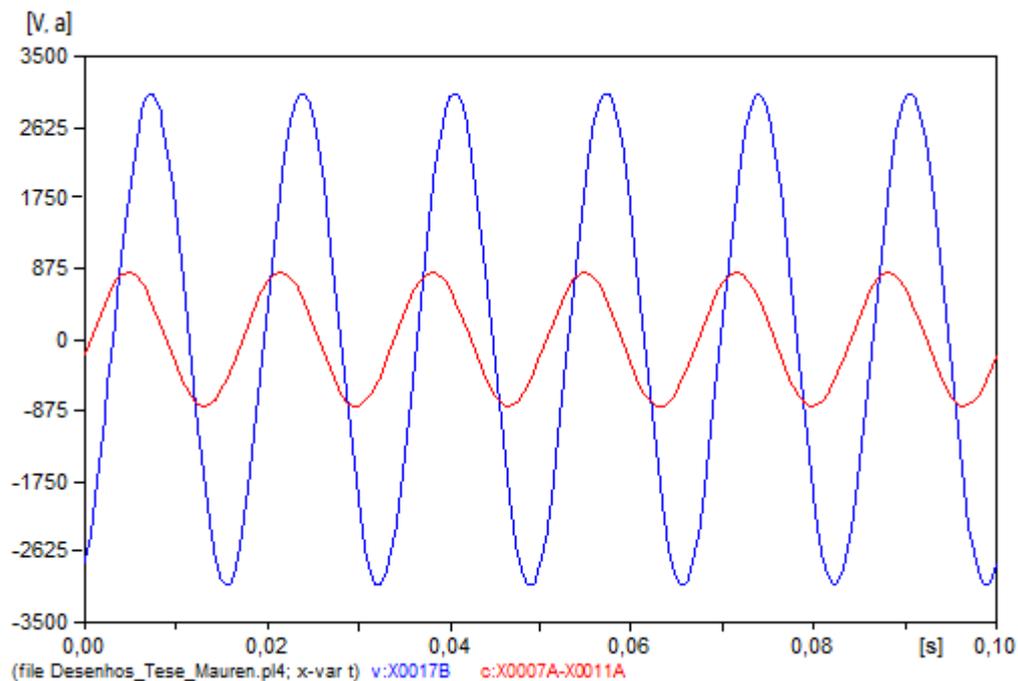
**Tabela 5: Limite de distorção harmônica total de tensão (PRODIST)**

<b>Indicador</b>	$V_n \leq 1.0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10%	8%	5%
DTT <sub>p</sub> 95%	2,5%	2%	1%
DTT <sub>i</sub> 95%	7,5%	6%	4%
DTT <sub>3</sub> 95%	6,5%	5%	3%

Sendo DTT95%, DTT<sub>p</sub>95%, DTT<sub>i</sub>95% e DTT<sub>3</sub>95% os valores máximos admitidos para o percentil 95% dos indicadores DTT%, DTT<sub>p</sub>%, DTT<sub>i</sub>% e DTT<sub>3</sub>%. O percentil 95% é o valor do indicador que foi superado em apenas 5% de 1008 leituras integralizadas de 10 minutos realizadas durante 1 semana.

## 2.4 CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES

Cargas lineares são constituídas de elementos passivos, como resistores, indutores e capacitores. Se a forma de onda da tensão é senoidal, a da corrente também será. A Figura 2, obtida de uma simulação de carga linear no *software ATPDraw*, mostra esse comportamento, onde são apresentadas as formas de onda da tensão e corrente.

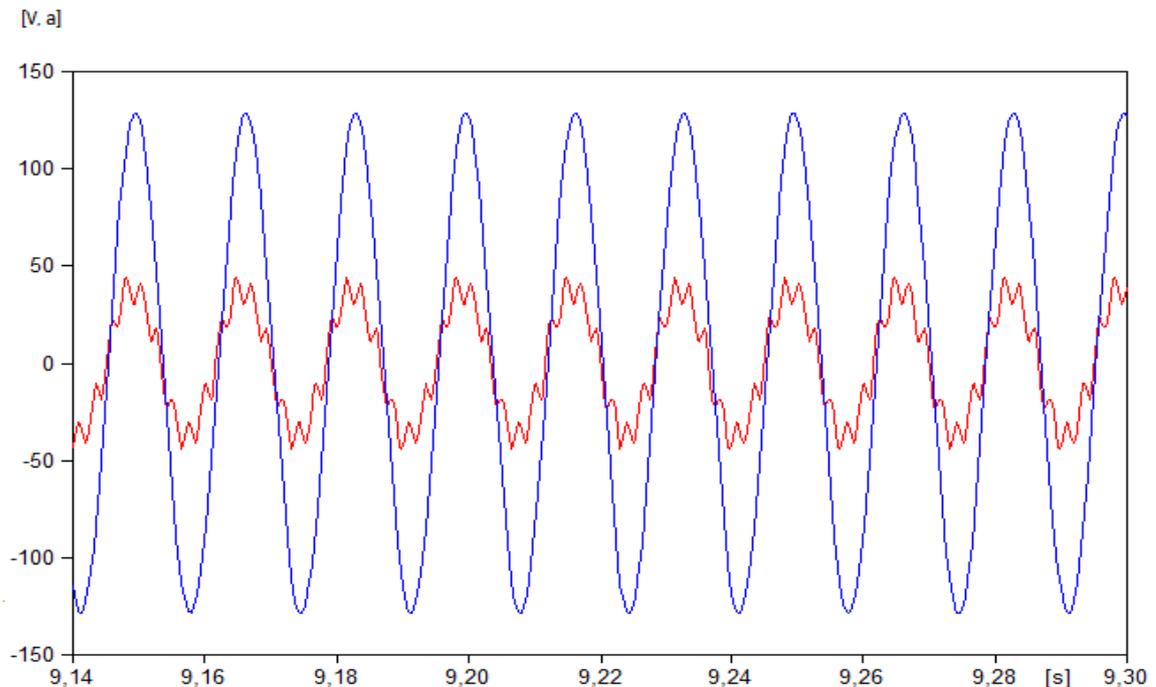


**Figura 2** Forma de onda de tensão e corrente de uma carga linear. (Fonte: o autor).

Em meados da década de 1990 houve grande aumento de cargas não lineares na rede, tais como equipamentos com funcionamento baseados em eletrônica de potência. A utilização de cargas não lineares pelos consumidores é cada vez mais significativa provocando também um aumento das harmônicas. No intuito de reduzir o consumo de energia elétrica muitos clientes tomaram medidas tais como: utilização de lâmpadas fluorescentes e com tecnologia LED, controladores de intensidade luminosa, inversores de frequência para controle da velocidade de motores e controladores de potência de chuveiros. Essas medidas apresentam boa solução para a conservação de energia elétrica, mas trouxeram como consequência a interferência na QEE, como a distorção harmônica (ELETROBRÁS, 2006). Conforme Dias (2002) pode-se citar também as cargas não lineares ligadas ao sistema como transformadores saturados, lâmpadas de descarga e retificadores.

A carga não linear é aquela em que a corrente que circula por ela não tem a mesma forma que a tensão que a alimenta. Esse tipo de carga não apresenta proporcionalidade entre

tensão e corrente, assim a distorção harmônica é causada por cargas não lineares (Dugan *et al*, 2002). A forma de onda da corrente em um circuito com cargas não lineares não é senoidal, conforme mostra a Figura 3, obtida de uma simulação no *ATPDraw*.



**Figura 3** Forma de onda de tensão e corrente de carga não linear. (Fonte: o autor).

Conforme De La Rosa (2006) no futuro as fontes de distorções harmônicas seriam diversas e mais numerosas. E as concessionárias deveriam estar atentas à produção de energia através de GD (fotovoltaica, eólica, entre outras) e sua integração à rede, causando distorção harmônica.

## 2.5 PRINCIPAIS PROBLEMAS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

Os efeitos causados pelas harmônicas em uma rede podem atingir componentes de uma instalação, aparelhos ou a própria instalação elétrica. Esses efeitos podem ser notados visualmente, ser ouvidos, ou também verificados através dos registros de medidores de temperatura, e em alguns casos, por outros equipamentos adequados à sua detecção (Moreno, 2001).

As principais formas de manifestação de harmônicas são: ressonância série e paralela; redução de eficiência na geração, transmissão e aproveitamento da energia elétrica; redução da vida útil de equipamentos; e mau funcionamento do sistema ou de seus componentes (Arrillaga & Watson, 2003). Dentro dos fatores citados encontram-se os problemas tais como: aquecimento excessivo; erro de medidores de energia; disparo de dispositivos de proteção; redução do fator de potência da instalação; vibrações dos aparelhos alimentados; sobreaquecimento ou oscilações da tensão, que afetam o brilho das lâmpadas que iluminam o local; aumento das quedas de tensão; danos em condutores e cabos de rede de energia; danos em máquinas rotativas, tais como motores ou geradores e interferências telefônicas.

## **2.6 FILTROS**

A função dos filtros é mitigar a distorção harmônica de tensão e corrente na rede elétrica. Quanto à estrutura de filtros, existem filtros do tipo passivo, filtros do tipo ativo e os filtros híbridos, que associam características dos dois anteriores. Quanto à conexão do filtro no sistema, eles podem ser divididos em filtros série e filtros paralelos ou *shunt*.

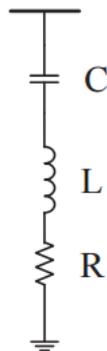
### **2.6.1 Filtro Ativo e Filtro Passivo**

O filtro ativo é um equipamento que funciona compensando as harmônicas contidas na corrente consumida por cargas não lineares. São caracterizados por terem em sua estrutura componentes ativos, daí resulta seu nome. Eles são compostos por um circuito de potência e um sistema de controle. Apesar de o filtro ativo ter ótimo desempenho em vários casos de mitigação de harmônicos, seu custo é muito elevado para sistemas de média e alta tensão, como os sistemas de distribuição.

Na grande maioria dos casos o filtro passivo cumpre bem a proposta de mitigar as harmônicas selecionadas, muitas vezes a preferência ocorre por fatores como: menor custo, estrutura robusta e alta eficiência (Verma & Singh, 2010). Além disso, outra vantagem é que

os filtros passivos podem compensar potência reativa na frequência fundamental (González & McCall, 1987; Verma & Singh, 2010). Portanto, o tipo de filtro escolhido para atuar nos sistemas para os quais a presente metodologia foca é o filtro passivo. Não será dado maior detalhamento a respeito do filtro do tipo ativo pelo fato do mesmo não entrar na metodologia de mitigação de distorção harmônica desta pesquisa.

Os filtros passivos são basicamente variações do agrupamento de elementos capacitivos, indutivos e resistivos. Uma estrutura de um filtro passivo conectado em paralelo no sistema elétrico pode ser vista na Figura 4.



**Figura 4** Filtro Passivo sintonizado simples. (Fonte: Akagi, 2006).

O filtro passivo instalado nas proximidades de uma carga não linear fornece um caminho de baixa impedância para frequências harmônicas específicas, resultando na absorção de corrente harmônica; também possui a capacidade de corrigir o fator de deslocamento de cargas indutivas, através da injeção de corrente capacitiva na frequência fundamental, essa possibilidade traz uma vantagem na aplicação desse tipo de filtro (Akagi, 2006).

Apesar de existirem muitas configurações de filtros passivos na literatura, há dois tipos de filtros passivos mais comuns para aplicação em sistemas de potência, o filtro sintonizado e o filtro passa-alta. Estes filtros são simples de projetar e menos custosos para implementar. No filtro sintonizado, os ramos LC série são sintonizados próximo das frequências que se quer mitigar. Para as frequências mais altas usa-se um simples capacitor funcionando como filtro

passa-alta. A resistência R serve para limitar a corrente que passará pelos componentes do filtro (Pomilio<sup>1</sup>, 2012).

O filtro do tipo sintonizado simples, ou único, é configurado de forma a ser uma baixa impedância para uma frequência ou um grupo de frequências. Ele é composto por um circuito RLC em série no caso de sintonização em apenas uma frequência. Para mais frequências são adicionados outros ramos paralelos cada um composto pelo circuito série necessário para a mitigação da harmônica específica.

O filtro do tipo passa-alta é configurado de forma a ser uma baixa impedância para todas as faixas de frequências situadas acima da frequência de corte estabelecida. Ele é composto, no modelo mais simples ou de 1ª ordem, por um capacitor em série com um resistor (RC), o qual limita a corrente que flui pelo capacitor, conforme a Figura 5.

A performance do filtro passa-alta de 1ª ordem é considerada não satisfatória para baixas frequências conforme Shi *et al* (2017), que são frequências abaixo de 5 kHz conforme Dugan *et al* (2002).



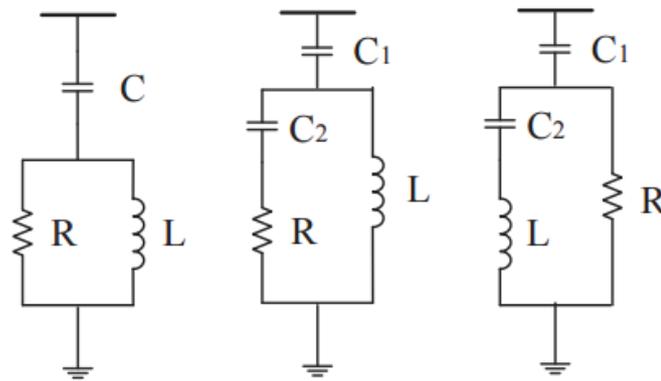
**Figura 5** Filtro passivo passa-alta RC. (Fonte: Akagi, 2006).

Além do filtro passa-alta de 1ª ordem, existem também os filtros passa-alta de 2ª ordem, de 3ª ordem e o tipo C, eles se diferenciam quanto à estrutura e quantidade dos

<sup>1</sup> POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**, Apostila de disciplinas da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Departamento de Sistemas e Controle de Energia. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, São Paulo, 2012.

componentes presentes em cada um, conforme mostra a Figura 6, que apresenta os filtros passa-alta de 2ª ordem, 3ª ordem e tipo C, respectivamente.

O filtro de 2ª ordem consiste em um capacitor em série com um indutor e resistor em paralelo. Ele atua como um filtro sintonizado para frequências abaixo da frequência sintonizada e semelhante a um filtro de 1ª ordem para as altas frequências (Shi *et al*, 2017).



**Figura 6** Filtros passa-alta de 2ª ordem, 3ª ordem e tipo C. (Fonte: Akagi, 2006).

O filtro de 3ª ordem compõe-se por uma grande reatância capacitiva na frequência fundamental e pequena impedância sobre uma banda de altas frequências, o comportamento é também como um filtro sintonizado abaixo da frequência de sintonização e como um filtro de 1ª ordem para frequências acima desta (Shi *et al*, 2017).

O tipo C tem alta impedância capacitiva na frequência fundamental e atua como um filtro sintonizado. Para altas frequências a atuação é semelhante ao filtro de 1ª ordem (Shi *et al*, 2017).

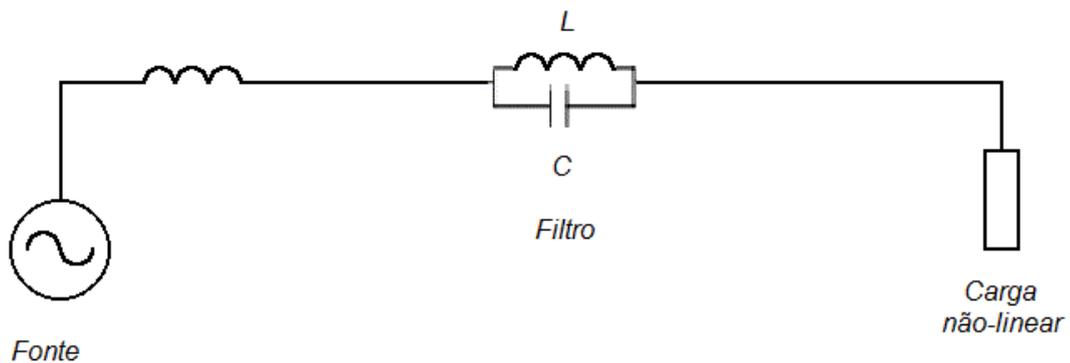
### 2.6.2 Filtros Série e Filtros Paralelo

Filtros do tipo série são instalados em série com o alimentador que está sendo analisada. O filtro deve carregar a corrente total da carga e deve ser isolado para tensão plena da linha (González & McCall, 1987). O foco é a minimização de distorções harmônicas de

tensão, sendo que a tensão produzida pelo filtro é relativa a uma parte percentual da tensão nominal da rede e a corrente que o percorre é a própria corrente da carga (Pomilio, 2012).

Este filtro possui como desvantagem o alto custo, por ser dimensionado para suportar a corrente de carga do circuito, sendo necessário utilizar componentes capazes de suportar toda a corrente de carga (González & McCall, 1987).

Um filtro em série é apresentado na Figura 7.



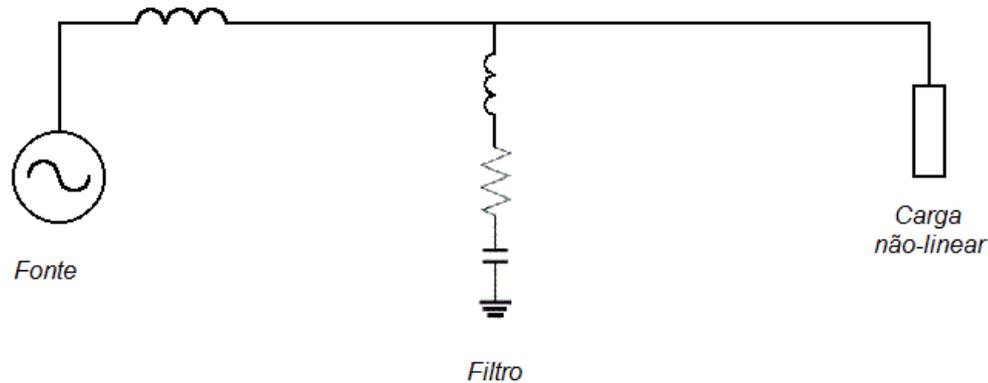
**Figura 7** Filtro passivo em série. (Fonte: Pomilio, 2012).

Os filtros em derivação ou paralelo, mais conhecidos como *shunt*, são alocados em paralelo. O filtro *shunt* normalmente é aterrado em um dos terminais e carrega somente a corrente harmônica para a qual ele é ajustado - o que o torna muito mais barato que o filtro série - e pode ser considerado de eficiência similar. Além disso, os filtros *shunt* podem fornecer potência reativa na frequência fundamental para compensação do fator de deslocamento. Principalmente por causa desse benefício a abordagem prática mais usual ainda é o filtro *shunt* em sistemas de altas potências.

Os filtros paralelos podem ser de diversas estruturas e configurações, como por exemplo, passivo sintonizado, passivo passa-alta, ativo ou híbrido. Na Figura 8 é apresentado um filtro *shunt* passivo.

O dimensionamento do filtro depende da potência reativa que o filtro fornece na frequência fundamental, sendo este um critério importante no projeto de um filtro. O ideal em

projeto de filtros é a eliminação total dos efeitos causados por distorção harmônica, mas este ideal é irrealista por razões técnicas e econômicas (Arrillaga & Watson, 2003).



**Figura 8** Filtro passivo *shunt* sintonizado para três frequências harmônicas. (Fonte: Pomilio, 2012).

Todos os tipos de filtros apresentam bom desempenho nos sistemas elétricos quando bem projetados, mas os filtros passivos ainda são preferidos por seu menor custo. Além disso, conforme Verma & Singh (2010) filtros ativos são utilizados em sistemas de baixa e média tensão, enquanto os passivos continuam dominando os níveis de alta tensão, como os sistemas de distribuição. O fato ocorre devido à necessidade do uso de chaves de alta tensão e, eventualmente, de conversores multiníveis, que tornam caro e complexo o sistema.

Os filtros escolhidos para esta pesquisa são os filtros passivos *shunt*, e a seguir será explicado sobre o projeto dos mesmos para o uso na metodologia apresentada.

### 2.6.3 Cálculo dos Filtros Passivos Paralelos

Os filtros passivos RLC *shunt* são calculados para cada ordem harmônica levando em consideração a ressonância que pode ser gerada no sistema elétrico. Ressonância é considerada uma amplificação na resposta do sistema a uma excitação periódica quando a frequência da fonte excitadora é igual à frequência do sistema (Castano & Plata, 2006). Para evitar a ocorrência de ressonância série no sistema ao instalar filtros passivos, os cálculos dos

componentes são feitos através de ordens harmônicas ligeiramente abaixo do valor real, conforme mostra a Tabela 6.

**Tabela 6: Valores de  $h$  para cálculos de filtros**

Ordem harmônica, real ( $h$ )	3	5	7	11	13	$h$
Valor de $h$ considerado	2,9	4,8	6,8	10,6	12,6	$(h-0,03*h)$

Outros autores (Gonzalez & McCall, 1987; Verma & Singh, 2010; Leite, 2017) apresentam valores ligeiramente abaixo da ordem harmônica multiplicando a ordem  $h$  por 0,95, resultando em valores: 2,8 para a 3ª; 4,7 para a 5ª; 6,6 para a 7ª; 10,4 para a 11ª e 12,3 para a 13ª. Verifica-se que os cálculos são entre 3% e 5% abaixo do valor da ordem harmônica.

Conforme Kassick<sup>2</sup> conhecendo-se a corrente solicitada pelo alimentador, tanto a fundamental quanto as harmônicas, é possível dimensionar o filtro RLC. O autor chama a atenção para o fato de que esse cálculo apenas leva em consideração as grandezas presentes naquele ponto, mas não leva em consideração outros filtros que podem estar sendo calculados e instalados no SEP no mesmo momento que o primeiro. Este é um ponto importante do estudo, e é mais um motivo corroborando a necessidade da visão panorâmica do sistema de distribuição em análise quando se está incluindo novos agentes atuantes, evitando, assim, consequências inesperadas e piores na QEE do sistema.

Conforme De La Rosa (2006) o filtro passivo pode ter dupla função, a de compensação reativa e a de filtragem de harmônicas. Os passos nos cálculos dos parâmetros do filtro iniciam com cálculo da capacitância que melhora o fator de potência para 0,95 ou mais. A corrente através do banco de capacitores é calculada com (7).

<sup>2</sup> KASSICK, E. V. **Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão**. Apostila de aula, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, 2008.

$$I_{c_{rms}} = \sqrt{(I_{C1}^2 + I_{Ch}^2)} \quad (7)$$

A(s) corrente(s)  $I_{Ch}$  deve(m) ser a(s) que está(ão) em análise para mitigação das distorções harmônicas do SEP. A tensão que atravessa o banco de capacitores,  $V_{Ch}$ , é calculada com uma equação análoga à (7), substituindo-se valores de corrente por tensão.

Então, a potência reativa,  $Q_c$ , do banco de capacitores é dada por (8).

$$Q_c = P. (\tan\theta_2 - \tan\theta_1) \quad (8)$$

O valor da reatância capacitiva do banco é dado usando (9).

$$X_{C1} = \frac{V_{L-L}^2}{kVAR} \quad (9)$$

Com  $V_{L-L}$  sendo a tensão linha-linha do sistema e  $kVAR$  o tamanho do banco a ser instalado, conforme o fator de potência requerido.

Então, calcula-se a reatância do indutor (10) para sintonizar com o capacitor em série, sabendo que  $X_{Lh} = X_{Ch}$ .

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h^2} \quad (10)$$

Por fim, os valores das reatâncias na frequência desejada podem ser expressar por (11).

$$X_{Ch} = \frac{X_{C1}}{h} \quad (11)$$

No procedimento de cálculo dos parâmetros do filtro, deve-se levar em conta o fator de qualidade,  $Q_f$ . Conforme De La Rosa (2006) o fator de qualidade está relacionado com a habilidade do filtro em dissipar a energia absorvida no filtro sintonizado. Usualmente o valor do  $Q_f$  varia numa faixa de 15 a 80, e pode ser calculado por  $X_L/R$  ( $X_C/R$ ). Também pode ser escolhido conforme conhecimento do responsável por projetar os filtros, sabendo que filtros

em baixa tensão (480 a 600 V) estão associados a valores baixos de  $Q_f$  e média e alta tensão apresentam valores mais altos de  $Q_f$  (De La Rosa, 2006).

A frequência angular do sistema,  $\omega$ , é baseada na frequência do sistema analisado, portanto, pode ser de 50 Hz ou 60 Hz, conforme a região analisada, países como o Brasil e os Estados Unidos tem  $f = 60\text{Hz}$ .

A impedância do filtro é dada pela equação (12).

$$Z = R + j \left[ \omega L - \frac{1}{\omega C} \right] \quad (12)$$

Sendo R, L e C os elementos do filtro, sendo  $h$  a relação entre as frequências harmônica e fundamental, C e L são calculados na frequência desejada, conforme as equações (13) e (14).

$$X_{Ch} = \frac{1}{(h\omega_c)} \quad (13)$$

$$X_{Lh} = h\omega_L \quad (14)$$

Sendo  $X_C$  e  $X_L$  as reatâncias capacitivas e indutivas na frequência de ressonância do filtro.

### 3 ESTADO DA ARTE

#### 3.1 ANÁLISE HARMÔNICA - PRINCIPAIS MÉTODOS

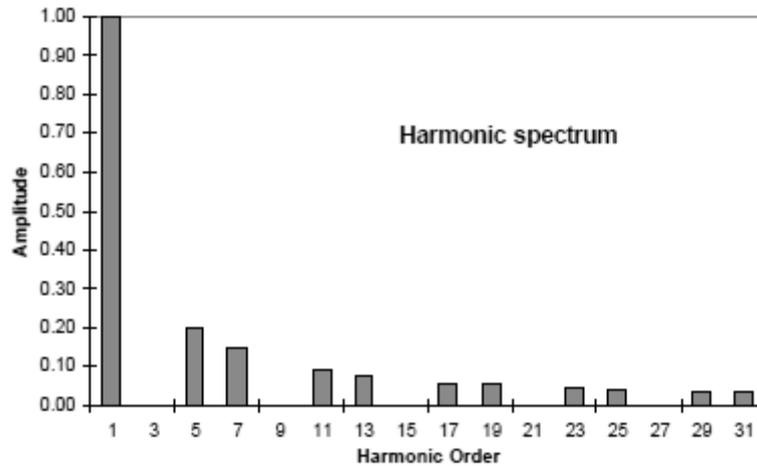
Para que seja possível fazer a análise de um sistema de potência que contém distorção harmônica é necessário definir a metodologia a ser utilizada para a obtenção do fluxo de correntes e também a modelagem que será compatível com os elementos presentes no sistema elétrico analisado. Para isto, são apresentados os principais métodos utilizados em estudo de distorção harmônica e a forma de representação usual dos componentes do sistema elétrico quando modelados em plataformas de simulação.

A análise de harmônicas envolve e depende da interação entre o equipamento causador de harmônica e o sistema de energia (Das, 2012). O sistema pode ser analisado separadamente em cada harmônica, pois encontrar a resposta do sistema para cada frequência individual é muito mais simples do que encontrar a resposta para o sinal completo. Portanto, a série de Fourier e a *FFT* são universalmente aplicadas na análise de problemas de harmônicas (Dugan et al, 2002).

De forma inversa, conforme Ranade & Xu (1998) quando se obtém um sinal, composto de diversas amplitudes harmônicas, todas baseadas na fundamental - a isso se chama espectro harmônico - um exemplo dos autores é mostrado na Figura 9, o espectro apresentado é de um conversor de seis pulsos. A superposição desses componentes harmônicos é o que cria a forma de onda original, distorcida.

Os métodos de análise de distorção harmônica podem ser classificados em métodos no domínio da frequência, métodos no domínio do tempo ou métodos híbridos, que combinam os dois anteriores. Métodos de análise no domínio da frequência são divididos em direto, iterativo e fluxo de potência harmônica, eles são realizados a partir da inclusão dos componentes

harmônicos de tensão e corrente diretamente no regime permanente e a solução é obtida para cada frequência em análise (Task Force, 2013).



**Figura 9** Espectro harmônico. (Fonte: Akagi, 2006)

Os métodos no domínio do tempo podem ser do tipo Convencional (denominado *Brute Force - BF*), onde a solução do regime permanente é obtida diretamente por integração de equações diferenciais que descrevem o sistema; ou do tipo solução periódica rápida de estado estacionário, no qual é necessária a simulação iterativa até que o sistema chegue ao seu estado estacionário de operação. Após a obtenção do regime permanente é utilizada a *FFT* para a decomposição do conteúdo harmônico dos sinais analisados (Task Force, 2013).

Conforme Herraiz *et al* (2003) os métodos no domínio da frequência são baseados no método convencional de fluxo de carga que é utilizado para analisar o estado estacionário da rede elétrica. Para isto são determinados os valores da tensão, da corrente, da potência ativa e da potência reativa na frequência fundamental. Porém, o método resulta na ausência de modelagem de fenômenos transitórios perturbando a rede, por isso há a inclusão das características de equipamentos não lineares, e o método modificado se torna propício para análise harmônica, ele é chamado de fluxo de potência harmônico.

Assumindo-se que todas as cargas não lineares podem ser representadas com injeção de corrente harmônica, a tensão harmônica de cada nó em um sistema elétrico de potência pode

ser obtida resolvendo-se as equações da matriz impedância,  $Z$ , ou a inversa da matriz admitância,  $Y$ , para cada uma das ordens harmônicas em consideração (Chang & Ribeiro, 1998).

Nos estudos de harmônicas a representação matemática do sistema de equações de rede para cada harmônica é resolvido com a equação matricial (15).

$$[I]_h = [Y]_h [V]_h \quad (15)$$

Sendo  $[I]_h$ , o vetor de correntes da h-ésima harmônica,  $[Y]_h$ , a matriz admitância da rede para a harmônica  $h$  e  $[V]_h$ , o vetor de tensões da h-ésima harmônica. Essa equação é resolvida para cada frequência harmônica e se o vetor de corrente harmônica e a matriz admitância harmônica são conhecidos, os resultados são as tensões harmônicas (Bonner *et al*, 1996; Arrillaga *et al*, 1997; Ranade & Xu, 1998).

Conforme Bonner *et al* (1996) é observado que uma solução do fluxo de carga na frequência fundamental é necessária, e conforme Yan *et al* (1994) o fluxo de carga de cada ordem harmônica é resolvido separadamente, pois se pressupõe que não há nenhum acoplamento mútuo entre redes com diferentes ordens harmônicas.

Em sistemas radiais a análise de harmônicas pode ser feita através de um fluxo de carga representado com o método *backward/forward sweep* com algumas adaptações, ou seja, determinar o estado estacionário para cada harmônica no tempo (Bud *et al*, 2007). Além do método de *backward/forward sweep* outro método dos mais difundidos para cálculo de fluxo de cargas é o Newton-Raphson. Conforme Salas (2010) este método é muito utilizado em sistemas elétricos e apresenta bom desempenho. Porém sua eficiência se restringe a sistemas de transmissão, pois existem particularidades nas redes de distribuição que tornam inconvenientes as simplificações adotadas no Newton-Raphson clássico, por conta de sua

estrutura radial, portanto, o método pode apresentar dificuldade de convergência, pois o desequilíbrio do sistema de distribuição é muito importante para ser desprezado.

Uma metodologia que apresenta um fluxo de potência harmônico baseado nas equações de injeção de corrente resolvido através de métodos iterativos de solução é o MICT (Método de Injeção de Corrente Trifásico) de Dommel *et al* (1970). Conforme Arrillaga & Watson (2003) essa metodologia utiliza penetração harmônica e com ela é possível uma solução direta quando a maioria das não linearidades são representadas como fonte de correntes harmônicas, ou seja, não é necessária a modelagem explícita de cada elemento causador das harmônicas.

Os métodos no domínio do tempo são muito utilizados para a análise de distorção harmônica. Estes métodos são baseados em resolução numérica das equações diferenciais que representam o comportamento dos componentes pertencentes ao sistema de potência. Este método é utilizado nos programas do tipo *ATP/EMTP*. Métodos no domínio do tempo apresentam integração em tempo discretizado e a precisão dos seus resultados depende do passo de cálculo utilizado, pois quanto menor o valor do passo de cálculo, menor o intervalo de análise e conseqüentemente maior o detalhamento da simulação (Herraiz *et al*, 2003).

Em Fernandes (2011) é apresentada uma metodologia com a modelagem e simulação de um sistema no *software ATP* no domínio do tempo. O autor testa a metodologia para provar que a ferramenta é capaz de gerar resultados coerentes num estudo com ênfase em distorções harmônicas num sistema elétrico de potência em nível de distribuição. O sistema utilizado para validação é o *IEEE 13 barras* (Task Force, 1999), e seus resultados são comparados com dados de referência fornecidos pelo *IEEE*, sendo menor que 4% as diferenças relativas de *THD* em relação aos resultados apresentados pelo *IEEE*, garantindo a integridade e capacidade do programa.

O *Open Distribution System Simulator (OpenDSS)* é uma ferramenta de modelagem e simulação desenvolvido pelo *Electric Power Research Institute (EPRI)*, ela calcula o fluxo de

potência harmônico em regime permanente através de soluções fasoriais. O foco do *software* é a simulação para integração de GD e modernização da rede.

Por fim, é importante atentar que, apesar de grande parte de estudos com análise harmônica poder utilizar modelo equivalente monofásico para representar rede trifásica, a exceção para esse tipo de representação ocorre com sistemas desequilibrados e sistemas com bancos de capacitores em uma fase, apesar da compensação monofásica ser rara, se utilizada, o sistema terá que ser representado em modelos por fase (De La Rosa, 2006).

### 3.2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA PROBLEMAS MULTIOBJETIVOS

Entre os problemas de otimização estão os problemas que envolvem a otimização de mais de um objetivo, ou seja, com mais de uma Função Objetivo (F.O.). Estes são os Problemas de Otimização Multiobjetivo (POM), e, na maioria dos casos, pelo menos algum dos objetivos será conflitante com outro. Os objetivos podem ser descritos como um conjunto de funções  $F_1, F_2, F_3$ , a serem minimizadas, conforme (16).

$$\min F = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_n\} \quad (16)$$

Existem diversas abordagens para solucionar problemas com mais de um objetivo que são conflitantes entre si. O problema de alocação de filtros em SEP da presente pesquisa é considerado um problema multiobjetivo, pois ao mesmo tempo que pretende-se diminuir os índices de distorção harmônica, também almeja-se um custo baixo para a solução, porém, a mitigação de distorções harmônicas prevê a instalação de filtros e quanto maior o número destes, maior o custo investido.

Conforme Snyman & Helbig (2017) POM com inclusão de restrição são muito difíceis de serem solucionados, pois é visível que no momento em que melhora-se um dos objetivos, conseqüentemente piora-se o outro. Conforme os autores há duas principais maneiras de chegar à solução de problemas quando há objetivos conflitantes intrínsecos nele. Uma delas

seria adicionar penalidade a cada uma das funções objetivos presentes na formulação do problema, mas isto somente seria possível se existisse um somatório de funções, que não é o caso dos POM. A outra alternativa seria a utilização do princípio de Pareto teoria proposta por Pareto em 1906, que compara as diversas soluções levando em consideração a violação de restrições.

Algoritmos Evolutivos (AE) são algoritmos baseados principalmente em comportamentos de evolução presentes na natureza - mas que também contam com alguns algoritmos baseados em teorias de sociologia ou arqueologia - eles são muito comuns para resolução de problemas multiobjetivos (Snyman & Helbig, 2017). Esse tipo de problema é conhecido como Otimização Multiobjetivo usando Algoritmos Evolutivos (MOEA). Conforme Kagan *et al* (2009) a computação evolutiva é um conjunto de técnicas e procedimentos genéricos e adaptáveis que são aplicáveis a problemas complexos nos quais outras técnicas são ineficazes ou não se aplicam. A maioria dos algoritmos evolutivos é baseada na teoria evolutiva de Darwin.

Entre as formulações que utilizam MOEA estão: os que se baseiam na natureza, como o *Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)*, por Knowles & Corne (2000); o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)*, por Deb (1994) e seus sucessores, o *NSGA II* e o *NSGA III*; o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)*, por Zitzler & Thiele (1998) e seus sucessores, o *SPEA 2* e *SPEA 2+*; o *Micro-Genetic Algorithm ( $\mu$ -GA)*, por Coello & Pulido (2001); o *Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)*, por Coello *et al* (2003) e o *Cultural Algorithm (CA)*, por Coello & Becerra (2003), baseado em sociologia.

Os Algoritmos Genéticos (AG) foram apresentados por Holland em 1975, onde o objetivo era formalizar matematicamente, ao mesmo tempo em que explicava, os processos adaptativos encontrados na natureza (Kagan *et al*, 2009). Daquela época para os dias atuais algumas variações deste algoritmo foram elaboradas, sempre mantendo a inspiração da teoria

da evolução, que é a base do AG. Dessa forma, permanecem presentes nas técnicas de otimização com base em AG: seleção, mutação e recombinação.

### **3.3 METODOLOGIAS DE MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS COM FILTROS PASSIVOS**

Conforme explicado previamente, para mitigar distorções harmônicas em um sistema elétrico são muito utilizados os filtros passivos, devido ao baixo custo e funcionalidade. Para proceder na revisão do estado da arte buscaram-se estudos de alocação de filtros em sistemas elétricos de potência, nesta busca, foi possível observar que muitas vezes a metodologia já prevê o cálculo dos parâmetros do filtro, além de seu local de inserção no sistema.

Percebeu-se que estudos a respeito de projeto e alocação de filtros são bastante correlatos, sendo feitos por vezes em conjunto ou, em outras vezes, em separado, e somente um dos dois assuntos é abordado. Além disso, muitos métodos de otimização utilizados para otimização de projeto de filtro são utilizados também para otimização de alocação de filtros e vice-versa.

Devido a isso, neste capítulo focou-se em pesquisas que abordem ambos objetivos, dimensionamento e alocação de filtro. Há revisões tanto de metodologias de determinação de locais de inserção dos filtros no SEP quanto de determinação de parâmetros do filtro passivo.

#### **3.3.1 Metodologias de Alocação de Filtros**

Esta seção traz a revisão bibliográfica de metodologias de alocação de filtros em sistemas elétricos. São pesquisas que remontam o início da década de 90 até os dias atuais, nas quais são verificados avanços através de modificações em métodos de otimização, formulação e uso de filtros. Com a finalidade de comparação, na revisão bibliográfica buscou-se trabalhos que usaram linha de raciocínio similar ao da presente pesquisa, bem como problemas que

buscaram objetivos de solução de mitigação de distorções harmônicas correspondentes aos da pesquisa deste trabalho.

No trabalho de Hartana & Richards (1992) o objetivo foi minimizar o somatório de *THD* verificado num determinado nó, ao mesmo tempo em que cada nó do sistema mantenha o nível de *THD* abaixo dos valores limite. Os autores chamam atenção neste artigo para a filtragem de harmônicas em um barramento somente, pois a consequência pode ser agravamento de distorção harmônica em outros barramentos que tem o mesmo alimentador. A otimização é feita com o método da secção áurea para alocação de filtros passivos em sistemas de distribuição. É importante ressaltar que observar os indicadores de distorção em cada nó é vital para o sucesso desta metodologia, se for objetivo atingir os limites estipulados pelas normas vigentes. De certa forma haveria um grande risco minimizar uma combinação de índices a respeito de QEE sem observar cada nó, pois isso não garantiria que um barramento estivesse em situação muito pior se comparado ao quadro inicial e ultrapassando os limites ou ainda causando problemas locais, enquanto outros estivessem muito abaixo fazendo a média estar abaixo dos valores máximos admitidos. O problema é mono-objetivo, sendo um somatório de *THD*, assim, utilizando pesos para cada parte da função, são destacados os nós considerados críticos no sistema. O estudo é feito com um sistema de distribuição de 35 barras, neste estudo as correntes harmônicas trifásicas injetadas podem ser equilibradas ou desequilibradas, sendo as ordens consideradas 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>. Os resultados mostram 8 filtros sintonizados trifásicos instalados no sistema. A desvantagem da metodologia é a intrínseca indicação de nós a receberem filtros, que é resultado dos pesos estipulados para cada nó na FO.

Em Yang & Richards (1994) foi proposta uma metodologia de análise de antecipação de distorção harmônica. O problema é mono-objetivo, e busca maximizar o total de *THD* do sistema ou a máxima *THD* de um sistema de distribuição, conforme a inserção de componentes num sistema. Os autores utilizam o Algoritmo Genético (AG) para executar diferentes

combinações de parâmetros de bancos capacitores, cargas e fontes causadoras de distorções harmônicas, assim, verifica-se o somatório de  $THD$  dos nós do sistema ( $TTHD$ ). Quando o pior valor de  $TTHD$  é encontrado, analisa-se cada nó do sistema, verificando se a  $THD$  de tensão está dentro dos valores estipulados pela norma. Então, nesta etapa, aloca-se um filtro passivo em um nó que minimize o somatório de  $THD$ , através de busca em todos os nós pela melhor posição, reduzindo a quantidade de harmônicas para o sistema, e repete-se o procedimento no intuito de montar um arranjo de filtros para atuar no sistema, caso a melhor posição do filtro ainda extrapole limites. No estudo de caso, é assumido que apenas as 5ª e 7ª harmônicas são geradas num sistema de distribuição de 21 nós, que é modelado somente com a sequência positiva da rede. As injeções de corrente são inseridas em 8 nós do sistema. É importante salientar que em estudos que envolvem simulação de um sistema elétrico na busca de alternativas de solução para um problema real, quanto mais detalhados e realistas forem os componentes do sistema modelado, mais fiel é a resposta para solucionar o problema. Portanto, assumir poucas ordens harmônicas presentes no sistema (neste caso apenas duas) não remete à realidade de fato, mesmo sendo um estudo de previsão, ter harmônicas relevantes negligenciadas pode impactar nos valores dos índices harmônicos no sistema e, conseqüentemente, nas soluções, isso pelo fato de que a solução está diretamente relacionada com o modelo do sistema. Outro ponto negativo desta metodologia é que a solução final do problema pode ser encontrada após rodar mais de uma vez o algoritmo. A solução somente foi encontrada após a alocação de filtros de outra ordem harmônica, ao verificar que com a alocação de filtro de 7ª ordem harmônica o sistema continuou com nós fora dos limites, o autor rodou novamente o algoritmo alocando filtros de 5ª ordem harmônica, para reduzir todos os índices até o limite da norma *IEEE Std. 519/1992*. Na simulação para minimizar o total de  $THD$ , o algoritmo encontrou a quantidade de 3 filtros trifásicos de 5ª e 7ª ordens alocados em

diversos nós do sistema de 21 nós. Já quando a função objetivo foi a máxima *THD* do sistema, o algoritmo encontrou 5 filtros trifásicos de 5ª e 7ª a serem alocados.

Em Hong & Chang (1996) são alocados filtros ativos num sistema de distribuição de 18 nós. O problema multi-objetivo é minimizar a injeção de corrente do filtro enquanto mantém os índices de distorções harmônicas abaixo do limite, baseado no *IEEE Std. 519*. Os autores consideram os filtros ativos com ótimo funcionamento e eficiência, porém, o problema de instalação dos mesmos no SEP é complexo. Utilizam o método *Generalized Benders Decomposition Theory (GBDT)* para a busca de otimização dos locais e tamanhos dos filtros a serem alocados num sistema de 18 nós, onde existem harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 19ª, 23ª e 25ª ordens. São estipulados 11 nós candidatos a receberem os filtros, nos resultados 2 filtros ativos trifásicos são alocados no sistema, mostrando-se eficientes ao manter *THD* abaixo do limite.

No trabalho de Berizzi & Bovo (2000) é feito o processo de otimização para determinar a solução ótima de escolha do local e tamanho de filtros passivos para minimizar as distorções harmônicas de tensão de um sistema elétrico, o problema é mono-objetivo, visando minimizar a *THD* do sistema. Os dados de entrada são o número e ordens relevantes dos filtros. É utilizado o AG nesta metodologia, os autores o consideram uma ferramenta eficiente para resolução desse tipo de problema devido à estratégia evolutiva para encontrar a melhor solução. O código mescla binário com inteiro, a verificação da metodologia foi feita em dois *test systems*, um do *IEEE*, de 14 nós e outro da *New England test system*, 39 nós, que conforme os autores não são sistemas típicos de distribuição e ambos são modificados com inclusão de cargas não lineares. No caso do sistema de 14 nós foram 2 filtros trifásicos alocados, de 5ª e de 7ª; enquanto que no caso do sistema de 39 nós foram 4 filtros trifásicos, de 6ª e 8ª ordens.

No trabalho de Chang *et al* (2002) determinam-se barras candidatas a alocação do filtro passivo trifásico de acordo com o procedimento de localização, o problema é mono-objetivo e

é resolvido para encontrar o valor ótimo de cada componente de filtro de forma a minimizar a *THD* de cada barra do sistema de distribuição, considerando limites de distorção harmônica total e individual em cada barra, baseados no *IEEE Std. 519*. Este estudo mostra a análise de distorções harmônicas para os principais índices harmônicos, pois a distorção individual e a total de cada barramento é levada em consideração. Porém, a metodologia não demonstra o comportamento de desequilíbrio presente em SEP de distribuição. O estudo é realizado em um sistema de distribuição de 18 nós e o resultado mostra alocação de dois filtros trifásicos em duas barras do SEP, de 5ª e 7ª ordens. As *THD* de tensão ficam abaixo do limite com a instalação dos filtros.

Em Teng Au & Milanovic (2007) a alocação do filtro passivo trifásico é dada com duas possibilidades: na barra com a máxima *THD* do sistema ou na barra onde pode ocorrer a maior redução da média de *THD* do sistema. O método utilizado pelos autores é de sensibilidade. As cargas não lineares são modeladas como fontes de correntes harmônicas em cada barra do sistema e com simulação é mensurada a *THD* em cada uma das barras. Um estudo que traz duas sugestões para a solução do problema é interessante do ponto de vista de que na realidade, muitas vezes uma concessionária ou um consumidor pode ter também dois caminhos a seguir. Testando virtualmente um e outro, através da comparação entre ambos, pode ser obtida a melhor escolha. Conforme os autores, o objetivo primário ao colocar um filtro no barramento mais sensível é a redução máxima de *THD* no mesmo, e conseqüentemente a redução sistêmica de *THD*. Porém, muitas vezes essa redução em todo o sistema pode não ser atingida, dessa forma, o objetivo secundário é encontrar a barra mais sensível, para evitar conectar grandes cargas não-lineares naquele local no futuro. O estudo de caso é feito com um sistema de distribuição de 20 nós e as ordens dos filtros passivos são de 5ª e 7ª.

Ghiasi *et al* (2008) utiliza AG para determinar parâmetros e local de instalação de filtro passivo sintonizado em um sistema de distribuição, sendo a instalação em consumidores

residenciais, e somente barramentos que produzem distorções harmônicas são considerados como candidatos a receberem filtros. A função mono-objetivo é de minimização dos valores dos componentes do filtro, e as restrições são baseadas nos limites de *THD* do *IEEE Std. 519*, na intenção de cumprir a norma em todos os barramentos de um sistema elétrico equilibrado. Foi utilizado o *IEEE 13 bus balanced industrial distribution system* para realizar estudo de caso, onde 3 nós foram escolhidos para receberem os filtros passivos trifásicos, o resultado foi a instalação de filtro de 7ª ordem harmônica.

Em Chang *et al* (2009) o problema mono-objetivo é minimizar o custo do filtro passivo trifásico, a sua perda de potência, a distorção total de correntes harmônicas e distorção harmônica total de tensão em cada barra, simultaneamente. São atribuídos pesos ( $w$ ) para cada parte que compõe a formulação desenvolvida pelos autores, é utilizado o AG para encontrar a solução. O algoritmo é executado em diferentes configurações de condições de operação do sistema elétrico, resultando em diferentes soluções, dependendo da prioridade dada a cada composição da função. Conforme os autores, a mesma função objetivo pode ser utilizada independente de mudanças de mercado ou mesmo do cenário do sistema durante o período do planejamento do filtro. O estudo foi feito num sistema industrial onde já existiam filtros passivos trifásicos sintonizados de 5ª e 7ª ordens instalados, além dessas, as harmônicas predominantes naquele cenário eram de 17ª e 19ª. Como resultado, diversas soluções de esquemas com filtros sintonizados (de 3ª, 5ª, 7ª, 11ª), passa-alta e tipo C são as possibilidades de filtros a serem alocados no SEP, dependendo do modo de operação da planta.

Conforme o artigo de Niquini *et al* (2010) para mitigação de distorções harmônicas uma análise do comportamento do sistema inteiro com o filtro alocado é necessária, simulando todas as possibilidades de alocação de filtro. Porém para sistemas maiores e com elevado número de filtros disponíveis essa alternativa passa a não ser viável, portanto, utiliza-se o AG. Juntamente com o AG é utilizada a Metodologia de Injeção de Corrente Harmônica Trifásica

(MICTH), de Variz (2006), que os autores consideram uma ferramenta precisa no estudo de fluxo harmônico. Nesse artigo o objetivo é a minimização da *THD* média do sistema, e, segundo os autores, apesar de ser possível um bom resultado para a *THD* média no sistema estudado (obtendo porcentagens menores com a alocação dos filtros nos locais sugerido pelo algoritmo) as *THD* em algumas barras podem continuar altas, podendo até ultrapassar os limites máximos. Então são atribuídos pesos para cada barra, definindo assim, em quais das barras há prioridade de alocação de filtro, para um resultado melhor na *THD* média da tensão, porém sem ultrapassar os limites permitidos em cada uma das barras. O estudo foi feito com o *test feeder IEEE 14 bus* que foi modificado, o sistema ganhou componentes trifásicos e aumento de harmônicas, mas as cargas são equilibradas. Foram simulados 2 casos, um simples e outro complexo. No caso simples um filtro passivo trifásico sintonizado de 3ª ordem foi a solução. O resultado para o caso complexo foi a alocação de 3 filtros passivos trifásicos no SEP, de 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica respectivamente, porém neste caso os limites de distorção harmônica não foram considerados.

Dando continuidade ao trabalho anterior, em Variz *et al* (2012) o objetivo é a minimização da média de distorção harmônica do sistema, minimizando a *THD* de tensão no sistema. Através da metodologia MICTH com iteração por Newton-Raphson (Variz, 2006), em interação com o AG, o estudo tenta solucionar o problema mono-objetivo, que utiliza, pesos associados aos nós do sistema para indicar os locais mais importantes. A metodologia é testada no *test feeder* de 14 barras do *IEEE*, com adaptações para estudo com harmônicas através da inserção de fontes harmônicas adicionais, porém, novamente sem abordar cargas desequilibradas. No artigo é provado com a simulações e resultados que a alocação de filtros em locais onde imagina-se serem os ideais, por serem os que apresentam maior quantidade ou pior índice de distorções harmônicas, muitas vezes resultam em pioras no sistema como um todo, podendo aumentar muito os índices harmônicos em outros nós, e conseqüentemente,

diminuindo a QEE no SEP. Dois estudos de caso foram utilizados para testar a metodologia, ambos com o *IEEE 14 bus*, caso 1 é simples e caso 2 complexo. Nos resultados o primeiro tem 1 filtro passivo sintonizado trifásico de 3ª ordem enquanto o segundo são 3 filtros passivos sintonizados trifásicos, um de 3ª ordem e dois de 5ª.

No estudo de Stone *et al* (2012) sugere-se os locais de instalação de filtros passivos trifásicos que melhor preservam a QEE no sistema, conforme os autores. Sendo um problema mono-objetivo, o intuito é reduzir a *THD* em uma barra, de forma a obter o maior impacto no sistema em geral, verificando-se, assim, a sensibilidade do sistema devido à cada nó que a ele pertence. A técnica de análise que os autores utilizam é indicada somente para pequenos SEP, onde, através de simulação é percorrido todo o sistema alocando um filtro em cada nó, por vez. Assim, com o uso da métrica *Harmonic Similarity (HS)*, que estabelece uma relação entre os distúrbios nas barras do sistema, verificam-se as barras com menor e maior sensibilidade ao filtro e às modificações do SEP. As ordens harmônicas consideradas no estudo são tradicionais em sistemas elétricos, mas o autor extrapola nas magnitudes aumentando-as para que se alcance um valor maior de *THD* no sistema. No estudo de caso assumem-se as ordens harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª e 17ª ordem para a modelagem e simulação, que é feita no *software PSCAD*. O estudo é feito com o sistema *IEEE 13 bus balanced* com dois casos distintos, no primeiro as cargas não lineares estão em 2 nós de níveis diferentes de tensão e no segundo, em 2 nós de mesmo nível de tensão. A pesquisa considera o limite de distorção total em cada barra, porém, não os limites das distorções individuais. O filtro é alocado em cada um dos 13 nós por vez, verificando a sensibilidade das outras barras do sistema quanto à *THD* de tensão das mesmas, a mensuração é feita através da *HS*.

Em Pandi *et al* (2012) é elaborado um algoritmo para determinação de filtro passivo trifásico visando o objetivo único de minimizar a máxima *THD* no sistema, ou seja, minimizar a *THD* que apresentou o valor mais alto entre as barras do sistema. São considerados o tipo de

filtro, fator de qualidade e a ordem harmônica sintonizada do filtro. Há duas possibilidades de filtros a serem implementadas no sistema analisado: o sintonizado de 5ª e 7ª harmônica ou passa alta. O método utilizado é o *Particle Swarm Optimization (PSO)*, método pouco utilizado na área, uma vez que foi verificado que grande parte dos estudos nessa área utilizam AG. Para testes foram utilizados os sistemas de distribuição *IEEE 18 bus* e *IEEE 33 bus* e para cada um deles foram simulados 2 casos, no primeiro 1 filtro passivo trifásico foi alocado e no segundo, 2 filtros passivos trifásicos eram utilizados, e, assim, foram verificados os impactos de diminuição de *THD* de tensão nos sistemas. Em todos os casos houve redução da *THD* de tensão, que estava em 7,46% e 9,68%, sem filtros, para abaixo do limite de 5%, conforme a norma *IEEE Std. 519*.

Leite (2013) tem como objetivos maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) dos filtros instalados e ao mesmo tempo minimizar a *THD* de corrente no PAC e de tensão nas barras do sistema elétrico industrial, conforme norma brasileira PRODIST Módulo 8/2010, através da determinação dos parâmetros dos filtros, e otimizando a seleção do tipo de filtro a ser utilizado. O problema é multiobjetivo e é utilizado o algoritmo *NSGA II* (Deb *et al*, 2002). Os tipos de filtros para a solução do problema são sintonizados e passa alta. Para testar a metodologia foi utilizado um sistema industrial de 10 nós em diferentes alternativas de solução. O *NSGA II* é responsável pela otimização dos parâmetros dos filtros e tipos a serem alocados, e o resultado traz um conjunto de soluções (a fronteira de Pareto) majoritariamente composto por filtros sintonizados. Para definir a solução final entre as possibilidades da fronteira de Pareto, outros critérios estipulados pelo autor ou usuário são necessários. Uma solução escolhida pelo autor mostrou 8 filtros passivos trifásicos a serem alocados em 3 nós do SEP, da seguinte forma: no nó 4, filtros de 5ª e de 7ª, no nó 8, filtros de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª, e no nó 10, filtros de 5ª e 7ª ordens harmônicas.

Em Alhaddad & El-Hawary (2014) é apresentada uma aplicação de otimização baseada no algoritmo *Ant Colony System Optimization (ACS)* na qual a função mono-objetivo é reduzir perda de potência. O ACS busca o tamanho, dado em kvar, e local do filtro a ser instalado no SEP, mantendo as distorções harmônicas dentro do limite. Para estudo de caso foi utilizado um sistema *13 bus distribution system* e a solução trouxe o filtro de tamanho 600 kvar a ser alocado no nó 7, assim, reduzindo em 29% as perdas de potência do SEP e as *THD* diminuiram levemente na análise geral do sistema, e se mantiveram abaixo do limite.

Em Bagheri *et al* (2016) o estudo proposto é focado para sistemas de distribuição com modernas residências. A metodologia aloca múltiplos filtros aleatoriamente em um sistema de distribuição residencial. O desafio é a inserção de grandes quantidades de filtros de forma mais econômica possível. O estudo é realizado através de um típico sistema de distribuição com carga residencial norte americano através do método de sensibilidade. A ideia é alocar filtros em um ponto considerado diferente do usual, o que os autores chamam de “*plug-in filters*”, ou seja, alocar filtros em sistemas de distribuição de baixa tensão, no lado secundário do transformador de serviço, no alimentador secundário, especificamente no lado da entrada elétrica das residências. Sabendo que o usual seria em 2 outros locais: ou no sistema alimentador primário de distribuição ou no alimentador secundário de distribuição, mas no lado do transformador, os autores consideram sua proposta inovadora. A ideia toda gira em torno de uma melhor aceitação por parte das concessionárias de energia de metodologias de alocação de filtros sugeridas nos anos recentes. Os autores comentam que o desafio não está na estrutura ou escolha dos tipos de filtros, passivos e ativos são bem aceitos e há muita pesquisa envolvendo ambos, a instalação dos mesmos é a motivação da pesquisa atual. Os autores escolhem o filtro ativo para ser alocado como “*plug-in filters*” devido principalmente ao tamanho, não maior do que o medidor de energia da casa, e ao custo do filtro, que em baixa tensão se torna menor para filtros ativos. Mesmo tendo escolhido filtros ativos para agirem

como filtros “*plug-in*”, os autores fazem simulação com filtros passivos, a fim de comparar os resultados. Os autores consideram que há menor gasto alocando filtros *plug-in* no lado residencial com a mesma eficácia de mitigação harmônica. Porém, esta solução é pontual, se existirem diversos pontos problemáticos, serão diversos filtros a serem alocados em residências, este procedimento vai encarecer a solução à medida que se alocam mais filtros ativos num sistema muito poluído de distorções harmônicas ou de maior proporção.

Shi *et al* (2017) atenta que devido a complexidade da estrutura dos sistemas de distribuição e interação entre fontes harmônicas, o desempenho da instalação dos filtros em mitigação de distorções harmônicas não tem sido totalmente verificada no modelo detalhado de sistemas de distribuição. O estudo é baseado em alocação de filtros passivos em sistemas de distribuição, porém verificando o funcionamento dos mesmos quando alocados na entrada das residências, ou seja, ainda no lado secundário do transformador, mas na parte das casas, ideia que foi proposta em Bagheri *et al* (2016) e denominada “*plug-in filter*”, porém na proposta de Bagheri foram utilizados filtros ativos. O estudo analisa ainda comportamento e atuação do filtro mediante a variação de carga residencial. As ordens harmônicas de interesse são 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> para atuarem no filtro sintonizado, ou conjunto dos mesmos. Os autores usam a simulação com *Monte Carlo Platform* e *MatLab*® onde modelam um SEP genérico com características residenciais em distribuição. Os filtros, conforme os autores são conectados entre as fases A e B das casas. Não há uso de algoritmos de otimização, uma vez que a ideia é analisar e comparar o desempenho do filtro em 3 diferentes posições: sistema primário de distribuição, sistema secundário de distribuição (lado do transformador) e sistema secundário de distribuição (lado da residência), abordando também a variação de carga e a atuação do filtro mediante isto. Conclui que a alocação de um conjunto de filtros sintonizados no lado residencial pode eficazmente mitigar o máximo de distorções harmônicas, não importando a

condição de variação de carga. A redução média nas ordens analisadas foi de 30% após a instalação do conjunto de filtros sintonizados.

Em Leite, Abril & Azevedo (2017) a formulação multiobjetivo tem a finalidade de maximizar a economia anual e maximizar a melhoria da QEE alocando capacitores ou filtros passivos em um sistema de distribuição. Isso é feito com o uso do *NSGA II*, onde as funções objetivo são maximizar a economia de custo, minimizar o máximo desvio de tensão, minimizar a máxima *THD* e a máxima *IHD*, seguindo os limites do *IEEE Std. 519/2014*. Conforme os autores, durante o processo de otimização, reduzir somente o máximo, faz com que todo o sistema melhore concomitantemente. São utilizados dois casos para testar o algoritmo, um de 69 nós e outro de 85, de Das *et al* (1995), para cada um são pré-definidos 15 e 25 tipos de compensadores, respectivamente, a serem alocados. Os filtros passivos para mitigação de harmônicas são de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem. Os resultados mostram o tipo, tamanho, ordem do filtro e o nó a ser alocado. As soluções são apresentadas na fronteira de Pareto e são necessários critérios extras para a decisão final entre as opções apresentadas na fronteira.

Barukcic *et al* (2017) através de função multiobjetivo propõem otimizar projeto e alocação de filtros passivos em sistemas de distribuição. Os objetivos são diminuir perdas de potência e mitigar distorções harmônicas, utilizando a norma europeia EN 50160 como base de limites. O estudo é feito com interação através de softwares abertos, o *OpenDSS*, para cálculo do fluxo de potência, e dois softwares em Python, para otimização evolucionária. O *Distributed Evolutionary Algorithms in Python (DEAP)* e o *Python Parallel Global Multiobjective Optimizer (PyGMO)* são utilizados para comparar o desempenho de dois AE na resolução de um problema MO, considerado complexo. O estudo utiliza pacotes disponíveis em ambos softwares dos algoritmos *NSGA II* e *SPEA 2*, que são largamente utilizados em aplicações de engenharia elétrica com foco em SEP, conforme os autores. É feita a simulação de um *test feeder* de 69 nós no *OpenDSS*, onde sobressaem as harmônicas de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens, e a

cossimulação para design e alocação de filtros com os AEs resultam, para cada um, uma gama de soluções com a fronteira de Pareto. Utilizando as mesmas configurações de população e geração, o *NSGA II* foi o AE que apresentou melhores resultados de todos os casos para diminuir *THD* e perdas de potência, quando simulado no *PYGMO*. Outras configurações, como operadores evolucionários, não são passíveis de serem modificadas no pacote, foram utilizados 160 indivíduos e 600 gerações nos algoritmos.

Em El-Arwash *et al* (2017) estudos de alocação ótima e dimensionamento de filtros são apontados como um dos tópicos de pesquisa mais pesquisados conforme os autores, nos dias de hoje. A pesquisa aloca filtros ativos através do uso dos algoritmos de otimização AG e PSO, o AG é utilizado para fazer uma inicialização e gerar soluções factíveis e o PSO segue a otimização até obter a solução ótima. A F.O. é monoobjetivo composta de um somatório de funções cada qual com um peso ( $w$ ). Para aplicação da metodologia é utilizado um sistema elétrico real, uma usina de dessalinização de água, de 19 barras. E compara-se o uso somente do AG e do AG com o PSO, os resultados demonstram que a utilização do AG para inicialização traz um resultado um pouco melhor, onde o mínimo da F.O. encontrado é 0,730 contra os 0,767 do primeiro. Mas a real vantagem se mostrou no tempo de simulação que passou de 120h para 30h. A *THD* de tensão em ambos foi cerca de 0,038.

### **3.3.2 Metodologias de Projeto de Filtros Passivos**

Neste subcapítulo alguns estudos que vão ao encontro da proposta de tese apresentada no presente trabalho são comentados. Os trabalhos, apesar de tratarem a respeito de projeto de filtros passivos, trazem ideias que podem ser usadas ou adequadas à pesquisa proposta. Os seguintes estudos são comentados focando no papel de complementação que cada um deles cumpriu para a pesquisa proposta.

No artigo de González & McCall (1987) é descrito o design de filtros para a mitigação de harmônicas em um sistema industrial. O que os autores buscam é o “*minimum filter*”, ou seja, o filtro que mitiga adequadamente harmônicas com o menor custo possível, e ainda fornece alguma potência reativa para o sistema. Algumas vezes, além do filtro escolhido, também são necessários outros filtros sintonizados complementares para melhorar o sistema.

Em Upadhye & Atre (1998) o objetivo foi determinar os parâmetros de filtros passivos de harmônicas usando otimização não linear. Conforme os autores muitas formas de mitigar o problema de distorção harmônica já haviam sido propostas na área de sistemas elétricos, mas a mais frequente e fácil continuava sendo a alocação de filtros passivos. Na definição de projeto de filtros para distorções harmônicas é feita uma combinação de componentes R, L, C, levando-se em consideração as harmônicas predominantes, para elaboração de filtro sintonizado e, para as outras, um filtro passa-alta é utilizado. Se a magnitude de cada uma dessas outras harmônicas não for muito alta, o filtro passa-alta resolverá o problema. Porém, pode-se utilizar um caminho opcional ao invés do convencional, essa opção se dá com a otimização de algoritmos para o melhor uso de filtros. No artigo são feitos 3 diferentes estudos de otimização, o primeiro com enfoque na máxima redução da distorção harmônica total, o segundo para melhor redução na frequência fundamental, ou seja, mínimas perdas no sistema em 50/60 Hz e o terceiro, envolve a otimização do custo do filtro.

O artigo de Chou *et al* (2000) propõe o planejamento de grandes filtros passivos para distorção harmônica em alta tensão, quatro tipos de filtros são selecionados para o projeto, são eles: filtro sintonizado único, de segunda ordem, de terceira ordem e filtro amortecido tipo C. Em geral, como a maioria das cargas não lineares está situada no nível de baixa tensão e o sistema de baixa tensão tem uma alta e estável impedância da fonte o desempenho do filtro harmônico alocado em nível de baixa tensão tem melhor performance. A proposta é baseada em multi-tipo e multi-configuração e considera a variação da impedância da fonte, requisitos

de filtragem harmônica e a melhoria do fator de potência, ao mesmo tempo. Foi implementada a formulação da função objetivo, baseada no menor custo, e as funções de restrição, divididas em filtragem de harmônicas, fator de potência e outras condições. O algoritmo de otimização é baseado no método *Simulated annealing (SA)*.

Verma & Singh (2010) utilizaram o AG para projetar filtros passivos em plataformas *offshore* em níveis baixos de tensão com a finalidade de minimizar *THD* de corrente na fonte. O foco se concentra nas harmônicas de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens. O código utilizado é binário e a função é multiobjetivo com atuação de penalidades. Os autores afirmam que a busca paralela, intrínseca no AG, pode fazer com que o resultado forneça o ótimo global, mas assumem que somente o aproximado-ótimo foi encontrado.

Em Zobaa *et al* (2010) a primeira consideração feita pelos autores leva em conta que a simples inclusão de bancos de capacitores em um sistema elétrico para corrigir fator de potência não considera presença de distorções harmônicas e de cargas não lineares, o que pode gerar resultados errôneos e problemas quanto a condições de ressonância no sistema. O estudo busca obter os valores de L e C, desconsiderando R devido à seu baixo valor frente à reatância fundamental, para sistemas de transmissão, considerando variação no tempo tanto da impedância da carga quanto da impedância do sistema, e ainda das fontes de distorção harmônica. Na otimização, feita com *Golden section*, os objetivos são maximizar o fator de potência ou minimizar perdas na linha de transmissão, sujeito às restrições de valores de capacitores *shunt*, apresentados em norma (*IEEE standards for shunt power capacitors*). Em cada simulação feita são consideradas as ordens harmônicas de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>, e encontrados valores  $X_L$  e  $X_C$  dos filtros passivos para cada momento analisado.

Kovernikova & Thanh (2012) propõem uma formulação mono-objetivo para otimização do cálculo dos parâmetros de filtros passivos a serem alocados em sistemas de distribuição. O objetivo é minimizar perdas de potência ao mesmo tempo que mantêm

restrições do filtro nos limites aceitáveis. Estas são tais como valor de tensão admissível, potência reativa, fator de qualidade do filtro. O estudo de caso é feito através de um sistema de 13 nós. Considera-se calcular filtros de 3ª e 5ª ordens harmônicas para alocação em um nó do sistema, o cálculo dos parâmetros é feito com o algoritmo *PSO*. Nos resultados observa-se que o filtro de 3ª harmônica não diminui tanto as correntes harmônicas quanto o de 5ª harmônica, que demonstra um melhor desempenho para a mitigação de distorções do sistema, o algoritmo *PSO* é considerado eficiente para o cálculo dos parâmetros.

Em Fahmy *et al* (2017) é utilizado o *NSGA II* para projetar filtros passivos do tipo *damped double-tuned* para alocação em sistemas de distribuição. Os autores pretendem comparar dois esquemas de conexão deste filtro através de um problema multiobjetivo que tem o intuito de minimizar perdas de potência das linhas e do filtro simultaneamente. Também propõe manter *IHD* e *THD* dentro dos limites do *IEEE 519* e o fator de deslocamento num índice aceitável. A modelagem é feita com equivalente trifásico baseado em um sistema industrial, as cargas não lineares são fontes de corrente e tensão. Os filtros são compostos por R, L e C em dois tipos de configurações, chamados DDT1 e DDT2 que se diferenciam pela configuração da resistência no esquema do filtro, o segundo tipo, onde a resistência é em série com o capacitor foi considerado melhor para mitigação de distorções harmônicas. O algoritmo *NSGA II* se mostrou uma boa ferramenta para otimização de projeto de filtros passivos.

Percebe-se que muitas vezes as metodologias de projeto de filtros não assumem a alocação dos mesmos no sistema, elas estão focadas somente no cálculo dos parâmetros RLC dos filtros.

Em sinergia com o tema tratado no presente estudo, Fernandes (2011) elaborou uma técnica de localização de cargas causadoras de distorções harmônicas, o autor utilizou como ferramenta auxiliar o *ATPDraw* simulando medidas denominadas por ele como “históricas” e

“atuais”, através de um banco de dados, o algoritmo baseado em otimização por enxame de partículas atuou localizando as cargas mais relevantes.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO ESTADO DA ARTE

Nesta seção serão apresentadas as considerações sobre a revisão bibliográfica. A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam as principais características das metodologias de alocação de filtros abordadas neste capítulo e a comparação com a presente proposta de tese.

O primeiro tópico que se observa nas metodologias previamente propostas diz respeito ao local, características e nível de tensão para o qual o estudo está se propondo fazer, que majoritariamente é para sistemas de distribuição. Este tipo de sistema tem como característica ser desequilibrado, devido à assimetria das linhas e o desbalanço das cargas. Porém, na análise feita, observa-se que nem sempre se utilizam ferramentas que garantem que a metodologia proposta para este tipo de sistema elétrico funcione com fidelidade à realidade.

Conforme verificado na pesquisa, muitos autores utilizam uma prática de solução que prevê o modelo com equivalente das fases das linhas e/ou cargas do sistema. Percebe-se isto quando para testes e validação das pesquisas são utilizados sistemas equilibrados, ou um equivalente representando as três fases de sistemas desequilibrados.

Outro ponto, consequência do primeiro, são as análises do SEP e seu comportamento, que acabam não sendo feitas por fase, mas sim por cada ramo trifásico do sistema. Em um sistema que contém ramos monofásicos, bifásicos e trifásicos, como é o caso de muitas redes de distribuição, é importante a análise em cada uma das fases, considerando, assim, essas características. Alguns trabalhos, como o de Niquini *et al* (2010), utilizam a análise por fase, porém, diferentemente da proposta da presente pesquisa, os dados da fase analisada são considerados iguais para as outras duas, fazendo com o que sistema adquira uma configuração de equilíbrio, se tornando um sistema equilibrado.



Tabela 8: Tabela de comparação de metodologias – Parte 2

METODOLOGIA	Análise da $IHD_v$	Cálculo dos parâmetros	Estudo com interação	Função multiobjetivo	Uso de A.E.	Uso de A.G.
Hartana & Richards (1992)		X				
Chang & Richards (1994)		X			X	X
Hong & Chang Y-K (1996)		X		X		
Berizzi & Bovo (2000)	X	X			X	X
Chang <i>et al</i> (2002)	X	X				
Teng Au & Milanović (2007)						
Ghiasi <i>et al</i> (2008)		X			X	X
Chang Y-P <i>et al</i> (2009)		X			X	X
Niquini <i>et al</i> (2010)			X		X	X
Variz <i>et al</i> (2012)			X		X	X
Stone <i>et al</i> (2012)			X			
Pandi <i>et al</i> (2012)	X	X			X	
Leite (2013)	X	X		X	X	X
Alhaddad & El-Hawary (2014)		X			X	
Bagheri <i>et al</i> (2016)	X					
Shi <i>et al</i> (2017)	X		X			
Leite <i>et al</i> (2017)	X	X		X	X	X
Barukcic <i>et al</i> (2017)	X	X	X	X	X	X
El-Arwash <i>et al</i> (2017)					X	X
<b>Proposta de Tese</b>	X	X	X	X	X	X

Filtros passivos, ativos e híbridos são utilizados para mitigação de distorções harmônicas em redes de distribuição. Durante a busca por estudos na área para proceder na revisão do estado da arte, observou-se um grande número de pesquisas com filtros ativos para baixa potência, mas estes não acrescentavam nenhuma contribuição para o desenvolvimento da presente pesquisa desta tese. Foram encontradas pesquisas com teor de otimização e alocação de filtros ativos e híbridos para sistemas de distribuição, mas como o projeto destes é muito diferente do projeto dos filtros passivos, que era a opção dentro da metodologia sugerida (por conta principalmente dos custos e simplicidade) estas foram ignoradas. Por conta disso, poucos são os artigos que abordam o uso de filtros ativos nesta análise. As pesquisas com uso de filtros passivos nas metodologias existentes no que tange estudos de alocação de filtros em sistemas elétricos de distribuição foram melhor analisadas na revisão bibliográfica.

Filtros alocados por fase são encontrados na bibliografia revisada quando se aborda filtros ativos em baixa potência. Para filtros passivos em SEP de distribuição, e mesmo sistemas industriais, não foram encontrados quaisquer artigos até o momento que tratem de alocação de filtro por fase no sistema, apenas foram encontrados dois artigos que sugerem a alocação por fase em sistema residencial. Desta forma, considera-se uma inovação do estado da arte esta proposta, sendo ela uma pesquisa inicial, que traz bons resultados em sistemas com determinadas características e um novo caminho de mitigação de distorções harmônicas para estes.

As análises dos índices de QEE são sempre feitas através da *THD* de tensão da barra, mas muitas vezes também utiliza-se um somatório ou uma combinação das *THD* para proceder na análise. As *IHD* de tensão nem sempre são analisadas, apesar de haver indicadores para distorção harmônica individual em ambas normas citadas anteriormente (em pelo menos uma versão das mesmas). O motivo mais razoável para este fato é que cada componente harmônica diminui juntamente com o total, por se tratar do somatório, conforme observa-se nas equações.

O projeto de filtro, apesar de constar como parte de muitas pesquisas, em algumas, trata-se apenas do cálculo da capacitância necessária em determinado ponto, para que se atinja uma potência reativa melhor no sistema. Em outras pesquisas, percebe-se que apenas o projeto de filtro já é o tema principal de determinadas pesquisas, e não foi objeto de estudo do presente trabalho.

A análise com interação entre programas é colocada em pauta nesta revisão pois considera-se relevante o uso de uma ferramenta de modelagem, que inclui a análise do fluxo harmônico, e atenta às diversas e detalhadas características de cada componente do SEP, principalmente para estudos em sistemas de distribuição. Algumas dessas ferramentas oferecem facilidade de acesso e modificações pelo tomador de decisões, portanto, esta é uma prática que vem sendo utilizada cada vez mais.

As funções multiobjetivas se tornaram tendência há relativamente pouco tempo nesta área de QEE. Elas têm sido utilizadas neste tipo de estudo com mais frequência desde cerca de 5 anos, porém muitos autores já utilizam multiobjetivos para diversos estudos em análise de SEP.

O uso de AE e especificamente AG é verificado para que seja possível distinguir o uso no passado e mais recentemente dos mesmos, conforme os algoritmos têm sido melhorados no decorrer dos anos. Assim, busca-se verificar quais as principais vertentes têm sido preferidas para proceder em assuntos de otimização na área da engenharia elétrica.

## 4 PROPOSTA METODOLÓGICA

### 4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Em sistemas de distribuição, distorções harmônicas causam preocupação quanto à QEE devido à quantidade de injeção de corrente harmônica por equipamentos com característica não linear. Com o aumento do uso desses equipamentos nas últimas décadas, as normas que regulam os limites se tornaram mais relevantes, e maior atenção tem sido demonstrada por parte de concessionária e consumidores para a QEE. Para mitigar distorções harmônicas normalmente é sugerido uso de filtros, porém, a alocação em nós que apresentam os maiores indicadores de distorção harmônica ou as maiores quantidades de cargas não lineares nem sempre é a melhor escolha, podendo causar aumento da distorção no próprio nó ou em outros devido à modificação do fluxo harmônico no sistema, com a modificação das correntes harmônicas presentes nele.

Muitas vezes uma boa opção para a análise de distorções harmônicas em um SEP é a simulação de cada possibilidade de alocação de filtros, ou seja, uma busca exaustiva verificando o resultado. Essa metodologia é possível em SEP de pequeno porte, no entanto o problema se torna exponencialmente mais complexo com aumento de nós a serem analisados, i.e., há necessidade de utilização de uma ferramenta que busque a solução ótima de forma automatizada.

Conforme Delbem (2005) em sistemas de distribuição existem problemas de otimização que costumam ter função objetivo não linear e não contínua. No problema de reconfiguração em SEP, citado pelo autor, além de muitos locais ótimos como solução, há características que tornam difícil a aplicação de programação matemática para o problema. De forma similar aparecem os problemas de alocação de filtros em sistemas de distribuição, com uma gama de locais ótimos como solução.

Os filtros para mitigação de distorções harmônicas são usualmente alocados trifasicamente, ou seja, o local de alocação é necessariamente em um ramo trifásico. Este tipo de recurso impede que haja a possibilidade de instalação de filtros em ramos monofásicos ou bifásicos em sistemas que tenham esta característica.

O tamanho do espaço de soluções cresce exponencialmente a medida que o sistema elétrico aumenta, ou seja, mesmo com poucas barras ou nós adicionados ao sistema elétrico estudado, o número de combinações possíveis se torna maior, mas não de forma diretamente proporcional, e sim de forma exponencial.

O problema apresentado é também multiobjetivo, tipo *CMOP* (*Constrained Multi-Objective Problems*), e pode também ser considerado como um problema combinatório uma vez que são múltiplas as combinações possíveis no universo de possibilidades de solução.

Através da metodologia proposta, pretende-se chegar a um resultado ótimo, satisfazendo as peculiaridades que o problema apresenta.

São propostas da metodologia:

- 1) Utilização de algoritmo de otimização heurística para solução de problema multiobjetivo com funções conflitantes.

- 2) Codificação para alocação de filtros em sistema desequilibrado e com circuitos monofásicos e bifásicos.

- 3) Alocação de filtros monofásicos, de forma a contemplar sistemas monofásicos, bifásicos e sistemas trifásicos com grau de desequilíbrio, os quais necessitam de uma abordagem independente para cada fase. Os filtros passivos sintonizados serão instalados no lado do primário do transformador no SDEE analisado.

## 4.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A função objetivo é do tipo multiobjetivo, com propósitos conflitantes entre si. O modelo de otimização proposto neste trabalho para alocação de filtro é dado por (17) - (22), cuja função objetivo é definida pela expressão (17). O objetivo  $F_1$  representando o número de nós/fase que violam os limites THD dado por (20). O objetivo  $F_2$  representa os custos do filtro alocados no sistema elétrico, dado por (19). A otimização está sujeita ao número máximo de filtros disponíveis para instalação (21). Ambos objetivos buscam minimização dos seus valores.

$$\min F = \{F_1, F_2\} \quad (17)$$

$$F_1 = \sum_{n=1}^{n_{\max}} b_n \quad (18)$$

$$F_2 = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \varphi_n \quad (19)$$

Com,

$$b_n = \begin{cases} 1 & \text{se } IHD_{h,n} > IHD_{h,\text{lim}} \text{ ou } THD_n > THD_{\text{lim}} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (20)$$

Sujeito a:

$$\sum_{n=1}^{n_{\max}} c_n \leq n_f \quad (21)$$

$$c_n = c_{h1} + c_{h2} + c_{h3} + c_{h4} + c_{h5} \quad (22)$$

Onde  $n_f$  é o número máximo de filtros permitidos para alocação,  $\varphi_n$  é o custo dos filtros alocados em cada nó/fase  $n$ ,  $b_n$  é uma variável binária para contabilizar o número de nós/fases que estão fora do limite de  $IHD/THD$ ,  $c_n$  é a quantidade de filtros alocados em cada nó/fase,

$THD_n$  é a distorção harmônica total no nó/fase  $n$ ,  $IHD_{h,n}$  é a distorção harmônica individual da  $h$ -ésima harmônica no nó/phase  $n$ ,  $THD_{lim}$  é o limite da distorção harmônica total,  $IHD_{hlim}$  é o limite da distorção harmônica individual de ordem  $h$ .

A alocação dos filtros está condicionada a uma variável binária de decisão  $c_{hi}$  que determina se o filtro de determinada ordem harmônica,  $h_i$ , será instalado em determinado nó/fase  $n$ . Dessa forma, quando  $c_{hi} = 1$ , o filtro está alocado, e quando  $c_{hi} = 0$ , não está alocado (23).

$$c_{hi} = \begin{cases} 1 & \text{se filtro } h_i \text{ for instalado no nó/fase } n \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (23)$$

#### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O uso de programas especializados em simulação do sistema de potência juntamente com ferramentas de otimização, produzindo interação entre ambos, pode contribuir para um resultado com soluções de otimização compatíveis com a realidade do sistema elétrico em estudo no âmbito de mitigação de distorções harmônicas. Uma modelagem mais realista do problema do SEP, levando em conta os fenômenos reais ocorridos em um sistema, proporciona um primeiro passo para uma boa solução final (Barukcic *et al*, 2017).

Uma forma efetiva de estudar a geração, propagação e mitigação de distorções harmônicas em sistemas elétricos é através de modelagem e simulação. É necessário que seja simulado o fluxo de potência das correntes de frequência fundamental e das correntes de frequência harmônica. Com o fluxo de potência harmônico torna-se possível identificar as ocorrências de harmônicas de tensão e corrente e sua propagação através do sistema, operando em regime permanente. A simulação é uma ferramenta de auxílio muito pertinente em estudos que envolvem SEP, e será utilizada para o presente estudo através do programa *ATP*

(*Alternative Transients Program*), um programa do tipo *EMTP (Electro Magnetic Transients Program)* já consolidado em estudos na área.

Na presente pesquisa é proposta uma modelagem no *software ATP* de um sistema com características pertinentes ao estudo de distorções harmônicas para obtenção do fluxo harmônico através da simulação. A interface *ATPDraw* é a escolhida para fazer a modelagem de cada elemento de forma intuitiva e prática.

O *ATPDraw* tem uma interface gráfica, onde diversos modelos são disponibilizados para modelar uma grande variedade de componentes presentes em SEP. O uso dessa interface simplifica a forma de descrever cada um dos elementos pertencentes ao sistema, além de reduzir a probabilidade de erros com respeito aos circuitos a serem simulados, ao mesmo tempo em que traz detalhamento na modelagem do sistema analisado.

O uso de um *software* do tipo *EMTP* se justifica pois, conforme já comentado, Shi *et al* (2017) falam sobre a complexidade da estrutura dos sistemas de distribuição, e ainda, da dificuldade de se analisar a performance da instalação dos filtros em modelos detalhados de sistemas de distribuição, com interação de fontes harmônicas, que ainda é uma realidade da pesquisa na área. Diante disso, o *ATPDraw* se torna uma ótima ferramenta de análise quanto à mitigação de distorções harmônicas em SEP de distribuição.

Além disso, a estratégia de utilizar um programa relativamente de fácil acesso e utilização torna a metodologia atrativa para pesquisadores e profissionais da área, podendo ter boa aceitação por parte de concessionárias ou indústrias.

Com o uso do *ATP* ainda é possível obter fluxos em diferentes possibilidades de inserção de filtros, e assim, coleta-se os dados necessários para dar seguimento à metodologia, através da utilização do *MatLab*®.

Com o *ATP* são obtidos os dados necessários para cálculo dos índices de distorção harmônica para cada possibilidade de instalação de filtros. Essas alternativas são geradas no

*MatLab*® e simuladas *no ATP*, através de um simulador automático, programado no *MatLab*®. Assim, são calculados os indicadores de distorção harmônica em cada barra de análise, para cada alternativa de solução. As opções de filtros disponíveis para alocação são dadas em módulos monofásicos com valores de resistência, indutância e capacitância pré-estipulados, correspondentes à sintonia dos filtros para as ordens harmônicas selecionadas para mitigação no SEP, sendo as ordens que normalmente são típicas em sistemas de distribuição. Neste trabalho, são consideradas as harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem. No entanto, pode-se variar as ordens escolhidas conforme características individuais de cada caso analisado.

O *MatLab*® é o ambiente utilizado para o desenvolvimento do algoritmo de alocação do filtro, sendo este algoritmo adaptado de uma rotina de otimização pré-existente. Considerando o universo de possibilidades de alocação do filtro, o algoritmo obtém os locais de instalação de filtros para os quais a função objetivo é minimizada. A restrição está dada pelo número máximo de filtros disponíveis para instalação, que será definido pelo tomador de decisões (o responsável pela alocação de filtros naquele SDEE).

O algoritmo utilizado na metodologia é baseado no Algoritmo Genético (AG) e utiliza técnica de Otimização Multiobjetivo (MO), ou seja, mais de uma função objetivo é considerada. A tendência no uso de MO tem surgido em cada região ao redor do mundo junto com as modificações do cenário do sistema elétrico, incluindo aspectos econômicos, de mercado, regulatórios e técnicos.

Conforme Berizzi *et al* (2001) as principais vantagens do uso da metodologia MO são:

- permite o gerenciamento de diferentes objetivos;
- torna mais fácil a tomada de decisão;
- traz indicações sobre as consequências da decisão em relação a todas as funções objetivo consideradas.

Além das vantagens relacionadas a técnicas de MO citadas acima, o algoritmo evolutivo selecionado para compor a presente metodologia, o *NSGA II*, traz algumas vantagens que vem ao encontro das necessidades inerentes ao problema a ser solucionado, de alocação de filtros em sistemas elétricos de distribuição. O *NSGA II* é um algoritmo que pode ser utilizado em uma busca que não exige o equacionamento matemático explícito do problema, ou seja, pode ser utilizado com uma formulação implícita. Isto é necessário nesta pesquisa porque a avaliação da F.O. é baseada no *ATP*, portanto, essa característica traz a necessidade do uso de uma técnica metaheurística, sem a necessidade de apresentar uma formulação matemática explícita.

A interação feita nesta metodologia é dada com a parte da modelagem feita através do programa visual *ATPDraw* e a resolução do problema com o *MatLab*<sup>®</sup> através de Algoritmo Genético.

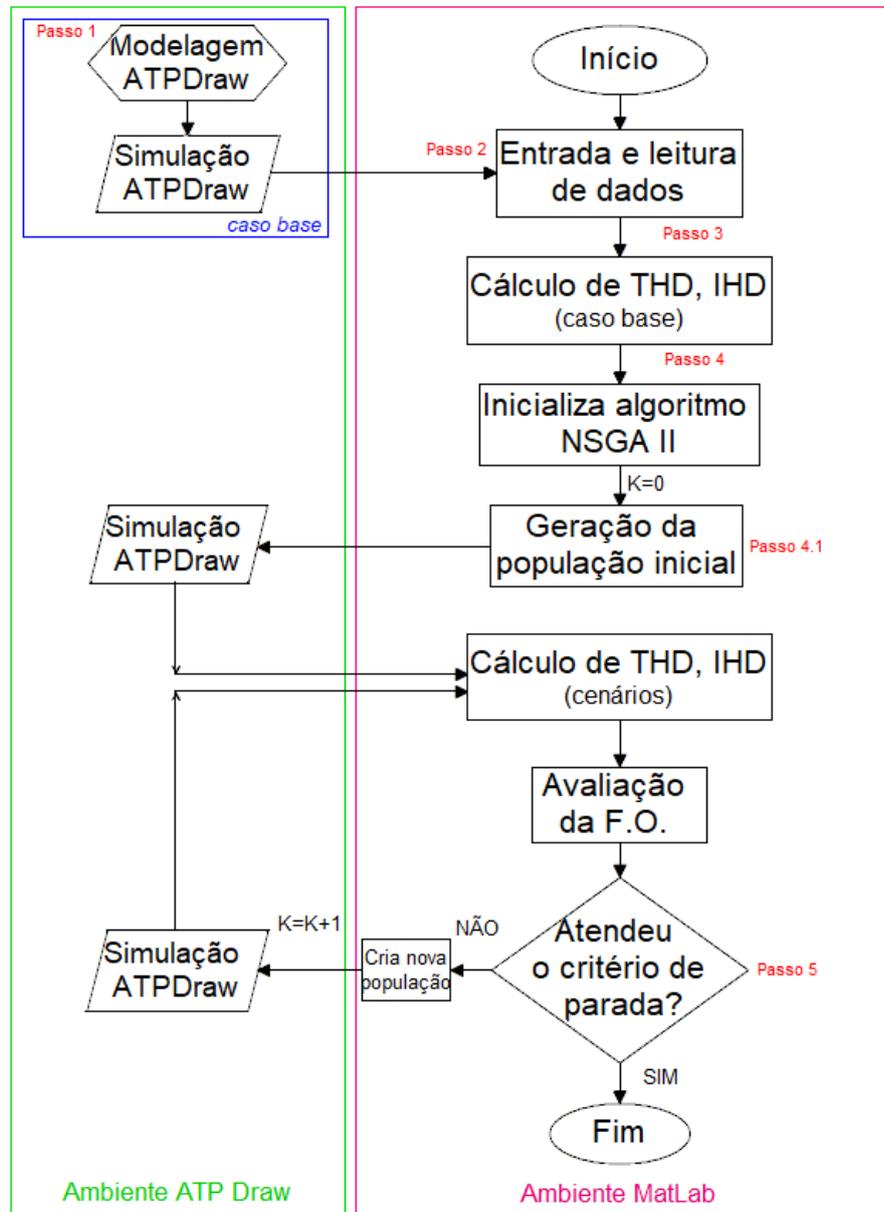
É dado um nome à metodologia proposta nesta pesquisa a cunho de facilidade de citá-la mais a frente, dessa forma é denominada de Metodologia de Alocação de Filtros Passivos Monofásicos ou MAFIPAM.

#### **4.3.1 Procedimentos da MAFIPAM**

Nesta seção serão explicados todos os passos que compõem a MAFIPAM de forma detalhada. Seguindo o fluxo da metodologia proposta, inicia-se pela modelagem até chegar à otimização heurística para solução do problema de alocação de filtros.

Na Figura 10 é apresentado o fluxograma da metodologia. Há uma divisão entre a parte desenvolvida no *software ATP* e no *MatLab*<sup>®</sup>, para que seja possível visualizar a interação entre simulações. Primeiramente o sistema elétrico em análise é modelado e é simulado seu caso base, ou seja, a situação do SEP sem nenhum filtro instalado. São modeladas fontes,

linhas, cargas lineares e não lineares, transformadores e bancos de capacitores. Assim, faz-se a análise harmônica do SEP em estudo.



**Figura 10** Fluxograma da metodologia proposta MAFIPAM. (Fonte: o autor).

Então, dando continuidade à aplicação da MAFIPAM, inicia-se a parte que envolve a otimização baseada em AG, com adaptações pertinentes de leitura de variáveis e nomeação e codificação das variáveis de entrada do caso estudado.

Na interface do *MatLab*<sup>®</sup>, o *NSGA II* é inicializado criando uma população inicial, baseada no espaço de busca. Quanto maior a diversidade de indivíduos, melhor, pois o

algoritmo buscará soluções através de elitismo, mutação e crossover (Deb *et al*, 2002). Cada indivíduo corresponde a alternativas de filtros alocados no sistema. Isto é, o indivíduo  $i$  é um cromossomo composto por  $x$  genes, em que  $x$  é o número de locais (nó/fase) possíveis para instalação de filtros, assim,  $i$  é o vetor que mostra todas as alocações possíveis para um filtro sintonizado monofásico. Este vetor será completado com códigos, de 0 a 32, onde o código 0 é usado para mostrar inexistência de local para inserir filtro, isto é, ausência de fase. Os demais casos correspondem a quantidade e ordem de filtros passivos a serem alocados em um gene. É uma codificação geral, uma vez que existem cinco ordens harmônicas a serem mitigadas,  $h1$ ,  $h2$ ,  $h3$ ,  $h4$  e  $h5$  e os códigos as combinam. Todo este procedimento será explicado mais adiante, com maior detalhamento.

O *ATPDraw* simula cada indivíduo e os dados retornam ao *MatLab*® para avaliar a F.O. Assim, durante a busca pelo melhor resultado, o *NSGA II* mudará os genes dentro dos indivíduos para reduzir o número de barras cujos índices harmônicos de tensão estão fora dos limites e os custos totais dos filtros alocados diminuam. O algoritmo irá parar quando atingir o número de gerações pré-estabelecido, e apresentará diversas fronteiras de Pareto, onde estarão as soluções.

#### 4.3.1.1 Modelagem dos Elementos

Para modelar um SEP deve-se verificar os componentes presentes no sistema real e analisar como serão representados virtualmente, ponderando qual é o melhor modelo de representação baseado no tipo de estudo ou análise.

A modelagem de componentes presentes em sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser baseada principalmente no que recomenda o relatório do *IEEE*, o *IEEE Distribution Planning Working Group Report*, porém, este não leva em conta as características de distorções harmônicas. O *IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation*, de 1999,

traz essas características em sua proposta de modelagem, bem como o que é recomendado em Arrillaga *et al*, de 1997 e em Martinez-Velasco *et al* (2010) onde é apresentada uma sucinta tabela com sugestões de modelagem para componentes em simulações no ATP/EMTP.

Com simulações é possível verificar o que pode ocorrer com o sistema em diferentes casos, devido à modificação de suas características, seja pela inclusão ou pela eliminação de fatores que compõem o sistema de estudo, como banco de capacitores, GD, alimentadores, cargas, transformadores, entre outros. Normalmente o uso da simulação como ferramenta de estudo é feito quando: o sistema está em planejamento; o sistema existe, porém, seria muito caro fazer experimentos nele; o sistema existe, porém, o caso de análise é inapropriado ou perigoso.

Baseando-se nas sugestões das referências, a seguir são apresentadas as modelagens para o estudo e simulação de sistemas de distribuição com distorção harmônica.

- **Linhas**

O modelo indicado para representação de linhas é o modelo  $\pi$  com parâmetros concentrados ou distribuídos. Em Martinez-Velasco *et al* (2010) recomenda-se que na faixa de baixas frequências, até 3kHz, seja usado parâmetros concentrados. Stevenson (1986), por sua vez, indicou usar parâmetros concentrados para linhas aéreas, e ainda, em linhas curtas (inferiores a 80 km) desprezar a capacitância em derivação existente, por ser muito pequena e não influenciar na precisão do resultado. Para este estudo em SDEE, a opção que melhor convém é o uso do modelo  $\pi$ .

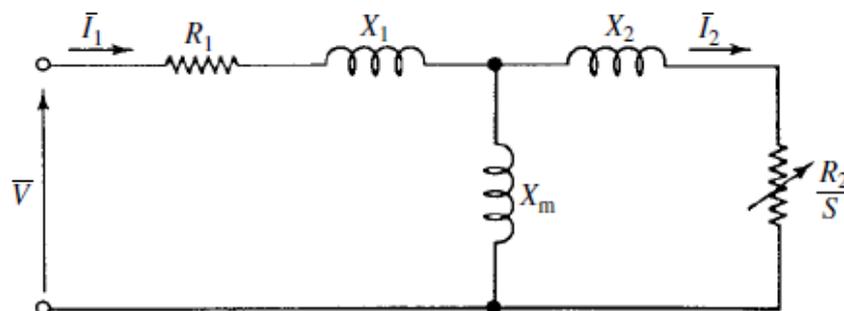
- **Cargas**

Segundo Arrillaga & Watson (2003), não há um equivalente de carga geral admitido para análise harmônica. Existem diversos modelos equivalentes para a representação de cargas

lineares e não lineares no sistema elétrico de potência. São basicamente três tipos de carga: passiva, máquinas/motores e dispositivos eletrônicos de potência.

As cargas passivas podem ser predominantemente representadas por um modelo aproximado de uma impedância em série,  $R\sqrt{h}+jXh$ , onde  $R$  é a resistência da carga na frequência fundamental,  $X$  é a reatância da carga na frequência fundamental e  $h$  é a ordem harmônica (Arrillaga & Watson, 2003). Conforme Ranade & Xu (1998) para representação de cargas passivas, pode-se utilizar também um modelo com RL em paralelo.

Os motores de indução são representados através do seu circuito simplificado (Arrillaga & Watson, 2003). Um exemplo de circuito simplificado de motor é mostrado na Figura 11, sendo  $R_1$  a resistência do estator,  $R_2$  a resistência do rotor referida ao estator,  $X_1$  a reatância de dispersão do estator,  $X_2$  a reatância de dispersão do rotor referida ao estator e  $X_m$  a reatância de magnetização.



**Figura 11** Circuito simplificado de um motor. (Fonte: Arrillaga & Watson, 2003).

A maioria das cargas não lineares é decorrente de eletrônica de potência, e estão presentes em muitos dos equipamentos que compõem o sistema elétrico, como retificadores, inversores e conversores CC-CC (Ndiaye, 2006). Segundo Arrillaga & Watson (2003) a modelagem das cargas com eletrônica de potência é um problema mais difícil, pois, além de serem fontes harmônicas, estas cargas não apresentam configuração R, L, C fixa, e suas características não lineares não podem ser incluídas dentro do modelo equivalente linear.

A modelagem desse tipo de carga pode ser através de fonte de injeção de corrente ou modelos do dispositivo com eletrônica de potência (Chang *et al*, 1998). Normalmente a opção escolhida é através de fonte de corrente, conforme sugerido em Dugan *et al* (2002).

Ainda, conforme Ranade & Xu (1998) deve-se ter o cuidado ao modelar as harmônicas, devido a algumas especificidades. As impedâncias do sistema devem ser adequadamente modeladas com base nas sequências de fase, principalmente se há múltiplas fontes de corrente sendo modeladas para o estudo e avaliação do SEP. Entre as principais ordens harmônicas estão a terceira harmônica, que aparece como componentes de sequência zero, a quinta harmônica, de sequência negativa, e a sétima, de sequência positiva, esta sequência (0, +, -) é utilizada para todas as ordens seguindo um ciclo, da seguinte forma:

**Tabela 9 Sequência das Ordens Harmônicas**

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frequência	60	120	180	240	300	360	420	480	540
<b>Sequência</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>0</b>

E assim por diante, sendo, para sequência positiva (+) os ângulos de fase ABC:  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$  e  $120^\circ$ ; para sequência negativa (-) os ângulos de fase ABC:  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $-120^\circ$  e para sequência 0, como a terceira ordem e as múltiplas de 3, não há mudança de fase, então  $0^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $0^\circ$ .

- **Fontes ou geradores**

Os geradores síncronos podem ser representados como uma combinação de uma fonte de tensão ideal em série com a impedância subtransitória da máquina síncrona (Martinez-Velasco *et al*, 2010). Para determinar a impedância harmônica da rede os geradores podem ser modelados com uma combinação de resistência e reatância indutiva,  $R\sqrt{h} + jX_d''h$ , levando em conta que  $R$  é a resistência de armadura na frequência fundamental, obtida através das perdas

de potência da máquina;  $X_d''$  é a reatância subtransitória do gerador e  $h$  é a ordem harmônica da frequência (Arrillaga & Watson, 2003).

- **Transformadores**

Conforme Arrillaga *et al* (1997), os transformadores podem ser representados por um modelo de impedância na frequência fundamental representado por uma resistência em série com reatância de dispersão, conforme pode ser verificado através da equação (24) que representa a impedância do transformador. Sendo, neste caso,  $R$  a resistência na frequência fundamental,  $X_l$  a reatância de dispersão do transformador na frequência fundamental e  $h$  a ordem harmônica da frequência.

$$Z = R(\sqrt{h}) + jX_l h \quad (24)$$

- **Capacitores**

Os capacitores são representados com o valor total do banco de capacitores alocados no ponto em questão. Pode ser um equivalente trifásico do banco ou calculado por fase, atentando para a configuração do banco de capacitor. O total é o valor de uma capacitância  $C$ .

- **Filtros**

Os filtros passivos em uso na metodologia proposta são os filtros sintonizados. Eles são modelados seguindo a configuração utilizada para este tipo de filtro, que é um equipamento *shunt* com RLC em série, calculados na frequência sintonizada, ou seja a frequência na qual ele vai atuar. Os cálculos foram apresentados no capítulo 2.

#### 4.3.1.2 Método de Otimização Heurística – NSGA II

Para a MAFIPAM justifica-se o uso de uma técnica Multiobjetivo de Otimização (MO) devido ao problema apresentado, que se encontra dentro do cenário do sistema elétrico

brasileiro e conta com suas peculiaridades. O mercado oferece alto custo para componentes de grandes dimensões da área de engenharia elétrica, como os que são utilizados para compor os filtros ativos, os passivos têm menor custo, por isso são escolhidos para esta metodologia. Já os órgãos reguladores de energia elétrica, demonstram que no futuro existe a possibilidade de serem estipuladas multas ou compensações para quem ultrapassar os limites definidos pelas normas, da mesma forma que é feito para os indicadores de qualidade do serviço atualmente.

As técnicas MO, como o próprio nome já diz, utilizam mais de uma função objetivo na formulação e solução do problema. Conseqüentemente, as respostas podem variar conforme a importância que se estipula para cada uma das funções a serem minimizadas, que, comumente, são conflitantes nos problemas em que se utiliza MO.

Dessa forma, no âmbito dessa pesquisa é interessante que o tomador de decisões tenha uma gama de opções que pode variar com a necessidade do momento. O mesmo raciocínio é utilizado em Berizzi *et al* (2001), observando que as respostas dos algoritmos MO trazem como resultado um conjunto de soluções possíveis, uma fronteira de Pareto. A decisão será baseada na importância relativa a cada objetivo em conflito, ou seja, qual deles merece ter maior atenção sendo então melhorado em relação ao outro, mas sem prejuízo de nenhum dos objetivos.

Uma vertente da otimização MO é a Otimização Multiobjetivo usando Algoritmos Evolutivos (MOEA), dentre eles está a Otimização Multiobjetivo com Algoritmo Genético (MOGA), que é onde se encontra o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)*.

Os algoritmos evolutivos baseiam-se em fenômenos da natureza, o AG é um exemplo de algoritmo baseado na teoria da evolução de Charles Darwin, onde os melhores sobrevivem e se reproduzem (Eiben & Smith, 2003). O método AG utiliza uma busca estocástica global, baseada no princípio de seleção natural e no desenvolvimento e evolução dos descendentes. Com a utilização dos operadores evolutivos dentro do algoritmo, os cromossomos são forçados

a evoluírem para uma geração melhor. O AG opera em uma população de soluções potenciais de acordo com a hipótese de "sobrevivência do mais apto" da teoria de Darwin, dessa forma considera-se que é possível conseguir, a cada nova geração, uma melhor aproximação da solução ideal (Verma & Singh, 2010).

O AG gera uma população composta por indivíduos, sendo que cada indivíduo traz consigo as informações acerca das variáveis, ou seja, os genes. Cada indivíduo é uma diferente solução para o problema, isso se chama busca paralela. O número de indivíduos pode ser escolhido no momento em que o algoritmo for iniciado. Esse tipo de busca onde vários indivíduos são avaliados paralelamente, e, portanto, várias soluções são testadas, é um dos maiores diferenciais do AG quando comparado à métodos de otimização tradicionais, que fazem a busca com um ponto único percorrendo o espaço de possibilidades.

A equação (25) demonstra a matriz solução do AG, com uma população composta por  $N$  indivíduos, e a equação (26) representa um indivíduo de uma solução, composto pelas variáveis  $n$ , de local de alocação e  $f$ , do filtro alocado.

$$p = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{bmatrix} \quad (25)$$

E,

$$i_1 = [n_1, f_1 \quad n_2, f_2 \quad \dots \quad n_i, f_i] \quad (26)$$

Conforme Eiben & Smith (2003) uma analogia entre o problema a ser solucionado e a Teoria da evolução de Darwin é a seguinte:

- Resolução do problema  $\leftrightarrow$  Evolução
- Problema  $\leftrightarrow$  Ambiente
- Soluções candidatas  $\leftrightarrow$  Indivíduos

Ainda, conforme os autores, dada uma determinada população de indivíduos a pressão do ambiente causa uma seleção natural, através da sobrevivência a determinadas condições. São duas as principais forças para formar a base da evolução: operadores de variação e seleção.

Este algoritmo segue basicamente os seguintes passos (Ferreira, 2009):

- representação genética das potenciais soluções do problema (codificação do cromossomo);
- estratégia de criação da população inicial;
- determinação da função de aptidão;
- determinação da estratégia de seleção;
- determinação dos operadores genéticos;
- seleção dos parâmetros de controle;
- definição do critério de parada.

Como operadores evolutivos, o AG utiliza a seleção, a mutação e a recombinação. A seleção é baseada na seleção natural, onde os melhores indivíduos, ou os que melhor se adaptaram às condições de determinada situação, são os que sobrevivem. A meta desse operador é repassar código genético bom para a próxima geração. Na mutação, o indivíduo sofre alguma alteração de gene, este operador é considerado um tipo de reprodução assexuada, uma vez que somente um indivíduo está envolvido no processo. Através de um fator de probabilidade de mutação, chamado  $p_m$ , que varia de 0,01 a 1 (sendo mais comum o uso no valor em torno de 0,1) os genes podem ser modificados permitindo possibilidade de melhoria. A recombinação ou *crossover* combina atributos favoráveis de outros indivíduos, por isso é considerada sexuada, tratando-se de um processo onde dois ou mais indivíduos geram um descendente. Um ponto de corte dos cromossomos é escolhido aleatoriamente e desse ponto em diante os genes são trocados entre o primeiro e o segundo pai. Para isso, há o fator probabilidade de recombinação, chamado  $p_c$ , que tipicamente varia entre 0,6 a 0,9.

O método de otimização que será utilizado na determinação da alocação dos filtros é o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)*, um algoritmo evolutivo baseado no Algoritmo Genético (AG), o qual foi proposto por Deb *et al* em 2002. No estudo os autores sugerem algumas melhorias quando comparado ao seu antecessor, o *NSGA*, que deixava a desejar em alguns quesitos como complexidade computacional, elitismo não muito elaborado e dependência de parâmetros de difícil definição.

Conforme já explicado, nos problemas de otimização multiobjetivo normalmente existem objetivos conflitantes entre si. Este fato faz com que não se possa adotar uma solução mínima ou máxima de um dos objetivos, pois algum outro estará sendo prejudicado ou sacrificado. O conceito de dominância, já presente no *NSGA* é também uma característica do algoritmo *NSGA II*.

O *NSGA II* é indicado para quando existem parâmetros igualmente importantes, onde não é permitido descartar ou supervalorizar algum deles. Com o *NSGA II* é possível uma seleção equilibrada dos objetivos (Marinho, 2009).

O *NSGA II* utiliza informações para cada indivíduo a respeito do conjunto que ele domina, bem como o número de indivíduos que o dominam. Portanto, o *NSGA II* é um algoritmo que implementa a dominância, ou seja, ele classifica a população total em *fronts* de acordo com o grau de dominação de um sobre o outro. Através desse critério, o algoritmo agrega o conceito de elitismo que classifica a população total em diferentes categorias de qualidade. Sendo assim, é permitida ao algoritmo a priorização das melhores classificadas.

O conjunto de soluções ótimas para um problema de otimização com multiobjetivo é chamado de conjunto de Pareto ou fronteira de Pareto. A fronteira de Pareto é baseada em uma hipótese que provém de uma teoria que diz que em uma determinada sociedade a melhoria do bem-estar de um ou mais indivíduos implica necessariamente a diminuição do bem-estar de pelo menos outro indivíduo. Porém, no conceito de Pareto é possível encontrar pontos que

formam uma fronteira, onde ambos parâmetros são equilibrados de forma que nenhum seja prejudicado, resultando num conjunto de soluções. Uma solução é pertencente a este conjunto e dita Pareto-ótima se ela é não-dominada por nenhuma outra solução possível, ou seja, não existe outra solução melhorando pelo menos um objetivo sem piorar um ou mais objetivos.

Como em problemas MO a formulação é composta por um vetor de funções objetivo, a não dominância é mensurada da seguinte forma: uma solução  $s_1$  é considerada não dominada por uma solução  $s_2$  somente se todas as funções objetivos de  $s_1$  são menores ou iguais às de  $s_2$  e ao menos uma função objetivo para  $s_1$  é menor que em  $s_2$ , os indivíduos não dominados compõem o *rank* dos melhores, que é o *rank* nº 1 (Barukcic, 2017).

Cada conjunto de soluções do *NSGA II* é referente a uma população, onde existe um número de indivíduos, que pode variar, ou seja, numa população podem existir 20 indivíduos, 50 indivíduos, 100 indivíduos, 500 indivíduos e assim por diante. Os indivíduos são representados por cromossomos, que trazem a informação necessária a respeito das variáveis inerentes ao problema.

Outra característica do *NSGA II* é a distância de aglomeração, também chamada de distância de multidão ou indicador de adensamento. Essa distância é calculada após a classificação de não-dominância ter sido completada. A distância de aglomeração é calculada para cada um dos indivíduos que compõe o *front*, mostrando a distância que ele está de cada um de seus vizinhos. O cálculo é sempre entre dois indivíduos, verificando-se o quão perto estão um do outro, quanto menor é a distância, melhor, os de maior distância possivelmente estão perto de um dos limites, enquanto outros se concentram possivelmente próximo do ótimo local. Por outro lado, quanto maior a média de distância de aglomeração, maior diversidade da população naquele momento. Dessa forma, é feita a seleção dos indivíduos baseando-se no *ranking* do mesmo e da distância de aglomeração que ele tem (Seshadri, 2009).

- **Fluxograma NSGA II**

Nesta seção é apresentado o diagrama de blocos do *NSGA II* em interação com a simulação na interface do *ATPDraw*, conforme a Figura 12.

A explicação básica do procedimento realizado no *NSGA II* é a seguinte:

1. Uma população inicial de tamanho  $Z$  é gerada aleatoriamente, baseada na faixa do problema e restrições, se existir<sup>3</sup>;
2. Esta mesma população é classificada conforme não dominância; É feito um ranqueamento de não dominância para todas as soluções não dominadas;
3. São feitos os operadores de seleção por torneio, e então recombinação e mutação para criar uma população de descendentes, de tamanho  $Z$ ;
4. A partir da primeira geração até a última, são feitos os seguintes passos:
  - a. Cria uma população de combinação entre a população de pais e a população descendente gerada, que terá tamanho  $2Z$ ;
  - b. Essa população de combinação será classificada conforme não dominância, identificando todos os *fronts* não dominados;
  - c. Após isso, uma nova população de pais é formada, adicionando soluções do primeiro *front* do rank não dominado até chegar ao número do tamanho da população,  $Z$ , e assim, rejeitando as de baixo rank. Isso é feito através da distância de aglomeração, que é um operador que calcula a distância média de duas soluções de cada lado de uma solução particular ao longo de cada um dos objetivos;
  - d. Então na mais nova população gerada, também de tamanho  $Z$ , são aplicados os operadores de seleção, recombinação e mutação.

---

<sup>3</sup> Conforme Berizzi & Bovo (2000) é importante que a população inicial tenha uma alta variedade de cromossomos, uma vez que a diversidade é uma das ferramentas mais poderosas dos AGs. Quanto mais diversificada for cada geração, mais eficiente será a busca da melhor solução, pois o paralelismo intrínseco do AG é totalmente explorado. Por isso, na população inicial, é interessante que exista uma média alta de distância de aglomeração entre os indivíduos. Ainda, conforme Kagan et al (2009), a população inicial é gerada de forma aleatória com número de população entre 100 e 200 indivíduos.

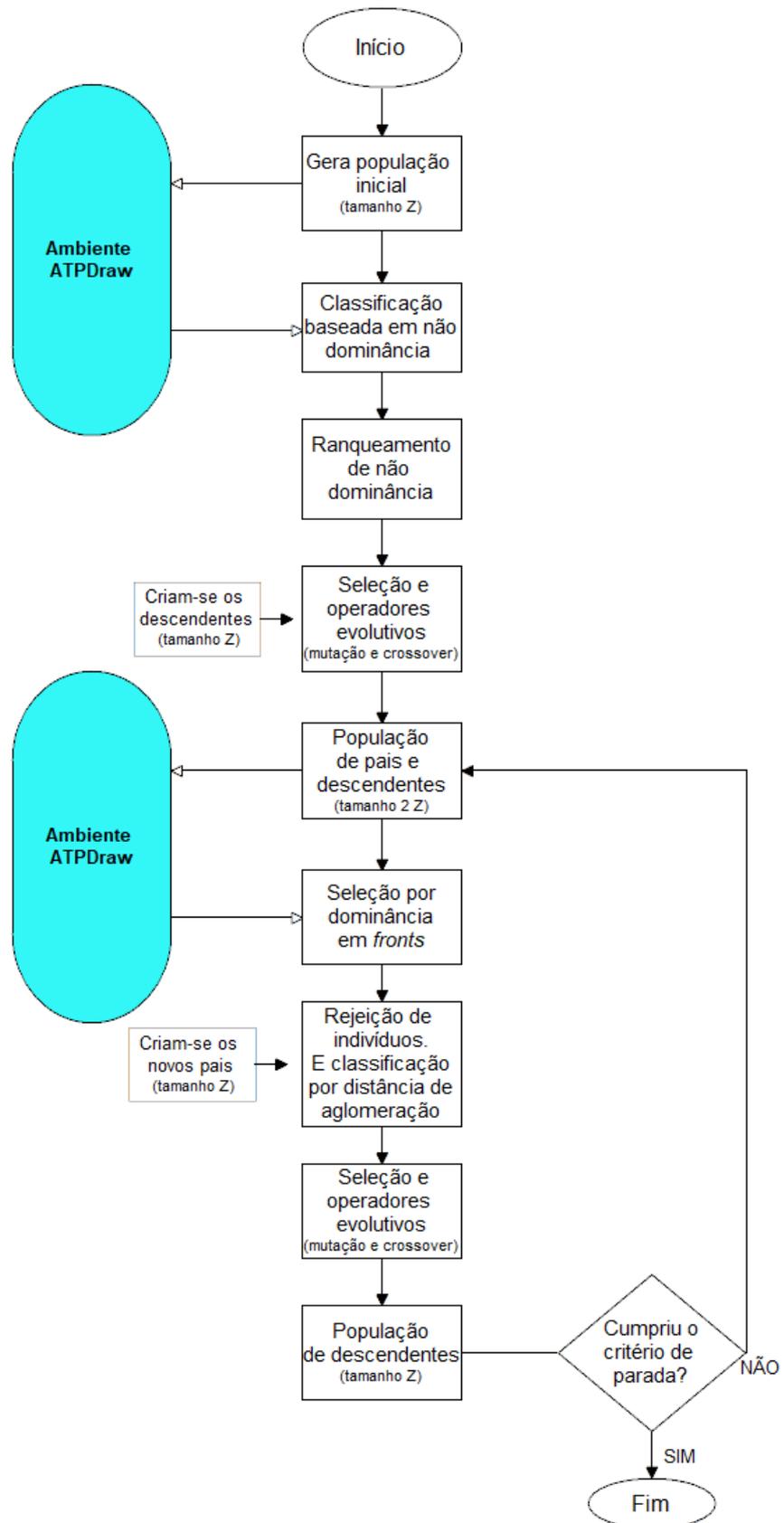
Assim, é criada uma nova população de descendentes, com tamanho  $Z$ .

5. O passo 5 é repetido até atingir o número máximo de iterações, conforme critério pré-definido.

Existem outros tipos de critério de parada, além do número máximo de gerações, como por exemplo, quando muitos dos indivíduos (cerca de 95%) são iguais na mesma população, ou quando a diferença entre um resultado e outro já é muito pequeno. Esta diferença deve ser estipulada, mas costuma ser da ordem de  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$  ou  $10^{-9}$ . Apesar disso, percebe-se que para o algoritmo evolutivo, o número máximo de gerações é largamente usado como critério de parada. Conforme Barukcic *et al* (2013) o número máximo de geração é determinado experimentalmente executando o algoritmo diversas vezes com diferentes números de gerações.

- **Codificação do algoritmo**

Para proceder na MAFIPAM, é necessário que se nomeiem e codifiquem as variáveis pertencentes ao problema, de forma que o algoritmo possa lê-las e proceder na busca da melhor escolha do local dos filtros. Para isso, primeiramente, foram nomeados cada um dos nós pertencentes ao sistema. Dessa forma cada nó inicia com “N”, de nó, acrescentando-se “000” após o N, esse 000 é o que muda de barra para barra, diferenciando-as. Cada dígito de 000 é referente a um numeral que é modificado de forma crescente iniciando em 001, assim, o primeiro nó será nomeado N001, o segundo N002, o terceiro N003, até preencher com o número de nós existentes no SEP, com possibilidade máxima de 999 nós, ou seja, N999. Foram escolhidos três dígitos propositalmente, no intuito de que a metodologia pudesse ser aplicada a sistemas um pouco maiores, com mais de 99 nós, como, por exemplo, o IEEE 123 bus test feeder, onde o último nó do sistema recebe o nome de N123.

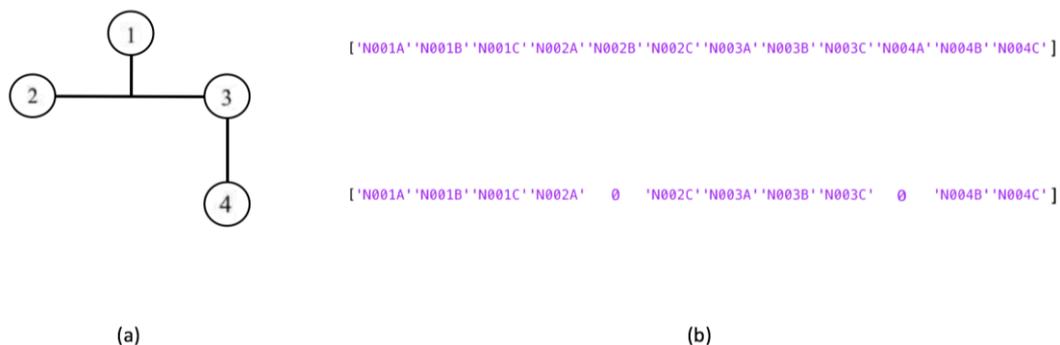


**Figura 12** Diagrama de blocos NSGA II. (Fonte: o autor).

Com essa nomeação feita, é gerado um vetor, chamado vetor individuo, que representa todo o sistema. Dentro desse vetor, para cada nó (N000), haverá 3 espaços a serem preenchidos, referentes à cada uma das fases, A, B e C. Ou seja, na prática, o algoritmo irá entender que existe a possibilidade de ter fase A, B ou C, portanto os nós terão a seguinte estrutura de nomeação: N000A, N000B e N000C.

Indivíduos são computacionalmente representados por uma estrutura de dados denominada cromossomo (Delbem et al, 2005), estes dados, portanto, são o que compõem o vetor individuo, citado anteriormente. Os dados, ou genes, que irão compor o vetor individuo (que terá o tamanho do SEP em estudo) são as variáveis referentes aos possíveis filtros a serem instalados em cada local.

Porém, primeiramente, devem-se configurar as características desse sistema em análise, deixando claro ao algoritmo quais são os ramos trifásicos, bifásicos e monofásicos do sistema, e, conseqüentemente, quais são os locais que não estão passíveis de alocação de filtros. Os espaços referentes às fases não existentes receberão uma variável de valor 0, que designa que não há fase existente naquele ramo. Apenas para exemplificar o que está sendo explicado, um pequeno e hipotético sistema é apresentada a Figura 13 (a), ele é um sistema em que há um nó trifásico e dois nós bifásicos, o nó 2 tem fases AC e o nó 4, BC. O vetor individuo do sistema de 3 nós, é apresentado na parte (b), que mostra a nomeação dos nós e a configuração do sistema mostrando as fases inexistentes, com a variável 0.



**Figura 13** Sistema 4 barras(a) e nomenclatura(b). (Fonte: o autor).

Ainda dando continuidade à etapa de configuração para posterior leitura de variáveis dentro do algoritmo NSGA II, é necessária a codificação de opções de filtros em cada uma das fases de cada uma das barras. Dessa forma, a melhor opção para esta parte foi pensar em diversos casos que pudessem ser opção para qualquer fase de qualquer barra. Ou seja, códigos que serão inseridos como genes no vetor indivíduo, ou cromossomo. A escolha na MAFIPAM foi ordenar numericamente os casos possíveis de alocação de filtros com códigos, iniciando na primeira ordem selecionada para mitigação de harmônicas,  $h_1$ , seguindo com a segunda ordem selecionada,  $h_2$ , e assim por diante até chegar ao código que engloba todas as combinações de ordens de filtros a serem alocados. Entre as opções estão “nenhum filtro instalado na fase” e “todos os filtros instalados na fase”, além das combinações das ordens selecionadas para mitigação de harmônicas no SEP, que são necessariamente sempre 5 ordens harmônicas:  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  e  $h_5$ , conforme a codificação elaborada.

As ordens harmônicas selecionadas para serem mitigadas em um SEP podem variar de sistema para sistema, dependendo das características intrínsecas a ele. Portanto, o tomador de decisões, após uma primeira análise ou prévio conhecimento, pode identificar quais são as ordens harmônicas que ele gostaria de mitigar no sistema analisado, e, assim, as seleciona para participarem das combinações que são geradas.

Lembrando que, conforme a codificação elaborada, são cinco possibilidades de ordens a serem alocadas. Com uma codificação genérica são apresentados os 32 códigos de alocação que irão entrar aleatoriamente nos espaços do vetor indivíduo para preencher os nós que podem receber filtros. As cinco ordens escolhidas sempre denominam-se  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  e  $h_5$ , podendo ser quaisquer que sejam. Os casos de 1 a 31 mesclam as cinco ordens, conforme a Tabela 10, e o caso 32 não aloca filtros no SEP.

**Tabela 10: Codificação dos Casos**

código	filtros	código	filtros
1	<i>h1</i>	17	<i>h2, h3, h4</i>
2	<i>h2</i>	18	<i>h1, h2, h5</i>
3	<i>h3</i>	19	<i>h1, h3, h4</i>
4	<i>h4</i>	20	<i>h1, h3, h5</i>
5	<i>h5</i>	21	<i>h1, h4, h5</i>
6	<i>h1 e h2</i>	22	<i>h2, h3, h4</i>
7	<i>h1 e h3</i>	23	<i>h2, h3, h5</i>
8	<i>h1 e h4</i>	24	<i>h2, h4, h5</i>
9	<i>h1 e h5</i>	25	<i>h3, h4, h5</i>
10	<i>h2 e h3</i>	26	<i>h1, h2, h3, h4</i>
11	<i>h2 e h4</i>	27	<i>h1, h2, h3, h5</i>
12	<i>h2 e h5</i>	28	<i>h1, h2, h4, h5</i>
13	<i>h3 e h4</i>	29	<i>h1, h3, h4, h5</i>
14	<i>h3 e h5</i>	30	<i>h2, h3, h4, h5</i>
15	<i>h4 e h5</i>	31	<i>h1, h2, h3, h4, h5</i>
16	<i>h1, h2, h3</i>	32	sem filtro alocado

- **População inicial e operadores evolutivos**

A geração da população inicial pode ser aleatória, mas algumas metodologias podem preferir utilizar algum artifício neste primeiro passo no intuito de melhorar a qualidade da população inicial, como incluir um método de busca inicial. Se este esforço computacional extra vale a pena ou não vai depender da aplicação em questão (Eiben & Smith, 2003). A decisão final da necessidade de direcionar a população inicial ou mantê-la totalmente randômica fica a critério do tomador de decisões.

Conforme comentado anteriormente, é necessária uma população inicial bastante diversificada, objetivando a variedade de cromossomos e que o algoritmo cumpra seu papel de agente de evolução natural. Devido a isso, optou-se por fazer a população inicial de forma totalmente aleatória.

Apesar disso, na MAFIPAM através da análise prévia do sistema, são determinadas as ordens harmônicas que mais aparecem no SEP (em quantidade e em proporção), e, a partir desse conhecimento, há a possibilidade do tomador de decisões concentrar esforços para mitigá-la, caso seja a intenção. Assim, estas ordens podem ser selecionadas para comporem o cromossomo dos indivíduos da população, fazendo-se com que haja um direcionamento da população inicial.

Os operadores evolutivos na MAFIPAM têm as seguintes características:

**Mutação:** O valor de probabilidade de mutação é calculada com  $p_m = 1/n$ . Sendo  $n$  o número de variáveis de decisão do problema. Portanto, dependendo do tamanho do sistema, o operador evolutivo de mutação, irá mudar;

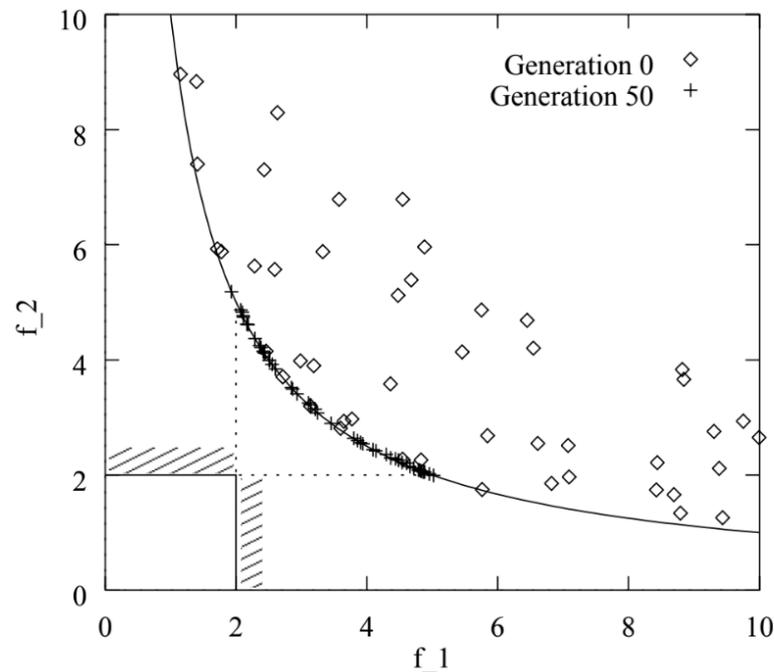
**Recombinação:** O valor de probabilidade de recombinação, também chamado de *crossover* é  $p_c = 0,9$ .

- **Fronteira de Pareto**

Nos algoritmos que apresentam a fronteira de Pareto como conjunto de soluções, cada indivíduo é considerado uma solução para o problema e o conjunto é a população que resultou das gerações que ocorreram durante a busca. Na última fronteira, todos os indivíduos estão empatados frente ao problema, ou seja, qualquer um dos indivíduos daquela geração é igualmente bom. A Figura 14 mostra as fronteiras que compõem um resultado de um problema multiobjetivo, verifica-se que a última geração, a 50, se apresenta na curva formada por pontos  $x$  que representam os indivíduos daquela última geração. Os pontos que se apresentam distantes da curva são os indivíduos de outras gerações e são piores do que qualquer um que está compondo a curva.

Quase todos os problemas de engenharia são abertos, ou seja, não possuem uma solução única. O fato de um problema ter mais de uma solução, porém, não significa que seja fácil de resolver; na verdade, o fato de existirem várias soluções possíveis muitas vezes torna o problema mais difícil (Brockman, 2010). No caso de alocação de filtros em um SDEE a dificuldade no número de soluções disponíveis é optar por qual seria a melhor. Desta forma, o tomador de decisões terá que optar pela solução que apresenta os valores mais convenientes ao orçamento para solucionar o problema, mas sem ignorar a qualidade mínima vislumbrada no início do planejamento de mitigação das distorções harmônicas.

Com a fronteira de Pareto a decisão se torna mais refinada, uma vez que através das opções disponíveis na fronteira o tomador de decisão pode definir aquela que melhor convém naquele momento, ou, mediante o cenário em que se encontra.



**Figura 14** Apresentação de uma Fronteira de Pareto. (Fonte: Eiben, 1998).

#### 4.3.1.3 Interação de simulação *ATPDraw* e *MatLab*®

Nesta etapa da MAFIPAM são feitas as simulações das possibilidades de soluções (as populações) a cada geração que surge no decorrer da busca do AG. Conforme já comentado, a população terá um número aproximadamente entre 50 e 100, enquanto o número de gerações mínimo para um resultado razoável está entre 100 e 200.

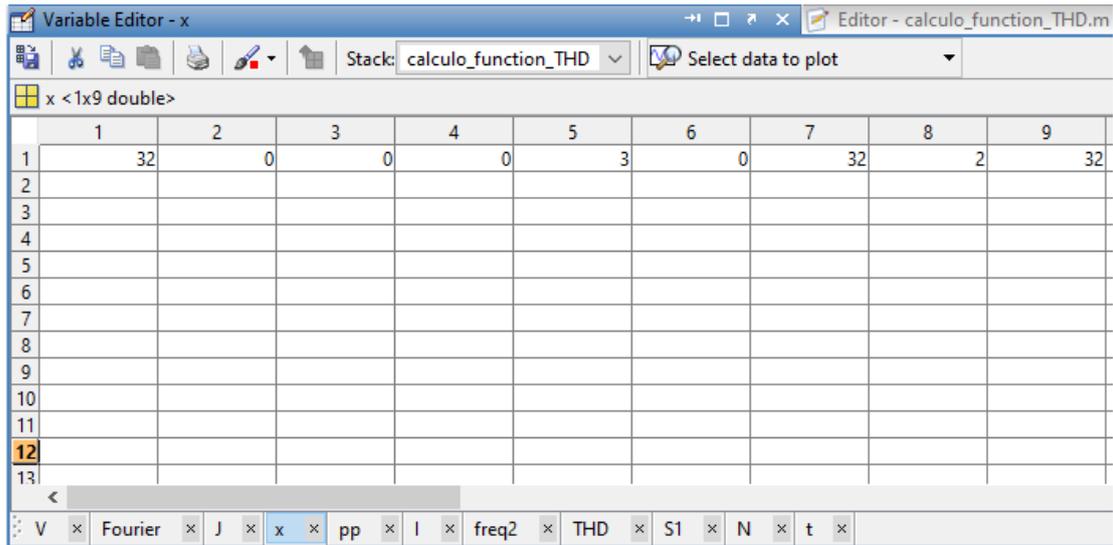
Na primeira população, são automaticamente simulados os 50 a 100 indivíduos no *ATPDraw*. Nesta etapa, o primeiro passo é alocar os filtros monofásicos conforme consta no cromossomo do indivíduo 1. Cada gene do cromossomo é um conjunto de filtros alocados no SEP, assim, eles serão simulados no *ATPDraw* e, em seguida, com o simulador automático, são calculados os índices de distorções harmônica. Em seguida, o indivíduo 2 é avaliado da mesma forma, e então, o indivíduo 3, e assim por diante até completar o número total de indivíduos da população. As informações de toda a população vão sendo guardadas. A geração que segue, a segunda população, sofre as modificações inerentes ao *NSGA II*, formando novos indivíduos que também vão de 1 a 50, por exemplo. A população, que dobrou de tamanho, sofreu seleção, mutação e recombinação. E, assim, seguem-se as etapas completando o número de gerações escolhidas no início da busca do AG.

A seguir são apresentados os passos que o simulador automático segue para proceder nas etapas iterativas onde ocorrem os processos de entrada e saída das variáveis, que é realizada através da interação entre os ambientes *ATPDraw* e *MatLab*®.

1. Na interface do *MatLab*® são gerados os genes dos indivíduos aleatoriamente a partir do vetor indivíduo, que foi apresentado na Figura 13 (b), e das possibilidades de filtros ou arranjos de filtros que foi apresentada na Tabela 10. Um vetor indivíduo hipotético gerado aleatoriamente para um pequeno sistema desequilibrado é apresentado na Figura 15.
2. No cartão de leitura do *ATP* são inseridos os filtros referentes a esse vetor indivíduo gerado anteriormente. Os filtros são montados a partir de valores dos

componentes R, L e C pré-estipulados, já calculados anteriormente para cada local. Então, os valores são carregados no cartão do *ATP* que já está preenchido com todas as informações do sistema em análise.

3. Cada um dos indivíduos é simulado no *ATPDraw* até completar o número total de indivíduos que foi escolhido na configuração inicial. Os indivíduos são avaliados na interface *MatLab*<sup>®</sup>, o processo de avaliação inicia com a extração dos valores de tensão de cada fase de cada nó do SEP. Em seguida, é executada a *FFT* do sinal, e então, os valores de *IHD* e *THD* são calculados na interface *MatLab*<sup>®</sup>. Dessa forma, a F.O. multiobjetivo é avaliada.
4. O procedimento de otimização heurística segue se a F.O. não cumpriu os requisitos necessários. Nesta etapa, o requisito de número máximo de gerações não foi cumprido, portanto, o algoritmo segue com seleção, mutação e recombinação. Dessa forma, o vetor indivíduo se modifica e é novamente enviado à interface do *ATPDraw* para serem retirados e/ou adicionados componentes dos filtros no cartão do *ATP* ou proceder em realocação dos filtros em diferentes nós.
5. Novamente o simulador é executado e os novos sinais de tensão são carregados no *MatLab*<sup>®</sup> para serem analisados através de novo cálculo de *IHD* e *THD* em cada fase para cada nó do sistema elétrico.
6. O procedimento segue com as modificações no cartão do *ATP* e avaliações da F.O. interativamente até cumprir a F.O. ou atingir o número de gerações escolhido.



The screenshot shows the MATLAB Variable Editor interface. The window title is "Variable Editor - x". The stack contains "calculo\_function\_THD". The variable "x" is a 1x9 double vector. The data is displayed in a table with 13 rows and 9 columns. The first row contains the values 32, 0, 0, 0, 3, 0, 32, 2, and 32. The rest of the rows are empty. The variable "x" is highlighted in the table.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	32	0	0	0	3	0	32	2	32
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									

**Figura 15** Interface do MatLab® apresentando um vetor indivíduo gerado aleatoriamente

## 5 ESTUDOS DE CASO

### 5.1 CASO 1: SISTEMA DE 3-NÓS

Para validação da MAFIPAM foi utilizado um sistema hipotético pequeno, com conteúdo harmônico e desequilibrado. A Figura 16 apresenta o diagrama unifilar do sistema.

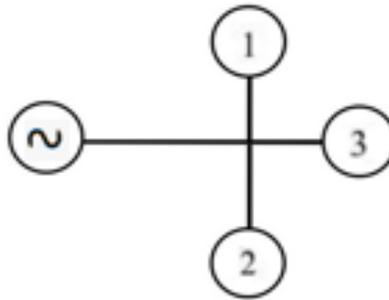


Figura 16 Diagrama unifilar sistema de 3 nós. (Fonte: o autor).

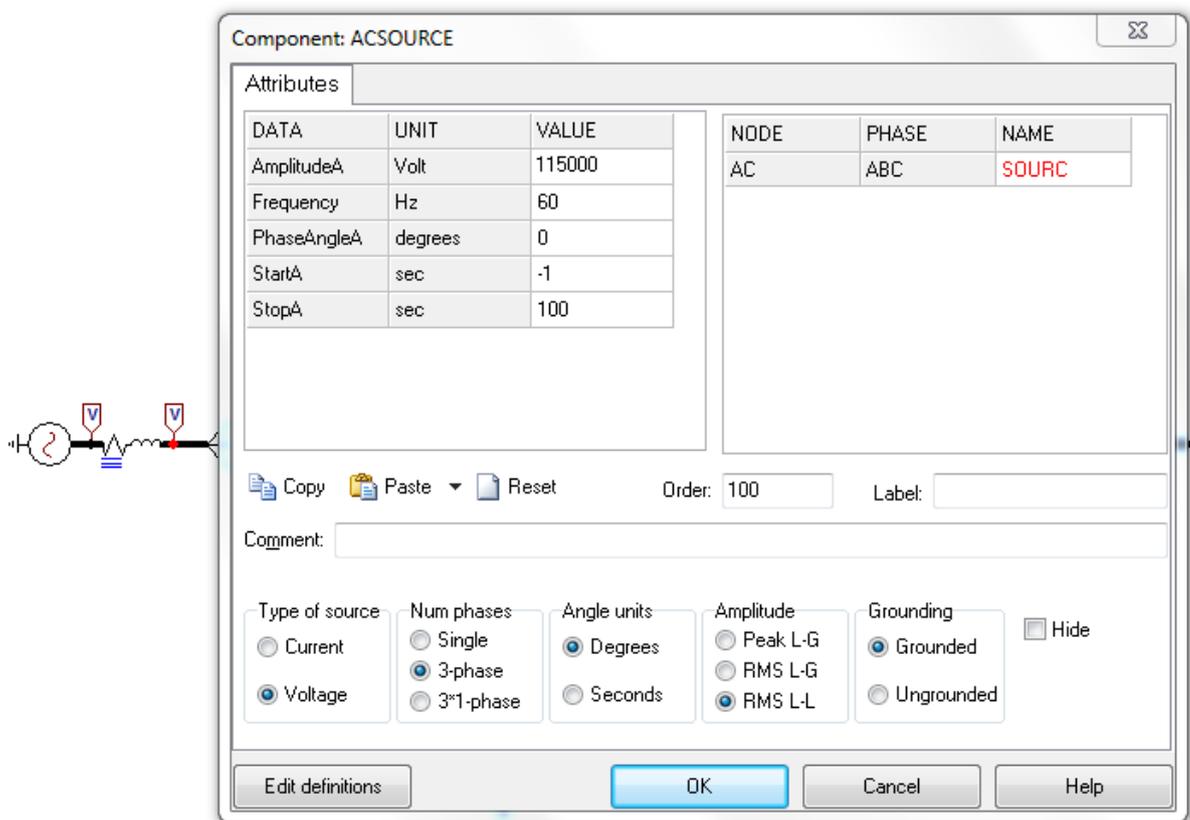
O sistema tem três nós, o nó 1 é constituído somente da fase A, o nó 2 somente tem a fase B e o nó 3, tem as fases A, B e C.

#### 5.1.1 Modelagem

A seguir, apresentam-se os modelos utilizados no programa para a modelagem e simulação para posterior obtenção dos resultados dos índices de qualidade de energia.

Iniciando com a fonte do sistema, que está localizada no nó 12 do diagrama unifilar, o modelo do ATP escolhido é o componente ACSOURCE, que simula uma fonte ideal de tensão, trifásica e aterrada, onde os dados de entrada são o valor de amplitude da tensão, a frequência da fonte e consequentemente do sistema, o ângulo de fase, o tempo de início e de finalização do elemento na simulação, que inicia em -1 segundo e termina em 100 segundos, para garantir que este elemento estará conectado e atuando durante todo o tempo de simulação. Para compor a fonte do sistema, uma impedância é acrescentada em série com o modelo ACSOURCE. O modelo utilizado para representar esta impedância interna da fonte é o RLC3,

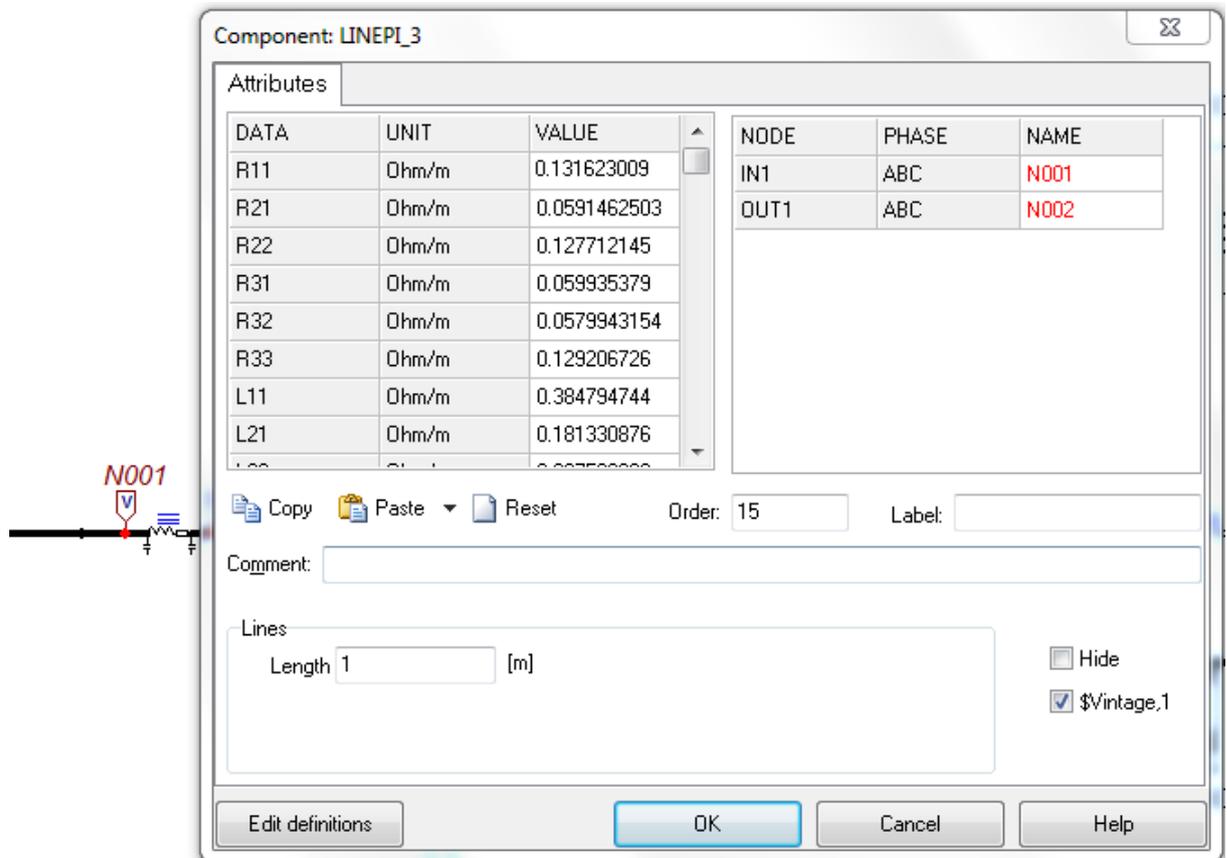
onde os dados de entrada são resistência, indutância e capacitância, mas neste caso, somente insere-se os valores de R e L para modelar a impedância corretamente. Na Figura 17 são mostrados os blocos do ATPDraw que representam o modelo da fonte e a impedância. Os modelos de medidores de tensão são representados no *ATPDraw* com os ícones com a letra V que são vistas próximo de cada componente, com eles é possível medir tensão em qualquer ponto do sistema, podendo ser de forma monofásica ou trifásica, o sinal de tensão contendo os dados, a forma de onda e a Transformada Rápida de Fourier também é obtido com esse medidor.



**Figura 17** Modelo de fonte ACSOURCE. (Fonte: *ATPDraw*).

As linhas de distribuição fazem parte do sistema interligando os componentes. Para modelar linhas ou alimentadores que compõem o sistema o modelo utilizado foi o que representa um equivalente pi com parâmetros concentrados, ou seja, o LINEPI\_3. No ATP o modelo é desenvolvido através do cálculo de matrizes impedância. Os dados de entrada são R,

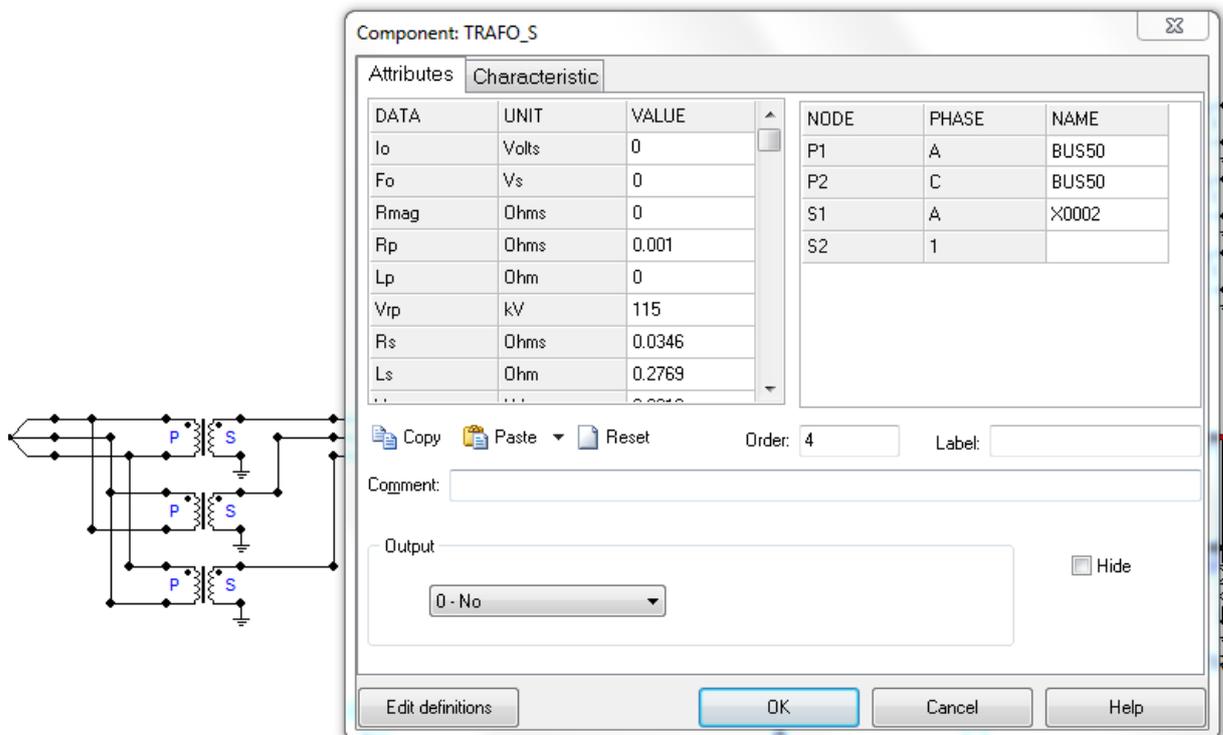
L e C, a Figura 18 mostra o bloco que representa o modelo de linha tipo pi, e sua tela de entrada de dados.



**Figura 18** Modelo de linha LINEPI\_3. (Fonte: ATPDraw).

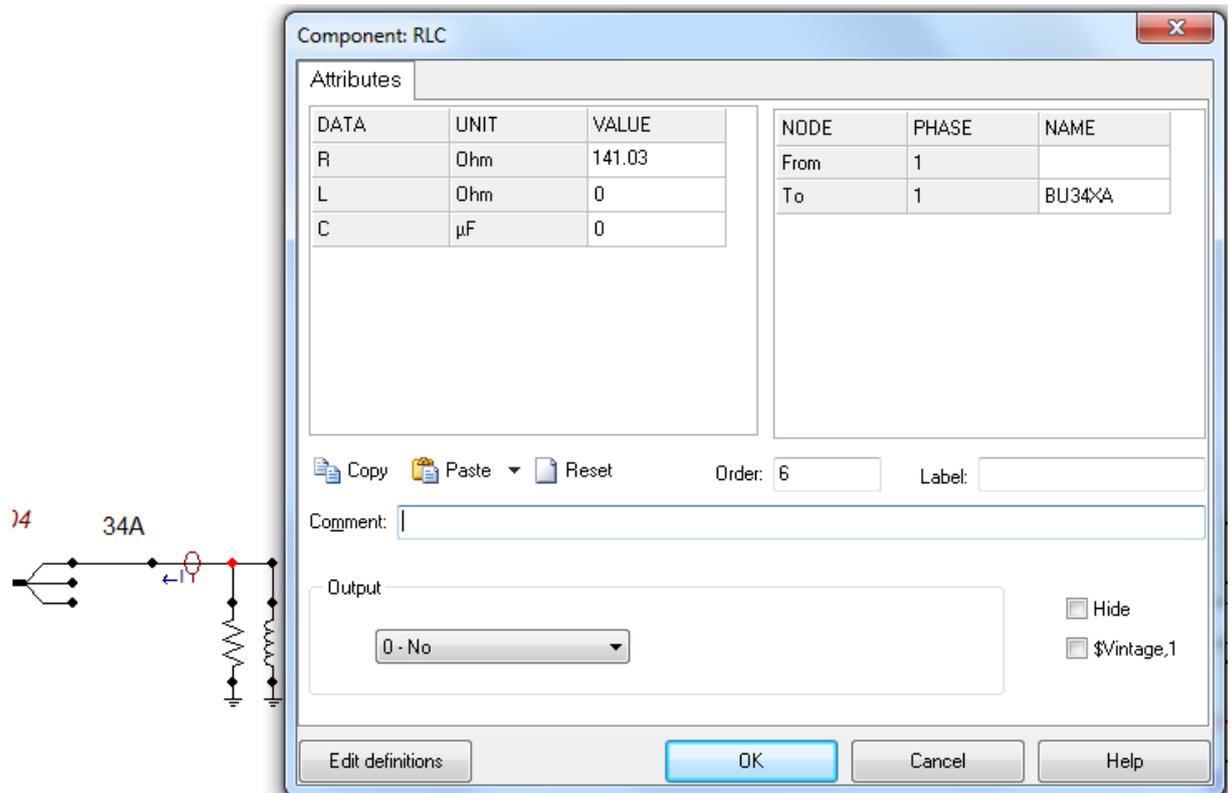
Os transformadores também estão presentes em sistemas de distribuição, na modelagem do sistema estudado os transformadores são representados com o modelo TRAF0\_S, que foi modelado de forma a configurar um transformador delta-estrela trifásico. O lado do primário é delta e o secundário é estrela. A Figura 19 mostra o bloco que representa esse transformador, sendo observado que são inseridos três blocos do mesmo, o TRAF0\_S, para compor a representação do transformador delta-estrela presente no sistema, de forma trifásica. Um modelo do tipo BCTRAN também seria uma boa alternativa para esta modelagem, mas como este tipo de representação requer os dados detalhados de ensaios do transformador, em vazio e curto circuito, não foi possível modelá-lo, uma vez que não há esse tipo de dado disponibilizado no artigo o qual foi baseada esta modelagem (Task Force, 1999).

Vale lembrar que os sistemas de que trata o artigo do *Task Force on HMS* são sistemas testes, baseados na realidade de SEP com distorções harmônicas, mas sistemas teóricos, de maneira que não seria possível ter dados tão aprofundados e completos como requer o *ATPDraw*.



**Figura 19** Modelo de transformador TRAF0\_S. (Fonte: *ATPDraw*).

Para modelar cargas lineares, foram utilizados ramos paralelos às linhas, com R e L em paralelo. O bloco é o mesmo para resistores e indutores, é chamado RLC, que é monofásico, sendo extremamente útil na modelagem de sistemas desequilibrados. Quando o intuito é modelar um resistor, deixa-se o campo de indutores e de capacitores com o valor de 0, quando a intenção é modelar um indutor, os campos que recebem o valor de 0 são os de R e C. A Figura 20 mostra os ícones de R e L como carga linear e a janela de entrada de dados para modelar resistência.

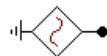


**Figura 20** Modelo de carga linear RL. (Fonte: *ATPDraw*).

Para cargas não lineares a grande maioria dos estudos com análise harmônica apresenta a modelagem através de injeção de corrente, que no *ATPDraw* é representado com fontes de corrente. Na fonte são incluídas magnitudes para cada frequência analisada, ou seja, várias fontes de correntes, paralelas uma à outra, são inseridas num determinado nó que já tenha um RL em paralelo, sendo que o RL está representando aquela carga na frequência fundamental.

Quando o pesquisador tem os dados completos e detalhados do equipamento causador de distorções harmônicas, ele pode fazer a representação do dispositivo através de modelagem de cada componente presente nele, conforme sua configuração. Os resultados que o *ATPDraw* obtém com essa simulação serão similares ou iguais aos de uma simulação onde são inseridos os valores conhecidos das correntes referentes a cada ordem harmônica que aquele equipamento produz.

A Figura 21 apresenta uma fonte do tipo ACSOURCE, configurada para ser do tipo corrente. Os dados de entrada são a amplitude da corrente, a frequência de que se trata aquele valor, o ângulo de fase, e os tempos de início e fim de atuação da fonte de corrente. Neste caso os tempos de início e fim podem variar, ou seja, uma determinada fonte, por exemplo, de 3ª harmônica pode iniciar durante a simulação já ocorrendo. Por exemplo, a simulação poderia ter 2 segundos no total, e a fonte de 3ª ordem atuaria somente entre 0,5 s e 1s. Ou diversas outras formas de atuação de fontes de corrente poderiam ser criadas.



Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Ampere	10
Frequency	Hz	180
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	A	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source:  Current  Voltage

Num phases:  Single  3-phase  3\*1-phase

Angle units:  Degrees  Seconds

Amplitude:  Peak L-G  RMS L-G  RMS L-L

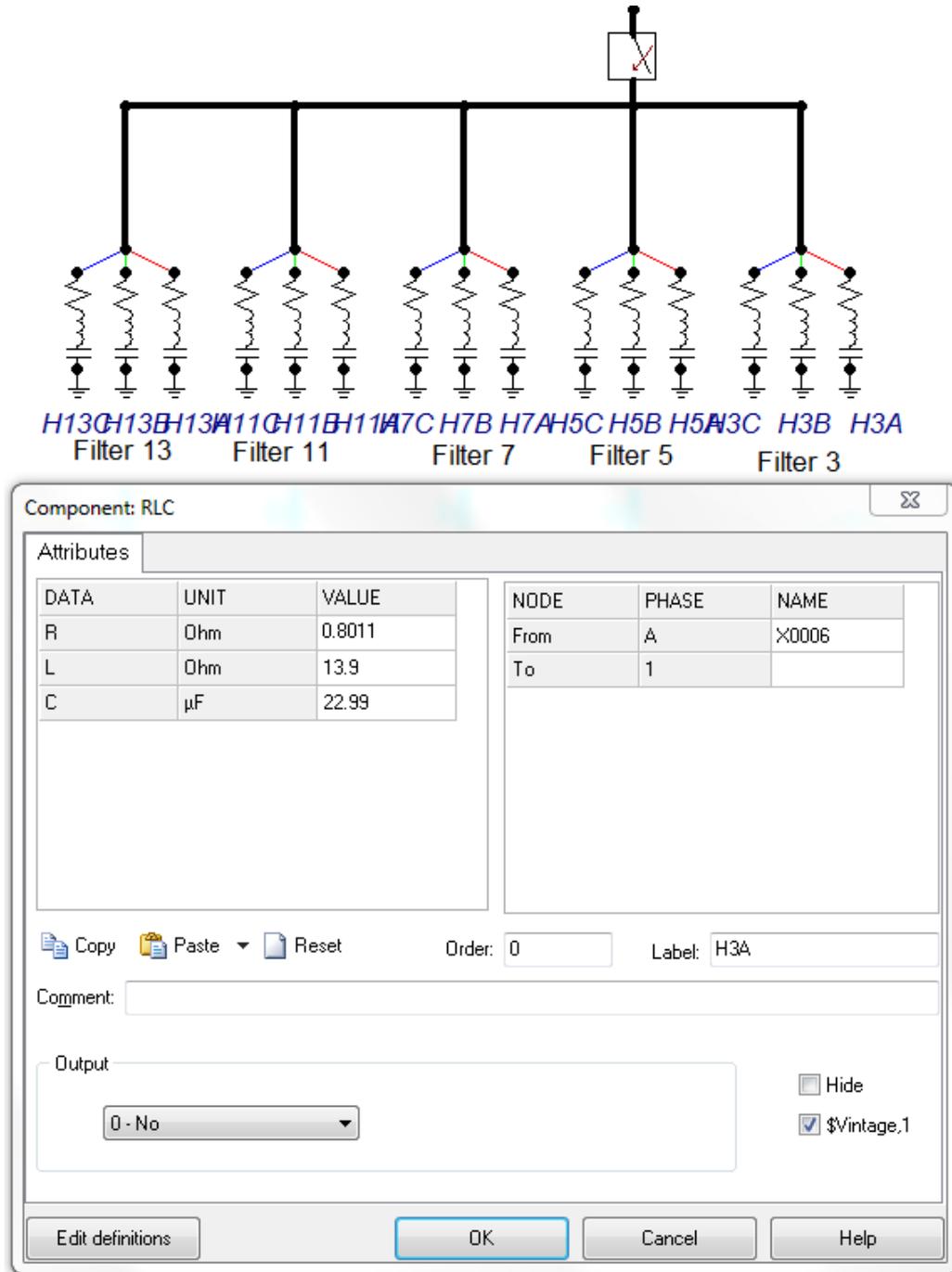
Grounding:  Grounded  Ungrounded  Hide

Edit definitions OK Cancel Help

**Figura 21** Modelo de carga não linear ACSOURCE (corrente). (Fonte: ATPDraw).

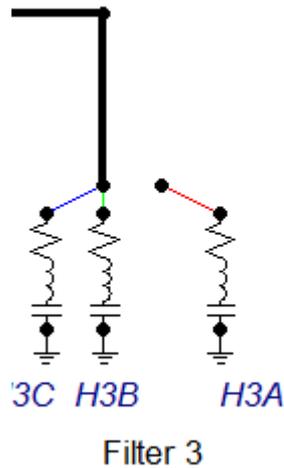
Para a modelagem dos filtros passivos monofásicos são utilizados os componentes R, L e C. O modelo do filtro é representado com o bloco RLC somente, indicando que não é trifásico, diferentemente de alguns modelos apresentados anteriormente, que eram denominados como RLCY3, por exemplo. Os parâmetros de entrada são preenchidos com os valores de R, L e C que foram calculados anteriormente conforme os dados do SDEE. Os

valores podem ser convertidos para valores de mercado, ou seja, valores existentes, para, assim, verificar a atuação dos filtros passivos. A Figura 22 apresenta o modelo do ATPDraw.



**Figura 22** Modelo de filtro passivo RLC. (Fonte: ATPDraw).

Pelo fato dos filtros serem alocados de forma monofásica visando atuar em qualquer parte de um sistema desequilibrado, eles são desmembrados e apresentados conforme a parte chamada *H3A* na Figura 23, ou seja, fase A, B ou C separadamente.



**Figura 23** Modelo de filtro passivo RLC monofásico. (Fonte: *ATPDraw*).

### 5.1.2 Análise da distorção harmônica

Após a simulação são medidos os sinais de tensão e calculados os valores de *THD* e *IHD* para cada nó do sistema. Assim, seguindo a norma *IEEE Std. 519/2014* para verificação dos limites desses índices, é feita a primeira análise harmônica. Esta análise tem a finalidade de verificar se há nós fora dos limites, e quais são eles, bem como, quais são as principais ordens harmônicas presentes neste sistema elétrico. A norma *IEEE Std. 519/2014* é utilizada como base por se tratar de uma norma consolidada e com histórico de poucas modificações ou revisões. A Tabela 11 apresenta as *THD* do sistema de 3 nós.

**Tabela 11:** *THD* de tensão sistema teste 3 nós

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
01	3,57%		
02		1,76%	
03	4,78%	5,21%	5,44%

Nesta análise percebe-se as fases B e C do nó 03 fora dos limites estipulados pela norma, que é 5% para esta faixa de tensão, de 4,16 kV. Os demais nós estão dentro do limite.

### 5.1.3 Resultados – Caso 1

No caso 1, um SEP de 3 nós, a finalidade é analisar um pequeno sistema elétrico verificando a melhor opção de alocação de filtros que minimize de forma sistêmica as distorções harmônicas, com menor custo possível, mantendo todos os nós abaixo do limite de distorção harmônica estipulado. Este procedimento é feito com a busca exaustiva, na qual todas as possibilidades de combinações são simuladas manualmente, inserindo os filtros em cada fase, e verificando o impacto em cada nó do sistema.

A metodologia MAFIPAM é então aplicada, contando com o algoritmo de otimização *NSGA II* para obter o resultado do problema. O resultado é então comparado com a solução ótima obtida a partir do procedimento de busca exaustiva executado anteriormente. Para a definição do valor limite das restrições é utilizada a norma *IEEE Std. 519/2014*, que limita a 8% a *THD* do nó 01 e a 5% a *THD* nos nós 02 e 03.

A Tabela 12 apresenta o resultado obtido conforme o procedimento de alocação de filtros um a um, verificando os *THD* de cada nó do sistema de 3 nós.

**Tabela 12: Resultado manual de alocação de filtros no Sistema de 3 nós**

Nó	Fase	Filtro ( <i>h</i> )	F <sub>1</sub> (nós)	F <sub>2</sub> (US\$)
03	B e C	3 <sup>a</sup>	0	1000
02 e 03	B	3 <sup>a</sup>	0	1000

Conforme a Tabela 12, existe mais de um caso testado que chega ao mínimo de nós fora do limite, ou seja, nenhum nó extrapolando os limites, por isso F<sub>1</sub> vale 0, que é o valor ideal. Enquanto o custo, F<sub>2</sub>, varia conforme os filtros alocados, o custo de um filtro de 3<sup>a</sup> ordem harmônica foi estipulado como \$500, enquanto o de 5<sup>a</sup> vale \$400, o de 7<sup>a</sup> vale \$300, o de 11<sup>a</sup> vale \$200 e o de 13<sup>a</sup> vale \$100. Na alocação manual foram encontradas duas soluções, sendo: alocação de um filtro passivo monofásico de 3<sup>a</sup> harmônica no nó 03 na fase B e um

filtro passivo monofásico de 3ª harmônica no nó 03 na fase C, garantindo todos os nós abaixo do limite estipulado pela norma. E a segunda alternativa, com: alocação de filtro passivo monofásico de 3ª harmônica no nó 02 na fase B e outro filtro passivo monofásico de 3ª harmônica no nó 03 na fase B, custando \$1000, com todos os nós respeitando os limites.

A Figura 24 apresenta a fronteira de Pareto apresentada como solução final na metodologia MAFIPAM. Nesta simulação foi feita a otimização rodando o *NSGA II* com uma população de 50 indivíduos e 35 gerações. A figura apresenta a fronteira de uma solução que tem as seguintes opções:

- Para os casos em que  $F_1 = 0$  e  $F_2 = \$1000$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica no nó 02, fase B e 3ª no nó 03, fase C (2 filtros monofásicos instalados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica no nó 03, fase B e 7ª e 11ª no nó 03, fase C (3 filtros monofásicos instalados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica no nó 03, fase B e 3ª no nó 03, fase C (2 filtros monofásicos instalados).

- Para os casos em que  $F_1 = 1$  e  $F_2 = \$500$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica: nó 02, fase B.

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica: nó 03, fase B.

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica: nó 03, fase C.

- Para os casos em que  $F_1 = 2$  e  $F_2 = \$300$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 7ª ordem harmônica: nó 03, fase B.

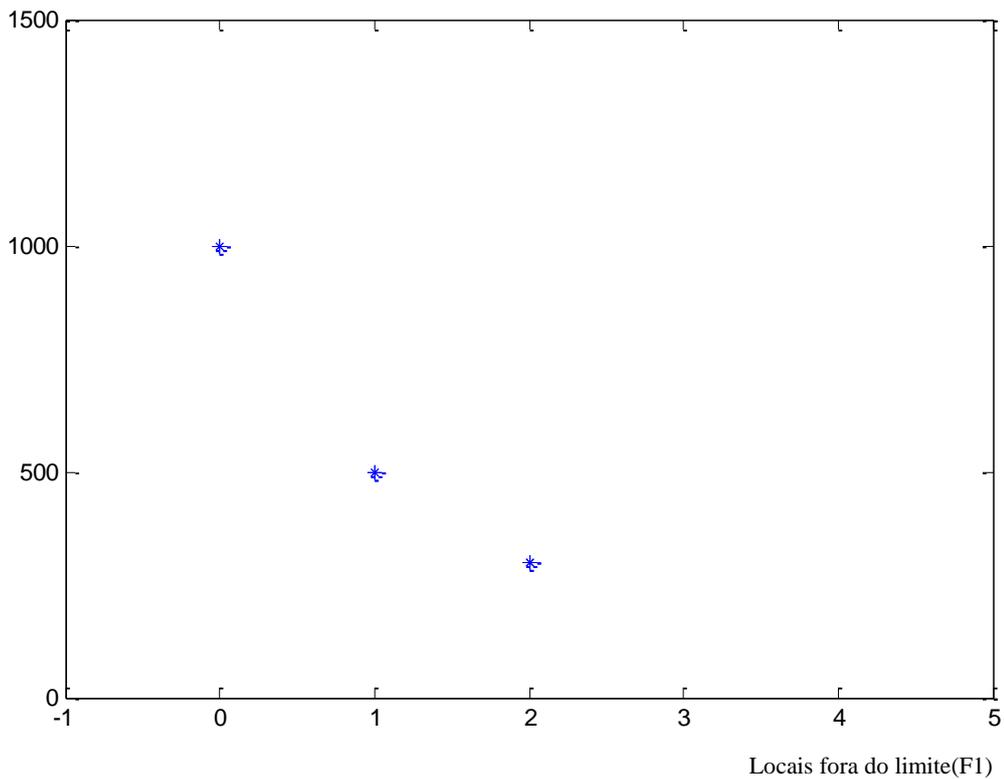
Alocação de filtro passivo monofásico de 7ª ordem harmônica: nó 03, fase C.

Alocação de filtro passivo monofásico de 11ª ordem harmônica no nó 03, fase C e de 13ª no nó 03, fase A.

O conjunto solução com os indivíduos que pertencem à população final é dado através da equação (27). Percebe-se que muitos indivíduos se repetem nesta população, que é composta por 50 indivíduos, porém, com 9 possibilidades, uma vez que vários indivíduos se repetem nas gerações finais.

$$p = \begin{bmatrix} N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 1 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 32 & N003C, 1 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 32 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 1 & N003C, 1 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 32 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 1 & N003C, 13 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 1 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 32 & N003C, 32 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 32 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 1 & N003C, 32 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 32 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 32 & N003C, 1 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 32 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 3 & N003C, 32 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 32 & N002C, 0 & N003A, 32 & N003B, 32 & N003C, 3 \\ N001A, 32 & N001B, 0 & N001C, 0 & N002A, 0 & N002B, 32 & N002C, 0 & N003A, 5 & N003B, 32 & N003C, 4 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Custo dos Filtros (F2)



**Figura 24** Fronteira de Pareto Caso 1. (Fonte: o autor).

Verificando os resultados, percebe-se que a MAFIPAM alcança o resultado obtido pela metodologia de alocação manual de filtros monofásicos. A diferença entre os resultados da Tabela 12 e os resultados da fronteira, é que na tabela foram apresentados resultados nos quais



Validada a modelagem, através da simulação do caso base, e comparação com as *THD* divulgadas no artigo do *Task Force* (1999), incrementaram-se as correntes harmônicas injetadas para obter um índice de distorção harmônica de tensão que justificasse a necessidade da instalação de filtros.

### 5.2.1 Modelagem

Da mesma forma que o sistema anterior, caso 1, para modelagem do sistema elétrico de 13 barras foram utilizados os mesmos blocos do programa *ATPDraw*.

Todos os valores inseridos nas janelas de entrada dos componentes do *ATPDraw* foram disponibilizados no artigo do *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* (1999).

A fonte do sistema, localizada no primeiro nó do diagrama unifilar, é representada com modelo ACSOURCE, que foi apresentada na Figura 17. Da mesma forma, há medidores de tensão, que possibilitam medir tensão em qualquer ponto do sistema, de forma monofásica ou trifásica.

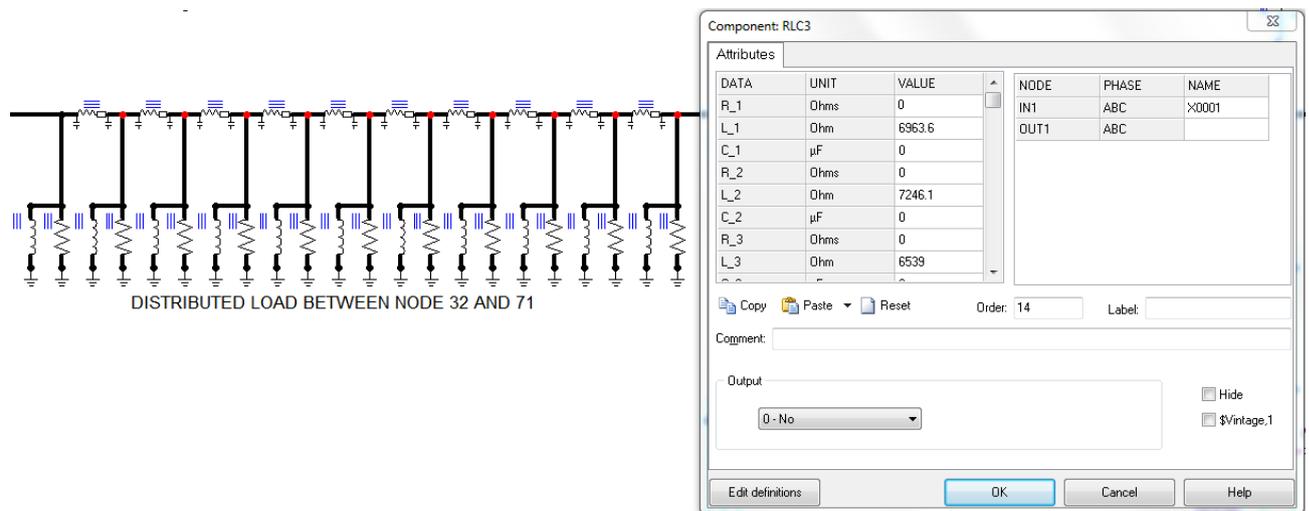
As linhas de distribuição são modeladas com um equivalente pi com parâmetros concentrados, ou seja, o LINEPI\_3. Os dados de entrada são R, L e C, a Figura 18 apresenta o bloco que representa este tipo de linha.

Os transformadores foram representados com o bloco TRAFOS, que representa um transformador delta-estrela trifásico, apresentado na Figura 19.

As cargas, lineares e não lineares, são apresentadas na Figura 20 e na Figura 21, respectivamente. Na modelagem de cargas lineares, foram utilizados ramos paralelos às linhas, com R e L em paralelo. Já as cargas não lineares são representadas com fontes de corrente.

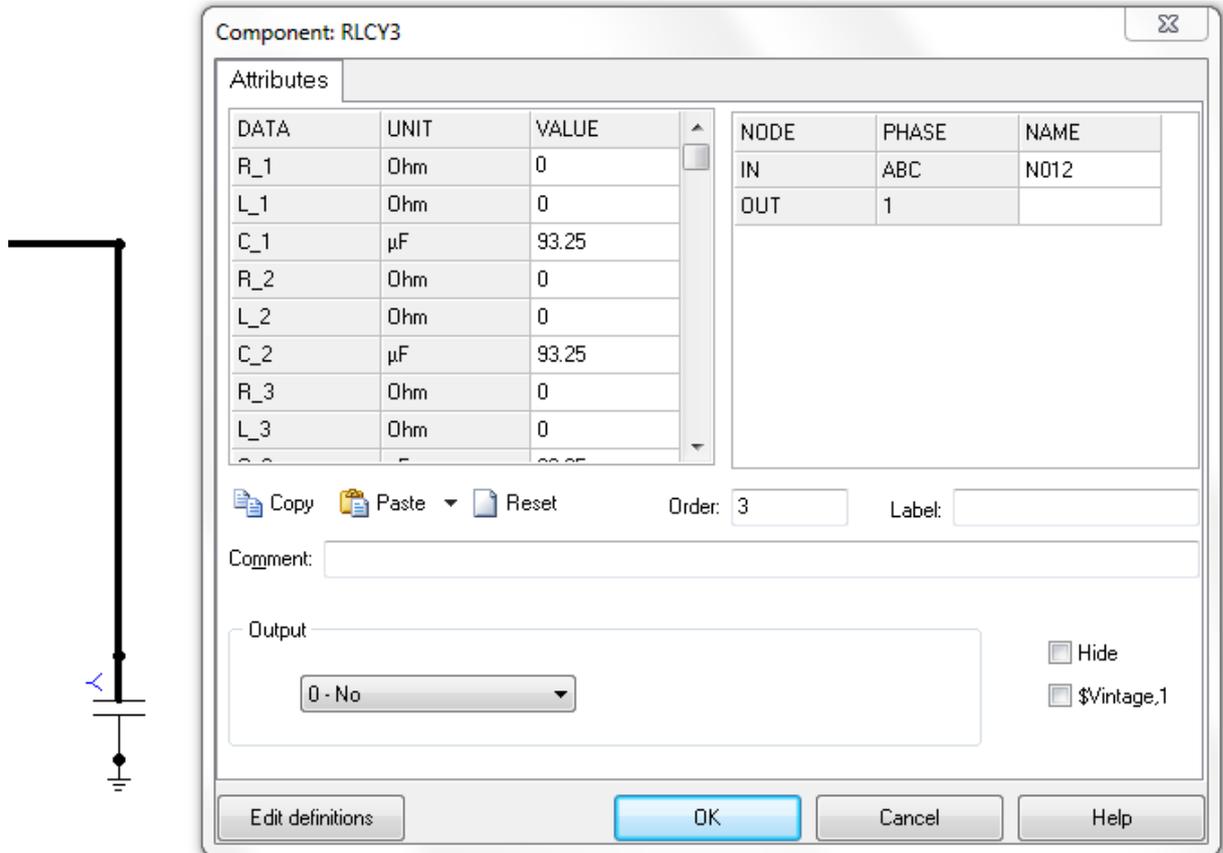
A seguir apresentam-se os modelos utilizados na modelagem do caso 2 que não estavam presentes no caso 1.

As cargas distribuídas podem ser modeladas como um equivalente de linhas pi, modelo LINEPI\_3, já apresentado, e cargas, numa configuração RL em paralelo, modelo RLCY3, já apresentado, constando os valores de R e L somente. Esse modelo composto por dois blocos do *ATPDraw* é mostrado na Figura 26.



**Figura 26** Modelo de carga distribuída LINEPI\_3 e RL. (Fonte: *ATPDraw*).

Os bancos de capacitores presentes neste sistema são modelados através de um valor de capacitância com o modelo RLCY3, deixando zerados os valores de R e L e somente inserindo um valor em C, no capacitor, conforme mostra a Figura 27. Percebe-se que o modelo é trifásico, uma vez que tem entrada para três valores de cada parâmetro.



**Figura 27** Modelo de capacitor C. (Fonte: ATPDraw).

### 5.2.2 Análise da distorção harmônica

As *THD* de tensão do sistema obtidas do artigo do *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* (1999) são apresentadas na Tabela 13.

Os valores de *THD* obtidos com a modelagem e simulação são apresentados na Tabela 14 para comparação e validação da modelagem realizada. A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14 pode-se observar uma diferença muito pequena entre os valores de distorções harmônicas apresentados no artigo e as modeladas para a MAFIPAM.

Para a definição do valor limite das restrições é utilizada a norma *IEEE Std. 519/2014*, por se tratar de uma norma mais consolidada e com menor histórico de modificações ou revisões.

**Tabela 13: THD de tensão nas barras analisadas conforme artigo *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation*.**

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
32	1,96%	1,76%	1,69%
33	1,96%	1,76%	1,69%
34	0,96%	0,96%	1,04%
71	3,23%	2,76%	2,86%
75	3,35%	2,82%	2,95%
52	3,30%		
911			3,00%

**Tabela 14: THD de tensão nas barras analisadas conforme simulação.**

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
32	2,06%	1,83%	1,70%
33	2,06%	1,83%	1,70%
34	1,06%	1,18%	0,99%
71	3,34%	2,90%	2,89%
75	3,47%	2,98%	2,95%
52	3,35%		
911			3,01%

Na Tabela 15 são apresentadas as magnitudes, em p.u., e ângulos, em graus, das correntes consideradas para cada tipo de carga não linear.

**Tabela 15: Correntes harmônicas das cargas não lineares**

$h$	Lâmpada Fluorescente		ASD		Outros	
	magnitude	fase	magnitude	fase	magnitude	fase
1	1	-41,2	1	-1,5	1	-35
2	0	0	0	0	0	0
3	0,192	273,4	0,542	0,7	0,007	-105,8
4	0	0	0	0	0,095	-167,4
5	0,107	339	0,152	110,8	0,002	-275,5
6	0	0	0	0	0,083	-42,6
7	0,021	137,7	0,069	151,9	0	0
8	0	0	0	0	0,005	-247,8
9	0,014	263,2	0,043	-95	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0,009	39,8	0,036	-13,9	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0,006	182,4	0,029	95,2	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0,005	287	0,025	-182,7	0	0

Uma vez validada a modelagem, foi necessário provocar uma maior distorção harmônica, para justificar a instalação de filtros no sistema. Portanto cada injeção de corrente correspondente à harmônica ímpar geradas por *ASD (Adjustable Speed Drive)*, lâmpadas fluorescentes e outras teve sua magnitude multiplicada por 5 (cinco). Com este procedimento, os novos valores de injeções de harmônicas são mostrados na Tabela 16.

**Tabela 16: Novos valores de correntes harmônicas das cargas não lineares**

H	Lâmpada Fluorescente		ASD		Outros	
	Mag.	Phase	Mag.	Phase	Mag.	Phase
1	1	-41,2	1	-1,5	1	-35
<b>3</b>	<b>0,96</b>	<b>273,4</b>	<b>2,71</b>	<b>0,7</b>	<b>0,035</b>	<b>-105,8</b>
4	0	0	0	0	0,095	-167,4
<b>5</b>	<b>0,535</b>	<b>339</b>	<b>0,76</b>	<b>110,8</b>	<b>0,01</b>	<b>-275,5</b>
6	0	0	0	0	0,083	-42,6
<b>7</b>	<b>0,105</b>	<b>137,7</b>	<b>0,345</b>	<b>151,9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
8	0	0	0	0	0,005	-247,8
<b>9</b>	<b>0,07</b>	<b>263,2</b>	<b>0,215</b>	<b>-95</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>11</b>	<b>0,045</b>	<b>39,8</b>	<b>0,18</b>	<b>-13,9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>13</b>	<b>0,03</b>	<b>182,4</b>	<b>0,145</b>	<b>95,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>15</b>	<b>0,025</b>	<b>287</b>	<b>0,125</b>	<b>-182,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Os novos resultados de *THD* de tensão nos referidos pontos de monitoramento são apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17: THD de tensão após incremento de injeção de harmônica.**

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
<b>32</b>	8,87%	8,52%	8,35%
<b>33</b>	8,75%	9,15%	8,37%
<b>34</b>	4,23%		
<b>71</b>	14,50%	13,51%	14,04%
<b>75</b>	14,97%	13,82%	14,34%
<b>52</b>	14,57%		
<b>911</b>			14,60%

Dessa forma, verifica-se que muitos dos indicadores de distorção harmônica referentes a cada nó analisado neste sistema estão acima do limite especificado nas normas, e convém a aplicação de filtros em determinadas barras do sistema, a serem escolhidas com a metodologia proposta.

### 5.2.3 Otimização com *NSGA II*

Conforme explicado no capítulo 4, para proceder na metodologia proposta é necessário nomear cada um dos nós de forma compatível com a leitura do algoritmo, e codificar o vetor de variáveis para atuação dos programas envolvidos na simulação.

O *ATPDraw* receberá a informação de cada local onde terá que instalar um filtro dentro do SEP modelado, conforme a população inicial. Assim, o sistema é simulado e retornará com os índices harmônicos. O *NSGA II* terá criado, através do vetor indivíduo, essa informação. Para a definição do número de genes que compõem cada vetor indivíduo da população foi necessário numerar as fases de cada nó do SEP. Sabendo-se que cada gene é um possível local a receber filtro, o procedimento seguiu a seguinte lógica:

- Cada nó do estudo de caso e suas respectivas fases são nomeadas em ordem crescente desde a barra da subestação, sendo, neste estudo de 13 nós de N001 até N013.
- Os genes que compõem um indivíduo são 39, relativos aos 13 nós e suas respectivas fases, assim: N001A, N001B, N001C, N002A, até N013C, conforme a Tabela 18.

**Tabela 18: Nomeação dos nós**

Barra	Nome do Nó	Nó no vetor indivíduo
31	N001	N001A,N001B, N001C
32	N002	N002A,N002B,N002C
33	N003	N003A,N003B, N003C
34	N004	N004A,N004B, N004C
45	N005	N005A,N005B, N005C
46	N006	N006A,N006B, N006C
71	N007	N007A,N007B, N007C
84	N008	N008A,N008B, N008C
911	N009	N009A,N009B, N009C
52	N010	N010A,N010B, N010C
92	N011	N011A,N011B, N011C
75	N012	N012A,N012B, N012C
150	N013	N013A,N013B, N013C

A Figura 28 mostra o vetor indivíduo do estudo de caso, composto pelos genes, que são os locais do sistema em análise.

```
[ 'N001A' 'N001B' 'N001C' 'N002A' 'N002B' 'N002C' 'N003A' 'N003B' 'N003C'
'N004A' 'N004B' 'N004C' 'N005A' 'N005B' 'N005C' 'N006A' 'N006B' 'N006C'
'N007A' 'N007B' 'N007C' 'N008A' 'N008B' 'N008C' 'N009A' 'N009B' 'N009C'
'N010A' 'N010B' 'N010C' 'N011A' 'N011B' 'N011C' 'N012A' 'N012B' 'N012C' 'N013A' 'N013B' 'N013C' ]
```

**Figura 28** Vetor indivíduo sistema 13 nós. (Fonte: o autor).

Cada um dos genes receberá um dos 32 códigos possíveis quando existir fase e 0 quando não houver fase existente.

Para a codificação das possibilidades de instalação de filtros em cada fase existente (lembrando que as ordens dos filtros disponíveis são: 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>) foi feita a codificação que varia de 0 a 32. A Tabela 19 mostra os códigos conforme as ordens disponíveis.

**Tabela 19: Códigos**

código	filtros	código	filtros
0	sem fase existente		
1	3 <sup>a</sup>	17	3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup>
2	5 <sup>a</sup>	18	3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
3	7 <sup>a</sup>	19	3 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup>
4	11 <sup>a</sup>	20	3 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
5	13 <sup>a</sup>	21	3 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
6	3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup>	22	5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup>
7	3 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup>	23	5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
8	3 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup>	24	5 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
9	3 <sup>a</sup> e 13 <sup>a</sup>	25	7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
10	5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup>	26	3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup>
11	5 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup>	27	3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
12	5 <sup>a</sup> e 13 <sup>a</sup>	28	3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
13	7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup>	29	3 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
14	7 <sup>a</sup> e 13 <sup>a</sup>	30	5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
15	11 <sup>a</sup> e 13 <sup>a</sup>	31	3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> , 13 <sup>a</sup>
16	3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup>	32	sem filtro alocado

Na Tabela 19 é mostrado que no código 0 não há fase existente, no código 1 o filtro de 3ª ordem é alocado, no código 2 o filtro de 5ª ordem é alocado, e assim por diante combinando os filtros, até chegar ao código 31, no qual todos os filtros são instalados na fase, e o código 32 indicando que não há filtro alocado naquele espaço.

Com a codificação, percebe-se que o universo de possibilidades de inserção de filtros é grande, para um sistema de 13 nós, ou seja, 39 locais, nos quais há 32 possibilidades de códigos (combinações de filtros), o universo de possibilidades é  $8,2 \times 10^{50}$ . O cálculo é feito através das informações de que cada indivíduo,  $x$ , do *NSGA II*, tem 39 espaços, correspondentes a cada possível local de inserção de filtro, e cada um desses locais, é passível de receber uma das 31 combinações de filtros e mais 1 opção na qual nenhum filtro é alocado, ou seja, 32 possibilidades. Porém, considerando que neste caso há ramos monofásicos e bifásicos, deve-se descontar estes locais inexistentes, resultando em 29 locais disponíveis para alocação de filtros monofásicos, gerando um universo de possibilidades na faixa de  $6,26 \times 10^{46}$ .

#### 5.2.4 Resultados MAFIPAM – Caso 2: Sistema IEEE 13 nós

Considerando o número máximo de filtros monofásicos a serem instalados,  $nf = 9$  e uma população de 100 indivíduos e 100 gerações, o *NSGA II* encontrou os seguintes resultados de alocação de filtros monofásicos para o sistema *IEEE* 13 nós:

- Para os casos em que  $F_1 = 3$  e  $F_2 = \$2700$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 5ª ordem harmônica no nó 07, fase A; 3ª, 7ª, 11ª e 13ª no nó 08, fase C; 3ª no nó 09, fase C e 3ª no nó 12, fase B (7 filtros alocados).

- Para os casos em que  $F_1 = 5$  e  $F_2 = \$2300$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 5ª ordem harmônica no nó 08, fase A; 3ª no nó 09, fase C; 3ª no nó 12, fase B e 5ª, 11ª e 13ª no nó 08, fase A

(6 filtros alocados).

- Para os casos em que  $F_1 = 7$  e  $F_2 = \$1700$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 5ª ordem harmônica no nó 07, fase A; 3ª e 5ª no nó 08, fase C e 7ª e 13ª no nó 12, fase B (5 filtros alocados).

- Para os casos em que  $F_1 = 8$  e  $F_2 = \$1300$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 13ª ordem harmônica no nó 08, fase C; 5ª no nó 09, fase C; 5ª no nó 12, fase A e 7ª e 13ª no nó 12, fase B (5 filtros alocados).

- Para os casos em que  $F_1 = 13$  e  $F_2 = \$1000$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 13ª ordem harmônica no nó 03, fase B; 5ª no nó 12, fase A; 13ª no nó 08, fase C e 7ª e 13ª no nó 12, fase B (5 filtros alocados).

- Para os casos em que  $F_1 = 22$  e  $F_2 = \$700$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 13ª ordem harmônica no nó 03, fase B; 13ª no nó 08, fase C; 13ª no nó 12, fase A e 7ª e 13ª no nó 12, fase B (5 filtros alocados).

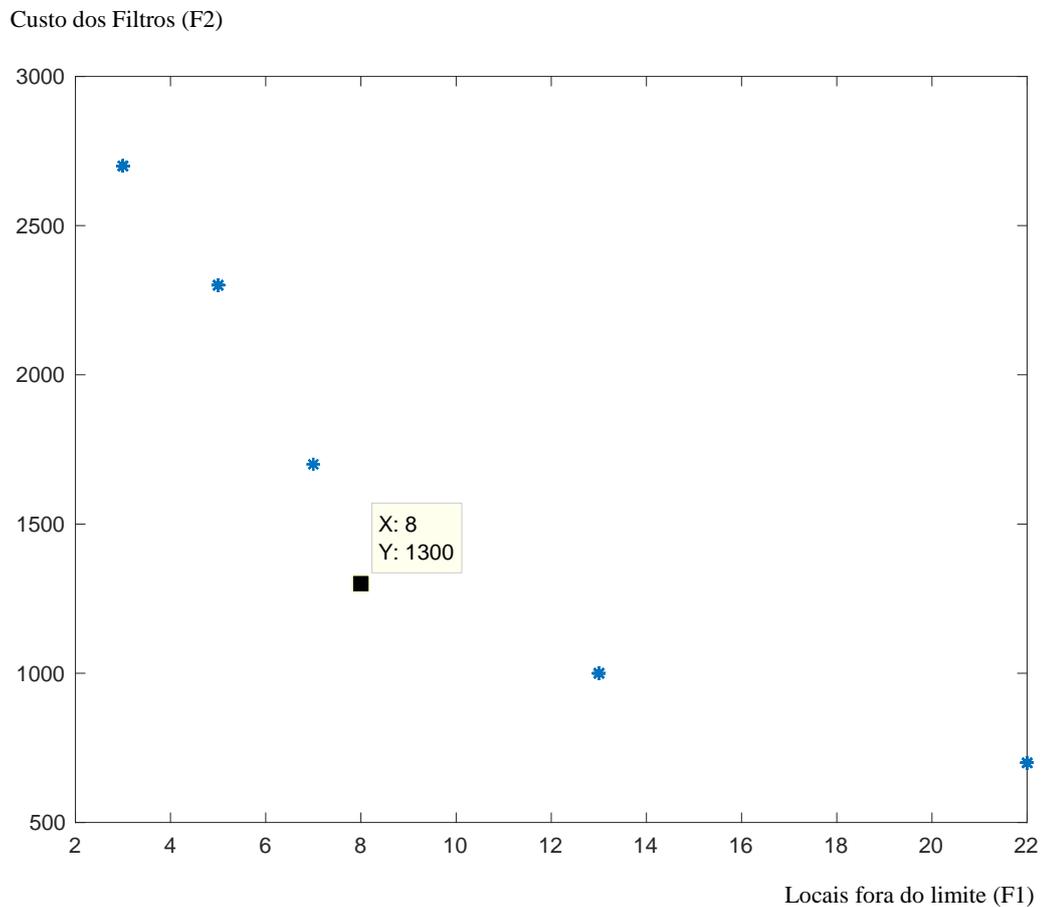
O conjunto solução é apresentado na equação (28). E a fronteira de Pareto na Figura 29.

$$p = \begin{bmatrix} N007A,2 & N008C,29 & N009C,1 & N012B,1 \\ N008A,24 & N008C,2 & N009C,1 & N012B,1 \\ & N007A,2 & N008C,6 & N012B,14 \\ N008C,5 & N009C,2 & N012A,2 & N012B,14 \\ N003B,5 & N008C,5 & N012A,2 & N012B,14 \\ N003B,5 & N008C,5 & N012A,5 & N012B,14 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Neste conjunto soluções foram apresentados apenas os locais e códigos selecionados para alocação de filtros. A matriz deste conjunto é muito grande por conta da quantidade de locais possíveis de alocação de filtros, que são os 13 nós multiplicado por 3 (as fases), assim,

cada linha tem 39 colunas. E sabe-se que os que não aparecem na matriz ou é devido à fases não existentes no SEP (código 0) ou é devido à não alocação de filtros no local (código 32).

A Figura 29 apresenta a fronteira de Pareto da solução obtida através da MAFIPAM, onde percebe-se que, do ponto de vista de F1, a solução ideal é a de 3 locais apenas violando limites impostos pela norma, com um custo de \$2700. Do ponto de vista de F2, o menor custo é \$700, porém, este mantém 22 dos locais existentes no SEP fora dos limites. O ponto ao centro da fronteira apresentada é o que  $F1 = 8$ , com  $F2 = \$1300$ .



**Figura 29** Fronteira de Pareto Solução 13 nós. (Fonte: o autor).

Para este caso 2, as injeções de corrente foram tão elevadas, da ordem de cinco vezes o valor indicado no artigo (*Task Force*, 1999), que em nenhum resultado da solução conseguiu-se alcançar o valor zero para a F1. Percebe-se na fronteira de Pareto que o mínimo é 3 locais fora do limite.

### 5.2.5 Outros Resultados - Sistema IEEE 13 nós

Para este sistema também foi feito um estudo de comparação entre as formas de alocação de filtros passivos. Na primeira etapa foram alocados 3 filtros passivos trifásicos para a simulação de mitigação de distorções harmônicas e então obteve-se a *THD* para cada nó do sistema. Na segunda etapa a alocação de filtros passivos monofásicos foi dada com a MAFIPAM, que encontrou 8 filtros monofásicos a serem alocados no sistema. Dessa forma, obteve-se a *THD* para cada nó do sistema, e comparou-se os valores com os resultados da primeira simulação, observando-se locais que ultrapassaram o limite de *THD* conforme a norma do *IEEE Std. 519/2014*. A Tabela 20 mostra os resultados de cada método utilizado.

**Tabela 20: Comparação dos locais fora do limite conforme os filtros instalados no SEP**

	Sem filtros	Com fitros trifásicos	Com filtros nonofásicos
Número de filtros alocados	0	3 filtros trifásico	8 filtros monofásicos
Locais excedendo o limite <i>IEEE Std. 519</i>	25	15	5

Percebe-se que com a alocação de filtros monofásicos no sistema, apenas cinco locais permanecem fora dos limites. A Tabela 21 mostra os valores de *THD* de cada fase para cada nó do sistema para a instalação de 3 filtros trifásicos no SDEE e a Tabela 22 mostra os valores de *THD* de cada fase para cada nó do sistema para a instalação de 8 filtros monofásicos neste sistema.

**Tabela 21: Instalação filtros trifásicos**

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
32	4.92%	2.88%	4.36%
33	4.90%	2.89%	4.37%
34	1.84%	-	-
45	-	3.00%	5.12%
46	-	3.02%	5.18%
71	7.71%	4.85%	6.84%
84	7.75%	-	7.07%
911	-	-	7.30%
52	7.76%	-	-
92	7.72%	-	6.85%
75	8.00%	5.07%	7.07%
150	7.19%	4.18%	6.07%

**Tabela 22: Instalação filtros monofásicos**

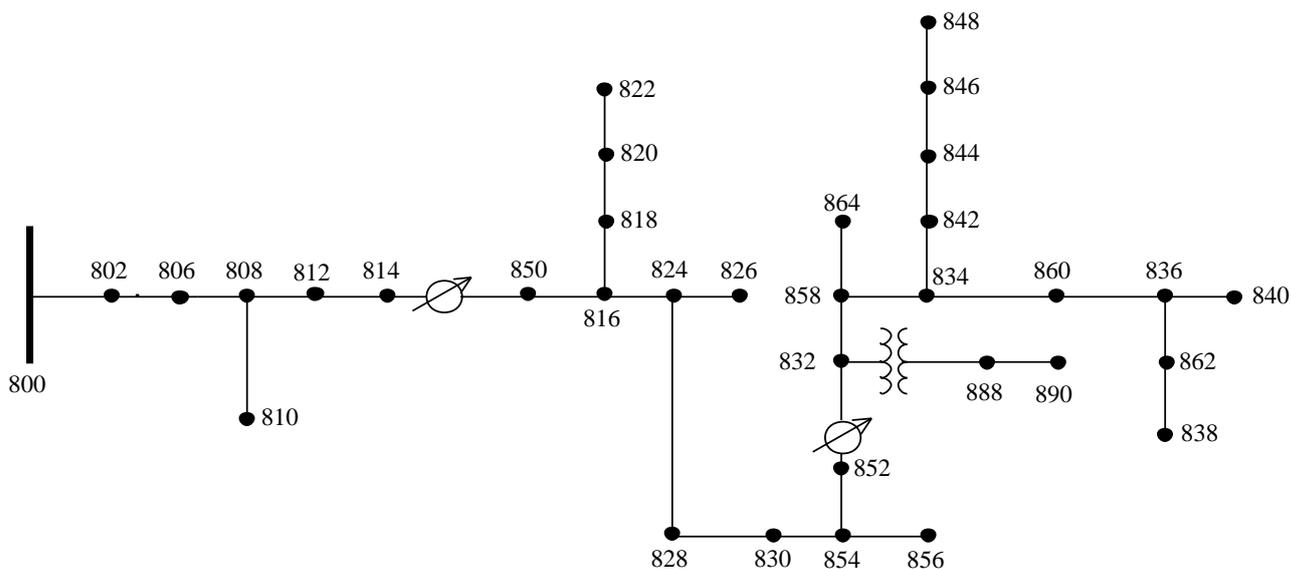
Nó	Fase A	Fase B	Fase C
32	3.14%	2.11%	4.77%
33	3.15%	2.12%	4.78%
34	2.46%	-	-
45	-	2.03%	3.42%
46	-	2.06%	3.48%
71	4.60%	4.75%	5.16%
84	4.52%	-	4.02%
911	-	-	4.43%
52	4.55%	-	-
92	4.60%	-	5.53%
75	4.86%	4.85%	5.09%
150	4.95%	5.05%	5.82%

### 5.3 CASO 3: SISTEMA IEEE 34-NÓS

Um outro caso foi executado para testar a metodologia, com um sistema maior, o *IEEE 34* nós, mostrado na Figura 30. Este sistema é um sistema real localizado no Arizona, com uma tensão nominal de 24,9 kV. É um sistema que apresenta um transformador para seção de 4,16 kV, carga desequilibrada, banco de capacitores e circuitos trifásicos e monofásicos. Neste sistema também foram modeladas fontes de correntes, que representam cargas não lineares, para que as distorções também alcançassem um nível que ultrapassasse os limites estipulados pela norma *IEEE Std. 519/2014*, pelo menos em alguns locais do SEP. Porém, os valores de magnitude de correntes injetadas foram muito menores comparados com o caso anterior, e além disso, não estão injetados em todos os nós do sistema.

#### 5.3.1 Modelagem

A modelagem para este sistema utilizou os mesmos modelos apresentados para os outros dois casos anteriores, 1 e 2. Os valores de entrada da modelagem são os fornecidos em *IEEE PES* e em Kersting W. H. (2001). Os modelos são utilizados na interface *ATPDraw* para a modelagem e simulação, e através destes procedimentos são obtidos os valores necessários para cálculo dos índices de qualidade.



**Figura 30** IEEE 34 Sistema de distribuição de 34 nós. (Fonte: *IEEE PES Test Feeders*)

### 5.3.2 Análise da distorção harmônica

Os valores de *THD* obtidos com a modelagem e simulação são apresentados na Tabela 23. Para a análise harmônica do SEP, foram considerados os limites da norma *IEEE Std. 519/2014* para estes níveis de tensão, 5% em 24,9 kV e 5% em 4,16 kV.

**Tabela 23:** *THD* de tensão sistema IEEE 34-nós.

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
800	5,73%	4,63%	1,32%
802	5,81%	4,02%	1,40%
806	5,98%	4,22%	1,59%
808	8,86%	7,53%	2,40%
810		7,82%	
812	7,21%	8,76%	2,56%
814	7,63%	10,16%	4,84%
850	7,78%	10,59%	4,62%
816	7,82%	10,78%	4,68%
818	4,79%		
820	4,83%		
822	4,84%		
824	8,32%	13,78%	4,89%
826		12,96%	
828	8,33%	13,38%	5,01%
830	7,83%	10,85%	4,63%

854	7,58%	10,67%	4,59%
856	9,35%		
852	6,89%	9,68%	4,58%
832	6,91%	9,70%	4,60%
888	6,83%	9,56%	4,66%
890	6,78%	9,28%	4,84%
858	6,89%	9,69%	4,57%
864	9,53%		
834	6,79%	9,30%	4,84%
842	6,78%	9,29%	4,83%
844	6,80%	9,30%	4,82%
846	6,80%	9,27%	4,81%
848	6,79%	9,26%	4,80%
860	6,79%	9,26%	4,81%
836	6,79%	9,25%	4,80%
862	6,78%	9,24%	4,79%
838	9,23%		
840	6,80%	9,26%	4,79%

### 5.3.3 Otimização com NSGA II

Novamente, seguindo a MAFIPAM é necessário nomear cada um dos nós pertencentes ao SEP de forma compatível com a leitura do algoritmo, e codificar o vetor de variáveis para atuação dos programas envolvidos na simulação e otimização.

Assim, cada nó do estudo de caso e suas respectivas fases são nomeadas em ordem crescente desde a subestação, sendo, neste estudo de 34 nós: de N001 até N034. Os genes que compõem um indivíduo são 102, relativos aos 34 nós e as três fases, conforme a Tabela 24. Cada um dos genes receberá um dos 32 casos possíveis quando existir fase e 0 quando não houver fase existente. Os códigos de combinação de filtros são os mesmos do caso 2 e foram apresentados na Tabela 19.

O universo de possibilidades deste caso é enorme. O sistema tem 34 nós, ou seja, 102 locais possíveis de instalação de filtros, o que resulta em  $1,88 \times 10^{64}$  possibilidades. Porém, considerando que neste caso há ramos monofásicos presentes, devem-se descontar os locais

inexistentes, resultando em 86 locais disponíveis para alocação de filtros monofásicos, e um universo de possibilidades de  $8,01 \times 10^{61}$ .

**Tabela 24: Nomeação dos nós**

Barra	Nome do Nó	Nó no vetor indivíduo
800	N001	N001A,N001B, N001C
802	N002	N002A,N002B,N002C
806	N003	N003A,N003B, N003C
808	N004	N004A,N004B, N004C
810	N005	N005A,N005B, N005C
812	N006	N006A,N006B, N006C
814	N007	N007A,N007B, N007C
850	N008	N008A,N008B, N008C
816	N009	N009A,N009B, N009C
818	N010	N010A,N010B, N010C
820	N011	N011A,N011B, N011C
822	N012	N012A,N012B, N012C
824	N013	N013A,N013B, N013C
826	N014	N014A,N014B, N014C
828	N015	N015A,N015B, N015C
830	N016	N016A,N016B, N016C
854	N017	N017A,N017B, N017C
856	N018	N018A,N018B, N018C
852	N019	N019A,N019B, N019C
832	N020	N020A,N020B, N020C
888	N021	N021A,N021B, N021C
890	N022	N022A,N022B, N022C
858	N023	N023A,N023B, N023C
864	N024	N024A,N024B, N024C
834	N025	N025A,N025B, N025C
842	N026	N026A,N026B, N026C
844	N027	N027A,N027B, N027C
846	N028	N028A,N028B, N028C
848	N029	N029A,N029B, N029C
860	N030	N030A,N030B, N030C

836	N031	N031A,N031B, N031C
862	N032	N032A,N032B,N032C
838	N033	N033A,N033B, N033C
840	N034	N034A,N034B, N034C

### 5.3.4 Resultados MAFIPAM – Caso 3: Sistema IEEE 34-nós

Neste caso 3, um SEP de 34 nós, com  $n_f = 15$ , 50 indivíduos e 50 gerações, o *NSGA II* retornou os seguintes resultados:

- Para os casos em que  $F_1 = 0$  e  $F_2 = \$16600$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica no nó 05, fase B; 3ª, 7ª, 11ª e 13ª no nó 13, fase B e 3ª no nó 21, fase B (6 filtros alocados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 13ª ordem harmônica no nó 05, fase B; 3ª no nó 07, fase A; 5ª, 7ª e 13ª no nó 21, fase A e 3ª no nó 21, fase B (6 filtros alocados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 5ª ordem harmônica no nó 05, fase B; 3ª no nó 21, fase A; 5ª, 7ª e 13ª no nó 21, fase B e 11ª no nó 34, fase A (6 filtros alocados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 3ª ordem harmônica no nó 07, fase A; 3ª no nó 13, fase B; 7ª no nó 21, fase B e 7ª, 11ª e 13ª no nó 34, fase C (6 filtros alocados).

- Para os casos que  $F_1 = 2$  e  $F_2 = \$15400$ :

Alocação de filtro passivo monofásico de 5ª, 11ª e 13ª ordem harmônica no nó 07, fase B; 3ª e 13ª no nó 20, fase A e 7ª no nó 21, fase A (6 filtros alocados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 5ª, 11ª e 13ª no nó 07, fase B; 3ª e 11ª no nó 20, fase A e 11ª no nó 21, fase B (6 filtros alocados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 11ª ordem harmônica no nó 07, fase A; 3ª, 7ª, 11ª e 13ª no nó 13, fase B e 7ª no nó 21, fase B (6 filtros alocados).

- Para os casos que  $F_1 = 43$  e  $F_2 = \$10700$ :

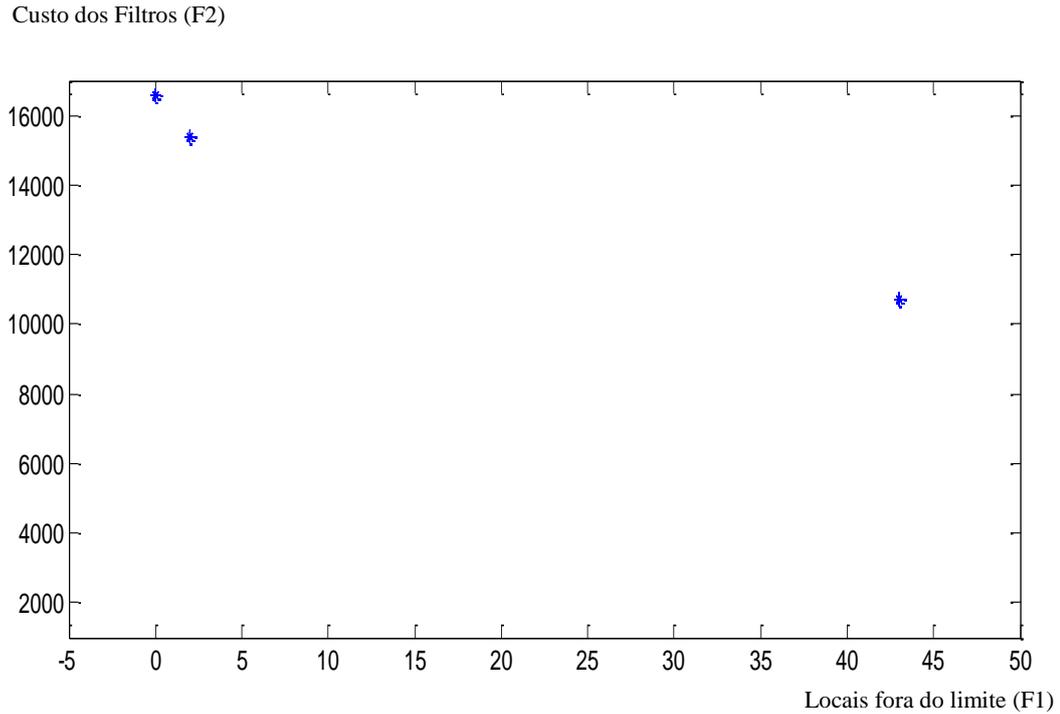
Alocação de filtro passivo monofásico de 13ª ordem harmônica no nó 17, fase B; 13ª no nó 28, fase C e 7ª, 11ª e 13ª no nó 29, fase A (5 filtros alocados).

Alocação de filtro passivo monofásico de 13ª ordem harmônica no nó 17, fase B; 13ª no nó 28, fase C e 7ª, 11ª e 13ª no nó 34, fase A (5 filtros alocados).

$$p = \begin{bmatrix} N005B,2 & N013B,29 & N021B,2 \\ N005B,5 & N007A,1 & N021A,23 & N021B,1 \\ N005B,2 & N021A,1 & N021B,23 & N034A,4 \\ N007A,1 & N013B,1 & N021B,3 & N034C,25 \\ N007B,24 & N020A,9 & N021A,3 \\ N007B,24 & N020A,8 & N021B,4 \\ N007A,4 & N013B,29 & N021B,3 \\ N017B,5 & N028C,5 & N029A,25 \\ N017B,5 & N028C,5 & N034C,25 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Para este sistema os valores dos filtros são: 3ª ordem harmônica vale \$3500, 5ª vale \$3100, 7ª vale \$2700, 11ª vale \$2300 e 13ª vale \$1900.

A Figura 31 apresenta a fronteira de Pareto para este estudo de caso, onde são apresentados na fronteira os indivíduos que constam no conjunto de soluções apresentado em (29). O melhor indivíduo do ponto de vista do objetivo  $F_1$  é o que corrige todos os nós fora do limite de *THD*, enquanto o melhor indivíduo para  $F_2$  é o que resulta em \$3800. Há um indivíduo entre os dois anteriores na fronteira de Pareto, que traz  $F_1=16$ , enquanto  $F_2=10700$  dólares.



**Figura 31** Fronteira de Pareto Solução *IEEE 34* nós. (Fonte: o autor).

Os resultados referentes à utilização da metodologia sugerida, obtidos com os casos 1, 2 e 3 e demonstram um bom funcionamento da MAFIPAM, obtendo locais compatíveis com a resolução do problema. Conforme as fronteiras de Pareto apresentadas na Figura 29 e Figura 31, referentes aos casos 2 e 3, os resultados que o algoritmo conseguiu obter utilizando a otimização heurística do *NSGA II* são soluções viáveis e que cumprem o que os dois objetivos buscam, a minimização de locais fora dos limites, bem como do custo do investimento dos filtros a serem alocados no SEP. Além dos gráficos de F1 e F2 formando a fronteira de Pareto os resultados gerados são disponibilizados em um arquivo texto contendo as soluções do *NSGA II*, podendo-se extrair o conjunto de soluções deste.

#### 5.4 TEMPO DE RETORNO DE SOLUÇÃO COM A MAFIPAM

O tempo total dedicado à MAFIPAM, desde a etapa de modelagem até retornar a solução final depende de diversos fatores, como:

1. Complexidade e tamanho do SEP a ser analisado;
2. Dados disponíveis para modelar cada componente;
3. Familiaridade do usuário com o *ATPDraw* e *MatLab*<sup>®</sup>;
4. Passo de integração utilizado nas simulações (calculado com  $1/(2f)$ , com  $f$  sendo a maior frequência de interesse) ;
5. Quantidade de ordens de filtros a serem alocados;
6. Tamanho da população e gerações;
7. Definição do delta de critério de parada;
8. Configuração da máquina que rodará o *NSGA II* no *MatLab*<sup>®</sup> e o *ATPDraw*.
9. Seleção do indivíduo ideal entre todos os indivíduos da população final.

A parte que de fato mais impacta quanto ao tempo de retorno da solução é o tempo total da simulação no *ATPDraw*, a partir do momento em que o SEP está modelado, e busca-se o conjunto solução apresentado como resposta na fronteira de Pareto.

A simulação nos *software* está diretamente envolvida com os itens 4 ao 8, o tempo de simulação é contado a partir da criação da população inicial na otimização heurística do *NSGA II*. Após esta etapa, ocorre a inserção dos filtros no *ATPDraw*, e assim, a simulação de cada indivíduo presente na população.

O tempo que leva para proceder na inserção dos valores RLC e retorno com os novos índices harmônicos, obtidos a cada nova geração de indivíduos, está relacionado com o delta T da simulação do *ATPDraw*, pois quanto menor o passo integração da simulação no ambiente do *ATP*, mais detalhado são os sinais da simulação feita, e maiores os arquivos de saída. O delta T utilizado para as simulações do *ATPDraw* foi o calculado de forma que se comportasse

conforme o PRODIST orienta que sejam calibrados os medidores de qualidade de energia, 12 a 15 ciclos, e considerando a mais alta frequência harmônica analisada.

Estudos com fenômenos eletromagnéticos que utilizam o *ATP* para proceder na simulação apresentam diferentes tempos de simulação. Em estudos de faltas em média tensão, em sistema de médio porte, utilizando um mínimo passo de integração, as simulações duram em média mais de 2 horas. Delbem *et al* (2005) atentam que a produção de configurações factíveis contribui para a redução do tempo em que o algoritmo ficará rodando.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para alocação de filtros em sistemas elétricos de distribuição, visando melhorar a qualidade de energia elétrica num sistema com elevada taxa de distorção harmônica.

Através da interação computacional entre *software*, são gerados cenários para diferentes pontos de alocação dos filtros com otimização heurística e são analisadas as distorções harmônicas e o custo inerente à alocação dos filtros.

A metodologia proposta baseia-se na modelagem e simulação do sistema elétrico no programa *ATPDraw* e a inserção de filtros através de uma gama de possibilidades de soluções gerados pelo algoritmo genético implementado no programa *MatLab*®.

A instalação de filtros de forma monofásica se mostra uma inovação na área de mitigação de distorções harmônicas. Esse estudo objetivou trazer uma resposta quanto a esta aplicação em sistemas de distribuição, verificando, assim, sua eficácia. Foi verificado que é positivo alocar filtros monofásicos em sistemas desequilibrados, principalmente quando há diversos ramos monofásicos e bifásicos, pois há grande possibilidade de mitigação de distorções harmônicas, muitas vezes com maior impacto do que com alocação de filtros trifásicos.

Além disso, comparando com outras formas de alocação de filtros, a instalação de filtros monofásicos mostrou-se mais eficiente, obtendo um número menor de nós que excedem os limites de distorção harmônica com a instalação de um número menor de filtros.

Foram feitos estudos em três sistemas com a metodologia proposta, e em dois deles foi possível eliminar o número de locais que ultrapassavam os limites de distorção harmônica. Isto demonstra que a metodologia funciona para sistemas com elevada distorção harmônica. Porém, apesar de sempre obter uma solução com indivíduos que dosam os dois objetivos a serem minimizados, nem sempre é possível atingir o resultado ideal para com um número

limitado de filtros. De qualquer maneira o tomador de decisões sempre terá que escolher o melhor indivíduo para o interesse dele.

Embora nesta pesquisa onde a preocupação com QEE é visível e muitas vezes fica clara a expectativa pela eliminação total de nós fora do limite de distorção harmônica, o conceito de Pareto utilizado aqui nos remete à realidade. Esta realidade mostra que ambos objetivos não podem ser alcançados simultaneamente em todos os casos, algumas vezes ainda restarão nós fora do limites estipulado pelas recomendações quando há restrição de número de filtros ou de investimento de filtros para solucionar o problema.

Por fim, como análise para a norma vigente no Brasil, percebe-se que para o nível de tensão dos estudos realizados, enquanto o *IEEE Std. 519/2014* limita o  $THD_V$  a 5%, o PRODIST limita a 8%, ou seja PRODIST é menos exigente. O PRODIST prevê ainda outros três indicadores que são direcionados a três tipos de ordens harmônicas, as pares, as ímpares e as múltiplas de 3. Ainda não há penalizações para a violação de qualquer um dos limites apresentados, ainda assim, as concessionárias têm se atentado e esforçado para cumprir as recomendações de limites estipulados.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é primeiramente sugerido que o projeto de filtros seja também otimizado, de forma que as reduções locais sejam certeiras, reduzindo a distorção a um valor muito próximo de zero.

Também é sugerido que um outro algoritmo de otimização heurística seja testado dentro da MAFIPAM. Sugere-se a implementação do *NSGA III*, o qual é trata de uma versão mais avançada do *NSGA II*. Era uma pretensão da presente pesquisa fazer o uso do *NSGA III*, mas não foi possível alcançar tal implementação por conta do tempo destinado a conhecer suas

características e modificações. Ele é um algoritmo novo, e trabalhos vêm sendo feito com o seu uso, atingindo bons resultados.

É sugerido fazer a MAFIPAM num sistema real para solução de problemas reais de distorção harmônica, sendo possível verificar inclusive realocação de filtros já existentes num sistema, analisando o impacto e comportamento destes no SEP.

## REFERÊNCIAS

- AKAGI, H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters. **Bulletin of the polish academy of sciences**, v. 54, n. 3, p. 255-269, 2006.
- ALHADDAD, F. M.; EL-HAWARY. M. Optimal filter placement and sizing using ant colony optimization in electrical distribution system. In: IEEE ELECTRICAL POWER AND ENERGY CONFERENCE, 2014, Calgary. **Proceedings...** Calgary: IEEE, 2014. p. 128-133.
- ARRILLAGA, J. *et al.* **Power system harmonic analysis**. New Zealand: John Wiley, 1997.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power system harmonics**. 2<sup>nd</sup> ed. New Zealand: John Wiley, 2003.
- AU, M. T.; MILANOVIC, V. Planning approaches or the strategic placement of passive harmonic filters in radial distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 347-353. 2007.
- BAGHERI, P.; XU, W.; DING, T. A Distributed filtering scheme to mitigate harmonics in residential distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31 n. 2, p. 648-656, April 2016.
- BARUKCIC, M. *et al.* Applying an evolutionary strategy for multiobjective optimization of capacitors bank allocation in distribution feeders. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART TECHNOLOGIES EUROCON, 2013, Zagreb. **Proceedings...** Zagreb: IEEE, 2013. p. 1262-1269.
- BARUKCIC, M. *et al.* The python-openDSS co-simulation for the evolutionary multiobjective optimal allocation of the single tuned passive power filters. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART SYSTEMS AND TECHNOLOGIES (SST), 2017, Osijek. **Proceedings...** Osijek: IEEE, 2017. p. 209-215.
- BERIZZI, A.; BOVO, C. The use of genetic algorithms for the localization and the sizing of passive filters. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE HARMONIC QUALITY POWER, 9., 2000, Florida. **Proceedings...** Florida: IEEE, 2000. p. 19-25.
- BERIZZI, A. *et al.* Multiobjective optimization techniques applied to modern power system. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. **Proceedings...** Columbus: IEEE, 2002. p. 1503-1508.
- BONNER, A. *et al.* Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks - Part 1: concepts, models, and simulation techniques. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, p. 452 - 465. 1996.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. 2. ed. Brasil, 2016. (Cadernos temáticos ANEEL). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Miniger>

<a%C3%A7%C3%A3o+Distribuida++2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>  
Acesso em: 06 jul. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) – Módulo 8. **Resolução Normativa nº 664/2015**. Brasília, 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) – Módulo 8. **Resolução Normativa nº 728/2016**. Brasília, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) – Módulo 8. **Resolução Normativa nº 767/2017**. Brasília, 2018.

BROCKMAN, J. B. **Introdução à engenharia**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2010.

BUD, C. *et al.* The load flow calculation in harmonic polluted radial electric networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 9., 2007, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: IEEE, 2008. p. 1- 5.

CASTANO, S. R.; PLATA, E. A. C. **Calidad del servicio de energía eléctrica**. 1. ed. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2006.

CHANG, G. W.; RIBEIRO, P. F. Tutorial on harmonics modeling and Simulation. IEEE PES, 1998. Chapter 2: **Harmonics theory**.

CHANG, G. W.; XU, W.; RIBEIRO, P. F. Tutorial on harmonics modeling and simulation. IEEE PES, 1998. Chapter 3: **Power electronic converters**.

CHANG, G. W.; CHU, S. Y.; WANG, H. L. A new approach for placement of single-tuned passive harmonic filters in a power system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, p. 1682 - 1684. 2002.

CHANG, G. W.; CHU, S. Y.; WANG, H. L. A new method of passive harmonic filter planning for controlling voltage distortion in a power system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 1, p. 305–312. 2006.

CHANG, Y-P.; LOW, C.; HUNG, S-Y. Integrated feasible direction method and genetic algorithm for optimal planning of harmonic filters with uncertainty conditions. **Elsevier Expert Systems with Applications**, n. 36. p. 3946-3955. 2009.

CHOU, C-J.; LIU, C-W.; LEE, J-Y; LEE, K-D. Optimal planning of large passive-harmonic-filters set at high voltage level. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, p. 433 - 441. 2000.

DAS, J. C. **Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics**. 2<sup>nd</sup>.ed. New York: CRC Press, 2012.

DAS, D. *et al.* Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution network. **Elsevier Electrical Power & Energy Systems**, v. 17 n. 5, p. 335-346, 1995.

DEB, K. Solving goal programming problems using multi-objective genetic algorithm. In: CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, CEC-99, 1999, Washington. **Proceedings...** Washington, USA: IEEE, 1999. p. 77-84.

DEB, K. *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, 2002.

DEB, K. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROBLEM SOLVING FROM NATURE, 6., 2000, Paris. **Proceedings...** Paris: Springer, 2000. p. 849-858.

DE LA ROSA, F. C. **Harmonic and power systems**. Missouri: Taylor & Francis Group, 2006.

DIAS, G. A. D. **Harmônicas em sistemas industriais**. 2. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2002.

DOMMEL, H. W. Digital computer simulation of electromagnetic transients in single- and multiphase networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-88, p. 388 - 399, 1969.

DOMMEL, H. W. *et al.* Further developments in Newton's method for power system applications. In: IEEE WINTER MEETING CONFERENCE PAPER, 1970, New York. **Proceedings...** New York: IEEE, 1970. n. 70, CP 161-PWR.

DUGAN, R. C. *et al.* **Electrical power systems quality**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Education, 2002.

EAJAL, A. A.; EL-HAWARY, M. E. Optimal capacitor placement and sizing in distorted radial distribution systems part I: system modeling and harmonic power flow studies. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP), 14., 2010, Bergamo. **Proceedings...** Bergamo: IEEE, 2010. p. 1-9.

EDGEWORTH, F. Y. **Mathematical phychics**: an essay on the application of mathematics to the moral sciences. London: C. Kegan Paul & Co, 1881.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. **Introduction to evolutionary computing**. Amsterdam: Springer, 2003.

EIBEN, A. E.; SMIT, S. K. Autonomous search. Cambridge: Springer, 2011. Chapter 2: **evolutionary algorithm parameters and methods to tune them**.

EL-ARWASH, H. M.; AZMY, A. N.; RASHAD, E. M. A GA-based initialization of PSO for optimal APFS allocation in water desalination plant. In: IEEE INTERNATIONAL MIDDLE EAST POWER SYSTEM CONFERENCE (MEPCON), 19., 2017, Cairo. **Proceedings...** Cairo: MEPCON, 2018. p. 1378- 1384.

ELETOBRÁS. **Conservação de energia:** eficiência energética de equipamentos e instalações. 3. ed. Itajubá: FUPAI, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. **EN 50160:2010.** Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution Net Works. 2010.

FAHMY, M. A. *et al.* Multi-objective optimization of double-tuned filters in distribution power systems using non-dominated sorting genetic algorithm-II. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING (ELECO), 10., 2017, Bursa. **Proceedings...** Bursa: ELECO, 2018. p. 195-200.

FERNANDES, R. **Localização e identificação de consumidores com alta contribuição para a distorção harmônica de tensão em sistemas de distribuição.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Paulo, UFSP, São Carlos, SP, 2011.

FERREIRA, G. D. **Otimização da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica:** uma abordagem considerando a seleção e alocação de dispositivos de proteção e manobras. 2009. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, 2009.

GHIASI, M.; RASHTCHI, V.; HOSEINI, S. H. Optimum location and sizing of passive filters in distribution networks using genetic algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES IEEE-ICET, 4., 2008, Rawalpindi. **Proceedings...** Rawalpindi: IEEE, 2009. p. 162-166.

GONZÁLEZ, D. A.; MCCALL J. C. Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-23 p. 504-511, May 1987.

HARTANA, R.K.; RICHARDS, G.G. Optimum filter design for distribution feeders with multiple harmonic sources. **Electric Power Systems Research Elsevier**, v. 23, p. 103-133, March 1992.

HERRAIZ S.; SAINZ L.; CLUA J. Review of harmonic load flow formulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, p. 1079-1087. July 2003.

HONG, Y-Y.; CHANG, Y-K. Determination of locations and sizes for active power line conditioners to reduce harmonics in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11. n. 3, p. 1610 - 1617. July 1996.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 519:** 1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. 1992.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 519:** 2014. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **PES Test Feeders: 34-bus Feeder**. 1992. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: 04 maio 2018.

KAGAN, N. *et al.* **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. **Proceedings...** Columbus: IEEE, 2002, p. 908-912.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. 2.ed. New Mexico: CRC Press, 2007.

KORVERNIKOVA, L. I.; THANH, N. C. An optimization approach to calculation of passive filters parameters based on particle swarm optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPQ), 10., 2012, Santiago de Compostela. **Proceedings...** Santiago de Compostela: ICREPQ, 2012. p. 605 - 610.

LEITE, J. C. **Projeto multicritério de filtros harmônicos passivos para instalações industriais utilizando técnicas de inteligência computacional**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, PA, 2013.

LEITE, J.; ABRIL I.; AZEVEDO, M. Capacitor and passive filter placement in distribution systems by nondominated sorting genetic algorithm-II. **Electric Power Systems Research Elsevier**, v. 143, p. 482- 489. Feb. 2017.

MARINHO, D. **Uma aplicação do algoritmo genético multiobjetivo NSGA II para seleção de imagens de satélite de trechos de mata atlântica**. 2009. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Sistemas e Computação, Universidade de Pernambuco, Recife, PE, 2009.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. *et al.* **Power system transients**. Florida: CRC Press, 2010.

MOCHIZUKI, D. O. **Análise das técnicas da ventilação sob demanda e do economizador de ar externo em sistemas de condicionamento de ar**. 2014. 229 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2014.

MORENO, H. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. 1.ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Cobre (PROCOBRE), 2001.

NIQUINI, F. M. M. *et al.* Estudo de alocação de filtros harmônicos em sistemas de potência utilizando algoritmo genético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA), 18., 2010, Bonito. **Anais...** Bonito: CBA, 2010. p. 4142 – 4149.

PANDI, V. R.; ZEINELDIN, H. H.; XIAO, W. Passive harmonic filter planning to overcome power quality issues in radial distribution systems. In: IEEE POWER AND ENERGY

SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 2012. p. 1-6.

PARETO, V. **Manuale di economia politica**. Itália: Societa Editrice Libreria Milano, 1906.

PROCOBRE. **Qualidade de energia elétrica: harmônicas**. Curso de Instalações Elétricas Internas – Módulo 4. 2009. Disponível em: <<http://www.leonardo-energy.org.br/biblioteca-virtual/instalacoes-eletricas-internas-modulo-4/>> Acesso em: 28. abr. 2013

RANADE, S. J.; XU, W. Tutorial on harmonics modeling and simulation. IEEE PES, 1998. Chapter 1: **An overview of harmonics modeling and simulation**.

SALAS, C. S. S. **Alocação de capacitores em redes de distribuição primárias e secundárias incluindo restrições de ressonância**. 2010. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, Campinas, SP, 2010.

SANTOS, I. N. *et al.* Considerations on hosting capacity for harmonic distortions on transmission and distribution systems. **Electric Power Systems Research Elsevier**, v. 119, p. 199-206, 2015.

SESHADRI, A. **NSGAI code**. 2009. Disponível em: Mathworks.com <<https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii--a-multi-objective-optimization-algorithm>>. Acesso em: 05 set. 2016

SHI, Q.; LIANG, H.; HOU, T.; BAI, L.; XU, W.; LI, F. Passive filter installation for harmonic mitigation in residential distribution systems. In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2018, Chicago. **Proceedings...** Chicago: IEEE, 2018. p. 1-5.

SNYMAN, F.; HELBIG, M. Solving constrained multi-objective optimization problems with evolutionary algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SWARM INTELLIGENCE ICSI, 8., 2017, Fukuoka. **Proceedings...** Fukuoka: ICSI, 2017. p.57-66.

STONE, P. E. C. *et al.* Efficient harmonic filter allocation in an industrial distribution system. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 2, p. 740-751, 2012.

TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, p. 452-474, 1996.

TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION. Test systems for harmonics modeling and simulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, p. 579- 587, 1999.

TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION. Harmonic analysis in frequency and time domain. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 3, 2013.

UPADHYE, S. D.; ATRE, Y. R. Determination of the design parameters of passive harmonic filters using nonlinear optimization. In: IEEE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS TECHNICAL CONFERENCE, 2002, Edmonton. **Proceedings...** Edmonton: IEEE, 2002. p. 155 - 164.

VARIZ, A. M. **Cálculo do fluxo de harmônicas em sistemas trifásicos utilizando o método de injeção de correntes**. 2006. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Engenharia Elétrica (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

VARIZ, A. M. *et al.* Allocation of power harmonic filters using genetic algorithm. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP). 15., 2012, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: IEEE, 2012. p. 143-149.

VERMA, V.; SINGH, B. Genetic-algorithm-based design of passive filters for offshore applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v 46, n. 4, p. 1295-1303, 2010.

YAN, Y. H. *et al.* Harmonic analysis for industrial customers. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, p. 462 – 468, 1994.

YANG, H.; RICHARDS, G.G. Optimum distribution system harmonic filter design using a genetic algorithm. **Electric Power Systems Research Elsevier**, n. 30, p. 263-267, 1994.

ZOBAA, A. F. *et al.* Sizing of passive filters in time-varying nonsinusoidal environments. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, (ICHQP), 14., 2010, Bergamo. **Proceedings...** Bergamo: IEEE, 2010. p. 1–8.

## APÊNDICE A:

Modelagem do *IEEE* 13 Sistema de Distribuição Desequilibrado no *ATPDraw*

# APÊNDICE A: MODELAGEM DO *IEEE 13* SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

## DESEQUILIBRADO NO *ATPDRAW*

