

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

**RÔMULO SEHNEM**

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO E DA CORRENTE DE FILTROS  
ATIVOS EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO  
ALGORITMO DE COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS**

Porto Alegre

2018

**RÔMULO SEHNEM**

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO E DA CORRENTE DE FILTROS  
ATIVOS EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO  
ALGORITMO DE COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS**

Dissertação de mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia.

**ORIENTADOR: Roberto Chouhy Leborgne**

**CO-ORIENTADOR: Sérgio Haffner**

Porto Alegre

2018

RÔMULO SEHNEM

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO E DA CORRENTE DE FILTROS  
ATIVOS EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO  
ALGORITMO DE COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre 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 - Gothenburg, Suécia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos, UNISINOS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil.

Profa. Dra. Mariana Resener, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Renato Gonçalves Ferraz, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

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

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr.

Porto Alegre, outubro de 2018.

## **DEDICATÓRIA**

Inevitavelmente, dedico este trabalho aos meus pais, meu alicerce durante esta longa jornada da pós-graduação. Sou grato pelo apoio e incentivo incondicional dado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a UFRGS, pela oportunidade de acesso à educação gratuita, e de qualidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao professor Sérgio Haffner por disponibilizar seu tempo para avaliar meu trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, pelo empenho despendido durante este trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um modelo de otimização que visa determinar o dimensionamento e a localização ótima de filtros de potência ativos em sistema de distribuição, com o intuito de minimizar duas funções objetivos: o somatório das distorções harmônicas de tensão nos nós e o somatório das correntes de injeções dos filtros de potência ativos. A metodologia proposta baseia-se na utilização de um algoritmo heurístico por Colônia de Abelhas Artificiais, sendo o desenvolvimento da rotina realizado no *software Matlab*®. Para avaliação do desempenho do modelo de otimização é realizado um estudo de caso com o sistema IEEE de 33 nós. Ademais, o método de mitigação da distorção harmônica de tensão através da instalação de filtros ativos é comparado com o método da instalação de filtros passivos sintonizados simples. Verificou-se que a alocação de filtros ativos apresentou um melhor desempenho em comparação com a alocação de filtros passivos ao minimizar as funções objetivo.

**Palavras-chave:** Distorção Harmônica. Otimização. Filtro de potência ativo. Algoritmo Heurístico.

## **ABSTRACT**

In this work, an optimization model is presented aiming to determine the optimum location and sizing of Active Power Filters (APFs) in distribution system in order to minimize two objective functions: the Total Harmonic Distortion of Voltage (THDV) and the sum of APF currents. The proposed methodology is based on Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, being the routine development performed on Matlab software. To evaluate the performance of the optimization model, a case study with the IEEE 33 nodes system is carried out. In addition, the harmonic distortion mitigation method through the installation of active filters is compared with the method of installing single tuned passive filters. It was found that the allocation of active filters presented a better performance compared to the allocation of passive filters when minimizing the objective functions.

**Keywords: Harmonic Distortion. Optimization. Active Power Filter. Heuristic Algorithm.**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>11</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	14
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA .....	16
2.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	17
2.3 TERMINOLOGIA E QUANTIFICAÇÃO .....	19
2.4 VALORES DE REFERÊNCIA .....	21
2.5 SEQUÊNCIA DE FASE DOS HARMÔNICOS .....	24
2.6 FONTES DE HARMÔNICOS .....	25
2.7 EFEITOS DOS HARMÔNICOS .....	34
2.8 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	38
2.8.1 REATOR SÉRIE .....	39
2.8.2 FILTRO PASSIVO PARALELO .....	39
2.8.3 FILTRO ATIVO .....	40
2.9 ANÁLISE HARMÔNICA .....	42
2.10 MODELAGEM DAS LINHAS .....	44
2.11 OTIMIZAÇÃO HEURÍSTICA .....	45
2.11.1 ALGORÍTMO DE OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS.....	46
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>48</b>
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	53
4.2 ALGORITMO ABC.....	57
4.3 REPRESENTAÇÃO E CODIFICAÇÃO .....	58
4.4 FUNÇÃO DE ADAPTAÇÃO E BUSCA NA VIZINHANÇA .....	59
4.5 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	60
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>62</b>
5.1 ESTUDO DE CASO .....	62
5.2 RESULTADOS PARA $f_1$ .....	68
5.3 RESULTADOS PARA $f_2$ .....	73
5.4 COMPARATIVO COM SOLUÇÃO ATRAVÉS DE FILTROS PASSIVOS.....	79
<b>6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>89</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	89
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	90
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>91</b>
<b>APÊNDICE A - DADOS DO SISTEMA IEEE 33 NÓS</b> .....	<b>94</b>



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: DISTORÇÃO DE CORRENTE CAUSADA POR RESISTÊNCIA NÃO-LINEAR (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004).....	18
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO EM SÉRIE DE FOURIER DE UMA FORMA DE ONDA DISTORCIDA (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004). ....	18
FIGURA 3: CURVA B-H CARACTERÍSTICA DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS (DAS, 2012). ....	26
FIGURA 4: CURVA DE CORRENTE (A) E ESPECTRO (B) DE UMA LÂMPADA DE DESCARGA DE ALTA EFICIÊNCIA (ARRILLAGA & WATSON, 2003). ....	28
FIGURA 5: RETIFICADOR MONOFÁSICO CONVENCIONAL (A), FONTE CHAVEADA (B) E FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE ENTRADA (C) (DAS, 2012). ....	30
FIGURA 6: <i>DRIVE</i> DE VELOCIDADE VARIÁVEL DE 6 PULSOS (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004). ....	30
FIGURA 7: TIPOS DE DRIVES VSI E CSI (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004). ....	31
FIGURA 8: INVERSOR DE VELOCIDADE VARIÁVEL POR PWM (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004). ....	32
FIGURA 9: EFEITOS DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE EM INVERSORES DE VELOCIDADE VARIÁVEL POR PWM (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004). ....	32
FIGURA 10: ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DE UM FORNO A ARCO ELÉTRICO DURANTE PERÍODO DE (A) DERRETIMENTO DE SUCATA E (B) REFINAMENTO (ARRILLAGA & WATSON, 2003). ....	33
FIGURA 11: CORRENTE DE UM BANCO DE CAPACITORES EM RESSONÂNCIA COM O SISTEMA NA 11ª HARMÔNICA (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004). ....	36
FIGURA 12: PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES DE FILTROS PASSIVOS (DUGAN <i>ET AL.</i> , 2004). ....	40
FIGURA 13: FILTRO ATIVO PARALELO (AKAGI, 2006).....	41
FIGURA 14: FILTRO ATIVO SÉRIE (AKAGI, 2006). ....	42
FIGURA 15: MODELO $\pi$ NOMINAL COM PARÂMETROS CONCENTRADOS. ....	44
FIGURA 16: FLUXOGRAMA PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO. ....	61
FIGURA 17: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO IEEE 33 NÓS.....	62
FIGURA 18: PERFIL DAS TENSÕES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL NOS NÓS. ....	64
FIGURA 19: CORRENTES EFICAZES TOTAIS DAS CARGAS E DAS CARGAS NÃO-LINEARES. ....	67
FIGURA 20: VALORES DE THDV PARA O CASO BASE.....	68
FIGURA 21: VALORES DE THDV NOS NÓS PARA A SOLUÇÕES QUE MINIMIZAM <b>f1</b> .....	70
FIGURA 22: ONDA DE TENSÃO NO NÓ 9 PARA MELHOR SOLUÇÃO DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS QUE MINIMIZA <b>f1</b> . ....	72
FIGURA 23: ONDA DE CORRENTE NO RAMO 8-9 PARA MELHOR SOLUÇÃO DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS QUE MINIMIZA <b>f1</b> . ....	72
FIGURA 24: VALORES DE THDV NOS NÓS PARA A SOLUÇÕES QUE MINIMIZAM <b>f2</b> .....	74
FIGURA 25: ONDA DE TENSÃO NO NÓ 9 PARA MELHOR SOLUÇÃO DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS QUE MINIMIZA <b>f2</b> . ....	76
FIGURA 26: ONDA DE CORRENTE NO RAMO 8-9 PARA MELHOR SOLUÇÃO DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS QUE MINIMIZA <b>f2</b> . ....	77
FIGURA 27: VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO <b>f2</b> E LOCALIZAÇÕES DOS FILTROS DA SOLUÇÃO INCUMBENTE EM SUCESSIVAS GERAÇÕES PARA ALOCAÇÃO DE 3 FAS. ....	78
FIGURA 28: RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE CADA FILTRO PASSIVO SINTONIZADO SIMPLES.....	80
FIGURA 29: RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO CONJUNTO DOS QUATRO FILTROS PASSIVOS SINTONIZADO SIMPLES. ....	80

FIGURA 30: VALORES DE THDV NOS NÓS PARA A SOLUÇÕES QUE MINIMIZAM <b>f1</b> .....	81
FIGURA 31: ONDA DE TENSÃO NO NÓ 9 PARA MELHORES SOLUÇÕES DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS E 3 FPS QUE MINIMIZAM A FUNÇÃO OBJETIVO <b>f1</b> . ....	83
FIGURA 32: ONDA DE CORRENTE NO RAMO 8-9 PARA AS MELHORES SOLUÇÕES DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS E 3 FPS QUE MINIMIZAM A FUNÇÃO OBJETIVO <b>f1</b> . ....	84
FIGURA 33: VALORES DE THDV NOS NÓS PARA A SOLUÇÕES QUE MINIMIZAM <b>f2</b> .....	85
FIGURA 34: ONDA DE TENSÃO NO NÓ 9 PARA MELHORES SOLUÇÕES DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS E 3 FPS QUE MINIMIZAM A FUNÇÃO OBJETIVO <b>f2</b> . ....	87
FIGURA 35: ONDA DE CORRENTE NO RAMO 8-9 PARA AS MELHORES SOLUÇÕES DE ALOCAÇÃO DE 3 FAS E 3 FPS QUE MINIMIZAM A FUNÇÃO OBJETIVO <b>f2</b> . ....	87

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: LIMITES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO .....	22
TABELA 2: LIMITES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE PARA SISTEMAS DE TENSÃO NOMINAL ENTRE 120 V E 69 kV .....	22
TABELA 3: VALORES LIMITES DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS DE TENSÃO .....	23
TABELA 4: VALORES LIMITES PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO.....	23
TABELA 5: SEQUÊNCIA DE FASE DOS HARMÔNICOS (DAS, 2012).....	24
TABELA 6: RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS TRABALHOS.....	52
TABELA 7: DADOS DE LINHA PARA CONFIGURAÇÃO 300 DO SISTEMA IEEE 34 NÓS.....	63
TABELA 8: TIPOS DE CARGAS NÃO-LINEARES (TASK FORCE, 1996).....	64
TABELA 9: COMPOSIÇÃO DAS CARGAS NÃO-LINEARES.....	65
TABELA 10: DADOS DAS CARGAS NÃO-LINEARES CONECTADAS AO SISTEMA.....	66
TABELA 11: LOCALIZAÇÕES DOS FILTROS E CORRENTES QUE MINIMIZAM <b>f1</b> .....	69
TABELA 12: VALORES DE IHDV PARA AS SOLUÇÕES QUE MINIMIZAM <b>f1</b> .....	71
TABELA 13: LOCALIZAÇÕES E CORRENTES QUE MINIMIZAM <b>f2</b> .....	73
TABELA 14: VALORES DE IHDV PARA AS SOLUÇÕES QUE MINIMIZAM <b>f2</b> .....	75
TABELA 15: DADOS DOS FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS SIMPLES.....	79
TABELA 16: RESULTADOS PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE FILTROS PASSIVOS QUE MINIMIZAM <b>f1</b> .....	81
TABELA 17: VALORES DE IHDV PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE 1 A 3 FPs QUE MINIMIZAM <b>f1</b> ....	82
TABELA 18: RESULTADOS PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE FILTROS PASSIVOS QUE MINIMIZAM <b>f2</b> .....	84
TABELA 19: VALORES DE IHDV PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE 1 A 3 FPs QUE MINIMIZAM <b>f2</b> ....	86
TABELA 20: IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS E TRANSFORMADOR.....	94
TABELA 21: DADOS DAS CARGAS DO SISTEMA.....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS

*ac: alternating current*

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

*ATP: Alternative Transient Program*

*dc: direct current*

DTT: Distorção harmônica total de tensão

*IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

*IEEE Std 519-2014: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*

*IHD: Distorção Harmônica Individual*

*IHDI: Distorção Harmônica Individual de Corrente*

*IHDV: Distorção Harmônica Individual de Tensão*

*FA: Filtro de Potência Ativo*

*FFT: Transformada Rápida de Fourier*

*FP: Filtro Passivo*

LASEP: Laboratório de Sistemas de Potência

*MATLAB: Matrix Laboratory*

*PCC: Point of Common Coupling*

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

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

QEE: Qualidade de Energia Elétrica

SEP: Sistema Elétrico de Potência

**SIN:** Sistema Interligado Nacional

**TDD:** Distorção Total de Demanda

**THD:** Distorção Harmônica Total

**THDI:** Distorção Harmônica Total de Corrente

**THDV:** Distorção Harmônica Total de Tensão

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

No último século a eletricidade assumiu um papel estratégico no desenvolvimento da nossa sociedade. Como consequência, a qualidade no fornecimento da energia elétrica cresce em importância com o aumento da complexidade do setor elétrico. Em geral, a qualidade da energia elétrica é fortemente afetada pela geração e propagação de correntes harmônicas. Essas correntes distorcem as tensões do sistema e causam efeitos indesejáveis e danosos, tais como aumento das perdas na transmissão, redução da eficiência, perda de produção e, também, mau funcionamento e danos a equipamentos (VARIZ et al., 2012).

Idealmente, o concessionário deve entregar invariavelmente uma tensão sinusoidal perfeita em cada ponto de entrega ao consumidor (ROSA, 2015). Todavia, dada a grande disseminação de cargas não-lineares no sistema elétrico e por outras razões, os concessionários tem dificuldade em preservar tais condições desejáveis.

Neste contexto, uma das formas de mitigação da distorção harmônica é a instalação de filtros ativos de potência. No entanto, o problema da alocação de filtros no sistema não é uma tarefa trivial. A escolha previsível para a alocação dos filtros harmônicos é nas barras com maiores distorções harmônicas ou barras com as maiores cargas não-lineares. Porém, muito provavelmente esta não é a melhor solução, pois a inclusão de um filtro no sistema muda significativamente o fluxo de harmônicas, o que torna o problema de alocação ótima de filtros harmônicos uma tarefa desafiante.

## 1.2 OBJETIVOS

Tendo em vista tais considerações, o objetivo deste trabalho é propor um modelo de otimização da alocação e da corrente de filtros ativos de potência em sistema de distribuição, de forma a minimizar duas funções objetivo: o somatório dos quadrados da Distorção Harmônica Total de Tensão (do inglês *Total Harmonic Distortion of Voltage* - THDV) nas barras e o somatório das correntes de injeções dos filtros ativos. Para modelar este problema, emprega-se um algoritmo heurístico por Colônia de Abelhas, sendo o desenvolvimento da rotina realizado no software Matlab.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Quanto à estrutura da dissertação, esta é dividida em 6 capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se uma fundamentação teórica sobre distorção harmônica, métodos de mitigação e otimização heurística. No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica, com foco no estado da arte relacionado à alocação de filtros ativos de potência em sistemas de distribuição. No quarto capítulo é descrito o modelo de otimização proposto e o seu fluxograma. No Capítulo 5 é apresentado o sistema para estudo de caso e são mostrados os resultados das simulações do modelo algoritmo de otimização. Por fim, no sexto capítulo são expostas as conclusões dos resultados obtidos neste trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No século passado, a eletricidade assumiu um papel estratégico no desenvolvimento de nossa sociedade. Como consequência, a qualidade no fornecimento da energia elétrica é cada vez mais importante com a crescente complexidade da rede elétrica. Em geral, a qualidade da energia elétrica é fortemente afetada pela geração e propagação de correntes harmônicas. Para (VARIZ *et al.*, 2012), estas correntes distorcem as tensões do sistema e provocam efeitos indesejáveis e nocivos tais como o aumento das perdas de transmissão, a redução da eficiência, a perda de produção, e também, avarias e danos a equipamentos.

De acordo com Arrillaga & Watson (2003), reduzir a distorção da forma de onda de tensão e corrente para níveis aceitáveis tem sido um problema no projeto do sistema de potência desde os primeiros dias de corrente alternada. A crescente preocupação resulta do aumento do uso de dispositivos eletrônicos e equipamentos sensíveis à deformações na forma de onda.

Em geral, os usuários finais sofrem muito mais com problemas de harmônicos do que o concessionário de energia elétrica, conforme menciona (DUGAN *et al.*, 2004). Os consumidores industriais que fazem uso de acionadores de velocidade ajustável, fornos à arco, fornos de indução e semelhantes são muito mais susceptíveis a problemas decorrentes da distorção harmônica. Ainda segundo o autor, se o sistema é adequadamente dimensionado para atender as demandas de carga, há uma pequena probabilidade de que os harmônicos causem um problema no sistema elétrico. Os problemas do sistema de energia surgem mais



frequentemente quando a capacitância no sistema resulta em ressonância em uma frequência harmônica crítica que aumenta a distorção drasticamente acima do normal.

Neste contexto, a alocação de filtros harmônicos é essencial e uma das medidas mais utilizadas para evitar que as correntes harmônicas geradas por cargas não-lineares se propaguem através da rede elétrica.

## 2.1 DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA

De acordo com (DUGAN *et al.*, 2004), a distorção da forma de onda é definida como a alteração, em regime permanente, da onda senoidal ideal de frequência fundamental, caracterizada pelo conteúdo espectral da deformação.

Existem cinco tipos principais de distorção de forma de onda:

1. DC Offset: consiste na presença de componente *dc* no sinal de frequência fundamental de tensão ou corrente;
2. Harmônicos: os harmônicos são tensões ou correntes senoidais de frequência *s* que são múltiplos inteiros da frequência fundamental, na qual o sistema é projetado para operar. As formas de onda com distorção periódica podem ser decompostas em uma soma da componente de frequência fundamental e suas harmônicas;
3. Inter-harmônicos: são componentes de tensões ou correntes de frequência não múltiplas inteiras da frequência fundamental. No espectro de frequências, podem aparecer como frequências discretas ou como uma faixa contínua de frequências;
4. Notching: é um distúrbio periódico de tensão causado pela operação normal de dispositivos eletrônicos de potência, quando a corrente é comutada de uma fase a outra. Seu espectro de frequência é constituído de componentes de alta frequência.

É causado principalmente por retificadores ou conversores trifásicos que geram corrente *dc*;

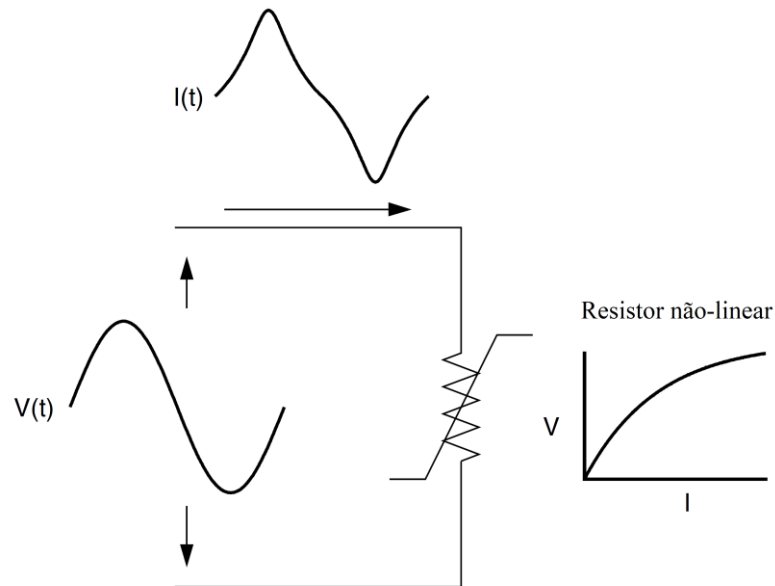
5. Ruído: é definido como um sinal elétrico indesejado com conteúdo espectral espalhado em uma ampla faixa de frequências abaixo de 200kHz superposta à onda de tensão ou corrente.

## 2.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA

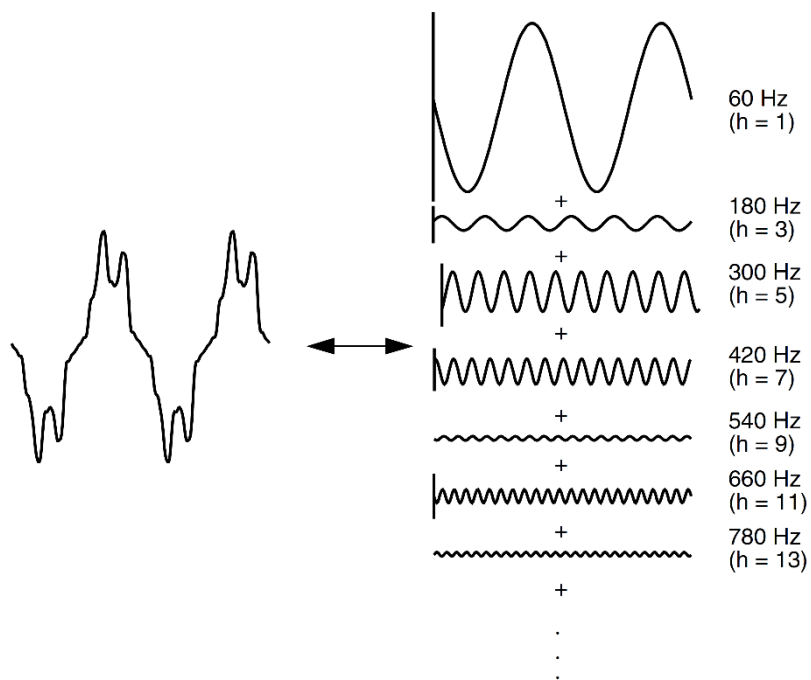
O Módulo 8 do PRODIST define a distorção harmônica como um fenômeno associado a deformações na forma de onda da tensão e corrente em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Este fenômeno é causado por cargas não-lineares conectadas ao sistema elétrico. Um dispositivo não-linear é aquele em que a corrente não tem a mesma forma de onda da tensão senoidal aplicada. Na presença da impedância do sistema elétrico, esta corrente provoca uma queda de tensão não senoidal e, por conseguinte, produz distorção harmônica de tensão ao longo da impedância do sistema elétrico. A Figura 1 apresenta o conceito da carga não-linear, a qual gera uma corrente não senoidal quando submetida a uma tensão senoidal.

Uma onda periódica em regime permanente pode ser representada, através da série de Fourier, como uma soma de ondas senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental da onda distorcida, sendo aquelas chamadas de harmônicos. A Figura 2 demonstra a representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida.



**Figura 1: Distorção de corrente causada por resistência não-linear (DUGAN *et al.*, 2004).**



**Figura 2: Representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida (DUGAN *et al.*, 2004).**

A utilização desta propriedade de decomposição da onda distorcida em harmônicos é extremamente importante na análise das distorções harmônicas, pois o sistema elétrico pode ser analisado separadamente em cada frequência harmônica.

Uma propriedade importante da série de Fourier é que só existem harmônicos ímpares para sinais simétricos com relação ao eixo temporal. Segundo (DUGAN *et al.*, 2004), isso resulta em simplificação da análise do problema, pois a grande maioria das cargas injeta no sistema elétrico correntes que são simétricas em ambas as polaridades, exceto para retificadores de meia-onda e fornos a arco quando o arco é aleatório.

### 2.3 TERMINOLOGIA E QUANTIFICAÇÃO

Os níveis de distorção harmônica são descritos pelo espectro harmônico completo com magnitudes e ângulos de fase de cada componente harmônico. Os parâmetros comumente utilizados são a Distorção Harmônica Individual (do inglês *Individual Harmonic Distortion* - IHD) e a Distorção Harmônica Total (do inglês *Total Harmonic Distortion* - THD), que é uma medida do valor efetivo da distorção harmônica.

As equações (1) e (2) apresentam as expressões para cálculo das grandezas de IHD de tensão e corrente, respectivamente, e as equações (3) e (4) apresentam as expressões para cálculo das grandezas de THD de tensão e corrente, respectivamente.

$$IHDV = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$IHDI = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (2)$$

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3)$$

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

$V_h$  é a componente de tensão harmônica de ordem  $h$ ;

$V_1$  é a componente de tensão de frequência fundamental;

$I_h$  é a componente de corrente harmônica de ordem  $h$ ;

$I_1$  é a componente de corrente de frequência fundamental.

A terminologia utilizada no PRODIST Módulo 8 para descrever a equação (3) é DTT (Distorção Total de Tensão).

Dependendo da magnitude da carga, o parâmetro de THD de corrente pode dar uma falsa impressão da real situação de distorção. Por exemplo, um drive de velocidade ajustável pode conter valores altos de THD para a corrente de entrada quando operando com cargas muito leves. Isto não é necessariamente preocupante, pois a magnitude da corrente harmônica é pequena, mesmo que sua distorção relativa seja alta.

Para caracterizar correntes harmônicas de uma maneira consistente, o IEEE 519-1992 define outro termo, a Distorção Total da Demanda (do inglês *Total Demand Distortion* - TDD). Este parâmetro é o mesmo que o THD, exceto que a distorção é expressa como uma porcentagem da corrente de carga nominal e não como uma porcentagem da magnitude da corrente fundamental no momento da medição. A equação (5) apresenta a expressão para cálculo da TDD de corrente.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$I_L$  = corrente nominal de carga

## 2.4 VALORES DE REFERÊNCIA

A maioria dos países desenvolveu no passado suas próprias normas e recomendações para limites de harmônicos, de acordo com as condições locais (ARRILLAGA & WATSON, 2003). No entanto, com o crescimento do comércio global, a necessidade de fabricação de equipamentos em um país para atender as normas em outro levou a um esforço conjunto na formulação de normas internacionais sobre harmônicos e inter-harmônicos.

A norma IEEE Std 519-2014 apresenta recomendações de prática a serem usadas como referência no projeto de sistemas elétricos com cargas não-lineares. Os limites estabelecidos são para operação em regime permanente e são recomendados para as condições de pior caso. As recomendações são direcionadas para aplicação no PCC (*Point of Common Coupling*), entre o usuário e o concessionário de energia elétrica. Normalmente, para o usuário industrial o PCC é do lado de alta tensão do transformador, e para o usuário comercial o PCC é o lado de baixa do transformador de serviço.

Os limites para o controle harmônico recomendados na norma IEEE 519-2014 representam uma responsabilidade conjunta entre usuários e concessionário de energia elétrica. Usuários produzem correntes harmônicas que fluem através do sistema elétrico do concessionário, o que causa harmônicos de tensão na tensão fornecida a outros usuários. O montante de distorção harmônica de tensão fornecida aos outros usuários é uma função do efeito combinado das correntes harmônicas de todos os usuários e a impedância característica do sistema elétrico.

Neste contexto, os limites harmônicos são recomendados para ambas correntes e tensões. Os valores recomendados são baseados no fato de que um certo nível de distorção é geralmente aceitável e ambos usuários e concessionários devem cooperar para manter os

níveis de distorção de tensão abaixo dos níveis desejados. Se as injeções de correntes harmônicas forem limitadas pelo usuário, as distorções de tensão podem ser mantidas abaixo dos níveis desejados. E no evento em que correntes harmônicas limitadas não for suficiente para manter a distorção de tensão em níveis aceitáveis, o concessionário deve modificar as características do sistema de forma a se obter níveis aceitáveis de distorção de tensão.

A Tabela 1 apresenta os valores limites de distorção de tensão e a Tabela 2 apresenta os valores limites de distorção de corrente para sistema de tensão nominal entre 120 V e 69 kV, ambas provenientes da norma IEEE 519-2014.

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

Tensão V da Barra no PCC	Distorção Individual de Tensão (%)	Distorção Total de Tensão DTT (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

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

Máxima Distorção Harmônica de Corrente em percentual de $I_L$						
Ordem harmônica individual (harmônicas ímpares) <sup>a, b</sup>						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	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> Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares

<sup>b</sup> Distorções de corrente que resultam em offset DC, por exemplo, conversores de meia onda, não são permitidos

<sup>c</sup> Todos os equipamentos de geração de energia elétrica são limitados a esses valores de distorção de corrente, independente da relação  $I_{SC}/I_L$

onde:

$I_{SC}$  = máxima corrente de curto-circuito no PCC

$I_L$  = máxima corrente de demanda (componente de frequência fundamental) no PCC sob condições de operação de carga normal

No PRODIST Módulo 8/2018, o qual trata da qualidade da energia elétrica, são apresentados valores limites para as distorções harmônicas totais de tensão, conforme indicado na Tabela 3, e os valores limites para distorções harmônicas individuais de tensão são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 3: Valores limites das distorções harmônicas totais de tensão**

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	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

**Tabela 4: Valores limites para distorções harmônicas individuais de tensão**

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13.8 \text{ kV}$	$13.8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5	
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5



## 2.5 SEQUÊNCIA DE FASE DOS HARMÔNICOS

Se as cargas e o sistema são balanceados, a  $h$ -ésima harmônica da fase b está defasada de  $h \times 120^\circ$  atrás da mesma harmônica na fase a, e a  $h$ -ésima harmônica da fase c está defasada de  $h \times 240^\circ$  atrás da mesma harmônica na fase a, segundo (DAS, 2012). A Tabela 5 resume as sequências de fases das primeiras harmônicas.

**Tabela 5: Sequência de fase dos harmônicos (DAS, 2012).**

Ordem Harmônica	Sequência de Fase
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0
7	+
8	-
9	0
10, 11, 12	+, -, 0

Como pode-se verificar na Tabela 5, harmônicas múltiplas de três são de sequência zero, ou seja, estão em fase e se somam no condutor neutro. Conforme afirma Das (2012), em sistemas trifásicos a 4 fios, com cargas perfeitamente balanceadas entre fase e neutro, todas harmônicas de sequência positiva e negativa se cancelam no condutor neutro, sobrando apenas as harmônicas de sequência zero.

## 2.6 FONTES DE HARMÔNICOS

Harmônicos causam distorções da forma de onda de corrente e tensão, o que gera efeitos adversos em equipamentos elétricos (DAS, 2012). Por essa razão, harmônicos são uma das grandes preocupações da Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Conforme Arrillaga & Watson (2003), antes do advento dos semicondutores, a principal fonte de distorção da forma de onda eram os fornos a arco, as lâmpadas fluorescentes e, em menor escala, as máquinas elétricas e transformadores. O aumento do uso dos dispositivos eletrônicos de potência para controle de sistemas e equipamentos de potência tem sido o motivo para uma preocupação maior quanto a distorção na forma de onda.

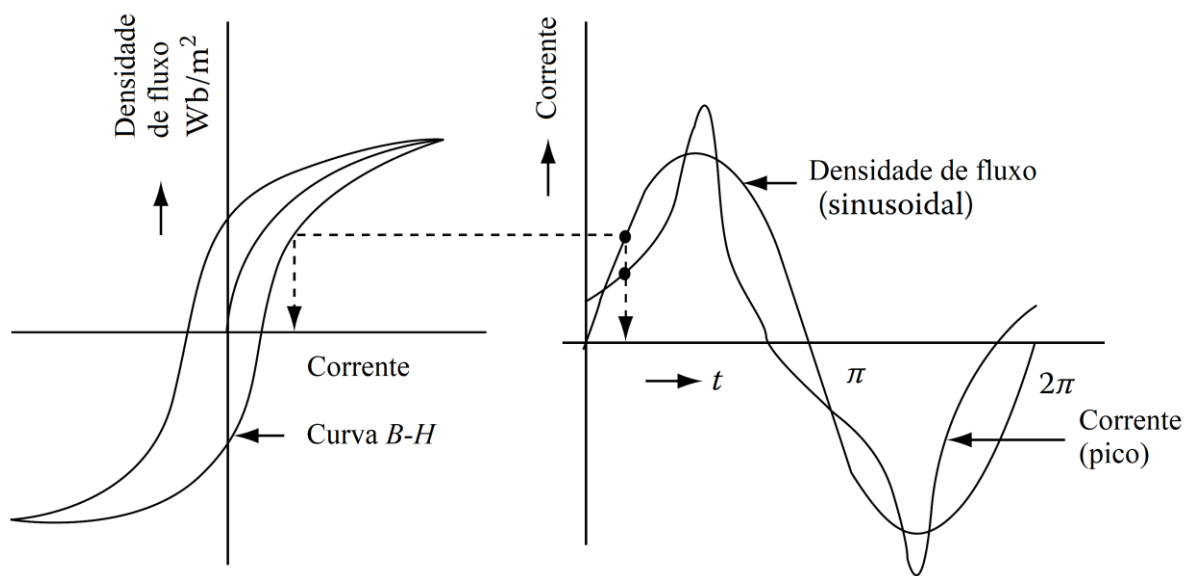
O eletrônico de potência mais comum, de acordo com Arrillaga & Watson (2003), é o retificador monofásico, usado para alimentar grande parte dos equipamentos de escritórios e eletrodomésticos. Embora os efeitos individuais são sempre pequenos, o efeito combinado de muitas cargas pequenas pode ser uma fonte grande de distorção da forma de onda.

Para (DAS, 2012), capacitores conectados ao sistema elétrico por si só não geram harmônicos, mas são a principal causa de amplificação de harmônicos devido à ressonância e aumento da distorção harmônica. No entanto, capacitores podem reduzir a distorção harmônica quando aplicados como filtros.

- Transformadores

Conforme (DAS, 2012), os harmônicos em transformadores surgem como resultado da saturação, energização, alta densidade de fluxo magnético e arranjos de conexão dos enrolamentos. Ainda segundo o autor, por economia do *design* e fabricação, os

transformadores são operados próximo ao joelho da curva de magnetização característica de materiais ferromagnéticos. A Figura 3 mostra a curva B-H e a forma de onda da corrente de magnetização.



**Figura 3: Curva B-H característica de materiais ferromagnéticos (DAS, 2012).**

A distorção típica que aparece na curva da Figura 3 é causada principalmente por harmônicos múltiplos de 3, sobretudo o 3º harmônico. De acordo com (ARRILLAGA & WATSON, 2003), de modo a manter uma fonte de tensão razoavelmente senoidal, é necessário prover um caminho para os harmônicos de corrente de sequência zero (múltiplos de 3), e isso é normalmente obtido através do uso de enrolamentos com arranjo de ligação em delta.

Conforme Dugan *et al.* (2004), embora a corrente de excitação do transformador na tensão nominal seja rica em harmônicos, é tipicamente menor que 1% da corrente nominal de carga. Arrillaga & Watson (2003) menciona que os harmônicos de corrente de magnetização aumentam aos seus níveis máximos nas primeiras horas da manhã, quando a tensão do sistema aumenta devido à baixa carga.

- Máquinas Rotativas

Harmônicos de corrente podem ser gerados, de acordo com Rosa (2015), como resultado de pequenas assimetrias geométricas nos *slots* do rotor e estator da máquina ou por pequenas irregularidades nos padrões dos enrolamentos trifásicos da máquina rotativa. Os enrolamentos estão alocados em *slots* cujo entreferro não possui distribuição senoidal perfeita da força magnetomotriz (WAKILEH, 2001). Para (ROSA, 2015) os harmônicos de fluxo magnético induzem uma força eletromotriz (FEM) nos enrolamentos do stator a uma frequência igual a razão da velocidade/comprimento de onda. A distribuição resultante de força magnetomotriz (FMM) na máquina produz harmônicos que são função da velocidade.

Ainda de acordo com (ROSA, 2015), correntes harmônicas adicionais podem ser geradas como consequência da característica da curva de saturação típica dos materiais ferromagnéticos. No entanto, essas correntes harmônicas são normalmente menores que as desenvolvidas por máquinas alimentadas por *drives* de frequência variável.

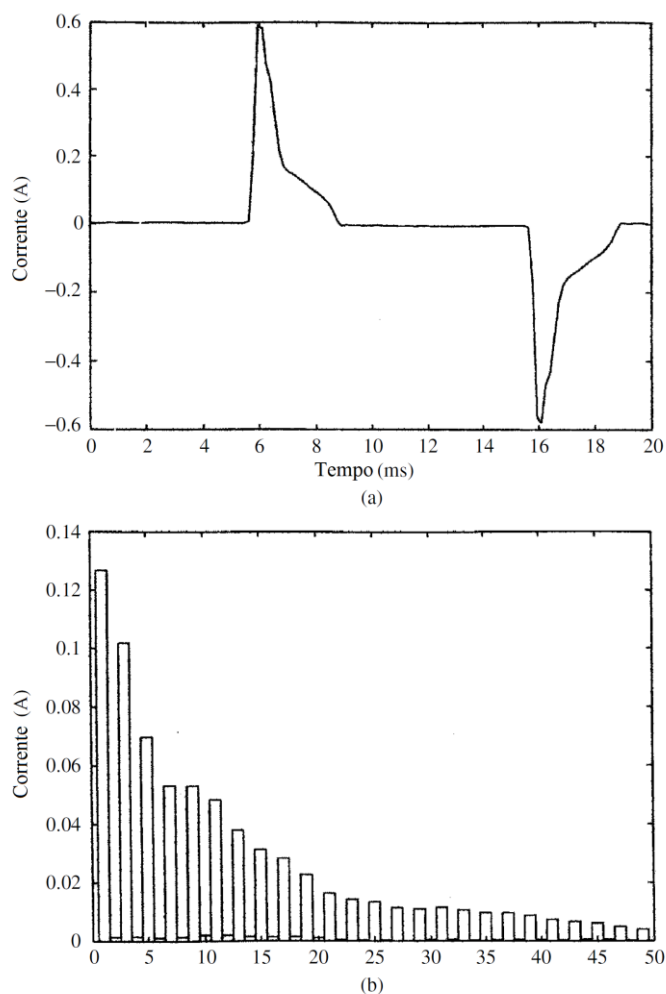
- Lâmpadas de Descarga

Sistemas de iluminação tipicamente compõem de 40 a 60% da carga de um prédio comercial (DUGAN *et al.*, 2004). Conforme Arrillaga & Watson (2003), lâmpadas de descarga são altamente não-lineares e dão origem a consideráveis correntes harmônicas ímpares. Esse efeito é claramente ilustrado na Figura 4, a qual apresenta a forma de onda de corrente e espectro harmônico de uma lâmpada de descarga de alta eficiência.

Conforme Dugan *et al.* (2004), lâmpadas fluorescentes também são lâmpadas de descarga, pois necessitam de um reator para prover uma alta tensão inicial que provoca a

descarga de corrente que flui entre dois eletrodos na tubo fluorescente. Uma vez que a descarga é estabelecida, o reator diminui a tensão para controlar a corrente do arco.

Há dois tipos de reatores para lâmpadas de descarga, magnético e eletrônico (DUGAN *et al.*, 2004). Reatores eletrônicos tipicamente produzem THD de corrente na faixa entre 10 e 32%. A maioria dos reatores eletrônicos possui filtro passivo para reduzir a THD de corrente de entrada para menos de 20%. Já que lâmpadas fluorescentes são uma fonte significativa de harmônicos em edificações comerciais, essas são normalmente distribuídas entre as fases de forma a balancear a carga. Com um transformador conectado em delta, essa distribuição reduz o quantidade de correntes harmônicas múltiplas de 3 que fluem para o sistema elétrico.



**Figura 4: Curva de corrente (a) e espectro (b) de uma lâmpada de descarga de alta eficiência (ARRILLAGA & WATSON, 2003).**

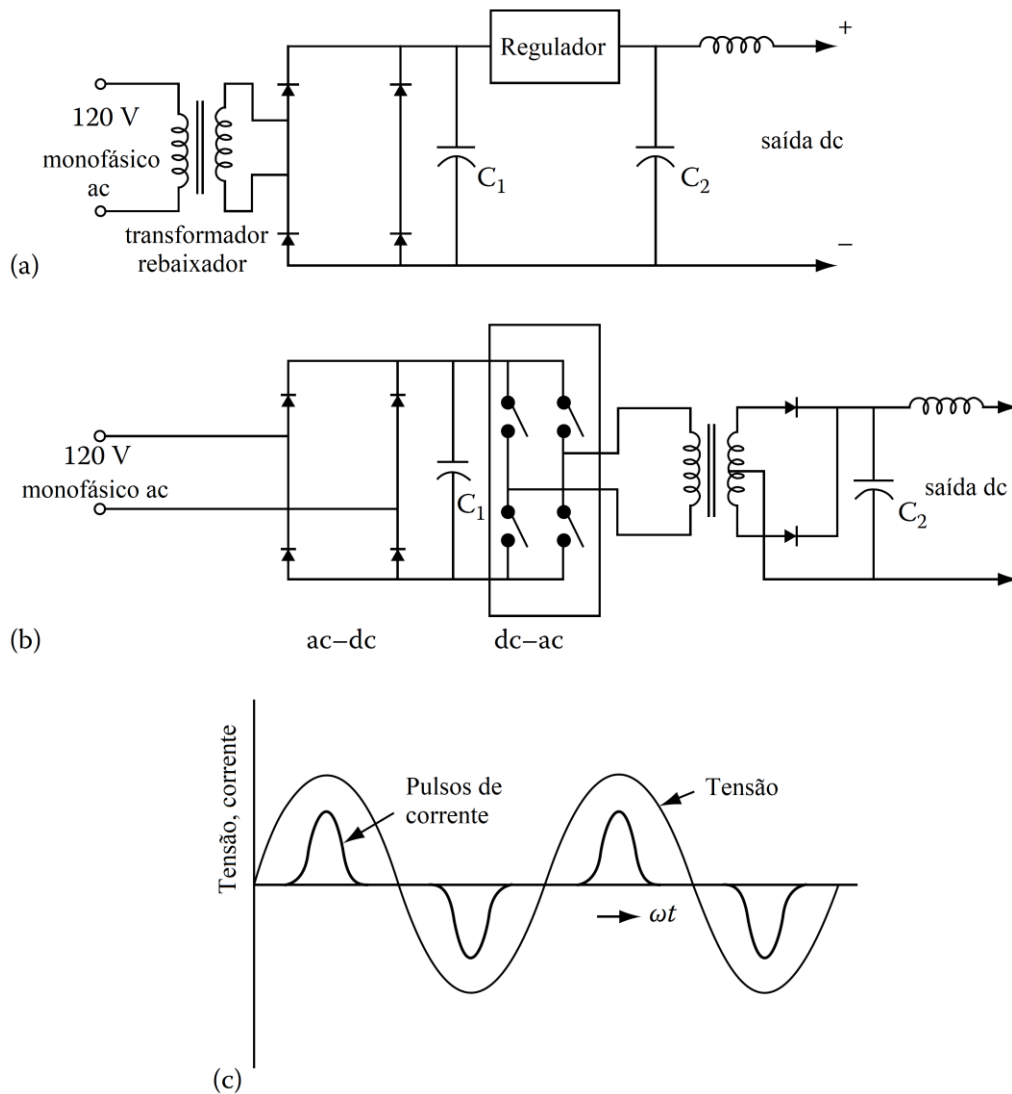
- Retificadores Monofásicos

Existem dois tipos comuns de retificadores monofásicos (DUGAN *et al.*, 2004). Tecnologias mais antigas usam métodos de controle de tensão pelo lado *ac*, como transformador, para reduzir o nível de tensão necessário no lado *dc*. Com tecnologia mais recente, as fontes chaveadas usam técnicas de conversão *dc-dc*, utilizando componentes pequenos e leves. A ponte de diodos é conectada diretamente no lado *ac*, eliminando o transformador. Fontes chaveadas são utilizadas quase que universalmente em aparelhos eletrônicos monofásicos, como televisores, computadores, impressoras e outros eletrodomésticos. As principais vantagens são peso reduzido, tamanho compacto, operação eficiente, custo e grande tolerância a variações na tensão de entrada. A Figura 5 mostra o retificador monofásico convencional e a fonte chaveada.

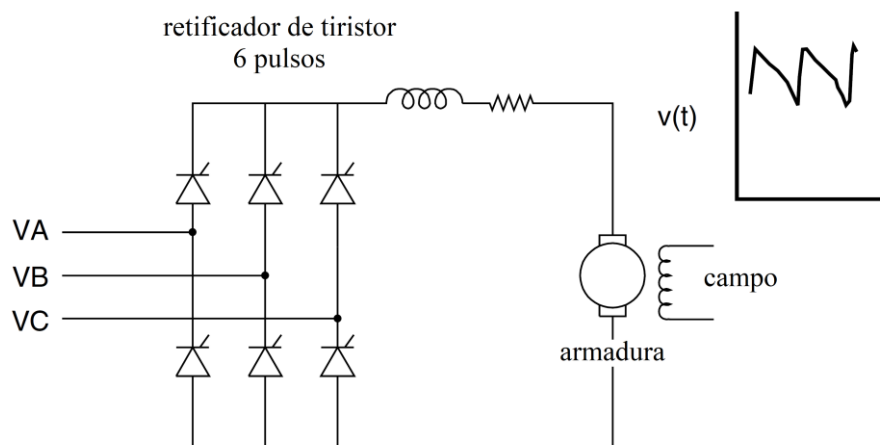
- Conversores de Potência Trifásicos

Diferente dos retificadores monofásicos, os conversores de potência trifásicos não geram harmônicos de corrente de terceira ordem. De acordo com Dugan *et al.* (2004), os conversores de potência trifásico são divididos basicamente em dois grupos, *drives dc* e *drives ac*.

*Drives dc* são basicamente utilizados para acionamentos de máquinas de corrente contínua. Conforme (DUGAN *et al.*, 2004), a única etapa de um *drive dc* é a retificação, o que o torna um sistema de controle simples. A maioria dos *drives dc* usam retificadores de 6 pulsos, conforme apresenta Figura 6, que geram correntes harmônicas de quinta e sétima ordem. Já *drives dc* de 12 pulsos eliminam até 90% dos harmônicos de quinta e sétima ordem.

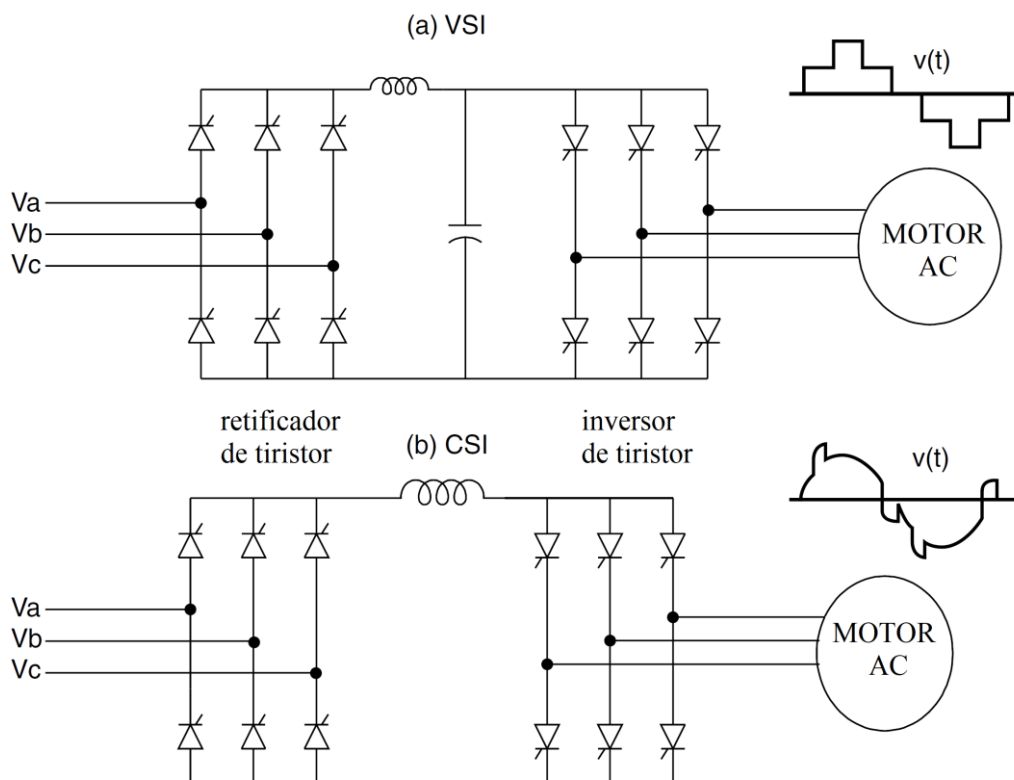


**Figura 5: Retificador monophasico convencional (a), fonte chaveada (b) e forma de onda da corrente de entrada (c) (DAS, 2012).**



**Figura 6: Drive de velocidade variável de 6 pulsos (DUGAN *et al.*, 2004).**

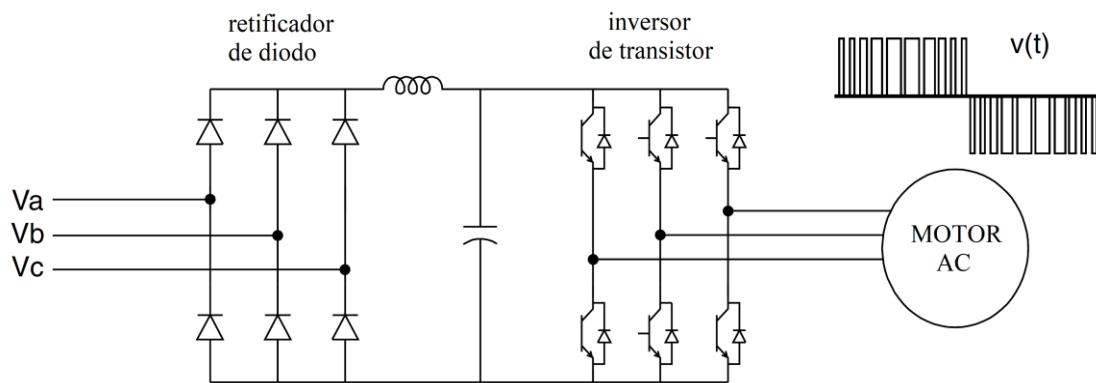
Em *drives ac*, de acordo com Dugan *et al.* (2004), a saída do retificador é invertida para gerar uma tensão *ac* de frequência variável para o motor. Os drives são classificados como inversores de fonte de tensão (VSI), que requerem uma fonte uma entrada constante de tensão obtida com filtro LC no link dc, e inversores de fonte de corrente (CSI), que requerem uma entrada constante de corrente obtida com indutor série no link dc. A Figura 7 ilustra os dois tipos de drives.



**Figura 7: Tipos de drives VSI e CSI (DUGAN *et al.*, 2004).**

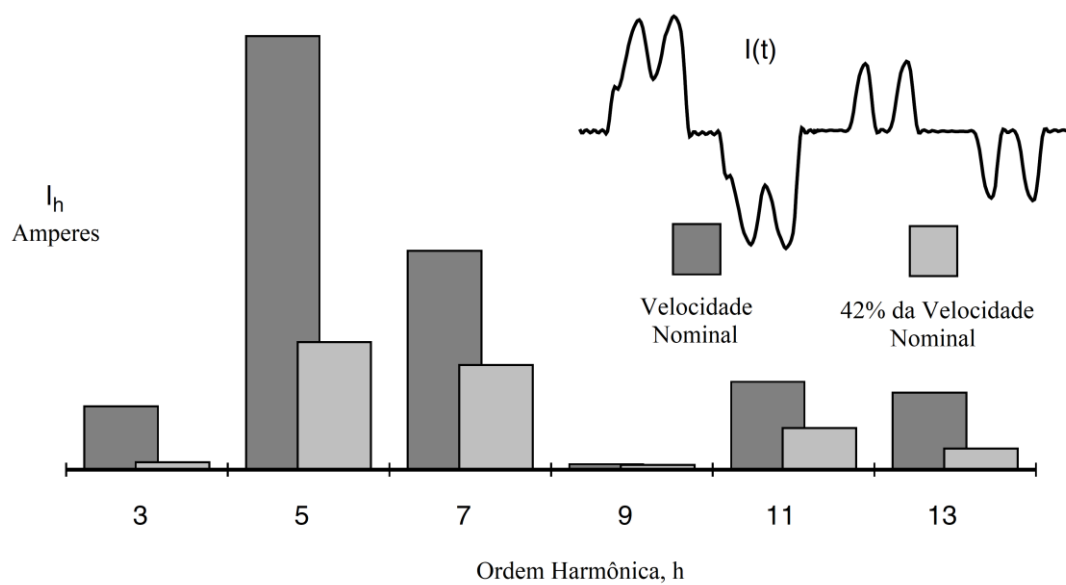
Drives ac são muito utilizados para acionamento de motores de indução, utilizando inversores com técnica PWM (*Pulse Width Modulation*) para sintetizar a forma de onda ac como um trem de pulsos dc de largura variável (DUGAN *et al.*, 2004), conforme apresenta Figura 8.





**Figura 8: Inversor de velocidade variável por PWM (DUGAN *et al.*, 2004).**

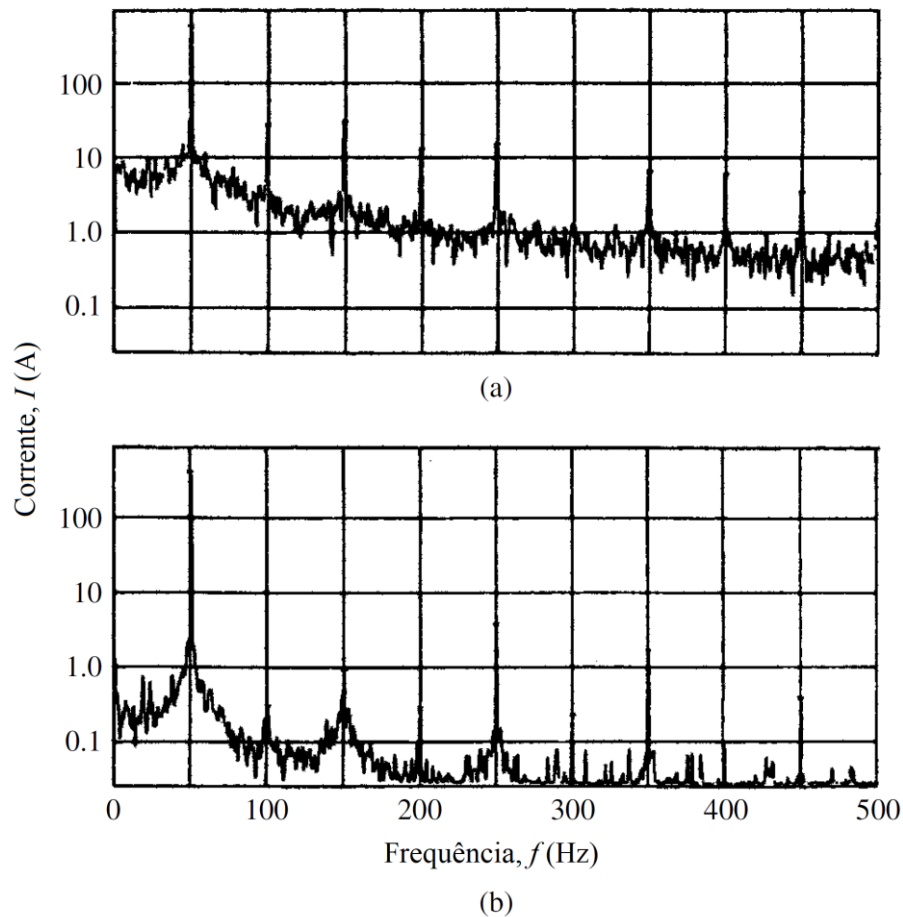
Ainda segundo (DUGAN *et al.*, 2004), a distorção harmônica de corrente em *drives* de velocidade variável não é constante. A forma de onda muda significativamente para diferentes valores de torque e velocidade, como pode visualizar na Figura 9.



**Figura 9: Efeitos dos harmônicos de corrente em inversores de velocidade variável por PWM (DUGAN *et al.*, 2004).**

- Fornos a Arco Elétrico

A corrente de um forno a arco elétrico é altamente não-linear, conforme ilustra a Figura 10. A magnitude da corrente, que é limitada principalmente pelas impedâncias dos cabos e transformador de alimentação do forno, pode alcançar valores acima de 60kA, de acordo com (ARRILLAGA & WATSON, 2003). A variação estocástica na forma de onda de tensão, devido às alterações repentinas no comprimento do arco, produz um espalhamento contínuo no espectro de frequências na faixa de 0,1 a 30 Hz, principalmente durante a fase de derretimento da sucata.



**Figura 10: Espectro de frequências de um forno a arco elétrico durante período de (a) derretimento de sucata e (b) refinamento (ARRILLAGA & WATSON, 2003).**

## 2.7 EFEITOS DOS HARMÔNICOS

As correntes harmônicas produzidas pelas cargas não-lineares são injetadas no sistema elétrico e, conforme Dugan *et al.* (2004), interagem nocivamente com diversos equipamentos conectados ao sistema, como capacitores, transformadores e motores, provocando perdas, sobreaquecimento e sobrecarga.

- Transformadores

O efeito principal dos harmônicos nos transformadores é o aquecimento adicional gerado pelas perdas causadas pelo conteúdo harmônico da corrente de carga, conforme menciona (ARRILLAGA & WATSON, 2003). Outros problemas provocados pelos harmônicos incluem ressonância entre a indutância do transformador e a capacitância do sistema, estresse da isolação do enrolamento e laminação do núcleo e pequenas vibrações no núcleo.

Segundo Arrillaga & Watson (2003), a presença das tensões harmônicas aumenta as perdas por correntes parasitas e de histerese na laminação do núcleo e estressa a isolação. Também, o fluxo de correntes harmônicas aumenta as perdas no cobre, pois os harmônicos aumentam o valor eficaz da corrente, o que aumenta as perdas nos condutores.

- Máquinas Rotativas

De acordo com Dugan *et al.* (2004), tensões harmônicas nos terminais do motor produzem fluxos harmônicos dentro do mesmo, os quais não contribuem para o torque do motor, mas giram em frequências diferentes da velocidade síncrona, basicamente induzindo correntes de alta frequência no rotor. Para (DAS, 2012), harmônicos produzem deflexão do eixo, torques parasitas, vibração, ruído, aquecimento adicional e diminuem a eficiência das maquinas rotativas.

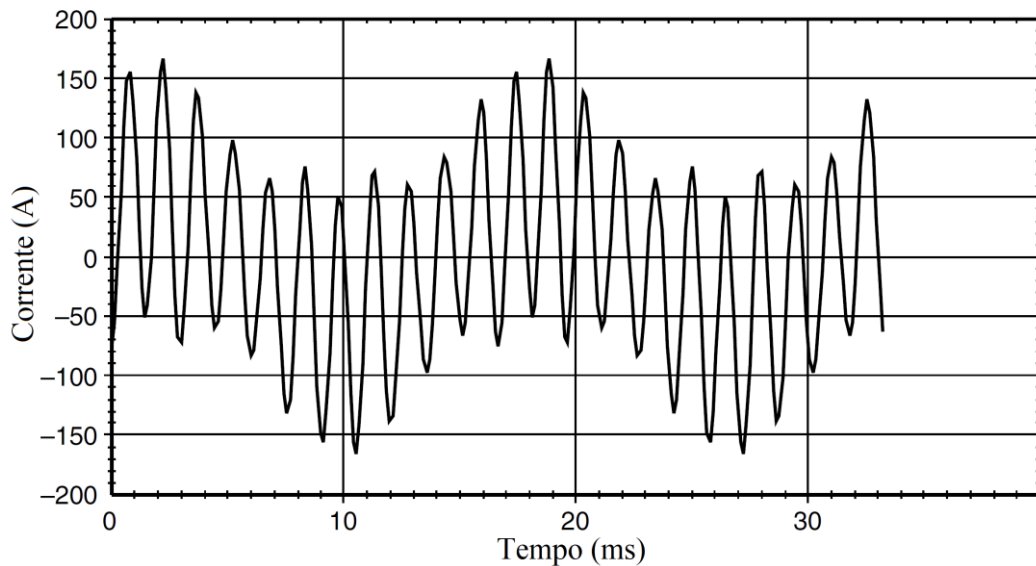
- Capacitores

Conforme Arrillaga & Watson (2003), a presença de capacitores, a exemplo dos usados para correção do fator de potência ou regulação de tensão, pode resultar em ressonância no sistema elétrico local, o que leva a correntes excessivas e possível dano subsequente aos capacitores.

Sobretensão pode estressar e diminuir a vida útil de um banco de capacitores, conforme afirma Rosa (2015). Estresses de tensão, temperatura e corrente são as principais causas para o colapso da isolação dielétrica do capacitor.

Para Dugan *et al.* (2004), capacitores *shunt*, alocados ou no consumidor para correção do fator de potência ou no sistema de distribuição para controle de tensão, alteram drasticamente a impedância do sistema com a frequência. Capacitores não criam harmônicas, mas distorção harmônica severa pode ocorrer devido à sua presença. Neste contexto, a aplicação de banco de capacitores pode amplificar as correntes das cargas não-lineares, devido à ressonância paralela ou série. O banco de capacitores sofre grande distorção de

tensão e corrente durante a ressonância, as quais são ricas em harmônicos monotônicos. A Figura 11 mostra a forma de onda de corrente de um banco de capacitores em ressonância com o sistema na 11ª harmônica.



**Figura 11: Corrente de um banco de capacitores em ressonância com o sistema na 11ª harmônica (DUGAN *et al.*, 2004).**

- Condutores

De acordo com Arrillaga & Watson (2003), as correntes harmônicas produzem perdas de potência adicionais devido ao fato de aumentarem a magnitude do valor eficaz da forma de onda de corrente, conforme Equação (6).

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (6)$$

Para (DAS, 2012), a resistência ac de um condutor muda devido aos efeitos pelicular e de proximidade. Ambos os efeitos são dependentes da frequência, tamanho do condutor, construção do cabo e espaçamento, e na presença de correntes harmônicas esses efeitos são mais aparentes.

Conforme explica (DAS, 2012), no efeito pelicular a densidade de corrente ao longo da seção reta não é uniforme. A corrente é forçada, pelas forças eletromotrizes induzidas pelos fluxos harmônicos, a fluir mais densamente próximo a extremidade do condutor, reduzindo a área efetiva do condutor. Já o efeito de proximidade ocorre devido à distorção da distribuição de corrente entre 2 condutores próximos. Isso provoca concentração de correntes em partes dos condutores próximas umas das outras.

- Sistemas de Controle

Em certas circunstâncias, de acordo com Rosa (2015), a distorção harmônica pode causar múltiplos cruzamentos por zero da forma de onda de tensão, provocando a má operação de sistemas de controle que usam o cruzamento por zero como uma referência de atuação, temporização ou contagem.

Arrillaga & Watson (2003) dizem que algoritmos e relés digitais que dependem de dados amostrados ou cruzamentos por zero são particularmente propensos a erros quando distorção harmônica está presente. No entanto, a grande maioria das operações de relés não é afetada significativamente quando os níveis de distorção harmônica são menores que 20%.

## 2.8 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

As principais técnicas para controle da distorção harmônica são:

- Reduzir as correntes harmônicas produzidas pela carga

Conectando-se um reator ou transformador em série irá reduzir significativamente as correntes harmônicas de um conversor de potência trifásico. Transformadores com conexão delta podem bloquear o fluxo das harmônicas múltiplas de três.

- Instalar filtros

Uma opção é a aplicação de filtros paralelos, que funcionam oferecendo um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, mantendo-as fora do sistema elétrico. Há, também, os filtros série, que oferecem alta impedância à corrente harmônica na frequência de interesse. Outra alternativa é a aplicação de filtros ativos, que injetam eletronicamente correntes harmônicas que cancelam a distorção harmônica produzida pela carga não-linear.

- Modificar a resposta em frequência do sistema

A resposta em frequência do sistema pode resultar em uma interação nociva com a carga não-linear. Dessa forma, as alternativas para modificar a resposta em frequência do sistema são adicionar filtro *shunt*, aplicar reator série e redimensionar, mover ou remover banco de capacitores. Essas medidas podem atenuar drasticamente ressonâncias entre a indutância do sistema e a reatância capacitiva de bancos de capacitores, reduzindo a distorção harmônica a um nível aceitável.

### 2.8.1 REATOR SÉRIE

De acordo com Dugan *et al.* (2004), a utilização de pequenos reatores em série com a entrada é um método muito eficaz de mitigação de distorção harmônica causada por drives do tipo PWM. A indutância do reator série reduz a taxa com que o capacitor do drive PWM é carregado, forçando o drive a drenar uma corrente por um período mais prolongado. O resultado é uma corrente de menor magnitude com muito menos conteúdo harmônico.

### 2.8.2 FILTRO PASSIVO PARALELO

Filtros passivos são arranjos de capacitores, indutores e resistores conectados em paralelo com a carga linear, provendo caminho de baixa impedância para frequências harmônicas específicas. Podem ser classificados em filtro sintonizado e filtro passa-alta, conforme ilustra a Figura 12. Conforme aponta Akagi (2006), possuem a vantagem de fornecer potência reativa na frequência fundamental, corrigindo o fator de deslocamento. São comumente usados e seu custo é relativamente baixo comparado com outros métodos.

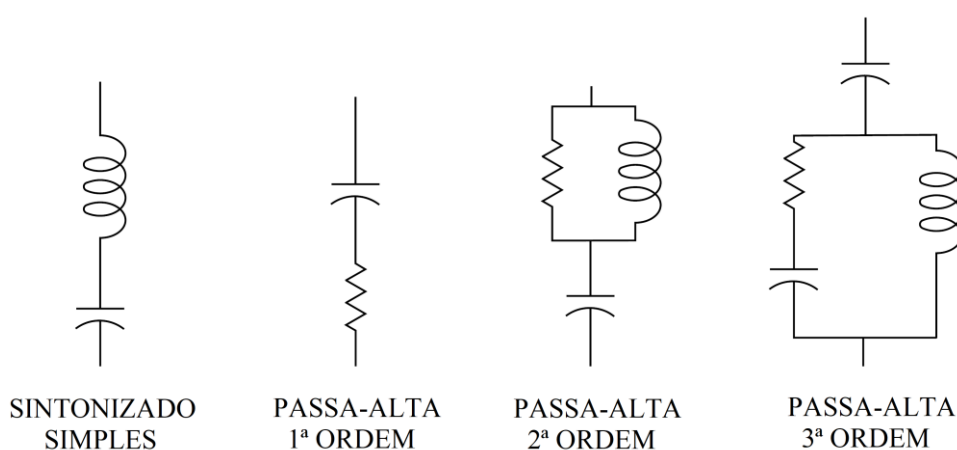
Porém, segundo (DAS, 2012), filtros passivos possuem as seguintes desvantagens:

- Não se adaptam a mudanças nas condições do sistema;
- Uma mudança no sistema pode resultar em desintonização do filtro;
- O projeto do filtro pode ser um problema para um sistema elétrico robusto (alta corrente de curto-circuito), pois para que o filtro seja eficaz sua impedância deve ser menor que a impedância do sistema. Em tal situação, uma



capacitância muito grande é necessária, podendo resultar em elevada injeção de potência reativa e sobretensão;

- Perda de energia nos elementos resistivos pode ser considerável;
- Pode ocorrer ressonância paralela entre o filtro e o sistema;
- O envelhecimento e deterioração dos componentes e a temperatura podem desintonizar o filtro.

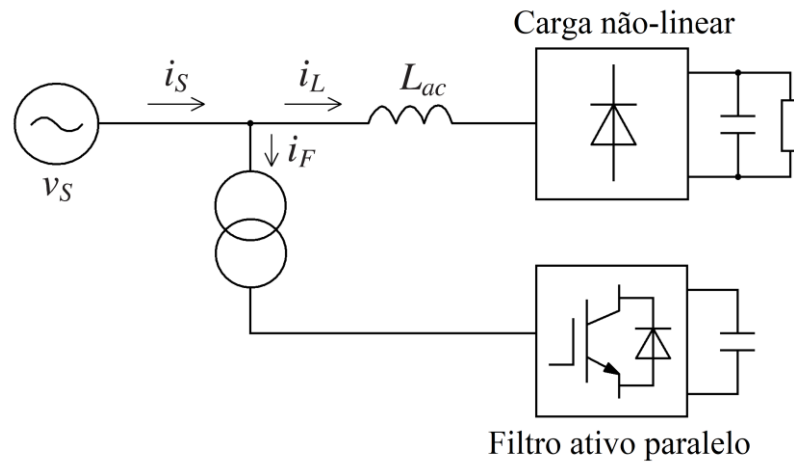


**Figura 12: Principais configurações de filtros passivos (DUGAN *et al.*, 2004).**

### 2.8.3 FILTRO ATIVO

Os filtros ativos são compostos por eletrônicos de potência e sistema de controle, que injetam no sistema correntes harmônicas idênticas às injetadas pela carga não-linear, mas de polaridade oposta. Para Dugan *et al.* (2004), os filtros ativos possuem as vantagens de não entrarem em ressonância com o sistema, injetam mais de uma harmônica ao mesmo tempo e mitigam outros tipos de problema da qualidade da energia, como por exemplo *flicker* e fator de potência.

De acordo com Akagi (2006), os filtros ativos podem ser classificados como filtros ativos paralelo, conforme ilustra Figura 13, e filtros ativos série, conforme ilustra Figura 14. Na configuração paralela, o controlador do filtro detecta a corrente instantânea da carga  $i_L$ , subtrai a corrente harmônica  $i_{Lh}$  da corrente de carga lida e drena corrente  $i_{AF} = -i_{Lh}$  do sistema, cancelando a corrente harmônica  $i_{Lh}$ .



**Figura 13: Filtro ativo paralelo (AKAGI, 2006).**

Já na configuração série, o controlador do filtro detecta a corrente instantânea da fonte  $i_S$ , extrai a corrente harmônica  $i_{Sh}$  da corrente da fonte lida e aplica uma tensão de compensação  $v_{AF} = Ki_{Sh}$  no primário do transformador. Isso resulta em uma redução significativa da corrente harmônica  $i_{Sh}$  da fonte quando o ganho  $K$  é ajustado suficientemente alto.

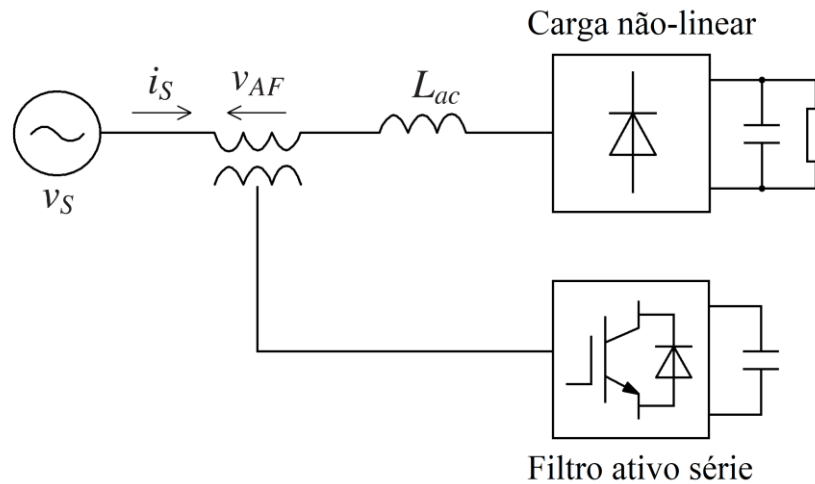


Figura 14: Filtro ativo série (AKAGI, 2006).

## 2.9 ANÁLISE HARMÔNICA

O objetivo da análise harmônica é avaliar a distribuição de correntes harmônicas, tensões e índices de distorção harmônica ao longo do sistema de potência, segundo (DAS, 2012). Essa análise é então aplicada no estudo de condições de ressonância e *design* de filtros harmônicos.

Os métodos de análise da propagação dos harmônicos no sistema elétrico são divididos em dois grupos, métodos no domínio do tempo e métodos no domínio da frequência. De acordo com Herraiz (2003), há também métodos híbridos, os quais trabalham em ambos os domínios para se beneficiar das vantagens de cada um dos domínios. Os métodos no domínio do tempo são baseados em resolução numérica de equações diferenciais que representam o comportamento do sistema, muito utilizados para solução de transitórios eletromagnéticos.

Para Medina (2013), os métodos para análise harmônica no domínio da frequência são divididos em método direto, análise harmônica iterativa e métodos de fluxo de potência harmônica.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi utilizado o método direto no domínio da frequência, chamado de método de injeção de correntes por Arrillaga & Watson (2003). Neste método, as cargas não-lineares são modeladas como fontes de correntes nas frequências harmônicas conectadas às barras.

Conforme descreve Arrillaga & Watson (2003), as tensões harmônicas nas barras do sistema são calculadas pela solução direta da equação linear (7).

$$\mathbf{I}^{(h)} = \mathbf{Y}^{(h)} \mathbf{V}^{(h)} \quad (7)$$

Onde  $\mathbf{I}^{(h)}$  é o vetor de injeções de corrente nodais da  $h$ -ésima harmônica,  $\mathbf{Y}^{(h)}$  é a matriz admitância de barras da  $h$ -ésima harmônica e  $\mathbf{V}^{(h)}$  é o vetor de tensões nodais da  $h$ -ésima harmônica.

Para cada frequência harmônica de interesse é gerada uma matriz admitância de barras separada, calculada conforme Equação (8), gerando um conjunto de  $h - 1$  equações lineares independentes.

$$\mathbf{Y}^{(h)} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1k} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2k} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{ik} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \cdots & Y_{ki} & \cdots & Y_{kk} & \cdots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nk} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde  $Y_{ki}$  é a admitância mútua entre as barras  $k$  e  $i$  na frequência harmônica  $h$ , e  $Y_{ii}$  é a admitância própria da barra  $i$  na frequência harmônica  $h$ , calculadas conforme Equações (9) e (10), respectivamente.

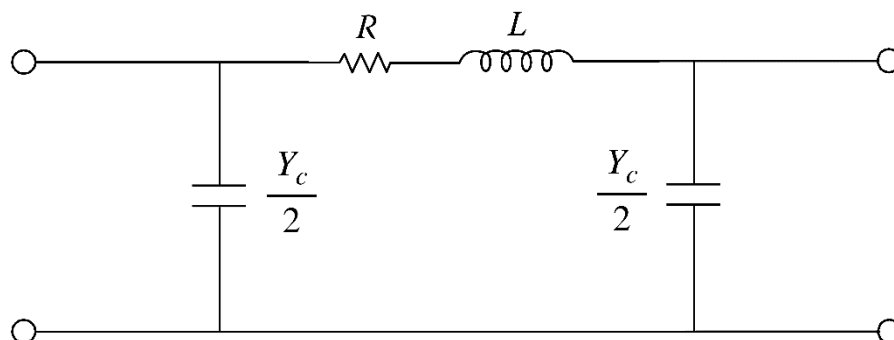
$$Y_{ki} = Y_{ik} = -y_{ki} \quad (9)$$

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad k \neq i \quad (10)$$

Onde  $Y_{ki} = Y_{ik}$  é a admitância mútua entre os nós  $i$  e  $k$ , e  $Y_{ii}$  é a auto-admitância do nó  $i$ .

## 2.10 MODELAGEM DAS LINHAS

Uma representação adequada dos componentes do sistema é essencial para a análise harmônica. Conforme sugere Martinez-Velasco *et al.* (2010), o modelo mais adequado para simulação de linhas com fenômenos de frequência na faixa de 0,1 Hz a 3 kHz é o modelo de parâmetros concentrados. Saadat (1999) afirma que linhas de até 250 km devem ser modeladas pelo modelo  $\pi$  nominal, em que a resistência  $R$  e a indutância  $L$  são bem representadas por parâmetros concentrados, e metade da admitância *shunt* da linha concentrada em cada extremidade do circuito equivalente, conforme ilustrado na Figura 15.



**Figura 15: Modelo  $\pi$  nominal com parâmetros concentrados.**

A impedância  $Z$  da linha é dada pela Equação (11), e a admitância *shunt* total  $Y_C$  é dada pela Equação (12), sendo esses parâmetros calculados para cada frequência harmônica de interesse.

$$Z = R + j\omega L \quad (11)$$

$$Y_C = g + j\omega C \quad (12)$$

Porém, a condutância *shunt*  $g$ , a qual representa a corrente de dispersão nos isoladores e o efeito corona, é desprezível e assume valor zero.

É importante ressaltar que a modelagem dos componentes deste trabalho leva em consideração um sistema balanceado, simplificando a formulação do problema. Dessa forma, o sistema é tratado pela representação monofásica equivalente.

## 2.11 OTIMIZAÇÃO HEURÍSTICA

Avanços recentes na engenharia da computação e a maior complexidade dos problemas de otimização de sistemas de potência levaram ao desenvolvimento de novas técnicas de otimização para problemas de grande escala. Nessa lista incluem-se programação dinâmica, métodos dos multiplicadores de Lagrange, métodos heurísticos e técnicas evolucionárias. Esforços tem sido concentrados, na última década, na pesquisa por novas técnicas de otimização com atributos de memória e busca baseada em população.

Diversos métodos heurísticos evoluíram nos últimos anos para facilitar a solução de problemas de otimização que foram anteriormente difíceis ou impossíveis de resolver. Dentre tais métodos destacam-se aqueles baseados em computação evolucionária, tais como: têmpera

simulada, enxame de partículas, colônia de formigas e colônia de abelhas. Dentre tais métodos destacam-se aqueles baseados em computação evolucionária, tais como: têmpera simulada, enxame de partículas, colônia de formigas e colônia de abelhas.

Para Soliman & Mantawy (2010), métodos heurísticos possuem a característica de identificação de ótimos locais, porém, sem estagnar a busca nos mesmos, estimulando a busca distribuída no espaço das variáveis de modo a descobrir a solução ótima global. Devido a sua capacidade de exploração, os métodos heurísticos são ótimas ferramentas quando o espaço de busca é grande e não-linear.

### **2.11.1 ALGORÍTMO DE OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS**

Inteligência de enxames é um ramo da otimização heurística que modela a população de agentes ou partículas que interagem e são capazes de se auto-organizarem. De acordo com (KARABOGA, 2007), o Algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas (do inglês *Artificial Bee Colony* - ABC) é uma técnica de otimização baseada em comportamento inteligente de enxame de abelhas melíferas utilizada para otimização de funções de multivariáveis.

No algoritmo ABC, a colônia contém três grupos de abelhas: operárias (campeiras), seguidoras e escudeiras. Para Serapião (2009), as abelhas operárias são enviadas em múltiplas direções simultaneamente para explorar uma grande área de busca, porém, concentrando a busca nas fontes de néctar mais proveitosas. Dentro da colméia, na pista de dança, as abelhas campeiras bailam de maneiras distintas conforme a distância da florada, de modo a tentar convencer suas companheiras a segui-las. Cada abelha seguidora decide atingir a fonte de néctar ou pólen seguindo uma abelha dançarina que já descobriu uma florada. A escolha da fonte de néctar é uma função de probabilidade que depende da qualidade da fonte de

alimento. A abelha campeira cuja fonte de néctar secou, torna-se abelha escudeira, que tem função de buscar nova fonte de alimento.

Conforme Karaboga (2007), no algoritmo ABC a posição de uma fonte de alimento representa uma possível solução do problema de otimização e a quantidade de néctar corresponde à qualidade da solução associada, ou seja, equivalente ao valor da função objetivo.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho tem por objetivo propor um modelo de otimização da alocação de filtros ativos em redes de distribuição para mitigação da distorção harmônica de tensão. O modelo de otimização proposto tem por objetivo a minimização das taxas de distorção harmônica nas barras do sistema de distribuição, de modo a atender os valores limites sugeridos pelas normas. Neste contexto, existem trabalhos relevantes publicados com desenvolvimento de modelos com funções objetivo semelhantes, utilizando outras técnicas heurísticas para otimização, tais como algoritmo genético, enxame de partículas, entre outros. Para a pesquisa das referências foram utilizadas as palavras *active power filter allocation* na base de dados do *IEEE Xplore* e do *Elsevier*. Tais trabalhos são brevemente descritos a seguir neste capítulo.

Em (HONG & CHANG, 1996) é proposta uma abordagem de otimização do dimensionamento e localização de APLCs (*Active Power Line Conditioner*), um tipo de filtro de potência ativo que compensa a distorção da forma de onda causada por harmônicos no sistema de potência. O objetivo é minimizar as injeções de correntes dos APLCs e a distorção de tensão enquanto satisfazendo os limites harmônicos estabelecidos em normas. Um estudo de caso é realizado em um sistema de distribuição de 18 barras utilizando um algoritmo baseado em GBDT (*Generalized Benders Decomposition Theory*), sendo considerados na formulação do problema os harmônicos de ordem 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 e 25.

(HONG *et al.*, 1999) propõe um método de otimização baseado em fluxo de potência ótimo (OHPF) para o dimensionamento e localização de APLCs em um sistema de distribuição de 18 barras. O objetivo é minimizar as injeções de correntes dos APLCs, a

distorção harmônica de tensão e as perdas nas linhas enquanto satisfazendo as equações de fluxo de potência dos harmônicos e da fundamental, as restrições de segurança e os limites harmônicos estabelecidos em normas. Na formulação do problema são consideradas duas cargas não-lineares, modeladas como fontes de corrente, injetando os harmônicos de ordem 5 e 7, apenas.

Já em (CHANG & CHANG, 2001) é apresentado um modelo de otimização baseado em Evolução Diferencial (DE) e Somatório de Gradiente Múltiplo (MGS) para a instalação ótima de três APLCs trifásicos em sistema de distribuição de 23 barras desbalanceado, resultante de conexões assimétricas dos transformadores. O objetivo é determinar a localização e o tamanho total dos três APLCs, tanto quanto o espectro das correntes injetadas, enquanto atendendo as restrições de THD e IHD de tensão e tamanhos discretos de APLCs. O algoritmo é dividido em duas etapas: na primeira etapa o método MGS resolve o problema do dimensionamento das correntes de injeções dos APLCs, que são variáveis contínuas, e na segunda etapa, o método DE é utilizado para encontrar o tamanho discreto do espectro de corrente dos APLCs.

Outros dois algoritmos de otimização de alocação de filtros de potência ativos (APF) são propostos por (KEYPOUR *et al.*, 2004), o primeiro com objetivo de minimizar o somatório dos quadrados das tensões harmônicas nas barras e o segundo com objetivo de atender os limites de distorção enquanto minimizando as correntes de injeção dos APFs. Ambos os algoritmos são resolvidos utilizando algoritmo genético (GA) como ferramenta de otimização, aplicados em um sistema de 18 barras, com cargas não-lineares conectadas às barras 7, 24 e 25, modeladas como fontes de correntes.

No trabalho de (ZIARI & JALILIAN, 2010) é implementado um algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) para alocação e dimensionamento de múltiplos APLCs. A função objetivo compreende a minimização do somatório das THD, o tamanho

total dos APLCs, perdas nas linhas de transmissão e perdas nos motores. Três casos diferentes em um sistema de 18 barras são avaliados: APLCs de tamanho contínuo ilimitado, contínuo limitado e discreto limitado. Três cargas não-lineares, modeladas como fontes de correntes, são conectadas, produzindo harmônicos de ordem 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 e 25.

Outro algoritmo para otimizar a alocação de filtros ativos em rede de distribuição é apresentado por (WANG *et al.*, 2010). O algoritmo heurístico baseado em busca tabu (TS) tem como objetivo minimizar o investimento e otimizar a localização e os parâmetros dos filtros ativos, com restrição de THD e IHD de tensão nas barras. O modelo proposto é analisado em um sistema de distribuição de tensão 10kV e 20 barras, sendo 4 cargas não-lineares, as quais injetam correntes harmônicas de ordem 5, 7 e 11. A solução ótima encontrada pelo algoritmo é a alocação de dois filtros.

No trabalho de (GRABOWSKI & MACIĄŻEK, 2013) é utilizado GA como ferramenta de otimização da alocação e dimensionamento de filtros de potência ativos. O objetivo é minimizar o custo de investimento da instalação dos filtros ativos. Para tanto, o autor estabelece uma função descontínua  $g(|I_W^k|)$  que caracteriza o custo do filtro ativo dependente da sua capacidade total de corrente rms. As equações de restrição contemplam valor máximo aceitável da corrente eficaz total do filtro, valor máximo de THD de tensão, valor máximo de IHD de tensão e valor máximo de corrente eficaz da h-ésima corrente harmônica do filtro. O algoritmo é aplicado na solução de um sistema de distribuição de 20 barras 12,4kV com cargas balanceadas, ou seja, o problema é resolvido considerando-se apenas uma fase. O sistema contém 8 cargas não-lineares, que são *drives* de velocidade ajustável de 6 pulsos, modeladas como injeções de corrente. O autor conclui que a solução ótima para a minimização do somatório das correntes dos filtros (que foi a alocação de 3 filtros) difere da solução ótima para a minimização dos custos dos filtros (que foi a alocação de dois filtros).

Todos os trabalhos supracitados aplicam suas metodologias em estudos de casos em que há poucas cargas não-lineares por todo o sistema que geram distorção harmônica.

O presente trabalho tem por objetivo propor um modelo de otimização para minimizar duas funções objetivo: a soma dos quadrados das THDVs em todas as barras e a soma das correntes dos APFs, baseado no algoritmo ABC, que tem, de acordo com (KARABOGA, 2007), uma performance melhor para otimização de funções multivariáveis em relação a outros algoritmos heurísticos baseados em enxame de partículas e evolução.

Ademais, o modelo de otimização proposto é testado em um sistema de distribuição IEEE de 33 barras, com cargas não-lineares aplicadas em todas as barras. O sistema escolhido para o estudo de caso é maior que os demais sistemas utilizados nos trabalhos referenciados. Isto dificulta muito a busca pela solução, visto que o problema de decisão de quais barras alocar os filtros é um problema combinatorial.

A Tabela 6 apresenta um resumo das características do presente trabalho e das referências.

Tabela 6: Resumo das características dos trabalhos.

Referência	Característica								Nº de nós do sistema de estudo de caso	Metaheurísticas
	Minimização do somatório dos valores de THDV nos nós	Minimização dos valores eficazes das correntes dos FAs	Minimização das perdas nas linhas de transmissão	Minimização das perdas em motores	Minimização do investimento total da instalação dos FAs	Cargas não-lineares modeladas como injeções de corrente	Sistema trifásico simétrico e com cargas equilibradas	Sistema trifásico assimétrico e com cargas desequilibradas		
(HONG & CHANG, 1996)	X	X				X	X		18	Generalized Benders Decomposition Theory
(HONG et al., 1999)	X	X				X	X		18	Generalized Benders Decomposition Theory
(CHANG & CHANG, 2001)		X	X	X		X		X	23	Evolução Diferencial
(KEYPOUR et al., 2004)	X	X				X	X		18	Algoritmo Genético
(ZIARI & JALILIAN, 2010)	X	X				X	X		18	Algoritmo Genético e Enxame de Partículas
(WANG et al., 2010)					X	X	X		20	Busca Tabu
(GRABOWSKI & MACIAŻEK, 2012)					X	X	X		20	Algoritmo Genético
(GRABOWSKI & MACIAŻEK, 2013)					X	X	X		20	Algoritmo Genético
<b>Presente trabalho</b>	<b>X</b>	<b>X</b>				<b>X</b>	<b>X</b>		<b>33</b>	<b>ABC</b>

## 4. METODOLOGIA

No presente trabalho é apresentada uma metodologia de otimização para o dimensionamento e alocação de FAs em rede de distribuição, sendo propostas duas funções objetivo. A primeira função objetivo é minimizar o somatório dos quadrados das THDVs nas barras, e a segunda função objetivo é minimizar o somatório das correntes eficazes dos FAs, enquanto atendendo as inequações de restrições. É utilizado o algoritmo ABC (*Artificial Bee Colony*) como técnica de otimização, sendo o desenvolvimento da rotina realizado através do *software Matlab®*.

Como visto no capítulo de revisão da literatura, o problema de alocação ótima de FAs em redes de distribuição consiste em:

- Determinar a localização (barras) de alocação dos FAs;
- Determinar os valores de correntes de injeções de cada ordem harmônica e de cada FA alocado;
- Minimizar as correntes eficazes de compensação injetadas pelos FAs;
- Minimizar as taxas de distorção de tensão nos nós do sistema.

### 4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

As tensões harmônicas nas barras do sistema, considerando as correntes de compensação injetadas pelos filtros, são calculadas pela solução direta da equação linear (13).

$$\mathbf{I}^{(h)} + \mathbf{I}^{AF(h)} = \mathbf{Y}^{(h)}\mathbf{V}^{(h)} \quad (13)$$

Onde  $\mathbf{I}^{AF(h)}$  é o vetor de correntes harmônicas nodais de ordem  $h$  injetadas pelos filtros.

A injeção de corrente dos filtros ativos está condicionada a uma variável binária de decisão  $b_n$  que determina se o filtro do nó  $n$  deve ser selecionado para instalação (quando  $b_n = 1$ ) ou não deve ser selecionado ( $b_n = 0$ ). Assim, o enésimo elemento do vetor de injeções dos filtros ativos ( $\mathbf{I}^{AF(h)}$ ) é dado pela Equação (14)

$$I_n^{AF(h)} = b_n \bar{I}_n^{AF(h)} \quad (14)$$

Sendo  $\bar{I}_n^{AF(h)} = \left| \bar{I}_n^{AF(h)} \right| e^{j\varphi_n^{AF(h)}}$  o fasor da corrente de ordem harmônica  $h$  injetada pelo filtro situado no nó  $n$ , sendo  $\varphi_n^{AF(h)}$  o seu respectivo ângulo de fase. Observar que quando  $b_n = 0$ , não existe filtro ativo instalado no nó  $n$  e as injeções das correntes são nulas para todos os harmônicos considerados, ou seja, se  $b_n = 0 \Rightarrow I_n^{AF(h)} = 0, \forall h = 2, 3 \dots, H$ .

O valor eficaz da corrente do filtro localizado no nó  $n$ , considerando todas as harmônicas, é dado pela Equação (15):

$$|I_n^{AF}| = \sqrt{\sum_{h=2}^H |I_n^{AF(h)}|^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^H b_n |\bar{I}_n^{AF(h)}|^2} \quad (15)$$

O modelo de otimização para a alocação de FAs proposto neste trabalho é dado pelas Equações (16) a (30). A função objetivo  $f_1$  é o somatório dos quadrados das THDVs nas barras e a função objetivo  $f_2$  é o somatório das correntes eficazes injetadas pelos FAs.

$$\min f_1 = \sum_{n=1}^N THDV_n^2 \quad (16)$$

$$\min f_2 = \sum_{n=1}^N |I_n^{AF}| \quad (17)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\mathbf{I}^{(h)} + \mathbf{I}^{AF(h)} = \mathbf{Y}^{(h)} \mathbf{V}^{(h)}, \forall h = 2, \dots, H \quad (18)$$

$$I_n^{AF(h)} = b_n \left| \bar{I}_n^{AF(h)} \right| e^{j\varphi_n^{AF(h)}}, \forall h = 2, \dots, H, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

$$THDV_n = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left( IHDV_n^{(h)} \right)^2}, \forall n = 2, \dots, N \quad (20)$$

$$IHDV_n^{(h)} = \frac{\left| \bar{V}_n^{(h)} \right|}{\left| \bar{V}_n^{(1)} \right|}, \forall h = 2, 3, \dots, H, \forall n = 2, \dots, N \quad (21)$$

$$THDV_n \leq THDV_{max}, \forall h = 2, 3, \dots, H, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (22)$$

$$IHDV_n^{(h)} \leq IHDV_{max}, \forall h = 2, 3, \dots, H, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (23)$$

$$|I_n^{AF}| \leq I_{max}^{AF}, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

$$|I_n^{AF}| = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left| I_n^{AF(h)} \right|^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^H b_n \left| \bar{I}_n^{AF(h)} \right|^2}, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

$$\sum_{n=1}^N b_n \leq W \quad (26)$$

$$-\pi \leq \varphi_n^{AF(h)} \leq \pi, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (27)$$



$$\left| \bar{I}_n^{AF(h)} \right| \in \mathbb{R}, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

$$\varphi_n^{AF(h)} \in \mathbb{R}, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

$$b_n \in \{0, 1\}, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (30)$$

Onde:

$N$  é o número total de barras do sistema;

$W$  é o número total de APFs a serem instalados;

$THDV_n$  é a distorção harmônica total de tensão na barra  $n$  (%);

$IHDV_n^{(h)}$  é a distorção harmônica individual de tensão do harmônico  $h$  na barra  $n$  (%);

$THDV_{max}$  é o valor máximo de  $THDV$  previsto em norma (%);

$IHDV_{max}$  é o valor máximo de  $IHDV$  previsto em norma (%);

$\left| \bar{V}_n^{(h)} \right|$  é o módulo da tensão do harmônico  $h$  na barra  $n$ ;

$\left| \bar{V}_n^{(1)} \right|$  é o módulo da tensão de frequência fundamental na barra  $n$ ;

$\left| \bar{I}_n^{AF(h)} \right|$  é a corrente eficaz de harmônica  $h$  do APF alocado na barra  $n$ ;

$I_{max}^{AF}$  é o valor máximo de corrente eficaz.

A função objetivo  $f_1$  foi escolhida pois minimiza diretamente o indicador de QEE (Qualidade da Energia Elétrica), e a  $f_2$  foi escolhida pois minimiza indiretamente o custo de instalação dos FAs, pois o custo do filtro é uma função de sua corrente eficaz.

As restrições do modelo de otimização, dadas pelas Equações (22) a (24), englobam condições que restringem o espaço de busca do algoritmo e valores limites estabelecidos em normas. A Equação (26) dá que o somatório de  $b_n$  deve ser igual ou menor que o número total

$W$  de FAs a serem instalados, e a Equação (27) limita o valor do ângulo de fase  $\varphi_n^{AF(h)}$  entre  $-\pi$  e  $\pi$ .

Dessa forma, o problema de dimensionamento e alocação de FAs dado pelas equações (16) a (30) é um problema de programação não-linear inteira mista, o que torna sua otimização um problema complexo de resolver por intermédio de métodos exatos, tais como os métodos enumerativos do tipo *branch-and-bound*.

## 4.2 ALGORITMO ABC

Os princípios básicos da inteligência coletiva das abelhas foram primeiramente empregados em (LUCIC & TEODOROVIC, 2001), no qual foi proposto um algoritmo chamado Bee System (BS) para solução de problemas de otimização combinatorial.

O algoritmo ABC, proposto em (KARABOGA, 2007), é uma técnica de otimização baseada em comportamento inteligente de enxame de abelhas melíferas utilizada para otimização de funções de multivariáveis.

A colônia de abelhas artificiais é composta por três grupos de abelhas: operárias (campeiras), seguidoras e escudeiras. As abelhas operárias são enviadas em múltiplas direções simultaneamente para explorar uma grande área de busca, porém, concentrando a busca nas fontes de néctar mais proveitosas. Dentro da colméia, na pista de dança, as abelhas campeiras bailam de maneiras distintas conforme a distância da florada, de modo a tentar convencer suas companheiras a segui-las. Cada abelha seguidora decide atingir a fonte de néctar ou pólen seguindo uma abelha dançarina que já descobriu uma florada.

A primeira etapa do algoritmo ABC é gerar aleatoriamente uma população de  $SN$  possíveis soluções (fontes de néctar). A posição de uma fonte de alimento representa uma

possível solução  $\mathbf{X}_i (i = 1, 2, \dots, SN)$  do problema de otimização e a quantidade de néctar corresponde à qualidade da solução associada, ou seja, equivalente ao valor da função objetivo. O número de fontes de néctar  $SN$  é igual ao número de abelhas campeiras  $BN$ .

A abelha campeira cuja fonte de néctar secou, torna-se abelha escudeira, que tem função de buscar aleatoriamente uma nova fonte de alimento. O algoritmo ABC é interrompido algum critério de parada é atendido, por ex. máximo número de iterações.

### 4.3 REPRESENTAÇÃO E CODIFICAÇÃO

As variáveis de entrada para o algoritmo de otimização apresentado neste trabalho são:

- i. a barra onde alocar o FA: um valor inteiro entre 1 e N;
- ii. as correntes harmônicas de compensação injetadas pelo FA: dois números reais representando o valor eficaz  $\left| \bar{I}_n^{AF(h)} \right|$  e o ângulo de fase  $\varphi_n^{AF(h)}$  para cada harmônica considerada.

Uma possível solução  $\mathbf{X}_i$  consiste de  $W$  filtros, sendo representados pela matriz da Equação (31) (uma linha para cada filtro alocado).

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} T_1 & \bar{I}_{T_1}^{AF(2)} & \bar{I}_{T_1}^{AF(3)} & \dots & \bar{I}_{T_1}^{AF(H)} \\ T_2 & \bar{I}_{T_2}^{AF(2)} & \bar{I}_{T_2}^{AF(3)} & \dots & \bar{I}_{T_2}^{AF(H)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_W & \bar{I}_{T_W}^{AF(2)} & \bar{I}_{T_W}^{AF(3)} & \dots & \bar{I}_{T_W}^{AF(H)} \end{bmatrix} \quad (31)$$

onde  $T_j$  é a barra a ser alocado o FA  $j$ , e  $\bar{I}_{T_j}^{AF(k)}$  é a corrente de compensação da harmônica  $k$  injetada pelo FA  $j$ .

#### 4.4 FUNÇÃO DE ADAPTAÇÃO E BUSCA NA VIZINHANÇA

A função de adaptação  $fit(\mathbf{X}_i)$ , conforme Equação (32), tem por objetivo avaliar o desempenho relativo individual de cada indivíduo da população, de forma a permitir a determinação do grau de aptidão dos indivíduos e o cálculo de probabilidade de cada abelha campeira ser escolhida por uma abelha seguidora.

$$fit(\mathbf{X}_i) = \frac{1}{f(\mathbf{X}_i) - f(\mathbf{X}_{incumbente}) + c} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, AC\} \quad (32)$$

Onde:

$c$  é a constante de normalização;

$AC$  é a população de abelhas campeiras;

$\mathbf{X}_{incumbente}$  é a melhor solução encontrada até a  $k$ -ésima iteração do algoritmo.

Quanto maior o valor da função  $fit(\mathbf{X}_i)$  de uma abelha campeira, maior a chance dessa abelha ser seguida por uma abelha seguidora. Assim, a probabilidade de cada abelha campeira da colmeia ser selecionada é calculada conforme Equação (33).

$$P(\mathbf{X}_i) = \frac{fit(\mathbf{X}_i)}{\sum_{k=1}^{AC} fit(\mathbf{X}_k)} \quad (33)$$

Após calculadas as probabilidades de seleção de cada abelha  $\mathbf{X}_i$  da população de abelhas campeiras, a seleção das  $AS$  abelhas seguidoras é feita a partir do método da roleta virtual.

Feita a escolha de uma abelha campeira por uma abelha seguidora, esta faz uma busca local na vizinhança da fonte de néctar, de acordo com a Equação (34).

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (34)$$

onde  $x_{ij}$  é uma fonte de néctar escolhida probabilisticamente por uma abelha seguidora,  $v_{ij}$  é a nova fonte de néctar,  $i \in \{1, 2, \dots, SN\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, BN\}$  e  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$  são índices escolhidos aleatoriamente, de modo que  $k \neq j$ ,  $\phi_{ij}$  é um número aleatório entre  $[-1, 1]$  e  $D$  é o número de parâmetros de otimização.

#### 4.5 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA

A Figura 16 apresenta o fluxograma do modelo de otimização proposto neste trabalho, o qual é implementado no *software* Matlab. Inicialmente, o algoritmo calcula as matrizes admitâncias de barra em cada ordem harmônica envolvida, inicializa aleatoriamente a população de abelhas, faz análise harmônica para cada possível solução e calcula a função de adaptação de cada fonte de néctar. Após, é iniciada a fase da abelha campeira, na qual é avaliada a vizinhança de cada fonte de néctar. Nesta fase, o algoritmo troca a solução  $x_i$  pela sua vizinha  $vx_i$  se a última for melhor.

Na sequência, vem a fase da abelha seguidora, na qual são avaliadas as vizinhanças das melhores fontes de néctar escolhidas probabilisticamente pelo método da roleta. Nesta fase, o algoritmo intensifica a busca no entorno das melhores soluções da população. Depois, o algoritmo ordena em ordem decrescente as melhores fontes de néctar, descartando, portanto, as piores. Na última fase, que é a fase da abelha escudeira, o algoritmo gera aleatoriamente uma fração da população de novos indivíduos que substituem as abelhas menos produtivas.

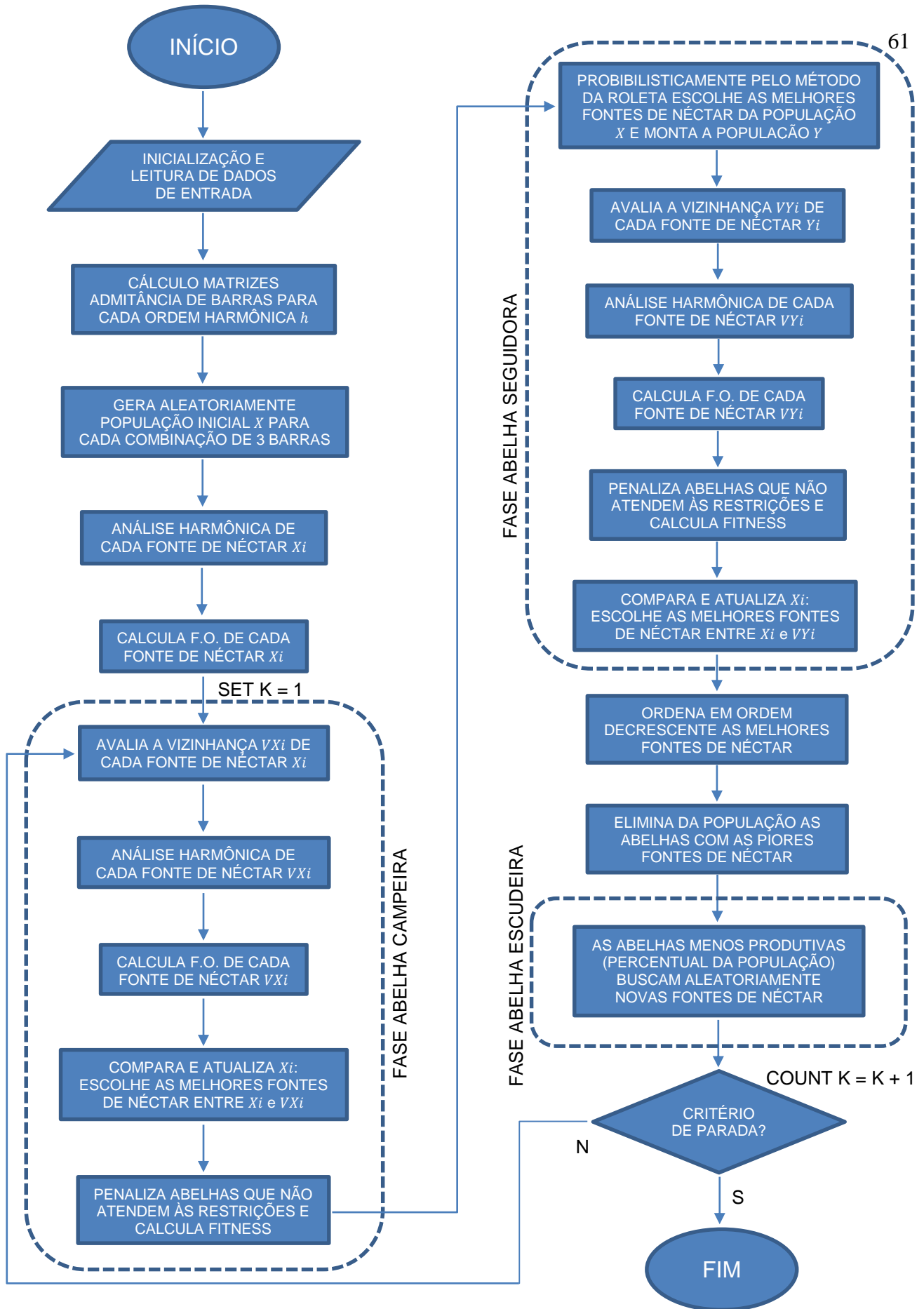


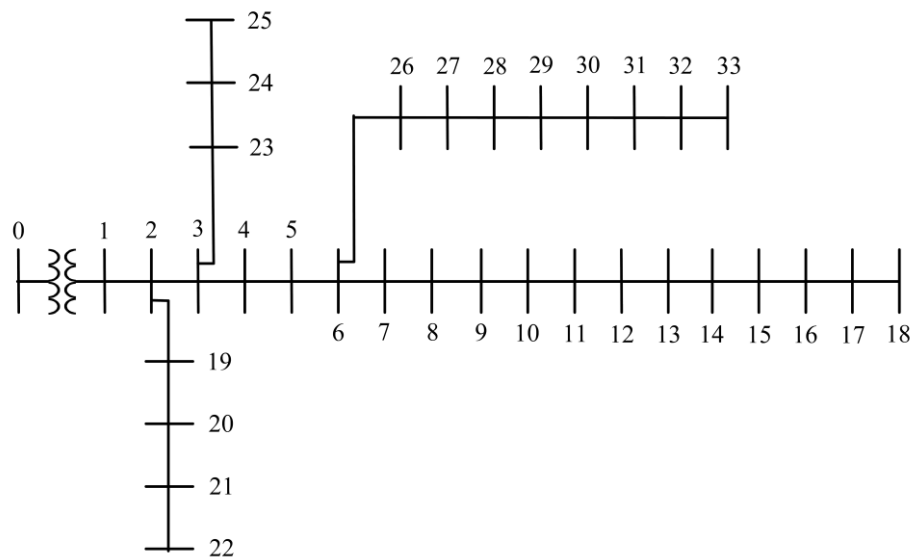
Figura 16: Fluxograma para resolução do problema proposto.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será descrito o sistema teste para o estudo de caso escolhido com os dados de entrada das linhas e cargas. Na sequência, serão apresentados os resultados de alocação ótima dos FAs para o processo de otimização das funções objetivo propostas no capítulo anterior. Por fim, é feita uma comparação da alocação de filtros ativos com a alocação de filtros passivos sintonizados simples.

### 5.1 ESTUDO DE CASO

Para a implementação e avaliação do desempenho do modelo de otimização proposto foi escolhido o sistema IEEE 33 nós, conforme ilustra a Figura 17. É um sistema de distribuição de tensão nominal 12,66 kV com linhas e cargas equilibradas, sendo o nó 0 a subestação.



**Figura 17: Sistema de distribuição IEEE 33 nós.**

Este sistema já foi utilizado para alocação ótima de geração distribuída (PRASANNA, 2014), resolução de fluxo de carga (BABU *et al.*, 2009), mitigação da perdas ativas e perfil de tensão (WAZIR & ARBAB, 2016), entre outros. Os dados das linhas e cargas seguem no apêndice.

O sistema IEEE 33 nós original foi completado com as susceptâncias *shunt* das linhas e um nó adicional para representar a conexão ao sistema de potência através de um transformador de 5MVA  $X=8\%$ . Para a inclusão de susceptância *shunt*, foram consideradas as características da configuração 300 de linha do conhecido sistema IEEE 34 barras, conforme dados da Tabela 7.

**Tabela 7: Dados de linha para configuração 300 do sistema IEEE 34 nós.**

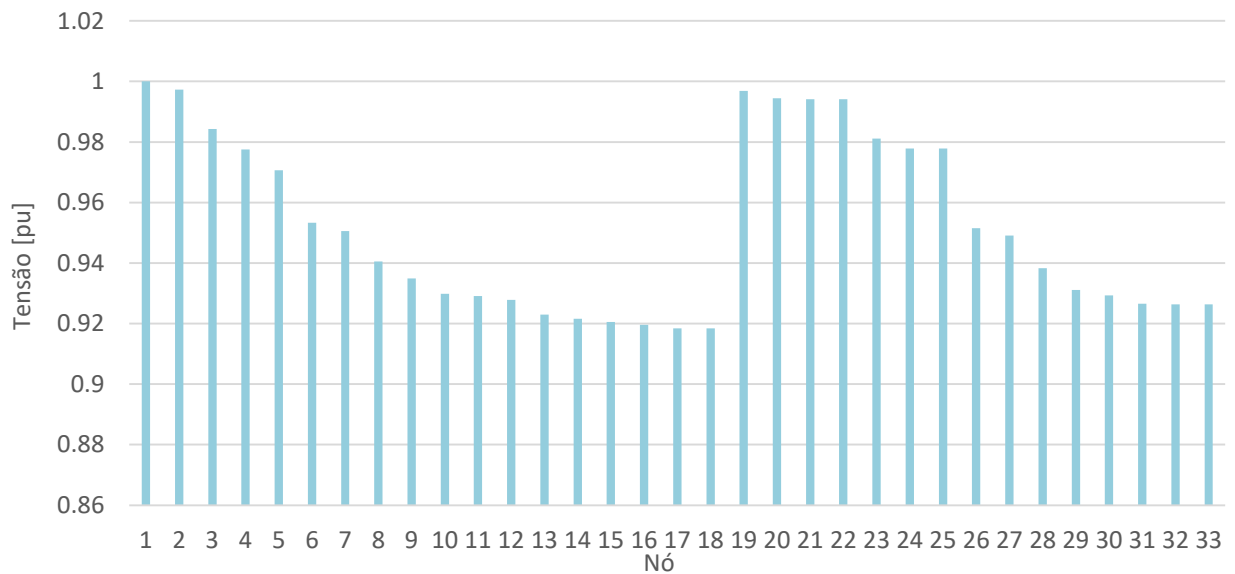
<b>Resistência</b>	0,8227	$\Omega/\text{km}$
<b>Reatância</b>	0,8433	$\Omega/\text{km}$
<b>Susceptância</b>	3,1684	$\mu\text{S}/\text{km}$

Os valores de resistência  $R$  e reatância indutiva  $X$  das cargas de frequência fundamental foram calculados a partir dos dados de potência ativa e potência reativa das cargas conectadas aos nós. Esses valores foram incluídos no algoritmo para o cálculo das matrizes admitância de barras em cada frequência harmônica envolvida.

O perfil das tensões de frequência fundamental ao longo do sistema é ilustrado na Figura 18.

O sistema IEEE 33 nós original possui apenas cargas lineares. Para que o sistema tenha suas formas de onda distorcidas, é considerado que percentuais dos tipos de cargas não-lineares discriminadas na Tabela 8 compõem as cargas conectadas em cada nó do sistema IEEE 33 nós, conforme apresenta a Tabela 9.





**Figura 18: Perfil das tensões de frequência fundamental nos nós.**

Os tipos de cargas não-lineares consideradas são modeladas como fontes de correntes, e injetam correntes de ordem harmônicas 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>. Essas ordens harmônicas foram escolhidas para poluir o sistema pois são as mais comumente encontradas nos sistemas de distribuição primários onde os transformadores que alimentam as cargas tem conexão delta/estrela aterrada. Considerando que harmônicos múltiplos de ordem 3 são componentes de sequência zero em sistemas equilibrados, esses não existem do lado do transformador com conexão delta, pois não há caminho de retorno para os mesmos.

**Tabela 8: Tipos de cargas não-lineares (TASK FORCE, 1996).**

Magnitude da corrente harmônica (% da Fundamental) e ângulo de fase com relação à tensão						
TIPO DE FONTE HARMÔNICA						
Ordem Harm.	ASD ( <i>Adjustable Speed Drive</i> )		Lâmp. Fluor.		Outro	
	IHDI (%)	Phase (°)	IHDI (%)	Phase (°)	IHDI (%)	Phase (°)
5	68,3	-14,23	10,7	10	3,2	139,4
7	47,8	-20,13	2,1	37	0	0
11	0,2	-27,91	0,9	36	0	0
13	6,1	158,2	0,6	47	0	0

As correntes harmônicas complexas injetadas pelas cargas não-lineares em cada nó do sistema são apresentadas na Tabela 10.

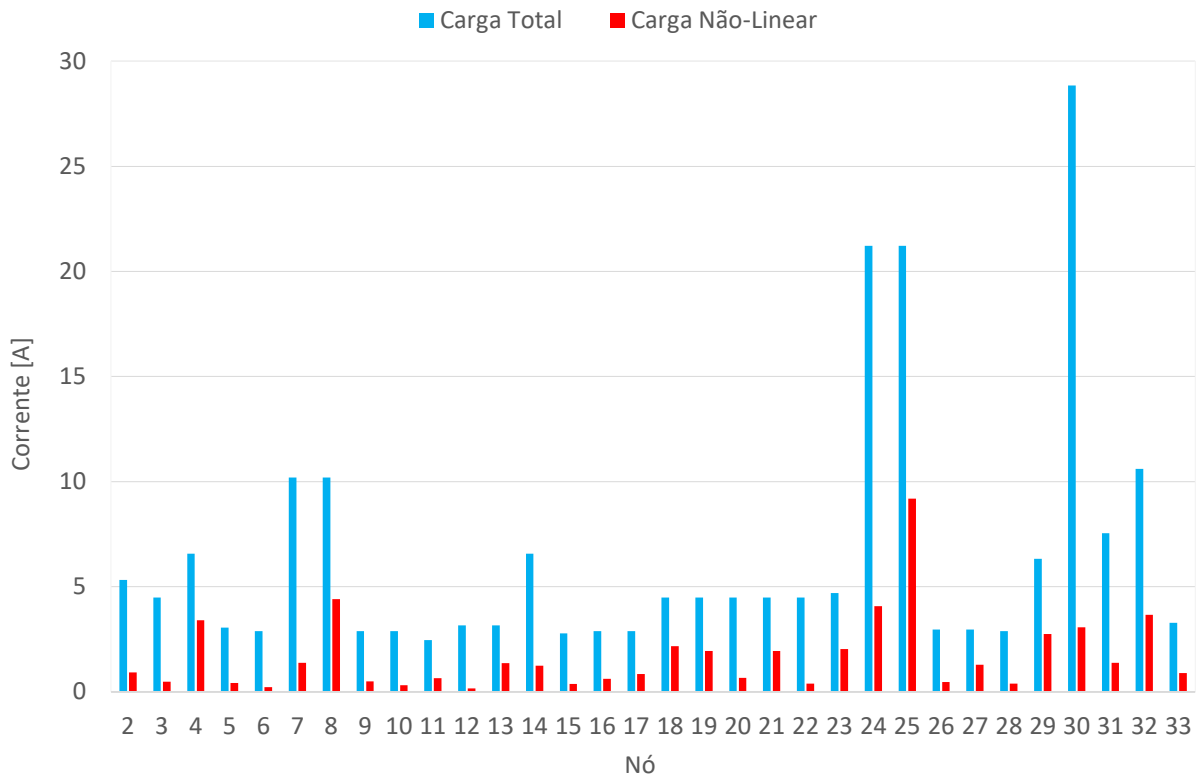
**Tabela 9: Composição das cargas não-lineares.**

<b>Nó</b>	<b>ASD (%)</b>	<b>FLUOR. (%)</b>	<b>OUTRO (%)</b>	<b>LINEAR (%)</b>
2	20	10	10	60
3	10	30	20	40
4	60	20	10	10
5	15	15	15	55
6	5	40	10	45
7	15	15	15	55
8	50	20	10	20
9	20	10	10	60
10	10	30	20	40
11	30	15	10	45
12	5	15	10	70
13	50	20	10	20
14	20	30	20	30
15	10	60	20	10
16	25	10	10	55
17	30	50	10	10
18	55	30	5	10
19	50	20	10	20
20	15	30	15	40
21	50	20	10	20
22	5	50	20	25
23	50	20	10	20
24	20	30	10	40
25	50	20	10	20
26	15	40	10	35
27	50	20	10	20
28	15	15	15	55
29	50	20	10	20
30	10	30	20	40
31	20	20	10	50
32	40	15	10	35
33	30	30	20	20

Tabela 10: Dados das cargas não-lineares conectadas ao sistema.

Nó	Corrente 5a Harmônica freq. = 300 Hz		Corrente 7a Harmônica freq. = 420 Hz		Corrente 11a Harmônica freq. = 660 Hz		Corrente 13a Harmônica freq. = 780 Hz	
	I <sub>ef</sub> [A]	fase [rad]	I <sub>ef</sub> [A]	fase [rad]	I <sub>ef</sub> [A]	fase [rad]	I <sub>ef</sub> [A]	fase [rad]
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,76375	-0,20787	0,51458	-0,33310	0,00603	0,30606	0,06380	2,71446
3	0,41872	-0,07552	0,23128	-0,24822	0,01255	0,56415	0,02561	2,46253
4	2,80561	-0,22287	1,90146	-0,33756	0,01687	0,19628	0,23798	2,73176
5	0,34607	-0,16842	0,22472	-0,31252	0,00461	0,45126	0,02712	2,66910
6	0,21006	0,01922	0,08457	-0,10449	0,01051	0,60752	0,00901	1,96700
7	1,15355	-0,16859	0,74908	-0,31269	0,01536	0,45109	0,09039	2,66893
8	3,65367	-0,22040	2,46069	-0,33724	0,02461	0,24645	0,30681	2,72339
9	0,41420	-0,21049	0,27907	-0,33572	0,00327	0,30344	0,03460	2,71184
10	0,26888	-0,07954	0,14852	-0,25223	0,00806	0,56014	0,01645	2,45851
11	0,53476	-0,21613	0,35796	-0,33782	0,00420	0,30135	0,04438	2,70975
12	0,14766	-0,08024	0,08156	-0,25293	0,00442	0,55944	0,00903	2,45782
13	1,13499	-0,22442	0,76440	-0,34125	0,00764	0,24243	0,09531	2,71938
14	1,05851	-0,15461	0,65219	-0,30388	0,01906	0,49811	0,07676	2,61088
15	0,34558	-0,01883	0,15438	-0,16700	0,01523	0,58862	0,01624	2,14373
16	0,51264	-0,22298	0,34799	-0,34405	0,00348	0,23964	0,04339	2,71659
17	0,72657	-0,16310	0,43079	-0,29993	0,01383	0,50800	0,05030	2,59237
18	1,81334	-0,22234	1,19641	-0,33985	0,01497	0,31906	0,14796	2,70177
19	1,60927	-0,22825	1,08382	-0,34509	0,01084	0,23859	0,13514	2,71554
20	0,57643	-0,12864	0,33823	-0,28084	0,01278	0,53364	0,03891	2,56634
21	1,60927	-0,22058	1,08382	-0,33741	0,01084	0,24627	0,13514	2,72322
22	0,36421	0,06158	0,13872	-0,06263	0,02041	0,60768	0,01535	1,80190
23	1,68228	-0,22075	1,13299	-0,33759	0,01133	0,24610	0,14127	2,72304
24	3,47192	-0,15784	2,10365	-0,29673	0,06149	0,50527	0,24758	2,61803
25	7,60103	-0,21953	5,11919	-0,33637	0,05119	0,24732	0,63828	2,72427
26	0,41472	-0,11188	0,22702	-0,25873	0,01109	0,55660	0,02543	2,49759
27	1,06208	-0,21656	0,71530	-0,33340	0,00715	0,25029	0,08919	2,72723
28	0,32627	-0,16685	0,21187	-0,31095	0,00434	0,45284	0,02557	2,67067
29	2,26998	-0,21394	1,52880	-0,33078	0,01529	0,25290	0,19062	2,72985
30	2,68884	-0,06819	1,48516	-0,24089	0,08058	0,57148	0,16445	2,46986
31	1,15941	-0,17437	0,73936	-0,30781	0,01516	0,45598	0,08922	2,67381
32	3,02394	-0,21346	2,04644	-0,33081	0,01959	0,23564	0,25552	2,73308
33	0,75308	-0,17173	0,48314	-0,30868	0,00991	0,45510	0,05830	2,67294

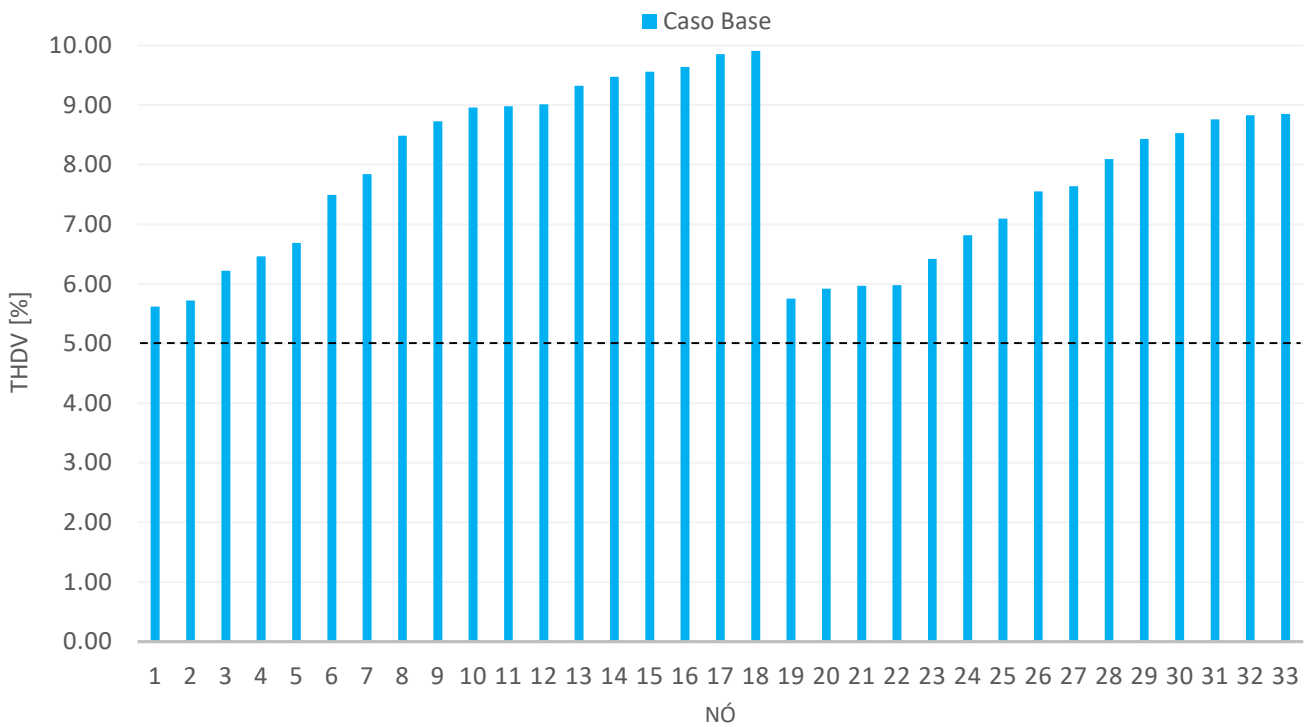
As correntes eficazes totais das cargas e das cargas não-lineares do caso base são apresentadas na Figura 19. A corrente eficaz total das cargas não-lineares sendo injetada nos nós é de 53.64 A.



**Figura 19: Correntes eficazes totais das cargas e das cargas não-lineares.**

Os valores de THDV (taxa de distorção harmônica de tensão) nos nós do sistema, para o caso base, são apresentadas na Figura 20. Como pode-se visualizar, todos os nós tem valores de THDV de tensão que transgridem o máximo valor previsto na norma IEEE 519-2014. O limite de THDV está destacado pela linha pontilhada na Figura 20.

De fato, um sistema de distribuição real é desbalanceado em magnitude e ângulo de fase. No entanto, neste trabalho é assumido que o sistema trifásico é simétrico e com cargas balanceadas, o que é uma simplificação do problema. Dessa forma, a análise de fluxo harmônico é realizada para umas das fases.



**Figura 20: Valores de THDV para o caso base.**

As restrições (22) e (23) foram consideradas através da aplicação de penalidades às funções *fitness*. Quando a solução é infactível, um valor de penalidade fixo e um variável são somados à função *fitness*, dependendo da magnitude da violação da restrição.

## 5.2 RESULTADOS PARA $f_1$

Nesta seção serão apresentados os resultados para a alocação ótima de múltiplos filtros de potência ativos que minimizam a função objetivo  $f_1$ . O modelo de otimização foi limitado para buscar a solução ótima da inserção de 1 a 3 FAs ( $W = 3$ ). Os valores máximos de  $THDV_{max}$  e  $IHDV_{max}$  são 5% and 3%, respectivamente, de acordo com a norma IEEE 519-

2014. Com respeito à alocação, todos os nós são candidatos para instalar FA, exceto os nós 0 e 1.

A Tabela 11 apresenta os resultados das localizações e dos valores de injeção de corrente ótimos para alocação de 1 a 3 FAs.

**Tabela 11: Localizações dos filtros e correntes que minimizam  $f_1$ .**

FAs	0	1	2		3			
Nós	-	7	18	27	13	23	30	
Corrente Harm. [A]	5a	-	42,34 $\angle 169,1^\circ$	4,61 $\angle 168,7^\circ$	37,67 $\angle 170,1^\circ$	9,31 $\angle 169,1^\circ$	24,46 $\angle 169,4^\circ$	11,76 $\angle 168,7^\circ$
	7a	-	27,31 $\angle 161,6^\circ$	2,82 $\angle 161,8^\circ$	24,57 $\angle 162,3^\circ$	6,11 $\angle 161,8^\circ$	15,39 $\angle 159,9^\circ$	7,73 $\angle 164,2^\circ$
	11a	-	0,5033 $\angle -155,3^\circ$	0,03 $\angle -130,7^\circ$	0,49 $\angle -158,6^\circ$	0,18 $\angle -154,4^\circ$	0,81 $\angle -83,2^\circ$	0,58 $\angle 126,6^\circ$
	13a	-	3,32 $\angle -26,3^\circ$	0,35 $\angle -36,0^\circ$	3,00 $\angle -24,2^\circ$	0,72 $\angle -32,2^\circ$	1,72 $\angle -23,3^\circ$	1,04 $\angle -25,4^\circ$
Corrente Eficaz [A]	-	50,5	5,42	45,08	11,16	28,96	14,13	
$f_1$ (%)	<b>2088,4</b>	<b>14,02</b>	<b>8,25</b>		<b>1,06</b>			
$f_2$ (A)	-	50,5	50,5		54,26			

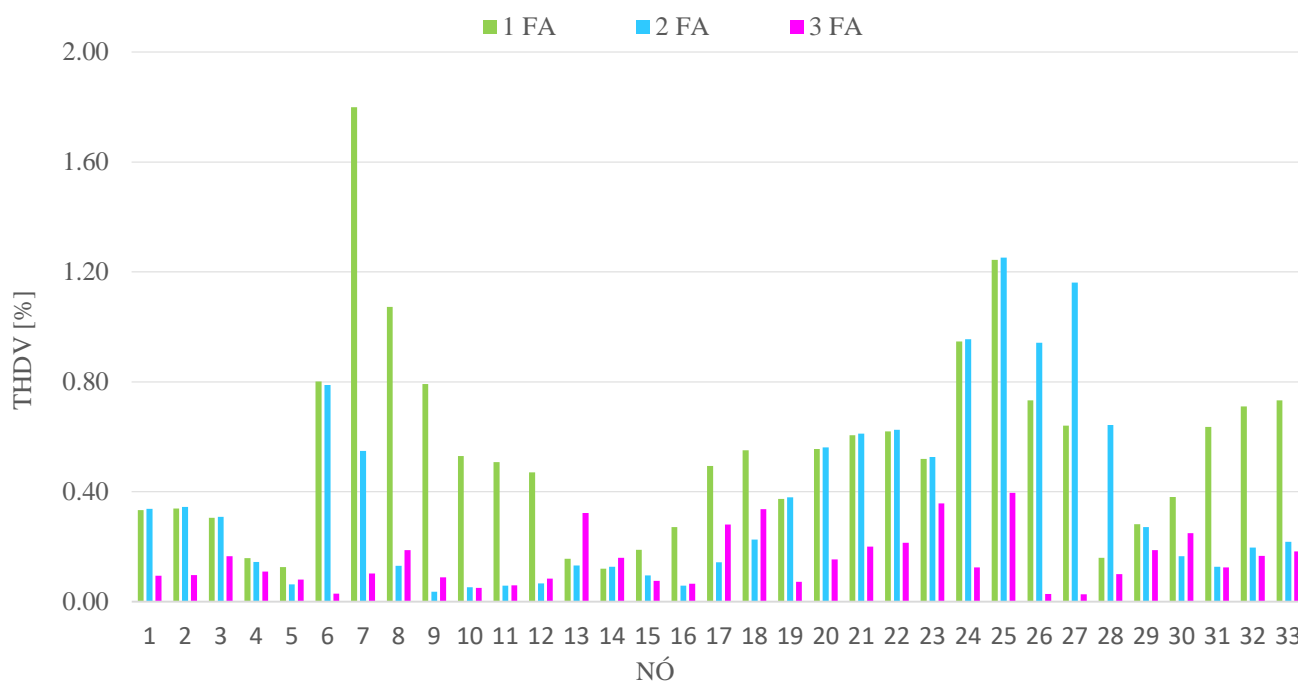
A Figura 21 ilustra o perfil de valores de THDV e a Tabela 12 os valores de IHDV ao longo do sistema para as soluções ótimas de alocação de 1 a 3 FAs que minimizam  $f_1$ .

Através da Tabela 11 fica evidente que os totais das correntes de compensação dos FAs ficam próximos ao valor total de corrente injetada pelas cargas não-lineares, resultado esperado quando se quer reduzir as distorções harmônicas. Pode-se perceber pelos resultados

da Figura 21 e Tabela 12 que a alocação de 1 a 3 FAs consegue atender às restrições (22) e (23).

Pode-se notar que a função objetivo  $f_1$  tem um valor menor para alocação de 3 FAs, já que as correntes se tornam mais distribuídas pelo sistema. Este é um resultado esperado já que quanto maior o número de filtros instalados, maior a redução das distorções harmônicas, sendo o melhor de todos os cenários tendo um FA instalado em cada nó do sistema. No entanto, isso seria uma solução trivial e mais onerosa.

Vemos na Figura 21 que o desvio padrão para a alocação de um FA (nó #7) é maior que para 2 e 3 FAs, isto é porque o único filtro deve injetar uma corrente de compensação alta em um nó e isso causa um aumento na distorção harmônica dos barramentos vizinhos.



**Figura 21: Valores de THDV nos nós para a soluções que minimizam  $f_1$ .**

A Figura 22 e a Figura 23 apresentam as ondas de tensão no nó 9 e corrente no ramo 8-9, respectivamente, antes e depois da instalação dos filtros para a melhor solução de alocação de 3 FAs que minimizam a função objetivo  $f_1$ . Tais figuras demonstram o efeito da redução da distorção da forma de onda após a compensação pelos FAs.

Tabela 12: Valores de IHDV para as soluções que minimizam  $f_1$ .

Nº	IHDV [%]															
	5a Harm.				7a Harm.				11a Harm.				13a Harm.			
	Qtd. FAs Instalados				Qtd. FAs Instalados				Qtd. FAs Instalados				Qtd. FAs Instalados			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
1	4,11	0,24	0,25	0,07	3,72	0,22	0,22	0,04	0,11	0,00	0,00	0,05	0,86	0,05	0,05	0,01
2	4,19	0,24	0,26	0,07	3,79	0,23	0,22	0,04	0,11	0,00	0,00	0,05	0,87	0,05	0,05	0,01
3	4,55	0,22	0,23	0,13	4,12	0,21	0,20	0,09	0,12	0,00	0,00	0,05	0,95	0,05	0,04	0,01
4	4,73	0,11	0,11	0,09	4,28	0,11	0,09	0,05	0,12	0,00	0,01	0,04	0,99	0,02	0,02	0,01
5	4,90	0,11	0,04	0,06	4,42	0,07	0,04	0,03	0,13	0,00	0,01	0,03	1,02	0,01	0,02	0,01
6	5,49	0,60	0,57	0,02	4,95	0,52	0,53	0,02	0,14	0,02	0,03	0,00	1,14	0,11	0,13	0,02
7	5,75	1,33	0,40	0,07	5,18	1,18	0,36	0,07	0,15	0,04	0,02	0,00	1,20	0,27	0,09	0,03
8	6,22	0,79	0,10	0,14	5,61	0,70	0,08	0,12	0,16	0,02	0,01	0,01	1,30	0,16	0,03	0,04
9	6,40	0,58	0,03	0,06	5,76	0,52	0,02	0,05	0,17	0,02	0,01	0,02	1,33	0,12	0,01	0,03
10	6,57	0,39	0,04	0,02	5,91	0,35	0,04	0,03	0,17	0,01	0,00	0,02	1,37	0,08	0,00	0,02
11	6,58	0,37	0,04	0,03	5,93	0,34	0,04	0,04	0,17	0,01	0,00	0,02	1,37	0,08	0,00	0,02
12	6,61	0,34	0,05	0,05	5,95	0,31	0,05	0,06	0,17	0,01	0,00	0,02	1,38	0,07	0,00	0,02
13	6,84	0,12	0,09	0,22	6,15	0,10	0,09	0,23	0,18	0,00	0,00	0,03	1,42	0,02	0,01	0,04
14	6,95	0,10	0,09	0,10	6,25	0,06	0,09	0,12	0,18	0,00	0,00	0,03	1,45	0,01	0,02	0,03
15	7,02	0,15	0,06	0,04	6,30	0,11	0,07	0,05	0,19	0,00	0,01	0,03	1,46	0,02	0,02	0,03
16	7,08	0,21	0,03	0,05	6,36	0,17	0,05	0,01	0,19	0,01	0,01	0,03	1,47	0,03	0,02	0,04
17	7,24	0,38	0,12	0,22	6,50	0,31	0,07	0,16	0,19	0,01	0,01	0,02	1,51	0,07	0,04	0,07
18	7,27	0,42	0,18	0,26	6,53	0,35	0,12	0,20	0,19	0,01	0,01	0,02	1,51	0,08	0,05	0,07
19	4,21	0,27	0,29	0,05	3,81	0,25	0,25	0,02	0,11	0,00	0,00	0,05	0,88	0,06	0,05	0,02
20	4,34	0,41	0,42	0,10	3,92	0,37	0,36	0,10	0,11	0,01	0,00	0,05	0,90	0,08	0,08	0,04
21	4,37	0,44	0,46	0,13	3,95	0,40	0,39	0,13	0,11	0,01	0,01	0,05	0,91	0,09	0,08	0,05
22	4,38	0,46	0,47	0,14	3,95	0,41	0,40	0,14	0,12	0,01	0,01	0,05	0,91	0,09	0,08	0,05
23	4,70	0,38	0,39	0,28	4,25	0,35	0,34	0,21	0,12	0,01	0,00	0,07	0,98	0,08	0,07	0,02
24	4,99	0,69	0,71	0,04	4,51	0,63	0,63	0,08	0,13	0,01	0,01	0,07	1,04	0,14	0,14	0,04
25	5,19	0,90	0,92	0,26	4,70	0,83	0,83	0,28	0,13	0,02	0,01	0,07	1,08	0,19	0,18	0,09
26	5,54	0,55	0,68	0,01	4,99	0,48	0,63	0,02	0,15	0,01	0,03	0,01	1,15	0,11	0,15	0,01
27	5,60	0,48	0,85	0,01	5,04	0,42	0,77	0,02	0,15	0,01	0,03	0,01	1,16	0,09	0,18	0,01
28	5,94	0,13	0,46	0,05	5,34	0,10	0,43	0,06	0,16	0,00	0,02	0,06	1,23	0,02	0,11	0,02
29	6,19	0,21	0,19	0,10	5,56	0,18	0,19	0,12	0,17	0,01	0,01	0,10	1,28	0,04	0,05	0,04
30	6,26	0,29	0,11	0,15	5,63	0,25	0,12	0,16	0,17	0,01	0,01	0,11	1,29	0,05	0,04	0,05
31	6,43	0,47	0,11	0,05	5,78	0,42	0,07	0,04	0,17	0,01	0,01	0,11	1,33	0,09	0,02	0,01
32	6,48	0,52	0,16	0,10	5,83	0,47	0,11	0,08	0,17	0,02	0,01	0,11	1,34	0,10	0,02	0,01
33	6,50	0,54	0,17	0,12	5,84	0,48	0,13	0,09	0,17	0,02	0,01	0,11	1,34	0,11	0,03	0,01



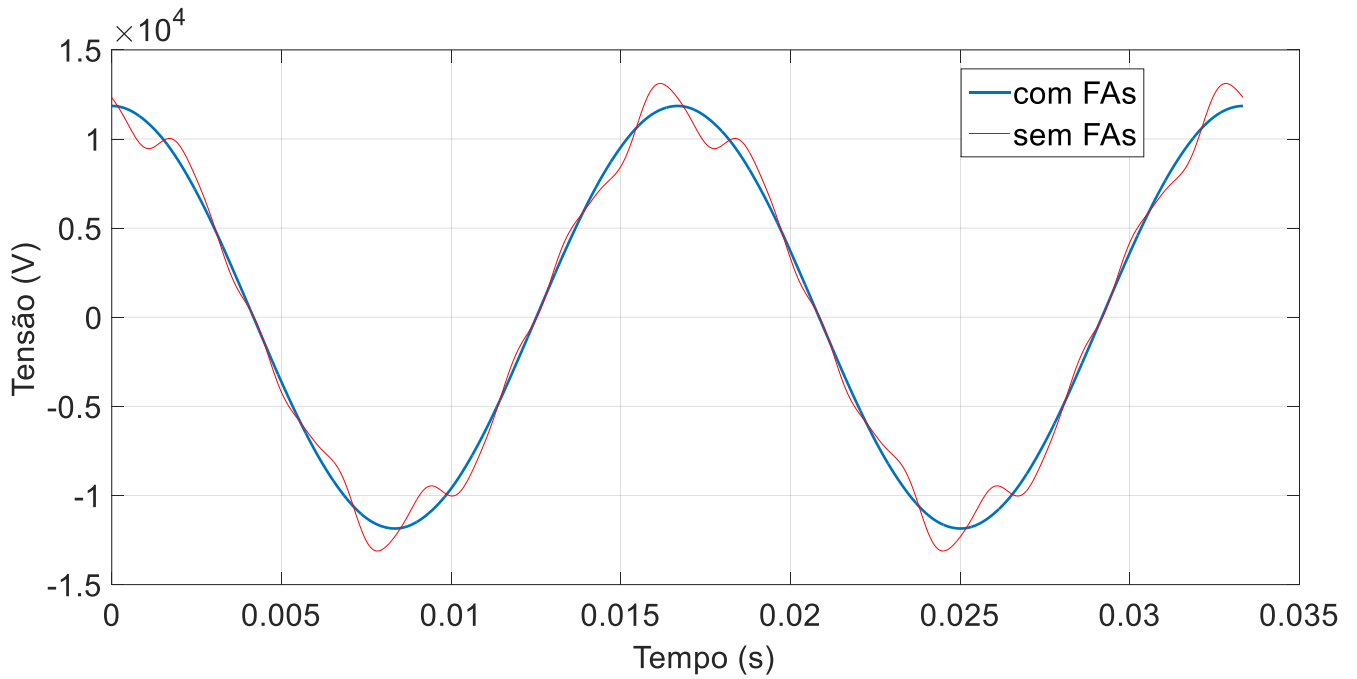


Figura 22: Onda de tensão no nó 9 para melhor solução de alocação de 3 FAs que minimiza  $f_1$ .

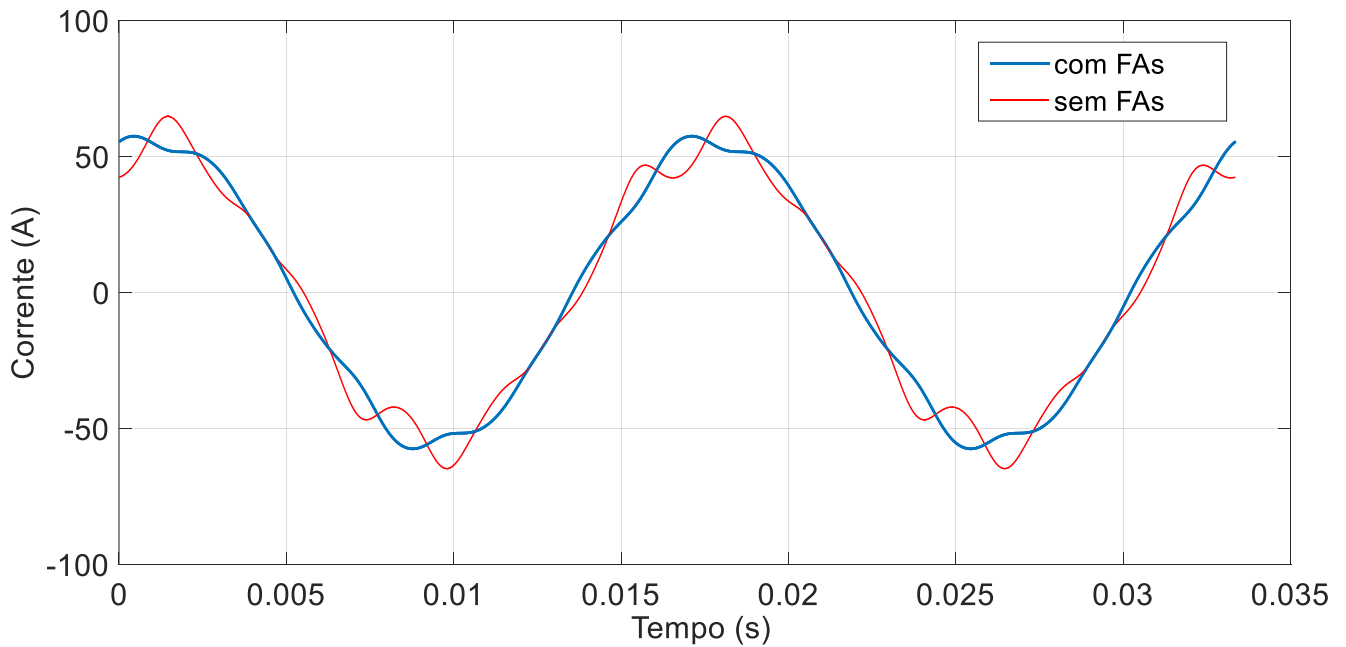


Figura 23: Onda de corrente no ramo 8-9 para melhor solução de alocação de 3 FAs que minimiza  $f_1$ .

### 5.3 RESULTADOS PARA $f_2$

Da mesma forma como na subseção anterior, nesta seção serão apresentados os resultados para a alocação ótima de múltiplos FAs que minimizam a função objetivo  $f_2$ . O modelo de otimização foi limitado para buscar a solução ótima da inserção de 1 a 3 FAs ( $W = 3$ ). A Tabela 13 apresenta os resultados das localizações e dos valores de injeção de correntes ótimos para alocação de 1 a 3 FAs.

**Tabela 13: Localizações e correntes que minimizam  $f_2$ .**

FAs	0	1	2		3			
Nós	-	8	17	30	16	25	32	
Corrente Harm. [A]	5a	-	25,06 $\angle 169,7^\circ$	6,77 $\angle 168,8^\circ$	15,17 $\angle 167,8^\circ$	8,70 $\angle 170,4^\circ$	3,73 $\angle 166,4^\circ$	7,53 $\angle 171,3^\circ$
	7a	-	14,60 $\angle 162,1^\circ$	4,21 $\angle 161,7^\circ$	7,97 $\angle 160,5^\circ$	5,61 $\angle 161,0^\circ$	1,04 $\angle 162,5^\circ$	4,83 $\angle 160,7^\circ$
	11a	-	0,0035 $\angle -93,2^\circ$	0,0008 $\angle 172,8^\circ$	0,0018 $\angle 45,0^\circ$	0,0019 $\angle 6,0^\circ$	0,0012 $\angle 165,9^\circ$	0,0011 $\angle 5,1^\circ$
	13a	-	0,0048 $\angle -24,4^\circ$	0,0018 $\angle 137,2^\circ$	0,0002 $\angle 63,4^\circ$	0,0013 $\angle 161,5^\circ$	0,0010 $\angle -36,8^\circ$	0,0007 $\angle -153,4^\circ$
Corrente Eficaz [A]	-	29,01	7,97	17,14	10,3	3,8	8,9	
$f_1$ (%)	2088,4	345,5	452,47		521,32			
$f_2$ (A)	-	<b>29,01</b>	<b>25,12</b>		<b>23,18</b>			

A Figura 24 ilustra o perfil de valores de THDV e a Tabela 14 os valores de IHDV ao longo do sistema para as soluções ótimas de alocação de 1 a 3 FAs que minimizam  $f_2$ .

Pela Tabela 13 é possível notar que quanto maior o número de FAs instalados menor é a corrente total necessária para atender as restrições (22) e (23).

Conforme texto destacado na Tabela 14, alguns nós tiveram seus valores de IHDV no limite máximo previsto na norma IEEE 519-2014, que é de 3%. Para atender à restrição (23), o FA deve injetar mais corrente, o que é um comportamento conflitante quando se quer minimizar a função objetivo  $f_2$ . Por causa disso, a solução de alocação de um FA teve o maior valor para  $f_2$ , de acordo com a Tabela 13.

Vemos pela Figura 24 que a melhor solução de alocação de um FA foi a mais prejudicada pela restrição (23), pois sua maior corrente de compensação resultou em valores de THDV menores nos nós, especialmente no nó #8, onde o FA está alocado. Por essa razão, a solução teve o menor valor para a função objetivo  $f_1$ .

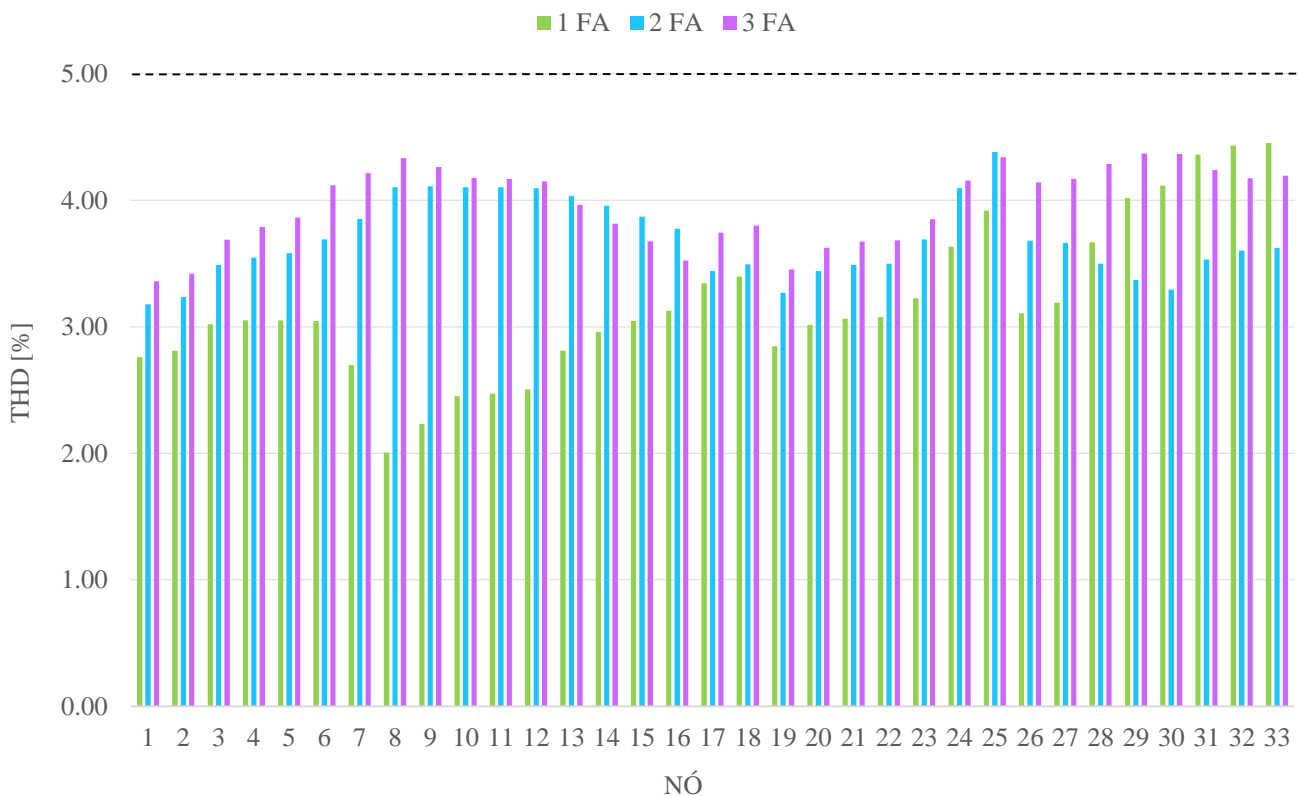


Figura 24: Valores de THDV nos nós para a soluções que minimizam  $f_2$ .

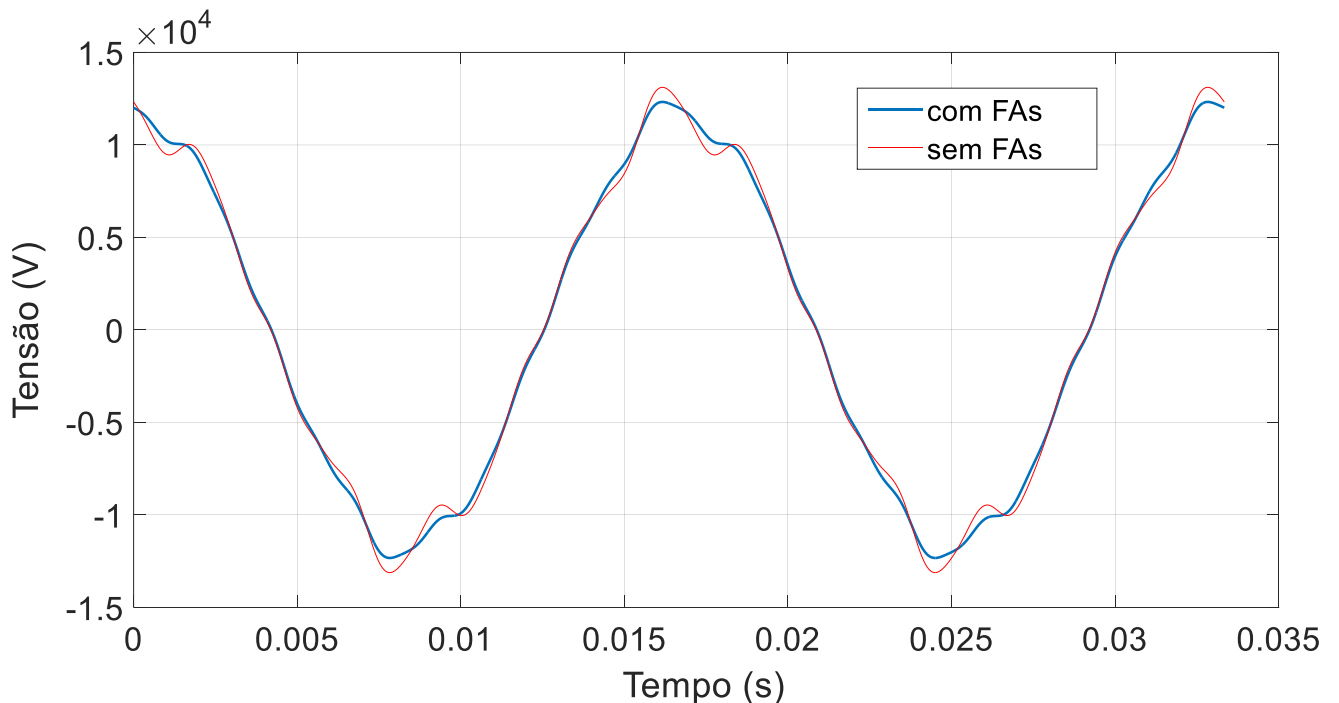
Observa-se um comportamento oposto na otimização das funções objetivos  $f_2$  e  $f_1$  nos dados da Tabela 11 e Tabela 13, pois enquanto o valor de  $f_1$  diminui, o valor de  $f_2$  aumenta, e vice-versa. Esse efeito é esperado, já que para diminuir a distorção harmônica é necessário aumentar a injeção de corrente harmônica de compensação. Isto é o que explica os valores de THDV estarem mais próximo do limite que é de 5% para o caso de minimização da função objetivo  $f_2$ , conforme pode-se perceber pela Figura 24.

**Tabela 14: Valores de IHDV para as soluções que minimizam  $f_2$ .**

N <sup>o</sup>	IHDV [%]															
	5a Harm.				7a Harm.				11a Harm.				13a Harm.			
	Qtd. FAs Instalados				Qtd. FAs Instalados				Qtd. FAs Instalados				Qtd. FAs Instalados			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
1	4,11	1,84	2,14	2,31	3,72	1,87	2,19	2,28	0,11	0,11	0,11	0,11	0,86	0,86	0,86	0,86
2	4,19	1,87	2,18	2,36	3,79	1,90	2,23	2,32	0,11	0,11	0,11	0,11	0,87	0,87	0,88	0,87
3	4,55	2,01	2,34	2,54	4,12	2,04	2,40	2,50	0,12	0,12	0,12	0,12	0,95	0,95	0,95	0,95
4	4,73	2,01	2,37	2,61	4,28	2,06	2,44	2,56	0,12	0,12	0,12	0,12	0,99	0,99	0,99	0,99
5	4,90	2,00	2,38	2,66	4,42	2,06	2,47	2,61	0,13	0,13	0,13	0,13	1,02	1,02	1,02	1,02
6	5,49	1,93	2,40	2,83	4,95	2,06	2,56	2,76	0,14	0,14	0,14	0,14	1,14	1,14	1,14	1,14
7	5,75	1,60	2,51	2,89	5,18	1,81	2,66	2,81	0,15	0,15	0,15	0,15	1,20	1,19	1,20	1,20
8	6,22	0,86	2,68	2,96	5,61	1,26	2,82	2,88	0,16	0,16	0,16	0,16	1,30	1,29	1,30	1,30
9	6,40	1,06	2,67	2,90	5,76	1,43	2,82	2,82	0,17	0,17	0,17	0,17	1,33	1,33	1,34	1,33
10	6,57	1,25	2,66	2,82	5,91	1,60	2,80	2,75	0,17	0,17	0,17	0,17	1,37	1,37	1,37	1,37
11	6,58	1,27	2,66	2,82	5,93	1,61	2,80	2,74	0,17	0,17	0,17	0,17	1,37	1,37	1,37	1,37
12	6,61	1,30	2,65	2,80	5,95	1,64	2,80	2,73	0,17	0,17	0,17	0,18	1,38	1,37	1,38	1,38
13	6,84	1,55	2,58	2,64	6,15	1,86	2,74	2,58	0,18	0,18	0,18	0,18	1,42	1,42	1,43	1,43
14	6,95	1,67	2,51	2,52	6,25	1,96	2,68	2,47	0,18	0,18	0,18	0,19	1,45	1,44	1,45	1,45
15	7,02	1,74	2,44	2,40	6,30	2,02	2,62	2,36	0,19	0,19	0,19	0,19	1,46	1,46	1,46	1,46
16	7,08	1,81	2,36	2,27	6,36	2,08	2,55	2,25	0,19	0,19	0,19	0,19	1,47	1,47	1,47	1,47
17	7,24	1,98	2,06	2,44	6,50	2,23	2,30	2,40	0,19	0,19	0,19	0,19	1,51	1,50	1,51	1,51
18	7,27	2,02	2,10	2,48	6,53	2,27	2,33	2,44	0,19	0,19	0,19	0,19	1,51	1,51	1,52	1,52
19	4,21	1,90	2,20	2,38	3,81	1,92	2,25	2,34	0,11	0,11	0,11	0,11	0,88	0,88	0,88	0,88
20	4,34	2,03	2,33	2,51	3,92	2,04	2,36	2,45	0,11	0,11	0,11	0,11	0,90	0,90	0,90	0,90
21	4,37	2,07	2,37	2,55	3,95	2,07	2,39	2,48	0,11	0,11	0,12	0,12	0,91	0,91	0,91	0,91
22	4,38	2,08	2,38	2,56	3,95	2,07	2,40	2,49	0,12	0,12	0,12	0,12	0,91	0,91	0,91	0,91
23	4,70	2,16	2,49	2,64	4,25	2,18	2,54	2,62	0,12	0,12	0,12	0,12	0,98	0,98	0,98	0,98
24	4,99	2,47	2,79	2,84	4,51	2,45	2,81	2,85	0,13	0,13	0,13	0,13	1,04	1,04	1,04	1,04

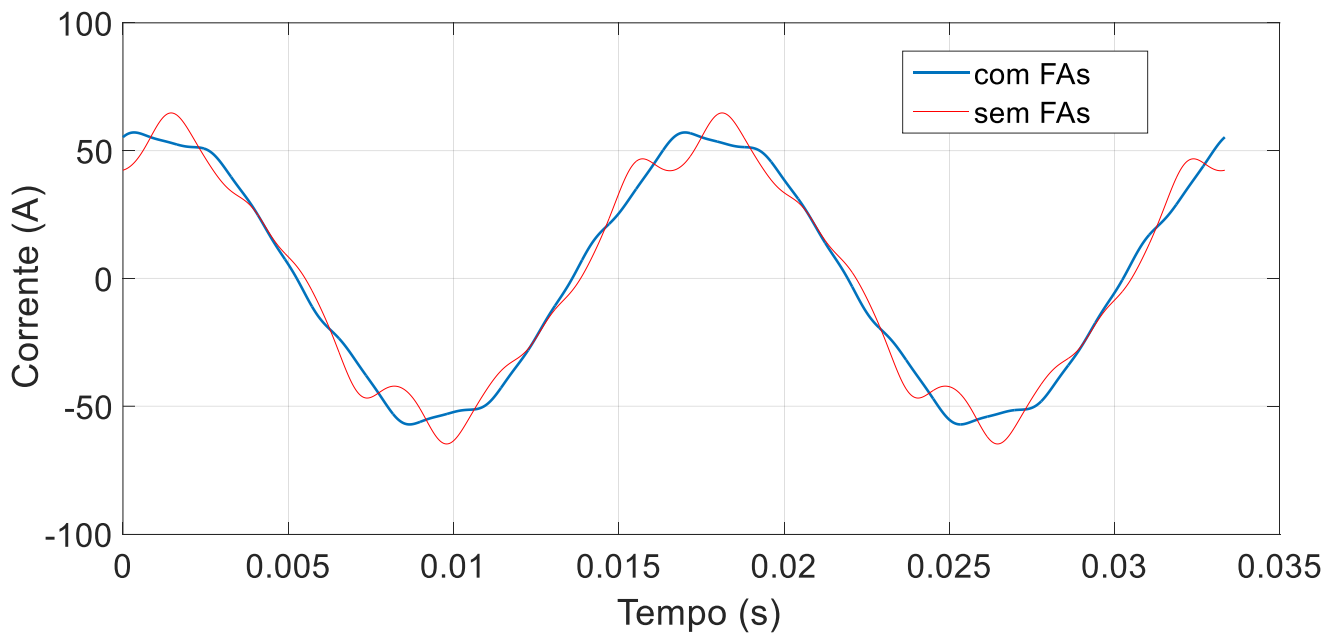
25	5,19	2,67	3,00	2,94	4,70	2,65	3,00	3,00	0,13	0,13	0,13	0,13	1,08	1,08	1,08	1,08
26	5,54	1,98	2,39	2,85	4,99	2,10	2,55	2,77	0,15	0,14	0,15	0,15	1,15	1,15	1,15	1,15
27	5,60	2,04	2,36	2,87	5,04	2,15	2,54	2,79	0,15	0,15	0,15	0,15	1,16	1,16	1,16	1,16
28	5,94	2,41	2,17	2,95	5,34	2,47	2,45	2,86	0,16	0,16	0,16	0,16	1,23	1,23	1,23	1,23
29	6,19	2,67	2,01	3,00	5,56	2,71	2,37	2,90	0,17	0,17	0,17	0,17	1,28	1,28	1,28	1,28
30	6,26	2,75	1,93	3,00	5,63	2,77	2,33	2,90	0,17	0,17	0,17	0,17	1,29	1,29	1,29	1,29
31	6,43	2,93	2,11	2,89	5,78	2,94	2,49	2,80	0,17	0,17	0,17	0,17	1,33	1,33	1,33	1,33
32	6,48	2,98	2,17	2,83	5,83	2,99	2,54	2,75	0,17	0,17	0,17	0,17	1,34	1,34	1,34	1,34
33	6,50	3,00	2,18	2,84	5,84	3,00	2,55	2,77	0,17	0,17	0,17	0,17	1,34	1,34	1,34	1,34

A Figura 25 e a Figura 26 apresentam as ondas de tensão no nó 9 e corrente no ramo 8-9, respectivamente, antes e depois da instalação dos filtros para a melhor solução de alocação de 3 FAs que minimizam a função objetivo  $f_2$ . Tais figuras demonstram o efeito da redução da distorção da forma de onda após a compensação pelos FAs.



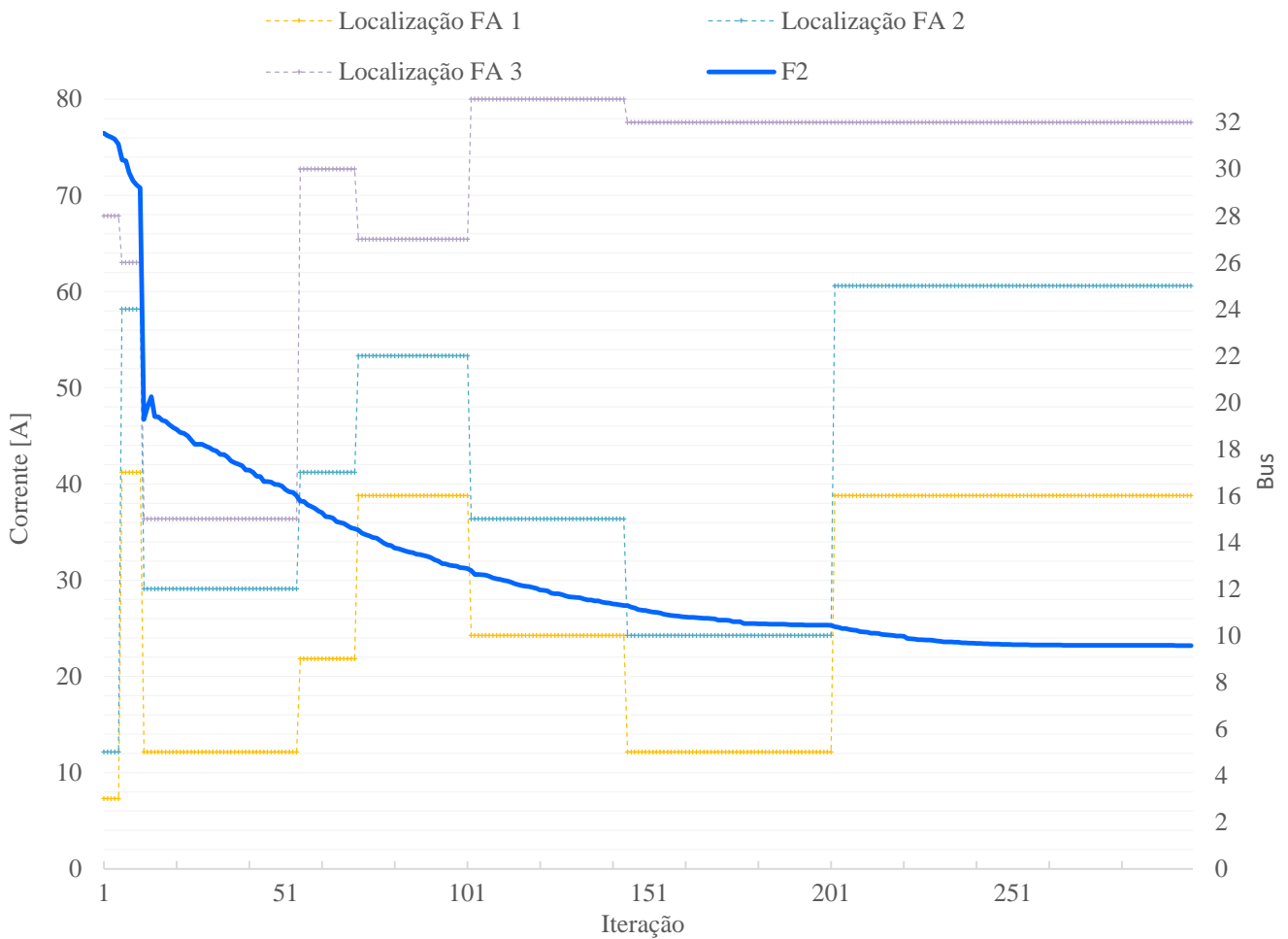
**Figura 25:** Onda de tensão no nó 9 para melhor solução de alocação de 3 FAs que minimiza  $f_2$ .

Fica evidente através da Figura 25 que a distorção da forma de onda é atenuada, resultado de um valor de THDV de aproximadamente 4%. Porém, visualiza-se ainda uma pequena deformação aparente, maior que quando minimizando  $f_1$ , resultado apresentado na Figura 22.



**Figura 26: Onda de corrente no ramo 8-9 para melhor solução de alocação de 3 FAs que minimiza  $f_2$ .**

A evolução da solução incumbente em cada iteração durante o processo de otimização do algoritmo para alocação ótima de 3 FAs que minimizam a função objetivo  $f_2$  é ilustrada na Figura 27.



**Figura 27: Valor da função objetivo  $f_2$  e localizações dos filtros da solução incumbente em sucessivas gerações para alocação de 3 FAs.**

É possível verificar pela Figura 27 que o valor de  $f_2$  oscila, tomando por vezes valor pior em gerações subsequentes. Isso ocorre devido ao fato de que o algoritmo minimiza uma função *fitness* que é o valor da função objetivo acrescida de penalidades, que são ponderações da violação das inequações de restrição.

#### 5.4 COMPARATIVO COM SOLUÇÃO ATRAVÉS DE FILTROS PASSIVOS

No intuito de comparar e avaliar os desempenhos entre os métodos de mitigação do problema de distorção harmônica de tensão através da alocação de filtros ativos e filtros passivos, esta subseção apresenta os resultados das soluções ótimas de alocação de bancos de filtros passivos sintonizados simples.

O algoritmo de otimização da alocação de bancos de filtros passivos consiste em determinar o conjunto ótimo de nós a serem conectados bancos de filtros passivos sintonizados simples pré-determinados, conforme Tabela 15, que minimizam as funções objetivos  $f_1$  e  $f_2$ . São enumeradas todas as combinações de  $W$  barras a serem instalados  $W$  filtros passivos, e para cada possível combinação é avaliada a função objetivo, determinando-se, assim, a melhor solução.

Cada FP consiste de quatro módulos de filtros passivos sintonizados simples, conectados em paralelo, com parâmetros pré-determinados e fixos, conforme dados apresentados na Tabela 15. Os valores de capacitância para cada filtro sintonizado simples foram fixados em 1  $\mu\text{F}$  (o que resulta em uma potência reativa total de 419 kvar), os valores de indutância foram calculados para a frequência de ressonância, e o valores de resistência foram calculados de modo que o fator de qualidade  $Q$  seja 50 (HOKAZONO, 2003; CHANG, 2006), conforme Equação (35).

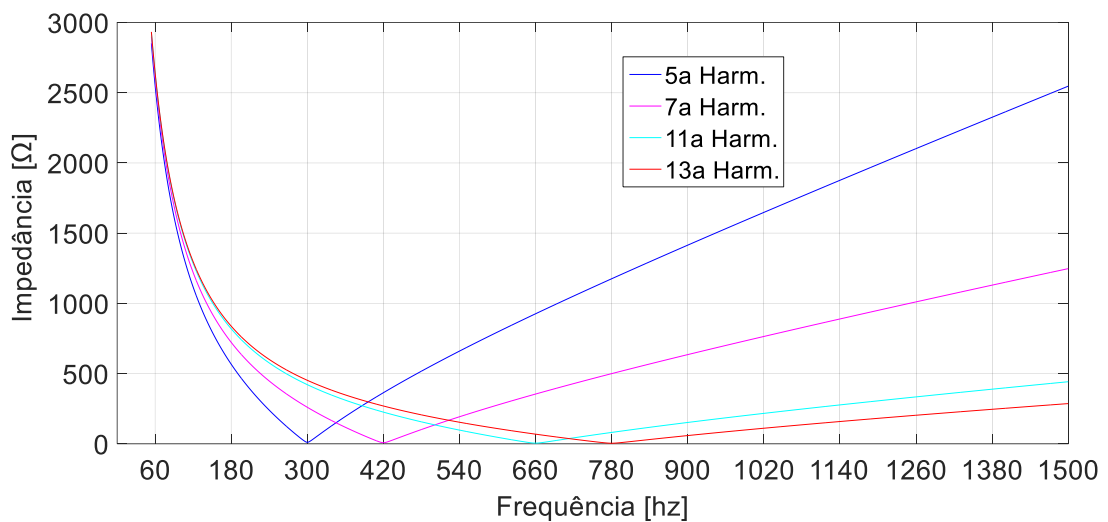
**Tabela 15: Dados dos filtros passivos sintonizados simples.**

	<b>C [<math>\mu\text{F}</math>]</b>	<b>L [H]</b>	<b>R [<math>\Omega</math>]</b>
5a Harm. (300 Hz)	1	0,281448	10,610
7a Harm. (420 Hz)	1	0,143596	7,579
11a Harm. (660 Hz)	1	0,05815	4,823
13a Harm. (780 Hz)	1	0,041634	4,081

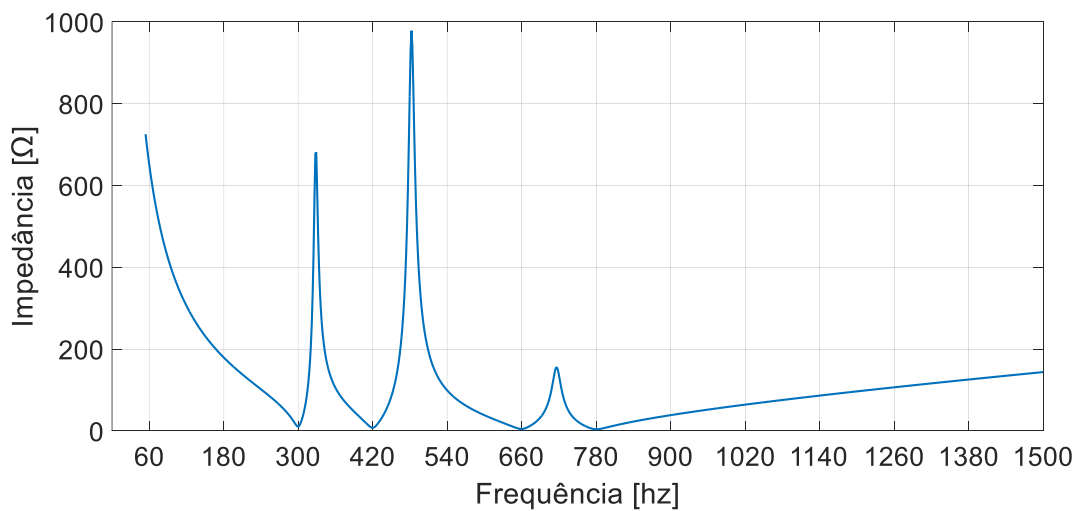


$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (35)$$

As respostas em frequência de cada filtro passivo harmônico sintonizado simples são apresentadas na Figura 28, e a resposta em frequência da impedância equivalente do módulo de 4 filtros passivos harmônicos é ilustrada pela Figura 29.



**Figura 28: Resposta em frequência de cada filtro passivo sintonizado simples.**



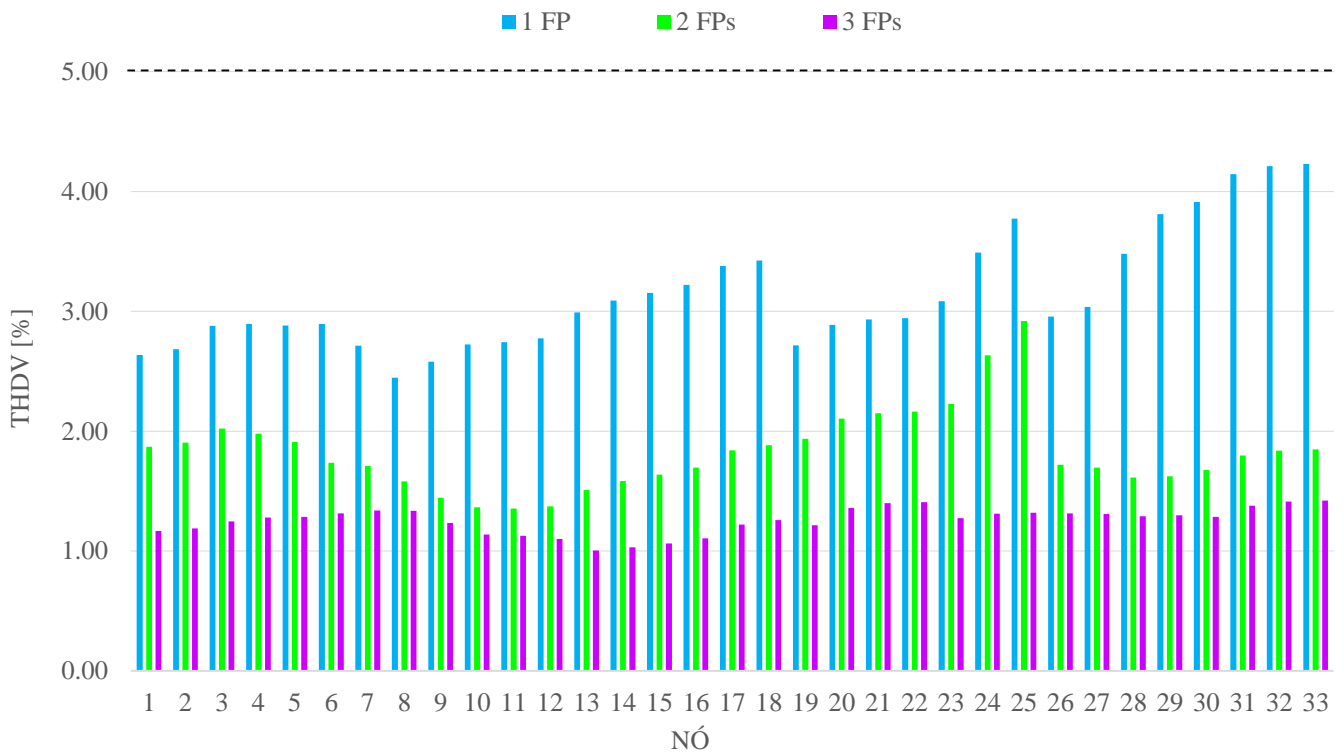
**Figura 29: Resposta em frequência do conjunto dos quatro filtros passivos sintonizado simples.**

Vemos através da Figura 28 e Figura 29 que as impedâncias dos filtros nas frequências harmônicas de interesse são os valores das resistências dadas na Tabela 15, que são menores do que as impedâncias das cargas e da impedância de Thevenin vista na subestação.

O modelo de otimização foi limitado para buscar as soluções ótimas da inserção de 1 a 3 FPs. A Tabela 16, a Tabela 17 e a Figura 30 apresentam os resultados das alocações ótimas de 1 a 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_1$ .

**Tabela 16: Resultados para alocação ótima de filtros passivos que minimizam  $f_1$ .**

<b>FPs</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Nós</b>	-	8	11, 29	13, 25, 30
<b><math>f_1</math> (%)</b>	<b>2088,4</b>	<b>333,70</b>	<b>113,91</b>	<b>52,40</b>
<b><math>f_2</math> (A)</b>		36,91	53,13	72,54



**Figura 30: Valores de THDV nos nós para a soluções que minimizam  $f_1$ .**

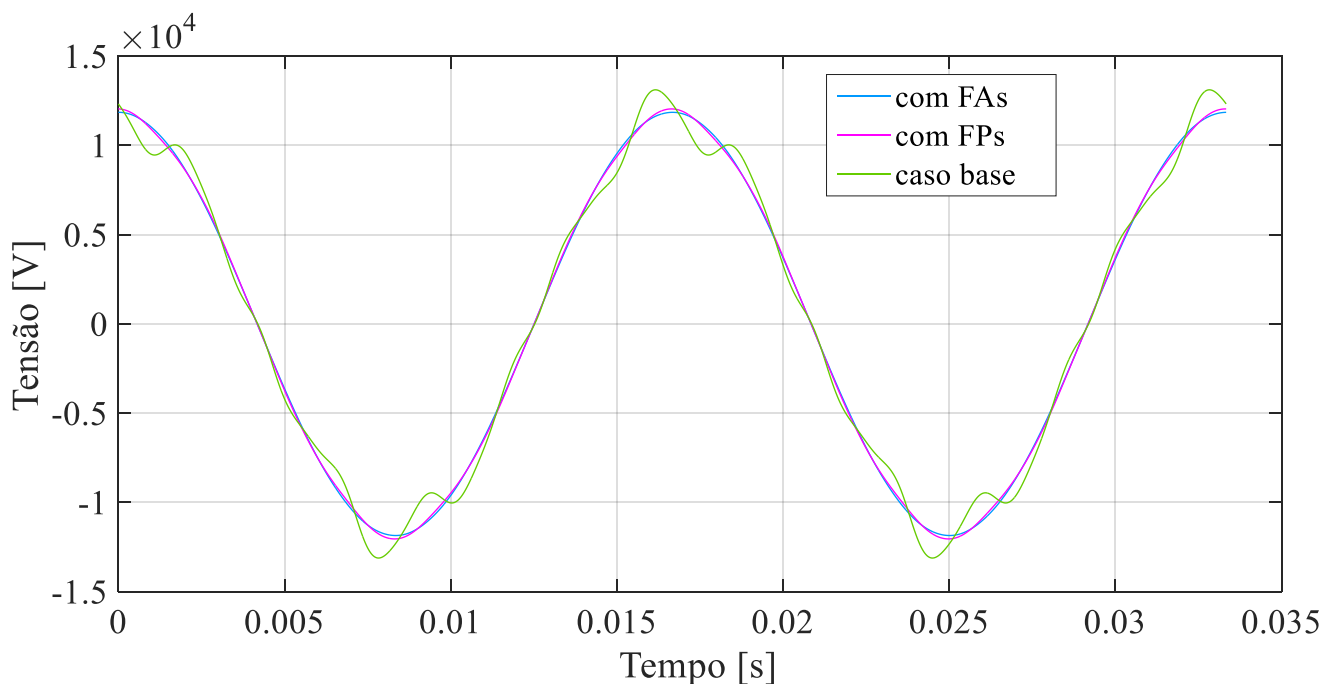
Tabela 17: Valores de IHDV para alocação ótima de 1 a 3 FPs que minimizam  $f_1$ .

Nº	IHDV [%]															
	5a Harm.				7a Harm.				11a Harm.				13a Harm.			
	Qtd. FPs Instalados				Qtd. FPs Instalados				Qtd. FPs Instalados				Qtd. FPs Instalados			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
1	4,11	2,11	1,49	1,00	3,72	1,55	1,11	0,60	0,11	0,04	0,03	0,01	0,86	0,31	0,22	0,09
2	4,19	2,15	1,51	1,02	3,79	1,58	1,13	0,61	0,11	0,04	0,03	0,01	0,87	0,32	0,23	0,09
3	4,55	2,31	1,61	1,07	4,12	1,69	1,20	0,63	0,12	0,04	0,03	0,01	0,95	0,34	0,24	0,09
4	4,73	2,33	1,59	1,10	4,28	1,68	1,16	0,65	0,12	0,04	0,03	0,01	0,99	0,33	0,23	0,10
5	4,90	2,34	1,55	1,11	4,42	1,66	1,10	0,64	0,13	0,04	0,02	0,01	1,02	0,32	0,21	0,10
6	5,49	2,40	1,47	1,14	4,95	1,59	0,92	0,64	0,14	0,04	0,02	0,01	1,14	0,29	0,16	0,09
7	5,75	2,33	1,46	1,16	5,18	1,38	0,88	0,66	0,15	0,03	0,02	0,01	1,20	0,21	0,14	0,10
8	6,22	2,19	1,38	1,16	5,61	1,08	0,76	0,66	0,16	0,01	0,01	0,01	1,30	0,07	0,11	0,10
9	6,40	2,30	1,29	1,08	5,76	1,16	0,64	0,58	0,17	0,01	0,01	0,01	1,33	0,09	0,07	0,08
10	6,57	2,42	1,24	1,02	5,91	1,25	0,57	0,51	0,17	0,02	0,01	0,01	1,37	0,12	0,04	0,06
11	6,58	2,43	1,23	1,01	5,93	1,26	0,56	0,50	0,17	0,02	0,01	0,01	1,37	0,12	0,04	0,06
12	6,61	2,46	1,25	0,99	5,95	1,28	0,57	0,48	0,17	0,02	0,01	0,01	1,38	0,13	0,04	0,05
13	6,84	2,62	1,35	0,92	6,15	1,42	0,66	0,40	0,18	0,03	0,01	0,00	1,42	0,17	0,07	0,03
14	6,95	2,70	1,41	0,94	6,25	1,49	0,72	0,42	0,18	0,03	0,01	0,01	1,45	0,19	0,09	0,04
15	7,02	2,75	1,44	0,96	6,30	1,53	0,76	0,45	0,19	0,03	0,02	0,01	1,46	0,21	0,11	0,05
16	7,08	2,80	1,49	0,99	6,36	1,58	0,81	0,48	0,19	0,03	0,02	0,01	1,47	0,22	0,12	0,06
17	7,24	2,91	1,59	1,07	6,50	1,69	0,92	0,58	0,19	0,04	0,02	0,01	1,51	0,25	0,15	0,09
18	7,27	2,95	1,62	1,09	6,53	1,72	0,95	0,61	0,19	0,04	0,02	0,01	1,51	0,26	0,16	0,10
19	4,21	2,17	1,54	1,04	3,81	1,60	1,15	0,63	0,11	0,04	0,03	0,01	0,88	0,32	0,23	0,10
20	4,34	2,30	1,66	1,14	3,92	1,71	1,26	0,73	0,11	0,04	0,03	0,02	0,90	0,35	0,26	0,12
21	4,37	2,33	1,70	1,17	3,95	1,74	1,29	0,75	0,11	0,05	0,03	0,02	0,91	0,35	0,27	0,13
22	4,38	2,34	1,71	1,18	3,95	1,75	1,30	0,76	0,12	0,05	0,03	0,02	0,91	0,35	0,27	0,13
23	4,70	2,46	1,76	1,10	4,25	1,83	1,33	0,63	0,12	0,04	0,03	0,01	0,98	0,37	0,27	0,09
24	4,99	2,75	2,06	1,16	4,51	2,10	1,61	0,61	0,13	0,05	0,04	0,01	1,04	0,43	0,34	0,06
25	5,19	2,96	2,26	1,18	4,70	2,29	1,80	0,59	0,13	0,05	0,04	0,01	1,08	0,47	0,38	0,04
26	5,54	2,45	1,46	1,15	4,99	1,63	0,90	0,64	0,15	0,04	0,02	0,01	1,15	0,30	0,15	0,09
27	5,60	2,51	1,45	1,15	5,04	1,68	0,87	0,63	0,15	0,04	0,02	0,01	1,16	0,31	0,14	0,08
28	5,94	2,83	1,43	1,15	5,34	1,99	0,74	0,58	0,16	0,05	0,01	0,01	1,23	0,38	0,08	0,06
29	6,19	3,07	1,45	1,17	5,56	2,21	0,72	0,56	0,17	0,06	0,01	0,01	1,28	0,43	0,05	0,04
30	6,26	3,15	1,50	1,16	5,63	2,28	0,75	0,55	0,17	0,06	0,01	0,01	1,29	0,45	0,06	0,04
31	6,43	3,32	1,59	1,24	5,78	2,44	0,83	0,61	0,17	0,07	0,01	0,01	1,33	0,49	0,08	0,06
32	6,48	3,36	1,62	1,26	5,83	2,48	0,86	0,63	0,17	0,07	0,01	0,01	1,34	0,50	0,09	0,07
33	6,50	3,38	1,63	1,27	5,84	2,50	0,86	0,64	0,17	0,07	0,01	0,01	1,34	0,50	0,09	0,07

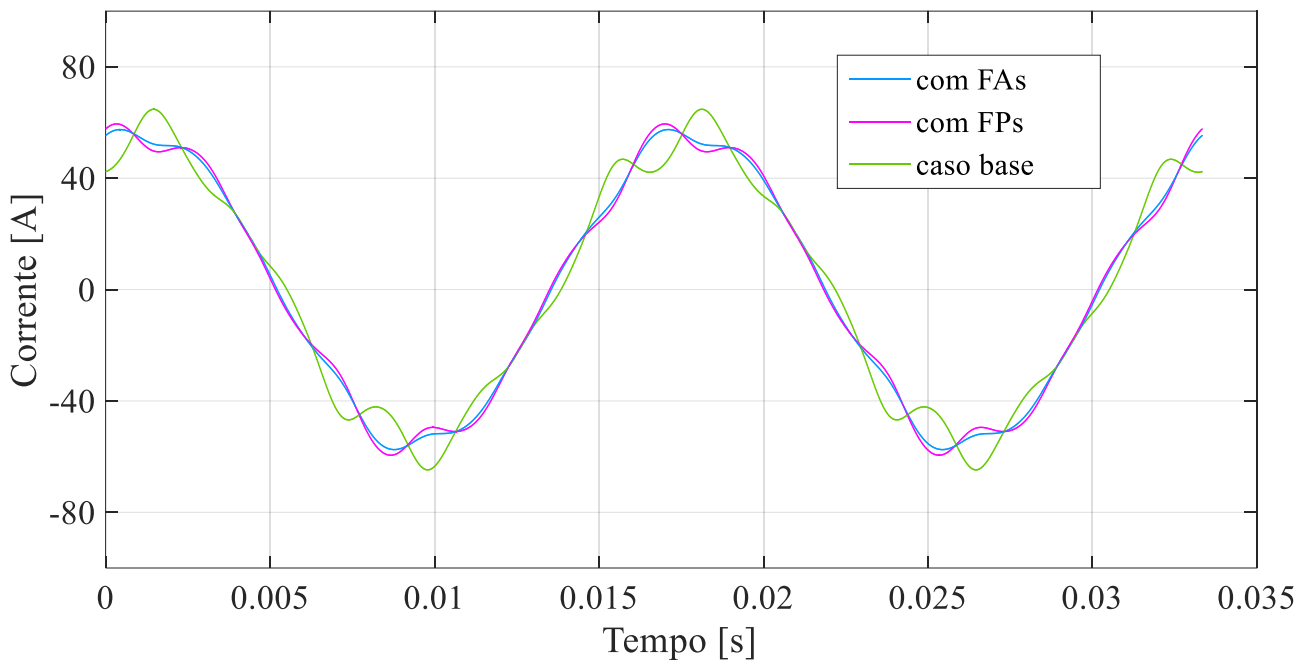
Vemos pela Tabela 16 que a melhor solução que minimiza a função objetivo  $f_1$  é quando são instalados 3 FPs. Nota-se pela Figura 30 e Tabela 17 que as soluções ótimas de alocação de 1 a 3 FPs para minimização da função objetivo  $f_1$  atendem às restrições (22) e (23), exceto para alocação de um FP, pois cinco nós ficam com seus valores de IHDV acima do limite da restrição (23), o que torna a solução infactível.

Em comparação com o método de mitigação através de alocação de FAs, a alocação de FPs apresentou desempenho inferior. Quando comparados os dois métodos para a inserção de 1 a 3 filtros para minimização de  $f_1$ , o método com FAs foi melhor para todos os casos, especialmente para inserção de 3 FAs, em que as distorções foram quase totalmente eliminadas requerendo menos corrente.

A Figura 31 e Figura 32 apresentam as ondas de tensão no nó 9 e a corrente no ramo 8-9, respectivamente, para a melhor solução de alocação de 3 FAs e 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_1$ . Tais figuras demonstram o efeito da redução da distorção da forma de onda após a instalação de FAs e FPs.



**Figura 31: Onda de tensão no nó 9 para melhores soluções de alocação de 3 FAs e 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_1$ .**



**Figura 32: Onda de corrente no ramo 8-9 para as melhores soluções de alocação de 3 FAs e 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_1$ .**

A Tabela 18, a Tabela 19 e a Figura 33 apresentam os resultados das alocações ótimas de 1 a 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_2$ .

**Tabela 18: Resultados para alocação ótima de filtros passivos que minimizam  $f_2$ .**

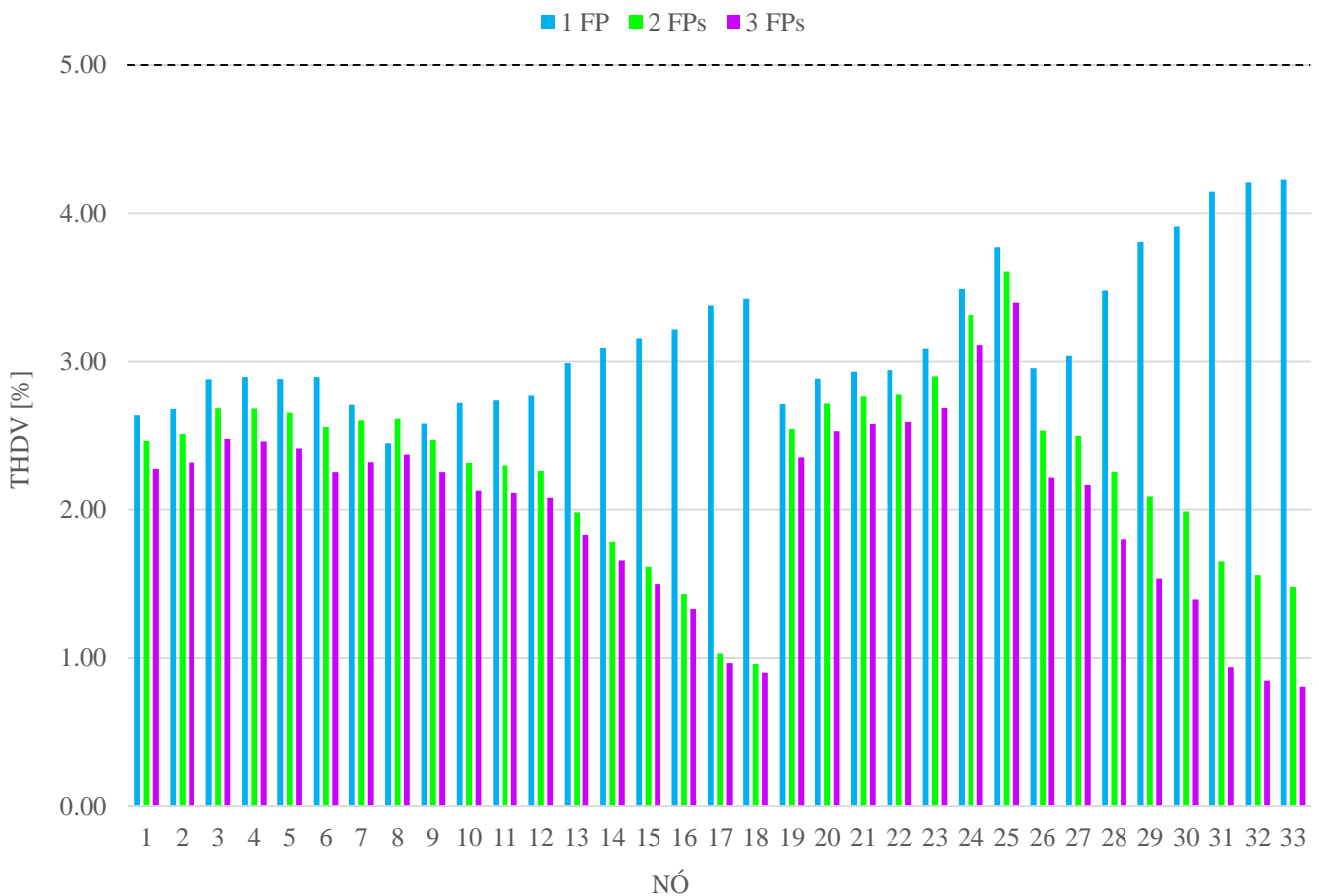
<b>FPs</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Nós</b>	-	8	18, 33	18, 32, 33
$f_1$ (%)	2088,4	333,7	184,7	148,13
$f_2$ (A)		<b>36,91</b>	<b>48,21</b>	<b>63,45</b>

Novamente, observa-se que as soluções ótimas de alocação de 1 a 3 FPs atendem à restrição (22), conforme Figura 33. A restrição (23) é atendida para alocação de 2 e 3 FPs, de acordo com dados contidos na Tabela 19. Porém, não há solução factível para alocação de 1

FP, sendo a alocação de 1 FP no nó 8 a solução com menor violação da restrição (23). Assim, a melhor solução que minimiza a função objetivo  $f_2$  é quando são instalados 2 FPs.

Ao contrário do método de mitigação por instalação de FAs, o método com FPs se comporta diferente para a minimização de  $f_2$ . Conforme se aumenta o número de FPs, a corrente eficaz total drenada pelos FPs também aumenta, ao passo que para FAs o valor de  $f_2$  diminui.

Em relação à instalação de FAs, o método de mitigação por FPs para minimização de  $f_2$  também obteve desempenho inferior. O valor de  $f_2$  foi menor em todos os casos para a alocação de FAs, especialmente para 3 FAs cujo resultado foi um terço em comparação com alocação de FPs.

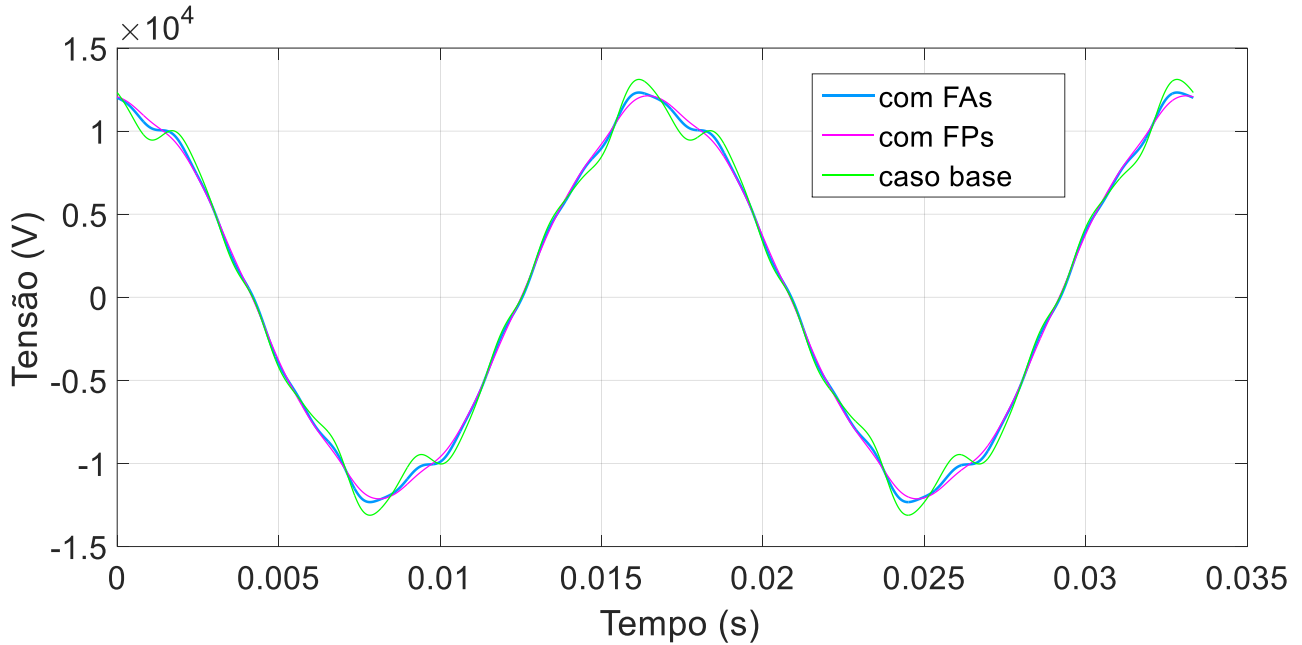


**Figura 33: Valores de THDV nos nós para a soluções que minimizam  $f_2$ .**

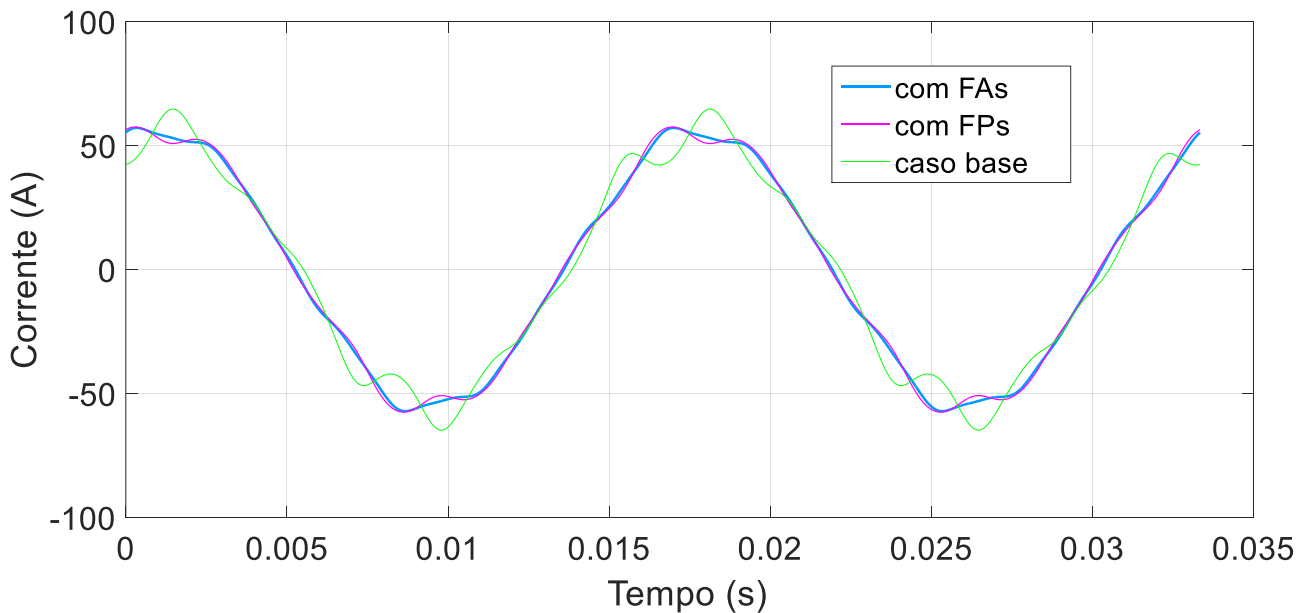
Tabela 19: Valores de IHDV para alocação ótima de 1 a 3 FPs que minimizam  $f_2$ .

Nº	IHDV [%]															
	5a Harm.				7a Harm.				11a Harm.				13a Harm.			
	Qtd. FPs Instalados				Qtd. FPs Instalados				Qtd. FPs Instalados				Qtd. FPs Instalados			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
1	4,11	2,11	1,87	1,70	3,72	1,55	1,57	1,48	0,11	0,04	0,04	0,04	0,86	0,31	0,34	0,33
2	4,19	2,15	1,90	1,74	3,79	1,58	1,60	1,50	0,11	0,04	0,04	0,04	0,87	0,32	0,35	0,33
3	4,55	2,31	2,04	1,85	4,12	1,69	1,71	1,60	0,12	0,04	0,04	0,04	0,95	0,34	0,37	0,35
4	4,73	2,33	2,04	1,84	4,28	1,68	1,70	1,59	0,12	0,04	0,04	0,04	0,99	0,33	0,37	0,35
5	4,90	2,34	2,02	1,81	4,42	1,66	1,68	1,56	0,13	0,04	0,04	0,04	1,02	0,32	0,37	0,34
6	5,49	2,40	1,98	1,71	4,95	1,59	1,59	1,44	0,14	0,04	0,04	0,04	1,14	0,29	0,34	0,31
7	5,75	2,33	2,01	1,76	5,18	1,38	1,62	1,48	0,15	0,03	0,04	0,04	1,20	0,21	0,35	0,32
8	6,22	2,19	2,01	1,80	5,61	1,08	1,62	1,51	0,16	0,01	0,04	0,04	1,30	0,07	0,35	0,33
9	6,40	2,30	1,91	1,72	5,76	1,16	1,53	1,42	0,17	0,01	0,04	0,04	1,33	0,09	0,33	0,31
10	6,57	2,42	1,80	1,63	5,91	1,25	1,42	1,33	0,17	0,02	0,04	0,04	1,37	0,12	0,30	0,29
11	6,58	2,43	1,79	1,62	5,93	1,26	1,41	1,32	0,17	0,02	0,04	0,03	1,37	0,12	0,30	0,28
12	6,61	2,46	1,76	1,60	5,95	1,28	1,39	1,30	0,17	0,02	0,04	0,03	1,38	0,13	0,30	0,28
13	6,84	2,62	1,56	1,43	6,15	1,42	1,19	1,12	0,18	0,03	0,03	0,03	1,42	0,17	0,25	0,24
14	6,95	2,70	1,43	1,31	6,25	1,49	1,05	0,99	0,18	0,03	0,03	0,03	1,45	0,19	0,21	0,20
15	7,02	2,75	1,31	1,21	6,30	1,53	0,93	0,87	0,19	0,03	0,02	0,02	1,46	0,21	0,19	0,18
16	7,08	2,80	1,18	1,09	6,36	1,58	0,79	0,75	0,19	0,03	0,02	0,02	1,47	0,22	0,15	0,15
17	7,24	2,91	0,92	0,86	6,50	1,69	0,46	0,43	0,19	0,04	0,01	0,01	1,51	0,25	0,05	0,05
18	7,27	2,95	0,87	0,82	6,53	1,72	0,40	0,38	0,19	0,04	0,00	0,00	1,51	0,26	0,03	0,03
19	4,21	2,17	1,93	1,76	3,81	1,60	1,62	1,52	0,11	0,04	0,04	0,04	0,88	0,32	0,35	0,34
20	4,34	2,30	2,06	1,89	3,92	1,71	1,73	1,64	0,11	0,04	0,05	0,04	0,90	0,35	0,38	0,36
21	4,37	2,33	2,10	1,93	3,95	1,74	1,76	1,67	0,11	0,05	0,05	0,05	0,91	0,35	0,39	0,37
22	4,38	2,34	2,11	1,94	3,95	1,75	1,77	1,67	0,12	0,05	0,05	0,05	0,91	0,35	0,39	0,37
23	4,70	2,46	2,20	2,01	4,25	1,83	1,85	1,74	0,12	0,04	0,05	0,04	0,98	0,37	0,41	0,39
24	4,99	2,75	2,50	2,32	4,51	2,10	2,13	2,02	0,13	0,05	0,05	0,05	1,04	0,43	0,47	0,45
25	5,19	2,96	2,71	2,53	4,70	2,29	2,32	2,22	0,13	0,05	0,06	0,05	1,08	0,47	0,51	0,49
26	5,54	2,45	1,96	1,68	4,99	1,63	1,57	1,41	0,15	0,04	0,04	0,04	1,15	0,30	0,34	0,31
27	5,60	2,51	1,94	1,64	5,04	1,68	1,54	1,38	0,15	0,04	0,04	0,04	1,16	0,31	0,33	0,30
28	5,94	2,83	1,80	1,39	5,34	1,99	1,34	1,12	0,16	0,05	0,04	0,03	1,23	0,38	0,27	0,23
29	6,19	3,07	1,70	1,21	5,56	2,21	1,19	0,92	0,17	0,06	0,03	0,03	1,28	0,43	0,23	0,19
30	6,26	3,15	1,64	1,12	5,63	2,28	1,11	0,82	0,17	0,06	0,03	0,02	1,29	0,45	0,21	0,16
31	6,43	3,32	1,43	0,82	5,78	2,44	0,81	0,46	0,17	0,07	0,02	0,01	1,33	0,49	0,12	0,06
32	6,48	3,36	1,38	0,76	5,83	2,48	0,72	0,38	0,17	0,07	0,01	0,01	1,34	0,50	0,09	0,03
33	6,50	3,38	1,33	0,73	5,84	2,50	0,64	0,34	0,17	0,07	0,01	0,00	1,34	0,50	0,04	0,02

A Figura 34 e Figura 35 apresentam as ondas de tensão no nó 9 e a corrente no ramo 8-9, respectivamente, para a melhor solução de alocação de 3 FAs e 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_2$ . Tais figuras demonstram o efeito da redução da distorção da forma de onda após a instalação de FAs e FPs.



**Figura 34: Onda de tensão no nó 9 para melhores soluções de alocação de 3 FAs e 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_2$ .**



**Figura 35: Onda de corrente no ramo 8-9 para as melhores soluções de alocação de 3 FAs e 3 FPs que minimizam a função objetivo  $f_2$ .**



Observa-se pelas Figura 34 e Figura 35 que as formas de ondas para solução para alocação de FAs apresentam maiores deformações que para alocação de FPs. Justamente este é o resultado esperado, pois a função objetivo  $f_2$  minimiza o somatório das correntes eficazes dos filtros, objetivo conflitante com  $f_1$ , que minimiza as distorções harmônicas.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

Um modelo de otimização baseado no algoritmo ABC foi proposto no presente trabalho para otimizar o problema de alocação e dimensionamento ótimo de FAs em sistemas de distribuição, minimizando as funções objetivo  $f_1$  e  $f_2$  (minimização dos quadrados das THDV nos nós e minimização das correntes eficazes dos filtros, respectivamente). O problema foi caracterizado como um problema de programação não linear inteira mista.

Para verificar a validade do método proposto, o sistema IEEE 33 barras foi escolhido para a simulação, tendo cargas não-lineares injetando correntes harmônicas em cada nó do sistema. Os resultados mostraram que quanto maior o número de filtros instalados, maior a minimização das funções objetivo. Também, foi observado um comportamento conflitante entre as funções objetivo  $f_1$  e  $f_2$  no processo de otimização, pois enquanto o valor de  $f_2$  diminui o valor de  $f_1$  aumenta, e vice-versa.

Ademais, outra consideração importante foi a comparação de desempenho entre os métodos de mitigação das distorções harmônicas através da instalação de bancos de filtros passivos sintonizados simples e através da instalação de filtros ativos. Verificou-se que a alocação de FAs apresentou um melhor desempenho em comparação com a alocação de FPs ao minimizar as funções objetivo  $f_1$  e  $f_2$ .

## 6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Adaptar o modelo de otimização para sistemas desbalanceados, com linhas e cargas desequilibradas;
- Utilizar como estudo de caso um sistema real;
- Otimizar outras funções objetivo, como por exemplo perdas ativas nas linhas e o custo de investimento da instalação dos FAs, utilizando valores de mercado;
- Implementar o modelo de otimização como uma função multi-objetivo, minimizando diversas funções objetivo conflitantes;
- Implementação do modelo otimização utilizando codificação binária;
- Comparação dos custos de instalação de FAs versus FPs.

## REFERÊNCIAS

AKAGI, H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, Warsaw, v. 54, n. 3, 2006.

ARRILLAGA, J. *et al.* **Power System Harmonic Analysis**. Chichester: John Wiley & Sons, 1997.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power System Harmonics**. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

BABU, P. R. *et al.* A novel approach for solving distribution networks. In: ANNUAL IEEE INDIA CONFERENCE, 2009, Gujarat. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. Não paginado.

CARPINELLI, G.; RUSSO, A.; VARILONE, P. Active filters: a multi-objective approach for the optimal allocation and sizing in distribution networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS, ELECTRICAL DRIVES, AUTOMATION AND MOTION, 2014, Ischia. **Proceedings...** New York: IEEE, 2014, p. 1201-1207.

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**, New York, v. 21, n. 1, Jan. 2006.

CHANG, H. C.; CHANG, T. T. Optimal installation of three-phase active power line conditioners in unbalanced distribution systems. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 57, n. 3, p. 163-171, Apr. 2001.

DAS, J. C. **Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

DUGAN, R. C. *et al.* **Electrical Power Systems Quality**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

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, 2008, Rawalpindi. **Proceedings...** New York: IEEE, 2008. Não paginado.

GRABOWSKI, D.; WALCZAK, J. Strategies for optimal allocation and sizing of active power filters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING, 2012, Venice. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012, p. 1098-1103.

GRABOWSKI, D.; MACIĄŻEK, M. Cost Effective Allocation and Sizing of Active Power Filters using Genetic Algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING, 2013, Wrocław. **Proceedings...** New York: IEEE, 2013. Não paginado.

HERRAIZ, S.; SAINZ L.; CLUA J. Review of Harmonic Load Flow Formulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 18, n. 3, 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**, Baltimore, v. 11, n. 3, p. 1610-1617, July 1996.

HONG, Y.-Y.; HSU, Y.-L.; CHEN, Y.-T. Active power line conditioner planning using an enhanced optimal harmonic power flow method. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 52, p. 181-188, Feb. 1999.

HOKAZONO, H. *et al.* Optimal filter allocation for harmonics suppression in power systems. **International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management**, Hong Kong, p. 236-241, Nov. 2003.

KARABOGA, D.; BASTURK, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. **Journal of Global Optimization**, Dordrecht, v. 39, n. 3, p. 459-471, Nov. 2007.

KEYPOUR, R.; SEIFI, H.; YAZDIAN-VARJANI, A. Genetic based algorithm for active power filter allocation and sizing. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 71, n. 1, p. 41-49, Sept. 2004.

LUCIC, P.; TEODOROVIC, D. Bee System: Modeling Combinatorial Optimization Transportation Engineering Problems by Swarm Intelligence. **Preprints of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis**, São Miguel, p. 441-445, 2001.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. **Power System Transients: Parameter Determination**. Boca Raton: CRC Press, 2010.

MEDINA, A. *et al.* Harmonic Analysis in Frequency and Time Domain. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 28, n. 3, p. 1813-1821, July 2013.

ROSA, F. D. L. **Harmonics, Power Systems and Smart Grids**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

SAADAT, H. **Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1999.

SERAPIÃO, A. B. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 20, n. 3, p. 271-304, Ago. 2009.

SOLIMAN, S. A.; MANTAWY, A. H. **Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems**. New York: Springer, 2010.

TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 11, n. 1, p. 466-474, Jan. 1996.

VARIZ, A. M. *et al.* Allocation of Power Harmonic Filters Using Genetic Algorithm. **International Conference on Harmonics and Quality of Power**, Hong Kong, p. 143-149, Dec. 2012.

WAKILEH, G. J. **Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design**. Berlin: Springer, 2001.

WANG, Y.-S.; HUA, S.; LIU, X.-M. Optimal allocation of the active filters based on the TABU algorithm in distribution network. **International Conference on Electrical and Control Engineering**, Wuhan, p. 1418-1421, June 2010.

WAZIR, A.; ARBAB, N. Analysis and Optimization of IEEE 33 Bus Radial Distributed System Using Optimization Algorithm. **Journal of Emerging Trends in Applied Engineering**, [S. l.], v. 1, n. 2, 2016.

ZIARI, I.; JALILIAN, A. A New Approach for Allocation and Sizing of Multiple Active Power-Line Conditioners. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 25, n. 2, p. 1026-1035, Apr. 2010.

## APÊNDICE A - DADOS DO SISTEMA IEEE 33 NÓS

**Tabela 20: Impedâncias das linhas e transformador.**

de	para	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	1/2Yc (S)
0	1	0	2,564	0
1	2	0,0922	0,047	8,83E-05
2	3	0,493	0,2511	4,72E-04
3	4	0,366	0,1864	3,50E-04
4	5	0,3811	0,1941	3,65E-04
5	6	0,819	0,707	1,33E-03
6	7	0,1872	0,6188	1,16E-03
7	8	17,114	12,351	2,32E-03
8	9	1,03	0,74	1,39E-03
9	10	1,044	0,74	1,39E-03
10	11	0,1966	0,065	1,22E-04
11	12	0,3744	0,1238	2,33E-04
12	13	1,468	1,155	2,17E-03
13	14	0,5416	0,7129	1,34E-03
14	15	0,591	0,526	9,88E-04
15	16	0,7463	0,545	1,02E-03
16	17	1,289	1,721	3,23E-03
17	18	0,732	0,574	1,08E-03
2	19	0,164	0,1565	2,94E-04
19	20	15,042	13,554	2,55E-03
20	21	0,4095	0,4784	8,99E-04
21	22	0,7089	0,9373	1,76E-03
3	23	0,4512	0,3083	5,79E-04
23	24	0,898	0,7091	1,33E-03
24	25	0,896	0,7011	1,32E-03
6	26	0,203	0,1034	1,94E-04
26	27	0,2842	0,1447	2,72E-04
27	28	1,059	0,9337	1,75E-03
28	29	0,8042	0,7006	1,32E-03
29	30	0,5075	0,2585	4,86E-04
30	31	0,9744	0,963	1,81E-03
31	32	0,3105	0,3619	6,80E-04
32	33	0,341	0,5302	9,96E-04

**Tabela 21: Dados das cargas do sistema.**

<b>Nó</b>	<b>P (kW)</b>	<b>Q (kvar)</b>	<b>S (kVA)</b>	<b>FP</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X (<math>\Omega</math>)</b>
2	100	60	116,6	0,857	2041	1225
3	90	40	98,5	0,914	2576	1145
4	120	80	144,2	0,832	1602	1068
5	60	30	67,1	0,894	3701	1851
6	60	20	63,2	0,949	4164	1388
7	200	100	223,6	0,894	1110	555
8	200	100	223,6	0,894	1110	555
9	60	20	63,2	0,949	4164	1388
10	60	20	63,2	0,949	4164	1388
11	45	30	54,1	0,832	4271	2847
12	60	35	69,5	0,864	3452	2014
13	60	35	69,5	0,864	3452	2014
14	120	80	144,2	0,832	1602	1068
15	60	10	60,8	0,986	4502	750
16	60	20	63,2	0,949	4164	1388
17	60	20	63,2	0,949	4164	1388
18	90	40	98,5	0,914	2576	1145
19	90	40	98,5	0,914	2576	1145
20	90	40	98,5	0,914	2576	1145
21	90	40	98,5	0,914	2576	1145
22	90	40	98,5	0,914	2576	1145
23	90	50	103,0	0,874	2357	1309
24	420	200	465,2	0,903	539	257
25	420	200	465,2	0,903	539	257
26	60	25	65,0	0,923	3942	1643
27	60	25	65,0	0,923	3942	1643
28	60	20	63,2	0,949	4164	1388
29	120	70	138,9	0,864	1726	1007
30	200	600	632,5	0,316	139	416
31	150	70	165,5	0,906	1520	709
32	210	100	232,6	0,903	1078	513
33	60	40	72,1	0,832	3203	2135
<b>TOTAL</b>	<b>3715</b>	<b>2300</b>	<b>4548,5</b>			