

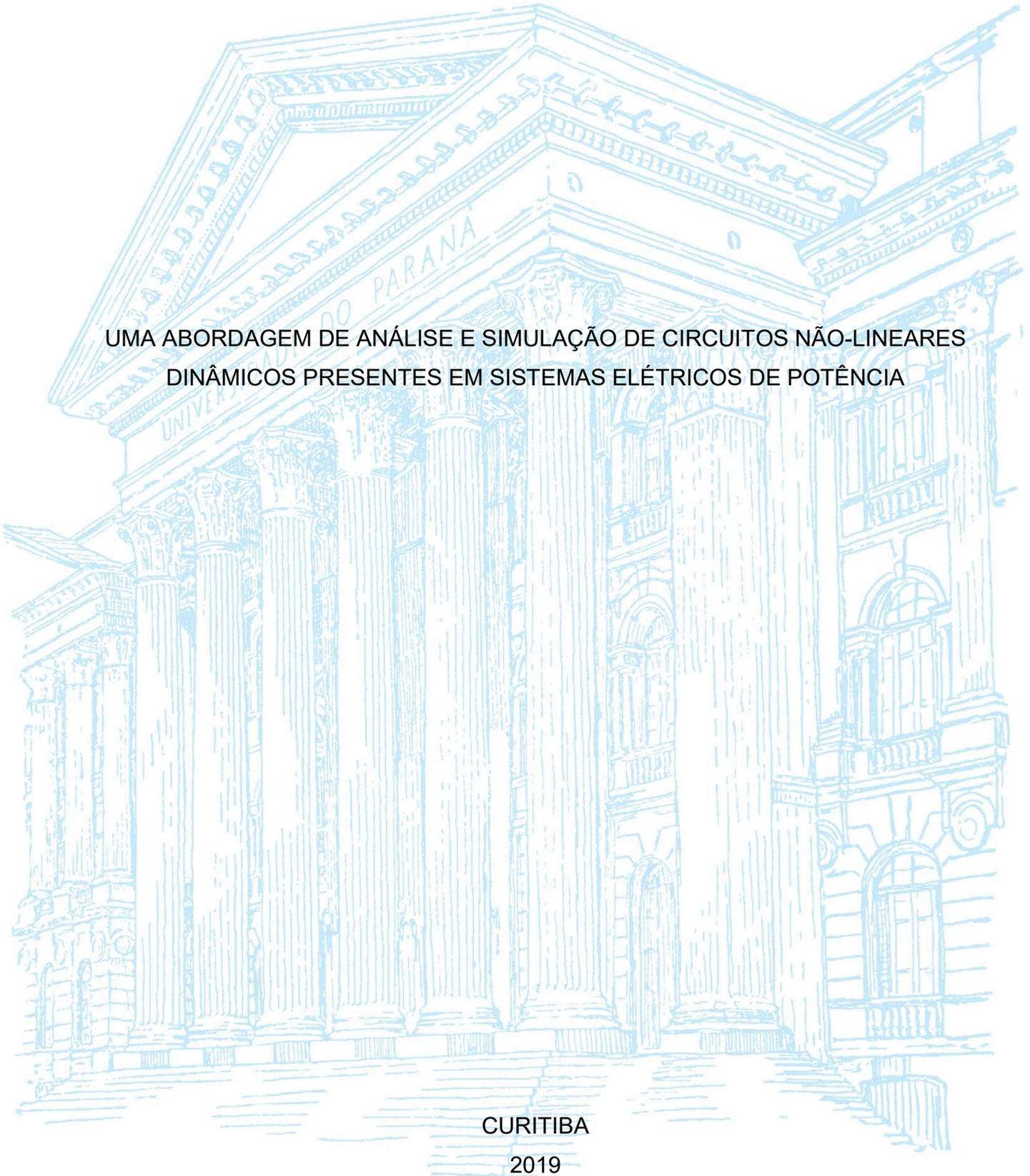
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAIO GONÇALVES NATALINO

UMA ABORDAGEM DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS NÃO-LINEARES
DINÂMICOS PRESENTES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

CURITIBA

2019



CAIO GONÇALVES NATALINO

UMA ABORDAGEM DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS NÃO-LINEARES
DINÂMICOS PRESENTES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ph.D. Eduardo Gonçalves de Lima

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

CAIO GONÇALVES NATALINO

UMA ABORDAGEM DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS NÃO-LINEARES DINÂMICOS PRESENTES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Ph.D. Eduardo Gonçalves de Lima
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. Wilson Arnaldo Artuzi Junior
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dra. Juliana Luísa Müller lamamura
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 05 de dezembro de 2019

Dedico este trabalho a todos que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, em especial à minha mãe, que sempre colocou a educação dos filhos em primeiro lugar.

“Nós só podemos ver um pouco do futuro, mas o suficiente para perceber que há muito a fazer. ”

(Alan Turing, 1950)

RESUMO

NATALINO, Caio. UMA ABORDAGEM DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS NÃO-LINEARES DINÂMICOS PRESENTES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Paraná. CURITIBA, 2019.

O sistema elétrico, ano após ano, aumenta sua capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia, o que vem acompanhado de uma ampliação do número de cargas não-lineares em todos os níveis de fornecimento. Ao promoverem distorções de tensão e corrente nas redes elétricas, comprometendo o funcionamento ou a vida útil de equipamentos, as cargas não-lineares entram na atenção tanto das concessionárias quanto dos consumidores. Nos sistemas de potência, dispositivos não-lineares estão sujeitos a um sinal de entrada contendo uma forte componente fundamental e harmônicas que são muito menores em amplitude. A simulação em regime permanente senoidal, também conhecida como análise de grandes sinais, é amplamente utilizada tanto para circuitos de baixa frequência, como os presentes em sistemas elétricos de potência, quanto para circuitos de alta frequência, por exemplo em circuitos de radiofrequência (RF) como amplificadores, osciladores e moduladores de sinal. Em muitos casos de análise, sobretudo em sistemas elétricos de potência, a topologia do circuito e a amplitude da fundamental injetada pelas fontes independentes são mantidas fixas, variando-se apenas as amplitudes das componentes harmônicas injetadas pelas fontes independentes. Deste modo, utilizando-se das ferramentas tradicionais de simulação de transitório, uma nova análise do circuito completo é necessária a cada nova configuração de valores para as componentes harmônicas na simulação. O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é propor uma ferramenta que permita realizar tal simulação de forma computacionalmente mais eficiente. Na abordagem proposta, o circuito original é inicialmente linearizado em torno do regime permanente periódico através da técnica conhecida em circuitos RF como simulação em corrente alternada periódica (PAC), que zera inicialmente todas as componentes harmônicas injetadas pelas fontes independentes. O efeito das componentes harmônicas injetadas pelas fontes independentes é então estudado apenas no circuito linearizado.

Palavras-chave: Análise de Corrente Alternada Periódica. Análise de Equilíbrio Harmônico. Análise de Transitório. Circuitos Não-Lineares Dinâmicos. Distorção Harmônica.

ABSTRACT

NATALINO, Caio. AN APPROACH TO ANALYSIS AND SIMULATION OF NONLINEAR-DYNAMIC CIRCUITS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS. 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Paraná. CURITIBA, 2019.

Year by year, the electric system increases its power generation, transmission and distribution capacity, which comes with an increase in the number of nonlinear loads at all levels of supply. By generating voltage and current distortions in power grids, affecting equipment operation, nonlinear loads come into the attention of both energy providers and consumers. In power systems, nonlinear devices are submitted to an input signal containing a strong fundamental content and harmonics that are much smaller in amplitude. Steady state simulation, also known as large signal analysis, is widely used for both low frequency circuits, such as those present in power systems, and for high frequency circuits, for example in radio frequency (RF) circuits such as amplifiers, oscillators and signal modulators. In many cases of analysis, especially in power systems, the circuit topology and fundamental amplitude injected by the independent sources are fixed, varying only the amplitudes of the harmonic components injected by the independent sources. Thus, using traditional transient simulation tools, a new full circuit analysis is required with each new value set for the harmonic components in the simulation. The objective of this work is to propose a tool that allows to perform such simulation in a computationally more efficient way. In the proposed approach, the original circuit is initially linearized around the steady state through the technique known in RF circuits as periodic alternating current simulation (PAC), which initially disregards all harmonic components injected by the independent sources. The effect of harmonic components injected by independent sources is then studied only in the linearized circuit.

Keywords: Dynamic Nonlinear Circuits. Harmonic Balance Analysis. Harmonic Distortion. Periodic Alternating Current Analysis. Transient Analysis.

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANM	Análise Nodal Modificada
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
HB	Harmonic Balance
PAC	Periodic AC Analysis
THD	Total Harmonic Distortion

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

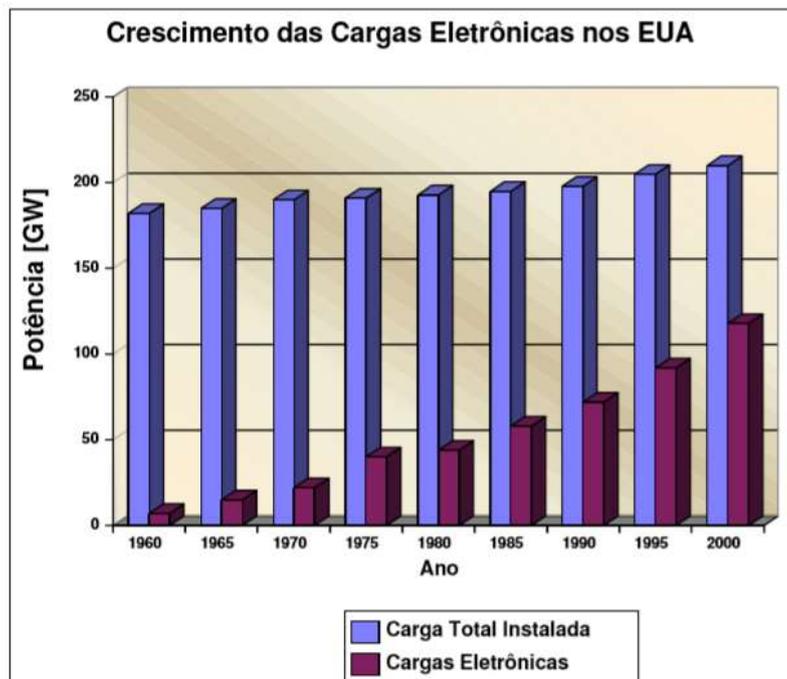
No período compreendido pelo início do século XX até algumas décadas atrás, o suprimento de energia pelas instalações elétricas era destinado, em geral, a cargas lineares, ou seja, que preservavam as formas de onda com comportamentos compatíveis entre si, mesmo que existissem defasagens angulares entre elas, dada a presença de capacitores ou indutores. Segundo Isoni (2001), neste período, as cargas não-lineares, isto é, cargas em que a relação entre a corrente e a tensão aplicada não é linearmente proporcional, representavam uma pequena parcela do total das cargas instaladas, concentrando-se em geral no setor industrial em processos produtivos baseados em fenômenos eletroquímicos ou eletrometalúrgicos.

Com o surgimento dos dispositivos semicondutores e desenvolvimento da eletrônica de potência, marcado pelo aperfeiçoamento da família dos transistores de potência e dos tiristores, o uso de sistemas envolvendo retificações foram intensificados, com o uso de conversores estáticos e inversores de energia. Ao operarem em estados controlados de condução e bloqueio em função da polaridade da tensão da rede, estes geram o aparecimento de uma tensão com forma de onda não-senoidal na carga e, conseqüentemente, uma corrente não-senoidal na carga e no sistema de alimentação (Isoni, 2001). Nesta situação, observam-se desvios nas formas de onda em comparação com uma forma senoidal pura, as chamadas "Distorções Harmônicas".

Além da utilização geral na indústria, inversores conectando um barramento de corrente contínua (CC) à rede de corrente alternada (CA) aparecem em instalações de painéis fotovoltaicos, fontes ininterruptas de energia, sistemas de carga e descarga de bancos de baterias e sistemas de acionamento e frenagem de motores, por exemplo (Deckmann, 2010). Nas redes inteligentes de eletricidade (ou "*smart grids*"), que vêm sendo cada vez mais estudadas e implementadas, conta-se com a presença de tais conversores dispersos pela rede, tornando-se de extrema importância, durante um projeto, a análise qualitativa e quantitativa dos efeitos das componentes injetadas pela comutação destes equipamentos.

Nos últimos quinze anos, além da contribuição das indústrias na distorção harmônica nos sistemas elétricos, o comportamento do consumidor doméstico também foi modificado, sendo possível afirmar que atualmente os sistemas de distribuição passaram a apresentar um impacto significativo sobre a quantidade de harmônicos injetados no sistema (Garcia, 2001). A nível de distribuição, cargas não-lineares como motores de velocidade variável, atenuadores de luminosidade ou *dimmers*, fornos de micro-ondas, aparelhos de televisão e outros dispositivos eletrônicos têm crescido nos últimos anos, como apresentado na Figura 1, que mostra resultados de um levantamento realizado nos EUA do ano de 1960 a 2000.

FIGURA 1 – Crescimento da Carga Eletrônica frente a Carga Instalada nos EUA.



FONTE: Garcia (2001).

Este aumento da parcela de cargas não-lineares conectadas a sistemas de potência requer estudos mais aprofundados, dado que componentes harmônicas em sistemas elétricos não só impactam na operação como também afeta na qualidade do fornecimento de energia elétrica. Por este motivo, métricas de qualidade de energia, como a distorção harmônica total - ou "*total harmonic distortion*" (THD) – de acordo com Bhonsle (2011), são calculadas em sistemas de potência e normas

como a IEEE 519-1992 (IEEE, 2014) definem limites harmônicos por níveis de tensão e corrente.

Assim, observa-se grande importância no estudo dos impactos da injeção de harmônicas em sistemas elétricos de potência por circuitos não-lineares dinâmicos, fazendo com que, no projeto destes circuitos e equipamentos, a etapa de simulação e análise leve em consideração esta questão e forneça os melhores resultados possíveis de forma eficiente, a fim de que estes componentes estejam dentro dos parâmetros pretendidos e autorizados para operação. Utilizando-se das ferramentas tradicionais de simulação de transitório, uma nova análise do circuito completo é necessária a cada nova configuração de valores para as componentes harmônicas, fazendo com que o processo se torne mais custoso computacionalmente. Na literatura de radiofrequência, conhece-se uma ferramenta que permite realizar tal simulação de forma mais eficiente e que pode ser utilizada para simulação destes componentes não-lineares dinâmicos presentes em sistemas de potência, apresentada no presente Trabalho de Conclusão de Curso.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Faifer (2018), em sistemas de potência, dispositivos não-lineares estão sujeitos a um sinal de entrada contendo uma forte componente fundamental e harmônicas que são muito menores em amplitude. A não-linearidade destes dispositivos acarreta no aparecimento de harmônicas no sistema, que podem causar problemas ao circuito ou à rede em que ele está conectado, fazendo com que a simulação e a análise do impacto das harmônicas neste tipo de circuito torne-se fundamental em projetos. Nos diversos ambientes de simulação disponíveis atualmente, o método mais utilizado para a simulação de circuitos é a análise de transitório.

Sabe-se que a simulação de transitório, mesmo fornecendo os resultados desejados para a análise de grandes sinais, acaba sendo computacionalmente ineficiente quando se faz necessário um conjunto muito grande ou diversificado de simulações, pois, em cada uma delas, deverá ser realizada tal análise completa, demandando um maior tempo de processamento. Ademais, ao contemplar toda a resposta do circuito, a simulação inclui a resposta transitória, mesmo quando a

informação que se deseja extrair está no regime permanente, como é o caso da análise de harmônicas em um sistema.

Assim, o envolvimento do método de corrente alternada periódica (PAC) para baixas frequências, construindo um ambiente que permita simular um circuito não-linear dinâmico e a comprovação de sua aplicabilidade neste caso serão relevantes no âmbito de simulações para sistemas elétricos de potência, uma vez que, no futuro, podem substituir sucessivas análises que requerem mais processamento por um método mais eficaz. Sendo assim, em simulações destes circuitos, visando identificar os impactos das harmônicas no sistema, pode-se linearizar o circuito em torno de uma resposta de topologia fixa e, a partir da superposição, realizar um número muito grande de análises lineares considerando as fontes independentes que injetam harmônicas, onde o custo computacional é diretamente ligado aos parâmetros de simulação definidos pelo usuário. O diferencial deste projeto, portanto, encontra-se especialmente na proposta de uma outra abordagem na análise de circuitos elétricos estimulados a baixas frequências, com aplicação prática em sistemas de potência em seu caso de estudo principal.

O trabalho em questão é destinado a produzir conhecimento e resultados à comunidade acadêmica, especialmente da área de Engenharia Elétrica, além de profissionais e pesquisadores relacionados a sistemas elétricos de potência e também de ambientes de simulação, principalmente aplicados a baixas frequências ou a análises PAC. A realização do trabalho, ao dar continuidade aos temas abordados em pesquisa na iniciação científica e produção do artigo de Natalino (2019), trará ainda mais embasamento acerca de ambientes de simulação e os métodos de análise estudados.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Como objetivo geral deste trabalho, propõe-se a apresentação de uma abordagem de análise de circuitos presentes em sistemas elétricos de potência diferente da simulação de transitório utilizada comumente, visando possibilitar ambientes de simulação destes circuitos de baixa frequência computacionalmente mais eficientes. Partindo de um circuito não-linear dinâmico excitado por fontes

periódicas com fundamental em grandes sinais e harmônicas em pequenos sinais arbitrário escolhido para caso de estudo, visa-se implementar o método PAC e analisar a validade desta análise de regime permanente para a aplicação do caso de estudo e circuitos de mesmo comportamento ou aplicação.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do trabalho, tem-se:

1.3.2.1. O estudo do artigo de referência bibliográfica do qual está sendo retirado o estudo de caso e de outras literaturas acerca do tema, a fim de entender o objeto de trabalho, suas peculiaridades e aplicações;

1.3.2.2. O estudo teórico e implementação em código dos métodos de análise envolvidos no estudo de caso e na abordagem proposta (transitório, equilíbrio harmônico e PAC), a fim de garantir a validação do método proposto a partir de comparação de resultados de outros métodos e também o desenvolvimento e implementação do método proposto;

1.3.2.3. Analisar, documentar e comparar os resultados das diferentes análises e simulações, visando fornecer os resultados esperados do objetivo geral do trabalho e avaliar o limite de validade do método aplicado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho se divide em cinco capítulos. O primeiro apresenta o contexto em que este trabalho está inserido, a justificativa e a motivação da realização do trabalho e os objetivos a serem atingidos. O segundo capítulo, por sua vez, apresenta uma fundamentação teórica sobre os temas abordados e os métodos de simulação estudados e implementados no trabalho, realizada a partir da literatura disponível e estudos acerca dos assuntos abordados.

Já no terceiro capítulo, é comentada toda a metodologia de estudo empregada, visando possibilitar que o mesmo possa ser replicado em estudos futuros, bem como os materiais fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

No quarto capítulo, apresenta-se os resultados documentados referentes às simulações realizadas e comparações entre os diferentes métodos aplicados ao caso de estudo escolhido.

Por fim, o quinto e último capítulo do trabalho apresenta as conclusões inferidas pelo autor, discute resumidamente os resultados obtidos e apresenta possibilidades acerca de trabalhos futuros dentro do tema ou relacionadas ao projeto em questão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo a seguir tem como principal intuito apresentar brevemente conceitos acerca do tema do projeto proposto, baseando-se numa revisão bibliográfica desenvolvida a partir das referências do presente trabalho.

2.1 NÃO-LINEARIDADE DE COMPONENTES ELÉTRICOS

Um circuito elétrico que possua a saída diretamente proporcional à sua entrada, de acordo com Sadiku (2013) é considerado linear. Todos os componentes presentes devem satisfazer simultaneamente as propriedades da homogeneidade e da sobreposição, isto é, quando uma constante é multiplicada por uma entrada do circuito, a saída é igualmente multiplicada pela mesma constante e, além disso, a resposta a um conjunto de entradas somadas é a somatória das respostas relacionadas a cada entrada separadamente. Um circuito é linear se, considerando uma entrada senoidal de frequência f , qualquer tensão ou corrente também será senoidal e possuirá frequência f , mesmo que as amplitudes e fases do sinal de saída em questão possam ser diferentes.

Para realizar a análise de circuitos, é necessário conhecer os modelos dos seus componentes e suas características de tensão-corrente. Considerando as curvas características de um resistor linear e de um transistor de efeito de campo apresentadas na Figura 2, e as equações de (1) a (6) é possível analisar os fenômenos da linearidade e da não-linearidade de componentes elétricos. Verifica-se a linearidade do resistor quando a equação (3) demonstra a propriedade da sobreposição e (4) a propriedade da homogeneidade e ainda a não-linearidade do transistor, ao observar que (5) e (6) não seguem a propriedade da sobreposição tampouco a da homogeneidade.

$$V_1 = R * I_1 \quad (1)$$

$$V_2 = R * I_2 \quad (2)$$

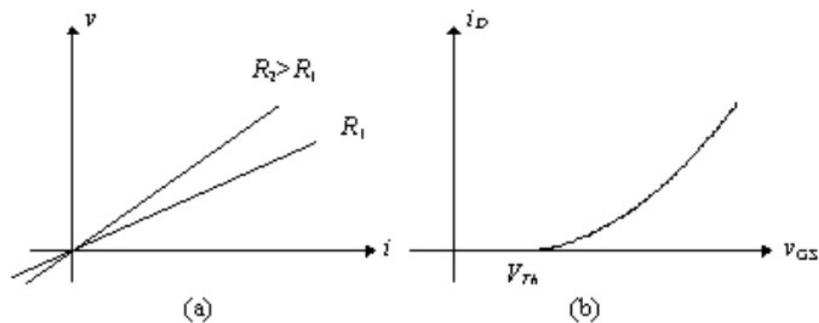
$$V_1 + V_2 = R * (I_1 + I_2) \quad (3)$$

$$k * V_1 = k * (R * I_1) \quad (4)$$

$$I_D = k * (V_{GS} - V_{th})^2, V_{GS} > V_{th} \quad (5)$$

$$I_D = 0, V_{GS} \leq V_{th} \quad (6)$$

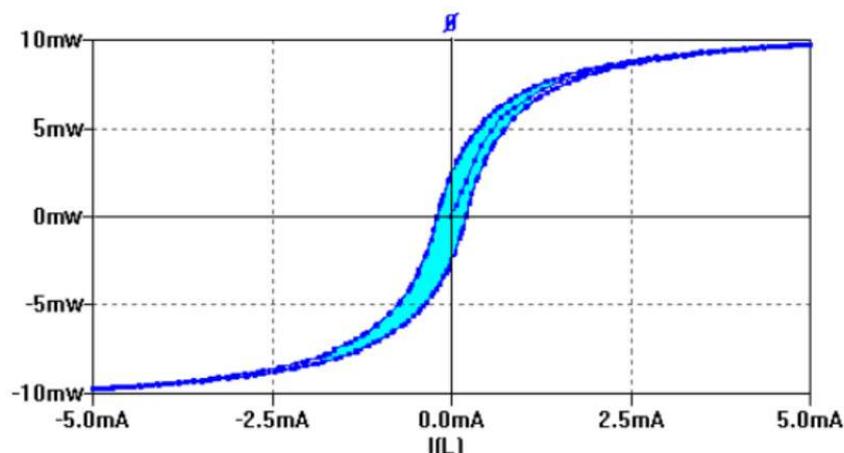
FIGURA 2. Característica tensão-corrente de uma resistência (a) e de um transistor de efeito de campo na zona de saturação (b)



FONTE: Dias (1996), UFRGS.

Os capacitores não-lineares possuem a natureza de cargas elétricas serem funções não-lineares da tensão, como por exemplo os encontrados nas junções semicondutoras em transistores e diodo. Nestes elementos, com a união de dois materiais semicondutores, há a formação de uma barreira de potencial e o aparecimento de uma capacitância parasita que irá variar com a diferença de potencial entre os terminais do componente. Ademais, uma grande gama de indutores físicos tem característica não-linear. Sabe-se que somente em uma pequena região em torno da origem os valores de corrente costumam ser lineares em relação à tensão, uma vez que para valores mais elevados de corrente, há a saturação do fluxo, ou seja, o fluxo magnético deixa de variar significativamente com a variação da corrente elétrica. O fenômeno da histerese, apresentado na Figura 3, é um dos efeitos não-lineares mais comuns, observados em núcleos ferromagnéticos.

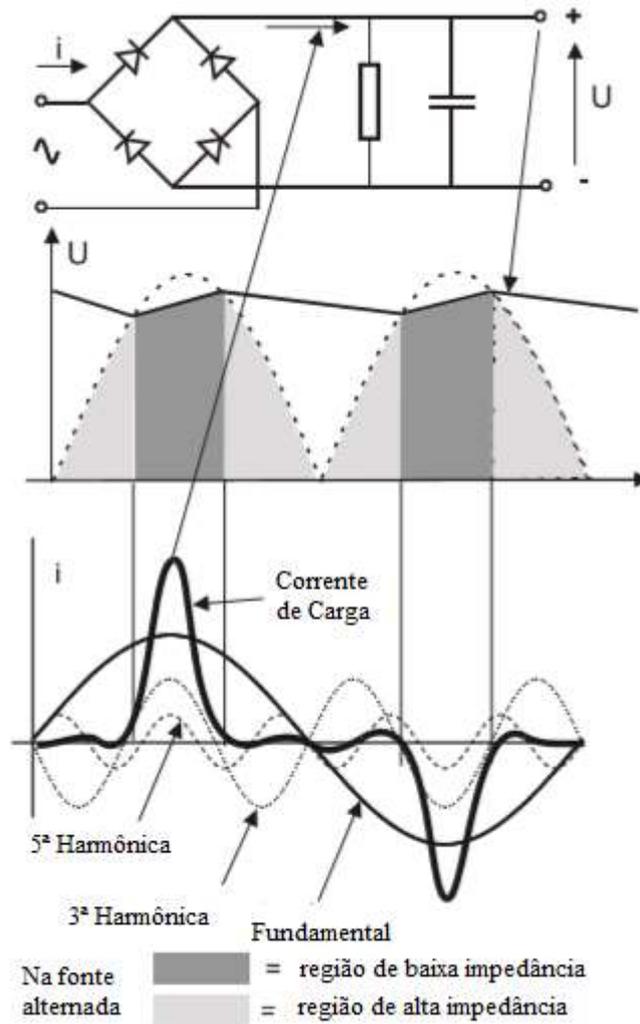
FIGURA 3. Fenômeno da Histerese.



FONTE: Pino (2019).

Um outro exemplo de carga não-linear são as compostas por uma resistência, um condensador e um diodo, encontradas na maioria das alimentações de energia utilizadas para dispositivos eletrônicos, de acordo com Schneider (2015). A corrente de carga é apresentada na Figura 4, onde foram incluídas a terceira e a quinta harmônicas.

FIGURA 4 – Tensão e corrente para cargas não lineares.



FONTE: Schneider Electric (2015) – Adaptado.

O condensador, em condições estáveis, carrega apenas quando a tensão de linha instantânea é superior à tensão nos respectivos terminais. Passando o estado do circuito de uma impedância alta (correspondente ao corte do diodo) para uma baixa impedância da carga (quando o diodo conduz). Essa variação da impedância do circuito em função da tensão aplicada, que já é senoidal, indica sua não-linearidade.

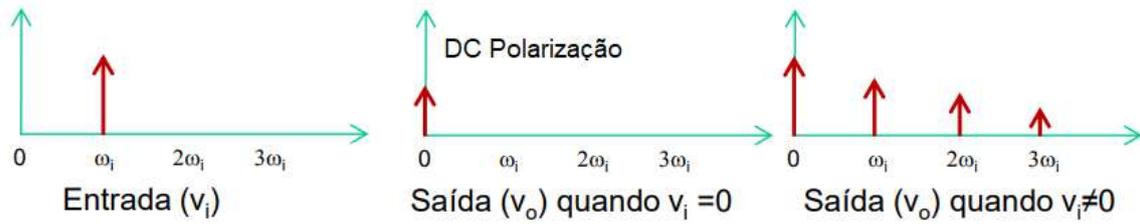
Quando a linearidade não é verificada em um sistema para determinados valores de corrente e de tensão, recorre-se à linearização dos elementos a fim de se facilitar a análise e o projeto, considerando um intervalo de valores em que a característica tensão-corrente pode ser aproximada por uma reta de inclinação igual à derivada da curva no ponto de intermédio deste intervalo, sem causar grandes erros à análise. Em circuitos com a presença de transistores, por exemplo, este ponto central do intervalo é chamado de ponto de polarização, onde realiza-se à análise de pequenos sinais.

A distorção harmônica é o principal efeito gerado pela presença de componentes não-lineares em um circuito elétrico, causando a circulação de correntes não-senoidais em equipamentos elétricos do sistema, como transformadores, cabos e reatores. Segundo Bernardes (2010), um transformador alimentando cargas não-lineares, por exemplo, tem suas perdas elétricas aumentadas em aproximadamente 8%.

2.2 COMPONENTES HARMÔNICAS

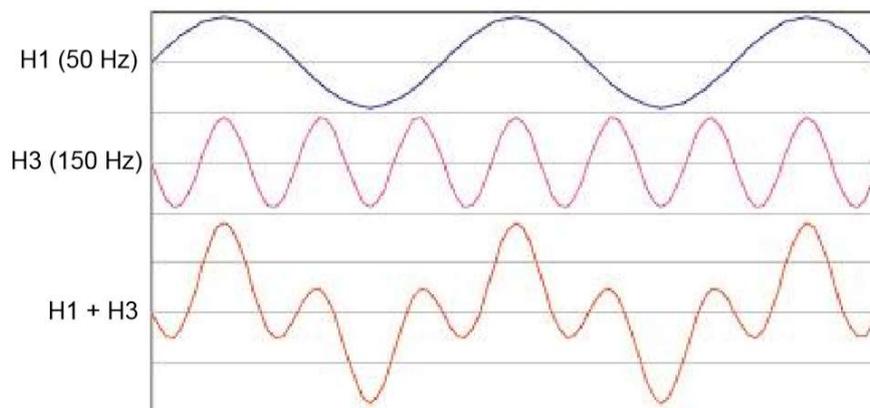
Circuitos com comportamentos não-lineares acabam distorcendo as formas de onda de tensão e corrente. Um circuito não-linear com uma entrada senoidal fornece na saída um espectro contendo o sinal original e suas harmônicas, definidas por componentes de ordem maior de frequências múltiplas inteiras que a componente periódica da série de Fourier (IEEE, 2014), ou seja, a saída do sistema é composta por, além de uma componente CC com amplitude diferente da amplitude de polarização na frequência de alimentação do circuito, e de uma componente fundamental, componentes de frequências múltiplas desta fundamental, como apresentado na Figura 5. A combinação da onda senoidal de entrada com as ondas senoidais nas frequências harmônicas gera a distorção da resposta, exemplificada na Figura 6.

FIGURA 5 – Exemplo de geração de harmônicas.



FONTE: Vitor (2004) – Adaptado.

FIGURA 6 – Distorção a Fundamental (50Hz) pela Harmônica de Terceira Ordem (150Hz).



FONTE: Schneider Electric (2015) – Adaptado

Uma distorção de forma de onda é considerada harmônica quando a deformação apresentada é constante em cada ciclo da frequência fundamental. Seu aparecimento num sistema elétrico é normalmente causado pela inclusão de componentes eletrônicos e conversores de potência como pontes retificadoras, conversores estáticos, inversores de potência, reguladores de tensão e fontes chaveadas, comuns em eletrodomésticos, microcomputadores e estabilizadores de energia (Garcia, 2001). Outras cargas, devido ao seu princípio de funcionamento, causam harmônicas num circuito, como as lâmpadas fluorescentes e dispositivos com núcleo magnético em saturação. Cargas não-lineares variáveis no tempo também produzem distorções que variam ao longo do tempo, o que pode levar ao aparecimento de frequências inter-harmônicas (ou produtos de intermodulação) além de harmônicas moduladas (Pomilio,1997), tais como de fornos a arco e compensadores reativos controlados por tiristores, como indicam Miller e Arrilaga (1982, 2003).

Em máquinas rotativas e transformadores, o maior efeito dos harmônicos é o sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos, principalmente sob forma de perdas por histerese e correntes parasitas, refletindo numa diminuição da vida útil e da eficiência dos equipamentos (Pomilio, 2017). O aumento das perdas afeta diretamente o custo da fabricação das máquinas, uma vez que implicam em possíveis sobredimensionamentos. Já nos cabos de alimentação, devido ao efeito peculiar, onde a área útil de condução de um condutor é inversamente proporcional às frequências aplicadas no circuito (Bortoluzzi, 2012), há a possibilidade de aparecimento de sobre-tensões ao longo das conexões segundo Pomilio (2017), o que pode danificar os cabos.

Excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias, aparecimento de vibrações e ruído, sobreaquecimento de capacitores e erros de medição de grandezas elétricas, de controle de conversores ou de atuação da proteção são outros exemplos de efeitos indesejados em sistemas de potência que podem aparecer com a presença de harmônicas em um sistema, como apresentado por Almonte (1995).

2.3 DISTORÇÃO HARMÔNICA E QUALIDADE DE ENERGIA

Com o aumento de cargas não-lineares conectadas à rede, os problemas associados a componentes harmônicas vêm sendo cada vez mais estudados e regulamentados, uma vez que afetam não apenas a qualidade de fornecimento de energia, mas também a operação e o controle dos sistemas. De acordo com Bhonsle (2011), as fontes de harmônicas em redes de energia elétrica se concentram em três categorias principais de equipamentos: equipamentos do sistema de potência, cargas industriais e cargas domésticas, sendo que as correntes harmônicas são geradas em pequena escala e baixo nível de distorção pelos equipamentos de geração, transmissão e distribuição, porém em maior escala pelas cargas industriais e domésticas.

Assim, o controle de harmônicas em um sistema de energia, para Pomilio e Deckmann (2011) é uma responsabilidade conjunta, que envolve usuários e proprietários ou operadores do sistema. A distorção harmônica é medida em termos de THD, com limites tanto para correntes, em função da demanda máxima da carga, quanto para tensões, estabelecidos na norma IEEE 519-1992 (IEEE, 2014) como

apresentado nas Tabelas 1 e 2. Matematicamente, a THD é representada pelas equações (7) e (8) para a tensão e corrente, respectivamente.

TABELA 1 – LIMITES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL PARA TENSÃO PELA IEEE 519

Tensão de Barra em kV	THD (%)
Até 69	5,0
115 – 161	2,5
> 161	1,0

FONTE: IEEE (2014) – Adaptado.

TABELA 2 – LIMITES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL PARA CORRENTE PELA IEEE 519

Razão de Curto-Circuito	THD (%)
<20	5,0
20-50	8,0
50-100	12,0

FONTE: IEEE (2014) – Adaptado.

$$THD_V = \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^n V_h)^2}}{V_1} \quad (7)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^n I_h)^2}}{I_1} \quad (8)$$

O THD é uma aproximação do valor eficaz da tensão harmônica normalizada (Deckmann, 2010). Pela expansão de um sinal periódico com período T caracterizado por qualquer forma de onda em série de Fourier, é possível se obter seu comportamento no domínio da frequência. A decomposição em funções seno e cosseno fornece as amplitudes e as fases das componentes harmônicas, sendo que a componente fundamental é definida por f_1 em (9) e é o inverso do período T do sinal. Considerando uma onda quadrada simétrica em torno da origem, unitária e que pode ser expressa através da série de cossenos de (9) para análise da distorção em relação à fundamental, isola-se a onda fundamental do resultado dessa série, obtendo a equação (9a).

$$v_T(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{h=2k+1} (-1)^k \frac{1}{h} \cos(h2\pi f_1 t), k = 1,2,3 \dots \quad (9)$$

$$v_T(t) = \frac{4}{\pi} \cos(2\pi f_1 t) + \frac{4}{\pi} \sum_{h=2k+1} (-1)^k \frac{1}{h} \cos(h2\pi f_1 t), k = 1,2,3 \dots \quad (9a)$$

Assim, observa-se que a amplitude da fundamental desta onda quadrada é igual a $4/\pi$. O restante dos elementos da série descrita em (9) é o sinal distorcivo, isto é, os efeitos das harmônicas na onda quadrada. Este sinal de distorção é normalizado pela onda fundamental a fim de quantificar o efeito distorcivo dessa parcela, obtendo-se o apresentado em (10), também podendo ser expresso em termos de valores eficazes (11).

$$v_{res}(t) = \frac{v_T(t) - v_1(t)}{v_1(t)} = \frac{\frac{4}{\pi} \sum_{h=2k+1} (-1)^{k+1} \frac{1}{h} \cos(2\pi f_1 t)}{\frac{4}{\pi} \cos(2\pi f_1 t)}, k = 1, 2, 3 \dots (10)$$

$$V_{res} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} (11)$$

Esta última relação pode ser comparada em (12) com a definição usual de THD designada nas normas, comprovando a equivalência entre a grandeza e o valor eficaz da tensão harmônica normalizada. De acordo com Deckmann (2010), o THD da tensão fornece uma boa indicação das amplitudes das harmônicas num sistema, pelo fato de o valor da componente fundamental ser relativamente constante, porém, para a análise do efeito das distorções da corrente, é preferível considerar os valores absolutos das harmônicas do que o THD, pelo fato da alteração da componente fundamental estar associada a variações da carga e poder ser muito significativa.

$$THD_V = \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^{50} V_h)^2}}{V_1} = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} (12)$$

2.4 SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS

De grande importância para o desempenho final de circuitos e equipamentos elétricos, a simulação é uma das principais etapas de sua fabricação e projeto, permitindo que o projetista possa estimar e analisar o comportamento do circuito, seus resultados e, caso haja necessidade, realize modificações nas especificações do circuito. Atualmente, existem diversos softwares no mercado que permitem a simulação de circuitos elétricos dependendo de sua aplicação.

Circuitos elétricos podem ser classificados como lineares e não-lineares em função do comportamento de seus componentes e de suas relações entre tensão e corrente. Em um circuito não-linear alimentado por uma fonte senoidal com uma amplitude mais baixa, faz-se valer a simulação de pequenos sinais, onde a resposta do circuito pode ser obtida pelas análises de corrente contínua e de corrente alternada associadas no entanto, para maiores amplitudes do sinal de entrada, há o aparecimento das componentes harmônicas em frequências múltiplas da frequência fundamental de excitação, e a simulação realizada passa a ser de grandes sinais, para melhor aproximação dos resultados (Natalino, 2018). Dessa forma, alguns métodos de simulação de circuitos, como o “Transitório” e o “Equilíbrio Harmônico” são adotados para se obter a resposta completa do circuito sob essas condições, composta não somente por componentes em frequências estimuladas pelas fontes independentes.

A energia elétrica utilizada para alimentação de todo e qualquer circuito depende do controle da frequência e da tensão em seu fornecimento, uma vez que sua transmissão e geração ocorrem em níveis nominalmente constantes. Assim, faz-se necessária alguma forma de condicionamento ou conversão de energia, usualmente implementada por circuitos eletrônicos que acabam por distorcer as formas de onda de tensão e corrente (Arrilaga, 2003). Devido a estas distorções nas formas de onda das respostas dos circuitos, estes não podem ser analisadas através da teoria tradicional dos fasores de única frequência, uma vez que o regime permanente é proveniente de uma somatória periódica de estados transitórios que requerem uma simulação dinâmica. A resposta na presença de harmônicas de sistemas de potência, como os de distribuição de energia elétrica, pode ser estudada por diversas técnicas analíticas (McGranaghan, 1981), como o cálculo simples de frequência de ressonância, simulações de análise de transientes na rede, e simulação digital.

Os métodos de simulação de análise harmônica podem ser fundamentados em formulações matemáticas no domínio do tempo ou no domínio da frequência, de acordo com Variz (2018). No domínio do tempo, as componentes harmônicas são calculadas através de métodos de integração numérica visando solucionar um conjunto de equações diferenciais obtido, modelando o comportamento dinâmico dos elementos e equipamentos conectados a um sistema de potência. Esta metodologia fornece resultados precisos, contudo apresenta alto esforço

computacional, mesmo para sistemas relativamente pequenos, uma vez que deve-se realizar a simulação de todo o sistema durante um longo período até o regime permanente ser alcançado, de onde serão retiradas as componentes harmônicas de tensões e correntes do sistema utilizando transformada de Fourier. Já em simulações com formulações no domínio da frequência, opera-se diretamente com os fasores de tensão e corrente, requerendo menor esforço computacional, posto que o tempo total de simulação irá depender diretamente da quantidade de harmônicas que o usuário deseja incluir na simulação e as iterações para resolução do sistema matricial obtido.

2.5 ANÁLISE NODAL MODIFICADA

Uma das principais técnicas de análise de circuitos elétricos é o procedimento conhecido como Análise Nodal. A partir dela, a análise da maioria dos circuitos elétricos pode ser realizada, após a obtenção de um conjunto de equações que resultam nos valores de tensão e corrente requeridos na análise.

Através da aplicação sistemática da Lei das Correntes de Kirchhoff e da definição da corrente elétrica em cada bipolo do circuito é possível encontrar os valores das tensões nos nós do circuito, as tensões nodais, após adotar arbitrariamente um deles como referência. A escolha dessas tensões nodais como variáveis do circuito, segundo Sadiku (2013), reduz o número de equações para resolução simultânea.

Uma das dificuldades desse método é encontrada em elementos problemáticos, os quais a equação característica não fornece uma relação explícita da corrente em função da tensão, como por exemplo as fontes de tensão. Sabendo disso, desenvolveu-se o método da “Análise Nodal Modificada” em que esse problema foi resolvido utilizando não apenas as tensões nodais como incógnitas do problema, mas também as correntes nos elementos que não fornecem um valor dessa corrente diretamente. Assim, mantendo-se todos os passos do procedimento da análise nodal geral e realizando-se essa modificação, o sistema algébrico para resolução tem sua dimensão aumentada, porém simplifica-se e otimiza-se o método.

Resumidamente, as etapas da análise nodal consistem em definir as tensões nodais e um nó de referência, onde a tensão será igual a zero, definir correntes sobre todos os elementos do circuito, incluindo os elementos problemáticos, aplicar

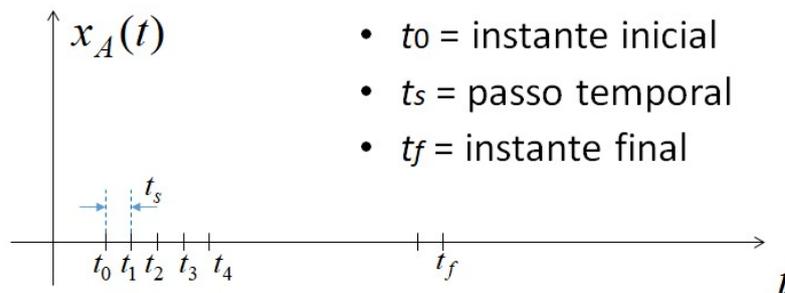
a Lei das Correntes de Kirchhoff, a qual postula que, em um circuito elétrico, a soma algébrica de todas as correntes elétricas que estão entrando em um nó é igual a soma das correntes que saem deste nó (Sadiku, 2013), em todos os nós excetuando-se o nó referência definido arbitrariamente, e utilizar as equações características de cada elemento para obter-se um sistema algébrico contendo apenas tensões nodais e correntes em elementos problemáticos como incógnitas. Após a solução do sistema por um método matemático de escolha arbitrária, é necessário relacionar os valores obtidos com os elementos do circuito, obtendo as respostas desejadas.

2.6 ANÁLISE DE TRANSITÓRIO

Simuladores de circuitos elétricos como o PSpice definem simulações realizadas em função do tempo com o termo "transitório" ou "transiente" (Sadiku, 2013), que podem ser utilizadas para obter a resposta transitória de um circuito que contenha algum elemento armazenador de energia, ou simplesmente para acompanhar o comportamento das tensões e correntes com o avançar do tempo.

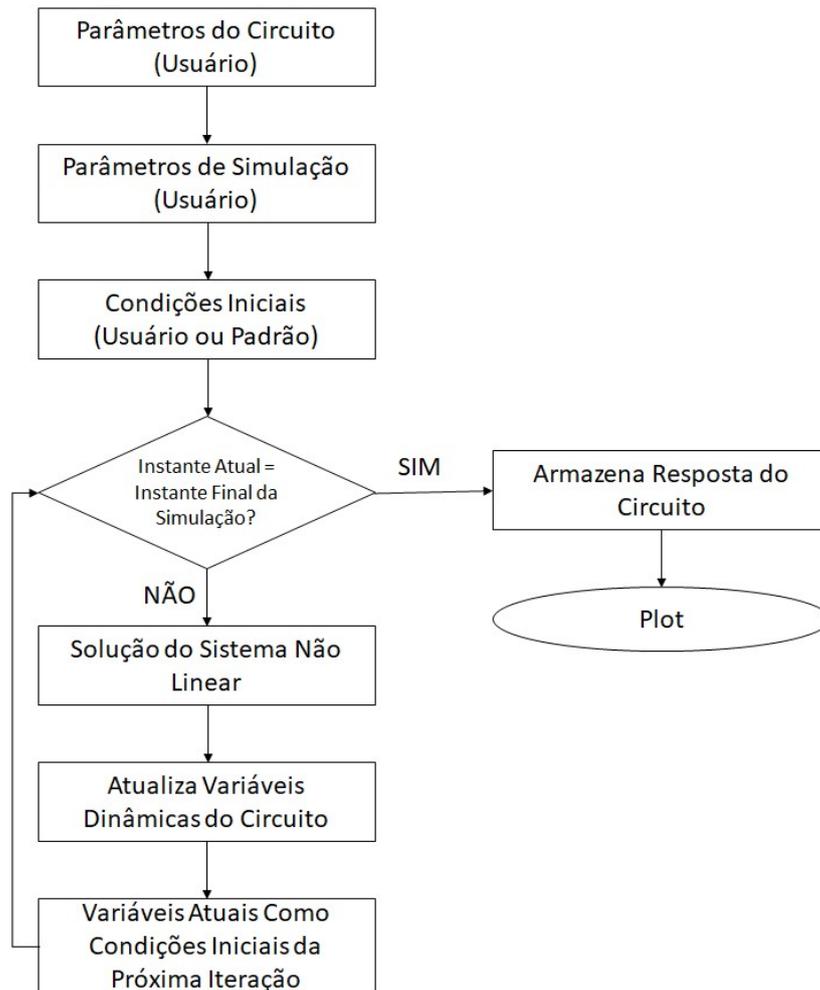
Na análise de transitório, a resposta possui dependência com as condições iniciais do circuito elétrico e varia a cada instante de tempo com incógnitas que dependem de valores anteriores, segundo Natalino (2018). Assim, uma série de iterações são realizadas na simulação, visando analisar o comportamento do componente eletrônico em função do tempo. Para desenvolver este tipo de análise o tempo é discretizado, a partir da definição de valores de tempo inicial, intervalo de amostragem e instante final ou número total de instantes de tempo decorridos (Natalino, 2019), como exemplificado na Figura 7.

FIGURA 7 – Parâmetros de Temporização e Amostragem da Simulação de Transitório.



FONTE: Lima (2016).

FIGURA 8 – Fluxograma de Implementação da Simulação de Transitório em Código.



FONTE: O autor (2019).

Além disso, métodos de integração numérica (Jahn, 2007), como o método Euler ou integração trapezoidal, são utilizados para substituir as derivadas dos elementos dinâmicos por equações algébricas. Quando há capacitores no circuito, sua corrente pode ser discretizada no tempo pelo método de integração numérica trapezoidal, representada pela equação (13), onde t_i é o instante atual da análise e t_{i-1} é o instante anterior. Para a primeira iteração da análise, utiliza-se os valores de tensão da análise CC e um valor de corrente inicial nos capacitores igual a zero, pelo fato de que nesta análise inicial o elemento capacitor comportar-se como um circuito aberto, já que não há variação de tensão no circuito (Natalino, 2018).

$$i_c(t_i) = \frac{2C}{\Delta t} [V_c(t_i) - V_c(t_{i-1})] - i_c(t_{i-1}) \quad (13)$$

Assim, a cada iteração correspondente a um instante de tempo, são obtidos os valores das incógnitas da análise nodal modificada, que irão fornecer a resposta do circuito após uma série de iterações, ou após um período decorrido. Os valores de tensão e corrente anteriores são, no fim de cada iteração, atualizados para que sejam utilizados na próxima. Um fluxograma da implementação em código dessa análise para simulação de circuitos é apresentado na Figura 8.

Como a cada instante de tempo decorrido na simulação uma solução de sistema não-linear é necessária, dependendo da não-linearidade do circuito e da temporização e amostragem da simulação, o procedimento torna-se custoso em termos de processamento computacional (Schuartz, 2018). Ademais, para cálculos de THD e outras análises de harmônicas em sistemas elétricos, uma vez que as informações devem ser retiradas do regime permanente, realiza-se uma simulação de transitório completa, para adquirir a resposta em regime permanente, posteriormente realizando uma transformada tempo-frequência e, então, obter as amplitudes das componentes harmônicas nos circuitos. Dessa forma, mesmo que a análise de transitório seja uma das mais utilizadas em projeto e simulação de circuitos, seja em circuitos estimulados por baixas ou altas frequências, existem na literatura outras simulações que podem ser mais eficientes computacionalmente.

2.7 ANÁLISE DE EQUILÍBRIO HARMÔNICO

A análise de transitório é comumente usada na simulação de circuitos eletrônicos em regime não linear, porém, para altas frequências, a quantidade de cálculos e iterações aumenta significativamente (Schuartz, 2018), recorrendo-se, portanto, a outros métodos de análises para esse tipo de excitação. A simulação de equilíbrio harmônico ou "Harmonic Balance" (HB) consiste na resolução de circuitos elétricos em grandes sinais, cujo objetivo principal transformar todas as equações no domínio do tempo obtidas através de um método de equacionamento, como a ANM, em um conjunto de equações independentes entre si no domínio da frequência (Natalino, 2018).

Assume-se que a resposta de um circuito não linear alimentado por um sinal senoidal pode ser representada por uma combinação linear de valores constantes, correspondentes a amplitudes de componentes senoidais, cossenoidais e do valor em regime permanente. Deste modo, a análise é realizada no domínio da

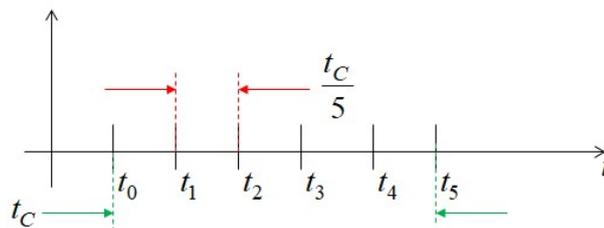
frequência, e as incógnitas da simulação são componentes espectrais, descritas por X_A , X_{ash} e X_{csh} na equação (14), respectivamente amplitudes do valor em regime permanente e das componentes senoidais e cossenoidais. H é o número de harmônicas que deseja-se considerar na simulação e ω_c a frequência fundamental do circuito.

$$x_A(t) = X_A + \sum_{h=1}^H X_{ash} \sin(h\omega_c t) + X_{ac} \cos(h\omega_c t) \quad (14)$$

Neste método, um período fundamental do sinal a ser analisado é dividido em $(2H+1)$ intervalos, onde um deles representa a amplitude em regime permanente e cada um dos demais representa uma amplitude de seno ou cosseno para cada harmônica considerada. Portanto, cada equação obtida pela ANM no domínio do tempo é substituída por $(2H+1)$ equações algébricas no domínio da frequência, a fim de aplicá-las a cada um desses intervalos e obter como resposta uma combinação linear de valores constantes correspondentes à amplitudes das componentes em frequência.

Considerando uma simulação que contemple duas harmônicas, o período fundamental seria dividido em cinco intervalos como demonstrado na Figura 9. A resposta da simulação, então, seria uma combinação linear de cinco valores correspondentes à amplitude em regime permanente, e as amplitudes de senos e cossenos para primeira e segunda harmônica.

FIGURA 9 – Amostragem do sinal no domínio da frequência considerando $H = 2$.



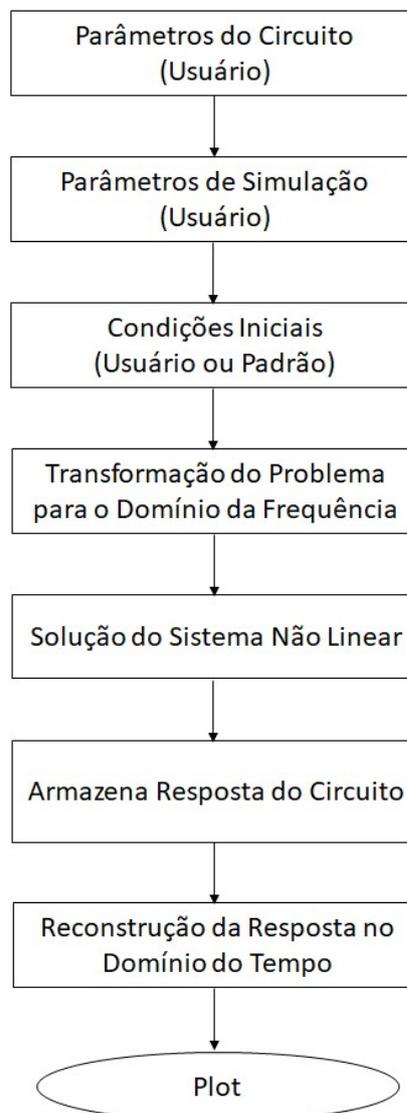
FONTE: Lima (2016).

Para circuitos não-lineares, passa-se o parâmetro não-linear para o domínio do tempo através de um procedimento semelhante à transformada de Fourier, aplicado para todas as equações algébricas do domínio da frequência, a não-linearidade de componentes nesta simulação é avaliada e, na sequência, este dado parâmetro volta para o domínio da frequência como uma equação linear. Há também

a criação de uma matriz jacobiana para os elementos dinâmicos como capacitores e indutores, já que a derivada encontrada em sua equação característica deve ser transformada no domínio da frequência linearmente (Natalino, 2019). Assim, obtém-se um único sistema linear no domínio da frequência a ser resolvido, cujo tamanho e processamento depende apenas do número de harmônicas a serem consideradas na simulação.

Como a resposta da análise é o conjunto de amplitudes em regime permanente e de senos e cossenos, é possível realizar análises de harmônicas e de espectro ou reconstrói-se o sinal no tempo a partir de (14). Por este motivo, a simulação de HB torna-se mais simples computacionalmente para execução. Mostra-se, na Figura 10, um resumo da implementação deste método em código.

FIGURA 10 – Fluxograma de Implementação da Simulação de HB em Código.



FONTE: O autor (2019).

2.8 ANÁLISE PERIÓDICA DE CORRENTE ALTERNADA

De acordo com Maas (2003), a análise periódica alternada, *periodic AC analysis* (PAC) ou análise de matriz de conversão, é uma simulação que se apresenta útil para situações em que circuitos não-lineares são estimulados por um único sinal senoidal de grande amplitude e outro sinal, de amplitude muito menor, é injetado, e procura-se a resposta linear ao pequeno sinal no circuito.

A aplicação mais comum do método está no design de misturadores e na análise de ruídos não linear em circuitos de microeletrônica e radiofrequência, porém segundo Faifer (2018), em sistemas de potência, dispositivos não-lineares estão sujeitos a um sinal de entrada contendo uma forte componente fundamental e harmônicas que são muito menores em amplitude. Assim, conclui-se que a topologia de circuitos presentes em sistemas elétricos de potência é uma das aplicações possíveis para esta simulação.

Os procedimentos da simulação PAC envolvem analisar o dispositivo não-linear apenas com a excitação de grande amplitude por algum método de análise, o qual geralmente através da simulação de HB. Após este momento, lineariza-se os componentes não-lineares, obtendo assim dispositivos lineares e variantes no tempo. Injeta-se então as fontes de pequenos sinais e, realiza-se uma análise linear de pequenos sinais no circuito. A resposta do circuito é dada pela superposição das duas análises realizadas (MOURA, 2019).

A linearização do componente não linear é realizada aplicando uma vez a derivada na equação não linear em função do valor base para a linearização (Maas, 2003), como expresso na equação (15).

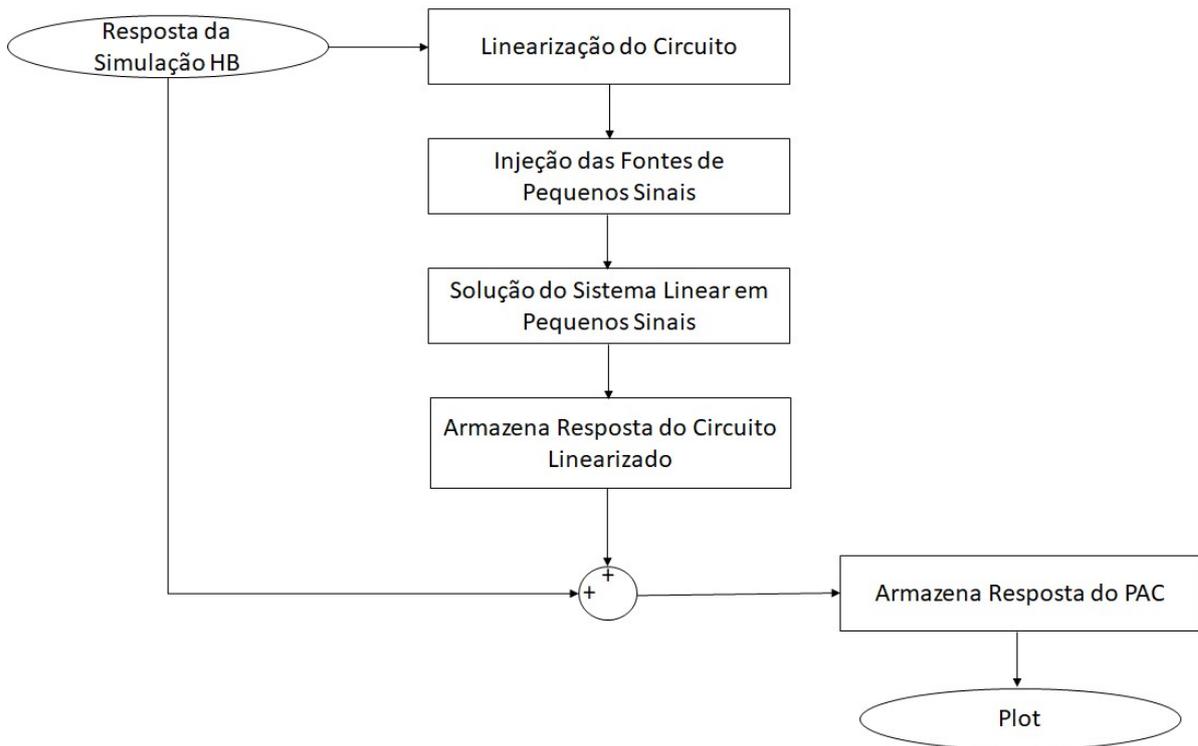
$$G = \left. \frac{\delta f(V)}{\delta V} \right|_{V_{base}} \quad (15)$$

G é um vetor de amplitudes de condutâncias com $(2H+1)$ posições, onde H é a quantidade de harmônicas consideradas na simulação, obtido a partir dos dados fornecidos pela análise de grandes sinais. A partir deste vetor, é possível montar uma matriz de condutâncias de forma que $I = \text{COND} \cdot V$ ou seja, a corrente e a tensão passam a interagir linearmente (Maas, 2003), onde I é a corrente linearizada, COND é a matriz de condutâncias que relaciona as respostas da análise de grandes sinais (de um sistema não linear) e as respostas do sistema linearizado a ser

analisado em pequenos sinais, e V é o vetor de amplitudes de tensões correspondentes à fonte de tensão da análise de pequenos sinais.

O método, segundo Maas (2003), é muito mais eficiente que a análise de equilíbrio harmônico, porém restringe-se em fornecer apenas a resposta linear do circuito, sendo aplicável a situações específicas de análise e simulação. Na Figura 11, apresenta-se a implementação do método em código através de um fluxograma.

FIGURA 11 – Fluxograma de Implementação da Simulação de PAC em Código.



FONTE: O autor (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 RECURSOS NECESSÁRIOS

No desenvolvimento do presente trabalho, recorreu-se ao software Matlab para a resolução dos sistemas de equações envolvidos nas simulações do circuito teste empregando os diferentes métodos e também para a automatização de iterações repetitivas. Esta ferramenta também pode ser substituída pelo software livre similar Octave, disponível gratuitamente para download. O Matlab é melhor desenvolvido, com editor de scripts e uma interface intuitiva e interativa, o que facilita a utilização e o entendimento ou aprendizado do usuário, se comparado com o Octave.

Ademais, o acesso à documentação citada nas referências (artigos, trabalhos de conclusão e publicações) e também a tutoriais de simuladores disponíveis no mercado e comumente utilizados por projetistas e para as análises abordadas neste trabalho foi de grande importância. Todo o material bibliográfico utilizado é disponibilizado em repositórios de livros e trabalhos acadêmicos encontrados gratuitamente na internet. Para os artigos provenientes da biblioteca virtual "IEEE Xplore", o download e acesso foram realizados em laboratórios conectados a servidores da universidade ou a partir da conta associada à Universidade Federal do Paraná.

3.2 METODOLOGIA

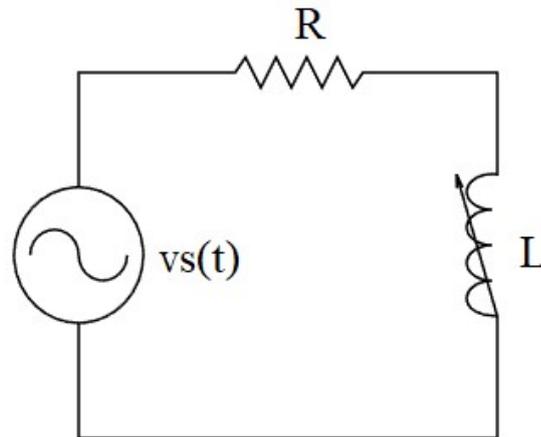
O método utilizado neste trabalho se resume em, para cada método de simulação testado, detalhar o procedimento de resolução do circuito teste, apresentando e confrontando os resultados numéricos obtidos de duas maneiras: a partir do software Matlab, atuando como pacote matemático para a resolução do sistema de equações obtido e automatização de iterações repetitivas, e de valores gerados por outro método de análise válido.

3.2.1 Circuito Teste

Uma vez que o foco principal do trabalho é a aplicação do método de simulação PAC para circuitos não-lineares dinâmicos presentes em sistemas de potência, buscou-se um circuito arbitrário que possuísse tais características e que, ao mesmo tempo, possibilitaria extrair e apresentar resultados claros da abordagem

proposta. Assim, optou-se por utilizar o circuito apresentado na Figura 12. Os parâmetros do circuito equivalente do indutor não-linear escolhido estão expostos na Tabela 3.

Figura 12. Circuito Equivalente de um Indutor Não-Linear.



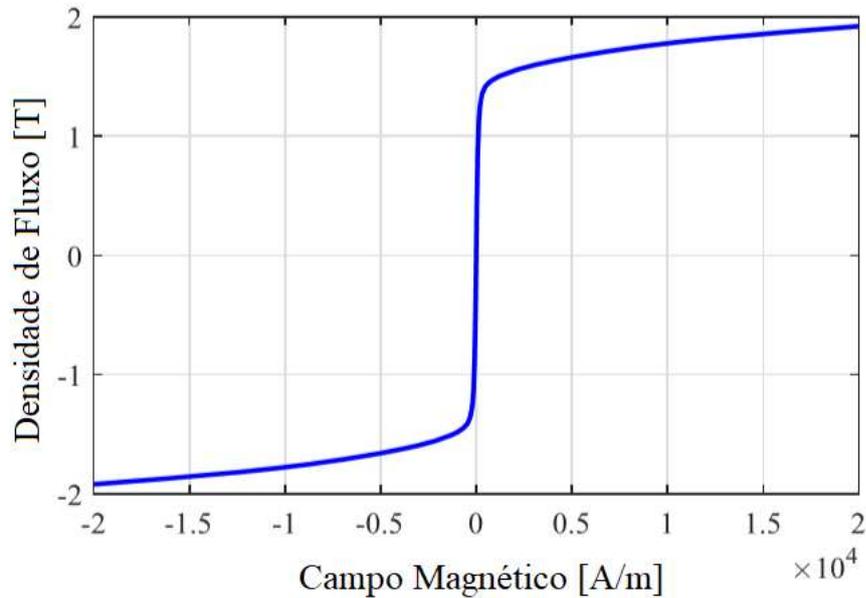
Fonte: O autor (2019).

Este caso de estudo consiste em um indutor saturável que representa uma carga passiva e não linear. A operação do indutor na região não-linear pode ser equivalente à saturação de núcleos ferromagnéticos de transformadores e máquinas eletromagnéticas, como motores e geradores.

É importante ressaltar que, para o circuito teste escolhido, a não-linearidade e a característica dinâmica do circuito estão presentes no mesmo elemento, porém o método apresentado também é válido para circuitos que possuam componentes dinâmicos e componentes não-lineares separadamente, como por exemplo um circuito de reator controlado por tiristores.

O comportamento do indutor saturável foi definido a partir da curva densidade de fluxo por campo magnético do material do núcleo apresentado por Faifer (2018) na Figura 13, similar a uma tangente hiperbólica. Deste modo, a equação característica do indutor utilizado foi deduzida, com desenvolvimento apresentado nas equações de (16) a (18).

FIGURA 13 – Curva B-H do Material do Núcleo Ferromagnético do Indutor.



FONTE: Faifer (2018) – Adaptado.

Dado o fluxo magnético de um indutor, descrito em (16), é possível, a partir da função da tensão do indutor em relação ao fluxo (17a), encontrar a equação característica do indutor não-linear explícita em (18), após operar a regra da cadeia.

$$\phi = \tanh(I_L) \quad (16)$$

$$v(t) = \frac{d\phi}{dt} \quad (17a)$$

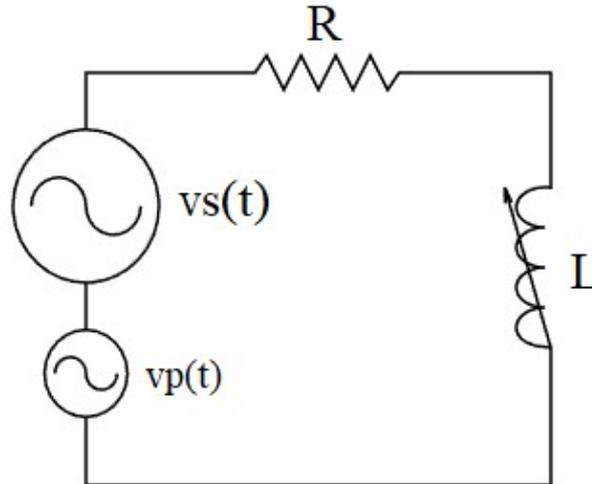
$$v(t) = \frac{d\phi}{di} * \frac{di}{dt} \quad (17b)$$

$$v(t) = \frac{d(\tanh(i))}{di} * \frac{di}{dt} \quad (18)$$

A fonte de tensão presente no circuito representa a fonte independente de alimentação do sistema, expressa por (19), onde V_s é a amplitude da tensão, f_c é a frequência fundamental do sistema e ϕ a defasagem angular da tensão v_s . A injeção de harmônicas por outras fontes de pequenos sinais $v_p(t)$ do sistema é somada à esta fonte, representando uma associação em série de fontes independentes de tensão, como exemplificado na Figura 14.

$$v_s(t) = V_s * \text{sen}(2\pi f_c t + \phi) \quad (19)$$

FIGURA 14 – Circuito Equivalente de um Indutor Não-Linear com Injeção de Harmônicas em Pequenos Sinais.

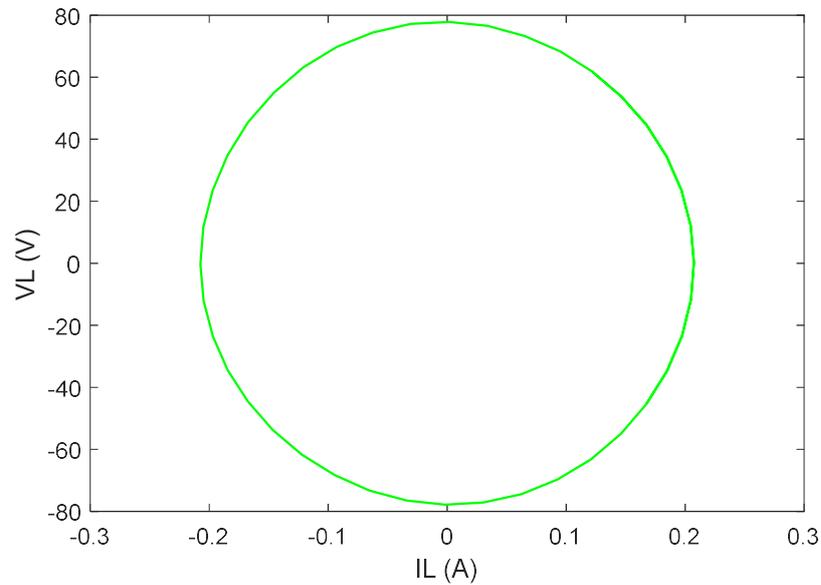


Fonte: O autor (2019).

A amplitude V_s utilizada para a fonte independente de alimentação do sistema foi definida a fim de garantir a operação do indutor em região de saturação, ou seja, assegurando a não-linearidade. Sabe-se que um indutor ideal linear possui a equação característica (20), onde $v(t)$ é a tensão no indutor, L a indutância e $di(t)/dt$ a variação da corrente em função do tempo. Isso faz com que sua corrente fique 90° atrasada em relação à tensão, mantendo sua amplitude, gerando uma curva característica tensão-corrente similar à apresentada na Figura 15.

$$v(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad (20)$$

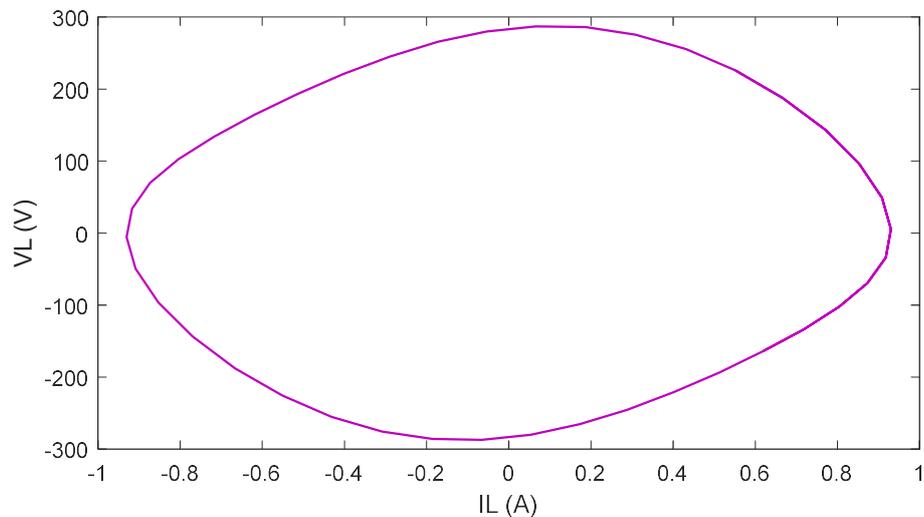
FIGURA 15 – Curva Característica Tensão-Corrente do Indutor Linear Ideal.



Fonte: O autor (2019).

Realizou-se testes, então, de amplitudes da fonte independente de alimentação do sistema, que manifestassem não-linearidade no indutor. Para o valor descrito na Tabela 3, obteve-se a curva característica tensão-corrente do indutor expressa pela Figura 16, onde é possível perceber o comportamento não-linear para o componente.

FIGURA 16 – Curva Característica Tensão-Corrente do Indutor com Comportamento Não-Linear.



Fonte: O autor (2019).

Já o valor de resistência foi escolhido visando observar-se uma defasagem da corrente em relação à tensão da fonte de aproximadamente 45 graus, isto é, para que o conjunto possua efeito dinâmico claro no circuito proveniente do indutor, gerando melhores resultados para o trabalho. Isto ocorre na faixa de valores onde a indutância é próxima de 1 e, considerou-se a frequência de excitação do sistema de 60 Hz.

TABELA 3 – PARÂMETROS DO INDUTOR NÃO-LINEAR

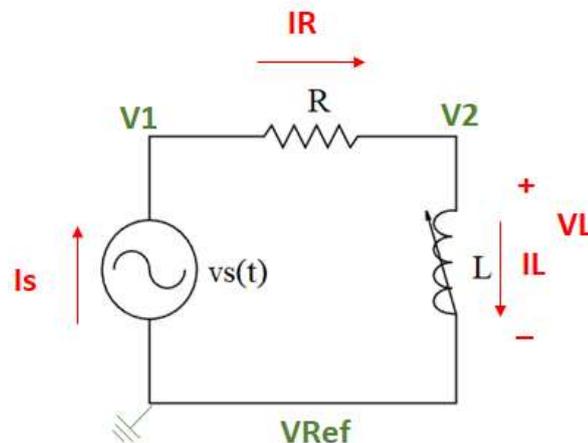
V_s	f_c	ϕ	R
440 V	60 Hz	0°	377 Ω

FONTE: O autor (2019).

3.2.2 Equacionamento

O sistema de equações algébricas não-lineares a ser resolvido em cada método de simulação foi encontrado utilizando a técnica da ANM. Utilizando os parâmetros dos componentes e as variáveis auxiliares, que são tensões e correntes sobre elementos do circuito, expressos na Figura 17, realizou-se o equacionamento descrito a seguir.

FIGURA 17 – Análise do Circuito Teste.



FONTE: O autor (2019).

Define-se como incógnitas da ANM as tensões nodais V_1 , V_2 e V_{ref} , sendo que V_{ref} é adotado como referência e, portanto, possui o valor zero, e as correntes no indutor não-linear e na fonte independente de tensão, respectivamente I_L e I_s .

Utilizando as demais variáveis auxiliares e as equações características dos componentes expressas em (21), (22) e (23), realiza-se a lei das correntes de

Kirchhoff nos nós 1 e 2 e, além disso, para cada elemento problemático, descrito na seção 2.5 desse trabalho, relaciona-se a tensão entre seus terminais com as tensões nodais. Assim, obtém-se o conjunto (24) de 4 equações que devem ser resolvidas simultaneamente durante as simulações a serem executadas.

$$V_s(t) = 440 * \text{sen}(120\pi t) \quad (21)$$

$$I_R = \frac{V_1 - V_2}{377} \quad (22)$$

$$V_L = \frac{d(\text{tanh}(I_L))}{dt} * \frac{dI_L}{dt} \quad (23)$$

$$\begin{cases} I_R - I_L = 0 \\ V_1 - V_s = 0 \\ I_R - I_s = 0 \\ V_L - V_2 = 0 \end{cases} \quad (24)$$

3.2.3 Simulações

Para todas as simulações realizadas, utilizou-se os parâmetros dados pela Tabela 4, sendo H o número de harmônicas consideradas para a simulação, f_s a frequência de amostragem da simulação e PT o número total de pontos simulados. Todas as condições iniciais utilizadas foram atribuídas como 0, que foi o padrão definido para o programa, mas poderiam assumir quaisquer valores. Ademais, o chute inicial para a resolução dos sistemas não-lineares pelo pacote *fsolve* do Matlab pode ser definido aleatoriamente, porém também foi sempre utilizado vetores de zeros como padrão de operação.

TABELA 4 – PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

H	f_s	PT
2	240 Hz	1000

FONTE: O autor (2019).

Os códigos de simulação foram então implementados, seguindo os fluxogramas apresentados para cada uma das simulações, nas Figuras 8, 10 e 11 do segundo capítulo do trabalho, utilizando o software Matlab para a resolução dos sistemas de equações envolvidos.

É importante ressaltar as variações nas equações características dos elementos encontradas de um método de simulação para outro. Como comentado na seção 2.6, na análise de transitório, a dinâmica dos componentes é discretizada no tempo a partir da integração trapezoidal, portanto, a equação característica do indutor saturável, nesta simulação, é apresentada na equação (25).

$$v_L(t) = \frac{2}{\Delta t} (\tanh(i_L(t)) - \tanh(i_L(t-1))) - v_L(t-1) \quad (25)$$

Já no equilíbrio harmônico, a dinâmica é representada por uma matriz jacobiana Ω_{HB} , a qual interpreta a derivada da equação característica do indutor não-linear para cada uma das $(2H+1)$ equações criadas no domínio da frequência. Além disso, a não-linearidade é avaliada no domínio do tempo e devolvida para o domínio da frequência através de uma matriz transformada F , que expande cada uma das $(2H+1)$ equações em uma somatória de senos e cossenos para as harmônicas consideradas na equação. Assim, a equação do indutor saturável é expressa em (26).

$$V_L = \Omega_{HB} * F * \tanh(F^{-1} * I_L) \quad (26)$$

Por fim, após a linearização do circuito em torno da resposta de equilíbrio harmônico, na simulação PAC, cria-se a matriz de condutâncias e a equação característica do indutor passa a ser linear, conforme (27). Como ainda se trata de uma análise no domínio da frequência, uma matriz jacobiana Ω_{PAC} também é empregada, porém essa deve corresponder às posições de frequências determinadas pela matriz de condutância $COND$.

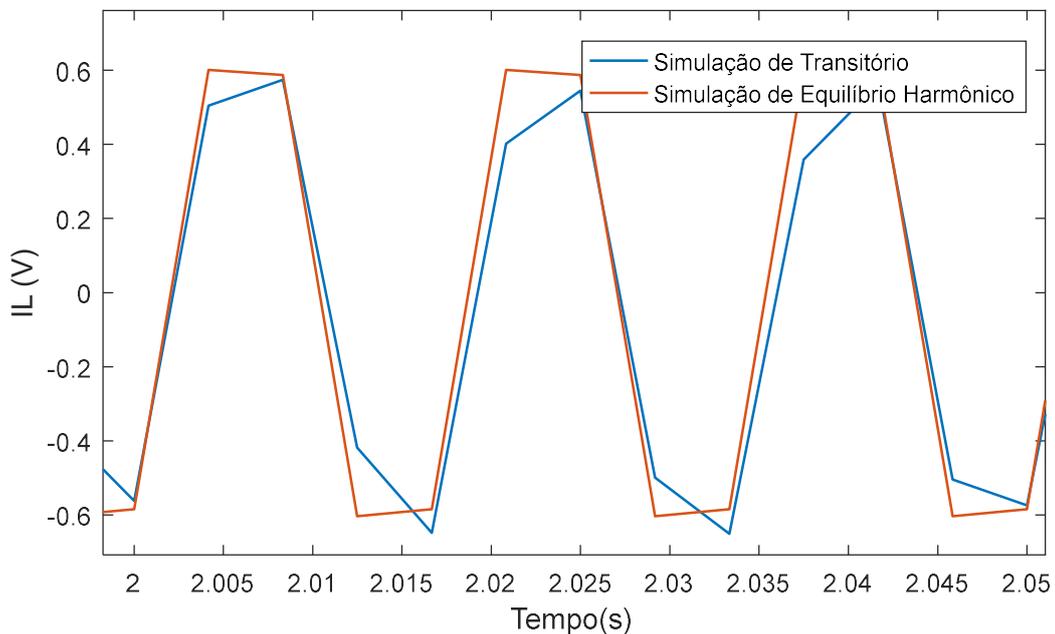
$$V_L = \Omega_{PAC} * COND * I_L \quad (27)$$

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pela aplicação das simulações descritas no capítulo 3, a fim de validar a abordagem de simulação proposta no trabalho e também realizar uma comparação dos dados e respostas obtidos nas análises de circuito desenvolvidas.

Considerando apenas a presença de uma fonte independente de tensão no circuito, ou seja, desconsiderando quaisquer fontes independentes que injetam harmônicas no circuito, apresentado anteriormente na FIGURA 12, desenvolveu-se as simulações de transitório e HB. As duas curvas foram plotadas na FIGURA 18 a fim de se confrontar as respostas de ambos os métodos, verificando sua validade, eficiência e peculiaridades.

FIGURA 18 – Resposta do Circuito Equivalente do Indutor Não-Linear para as simulações de transitório e HB.



FONTE: O autor (2019).

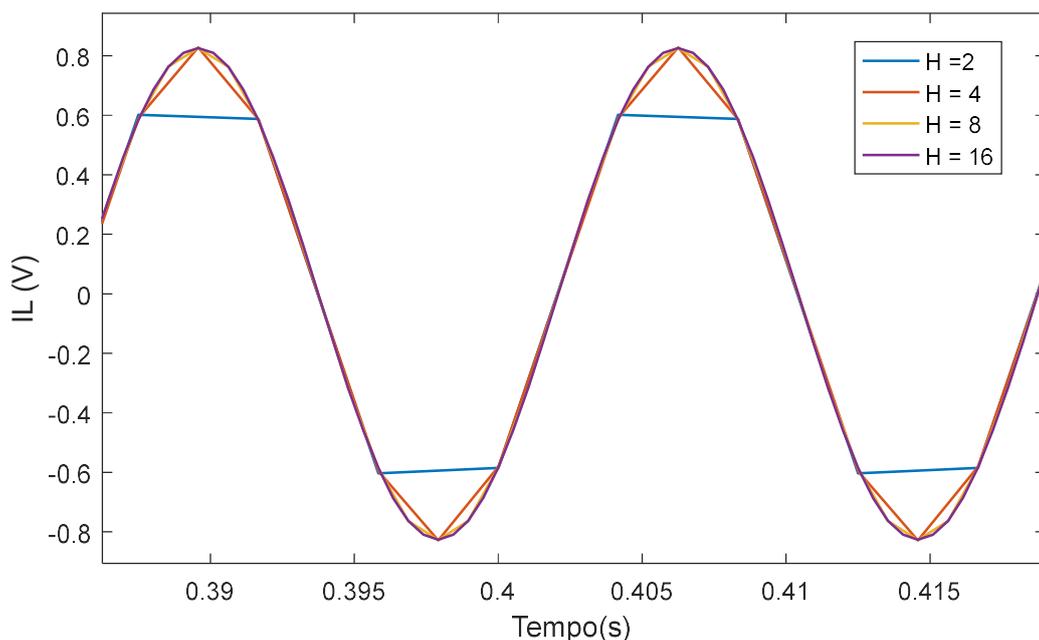
É importante ressaltar que ambos utilizaram o comando *fso/ve* do software Matlab para resolução do sistema algébrico não-linear, a partir de iterações repetitivas, ou seja, existe um pequeno erro propagado em ambas as soluções a

cada iteração. Além deste procedimento em comum nas duas simulações, alguns fatores intrínsecos de cada uma podem gerar imprecisões nas respostas

O transitório, por ser uma análise discretizada no tempo, exige que, para uma maior acurácia dos resultados, o usuário simule mas pontos. Ainda, como a discretização do comportamento dinâmico do circuito é realizado através da integração trapezoidal, é necessário simular o circuito com uma variação temporal pequena, inversamente proporcional à qualidade da resposta. Estas duas características, elevando o número de iterações e soluções do sistema não-linear, aumentam o esforço computacional da simulação que, como comprovado em literatura, já é maior que o HB.

Já na simulação HB, como a amostragem é feita em função do número de harmônicas consideradas no problema, para obter-se uma resposta mais precisa, basta-se aumentar o número de harmônicas na simulação, o que irá apenas aumentar o número de equações do sistema não-linear, que ainda deverá ser resolvido apenas uma vez, sem aumentar significativamente o custo de processamento da simulação. A dificuldade, então, se dá nas matrizes transformada e jacobiana, que possuem suas dimensões diretamente proporcionais ao número de harmônicas. O aumento da precisão na resposta é demonstrado na Figura 19.

FIGURA 19 – Acurácia da Resposta da Simulação de HB.

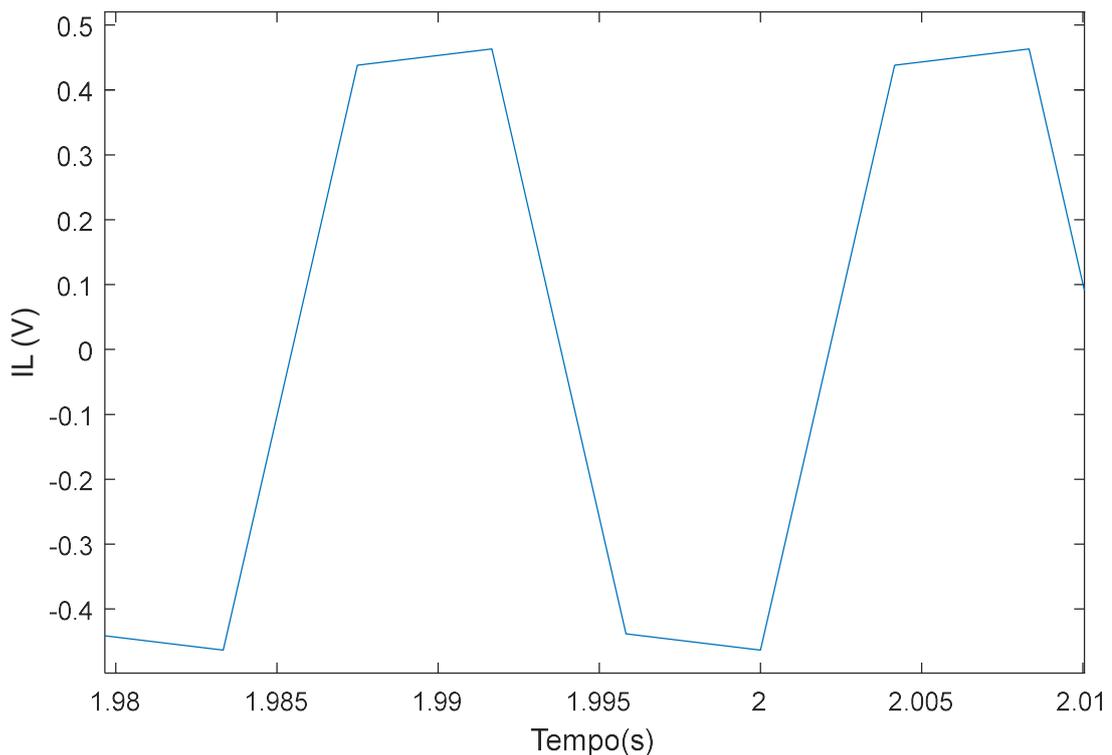


FONTE: O autor (2019).

Para um circuito onde há a injeção de harmônicas em pequenos sinais, como o demonstrado na Figura 14 e que representa a inclusão de cargas não-lineares em um sistema de potência, recorreu-se à simulação de PAC. Nas Figuras 20 e 21, apresenta-se a resposta obtida neste método e a resposta da simulação de transitório respectivamente, para uma fonte independente que injeta uma componente de terceira harmônica em pequenos sinais no sistema.

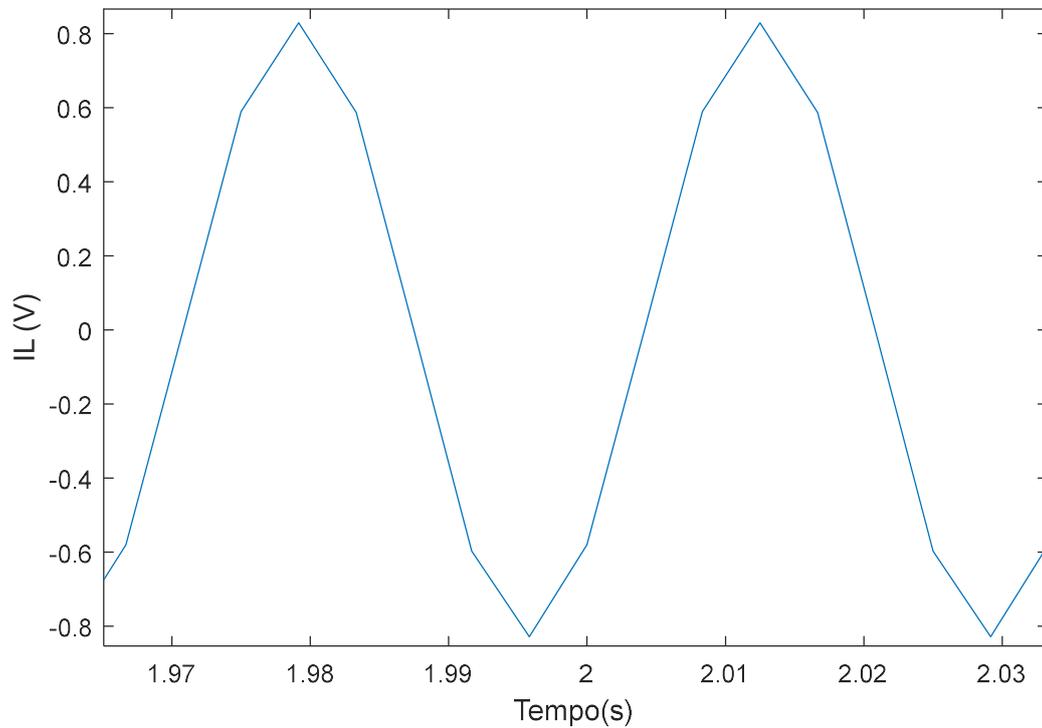
Para os três casos de fontes independentes que injetam harmônicas em pequenos sinais apresentados na Tabela 5, respectivamente, utilizou-se a métrica de tempo de simulação do software Matlab, um dos parâmetros importantes de indicação de processamento computacional de um código. Os valores são expostos na Tabela 6

FIGURA 20 – Resposta do Circuito Equivalente do Indutor Não-Linear com Injeção de Harmônicas em Pequenos Sinais para a Simulação de Transitório.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 21 – Resposta do Circuito Equivalente do Indutor Não-Linear com Injeção de Harmônicas em Pequenos Sinais para a simulação PAC.



FONTE: O autor (2019).

TABELA 5 – CASOS DE ESTUDO

Caso	Harmônicas Injetadas em Pequenos Sinais
1	2ª harmônica
2	3ª harmônica
3	5ª harmônica

FONTE: O autor (2019).

TABELA 5 – TEMPO DE PROCESSAMENTO

Caso	PAC	Transitório
1	0,2683 s	65,2265 s
2	0,2982 s	56,888 s
3	0,1675 s	61,9837 s

FONTE: O autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal a apresentação de uma abordagem de análise e simulação para circuitos dinâmicos e não-lineares presentes em sistemas elétricos de potência diferente da comumente utilizada e da comparação entre este método de simulação – o transitório – e da abordagem apresentada.

O estudo de caso escolhido, mesmo que simples em relação ao número de componentes, possibilitou analisar a influência de cada parâmetro do circuito no comportamento da resposta do mesmo numa simulação, principalmente quando existem não-linearidades no circuito ou sendo injetadas no sistema. No entanto, a escolha de um componente representando ao mesmo tempo no circuito a dinâmica e a não-linearidade pode ser considerada um desafio, uma vez que a análise do circuito se torna mais elaborada, ainda mais tratando-se de métodos no domínio da frequência, distintos dos mais empregados atualmente.

A hipótese inicial, de que o método PAC, por realizar uma superposição de duas análises, uma de grandes sinais não-linear e, posteriormente, uma de pequenos sinais para excitações em outras frequências em pequenos sinais, era aplicável à circuitos não-lineares dinâmicos presentes em sistemas elétricos de potência, foi comprovada através dos estudos e revisões bibliográficas utilizadas e da aplicação prática da hipótese, ao realizar-se a simulação PAC do circuito teste.

Ao fim das etapas da implementação dos códigos de simulação realizada, obtendo-se as respostas para o circuito em cada uma delas, destaca-se inicialmente a eficiência da simulação HB para a análise simples frente a simulação de transitório, considerando as harmônicas presentes do circuito pela não-linearidade dos componentes, sem ponderar injeções de harmônicas no sistema por outras fontes independentes.

Ademais, para os casos de fontes independentes externas ao circuito incluindo harmônicas na resposta, também se mapeou destaque da análise PAC sobre o transitório, uma vez que, após a linearização, realizou-se a solução de um sistema algébrico linear que apenas dependia do número de harmônicas consideradas no problema, enquanto a simulação de transitório completa era feita a cada análise.

Em um contexto de projeto de circuitos que possuam não-linearidades e dinâmica, sabe-se a importância da simulação de harmônicas e seus impactos em todo o sistema. Considerando que o projetista precisaria simular diversas condições de injeção de harmônicas na rede ou no circuito elétrico em questão, a simulação PAC torna-se altamente recomendável, substituindo a simulação de transitório.

Por fim, alcançou-se uma eficiência de processamento computacional maior que a observada na simulação transiente, indicada pelo tempo de simulação apresentado em ambas as análises. Ressalta-se que, com o aumento do número de componentes – principalmente os não-lineares –, a quantidade de harmônicas a serem consideradas na simulação e a variação temporal e amostragem do sinal, a discrepância entre o tempo de processamento dos dois métodos seria ainda mais visível.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem ainda algumas pesquisas a serem desenvolvidas no âmbito de simulações destes circuitos, visando ampliar o conhecimento acerca do tema e desenvolver o mercado e processos de simulação e projeto de circuitos que envolvam não-linearidades e dinâmica. Deste modo, é interessante aplicar o método apresentado neste trabalho em outros tipos de circuitos testes, com disposições diferentes, componentes com comportamentos distintos e que, de mesma forma, sofrem e fornecem impacto ao sistema.

Tendo em vista a validação do método, que já aparece, mesmo que de forma incomum, em softwares de simulação de circuito eletrônicos, mostra-se como oportunidade a implementação do PAC em simuladores de circuitos de uso amplo pela comunidade de sistemas elétricos de potência, seja no âmbito de máquinas elétricas ou dispositivos de eletrônica de potência.

Além disso, em conclusão, continuando a linha de pesquisa adotada neste trabalho, surge a oportunidade de comparar a linearização método PAC utilizando HB com a linearização a partir de um outro método similar baseado no domínio do tempo, conhecido como método do tiro ou “*shooting*”, o qual também obtém o regime permanente diretamente, sem passar pela resposta transitória, porém com simulação desenvolvida no domínio do tempo.

REFERÊNCIAS

- ALMONTE, R.L. e ASHLEY, A.W. Harmonics at the utility industrial interface: a real world example, IEEE Trans. on IA, Vol. 31, No. 6, Nov. Dec., pp. 1419-1426,1995.
- ARRILAGA, J.; WATSON, Neville R. Power System Harmonics. John Wiley&Sons, 2003.
- BERNARDES, Délvio F.; BELCHIOR, Fernando N.; JÚNIOR, Francisco J. D. M. Galvão; FARIA, Ivan P.; ABREU, José P. G.; SÁ, Jocélio S.; PARENTONI, Marcel F. C.; SILVEIRA, Paulo M.. Impacto causado pelo uso de cargas não lineares em transformadores. O Setor Elétrico, ed. 53, junho de 2010.
- BHONSLE, Deepak C., KELKAR, Ramesh B. Harmonic pollution survey and simulation of passive filter using MATLAB. International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering, IEEE, p. 230-236, 2011.
- BORTOLUZZI, Adilson P.; CARVALHO, Ricardo J. O. Efeito das distorções harmônicas na elevação de temperatura de transformadores a seco. SBSE 2012 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, mai. 2012. Goiânia, GO.
- DIAS, Victor da Fonte. Circuitos e Sistemas Electrónicos da Licenciatura em Engenharia Aeroespacial do Instituto Superior Técnico: Manual da Apoio. Oeiras, 1996.
- DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica - Distorção Harmônica: Causas, Efeitos, Soluções e Normas. Campinas, 2010.
- FAIFER, Marco; LAURANO, Christian; OTTOBONI, Roberto; PRIOLI, Marco; TOSCANI, Sergio; ZANONI, Michele. Definition of Simplified Frequency-Domain Volterra Models With Quase-Sinusoidal Input. IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers, vol. 65, no. 5, p. 1652-1663, maio de 2018.
- GARCIA, Flávio Resende. Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. IESA S/A, 2001.
- IEEE. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control of Electrical Power Systems, IEEE Standards, New York, 2014 (Revisão).
- ISONI, Marcos. A Moderna Eficientização Energética e seus Possíveis Efeitos sobre o Desempenho Operacional de Equipamentos e Instalações Elétricas – Distorções Harmônicas: Uma Revisão de Conceitos Gerais. São Paulo, 2001.
- JAHN, S.; MARGRAF, M.; HABCHI, V.; JACOB, R. QUCS–Technical Papers, 2007.
- LIMA, E.G. Computational Tools for Analysis and Design of RF Circuits. EMICRO PR: 1st Escola de Microeletrônica do Paraná. Curitiba, 2016.
- MAAS, S.. Nonlinear Microwave and RF Circuits, Artech House, 2003.

MCGRANAGHAN, M. F.; DUGAN, R. C.; SPONSLER, W. L. Digital Simulation of Distribution System Frequency-Response Characteristics. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, no 3, p. 1362-1369. Mar 1981.

MILLER, T.J.E. Reactive Power Control in Electric Systems, Ed. John Wiley&Sons, 1982.

MOURA, D.; LIMA, E. G.. Técnicas de Linearização para Circuitos Eletrônicos. 11^a SIEPE – Semana Integrada de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2019, Curitiba. Anais do EINTI-EVINCI – 2019, 2019.

NATALINO, C. G.; LIMA, E. G.. Ambientes de simulação para a análise de circuitos com estímulos a dois tons. 10^a SIEPE – Semana Integrada de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2018, Curitiba. Anais do EINTI-EVINCI – 2018, 2018. p. 401-401

NATALINO, C.; MOURA, D.; LIMA, E.. Two-tone Analysis Methods Applied to RF Circuits Simulation. In: 19th Microelectronics Students Forum, 2019, São Paulo.

PINO, Alexandre Visintainer. Circuitos Elétricos – Módulo 5. Rio de Janeiro, 2019.

POMILIO, José Antenor, DECKMANN, Sigmar Maurer. Efeito Flicker produzido pela Modulação Harmônica. SBQEE'97 - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, nov. 1997, São Lourenço, MG.

POMILIO, José Antenor. Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica. Eletrônica de Potência, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação – UNICAMP, Capítulo 4. Campinas, 2017.

SADIKU, Matthew N.; ALEXANDRE, Charles K. O. Fundamentos de Circuitos Elétricos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

SCHNEIDER ELECTRIC. Eliminação de Harmônicas em Instalações. 2015.

SCHUARTZ, L.; SANTOS, E. L.; LEITE, B. R. B. A.; MARIANO, A. A.; LIMA, E. G.. Envelope Methods Applied to Simulation of Power Amplifiers with Efficiency Enhancement Techniques. 33rd South Symposium on Microelectronics, 2018, Curitiba. Proceedings of the 33rd South Symposium on Microelectronics, 2018.

VARIZ, Abilio M.; JUNIOR, Sandoval C.; PEREIRA, José L. R.; BARBOSA, Pedro G. Cálculo do Fluxo de Harmônicos em Sistemas de Potência Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes com Solução Iterativa. Revista Controle & Automação, vol.19 no.2/Abril, p. 178-198. Maio e junho, 2008.