

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

KAUAN DE PAULO

**Plataforma de Simulação para Estudo dos Efeitos das Componentes
Harmônicas em Sistemas Elétricos Industriais**

Ilha Solteira
2024

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KAUAN DE PAULO

Plataforma de Simulação para Estudo dos Efeitos das Componentes Harmônicas em Sistemas Elétricos Industriais

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nome do orientador

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P331p Paulo, Kauan de.
Plataforma de simulação para estudo dos efeitos das componentes harmônicas em sistemas elétricos industriais / Kauan de Paulo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
49 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024

Orientador: Fabio Bertequini

Inclui bibliografia

1. Qualidade de energia elétrica. 2. Harmônicas. 3. MATLAB Simulink.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos treze dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **Kauan de Paulo**, matriculado sob o nº 1057/16, tendo como banca examinadora seu orientador, o *Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão*, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro* e o *prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Plataforma de Simulação para Estudo dos Efeitos das Componentes Harmônicas em Sistemas Elétricos Industriais**" obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito APROVADO

Fábio Bertequini Leão

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão

- orientador -

Kauan de Paulo

Kauan de Paulo

- discente -

Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro

- membro da banca -

Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo

- membro da banca -

RESUMO

O trabalho de graduação focou no desenvolvimento de uma plataforma de simulação para estudar os efeitos das componentes harmônicas em sistemas elétricos industriais, com ênfase na qualidade de energia elétrica (QEE). Harmônicas, geradas por cargas não-lineares como conversores de frequência, provocam distorções em formas de onda de tensão e corrente, impactando negativamente o desempenho de instalações elétricas. O objetivo principal foi implementar um sistema no Matlab Simulink para simular a inserção de harmônicas, e analisar seus impactos. A metodologia incluiu a modelagem de um sistema industrial, a criação de uma fonte trifásica de correntes harmônicas e o uso de ferramentas matemáticas, como a análise de Fourier, para decomposição de sinais e avaliação do impacto das cargas não-lineares. Ao final deste trabalho, foram feitos alguns testes e estudos de casos, avaliando o desempenho da plataforma de simulação que foi criada.

Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica. Harmônicas. Matlab Simulink. Análise de Fourier. Sistemas Industriais.

ABSTRACT

The work focused on the development of a simulation platform to study the effects of harmonic components in industrial electrical systems, with an emphasis on electrical energy quality (EEQ). Harmonics, generated by non-linear loads such as frequency converters, cause distortions in voltage and current waveforms, negatively impacting the performance of electrical installations. The main objective was to implement a system in Matlab Simulink to simulate the insertion of harmonics and analyze their impacts. The methodology included modeling an industrial system, creating a three-phase source of harmonic currents, and using mathematical tools, such as Fourier analysis, for signal decomposition and evaluation of the impact of non-linear loads. At the end of this work, some tests and case studies were conducted, evaluating the performance of the simulation platform that was created.

Keywords: Power Quality. Harmonics. Matlab Simulink. Fourier Analysis. Industrial Systems.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.2 Estudo e caracterização das componentes harmônicas	11
3 DESENVOLVIMENTO da plataforma de simulação.....	14
4 TESTES E RESULTADOS.....	25
4.1 Primeiro teste de validação	25
4.2 Segundo teste de validação	30
4.3 Primeiro caso de estudo.....	35
4.4 Segundo caso de estudo.....	41
5 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Os sinais de tensão ou corrente em uma instalação elétrica podem ser alterados em função de muitos fatores tais como partida de motores, chaveamento de grandes cargas, emprego de equipamentos eletrônicos cujo princípio de funcionamento utiliza eletrônica de potência, fornos a arco etc. De modo geral, para qualquer problema que altere a tensão, corrente ou frequência em relação aos seus valores nominais pode-se dizer que existe um problema de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) (H. Moreno, 2019], (R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, 2002) Os impactos causados devido a problemas de QEE podem incluir principalmente sobrecargas, perda de dados, falhas de operação e atuações inesperadas de dispositivos de proteção (H. Moreno, 2019).

O termo Qualidade de Energia Elétrica é aplicado a uma grande variedade de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas de potência conforme (R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, 2002)

Apesar do amplo espectro dos fenômenos que podem ocorrer em sistemas elétricos relacionados a QEE, neste projeto de trabalho de graduação o foco será o estudo de fenômenos relacionados a deformação das formas de onda de tensão e corrente conhecidas como harmônicas.

Para o estudo de componentes harmônicos é necessário conhecer o conceito de cargas lineares e cargas não-lineares, visto que os fenômenos de distorções harmônicas são encontrados somente em dispositivos que possuem um comportamento de carga não linear.

Uma carga é dita linear, quando a forma de onda da tensão e da corrente são similares, bem como a corrente que circula pela carga é diretamente proporcional a tensão aplicada. De forma geral, as cargas lineares são formadas por resistores, capacitores de valores fixos e indutores não saturáveis. Em (R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, 2002) os autores definem as cargas não-lineares como sendo aquelas na qual a corrente não é proporcional a tensão aplicada ou ainda que as cargas não-lineares são cargas nas quais a corrente que ela absorve não possui a mesma forma de onda da tensão que a alimenta.

Com o aumento da utilização de cargas não-lineares, tanto no uso industrial, comercial ou até mesmo residencial, as formas de onda de corrente e tensão que naturalmente deveriam ser puramente senoidais, têm sofrido distorções chamadas de

distorções harmônicas. A análise deste fenômeno tem sido cada vez mais necessária para avaliar a qualidade de energia elétrica e identificar potenciais efeitos que podem ter como causa primária a existência de harmônicas.

As harmônicas são componentes de tensão ou corrente periódicas, com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental da fonte de alimentação que normalmente é 50Hz ou 60Hz (R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, 2002). As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST, 2021).

As harmônicas são consideradas fenômenos de estado permanente, porém, alguns efeitos instantâneos devido a eventos e surtos com harmônicas de alta frequência podem causar variações na QEE, o que pode vir a ocasionar mal funcionamento de equipamentos eletrônicos mais sensíveis. Os limites estabelecidos para distorções harmônicas em sistemas de potência são definidos levando-se em conta os efeitos provocados a longo prazo. Na norma IEEE 519 (IEEE, 2014) e no PRODIST (PRODIST, 2021) são definidos limites recomendados de harmônicas em sistemas elétricos.

De modo geral as harmônicas são geradas por cargas não-lineares, como conversores de frequência e outros dispositivos eletrônicos, que são cada vez mais utilizados devido a evolução tecnológica atual. As cargas não lineares podem ainda ser divididas em convencionais e chaveadas. As convencionais são caracterizadas pela ausência de interruptores estáticos, como transformadores, máquinas elétricas, reatores de núcleo ferromagnético saturados e fornos elétricos a arco. Por outro lado, as cargas não-lineares chaveadas, fazem o uso de diodos, transistores e tiristores que, de forma geral, operam em modo de interrupção ou bloqueio. As cargas chaveadas são amplamente utilizadas, como por exemplo, retificadores (ca-cc), conversores (cc-ca), cicloconversores (ca-ca), acionamentos eletrônicos de velocidade variável, fontes de computadores etc. No uso industrial podem-se citar como principais cargas não-lineares retificadores trifásicos, inversores de frequência e variadores de velocidade, fontes de alimentação monofásicas, máquinas de solda, conversores trifásicos, entre outras (H. Moreno, 2019).

A utilização de cargas não-lineares não se restringe somente a aplicações industriais e podem ser amplamente encontradas em uso doméstico e comercial, como fontes de computadores e reatores de lâmpadas monofásicas. Em instalações

comerciais e residenciais é comum encontrar a presença de fontes chaveadas que, por natureza, geram um alto conteúdo harmônico de 3a ordem na forma de onda da corrente. Os harmônicos de ordem tripla, aumentam a circulação de corrente pelo neutro, fator de preocupação para instalações elétricas, que podem não ter sido dimensionadas adequadamente para esta condição (ABNT NBR 5410, 2004). Os transformadores também podem sofrer um sobreaquecimento em função da combinação do conteúdo harmônico da corrente, fluxo de dispersão e elevada corrente de neutro. Adicionalmente outros efeitos podem ocorrer nas instalações devido a inserção de harmônicas como aquecimentos excessivos principalmente em cabos elétricos e barramentos, atuação intempestiva de dispositivos de proteção, ressonância, aumento da queda de tensão e redução do fator de potência industrial (H. Moreno, 2019).

A qualidade de energia elétrica e os distúrbios a ela associados, desempenham um papel crescente e de relevante importância dentro do cenário elétrico atual. Isso se justifica pelo aumento significativo das cargas não-lineares citadas, onde o conhecimento aprofundado deste assunto é de vital importância para os engenheiros e técnicos que, de alguma forma, estão envolvidos com desenvolvimento, execução ou manutenção de equipamentos e instalações elétricas em geral. A qualidade de energia elétrica reflete em um adequado funcionamento das instalações elétricas sobremaneira as do setor industrial, máquinas e equipamentos, eficiência, vida útil prolongada, economia e segurança do pessoal envolvido.

Neste trabalho de graduação foram feitas simulações a partir do software “Matlab Simulink” de maneira a observar visualmente as distorções geradas nas formas de onda que estão contaminadas com harmônicas. Além da visualização, este trabalho tem como propósito permitir a análise de alguns casos específicos que foram descritos ao longo deste trabalho. Foram analisados o fator K de transformadores, a corrente circulante no neutro do transformador devido a presença de harmônicas, a THD% (*Total Harmonic Distortion*), entre outros aspectos explorados neste trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, serão abordados alguns conceitos para familiarizar o leitor com as principais equações e definições necessárias, para que se possa aproveitar ao máximo o conteúdo deste trabalho.

2.2 ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

As componentes harmônicas podem ser caracterizadas matematicamente empregando a análise de Fourier que foi desenvolvida em 1822 pelo matemático francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Esta ferramenta matemática utiliza um processo de conversão da forma de onda no domínio do tempo em suas componentes representadas no domínio da frequência. Em (R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, 2002) os autores se referem as Séries de Fourier como sendo uma forma de onda periódica, representada pelo somatório de ondas senoidais puras, na qual a frequência de cada senoide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda original. A cada múltiplo inteiro da frequência fundamental, que compõe o sinal original, é atribuído o nome de harmônico. Portanto a análise de Fourier é empregada para identificar os componentes de frequência em uma forma de onda não senoidal. A frequência, amplitude e fase de cada componente podem ser determinados por esta ferramenta matemática, amplamente utilizada nas aplicações práticas de ciências e de engenharia.

Em termos de QEE, a “distorção” se refere à deformidade da forma de onda da tensão ou corrente alternada senoidal. Os indicadores harmônicos têm o objetivo de mensurar a conformidade ou desvio de uma onda distorcida em relação a sua fundamental senoidal tanto de tensão quanto de corrente, além de permitir a avaliação do desempenho da instalação como um todo. Dentre os indicadores mais empregados tem-se a THD de tensão ou corrente, e a TDD (Total Demand Distortion) especificamente para distorções na corrente (IEEE, 2014). Indicadores individuais de harmônicas de tensão e corrente também podem ser utilizados tendo como referência os sinais senoidais fundamentais. A THD% de tensão ou corrente, conforme (R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, 2002), pode ser calculada como:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (1)$$

Onde M_h é o valor RMS do componente harmônico h da grandeza M , e M_1 é o valor RMS da fundamental.

Ainda conforme (R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, 2002), a taxa de distorção da demanda TDD é utilizada para avaliar o nível de injeção de correntes harmônicas no sistema com base na capacidade da instalação e é geralmente analisada no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Ela é expressa como um percentual da média dos últimos 12 meses da demanda máxima mensal da corrente fundamental, medida em intervalos de 15 a 30 min. Uma instalação com nível de TDD abaixo do limite estabelecido na norma não provocará um impacto significativo de distorção de tensão. No caso de instalações novas, onde a média da demanda máxima ainda não pode ser calculada, a TDD pode ser estimada utilizando-se a corrente de plena carga do transformador. A TDD% pode ser calculada como:

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

Sendo I_L a carga de demanda máxima, ou corrente de pico, da componente de frequência fundamental medida no ponto de acoplamento comum (PAC).

O fator K é um coeficiente que descreve o calor adicional que ocorre em um transformador que alimenta cargas não lineares. O projeto de um transformador leva em consideração o aquecimento provocado por correntes senoidais de 60Hz, mas com a presença de harmônicas, o transformador sofrerá um aquecimento adicional, gerado pelas correntes harmônicas adicionais nos enrolamentos, que poderá levá-lo a redução de vida útil ou avaria. Qualquer transformador que trabalhe alimentando cargas não-lineares deve ser avaliado a fim de se verificar se ele está operando dentro dos limites nominais ou se está operando em condição de sobrecarga. O fator K de um transformador é um dos fatores utilizados para avaliar sua capacidade de alimentar cargas ricas em harmônicas.

O fator K de um transformador está relacionado a sua capacidade de lidar com diversos níveis de cargas não-lineares, sem exceder os limites de elevação de temperatura nominal. Os transformadores convencionais possuem fator K=1. Quanto

maior for o fator K, maior será a sua capacidade de lidar com correntes distorcidas por componentes harmônicas. O fator K não está linearmente relacionado com a ordem das harmônicas, ou seja, um transformador com fator K=3 não significa que ele é tolerante às harmônicas de 3ª ordem e sim, que ele é 3 vezes mais tolerante às correntes harmônicas se comparado a um transformador com fator K=1. Conforme [H. Moreno, 2019] o fator K de transformadores pode ser calculado como:

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{RMS} \cdot \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Sendo: I_{pico} a corrente de pico do sinal; I_{RMS} a corrente eficaz do sinal.

Na equação (3) FC é o Fator de Crista do sinal definido pela razão direta entre os valores de pico e eficaz do sinal. Para sinais puramente senoidais o FC é $\sqrt{2} = 1,414$, o que resulta em K=1, enquanto para sinais não senoidais com presença de componentes harmônicas o FC tende a ser maior do que 1,414 o que resulta em K>1. A partir da equação (3) a máxima potência fornecida por um transformador existente submetido a componentes harmônicas, segundo (H. Moreno, 2019), pode ser calculada como:

$$S_{max} = \frac{S_{Nominal}}{K} \quad (4)$$

Note que para K>1 a potência máxima do transformador é reduzida devido a presença de componentes harmônicas no sinal.

3 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Inicialmente utilizou-se do software “Matlab Simulink” para simular desde a subestação, até uma indústria genérica.

Para simular a barra infinita, utilizou-se do bloco “Three-Phase Source” que foi configurado de maneira a fornecer para o circuito uma tensão trifásica de 138kV, com frequência de 60Hz, potência de curto-circuito trifásico de 800MVA e relação $X/R = 20$.

Imediatamente após este bloco, foi conectado o bloco “Three-Phase Transformer”, representando o transformador abaixador que conecta a subestação com a linha de transmissão (Transformador 1). Este transformador está configurado de modo a abaixar a tensão para 13,8kV, sua potência nominal é de 5MVA, frequência de 60Hz e sua ligação é delta/estrela aterrado.

No lado secundário do Transformador 1, foi conectado o bloco “Three-Phase Series RLC Branch”, que foi configurado de modo a simular uma linha de distribuição de 500m.

O próximo bloco conectado foi o “Three-Phase VI Measurement”, responsável por medir as formas de onda de tensão e corrente no lado primário do transformador que conecta a linha de distribuição com a indústria (Transformador 2).

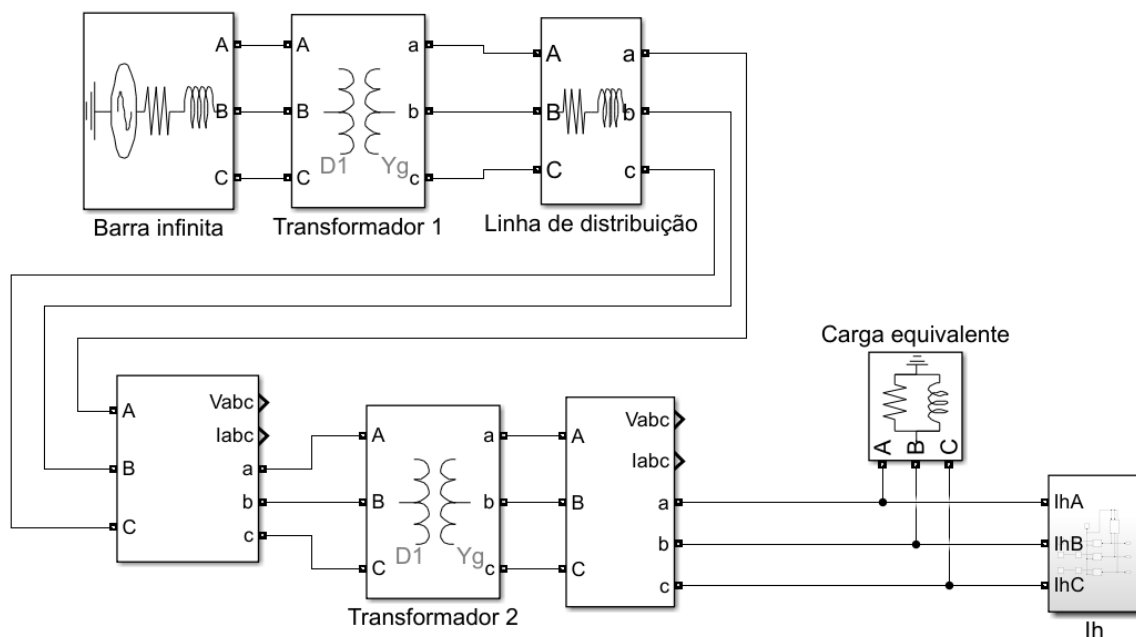
Conectado a este bloco, foi inserido mais um bloco “Three-Phase Transformer”, que irá representar o transformador 2. Este transformador está configurado de modo a abaixar a tensão para 380V, sua potência nominal é de 1500kVA, frequência de 60Hz e sua ligação também é delta/estrela aterrado.

Na sequência, adicionou-se outro bloco “Three-Phase VI Measurement”, que será responsável por medir as formas de onda de tensão e corrente no lado secundário do transformador 2.

O próximo bloco inserido foi o “Three-Phase Parallel RLC Load” que simulará a carga equivalente da indústria alimentada pelo sistema. Este bloco foi configurado com uma potência instalada de 800kVA, fator de potência de 0,94 e tensão de operação de 380V.

Por último, foi conectado também ao lado secundário do transformador que liga a linha de transmissão com a indústria, o circuito que irá injetar as harmônicas no sistema (Ih). Na Figura 1 é ilustrado o circuito até este ponto.

Figura 1 – Montagem do circuito.

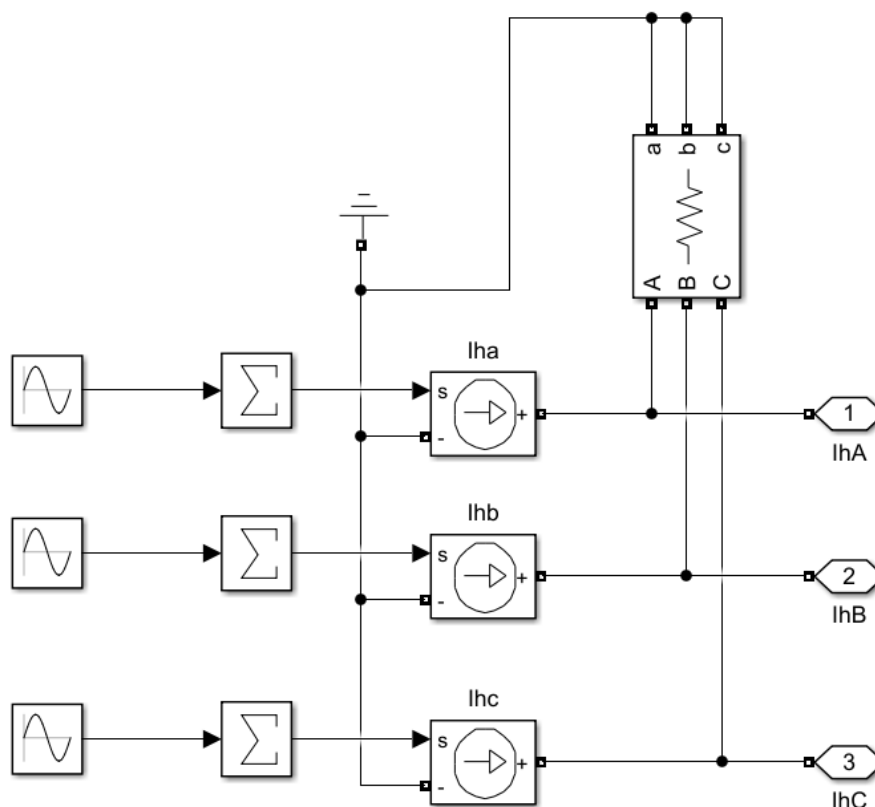


Fonte: Próprio autor.

Sendo o bloco “Ih” o circuito que irá inserir as harmônicas no sistema e seu circuito interno pode ser visualizado na Figura 2. A ideia deste bloco é simular a inserção de diversas ordens harmônicas equivalente a inserção de cargas não-lineares no sistema elétrico.

Note que a presença deste bloco, elimina a necessidade de se dimensionar qualquer carga geradora de harmônicas, sendo apenas necessário configurar o bloco “Ih” e selecionar quais harmônicas e quais suas magnitudes deseja-se injetar no sistema elétrico

Figura 2 – Circuito de inserção de harmônicas



Fonte: Próprio autor

Neste circuito pode-se observar três blocos “Sine Wave”, cada um é referente a uma fase. Estes blocos irão gerar os sinais equivalentes as harmônicas que serão injetadas no sistema. Cada bloco representa a injeção de harmônicas em cada uma das fases do sistema industrial. Neste trabalho considerou-se que as harmônicas são injetadas de forma simétrica e equilibrada e, portanto, estes blocos estão injetando sinais de corrente com mesma amplitude e defasados de 120° entre si. As configurações dos blocos podem ser visualizadas nas Figuras 3a, 3b e 3c.

Figura 3a – Configuração do bloco “Sine Wave” Fase A

Block Parameters: Sine Wave

Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} \cdot \sin(\text{Freq} \cdot t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameters in the two types are related through:

Samples per period = $2 \cdot \pi / (\text{Frequency} \cdot \text{Sample time})$

Number of offset samples = $\text{Phase} \cdot \text{Samples per period} / (2 \cdot \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude:

$(8e5/(\sqrt{3} \cdot 380)) \cdot [h3 \ h5 \ h7 \ h9 \ h11 \ h13 \ h15 \ h17 \ h19] \cdot \sqrt{2}$

Bias:

[0 0 0 0 0 0 0 0]

Frequency (rad/sec):

$(2 \cdot \pi \cdot 60) \cdot [3 \ 5 \ 7 \ 9 \ 11 \ 13 \ 15 \ 17 \ 19]$ <1x9 double>

Phase (rad):

0

Sample time:

0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Fonte: Próprio autor.

Figura 3b – Configuração do bloco “Sine Wave” Fase B

Block Parameters: Sine Wave1

Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} \cdot \sin(\text{Freq} \cdot t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameters in the two types are related through:

Samples per period = $2 \cdot \pi / (\text{Frequency} \cdot \text{Sample time})$

Number of offset samples = $\text{Phase} \cdot \text{Samples per period} / (2 \cdot \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude:

$(8e5/(\sqrt{3} \cdot 380)) \cdot [h3 \ h5 \ h7 \ h9 \ h11 \ h13 \ h15 \ h17 \ h19] \cdot \sqrt{2}$

Bias:

[0 0 0 0 0 0 0 0]

Frequency (rad/sec):

$(2 \cdot \pi \cdot 60) \cdot [3 \ 5 \ 7 \ 9 \ 11 \ 13 \ 15 \ 17 \ 19]$ <1x9 double>

Phase (rad):

$(-2 \cdot \pi / 3) \cdot [0 \ -1 \ +1 \ 0 \ -1 \ +1 \ 0 \ -1 \ +1]$ <1x9 double>

Sample time:

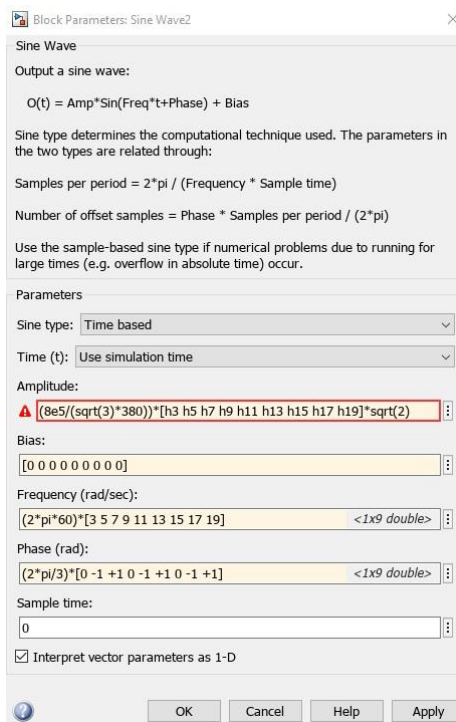
0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Fonte: Próprio autor

Figura 3c – Configuração do bloco “Sine Wave” Fase C



Fonte: Próprio autor

Note que o campo “Amplitude” deve ser igual para as três fases, e h3, h5, h7.... representam a magnitude da harmônica que se deseja injetar no sistema. Por exemplo, para injetar 20% de harmônicas de 3ª ordem e 15% de harmônicas de 5ª ordem, o campo amplitude deve ser preenchido com a potência trifásica total da carga, a tensão de linha do sistema e o percentual de cada harmônica, ou seja, $(8e5/(\sqrt{3}*380))*[0.2 \ 0.15 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]*\sqrt{2}$.

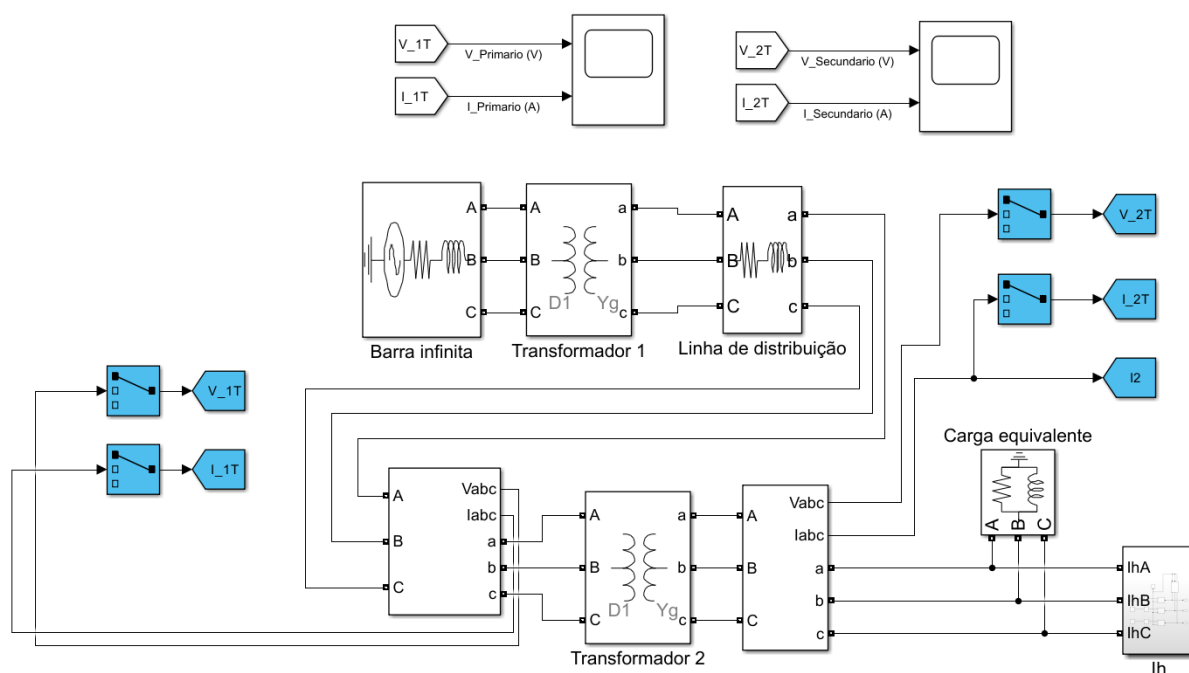
Uma vez que os sinais estão configurados, tem-se o bloco “Sum” que faz a soma ponto a ponto de cada harmônica considerada e une em um único sinal deformado. Por fim cada sinal distorcido passa pelo bloco “Controlled Current Source” que tem a função de converter o sinal senoidal que está recebendo de entrada e transformá-lo em um sinal equivalente de corrente.

As harmônicas injetadas no sistema elétrico estão em fase com a tensão da barra infinita.

Existe um último bloco adicional neste circuito, que é o bloco “Three-Phase Series RLC Branch” que precisou ser adicionado para que o Simulink permitisse a conexão do circuito gerador de harmônicas com o circuito externo. Foi configurado com resistência muito alta para que não haja fluxo de corrente neste bloco.

Agora que o circuito é capaz de inserir harmônicas no sistema, adicionou-se alguns blocos auxiliares para obter-se as formas de ondas do primário e secundário do transformador 2. Na Figura 4 são ilustradas as implementações feitas.

Figura 4 – Blocos responsáveis por obter as formas de onda no primário e secundário do transformador



Fonte: Próprio autor.

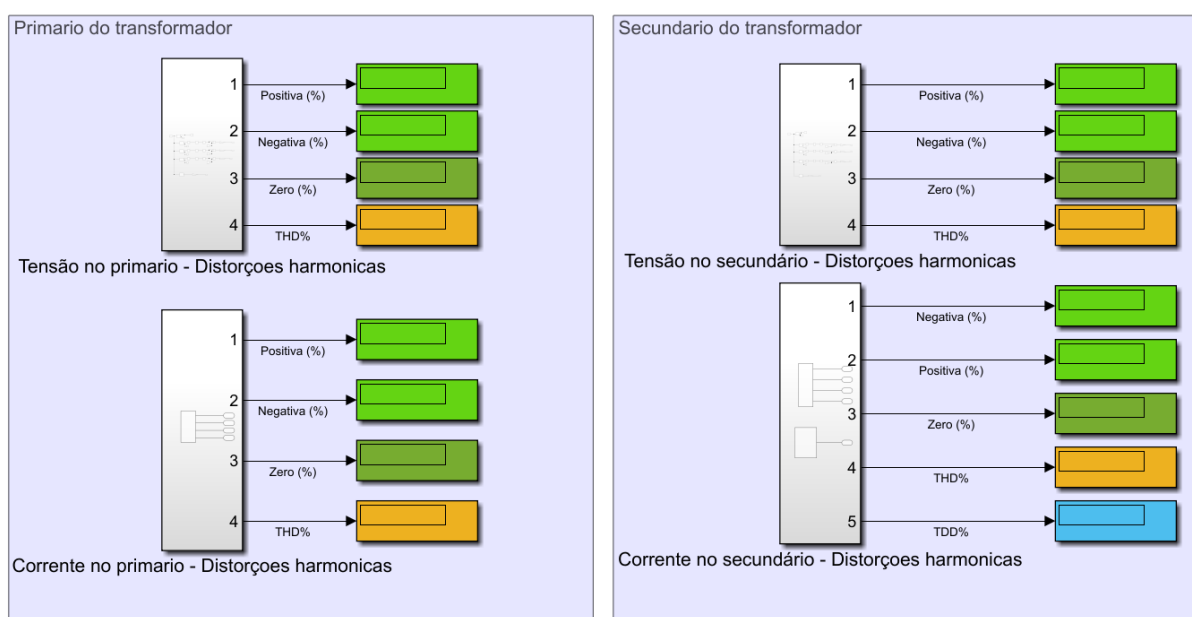
Sendo que os blocos V_1T e I_1T fornecem, respectivamente, a tensão RMS e a corrente RMS no primário do transformador 2, enquanto V_2T e I_2T fornecem, respectivamente, a tensão RMS e corrente RMS no secundário do transformador 2. I2 fornece as formas de onda de corrente das três fases com o objetivo de calcular a corrente circulante no neutro do transformador 2.

Seguindo com a implementação da plataforma, foram desenvolvidos mais quatro blocos, que serão responsáveis por calcular a distorção total devido a presença de harmônicas de sequência positiva, negativa e de sequência zero, calcular a THD% e para a corrente no secundário do transformador, também calcular a TDD%.

Os blocos referentes a esta implementação podem ser visualizados na Figura 5.

Observa-se que os blocos estão organizados de maneira a fornecer os mesmos parâmetros, a esquerda para o lado primário do transformador e a direita para o lado secundário do transformador.

Figura 5 – Resultados gerais para as formas de onda do primário e secundário do transformador



Fonte: Próprio autor

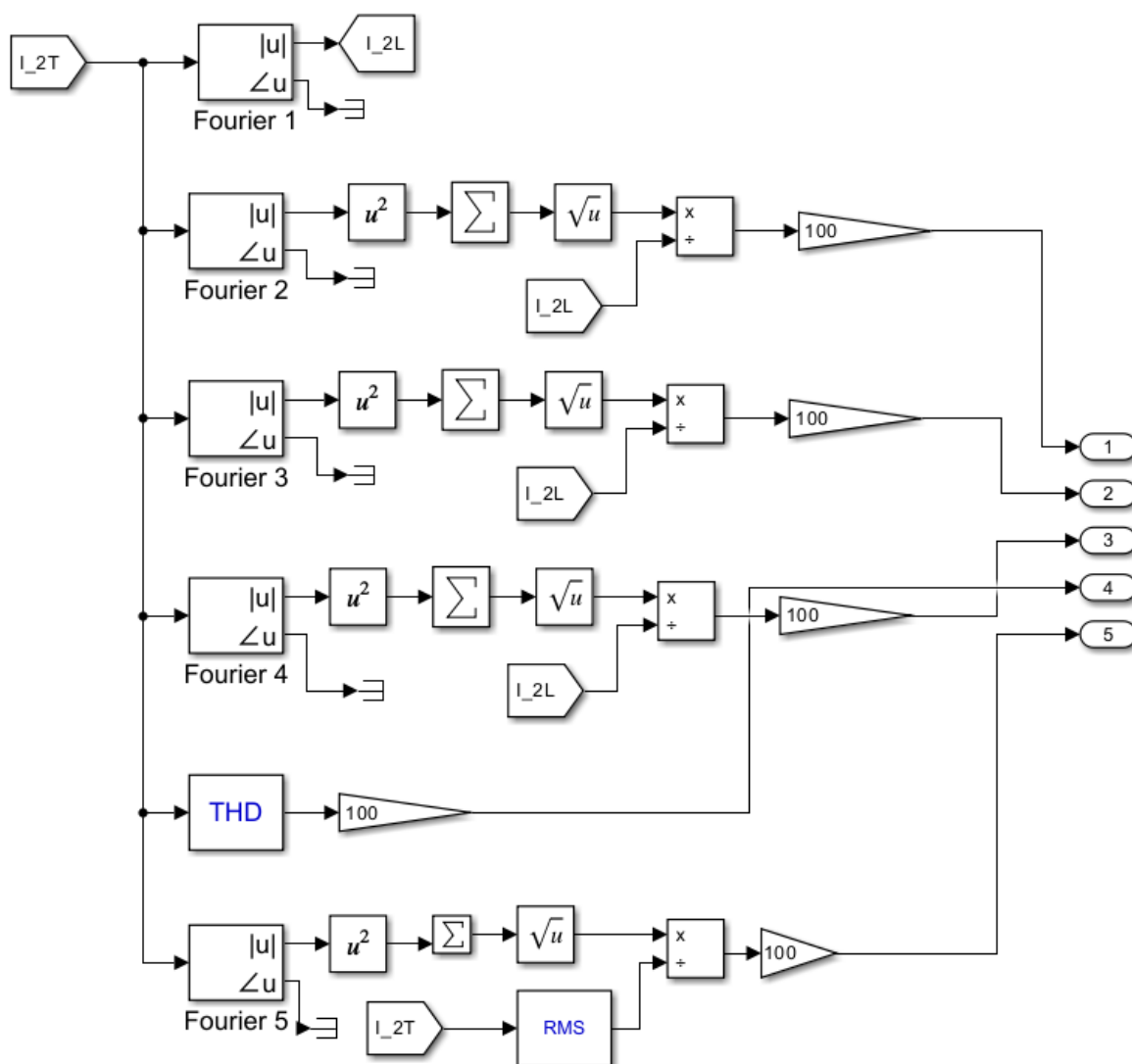
Cada bloco visualizado na Figura 5, irá realizar alguns cálculos a partir das equações discutidas no capítulo 2. Sendo assim, seu circuito interno possui configurações específicas de blocos que juntos irão medir a distorção total causada por harmônicas de sequência positiva, a distorção total de harmônicas de sequência negativa, a distorção total de harmônicas de sequência zero (desconsiderando a fundamental), a THD% e a TDD%.

Para explicar esta parte da plataforma, é utilizado apenas o bloco inferior direito da Figura 5 pois o restante dos blocos funcionará de maneira análoga. Na Figura 6 é ilustrada a configuração interna desse bloco.

Por se tratar de analisar a forma de onda da corrente que circula no secundário do transformador, este bloco utiliza como entrada a corrente do lado secundário.

Na Figura 6, tem-se os blocos “Fourier” que tem a função de seleccionar harmônicas específicas e fornecer seu valor RMS dependendo da forma como são configurados. Sendo assim, o primeiro bloco (mais acima) “Fourier 1” foi configurado de maneira que I_2L seja o valor RMS da componente fundamental que circula no secundário do transformador.

Figura 6 – Configuração interno do bloco “Corrente no secundário – Distorções harmônicas”



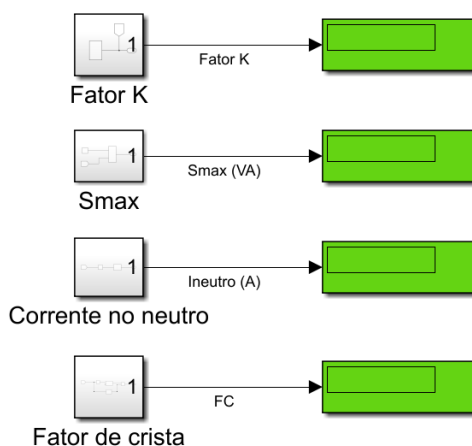
Fonte: Próprio autor.

Abaixo na Figura 6 tem-se mais três blocos (Fourier 2, Fourier 3, e Fourier 4) sendo que o Fourier 2 irá fornecer apenas os valores RMS das harmônicas de sequência positiva, o Fourier 3 fornecerá os valores referentes as harmônicas de sequência negativa, e o Fourier 4 irá fornecer os valores referentes as harmônicas de sequência zero. Cada um desses blocos terá seus valores elevados ao quadrado, somados, extraído a raiz quadrada e por fim serão divididos pelo valor RMS da componente fundamental e multiplicado por 100, resultando nas distorções percentuais totais de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

O bloco “THD” fornece de maneira direta a THD% do sinal analisado. Abaixo, tem-se o bloco Fourier 5 que irá selecionar as harmônicas para o cálculo da TDD%. Essa combinação de blocos é a implementação da equação (2). Sendo assim, tem-se como entrada a corrente no lado secundário, este valor é conectado ao bloco “Fourier 5” que está configurado para passar todas as harmônicas para o bloco “Math” configurado para elevar os valores ao quadrado. Na sequência estes valores são somados pelo bloco “Sum”, que por fim é dividido pela corrente máxima de demanda, que neste caso será a corrente que circula no lado secundário do transformador, um último bloco “Gain” é adicionado para multiplicar o valor por 100, fornecendo então a TDD%.

A última parte que foi implementada foi referente aos cálculos do Fator K, da potência máxima que o transformador poderá operar, da corrente no neutro do transformador e o cálculo do FC. Esta parte pode ser visualizada na Figura 7.

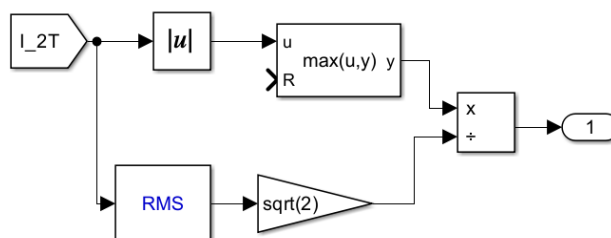
Figura 7 – Fator K; potência máxima; corrente no neutro e FC



Fonte: Próprio autor.

Começando pelo bloco do Fator K na Figura 7, este utiliza a equação (3). Os blocos referentes a este método podem ser visualizados na Figura 8.

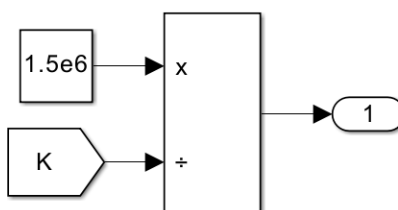
Figura 8 – Blocos para o cálculo do fator K



Fonte: Próprio autor.

Como pode-se observar, na Figura 8 é obtido o valor de pico do sinal de corrente no secundário do transformador utilizando-se os blocos “Abs” e “MinMax Running Resettable” e a partir do diagrama inferior é obtido o valor RMS da corrente, esse valor é multiplicado por $\sqrt{2}$ e por fim os resultados são divididos pelo bloco “Divide” para encontrar o valor de K definido na equação (3). Seguindo para o próximo bloco, tem-se o cálculo da potência máxima que o transformador pode operar devido a influência das harmônicas. Tais blocos podem ser visualizados na Figura 9.

Figura 9 – Blocos para o cálculo de Smax



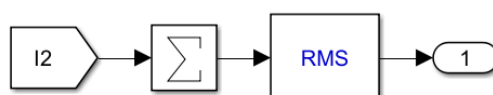
Fonte: Próprio autor.

Essa configuração de blocos, utiliza a equação (4) como referência. É utilizado então um bloco “Constant” que é configurado com a potência nominal do transformador, e um bloco “From” que carrega o resultado do valor de K calculado.

Estes valores são divididos por um bloco “Divide” e o resultado é a potência máxima que o transformador pode operar.

Na sequência tem-se os blocos responsáveis por encontrar a corrente que circula no neutro do transformador e podem ser visualizados a partir da Figura 10.

Figura 10 – Corrente circulante no neutro do transformador.

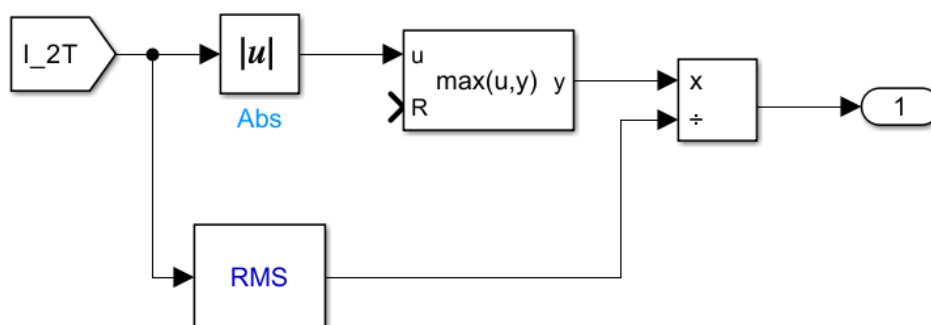


Fonte: Próprio autor.

Nos blocos da Figura 10 é calculada a corrente circulante no neutro a partir da soma ponto a ponto do sinal de corrente que percorre cada fase, também previsto pela literatura em (H. Moreno, 2019).

Por fim, tem-se o FC, definido na equação (3). Os blocos responsáveis por este cálculo podem ser visualizados na Figura 11.

Figura 11 – Blocos para o cálculo do FC



Fonte: Próprio autor.

4 TESTES E RESULTADOS

Uma vez que a plataforma de simulação está finalizada, foram realizados testes para validação dos resultados. Nas seções seguintes são apresentados dois testes de validação da plataforma desenvolvida e na sequência apresentados resultados para casos de inserção de cargas não-lineares no sistema elétrico.

4.1 PRIMEIRO TESTE DE VALIDAÇÃO

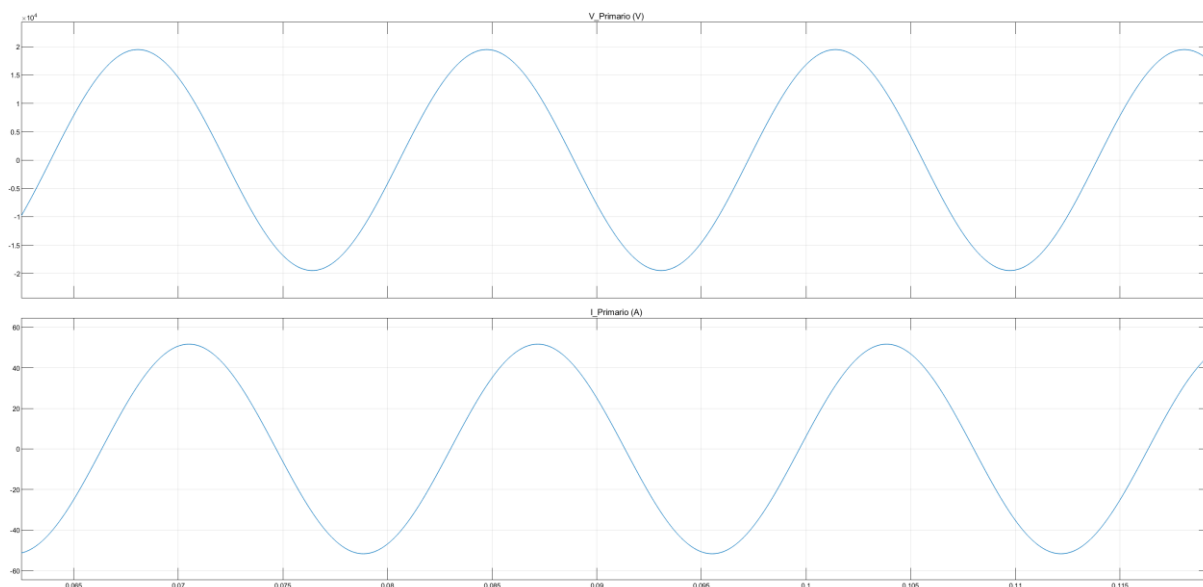
No primeiro teste é considerado o sistema mencionado no capítulo 3 e os parâmetros principais podem ser visualizados na Tabela 1, porém sem qualquer inserção de harmônicas. Para este teste, considera-se que os resultados são referentes ao transformador 2. Na Figura 12 observa-se as formas de onda de tensão e corrente no primário do transformador e na Figura 13 observa-se a tensão e corrente no secundário.

Tabela 1 – Parâmetros do primeiro teste de validação.

Barra infinita		Transformador 1		Linha de distribuição		Transformador 2		Carga equivalente	
Tensão trifásica	138 kV	Tensão no primário	138 kV	Comprimento	0,5 km	Tensão no Primário	13,8kV	Potência	800kVA
Frequência	60 Hz	Tensão no secundário	13,8 kV	R+jX	0,045 + 0,32 ohm/km	Tensão no secundário	380V	Tensão	380V
Potência de curto-circuito	800 MVA	Potência	5 MVA			Potência	1500kVA	fp	0,94
Relação X/R	20	Ligação	Delta/y aterrado			Ligação	Delta/y aterrado		

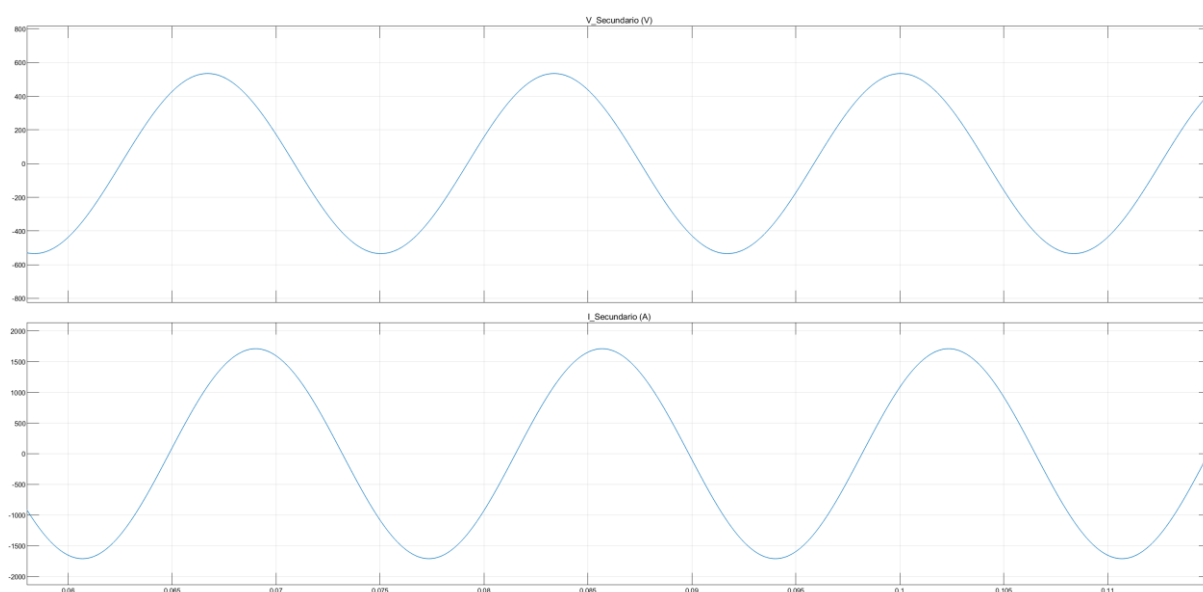
Fonte: Próprio autor.

Figura 12 – Teste sem harmônicas – Tensão e corrente no primário.



Fonte: Próprio autor

Figura 13 – Teste sem harmônicas – Tensão e corrente no secundário.

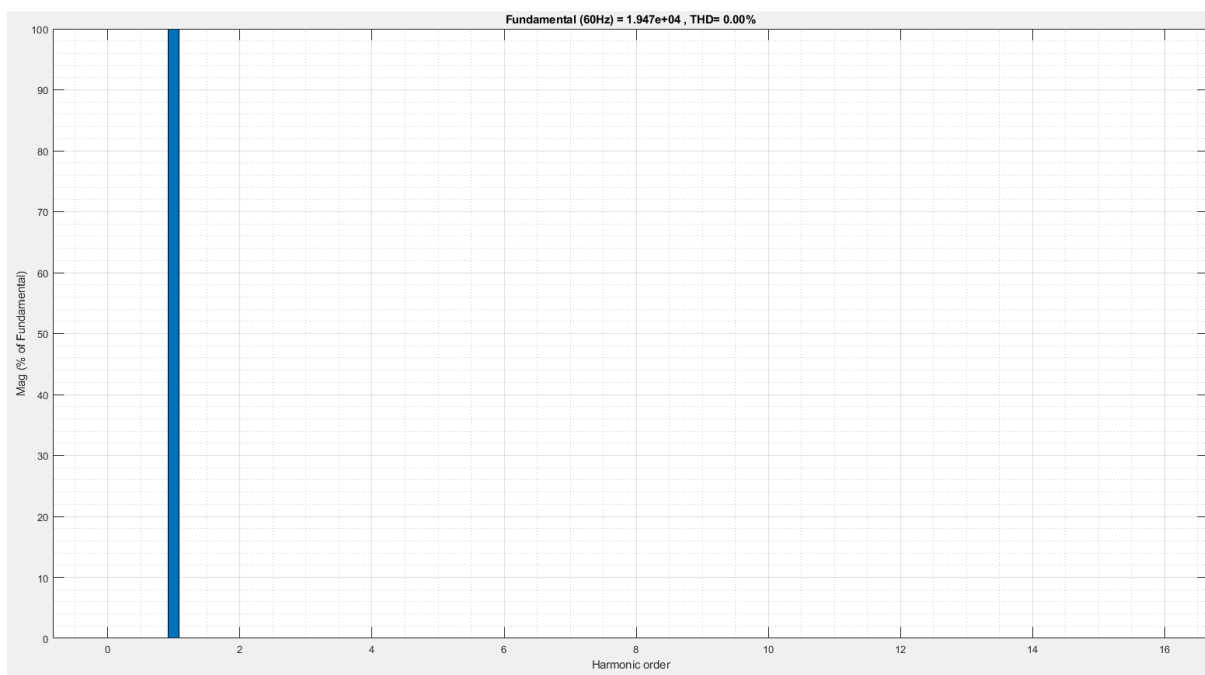


Fonte: Próprio autor.

Observando as Figuras 12 e 13, nota-se que os sinais de tensão e corrente em ambos os lados do transformador são senoidais.

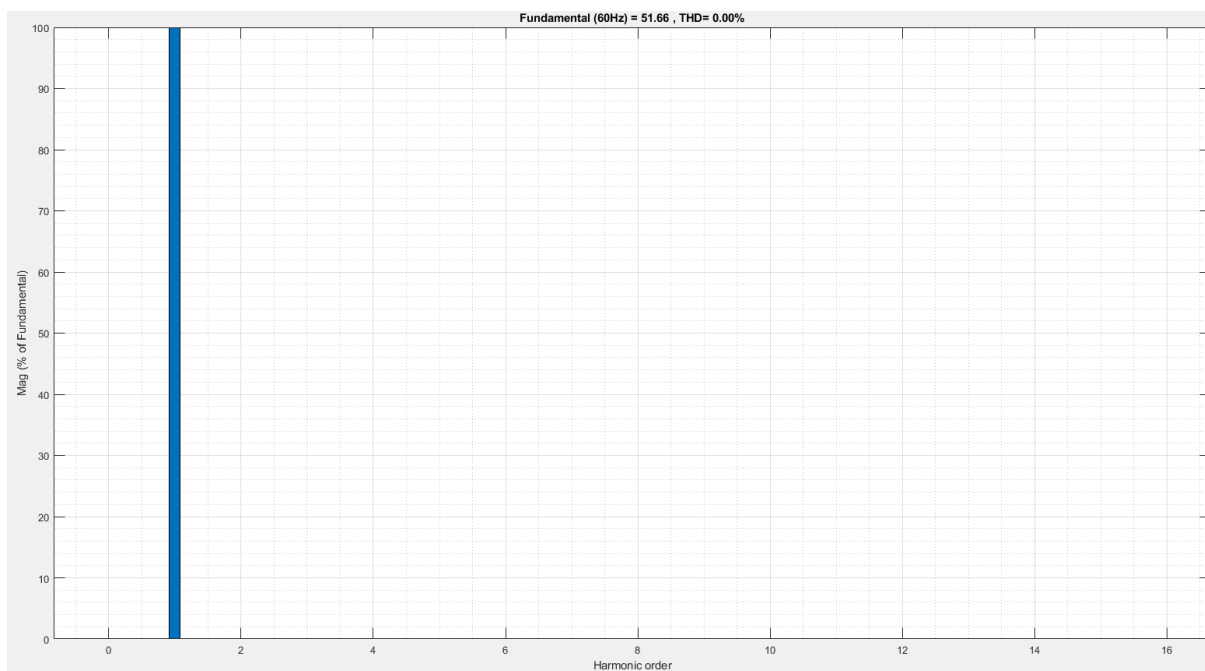
Seguindo com a análise deste caso, foi realizada a análise de Fourier para cada uma das formas de onda referentes as Figuras 12 e 13 e o resultado pode ser observado a partir das Figuras 14, 15, 16 e 17.

Figura 14 – Teste sem harmônicas – FFT na tensão do primário do transformador



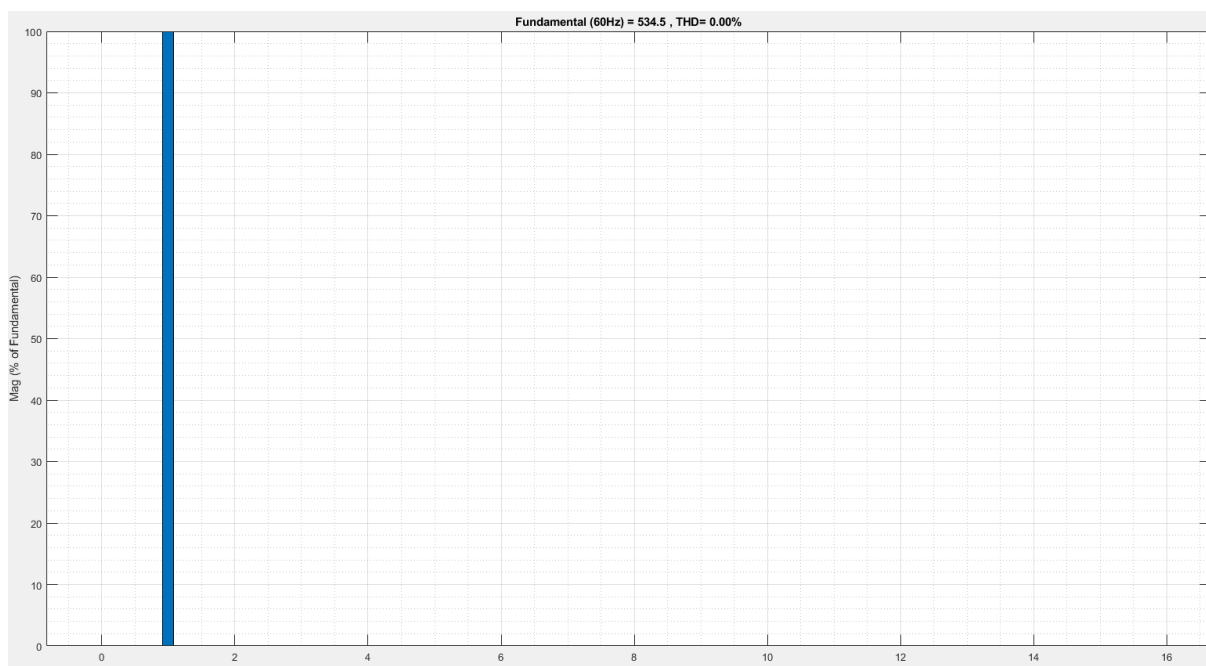
Fonte: Próprio autor

Figura 15 – Teste sem harmônicas – FFT na corrente do primário do transformador



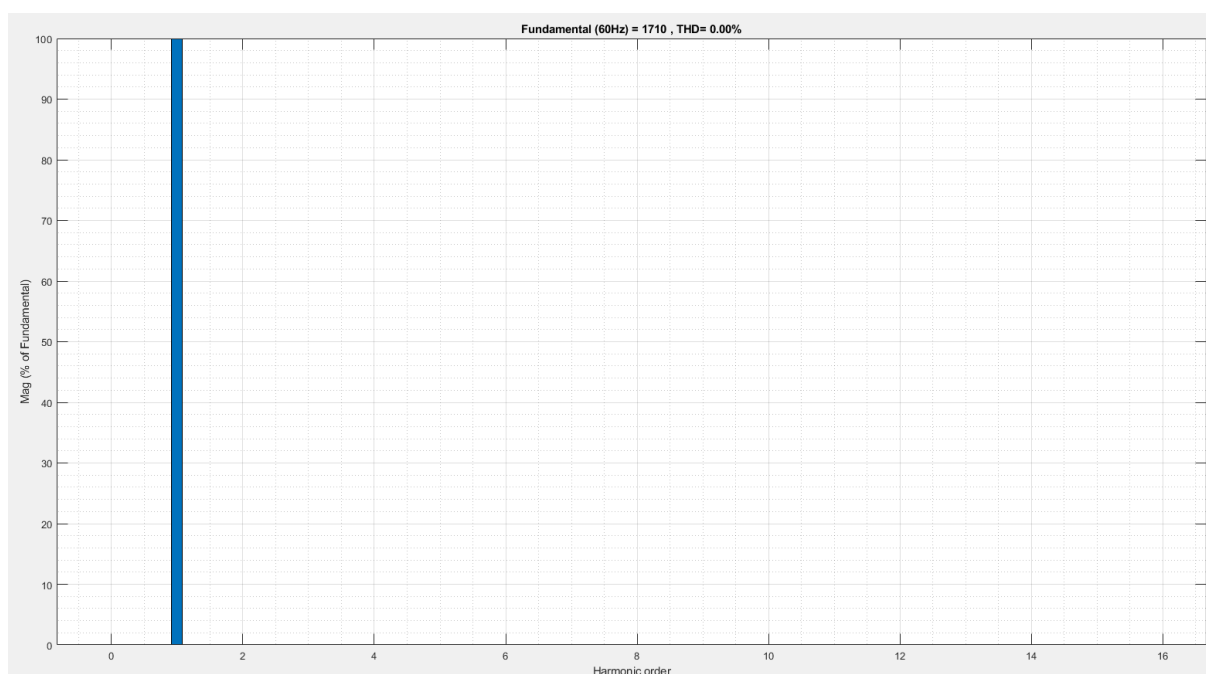
Fonte: Próprio autor

Figura 16 – Teste sem harmônicas – FFT na tensão do secundário do transformador



Fonte: Próprio autor.

Figura 17 – Teste sem harmônicas – FFT na corrente do secundário do transformador

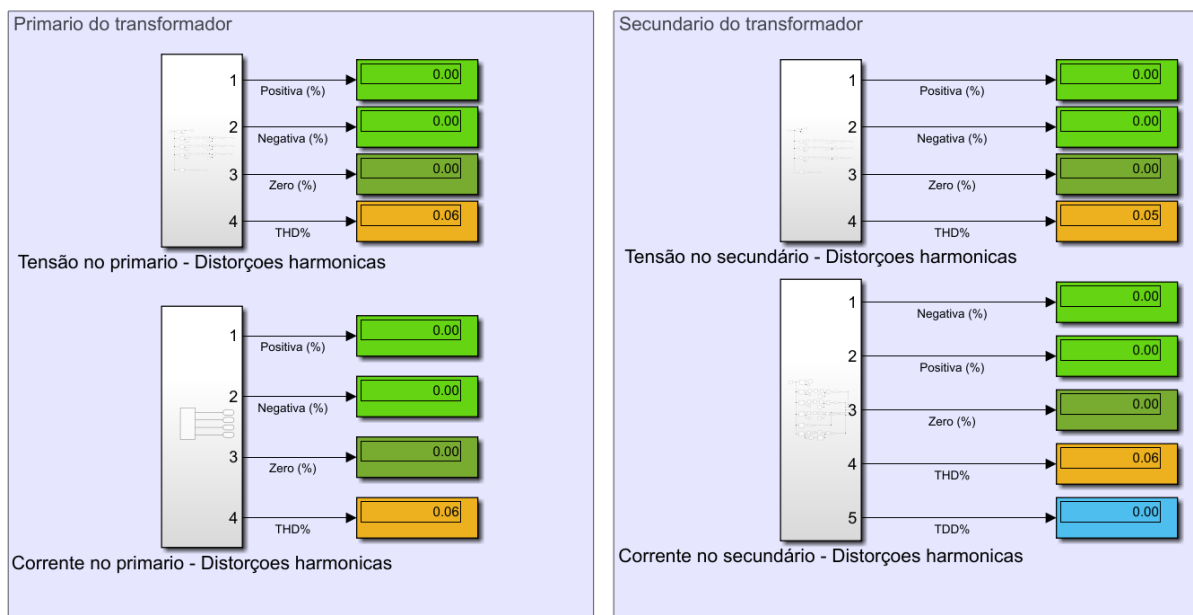


Fonte: Próprio autor.

A partir das Figuras 14, 15, 16 e 17, observa-se que não existem harmônicas circulando no sistema, apenas a componente fundamental.

Na Figura 18 são apresentados os resultados numéricos encontrados pelos blocos implementados na plataforma.

Figura 18 – Teste sem harmônicas – Resultados numéricos.

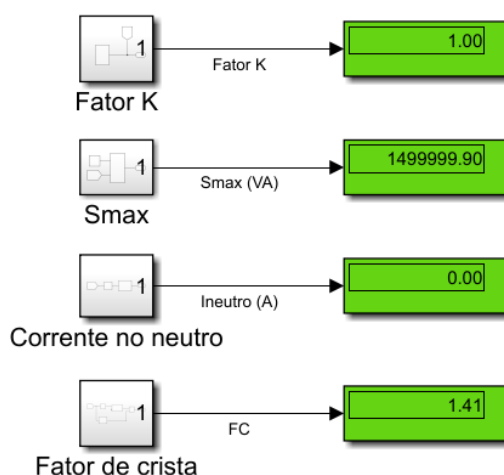


Fonte: Próprio autor

Percebe-se que os blocos não calculam qualquer influência de harmônicas, porém existe um pequeno erro no cálculo do THD% onde o resultado esperado seria 0%. Esta diferença está relacionada com o tempo de amostragem utilizado nas simulações. Quanto menor for o tempo de amostragem da simulação, mais precisos serão os resultados, e em contrapartida o tempo de simulação pode se tornar muito elevado. Nas simulações considerou-se o compromisso entre precisão e tempo total de simulação sendo adotado como tempo de amostragem 5 microssegundos.

Na Figura 19 são apresentados os resultados do cálculo do fator K, da potência máxima que o transformador poderá operar, da corrente circulante no neutro e do fator de crista.

Figura 19 – Teste sem harmônicas – Fator K; Smax; corrente no neutro e fator de crista.



Fonte: Próprio autor.

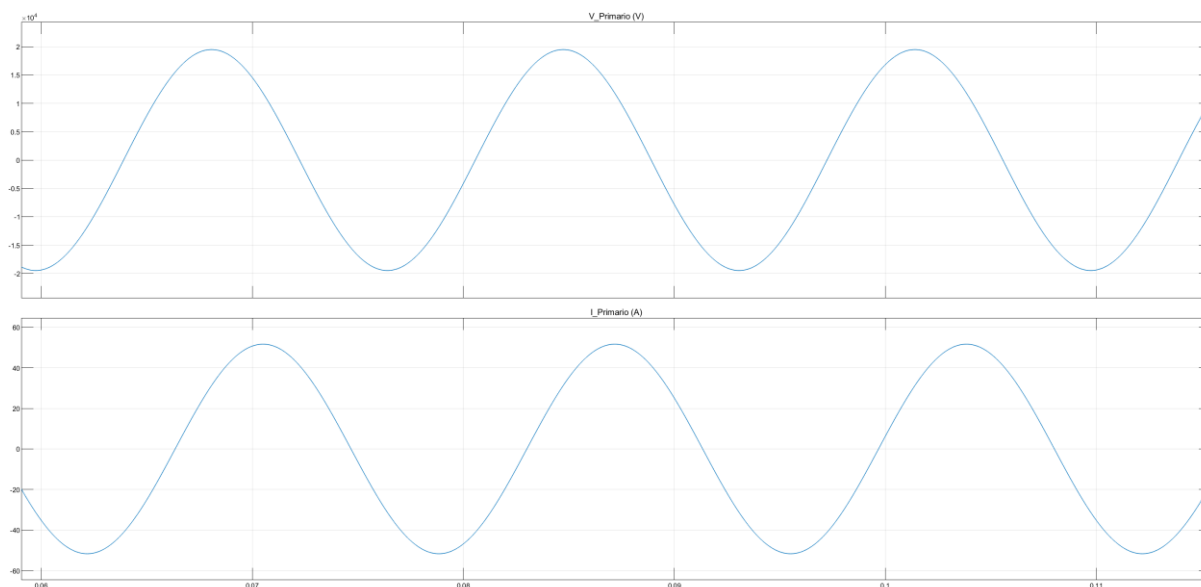
Observa-se que os resultados obtidos foram os esperados para um sistema simétrico, equilibrado e sem a presença de harmônicas.

4.2 SEGUNDO TESTE DE VALIDAÇÃO

Agora que foram validados os resultados para um sistema sem a presença de harmônicas, é realizado um segundo teste inserindo apenas a terceira harmônica com magnitude de 34% em relação a sua fundamental. Na Figura 20 são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente no primário e na Figura 21 são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente no secundário do transformador.

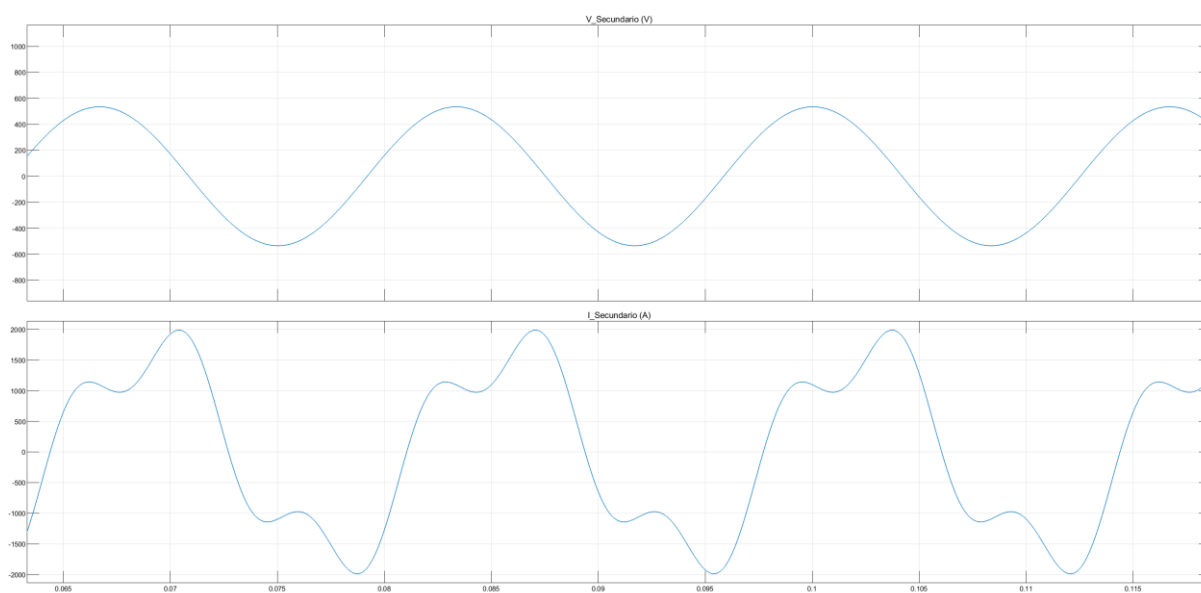
Observando as Figuras 20 e 21, nota-se que a única forma de onda que sofreu deformação com a presença da harmônica foi a corrente que circula no secundário do transformador, esse resultado é esperado pois o sistema é equilibrado e o transformador está ligado em delta/estrela aterrado.

Figura 20 – Teste com a 3ª harmônica – Tensão e corrente no primário.



Fonte: Próprio autor

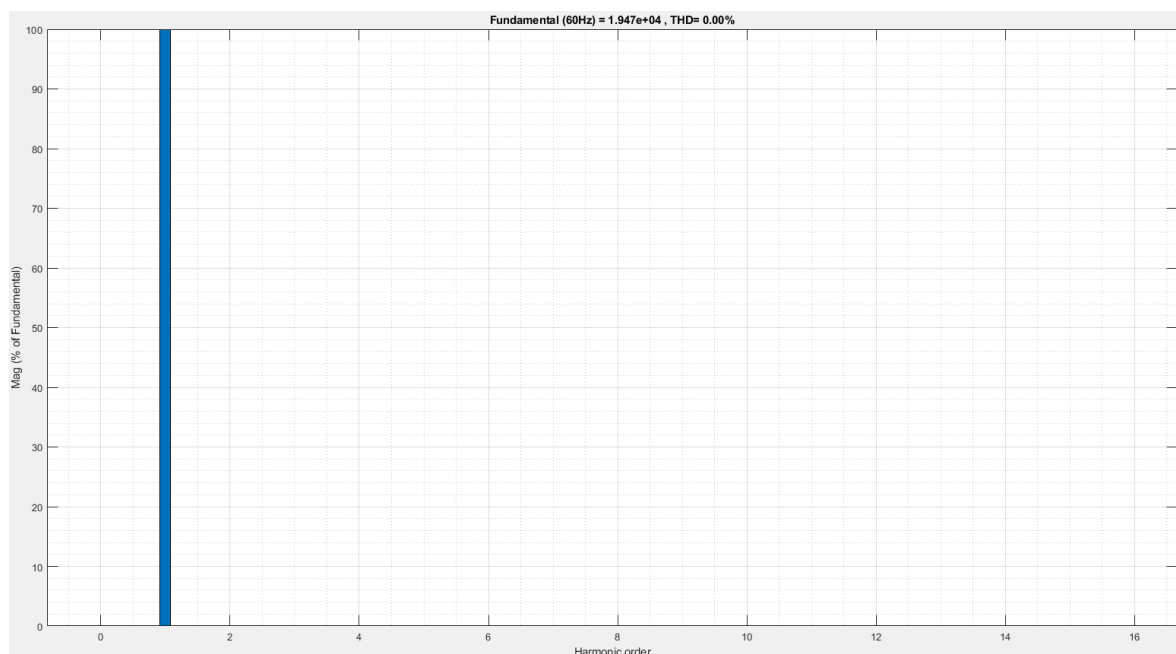
Figura 21 – Teste com a 3ª harmônica – Tensão e corrente no secundário.



Fonte: Próprio autor.

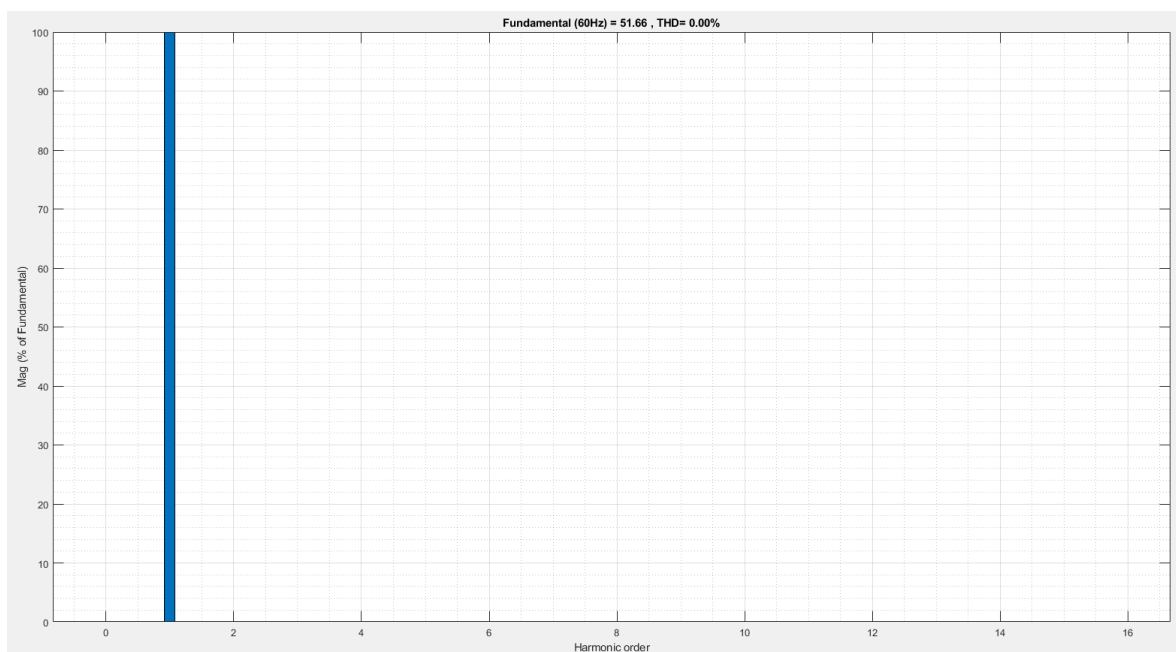
Seguindo com a análise deste teste, foi realizada a análise de Fourier para cada uma das formas de onda referentes as Figuras 20 e 21 e o resultado pode ser observado a partir das Figuras 22, 23, 24 e 25.

Figura 22 – Teste com a 3ª harmônica – FFT na tensão do primário do transformador



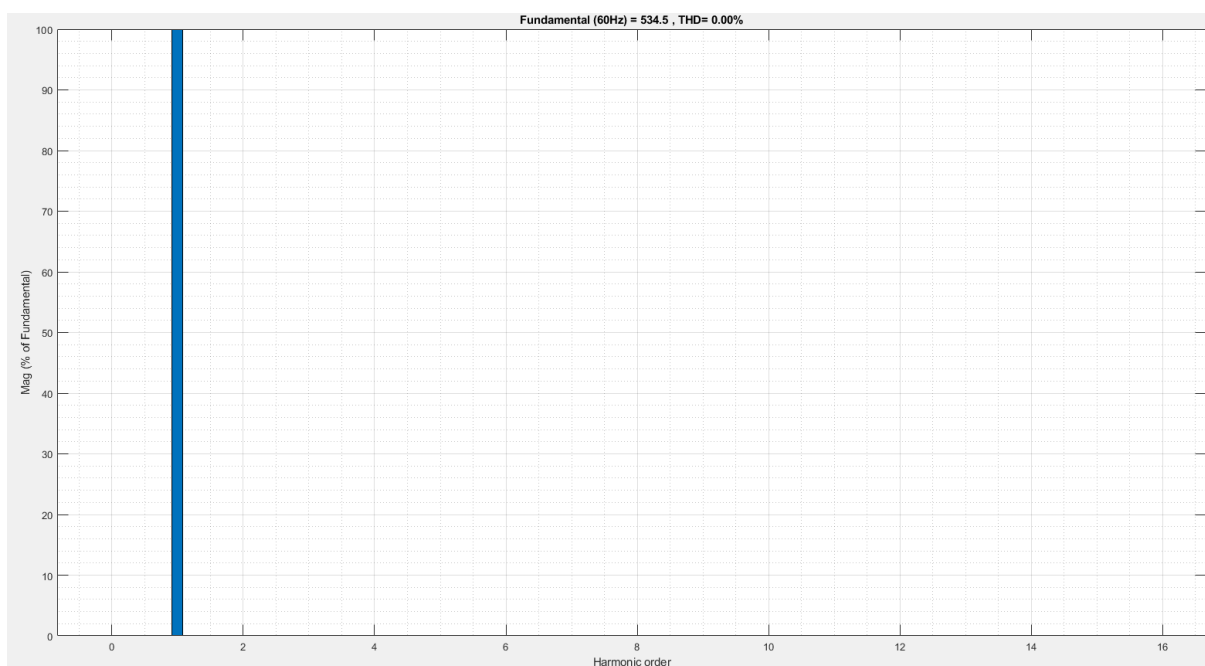
Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Teste com a 3ª harmônica – FFT na corrente do primário do transformador



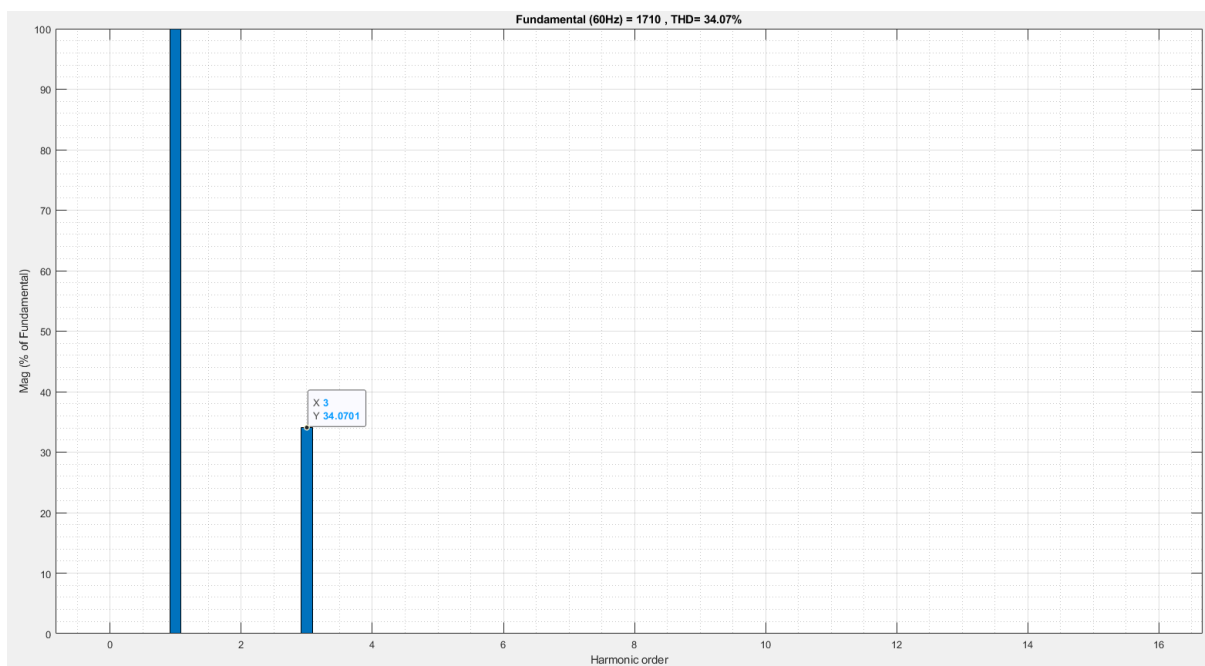
Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Teste com a 3ª harmônica – FFT na tensão do secundário do transformador



Fonte: Próprio autor.

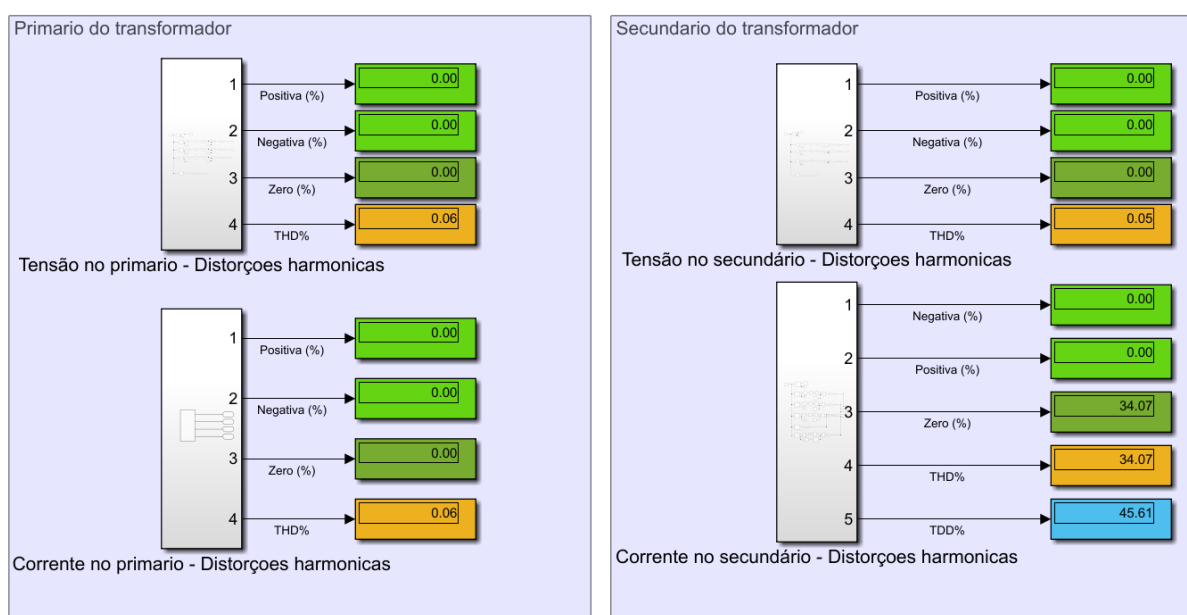
Figura 25 – Teste com a 3ª harmônica – FFT na corrente do secundário do transformador



Fonte: Próprio autor.

A partir das Figuras 22, 23, 24 e 25, valida-se os resultados obtidos a partir das formas de onda das Figuras 20 e 21, onde tem-se apenas a presença da terceira harmônica com magnitude de 34% em relação a fundamental. Como esta é a única componente harmônica presente, a THD também é de 34%. Na Figura 26 são apresentados os resultados numéricos encontrados pelos blocos implementados na plataforma.

Figura 26 – Teste com a 3ª harmônica – Resultados numéricos.



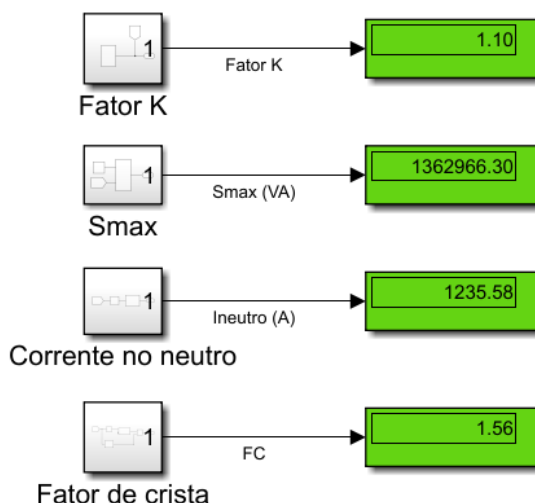
Fonte: Próprio autor

Observando a Figura 26, nota-se os mesmos 34% de distorção referente a harmônica de sequência zero, e adicionalmente tem-se o cálculo da TDD% que resultou no valor de 45,61%.

Na Figura 27 são apresentados os resultados do cálculo do fator K, da potência máxima que o transformador poderá operar, da corrente circulante no neutro e do fator de crista.

Observa-se a partir da Figura 27 que os 34% de harmônica de 3ª ordem presente no sistema, resultaram em um fator K de 1,10 que reduz a potência máxima de operação do transformador 2 para 1360kVA. Observa-se também que existe uma corrente circulante no neutro de 1235A, essa corrente é esperada pois essa é uma característica de harmônicas de sequência zero.

Figura 27 – Teste com a 3ª harmônica – Fator K; Smax; corrente no neutro e fator de crista.



Fonte: Próprio autor.

4.3 PRIMEIRO CASO DE ESTUDO

As primeiras harmônicas simuladas no projeto são harmônicas resultantes de cargas tipo monofásicas, geradoras de grandes correntes harmônicas de ordens ímpares H3 à H15. O sistema utilizado foi o mencionado no capítulo 3.

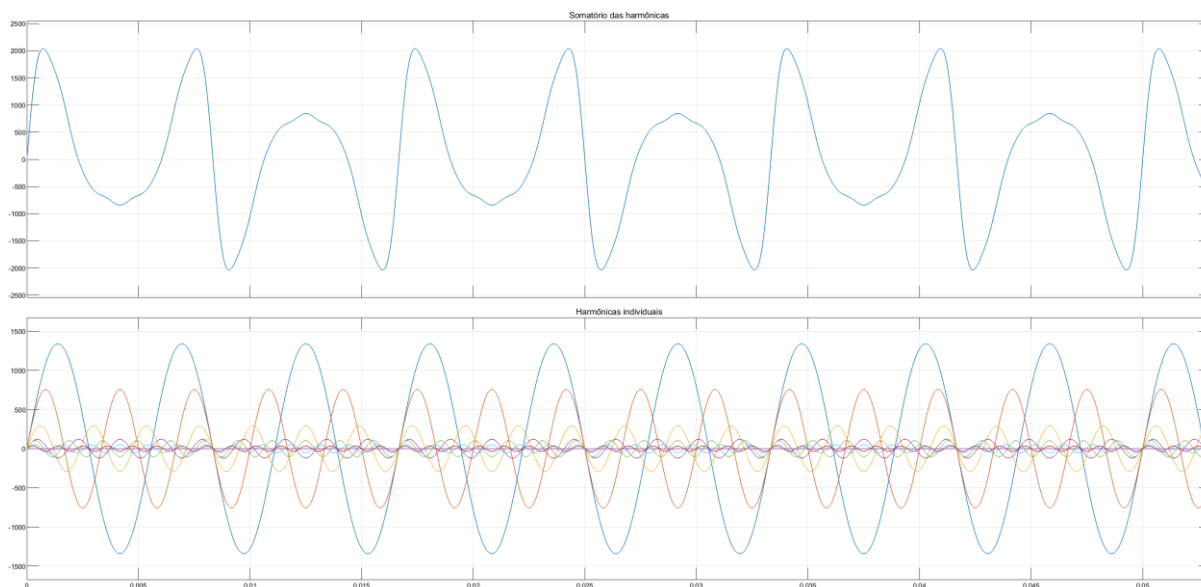
As harmônicas injetadas podem ser visualizadas na Tabela 2. Na Figura 28 são ilustradas as formas de onda das harmônicas injetadas no circuito e de sua soma, resultando na corrente distorcida que será injetada no sistema.

Tabela 2 – Harmônicas injetadas no primeiro caso de estudo

H3	78%
H5	44%
H7	17%
H9	7%
H11	6%
H13	3%
H15	2%

Fonte: Próprio autor

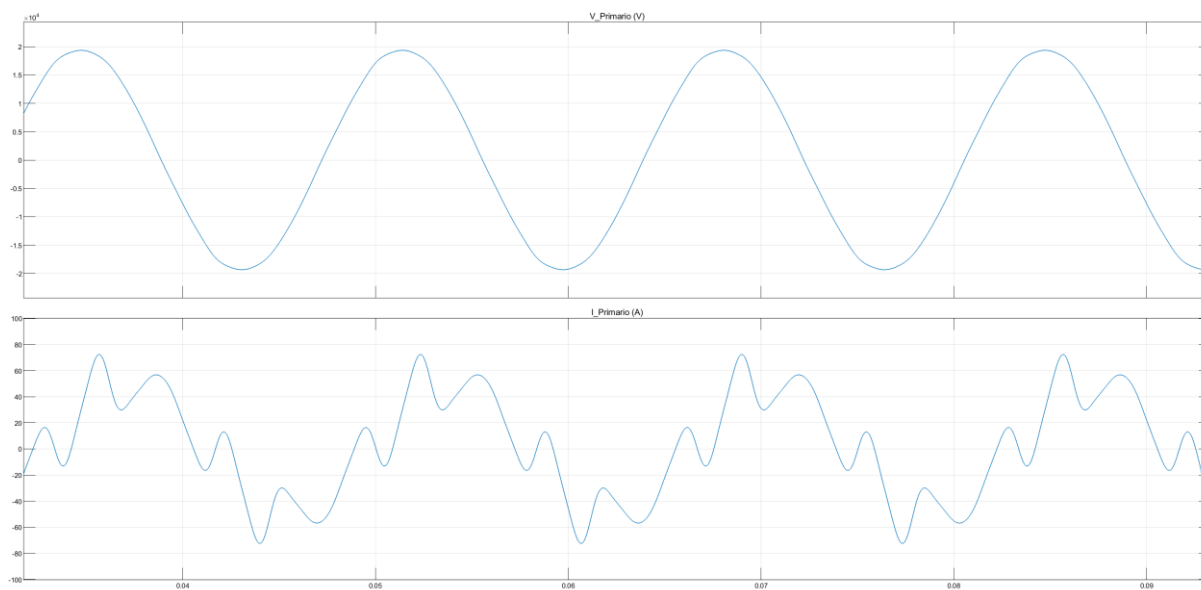
Figura 28 – Primeiro caso - Harmônicas injetadas no circuito



Fonte: Próprio autor

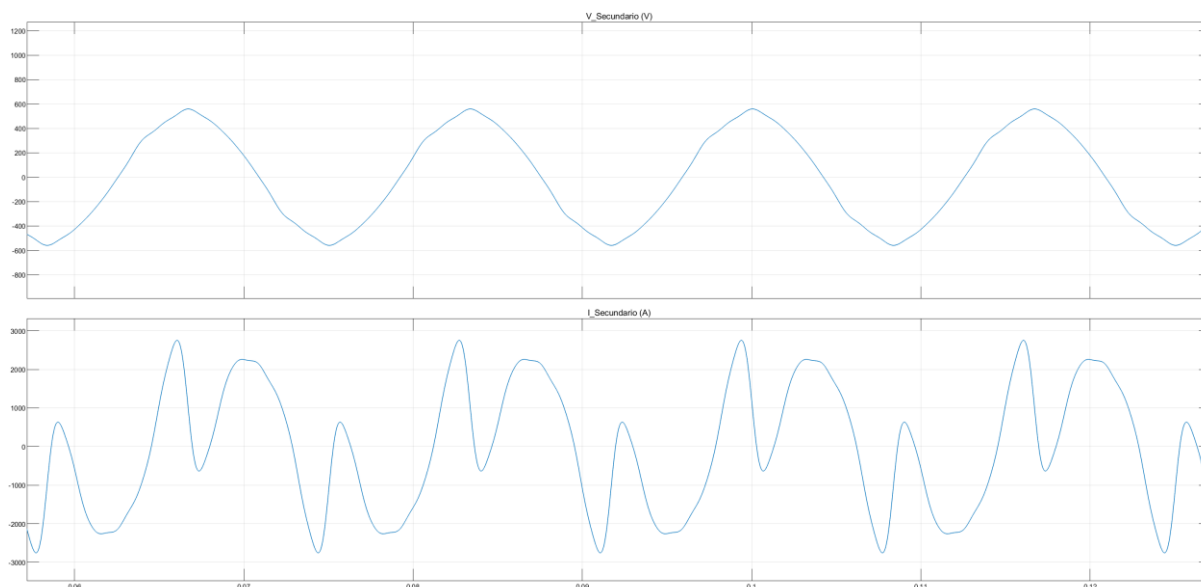
Primeiramente são analisadas as formas de onda de tensão e corrente no primário e secundário do transformador. Para isso, são apresentadas as Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Primeiro caso – Tensão e corrente no primário.



Fonte: Próprio autor.

Figura 30 - Primeiro caso – Tensão e corrente no secundário.



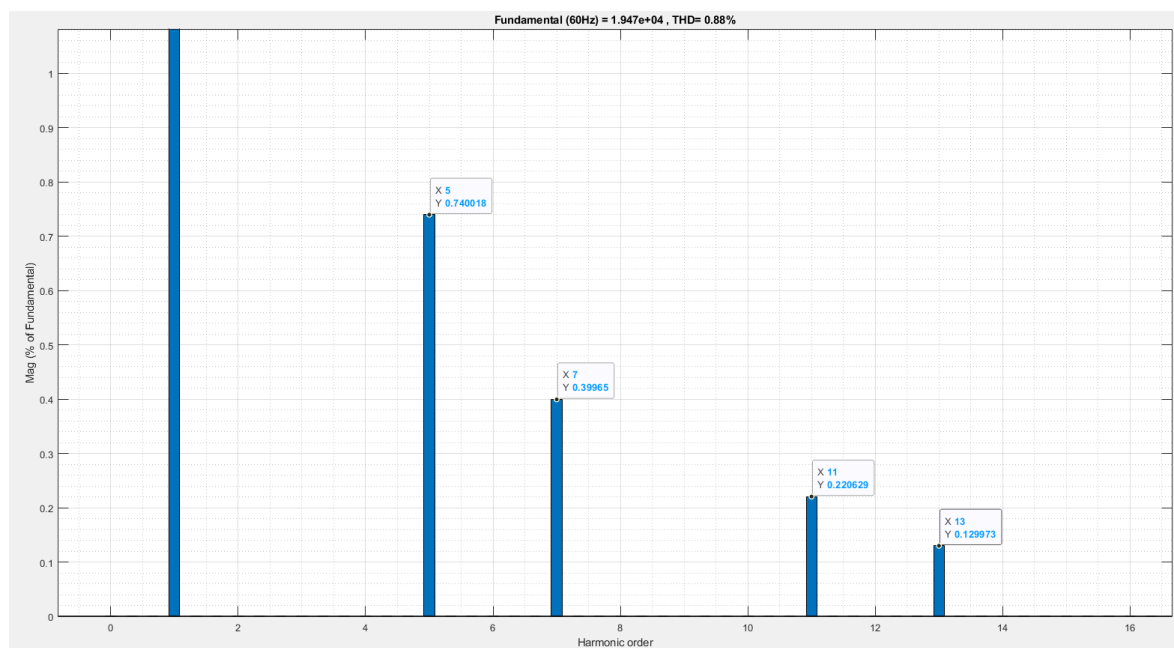
Fonte: Próprio autor.

Analisando as Figuras 29 e 30, pode-se observar que houve maior distorção nas formas de onda de corrente do que na tensão, esse resultado é esperado pois as harmônicas consideradas no sistema são todas ímpares.

Para seguir com a análise, foi feita a FFT com o objetivo de observar a magnitude de cada componente harmônica presente nas formas de onda. Para isso, são apresentadas as Figuras 31, 32, 33 e 34.

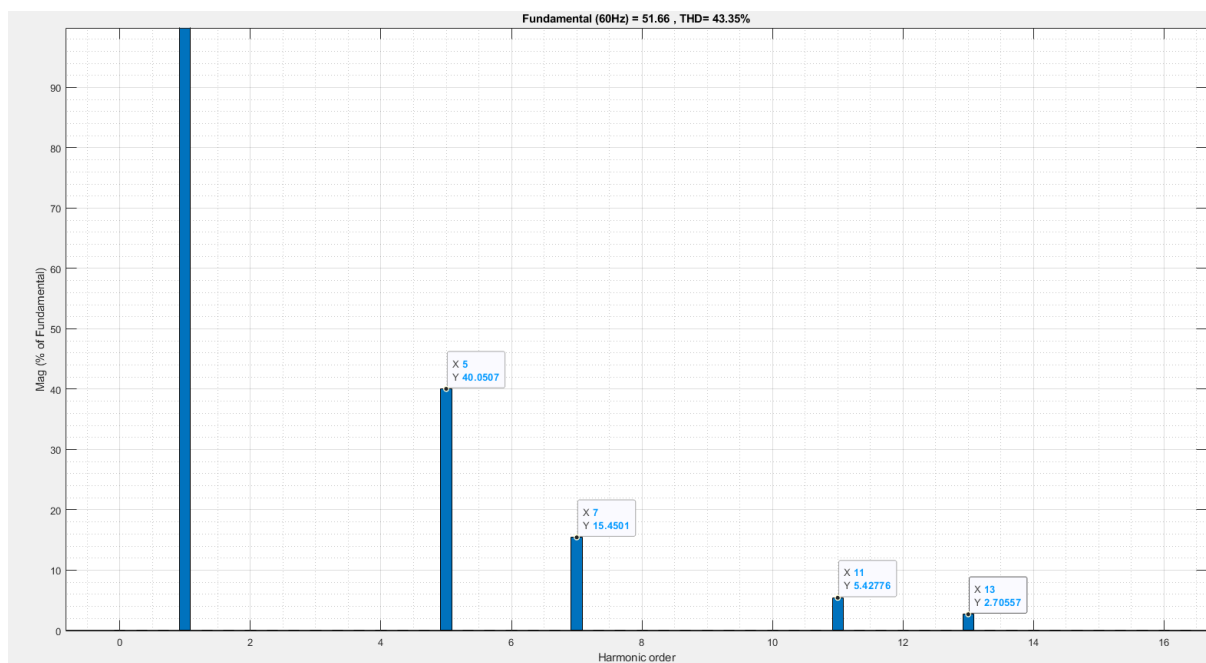
Observando então as Figuras 31, 32, 33 e 34, pode-se observar e comparar os resultados em ambos os lados do transformador. O primeiro ponto que é observado é que as harmônicas de sequência zero estão influenciando apenas a corrente que circula no lado secundário do transformador. Isso é uma característica de transformadores conectados em delta/estrela aterrado, que atuam como um tipo de filtro para estas harmônicas. Ainda olhando para os resultados em relação as correntes, percebe-se que houve uma leve redução na influência nas harmônicas de ordem 5, 7, 11 e 13 quando comparado ao lado secundário com o primário.

Figura 31 – Primeiro caso – FFT da tensão no primário.



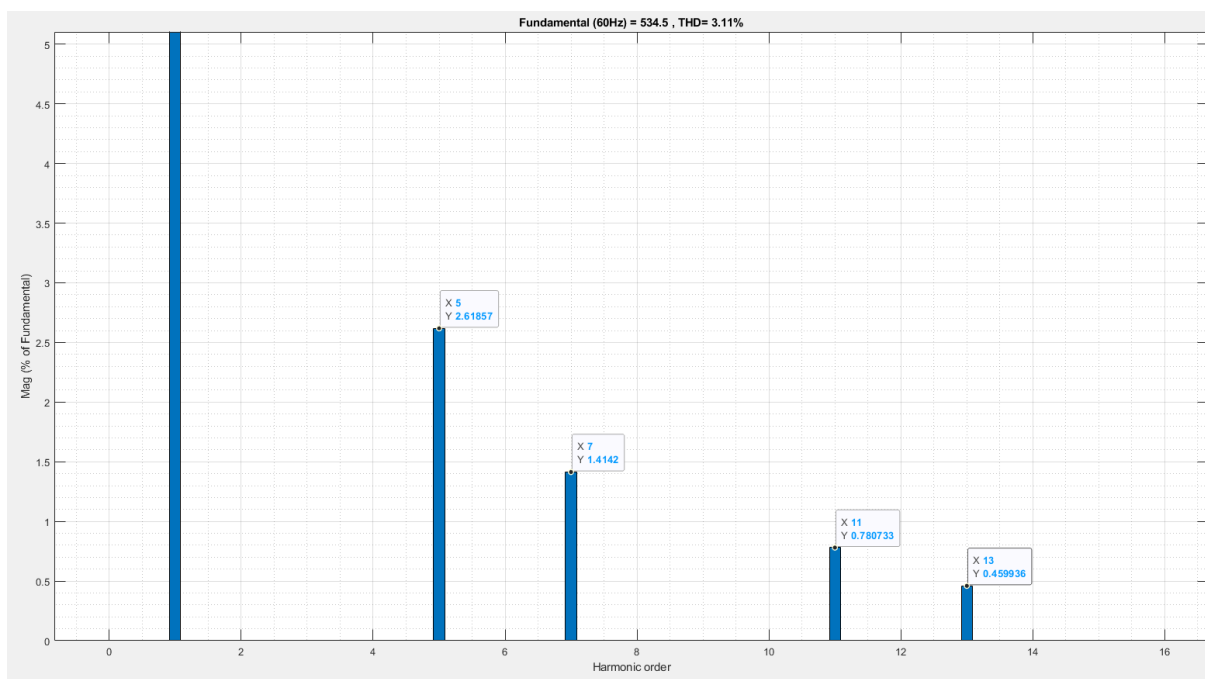
Fonte: Próprio autor

Figura 32 – Primeiro caso – FFT da corrente no primário.



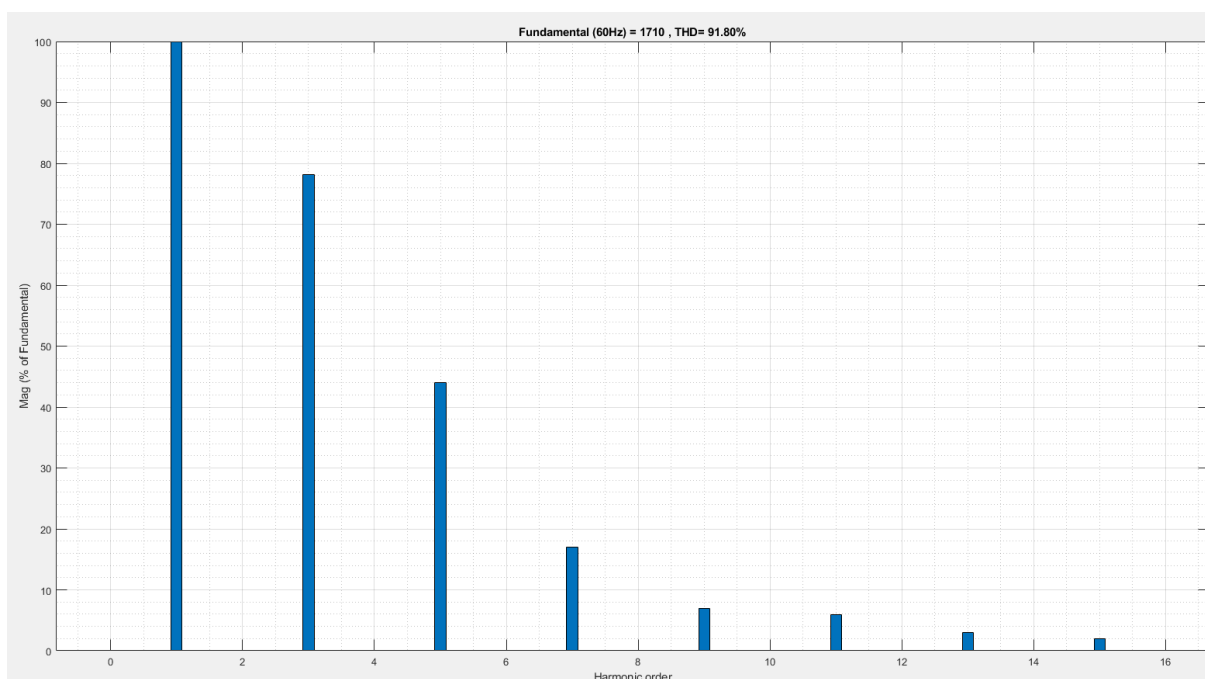
Fonte: Próprio autor.

Figura 33 – Primeiro caso – FFT da tensão no secundário.



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Primeiro caso – FFT da corrente no secundário.

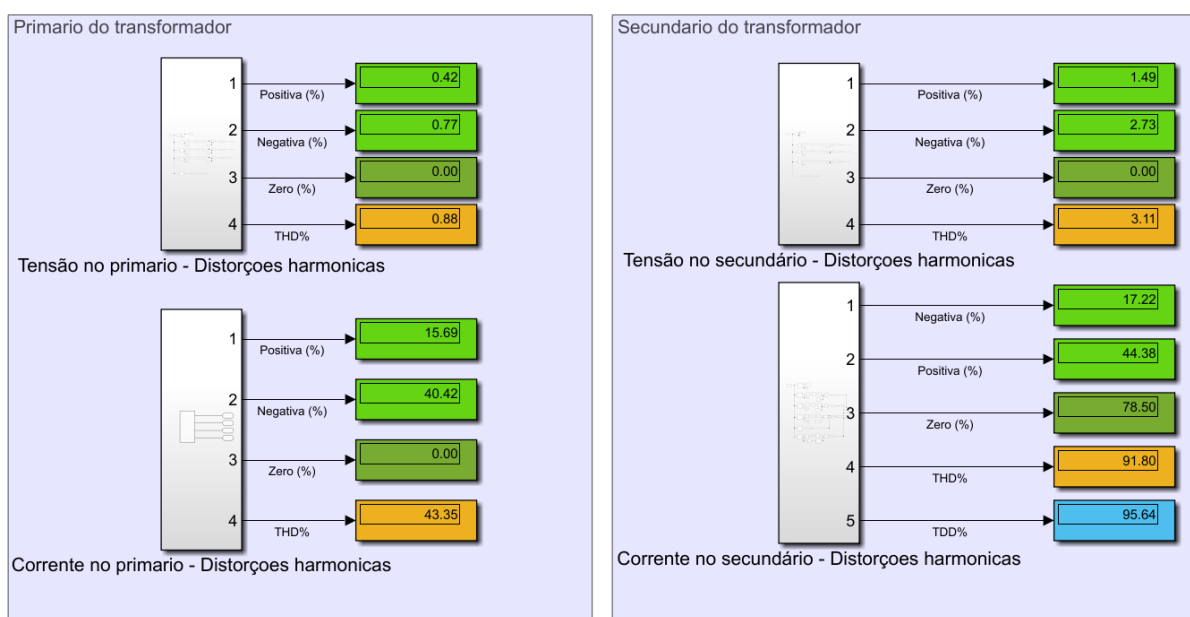


Fonte: Próprio autor.

Observando agora os resultados em relação as formas de onda de tensão, estas tiveram uma diferença significativa em relação a todas as harmônicas presentes nessa simulação (exceto as harmônicas de sequência zero que não estão presentes em ambas as formas de onda), isso acontece porque o transformador atenua componentes harmônicas de alta frequência e devido sua conexão bloqueia harmônicas múltiplas de três.

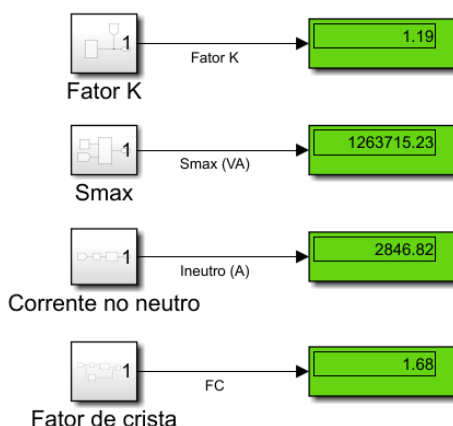
Além dos resultados das ondas e FFT, conforme apresentado anteriormente, a plataforma projetada também é capaz de fornecer alguns resultados numéricos, como o fator K do transformador, a corrente que circula pelo neutro, a influência de cada sequência harmônica no circuito e o cálculo da TDD%. Estes resultados podem ser visualizados nas Figuras 35 e 36.

Figura 35 – Primeiro caso – Resultados numéricos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Primeiro caso – Fator K; Smax; corrente no neutro e fator de crista.



Fonte: Próprio autor.

Analisando as Figuras 35 e 36, pode-se ver que a partir das formas de onda de tensão, tanto as harmônicas de sequência positiva quanto as harmônicas de sequência negativa foram atenuadas se comparadas ao lado secundário com o primário. Em relação as formas de onda de corrente, houve pequena atenuação das harmônicas de sequência positiva e negativa e o cancelamento das harmônicas de sequência zero.

O fator K encontrado foi de 1,19, o que significa que com a presença das harmônicas, a potência máxima que o transformador poderá operar é de 1263kVA.

A corrente que circula no neutro foi de 2846A. Essa corrente é maior que a obtida no teste onde foi aplicado 34% da terceira harmônica. Isso é esperado pois neste caso, existe uma quantidade maior de harmônicas de sequência zero influenciando o sistema, além de suas magnitudes também serem maiores que no teste.

O último parâmetro que foi calculado foi a TDD% com valor de 95,64%. Os resultados obtidos com a inserção dessas harmônicas indicam que o sistema está operando em condições críticas tornando-se necessário a implementação de medidas corretivas.

4.4 SEGUNDO CASO DE ESTUDO

Para esta próxima simulação, são consideradas correntes harmônicas de ordens ímpares H5, H7, H11 e H13 que podem ser consideradas em cargas que utilizam variadores de velocidade.

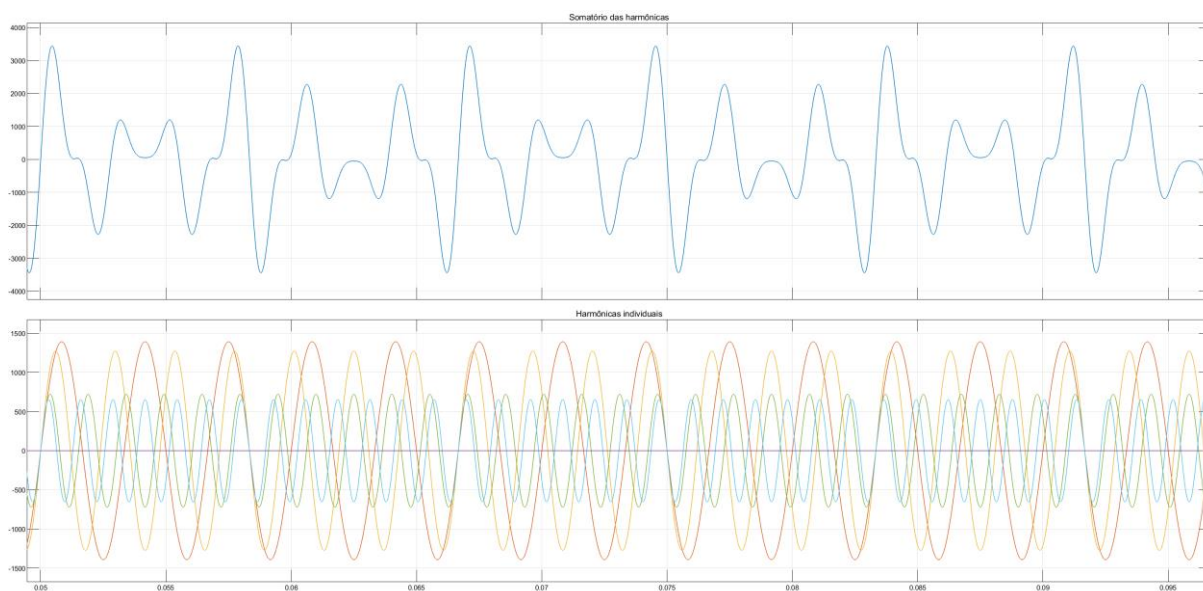
As harmônicas injetadas no sistema elétrico podem ser visualizadas na tabela 3. Na Figura 37 são ilustradas as formas de onda das harmônicas injetadas no circuito.

Tabela 3 - Harmônicas injetadas no segundo caso de estudo

H5	81%
H7	74%
H11	42%
H13	38%

Fonte: Próprio autor

Figura 37 – Segundo caso - Harmônicas injetadas no circuito



Fonte: Próprio autor

Assim como no caso anterior, inicia-se analisando as formas de onda de tensão e corrente no primário e secundário do transformador. Para isso, são apresentadas as Figuras 38 e 39.

Analisando as Figuras 38 e 39, pode-se observar novamente que houve maior distorção nas formas de onda de corrente do que na tensão, porém nota-se que diferentemente do caso anterior, onde visualmente era possível notar que as formas de onda de corrente tinham distorções diferentes, neste caso, apesar de ainda serem diferentes, parecem ter um formato mais próximo. Isso ocorre por não haver a influência de harmônicas de sequência zero no sistema.

Figura 38 – Segundo caso – Tensão e corrente no primário.

Fonte: Próprio autor.

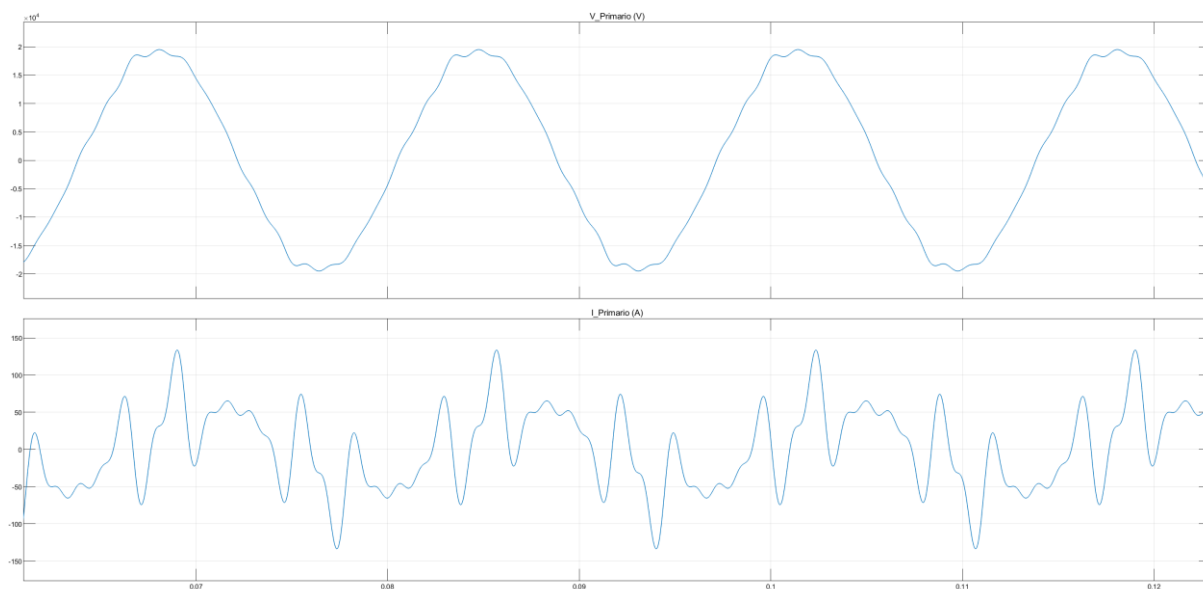
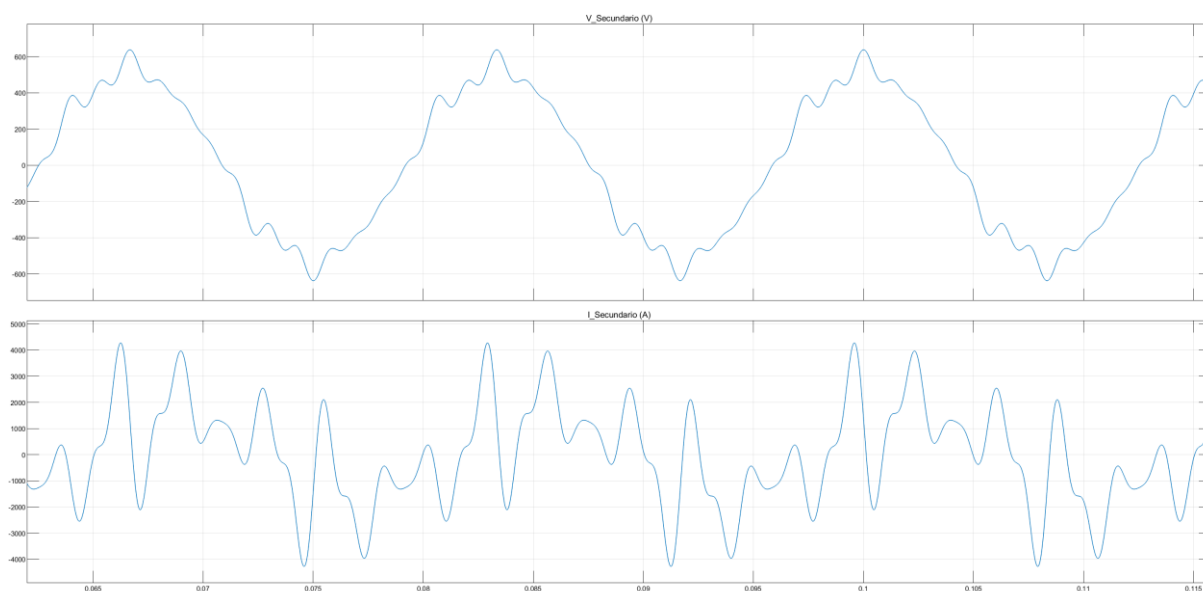


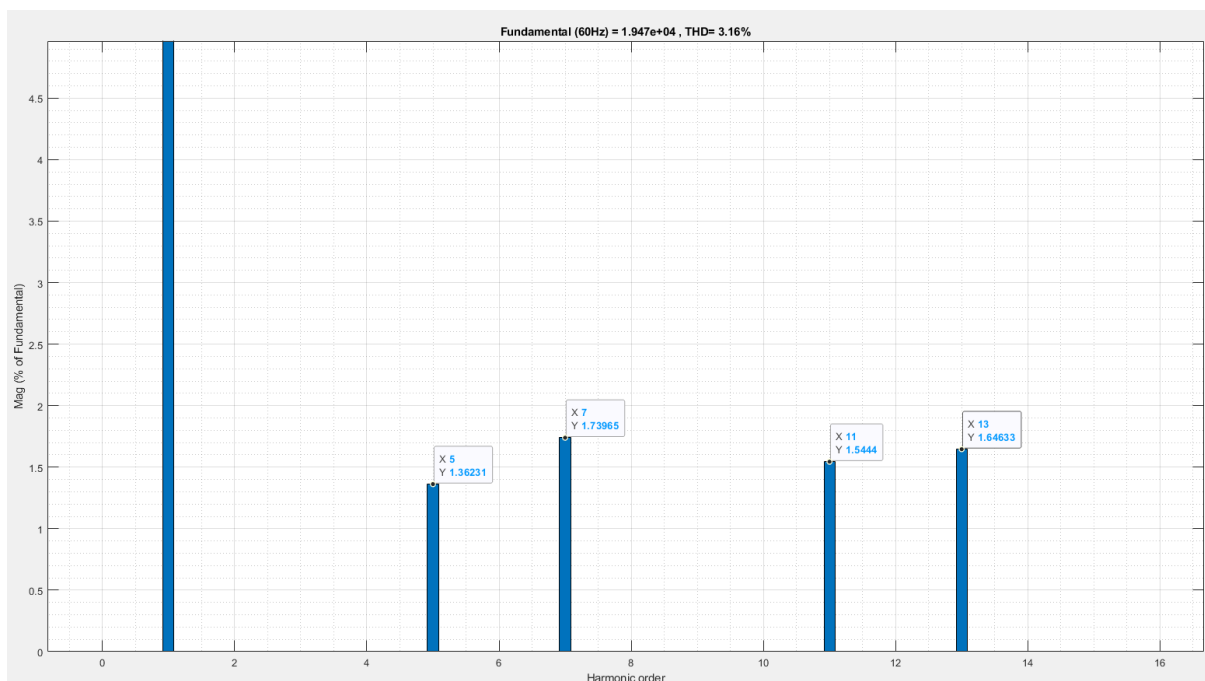
Figura 39 – Segundo caso – Tensão e corrente no secundário.



Fonte: Próprio autor.

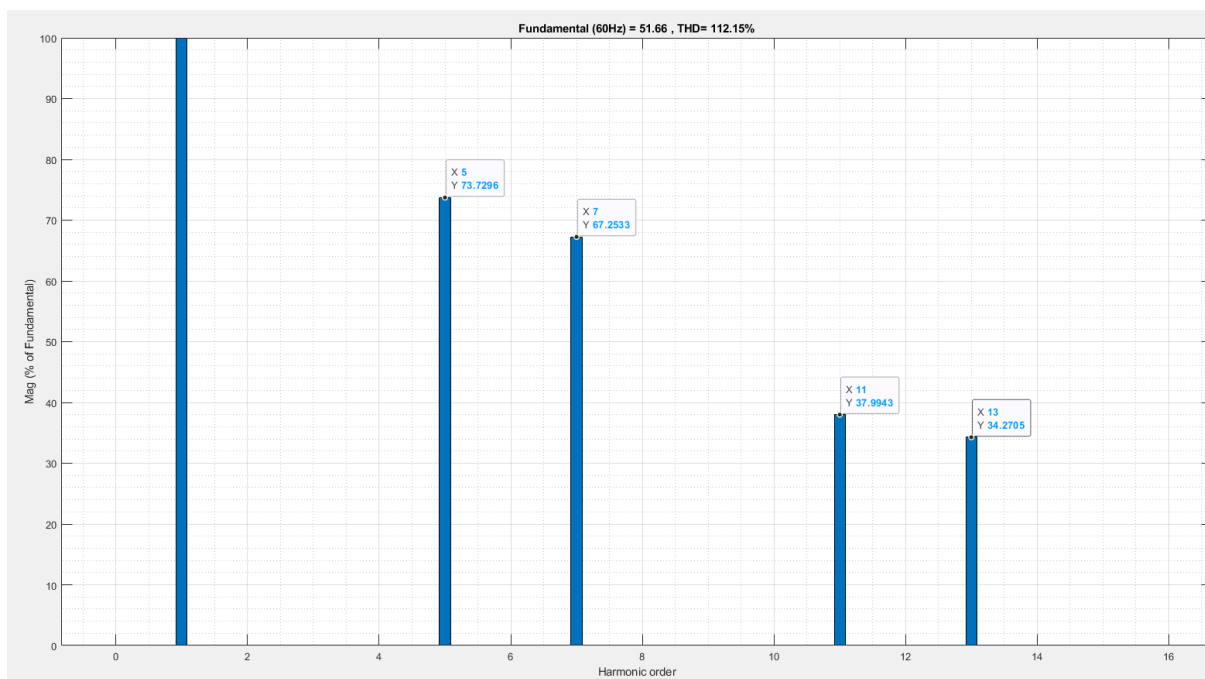
De maneira análoga ao caso anterior, foi feita a análise de Fourier com o objetivo de observar a magnitude de cada componente harmônica presente nas formas de onda. Para isso são apresentadas as Figuras 40, 41, 42 e 43.

Figura 40 – Segundo caso – FFT da tensão no primário.



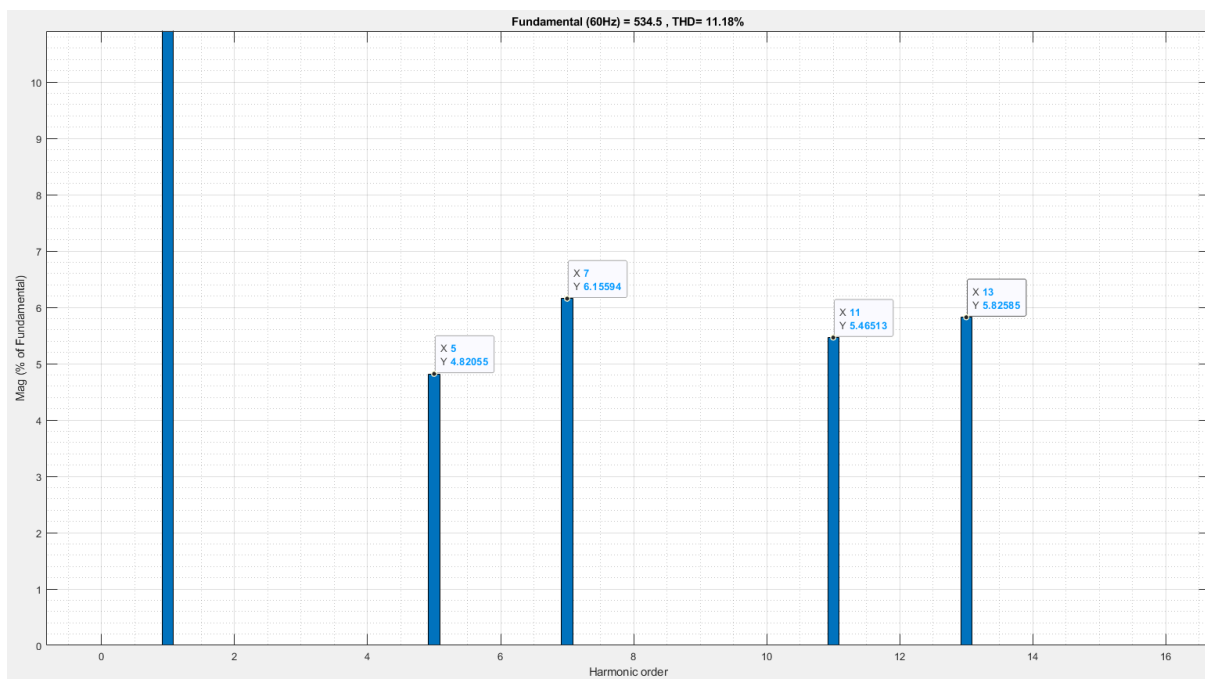
Fonte: Próprio autor

Figura 41 – Segundo caso – FFT da corrente no primário.



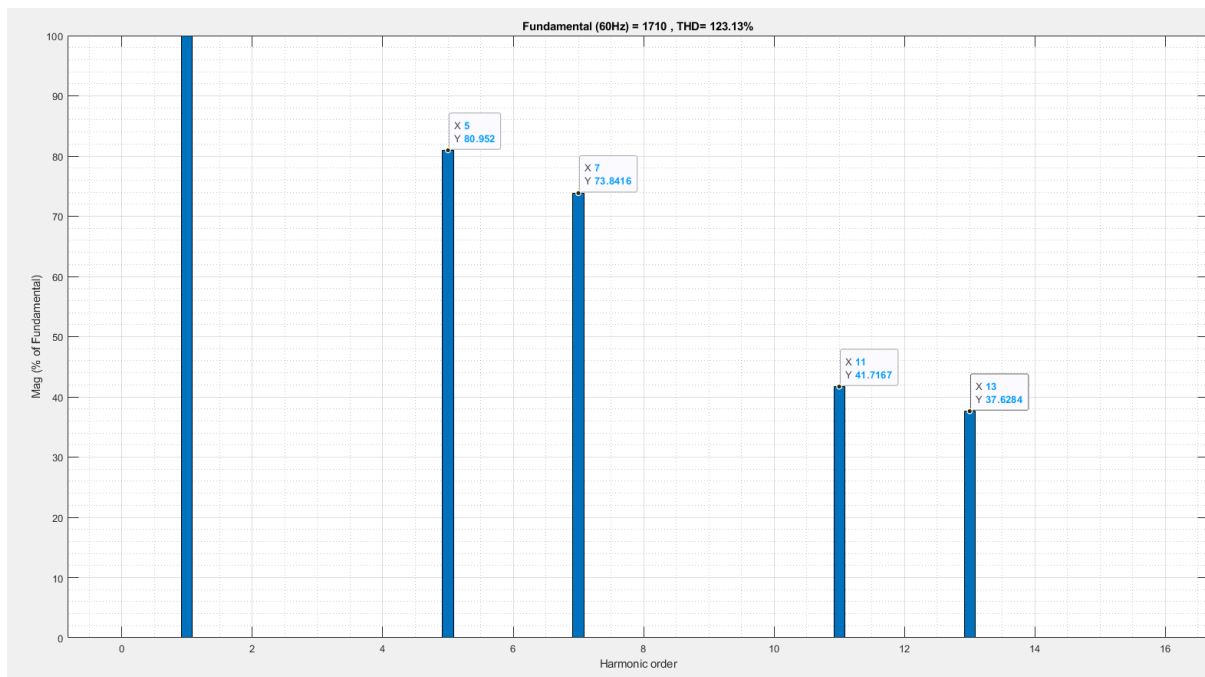
Fonte: Próprio autor.

Figura 42 – Segundo caso – FFT da tensão no secundário.



Fonte: Próprio autor.

Figura 43 – Segundo caso – FFT da corrente no secundário.

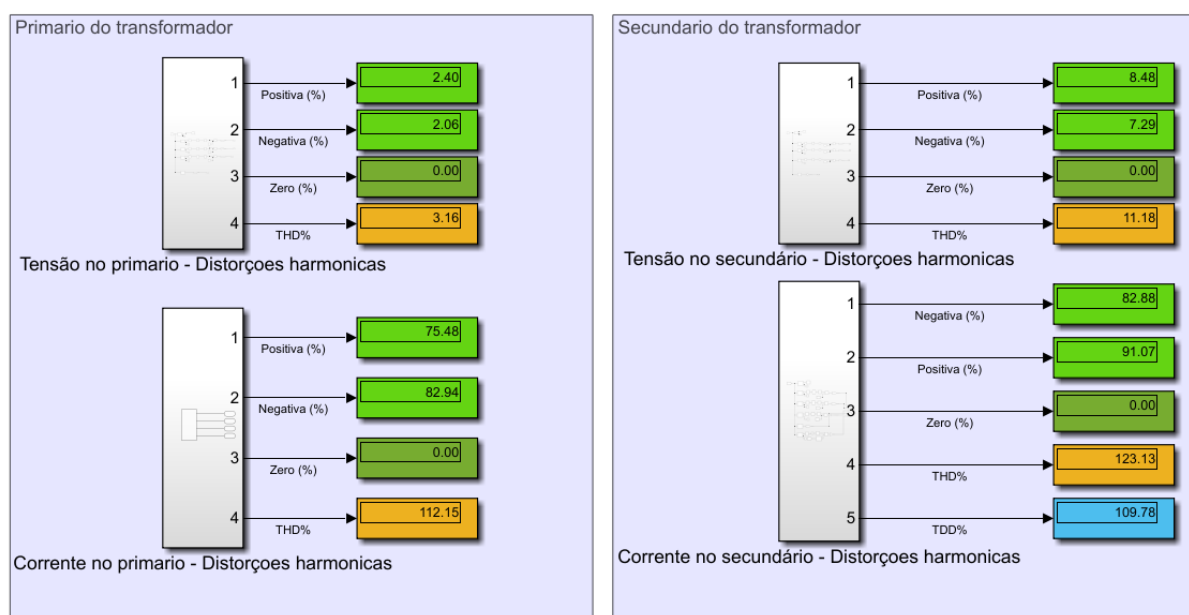


Fonte: Próprio autor.

Com o resultado da análise de Fourier, pode-se observar e comparar os resultados em ambos os lados do transformador. Em relação a corrente, houve uma pequena atenuação da magnitude das harmônicas quando comparado ao lado secundário com o primário. Como neste caso não existe a presença de harmônicas de sequência zero, a THD% das formas de onda de corrente foram bem próximas, com 123% para a corrente do secundário e 112% para a corrente no primário. Observa-se que casos de THD% maiores do que 100% são considerados raros na prática e indicam condição harmônica extrema. A ideia deste caso é apresentar o comportamento do simulador para estes tipos de casos. Em relação as formas de onda de tensão, as distorções são bem menores se comparadas com as correntes, o que valida os resultados obtidos a partir das formas de onda nas Figuras 38 e 39.

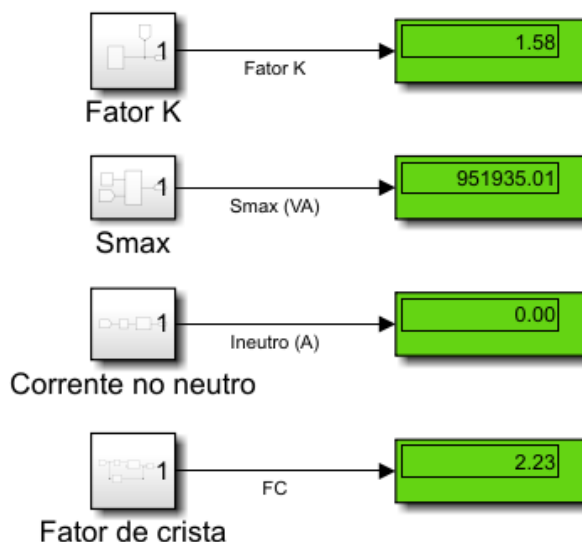
Seguindo com a análise dos resultados observa-se a partir das Figuras 44 e 45 os resultados numéricos.

Figura 44 – Segundo caso – Resultados numéricos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 45 – Segundo caso – Fator K; Smax; corrente no neutro e fator de crista.



Fonte: Próprio autor.

Analisando as Figuras 44 e 45 observa-se que tanto em relação a tensão quanto a corrente, tiveram atenuações nas magnitudes das harmônicas quando comparado ao lado secundário com o primário do transformador da indústria. Nota-se também que os resultados numéricos estão de acordo com os resultados gráficos, indicando grande distorção nas formas de onda de corrente, e distorções muito menores na forma de onda de tensão.

Para este caso o fator K calculado foi maior que no caso anterior, resultando em uma queda na potência máxima de operação do transformador 2 para o valor de 951kVA.

A corrente que circula no neutro foi nula, o que é esperado de um sistema equilibrado e sem a presença de harmônicas de sequência zero (múltiplas de três). O último parâmetro que foi calculado foi a TDD% com valor de 109%. Os resultados obtidos neste caso são ainda mais críticos que os resultados do caso anterior e indicam que o sistema também está operando em condições severas, tornando se necessário a implementação de medidas corretivas.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o sistema projetado se mostrou eficiente quando se trata de obter resultados visuais e numéricos sobre as formas de onda de tensão e corrente nos lados primário e secundário do transformador e a maneira como estas harmônicas influenciam o transformador, fornecendo os principais parâmetros de forma rápida para o usuário, que se desejar fazer uma análise ainda mais detalhada, pode abrir a ferramenta FFT e visualizar individualmente os efeitos das harmônicas em cada forma de onda presente nos lados primário e secundário do transformador.

Este trabalho manteve fixo alguns parâmetros como dados dos transformadores, potência instalada na carga, comprimento da linha de transmissão, porém a plataforma de simulação implementada permite alterar também estes parâmetros para simular condições diferentes.

Como trabalhos futuros pode-se indicar a análise de outros efeitos no sistema elétrico devido a presença de harmônicas adicionando-se a implementação da plataforma de modo que seja possível injetar harmônicas no primário do transformador, e verificar os efeitos de distorção na forma de onda de tensão. Adicionalmente a implementação de ações corretivas como filtros ativos e passivos para que se possa testar sua capacidade de mitigar harmônicas, sobre diferentes cenários.

REFERÊNCIAS

H. Moreno, “Harmônicas nas Instalações Elétricas,” in Procobre Brasil - Instituto Brasileiro do Cobre, 2019, p. 44.

R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 2a Edition. McGraw-Hill Professional, 2002.

ANEEL, “PRODIST - Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica.” p. 69, 2021.

IEEE Std 519, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems Sponsored by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society. 2014, pp. 1–29.

ABNT, NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão. 2004, p. 218.