

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Relatório III:

Desequilíbrio e Distorção Harmônica

Disciplina: Qualidade de Energia Elétrica

Discente: Rafael Pavan

Docente: Prof. Dr. Helmo K. Morales Paredes

Bauru, 2020

SUMÁRIO

1. RESUMO	7
2. OBJETIVO.....	8
3. INTRODUÇÃO.....	9
4. ANÁLISE COMPARATIVA CRÍTICA DE NORMATIZAÇÃO EM DESEQUILÍBRIO (E1) ..	12
4.1 NORMAS AMERICANAS (E1.1)	12
4.2 NORMAS EUROPEIAS (E1.2)	13
4.3 NORMAS BRASILEIRAS (E1.3)	14
4.4 SEMELHANÇAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS (E1.4).....	15
5. ESTUDOS DE CASO DESEQUILÍBRIO COM SIMULAÇÕES (E3 e E4)	17
5.1 EXEMPLO NUMÉRICO 1 – MOTOR DE INDUÇÃO (E3.1)	17
5.2 EXEMPLO NUMÉRICO 2 A – CIRCUITO A 3 CONDUTORES (E3.2A).....	23
5.3 EXEMPLO NUMÉRICO 2 B – CIRCUITO A 4 CONDUTORES (E3.2B).....	27
5.4 ESTUDO DE CASO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E CORRENTE (E4)	33
6. ANÁLISE COMPARATIVA CRÍTICA DE NORMATIZAÇÃO EM DISTORÇÃO HARMÔNICA (E2).....	38
6.1 NORMAS AMERICANAS (E2.1)	38
6.2 NORMAS EUROPEIAS (E2.2)	42
6.3 NORMAS BRASILEIRAS (E2.3)	44
6.4 SEMELHANÇAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS (E2.4)	47
7. ESTUDO DE CASO DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO E CORRENTE (E5)	48
7.1 ESTUDO DE CASO 1	48
7.2 ESTUDO DE CASO 2	59
7.3 ESTUDO DE CASO 3	64
8. DESAFIO: COMPONENTES GENERALIZADAS (E6).....	68
9. CONCLUSÕES.....	72
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desequilíbrio de Tensão	9
Figura 2 – Distorção Harmônica de Corrente e Espectro de Frequência.....	10
Figura 3 – Fenômeno de <i>Notching</i>.....	11
Figura 4 – Circuitos Equivalentes por Fase do Motor de Indução, Escorregamento de 2% (Normal, Positiva e Negativa).....	22
Figura 5 – Circuito a 3 Condutores Proposto	23
Figura 6 – Forma de Onda da Tensão de Linha da Fonte.....	24
Figura 7 – Forma de Onda da Tensão e da Corrente no PAC	24
Figura 8 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Tensões de Linha.....	25
Figura 9 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Correntes	26
Figura 10 – Circuito a 4 Condutores.....	28
Figura 11 – Forma de Onda da Tensão de Linha da Fonte.....	28
Figura 12 – Forma de Onda da Tensão e da Corrente no PAC	29
Figura 13 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Tensões de Linha do PAC.....	30
Figura 14 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Tensões de Fase do PAC	31
Figura 15 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Correntes do PAC.....	32
Figura 16 – Modelo do Circuito Simulado para o Estudo de Caso	34
Figura 17 – Variação do Desequilíbrio de Corrente com a Tensão	35
Figura 18 – Torque Eletromagnético Para Cada Caso Simulado	35

Figura 19 – Fator de Depreciação De Um Motor de Indução em Função do Desbalanceamento de Tensão	36
Figura 20 – Circuito do Estudo de Caso 1	48
Figura 21 – Onda de Tensão e Corrente de Fase	49
Figura 22 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	50
Figura 23 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase	50
Figura 24 – Onda de Tensão e Corrente de Fase	51
Figura 25 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	52
Figura 26 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	52
Figura 27 – Onda de Tensão e Corrente de Fase	53
Figura 28 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	54
Figura 29 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	54
Figura 30 – Onda de Tensão e Corrente de Fase	55
Figura 31 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	56
Figura 32 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	56
Figura 33 – Conjugado Eletromagnético para Cada Estudo de Caso	57
Figura 34 – Circuito com Carga em Y com Neutro	59
Figura 35 – Forma de Onda de Tensão e Corrente de Fase	60
Figura 36 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase	60
Figura 37 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase	61
Figura 39 – Circuito com Carga em Y e Sem Neutro	62
Figura 40 – Forma de Onda de Tensão e Corrente de Fase	62
Figura 41 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase	63
Figura 42 – Circuito com Com Retificador Onda Completa	64

Figura 43 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase	66
Figura 44 – Espectro de Harmônicas da Tensão de Fase no PAC	67
Figura 45 – Tensões e Correntes Instantâneas	67
Figura 45 – Circuito Simulado Para o Sinal Proposto.....	70
Figura 46 – Componentes Generalizadas	70
Figura 47 – Sinal Reconstituído e Sinal Original.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculos de Desequilíbrio	27
Tabela 2 – Cálculos de Desequilíbrio	32
Tabela 3 – Cálculos de Desequilíbrio de Corrente e Tensão.....	34
Tabela 4 – Limite de Distorção Harmônica de Tensão no PAC.....	40
Tabela 5 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Entre 120 V e 69 kV	40
Tabela 6 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Entre 69 e 161 kV	41
Tabela 7 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Maiores que 161 kV	41
Tabela 8 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente Para Equipamentos de Classes A, B, C e D	42
Tabela 9 – Limite de Distorção Harmônica de Tensão Para Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (240/415V).....	43
Tabela 10 – Limite de Distorção Harmônica de Tensão Para Sistema de Média, Alta e Extra-Alta Tensão	44
Tabela 11 – Limites de Distorção Harmônica de Tensão - PRODIST 8.....	44
Tabela 12 – Limites Globais	46
Tabela 13 – Limites Individuais.....	47
Tabela 14 – Porcentagem de Harmônicas para cada Casos de Estudo	49
Tabela 15 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Entre 120 V e 69 kV	65
Tabela 16 – Sinal Implementado no Simulink.....	69

1. RESUMO

A crescente industrialização e modernização dos aparelhos eletrônicos trouxe novos desafios para a qualidade de energia elétrica a partir da inserção de cargas não lineares nas instalações elétricas. Como consequência, desequilíbrios de tensão e corrente, bem como distorções em suas formas de onda acabaram por se tornar aspectos relevantes no dimensionamento e projeto de novos sistemas. O presente trabalho visa demonstrar através de simulações como tais fenômenos se comportam em diferentes condições, bem como avaliar os limites estabelecidos pelas normas e aplicar os diferentes métodos de cálculo sugerido por estas. Será visto como se é feita a decomposição em componentes simétricas de ondas senoidais e não senoidais, além de se analisar como se comportam as harmônicas sequência zero, positiva e negativa.

2. OBJETIVO

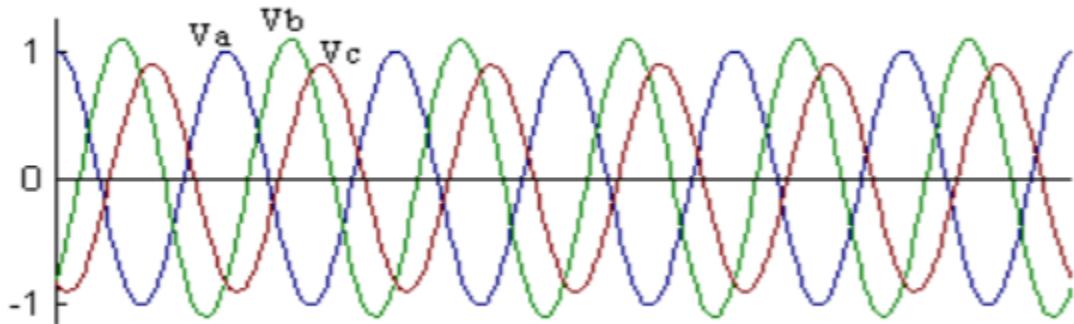
Através do presente trabalho pretende-se tomar conhecimento sobre os atuais limites estabelecidos em normas para desequilíbrio e distorções harmônicas, bem como avaliar as diferentes metodologias de cálculo de tais distúrbios. Serão avaliados como tais fenômenos ocorrem sobre diferentes condições de cargas, e os impactos destes nestas. Também será avaliado o desequilíbrio de ondas não puramente senoidais.

3. INTRODUÇÃO

Dentre os fenômenos que contribuem para a perda de qualidade da energia elétrica, estão o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica. Segundo Dugan e ANEEL, o desequilíbrio é definido, em termos percentuais, como sendo o máximo desvio da média das tensões ou correntes trifásicas, dividido pela própria média. Pode ser mais rigorosamente definido através da utilização dos conceitos de componentes simétricas, onde separa-se a onda em três componentes: sequência positiva, negativa e zero. Dessa forma, as proporções entre as componentes de sequência negativa ou zero em relação a componente positiva, podem ser utilizadas para caracterizar o desequilíbrio [1].

O desequilíbrio é causado pela conexão desigual de cargas no sistema de distribuição, manifestando-se no PAC devido às quedas de tensões desiguais sobre a impedância do alimentador. Possui grande impacto em cargas motoras, pois a componente de sequência negativa faz com que o campo magnético gerado por tal fonte gire no sentido contrário ao da componente fundamental [2].

Figura 1 – Desequilíbrio de Tensão

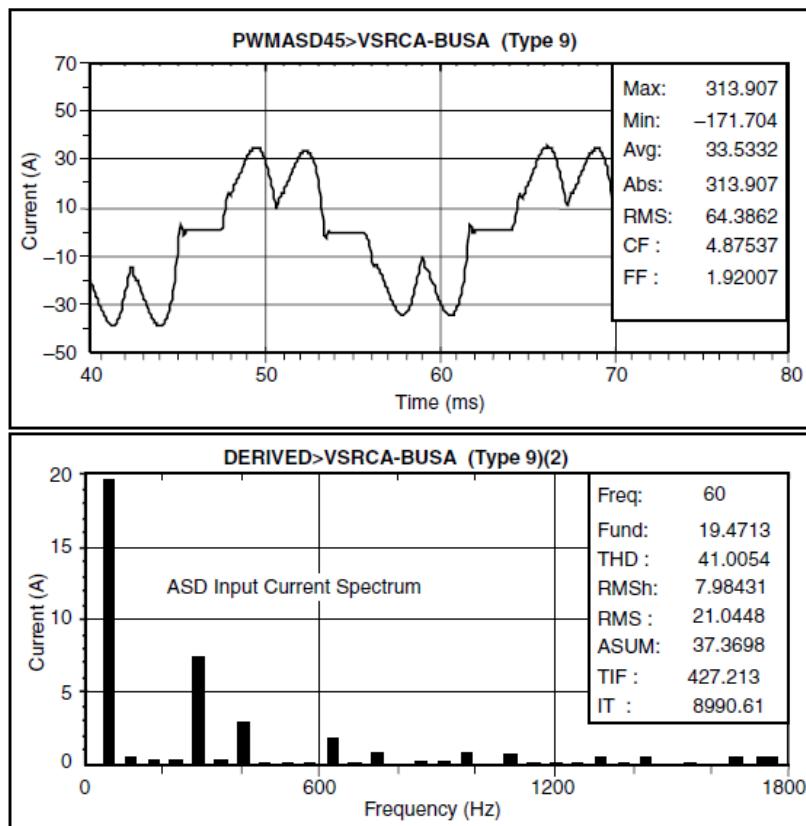


Fonte: Pomilio [2]

No tocante à distorção de onda, é definida como sendo o desvio de estado estacionário em relação à uma forma de onda ideal senoidal na frequência nominal,

podendo ser caracterizada através de seu conteúdo espectral no domínio da frequência. Pode ser causada pela inserção de uma componente CC no sistema de potência CA, o que leva transformadores à deterioração devido à elevação da saturação e do aquecimento decorrente, causando um estresse na isolação de seus componentes. Outra razão para a ocorrência da distorção da forma de onda é a presença de harmônicas, que são componentes senoidais múltiplas inteiros da frequência nominal. Tais componentes ao se combinarem com a fundamental produzem uma distorção da forma de onda. São consequências da utilização de cargas não-lineares no sistema de potência [3].

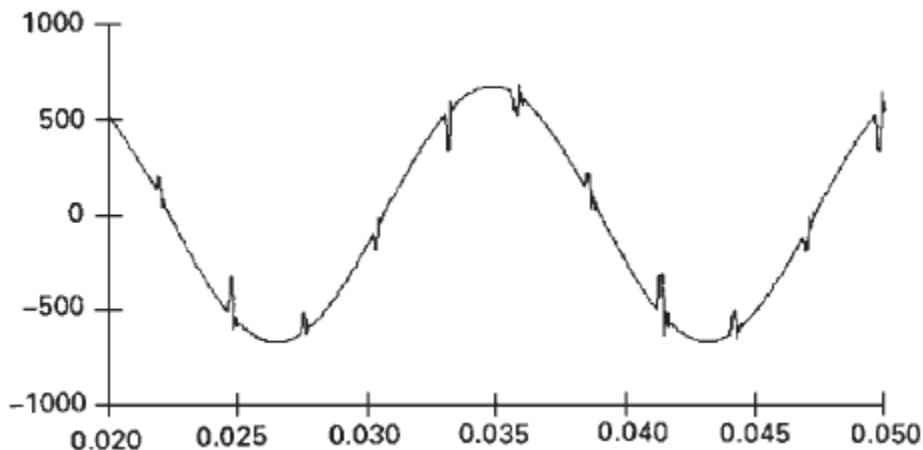
Figura 2 – Distorção Harmônica de Corrente e Espectro de Frequência



Fonte: Electrical Power Quality Systems, Dugan [1]

Outros fatores que ocasionam a distorção de onda são: interharmônicas, ruídos e *notching*. As interharmônicas são componentes de frequência não múltiplas inteiras da componente fundamental, geradas por equipamentos como: fornos de indução, dispositivos a arco, e conversores de frequência estáticos. O ruído, é um sinal elétrico indesejável imposto sobre os sinais de tensão e corrente nos condutores de fase, neutro ou de transmissão de sinais. Estes problemas geralmente são mais amplificados através de um aterramento inadequado que falha em conduzir o ruído para fora do sistema elétrico, sendo prejudicial aos microcomputadores e controladores programáveis. O fenômeno de *notching* (Figura 3), é um distúrbio de tensão periódico causado pela operação normal de um dispositivo de eletrônica de potência, onde há a comutação de corrente de uma fase para outra, sendo que neste curto período de tempo de comutação há um curto circuito entre as duas fases, levando o valor da tensão a aproximadamente zero.

Figura 3 – Fenômeno de Notching



Fonte: Electrical Power Quality Systems, Dugan [1]

4. ANÁLISE COMPARATIVA CRÍTICA DE NORMATIZAÇÃO EM DESEQUILÍBRIO (E1)

Neste item, serão comparadas as normas americanas, europeias, brasileiras e demais padrões pertinentes no tocante à qualidade de energia elétrica, em específico, ao distúrbio de desequilíbrio.

4.1 NORMAS AMERICANAS (E1.1)

O Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), através da IEEE Std 1159TM-2019, utiliza a seguinte metodologia para o cálculo do desequilíbrio, podendo ser utilizado para tensão ou corrente:

$$\text{Desequilíbrio (\%)} = \frac{|C_{neg}|}{|C_{pos}|} * 100\%$$

Onde:

Desequilíbrio (%) = Desequilíbrio expresso em termos percentuais;

$|C_{neg}|$ = Magnitude da Componente Simétrica Negativa (Sequência 2) de Tensão ou Corrente;

$|C_{pos}|$ = Magnitude da Componente Simétrica Positiva (Sequência 1) de Tensão ou Corrente;

O desequilíbrio é definido como sendo a divisão entre a magnitude da componente simétrica de sequência negativa pela magnitude da componente simétrica de sequência positiva. Tipicamente, este valor encontra-se numa faixa entre 0,5 a 5% para tensão e

de 1 a 3% para corrente, em estado estacionário [3]. O mesmo IEEE, através da norma IEEE Std 112™-2017 - *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, define o desequilíbrio como sendo [4]:

$$\text{Desequilíbrio (\%)} = \frac{\text{Máxima Variação de Tensão de Fase Em Relação a Média das 3 Fases}}{\text{Média da Tensão de Fase das Três Fases}} * 100\%$$

O desequilíbrio máximo para os motores, segundo o IEEE não deve ser superior a 0.5%. Já as normas ANSI C84.1-2016 [3] e NEMA MG1 – 14.34 (National Electrical Manufacturers Association) [5], definem o desequilíbrio como sendo:

$$\text{Desequilíbrio (\%)} = \frac{\text{Máxima Variação de Tensão de Linha Em Relação a Média das Tensões de Linha}}{\text{Média das Tensões de Linha}} * 100\%$$

A definição é a mesma que a utilizada pela IEEE 112, no entanto, utiliza as tensões de linha para realizar o cálculo. Para as normas NEMA MG1 e ANSI C84.1, estabelece que o desequilíbrio de tensão no sistema não seja superior a 3% em condições de operação a vazio.

4.2 NORMAS EUROPEIAS (E1.2)

Aqui, pode-se notar a repetição das metodologias anteriormente explicitadas. A definição de desequilíbrio segundo a IEC 61000-2-2 (*Environment Compatibility Levels for Low Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Low Voltage Power Supply Systems*), é a mesma utilizada pela IEEE 1159 [6]:

$$\text{Desequilíbrio (\%)} = \frac{|C_{neg}|}{|C_{pos}|} * 100\%$$

Para sistemas de baixa e media tensão a IEC standard 61000-2-2 requer que o desbalanceamento seja inferior a 2%. Outro método utilizado na europa para realização de medições é o do CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*), sendo empregado nos casos em que os aparelhos de medição realizam leituras apenas dos módulos das tensões (tensão eficaz).

$$Desequilíbrio (\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\%$$

Onde

$$\beta = \frac{|Vab|^4 + |Vbc|^4 + |Vca|^4}{(|Vab|^2 + |Vbc|^2 + |Vca|^2)^2}$$

4.3 NORMAS BRASIEIRAS (E1.3)

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, no tocante ao desequilíbrio de tensão, expressa o fator de desequilíbrio da mesma forma que as normas do IEEE 1159 e CIGRÉ:

$$Desequilíbrio (\%) = \frac{|C_{neg}|}{|C_{pos}|} * 100\%$$

Ou, alternativamente:

$$Desequilíbrio (\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\%$$

Onde

$$\beta = \frac{|Vab|^4 + |Vbc|^4 + |Vca|^4}{(|Vab|^2 + |Vbc|^2 + |Vca|^2)^2}$$

Ainda complementando, o PRODIST estabelece os limites máximos para o fator de desequilíbrio, de forma que para instalações com tensão nominal inferior a 1 kV, o fator de desequilíbrio que foi superado em 5% das 1008 leituras tem de ser inferior a 3%, enquanto que para instalações com tensão nominal entre 1 kV e 230 kV, o fator deve ser inferior a 2%. Correspondem ao máximo valor desejável a ser observado nos sistemas de distribuição.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira e de seus componentes, o desequilíbrio de tensão também deve ser expresso de acordo com a relação entre as componentes de sequência negativa e positiva. De acordo com esse submódulo, o limite global nos barramentos da rede básica e nos transformadores de fronteira é de 2%, e o limite individual nos pontos de conexão à rede básica ou aos barramentos dos transformadores de fronteira é de 1,5% [9].

4.4 SEMELHANÇAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS (E1.4)

Com a finalidade de analisar as semelhanças, vantagens e desvantagens de cada método, deve-se, inicialmente, estabelecer que a maneira mais adequada de se mensurar o desequilíbrio de tensão ou corrente é através da utilização dos módulos das componentes simétricas negativa e positiva, como estabelece a IEC e o IEEE. No entanto, apesar de ser o método mais preciso e adequado, nem sempre há a possibilidade de possuir tais valores em mãos, principalmente quando em atividades em campo. Sendo assim, a segunda melhor opção de metodologia de cálculo do desbalanceamento é a utilizada pelo CIGRÉ, que utiliza apenas os valores eficazes das tensões de linha. No entanto, as expressões do CIGRÉ são compatíveis apenas para valores de linha e não de fase, além de que exige que as componentes simétricas de

sequência zero sejam nulas. Por último, os métodos ANSI, IEEE e NEMA, que utilizam a média dos valores das tensões de fase (IEEE) e linha (ANSI e NEMA), e o maior desvio absoluto entre os valores medidos e a média. Segundo o IEEE, os valores calculados se aproximam do real caso o conteúdo harmônico do sinal seja baixo e a componente de sequência zero seja pequena.

5. ESTUDOS DE CASO DESEQUILÍBRIO COM SIMULAÇÕES (E3 e E4)

Nesta seção, serão apresentados estudos de caso de desequilíbrio realizados a partir de simulações com o software MATLAB versão 2018, através da ferramenta SIMULINK. Os valores de tensão passados na problemática do trabalho foram considerados como sendo **EFICAZ (RMS)**.

5.1 EXEMPLO NUMÉRICO 1 – MOTOR DE INDUÇÃO (E3.1)

No exemplo numérico em questão, foi utilizado o circuito equivalente de um motor de indução com gaiola de esquilo com os valores de reatância e resistência elaborados na problemática do trabalho (arquivo: E3_1_Desequilíbrio). A tensão dada pelo trabalho foi considerada como sendo o **VALOR EFICAZ (RMS)**. Foram calculadas as componentes simétricas de sequência positiva e negativa para essas tensões, e implementadas nos correspondentes circuitos equivalentes de sequência positiva e negativa do motor de indução.

O valor da corrente eficaz de estator cada fase dado pela simulação foi de:

- 'Corrente Fase A' = 9.87 Arms | -62.20°
- 'Corrente Fase B' = 10.35 Arms | 177.80°
- 'Corrente Fase C' = 10.83 Arms | 57.80°

O valor da corrente eficaz de rotor de cada fase dado pela simulação foi de:

- 'Corrente Rotor Fase A' = 4.587 Arms | -0.426°
- 'Corrente Rotor Fase B' = 4.807 Arms | -120.3°
- 'Corrente Rotor Fase C' = 5.031 Arms | 119.70°

Em seguida, implementou-se o seguinte algoritmo pelo MATLAB para calcular as correntes simétricas pelo Teorema de Fortscue (script em anexo: code_1.m):

```

% Variáveis de Entrada

magnitudes = [9.87,10.35,10.83]; % <- Inserir os Valores das Magnitudes da
Grandeza a Ser Analisada

angles = degtorad([-62.20,177.80,57.80]); % <- Inserir os Valores dos ângulos
em Graus da Grandeza a Ser Analisada, Referentes às Magnitudes Anteriores

% Implementando Teorema de Fortescue

matriz_A_inv = [1, 1, 1;1,(exp(i*2*3.1415/3)), (exp(i*2*3.1415/3))^2; 1,
(exp(i*2*3.1415/3))^2, (exp(i*2*3.1415/3))];

vetor =
[magnitudes(1).*exp(i*angles(1)),magnitudes(2).*exp(i*angles(2)),magnitudes(3)
.*exp(i*angles(3))];

simetricas = vetor*(1/3)*matriz_A_inv;

modulos_sim=abs(simetricas)
angulos_sim=radtodeg(angle(simetricas))

% Encontrando Componentes de Sequência 1, 2 e 0

positiva = [simetricas(2),
simetricas(2)*exp(i*2*3.1415/3)^2,simetricas(2)*exp(i*2*3.1415/3)];
negativa = [simetricas(3),
simetricas(3)*exp(i*2*3.1415/3),simetricas(3)*exp(i*2*3.1415/3)^2];
zero = [simetricas(1), simetricas(1),simetricas(1)];

v = [real(simetricas);imag(simetricas)];
v1 = [real(positiva);imag(positiva)];
v2 = [real(negativa);imag(negativa)];
v0 = [real(zero);imag(zero)];

% Criando Gráficos

subplot(2,2,1)

plotv(v,'-')
grid on
grid minor
title('Componentes Simétricas')
ylabel('Eixo Imaginário')
xlabel('Eixo Real')
legend('Seq 0', 'Seq 1', 'Seq 2')

subplot(2,2,2)

plotv(v1,'-')
grid on
grid minor
title('Componentes Simétricas Sequência 1')

```

```

ylabel('Eixo Imaginário')
xlabel('Eixo Real')
legend('Ia', 'Ib', 'Ic')

subplot(2,2,3)

plotv(v2,'-')
grid on
grid minor
title('Componentes Simétricas Sequência 2')
ylabel('Eixo Imaginário')
xlabel('Eixo Real')
legend('Ia', 'Ib', 'Ic')

subplot(2,2,4)

plotv(v0,'-')
grid on
grid minor
title('Componentes Simétricas Sequência 0')
ylabel('Eixo Imaginário')
xlabel('Eixo Real')
legend('Ia', 'Ib', 'Ic')

abs(positiva)
radtodeg(angle(positiva))

abs(negativa)
radtodeg(angle(negativa))

abs(zero)
radtodeg(angle(zero))

```

Os valores das componentes simétricas calculadas para as correntes de estator medidas:

1. Sequência Zero Valor Eficaz (RMS)

$$3x 0.2771 | 87.80$$

2. Sequência Positiva Valor Eficaz (RMS)

$$I_a = 10.35 | -62.2036^\circ, I_b = 10.35 | 177.7893^\circ, I_c = 10.35 | 57.7928^\circ$$

3. Sequência Negativa Valor Eficaz (RMS)

$$I_a = 0.2768 | 147.760^\circ, I_b = 0.2768 | -92.2435^\circ, I_c = 0.2768 | 27.7530^\circ$$

Os valores das componentes simétricas calculadas para as tensões de fase:

4. Sequência Zero Amplitude (Valor de Pico)

$$3x 4.7748 | 150.3^\circ$$

5. Sequência Positiva Amplitude (Valor de Pico)

$$V_a = 179.550 | 0^\circ, V_b = 179.550 | -120^\circ, V_c = 179.550 | 120^\circ$$

6. Sequência Negativa Amplitude (Valor de Pico)

$$V_a = 4.7693 | -150.3406^\circ, V_b = 4.7693 | -30.3441^\circ, V_c = 4.7693 | 89.6524^\circ$$

Uma vez calculada as componentes simétricas positivas e negativas das tensões de fase, foi realizada uma simulação para circuitos equivalentes do motor de indução para sequência positiva e negativa. O conjugado eletromagnético (Ce) líquido [5] para cada fase pode ser calculado a partir da expressão:

- **Sequência Positiva:**

$$Ce = w * P = \frac{60}{2 * \pi * 120 * \frac{f}{p}} * I_{rotor}^2 * \frac{R_{rotor}}{s}$$

- **Sequência Negativa:**

$$Ce = w * P = \frac{60}{2 * \pi * 120 * \frac{f}{p}} * I_{rotor}^2 * \frac{R_{rotor}}{2 - s}$$

Uma vez simulado os circuitos equivalentes do motor de indução, calculou-se o conjugado eletromagnético para cada fase, com base nas correntes de rotor mensuradas.

Condição Desequilibrada:

- **Conjugado Fase A:** 4.19 N.m
- **Conjugado Fase B:** 4.61 N.m
- **Conjugado Fase C:** 5.06 N.m
- **Conjugado Total:** 13.86 N.m

Em seguida calculou-se o torque eletromagnético para os circuitos de sequência positiva e negativa.

Sequência Positiva:

Corrente Rotórica Considerada: 4.81 A

Conjugado Total: 13.898 N.m

Sequência Negativa:

Corrente Rotórica Considerada: 2.61

Conjugado Total: 0.0413 N.m

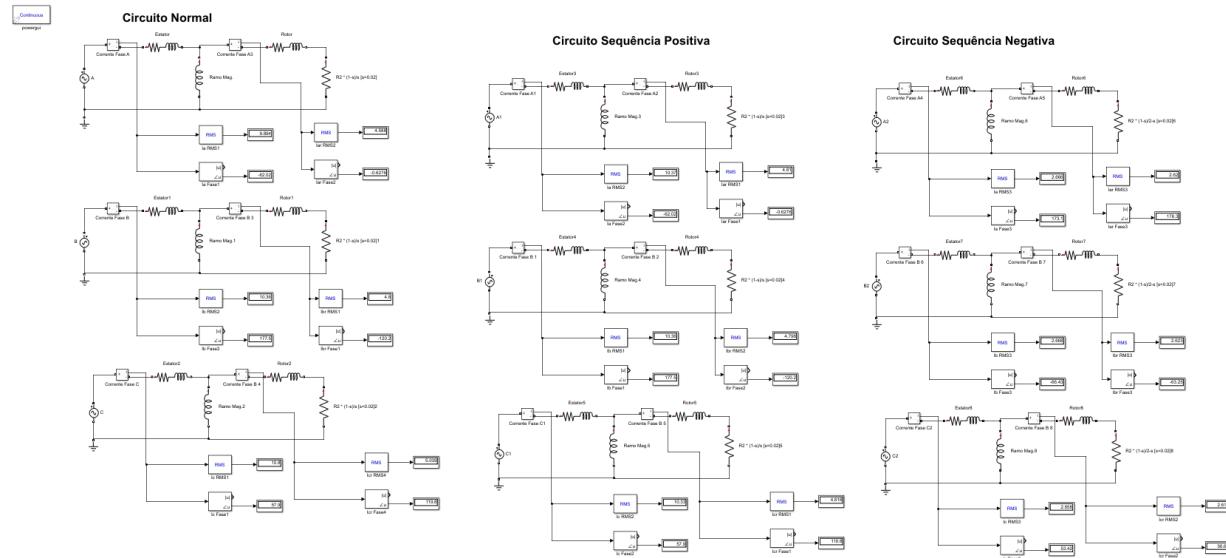
Sabe-se que o torque eletromagnético (Ce) produzido pela parcela da componente simétrica de sequência negativa é no sentido contrário ao da positiva, portanto, subtrativo. A componente simétrica de sequência zero não produz torque. Logo:

$$Ce^{Total} = Ce^+ - Ce^-$$

Realizando a subtração, encontramos que o conjugado total é de 13.856 N.m, o que é bem próximo ao calculado anteriormente com os valores de tensões desequilibradas (13.86 N.m). Assim, pode-se ver que o desequilíbrio de tensão diminui o conjugado total desenvolvido pela máquina, uma vez que as componentes de sequência negativa contribuem negativamente no cálculo. A tensão da problemática foi utilizada como sendo a de valor eficaz.

***Nota: Caso o valor da tensão informada no enunciado fosse considerada como sendo de pico (amplitude), os valores RMS de corrente equivalentes seriam $\sqrt{2}$ menores, enquanto que o torque seria a metade do calculado anteriormente.**

Figura 4 – Circuitos Equivalentes por Fase do Motor de Indução, Escorregamento de 2% (Normal, Positiva e Negativa)

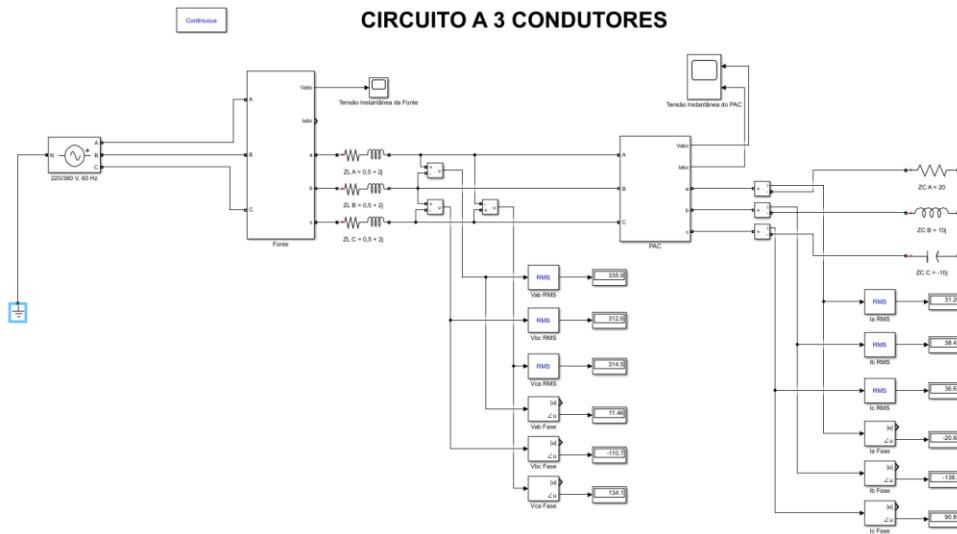


Fonte: Autor

5.2 EXEMPLO NUMÉRICO 2 A – CIRCUITO A 3 CONDUTORES (E3.2A)

No exemplo numérico em questão, foi utilizado o circuito a 3 condutores com os respectivos valores de impedância de linha e de carga elaborados na problemática do trabalho (arquivo: E3_2_A_Desequilibrio). Os valores de tensão passados no enunciado foram considerados como sendo **EFICAZ (RMS)**. O circuito implementado pode ser visto na Figura abaixo:

Figura 5 – Circuito a 3 Condutores Proposto



Fonte: Autor

Os valores informados de tensão da fonte foram considerados como sendo o RMS. Sendo assim, a forma de onda da fonte tem a seguinte característica, com tensão RMS de fase de 220 V e Linha de 380 V:

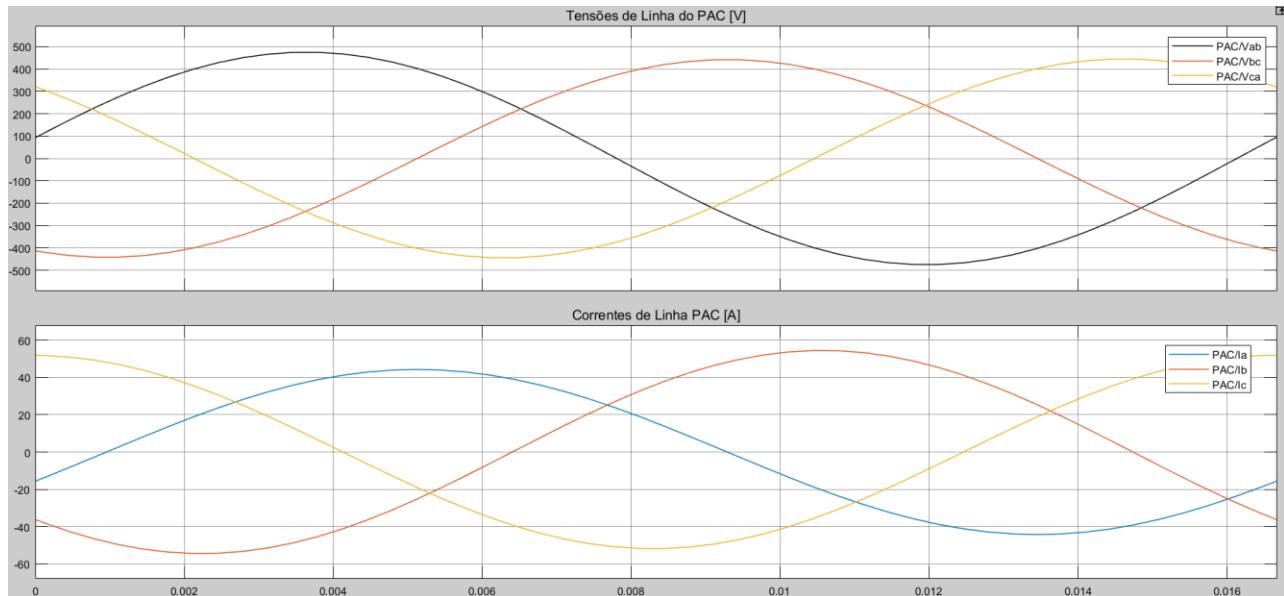
Figura 6 – Forma de Onda da Tensão de Linha da Fonte



Fonte: Autor

Em decorrência da carga desequilibrada, tem-se a forma de onda de tensão e corrente no PAC:

Figura 7 – Forma de Onda da Tensão e da Corrente no PAC



Fonte: Autor

Os valores das tensões de linha medidos no PAC:

- ' V_{AB} : PAC' = 335.91 VRMS | 11.46°
- ' V_{CA} : PAC' = 314.46 VRMS | 134.13°
- ' V_{BC} : PAC' = 312.58 VRMS | -110.66°

Os valores das componentes simétricas calculadas para as tensões de linha medidas no PAC:

7. Sequência Zero

$$3x 0.0136 | -130.8945^\circ$$

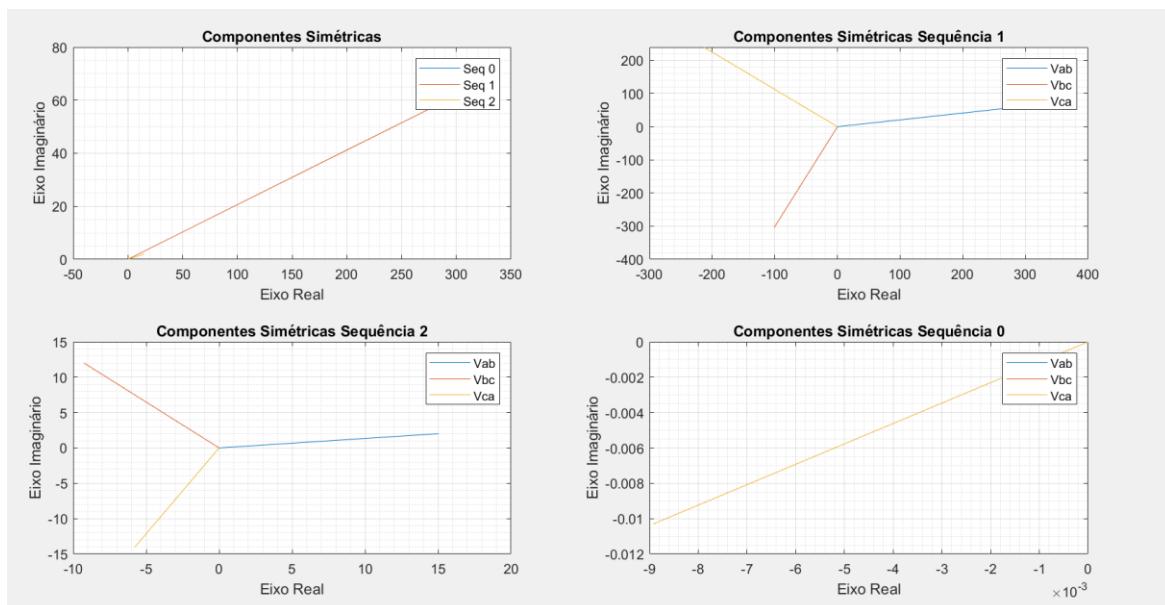
8. Sequência Positiva

$$V_{ab} = 320.8002 | 11.6402^\circ, V_{bc} = 320.8002 | -108.3668^\circ, V_{ca} = 320.8002 | 131.6367^\circ$$

9. Sequência Negativa

$$V_{ab} = 15.1620 | 7.6360^\circ, V_{bc} = 15.1620 | 127.6324^\circ, V_{ca} = 15.1620 | -112.3711^\circ$$

Figura 8 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Tensões de Linha



Fonte: Autor

Os valores das correntes medidas no PAC:

- '|I A: PAC| = 31.26 Arms | -20.66°
- '|I C: PAC| = 36.61 Arms | 90.81°
- '|I B: PAC| = 38.47 Arms | -138.32°

Os valores das componentes simétricas calculadas para as correntes medidas no PAC:

10. Sequência Zero

$$3x 0.0014 | -89.4509$$

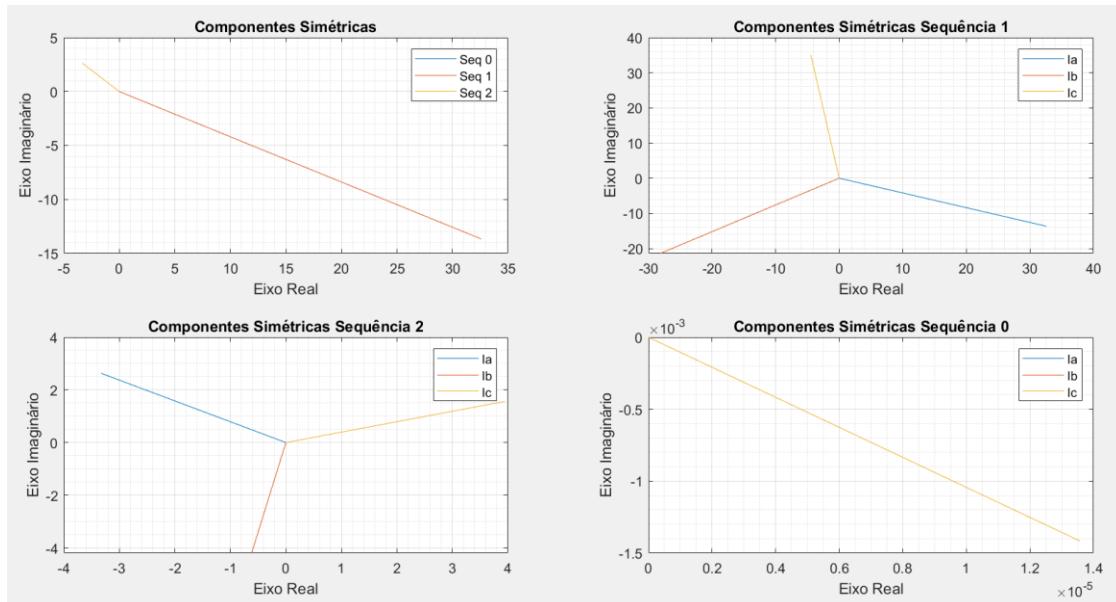
11. Sequência Positiva

$$I_a = 35.3243 | -22.7509^\circ, I_b = 35.3243 | -142.7580^\circ, I_c = 35.3243 | 97.2456^\circ$$

12. Sequência Negativa

$$I_a = 4.2414 | 141.6453^\circ, I_b = 4.2414 | -98.3582^\circ, I_c = 4.2414 | 21.6382^\circ$$

Figura 9 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Correntes



Fonte: Autor

Com base nos dados levantados e calculados anteriormente, foram calculados os valores de desequilíbrio para cada norma citada neste trabalho.

Tabela 1 – Cálculos de Desequilíbrio

DESEQUILÍBRIO			
MÉTODO DE CÁLCULO	TENSÃO DE FASE	TENSÃO DE LINHA	CORRENTE
IEEE (112)	X	X	11,81%
ANSI - NEMA	X	4,65%	X
CIGRÉ	X	4.77%	X
PRODIST 1 (SIMÉTRICAS)	X	4,72%	12%
PRODIST 2 (EFICAZ)	X	4.77%	X
IEC	X	4,72%	12%

Fonte: Autor

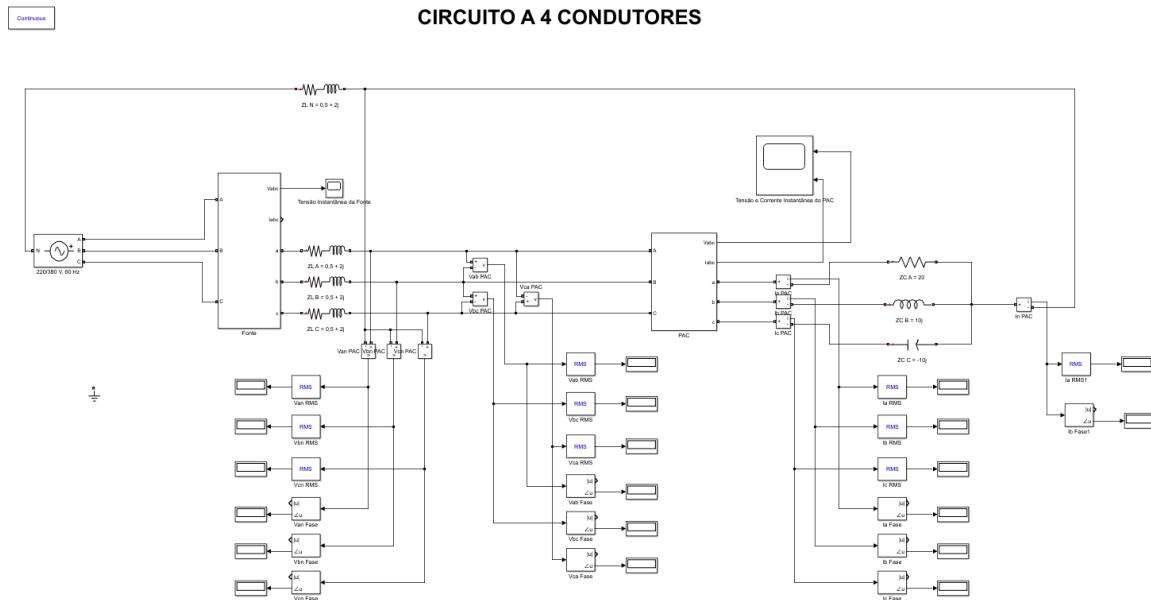
Observa-se que os métodos de cálculo do IEEE, ANSI e NEMA, aproximam-se muito dos cálculos que utilizam as componentes simétricas em consideração. O método CIGRÉ resultou praticamente o mesmo valor que o método das componentes simétricas, com a vantagem de utilizar apenas os valores de tensão eficaz de linha.

***Nota: Caso o valor da tensão informada no enunciado fosse considerada como sendo de pico (amplitude), os valores RMS de corrente e tensões equivalentes calculados anteriormente seriam $\sqrt{2}$ menores.**

5.3 EXEMPLO NUMÉRICO 2 B – CIRCUITO A 4 CONDUTORES (E3.2B)

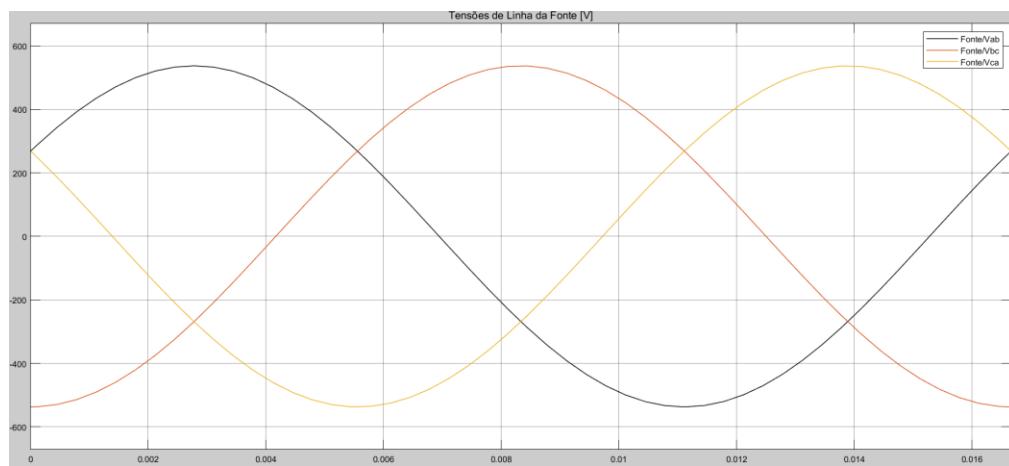
No exemplo numérico em questão, foi utilizado o circuito a 4 condutores com os respectivos valores de impedância de linha e de carga elaborados na problemática do trabalho (arquivo: E3_2_B_Desequilibrio). Os valores de tensão passados no enunciado foram considerados como sendo **EFICAZ (RMS)**. O circuito implementado pode ser visto na Figura abaixo:

Figura 10 – Circuito a 4 Condutores



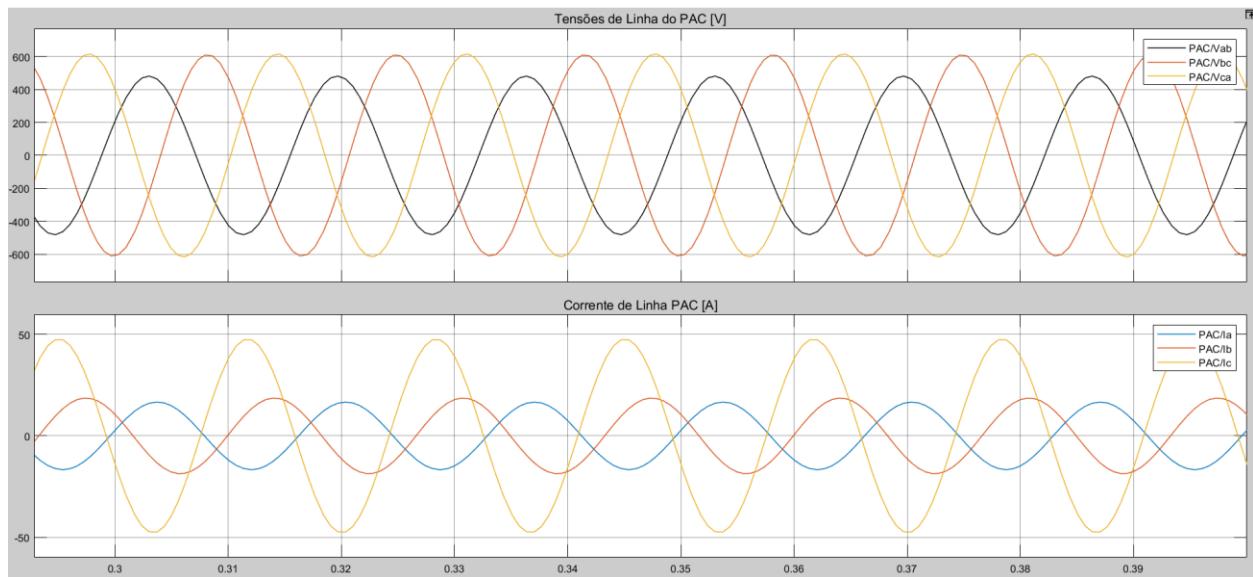
Fonte: Autor

Figura 11 – Forma de Onda da Tensão de Linha da Fonte



Fonte: Autor

Figura 12 – Forma de Onda da Tensão e da Corrente no PAC



Fonte: Autor

Os valores das tensões de linha medidos no PAC:

- 'Vab PAC' = 340.58 Vrms | 25.71°
- 'Vbc PAC' = 432.10 Vrms | -86.83°
- 'Vca PAC' = 435.71 Vrms | 139.38°

Os valores das componentes simétricas calculadas para as tensões de linha medidas no PAC:

13. Sequência Zero

$$3x 0.0143 | -36.3161^\circ$$

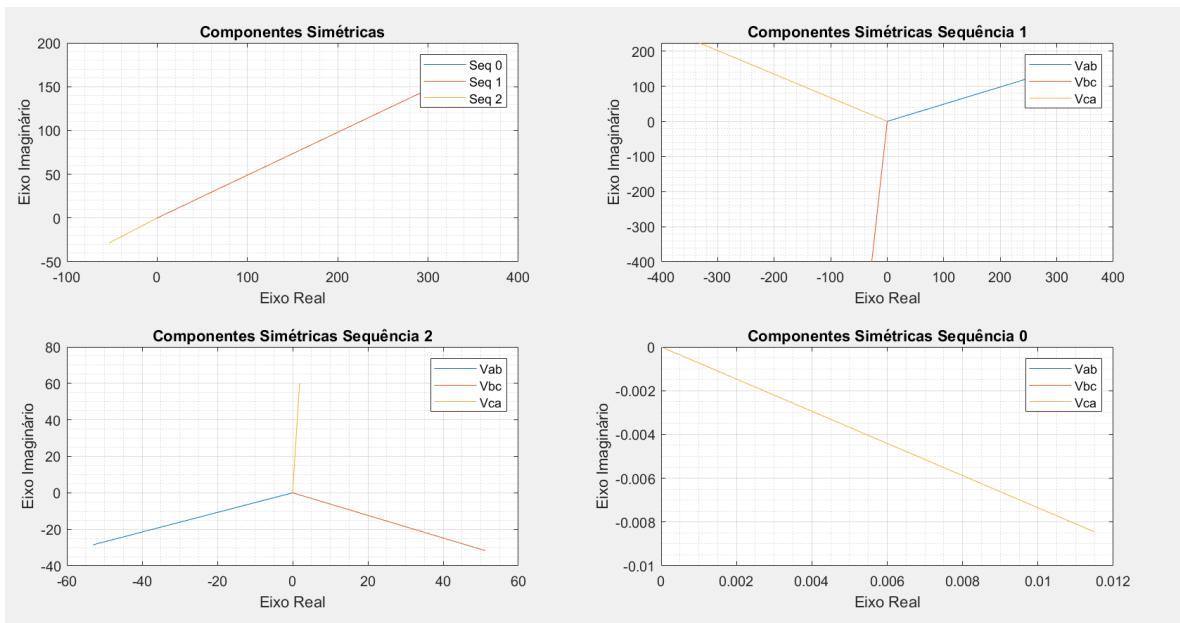
14. Sequência Positiva

$$V_{ab} = 400.7001 | 26.0905^\circ, V_{bc} = 400.7001 | -93.9166^\circ, V_{ca} = 400.7001 | 146.0869^\circ$$

15. Sequência Negativa

$$V_{ab} = 60.1706 | -151.7575^\circ, V_{bc} = 60.1706 | -31.7611^\circ, V_{ca} = 60.1706 | 88.2354^\circ$$

Figura 13 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Tensões de Linha do PAC



Fonte: Autor

Os valores das tensões de fase medidos no PAC:

- 'Van PAC' = 235.64 Vrms | 9.54°
- 'Vbn PAC' = 131.77 Vrms | 124.41°
- 'Vcn PAC' = 337.38 Vrms | 106.94°

Os valores das componentes simétricas calculadas para as tensões de fase medidas no PAC:

16. Sequência Zero

$$3x 158.0897 | 82.7790^\circ$$

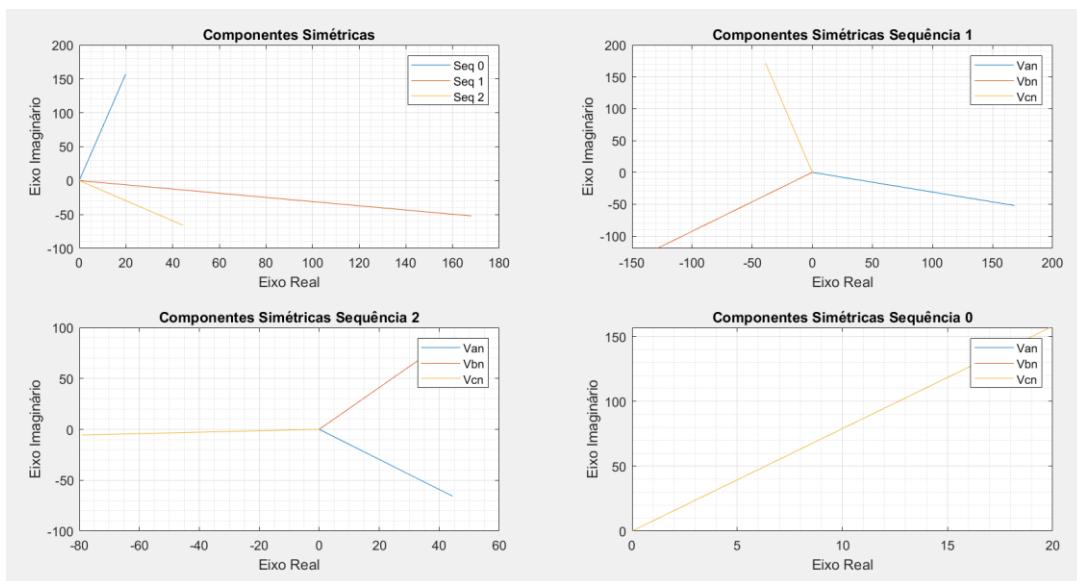
17. Sequência Positiva

$$\text{Van} = 175.9027 | -17.2021^\circ, \text{Vbn} = 175.9027 | -137.2091^\circ, \text{Vcn} = 175.9027 | 102.7944^\circ$$

18. Sequência Negativa

$$\text{Van} = 79.3930 | -55.9396^\circ, \text{Vbn} = 79.3930 | 64.0569^\circ, \text{Vcn} = 79.3930 | -175.9467^\circ$$

Figura 14 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Tensões de Fase do PAC



Fonte: Autor

Os valores das correntes medidas no PAC:

- 'Ia PAC' = 11.78 Arms | 9.54°
- 'Ib PAC' = 13.18 Arms | 145.59°
- 'Ic PAC' = 33.74 Arms | -163.06°

Os valores das componentes simétricas calculadas para as correntes medidas no PAC:

19. Sequência Zero

$$3x 10.4941 | -179.3547$$

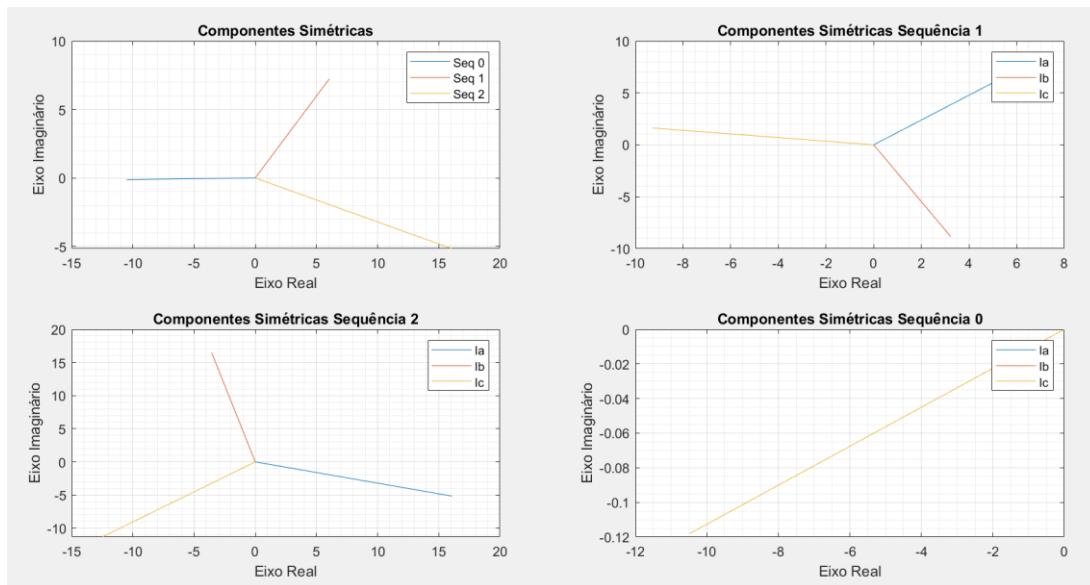
20. Sequência Positiva

$$I_a = 9.4239 | 50.0879^\circ, I_b = 9.4239 | -69.9192^\circ, I_c = 9.4239 | 170.0843^\circ$$

21. Sequência Negativa

$$I_a = 16.8730 | -17.8040^\circ, I_b = 16.8730 | 102.1924^\circ, I_c = 16.8730 | -137.8111^\circ$$

Figura 15 – Diagrama Fasorial das Componentes de Sequência das Correntes do PAC



Fonte: Autor

Com base nos dados levantados e calculados anteriormente, foram calculados os valores de desequilíbrio para cada norma citada neste trabalho.

Tabela 2 – Cálculos de Desequilíbrio

DESEQUILÍBRIO			
MÉTODO DE CÁLCULO	TENSÃO DE FASE	TENSÃO DE LINHA	CORRENTE
IEEE (112)	43.91%	X	72.43%
ANSI - NEMA	X	15,44	X
CIGRÉ	X	15.01 %	X
PRODIST 1 (SIMÉTRICAS)	45.13 %	15.01 %	179.04 %
PRODIST 2 (EFICAZ)	X	15.01 %	X
IEC	45.13 %	15.01 %	179.04 %

Fonte: Autor

Observa-se que os métodos de cálculo do IEEE, ANSI e NEMA, aproximam-se muito dos cálculos que levam as componentes simétricas em consideração. O método

CIGRÉ resulta o mesmo valor que o método das componentes simétricas, com a vantagem de utilizar apenas os valores de tensão eficaz de linha. A maior discrepância de cálculo foi em relação ao método IEEE e IEC para a corrente. Conforme pode-se analisar, neste caso, a componente simétrica negativa apresenta valor eficaz muito maior que o da componente simétrica positiva.

***Nota: Caso o valor da tensão informada no enunciado fosse considerada como sendo de pico (amplitude), os valores RMS de corrente e tensões equivalentes calculados anteriormente seriam $\sqrt{2}$ menores.**

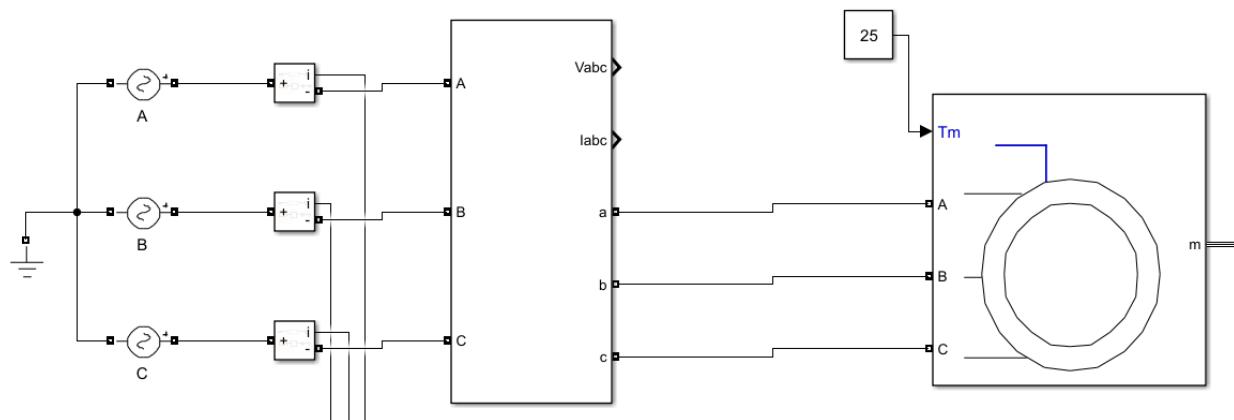
5.4 ESTUDO DE CASO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E CORRENTE (E4)

Como estudo de caso para análise do desequilíbrio de tensão e corrente, foi implementada a sugestão proposta na problemática do trabalho. Foi considerado um motor trifásico, 220 V, 60 Hz, 6 polos (1200 RPM), escorregamento de 3%, com entrada de torque constante de 25 N.m. O mesmo motor foi alimentado em 4 casos distintos:

- Fonte de Alimentação Equilibrada
- Fonte de Alimentação com Desequilíbrio de 1%
- Fonte de alimentação com Desequilíbrio de 5%
- Fonte de Alimentação com Desequilíbrio de 10%

Para cada caso calculou-se as componentes simétricas de tensão e corrente do circuito, a fim de avaliar o impacto do desequilíbrio de tensão na corrente da carga. Também foi levantada a curva do torque eletromagnético de cada motor para cada situação de alimentação anteriormente especificada.

Figura 16 – Modelo do Circuito Simulado para o Estudo de Caso



Fonte: Autor

Os valores de sequência positiva e negativa para as tensões e correntes de cada caso simulado, encontram-se na tabela abaixo:

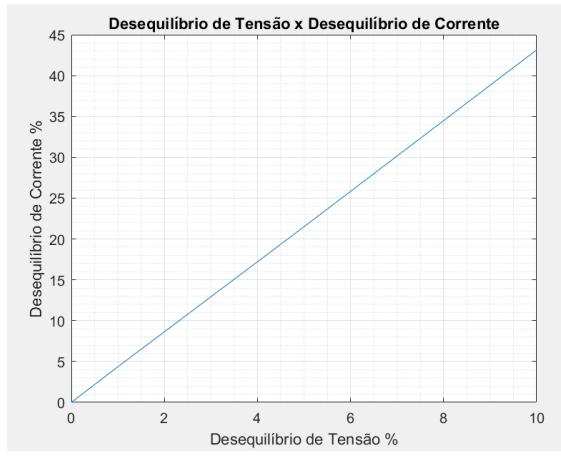
Tabela 3 – Cálculos de Desequilíbrio de Corrente e Tensão

DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	MÓDULO DA CORRENTE DE SEQUÊNCIA POSITIVA [A]	MÓDULO DA CORRENTE DE SEQUÊNCIA NEGATIVA [A]	MÓDULO DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA POSITIVA [V]	MÓDULO DA TENSÃO DE SEQUÊNCIA NEGATIVA [V]	DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE
0%	13,74	0	127	0	0,00%
1%	13,76	0,6	126,26	1,27	4,36%
5%	13,77	2,96	122,26	6,3	21,50%
10%	13,83	5,97	125,53	12,61	43,17%

Fonte: Autor

Pode-se observar que a cada 1% de desequilíbrio de tensão proposto no caso simulado, acarretou em um desequilíbrio de corrente 4.3 vezes superior, em termos percentuais. O gráfico abaixo ilustra esta correlação.

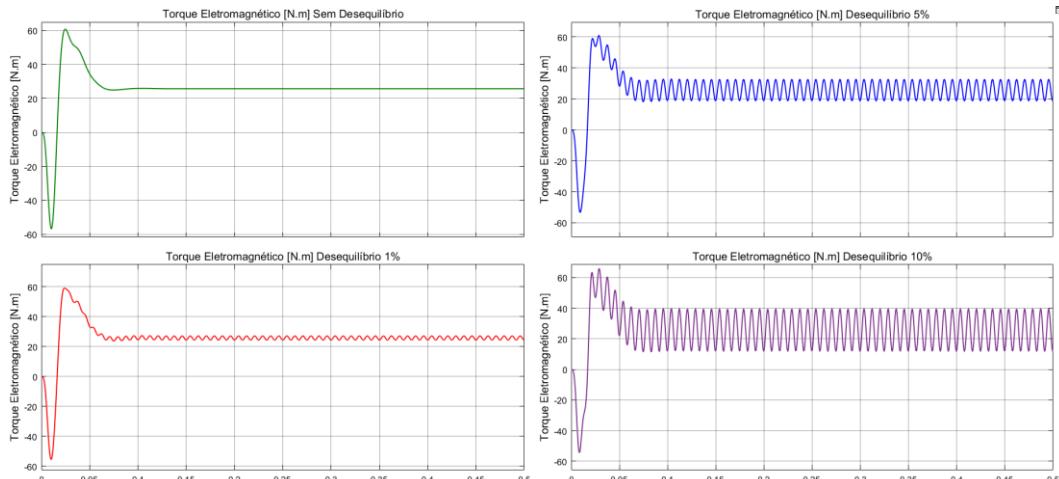
Figura 17 – Variação do Desequilíbrio de Corrente com a Tensão



Fonte: Autor

Para analisar o torque eletromagnético desenvolvido pela máquina síncrona, foi realizado o gráfico de torque x tempo para cada situação anteriormente simulada. O resultado pode ser visto na Figura 18 abaixo.

Figura 18 – Torque Eletromagnético Para Cada Caso Simulado



Fonte: Autor

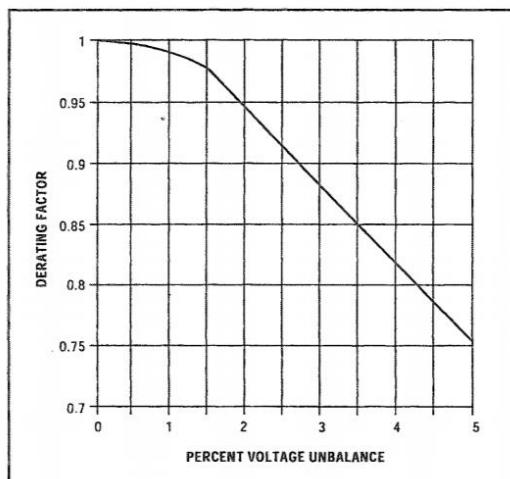
Observa-se que para o caso com desequilíbrio nulo de tensão, o torque desenvolvido ao alcançar seu estado de regime permanente permanece com

comportamento constante em torno do valor atribuído na simulação (25 N.m). Ao inserir um desequilíbrio na alimentação do sistema, observa-se que o torque começa a apresentar um comportamento oscilatório pulsante, variando aproximadamente 0.1 pu para o caso de desequilíbrio de 1%, 0.3 pu para o caso de desequilíbrio de 5% e 0.6 pu para o caso de desequilíbrio de 10%.

Com as simulações da modelagem proposta para alimentação desequilibrada, o desequilíbrio de tensão de 1% praticamente não causou grandes impactos na corrente eficaz e no conjugado eletromagnético desenvolvido pelo motor. Já os desequilíbrios de 5% e 10%, causaram alterações significativas na característica do conjugado, que torna-se pulsante, com amplitude que chega a 30% e 60% acima do valor nominal, respectivamente, o que acarreta em vibrações, aquecimento, perda de eficiência e degradação do equipamento. Além disso, a corrente RMS eficaz também apresenta grande variação em seu valor, além do defasamento angular não simétrico.

As Normas PRODIST 8 da ANEEL e a IEC 61000-2-2, fixam a tolerância máxima de desbalanceamento em torno de 2%. A norma NEMA MG1-14.35 traz um gráfico que demonstra o fator de depreciação do motor em função do desbalanceamento de tensão [10].

Figura 19 – Fator de Depreciação De Um Motor de Indução em Função do Desbalanceamento de Tensão



Fonte: Austin H. Bonnett [10]

Para os desbalanceamentos de 1 a 2%, observa-se que o fator de depreciação não é inferior a 0.95. A norma recomenda que motores não operem com desbalanceamento de tensão superior a 5%, cujo fator de depreciação respectivo é de 0.75.

6. ANÁLISE COMPARATIVA CRÍTICA DE NORMATIZAÇÃO EM DISTORÇÃO HARMÔNICA (E2)

Neste item, serão comparadas as normas americanas, europeias, brasileiras e demais padrões pertinentes no tocante à qualidade de energia elétrica, em específico, ao distúrbio de distorção harmônica.

6.1 NORMAS AMERICANAS (E2.1)

A norma americana IEEE Std 519 - *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* [11], estabelece critérios relacionados à distorção de onda para o projeto de sistemas elétricos que possuam cargas lineares e não-lineares. Ela recomenda que os conceitos desenvolvidos sejam aplicados no ponto de acoplamento entre a concessionária e o consumidor, sendo que os limites estabelecidos de distorção harmônica devem ser de responsabilidade compartilhada entre um e outro. Desta forma, os usuários devem manter as distorções harmônicas de corrente dentro de limites razoáveis enquanto que a concessionária deve tomar ações a fim de diminuir a distorção harmônica da tensão fornecida.

O método de medição adotado pela norma, estabelece que instrumentos que funcionem baseados na transformada de Fourier discreta, utilizem uma janela de medição de aproximadamente 200 ms (12 ciclos) para redes de 60 Hz, e 10 ciclos para redes de 50 Hz. Com essa janela, as componentes do espectro estarão disponíveis a cada 5 Hz de frequência de espaçamento, sendo a magnitude da harmônica correspondente à componente central delimitada pelas “bordas” de 5 Hz.

A norma define ainda dois conceitos:

- **Valor de Harmônicas em Tempo Muito Curto**

É o valor calculado para cada harmônica em intervalo de tempo de 3s com base na agregação de 15 janelas consecutivas de 12 ciclos, tanto para valores de tensão como de corrente.

$$F_{n,vs} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} F^2_{n,i}}$$

F – Tensão ou Corrente

n – Harmônica

Estes valores devem ser calculados ao longo de um dia. Deve ser calculado o valor que é excedido em 1% do período de medição (percentil 99), em cada período de 24 horas.

- **Valor de Harmônicas em Tempo Curto**

É o valor calculado para cada harmônica em intervalo de tempo de 10 minutos com base na agregação de 200 valores sucessivos da medição em intervalo muito curto.

$$F_{n,sh} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F^2_{(n,vs)i}}$$

F – Tensão ou Corrente

n – Harmônica

Estes valores devem ser calculados ao longo de uma semana. Deve ser calculado o valor que é excedido em 5% e 1% do período de medição (percentis 95 e 99), em cada período de 7 dias.

Uma vez calculados os valores anteriormente mencionados, deve-se compará-los aos limites estabelecidos pela norma, conforme as tabelas a seguir:

Tabela 4 – Limite de Distorção Harmônica de Tensão no PAC

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV < $V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV < $V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5 ^a

Fonte: IEEE 519 [11]

Tabela 5 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Entre 120 V e 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^c	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: IEEE 519 [11]

Tabela 6 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Entre 69 e 161 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics)^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^c	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Fonte: IEEE 519 [11]

Tabela 7 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Maiores que 161 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics)^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 25 ^c	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25 < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Fonte: IEEE 519 [11]

Como pode-se notar, o limite é estabelecido com base no nível de tensão e no nível de curto-círcuito no PAC, pois quanto menor for a corrente de distorção em relação a corrente de curto circuito, menor será a distorção harmônica imposta na tensão.

6.2 NORMAS EUROPEIAS (E2.2)

A norma europeia IEC 61000-3-2 - *Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*, aborda o assunto de distorção harmônica de uma perspectiva diferente da IEEE 519. Ela trata a limitação da distorção do ponto de vista dos equipamentos para o sistema elétrico, sendo os equipamentos com corrente de entrada de até 16 A por fase conectado em um sistema de baixa tensão, de tensão fase-neutro entre 220 e 240 V (faixa típica da tensão da comunidade europeia)[12]. Para correntes superiores, aplica-se a IEC 61000-3-4.

São quatro classificações distintas da norma para os equipamentos: A, B, C e D. Para equipamentos de classe A têm-se: equipamentos trifásicos equilibrados, ferramentas, equipamentos de áudio, lâmpadas incandescentes e equipamentos residenciais. Equipamentos classe B: ferramentas portáteis. Equipamentos classe C: dispositivos de iluminação com potência superior a 25 W. Equipamentos classe D: computadores pessoais, monitores e televisões com potência entre 75 e 600 W. As tabelas abaixo definem os limites de distorção harmônica para cada classe de equipamento:

Tabela 8 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente Para Equipamentos de Classes A, B, C e D

Ordem <i>h</i>	Classe A (A)	Classe B (A)	Classe C (% da fund.) <i>P</i> > 25 W	Classe C (mA/W) <i>P</i> ≤ 25 W	Classe D (mA/W)	Classe D (A)
Harmônicas ímpares						
3	2,30	3,45	$30 \times \lambda^*$	3,40	3,40	2,30
5	1,14	1,71	10	1,90	1,90	1,14
7	0,77	1,16	7	1,00	1,00	0,77
9	0,40	0,60	5	0,50	0,50	0,40
11	0,33	0,50	3	0,35	0,35	0,33
13	0,21	0,312	3	3,85/h	3,85/h	Ver Classe A
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 \times 15/h$	$0,23 \times 15/h$	3	3,85/h	3,85/h	Ver Classe A
Harmônicas pares						
2	1,08	1,62	2	-	-	-
4	0,43	0,65	-	-	-	-
6	0,30	0,45	-	-	-	-
$8 \leq h \leq 40$	$0,23 \times 8/h$	$0,35 \times 8/h$	-	-	-	-

Fonte: Heverton Augusto Pereira [14]

Para realização da medição das correntes harmônicas das diferentes classes de equipamentos, a IEC estabelece que deve-se realizar a passagem do sinal por um filtro passa-baixas de segunda ordem com constante de tempo de 1.5 segundo, e depois aplicar a transformada de Fourier discreta, com uma janela de medição de 4 a 30 ciclos. Calcula-se a média aritmética dos valores da TFD durante o período de amostragem, que varia de acordo com o equipamento em análise [12]. Para a classe B, os limites são os mesmos que os da tabela A multiplicados por 1.5.

Ainda, a norma IEC 61000-2 - Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems define os níveis de harmônica de tensão para o sistema de distribuição de baixa tensão de 240 e 415 V. Já a norma IEC 61000-3-6 - *Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*, estabelece os limites de distorção harmônica para análise em sistemas de média, alta e extra-alta tensão.

Tabela 9 – Limite de Distorção Harmônica de Tensão Para Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (240/415V)

TABELA 4 LIMITES DE HARMÔNICOS INDIVIDUAIS EM SISTEMAS PÚBLICOS DE BAIXA TENSÃO (240 V E 415 V) CONFORME NORMA IEC 61000-2-2					
Ordem ímpar	Tensão harmônica (%)*	Ordem ímpar – múltiplo de 3	Tensão harmônica (%)*	Ordem par	Tensão harmônica (%)*
5	6,0	3	5,0	2	2
7	5,0	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	> 21	0,2	10	0,2
19	1,5			> 12	0,2
23	1,5				
25	1,5				
> 25	0,2 + 1,3 x 25/h				
THDV (até o 40º harmônico) < 8%					

Fonte: Revista o Setor Elétrico [12]

Tabela 10 – Limite de Distorção Harmônica de Tensão Para Sistema de Média, Alta e Extra-Alta Tensão

Odd harmonics non-multiple of 3			Odd harmonics multiple of 3			Even harmonics			
Harmonic Order h	Harmonic Voltage %		Harmonic Order h	Harmonic Voltage %		Harmonic Order h	Harmonic Voltage %		
	MV	HV-EHV		MV	HV-EHV		MV	HV-EHV	
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4	
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8	
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4	
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4	
$17 \leq h \leq 49$	$1.9 \cdot \frac{17}{h} - 0.2$	$1.2 \cdot \frac{17}{h}$	$21 < h \leq 45$	0.2	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \cdot \frac{10}{h} + 0.22$	$0.19 \cdot \frac{10}{h} + 0.16$	

Fonte: S. M. Halpin [13]

6.3 NORMAS BRASILEIRAS (E2.3)

A ANEEL através do PRODIST 8 delimita apenas a distorção harmônica de tensão, através de alguns indicadores e de diferentes faixas de tensões, conforme a tabela abaixo:

Tabela 11 – Limites de Distorção Harmônica de Tensão - PRODIST 8

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _P 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _I 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL [8]

Onde:

- Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem H

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100$$

- Distorção Harmônica Total de Tensão

$$DTT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

- Distorção Harmônica Total de Tensão Para Componentes Pares Não Múltiplas de 3

$$DTT_P \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

- Distorção Harmônica Total de Tensão Para Componentes Impares Não Múltiplas de 3

$$DTT_I \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

- Distorção Harmônica Total de Tensão Para Componentes Múltiplas de 3

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

- DTT 95% - Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.
- DTTP 95% - Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.
- DTTi 95% - Valor do indicador DTTi% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.
- DTT3 95% - Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

Ainda, a ProRede através do submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes [9], define limites de desempenho global superior e inferior e de desempenho individual. Determina-se a maior Distorção Harmônica de Total e Individual superado em 5% dos registros obtidos em 24 horas, em intervalos de 10 minutos, por 7 dias consecutivos. O valor do indicador é o maior dos 7 coletados.

Tabela 12 – Limites Globais

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Fonte: ONS [9]

Tabela 13 – Limites Individuais

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥27	0,7%			≥27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

Fonte: ONS [9]

6.4 SEMELHANÇAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS (E2.4)

A norma IEEE 519 estabelece um critério de limitação da distorção harmônica baseado na quantidade de harmônica que se é injetada na rede no ponto de acoplamento comum (PAC), não se importando com como tais harmônicas são geradas no interior da unidade consumidora. A preocupação maior é não deixar com que a corrente harmônica vista no PAC acabe por distorcer também a forma de onda da tensão de fornecimento. Sendo assim, concessionárias devem se responsabilizar por adequar os níveis de distorção de tensão através do ajuste da impedância do sistema, enquanto que os consumidores devem compartilhar a responsabilidade de limitar a distorção harmônica da corrente consumida. Este ponto de vista é o que favorece o sistema de distribuição.

A norma IEC, além de estabelecer valores para a distorção harmônica de tensão para sistemas de distribuição, também apresenta limitações para harmônicos desenvolvidos por equipamentos eletrônicos, dependendo da finalidade e da potência. Esta abordagem apresenta uma visão de como determinada carga pode influenciar dentro de uma instalação.

As normas da ANEEL e do ONS, consideram apenas os índices de distorção harmônica total, e não levam em consideração a porcentagem de distorção de cada componente harmônica, não considerando também o efeito de aumento da impedância do alimentador com o aumento da frequência. Além disso, ela estabelece limite de distorção harmônica total de tensão com valor superior aos das demais normas mencionadas no trabalho em questão.

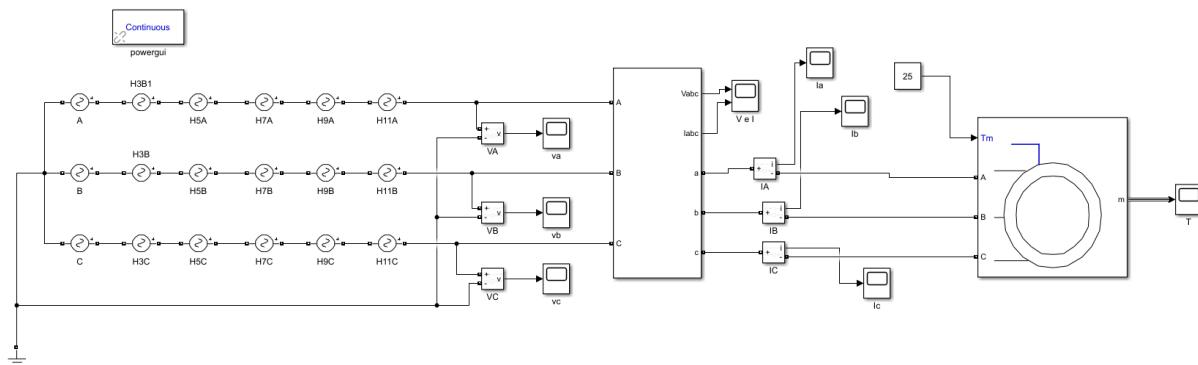
7. ESTUDO DE CASO DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO E CORRENTE (E5)

Nesta seção serão apresentados 3 estudos de casos para avaliar o impacto das distorções harmônicas de tensão e corrente. O primeiro estudo será aplicado a um motor de indução trifásico alimentado por fontes de tensão com harmônicas. O segundo, a uma carga equilibrada com e sem condutor neutro. O terceiro, será utilizada uma carga não linear para verificar a distorção harmônica causada pela corrente na tensão do PAC.

7.1 ESTUDO DE CASO 1

Montou-se no SIMULINK um circuito (E5_1_Harmonicas) onde há uma fonte de tensão trifásica equilibrada em série com outras fontes que irão inserir harmônicas no sistema, que alimenta um motor de indução trifásico.

Figura 20 – Circuito do Estudo de Caso 1



Fonte: Autor

Foram simulados 4 casos distintos de acordo com a Tabela 13. A decomposição das harmônicas foi realizada através da ferramenta Powergui FFT Tool do Matlab, levando em conta janelas de 200 ms (12 ciclos).

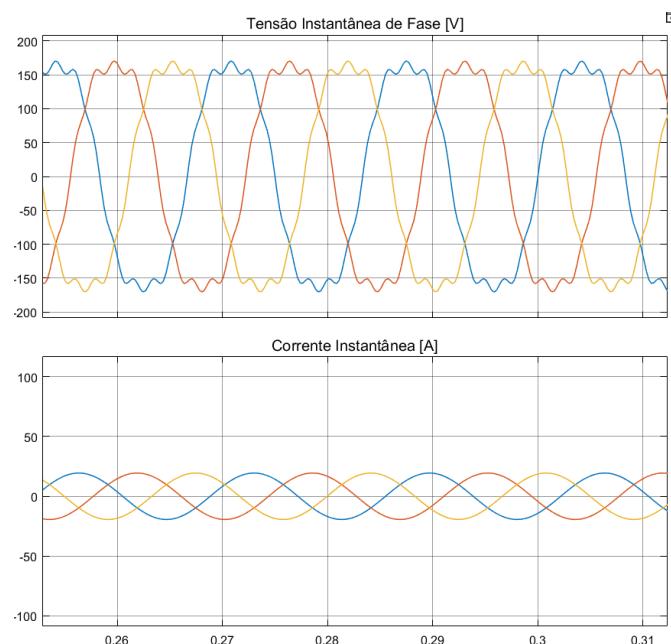
Tabela 14 – Porcentagem de Harmônicas para cada Caso de Estudo

CASO	% EM RELAÇÃO A FUNDAMENTAL					THD	
	3 ^a	5 ^a	7 ^o	9 ^o	11 ^o	TENSÃO	CORRENTE
1	10%	0%	0%	10%	0%	11,00%	0,37%
2	0%	0%	15%	0%	0%	14,50%	9,85%
3	0%	10%	0%	0%	10%	13,46%	10,04%
4	0%	5%	10%	0%	5%	9,54%	6,81%

Fonte: Autor

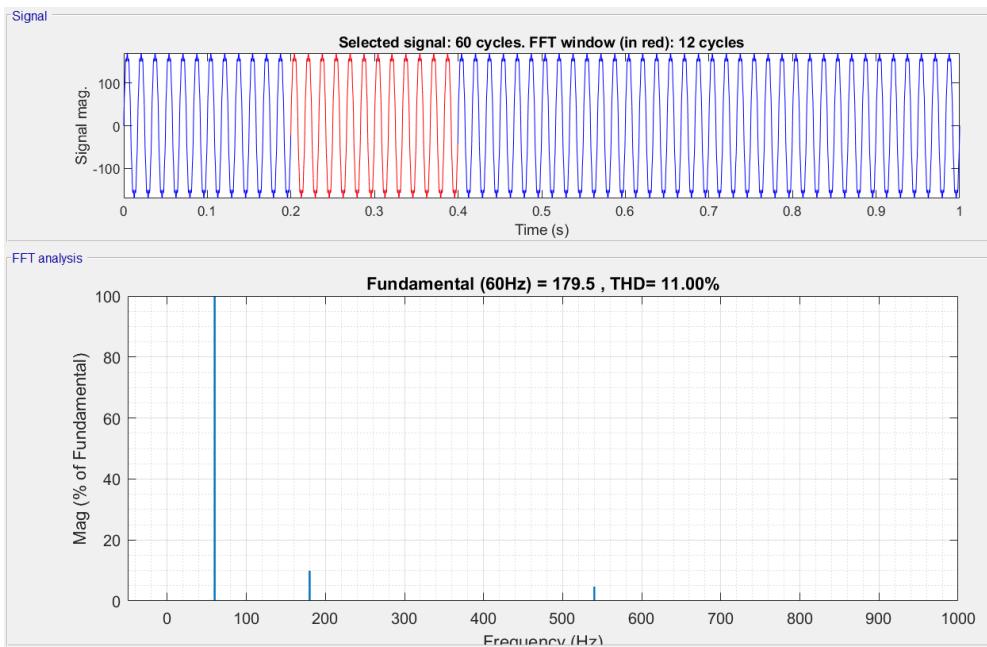
- **Caso 1 – Resultados**

Figura 21 – Onda de Tensão e Corrente de Fase



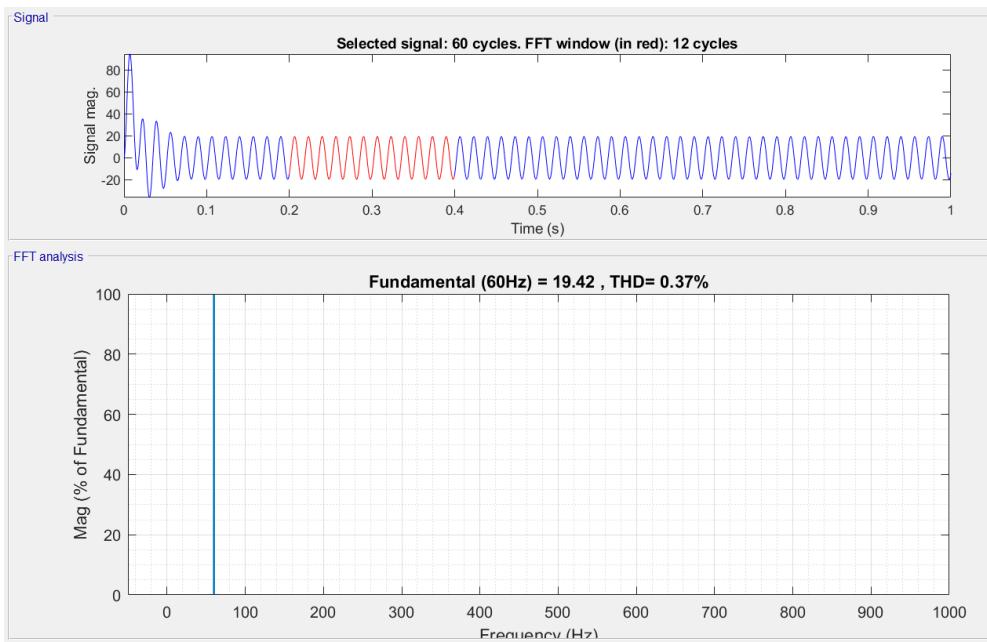
Fonte: Autor

Figura 22 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



Fonte: Autor

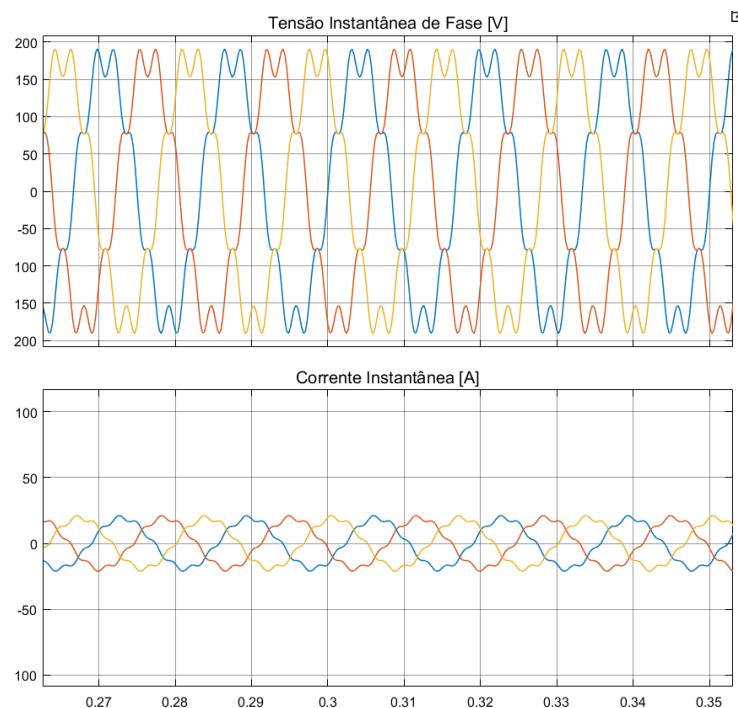
Figura 23 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase



Fonte: Autor

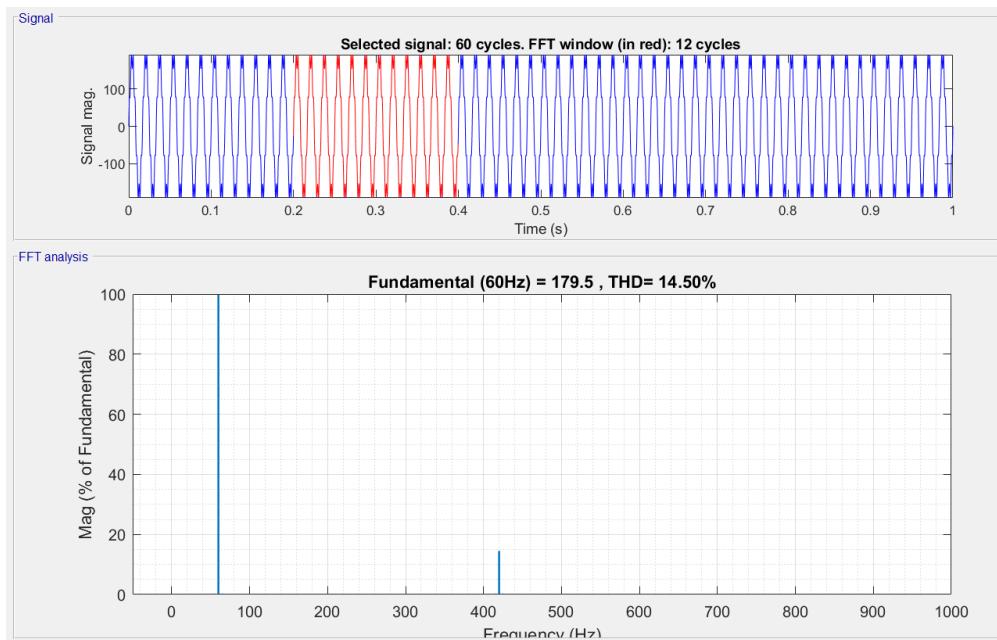
- Caso 2 – Resultados

Figura 24 – Onda de Tensão e Corrente de Fase



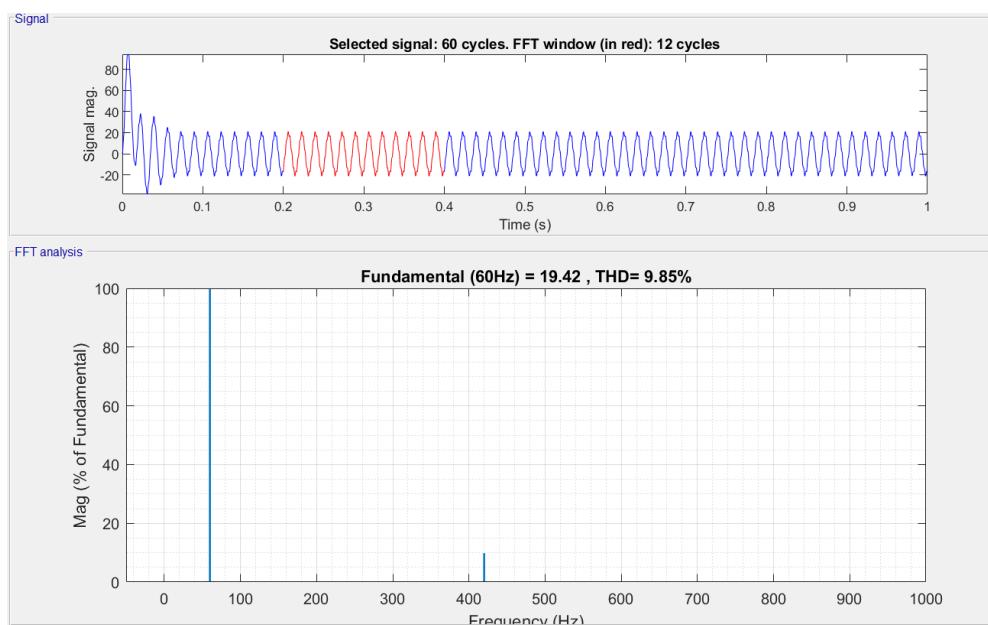
Fonte: Autor

Figura 25 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



Fonte: Autor

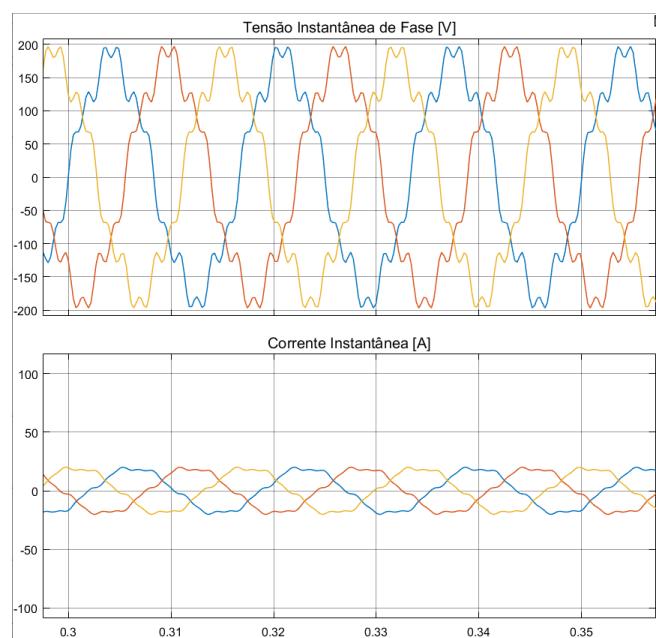
Figura 26 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



Fonte: Autor

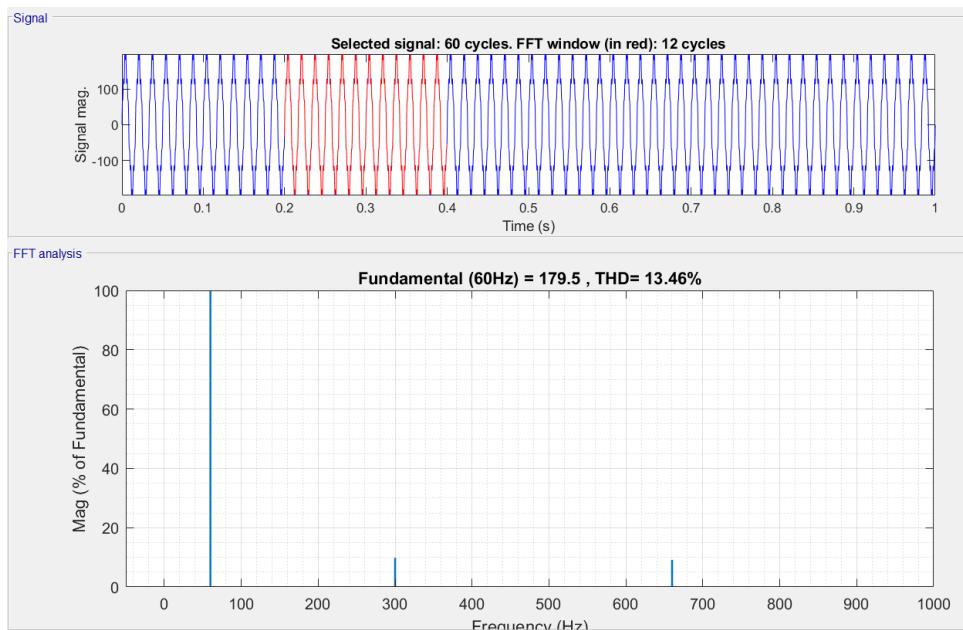
- Caso 3 – Resultados

Figura 27 – Onda de Tensão e Corrente de Fase



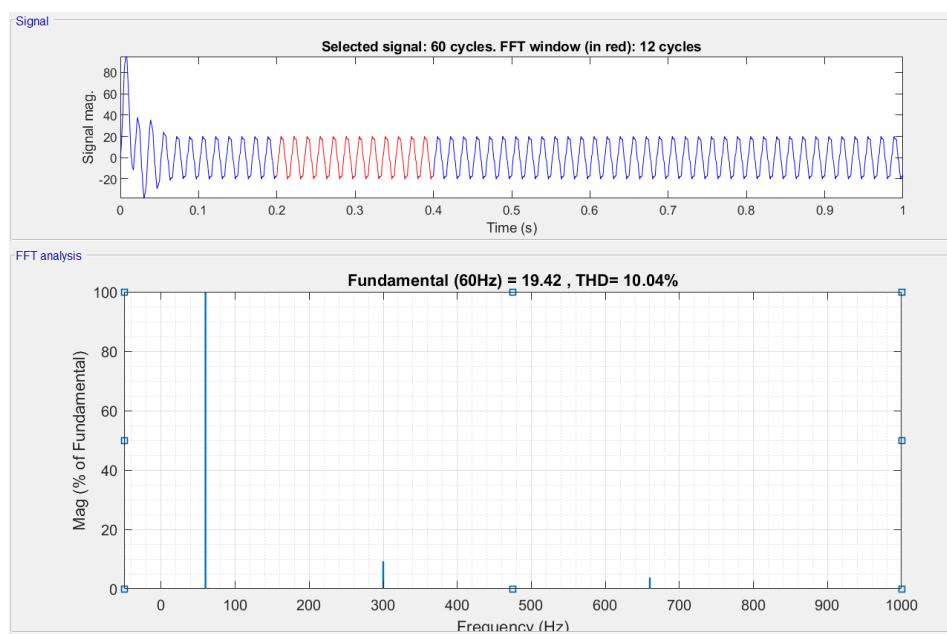
Fonte: Autor

Figura 28 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



Fonte: Autor

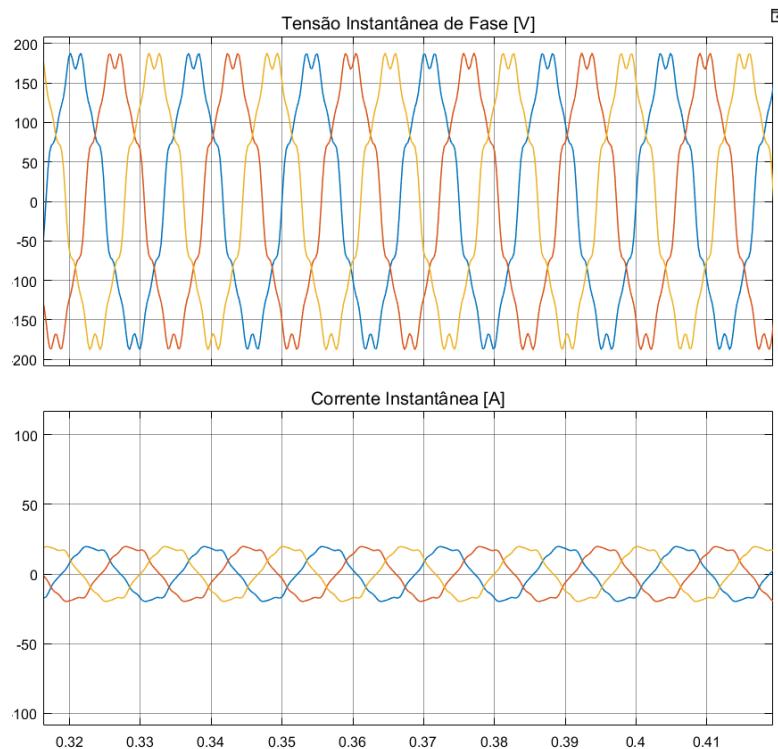
Figura 29 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



Fonte: Autor

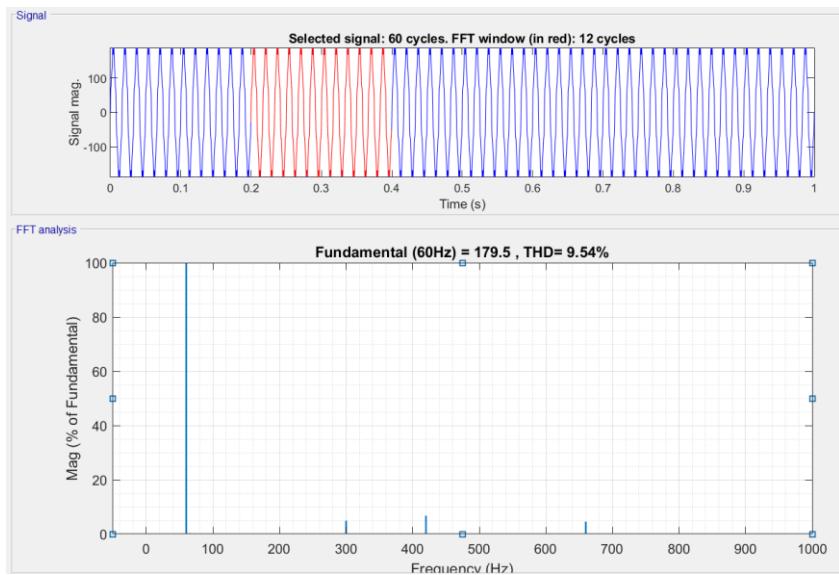
- Caso 4 – Resultados

Figura 30 – Onda de Tensão e Corrente de Fase



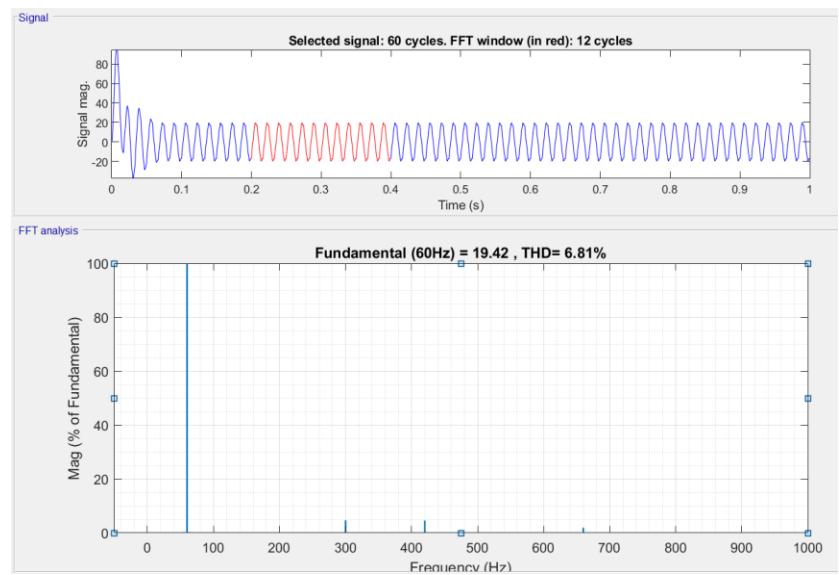
Fonte: Autor

Figura 31 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



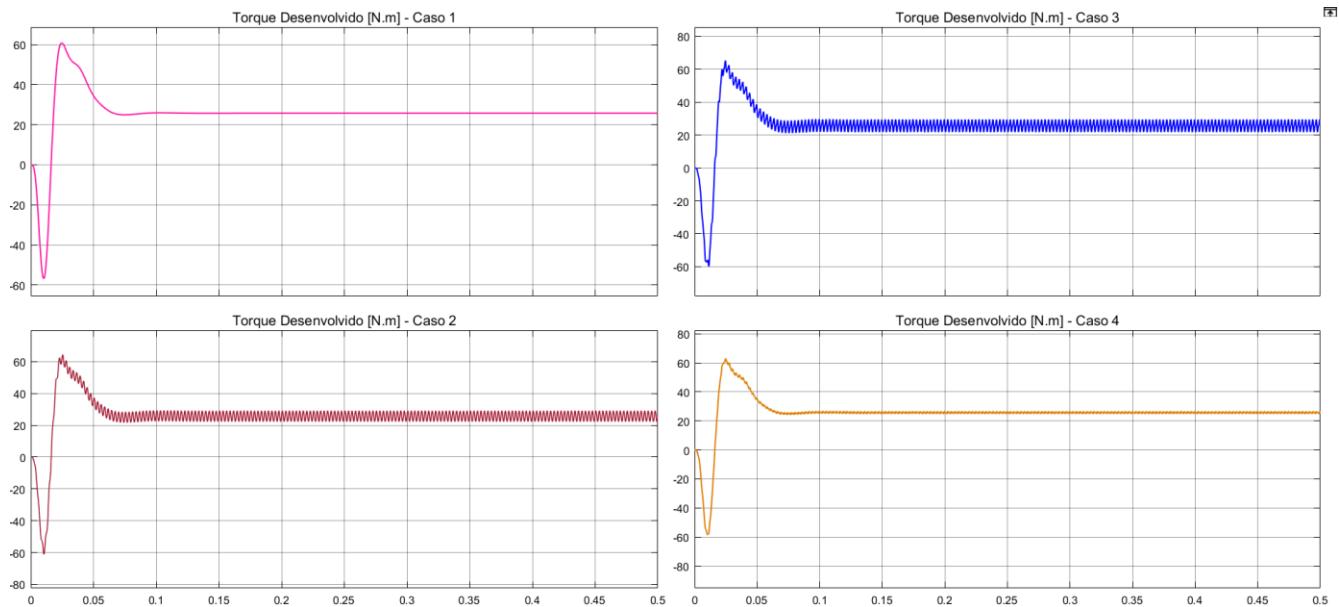
Fonte: Autor

Figura 32 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



Fonte: Autor

Figura 33 – Conjugado Eletromagnético para Cada Estudo de Caso



Fonte: Autor

- **Caso 1 – Discussões**

No estudo de caso 1, as terceira e nona harmônicas estão presentes apenas na forma de onda da tensão, pois como trata-se de uma carga equilibrada trifásica sem neutro, tais harmônicas não aparecem na corrente, pois são consideradas harmônicas de sequência 0. Pode-se observar que o torque desenvolvido pelo motor não sofre alterações, uma vez que a componente de sequência 0 não influencia em seu funcionamento.

- **Caso 2 – Discussões**

No estudo de caso 2, a sétima harmônica está presente na forma de onda da tensão e da corrente, pois trata-se de uma harmônica de sequência positiva. Pode-se observar que o torque desenvolvido pelo motor é pulsante, uma vez que a componente de sequência positiva soma-se ao conjugado desenvolvido.

- **Caso 3 – Discussões**

No estudo de caso 3, a quinta e décima primeira harmônicas estão presentes na forma de onda da tensão e da corrente, pois trata-se de harmônicas de sequência negativa. Pode-se observar que o torque desenvolvido pelo motor é pulsante, uma vez que a componente de sequência negativa subtrai do conjugado desenvolvido.

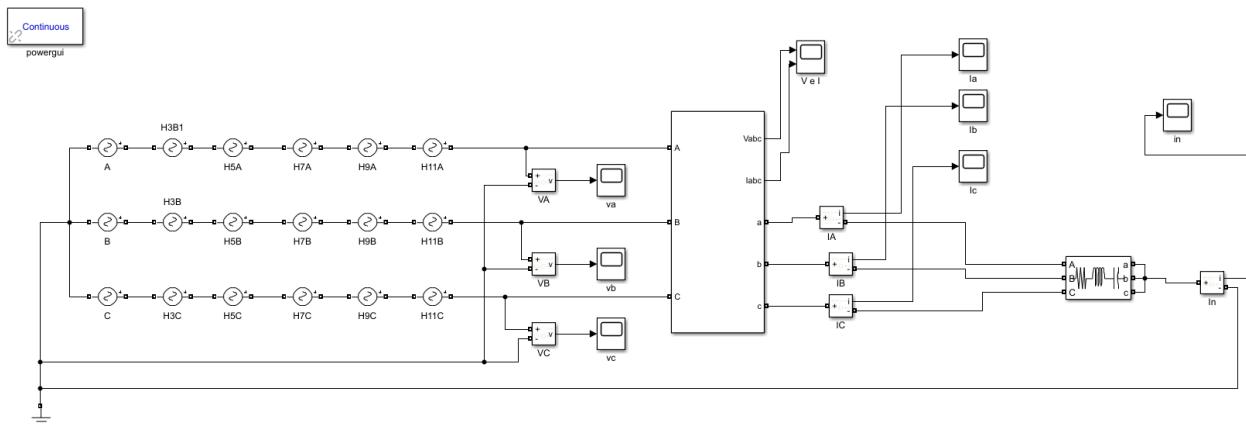
- **Caso 4 – Discussões**

No estudo de caso 4, a quinta, sétima e décima primeira harmônicas estão presentes na forma de onda da tensão e da corrente, pois trata-se de harmônicas de sequência negativa (5^{a} e 11^{a}) e positiva (7^{a}). Pode-se observar que o torque desenvolvido pelo motor apresenta um comportamento menos pulsante, mais similar ao caso 1 do que ao dos casos 2 e 3. Isso deve-se ao fato de que as componentes de sequência positiva e negativa se sobrepõem de maneira que a significância de ambas é diminuída.

7.2 ESTUDO DE CASO 2

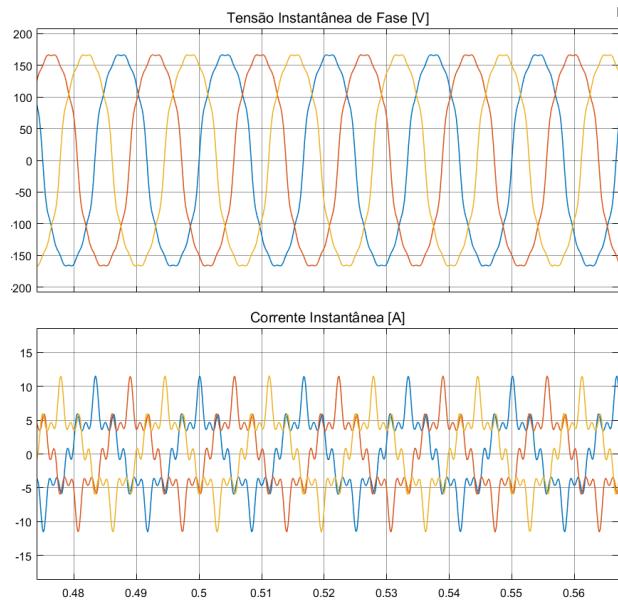
Montou-se no SIMULINK um circuito (E5_2_Harmonicas) onde há uma fonte de tensão trifásica equilibrada em série com outras fontes que irão inserir harmônicas no sistema, que alimenta uma carga em Y e outra em Y com condutor de neutro. O objetivo do experimento é analisar como se comportam as harmônicas de sequência positiva, negativa e zero, na presença de uma carga equilibrada com e sem condutor neutro.

Figura 34 – Circuito com Carga em Y com Neutro



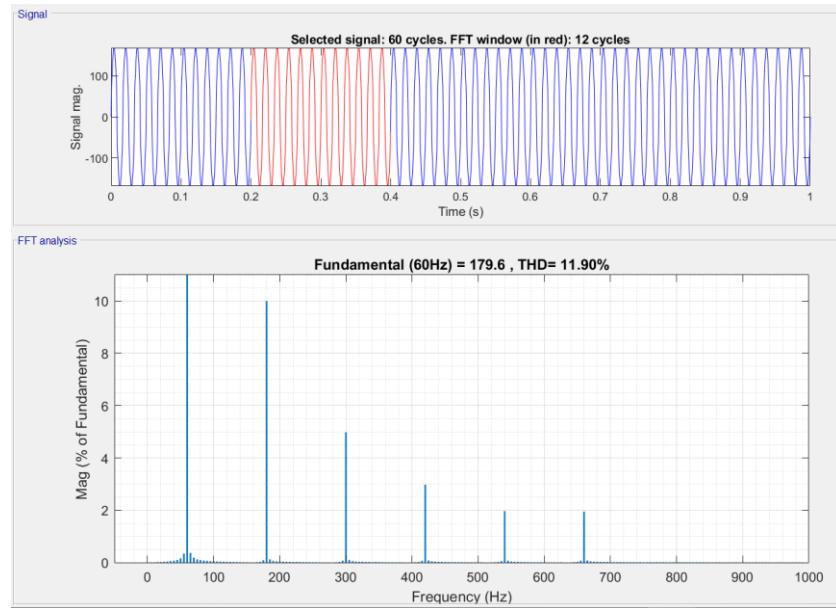
Fonte: Autor

Figura 35 – Forma de Onda de Tensão e Corrente de Fase



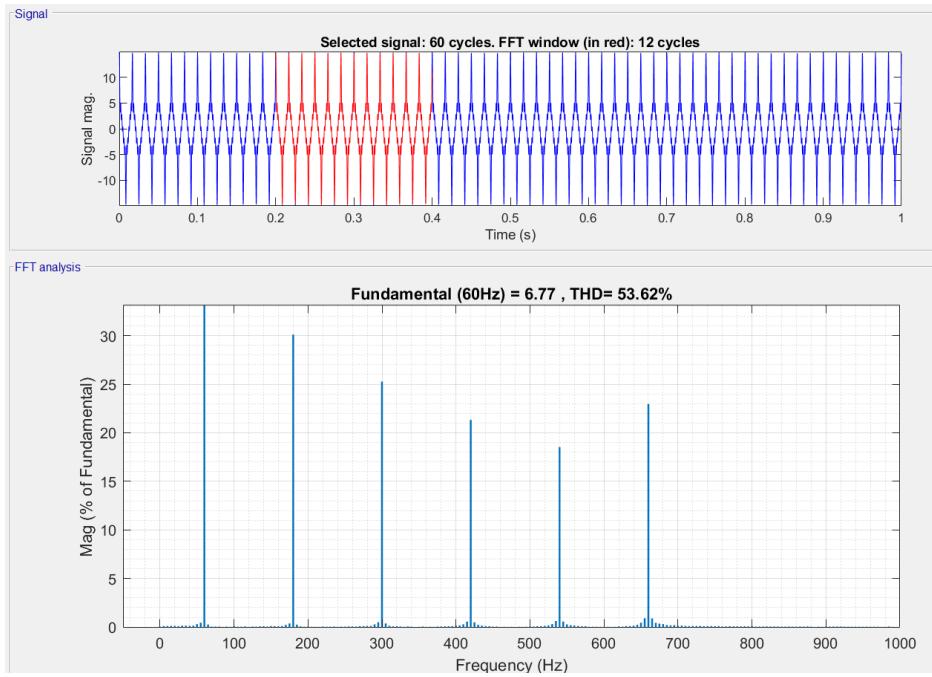
Fonte: Autor

Figura 36 – Espectro de Harmônicas de Tensão de Fase



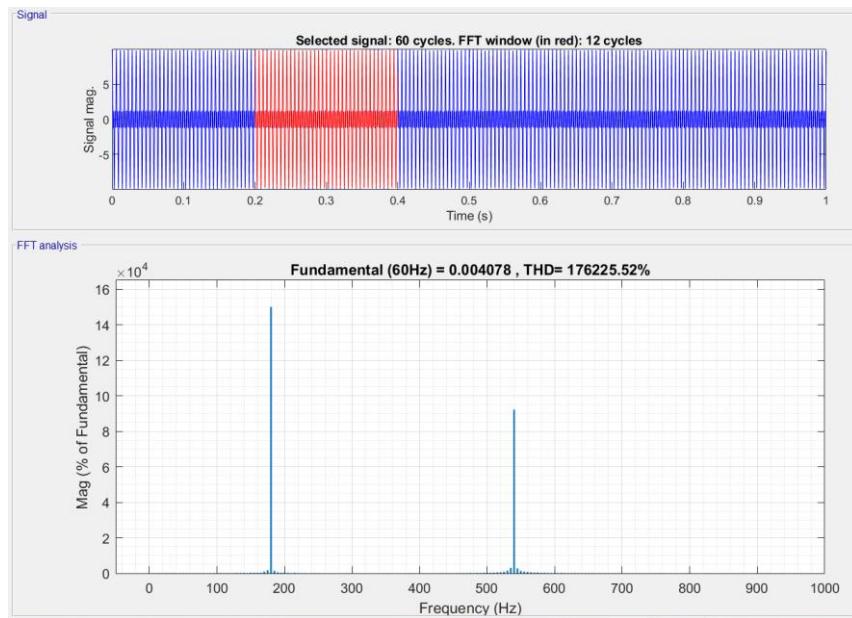
Fonte: Autor

Figura 37 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase



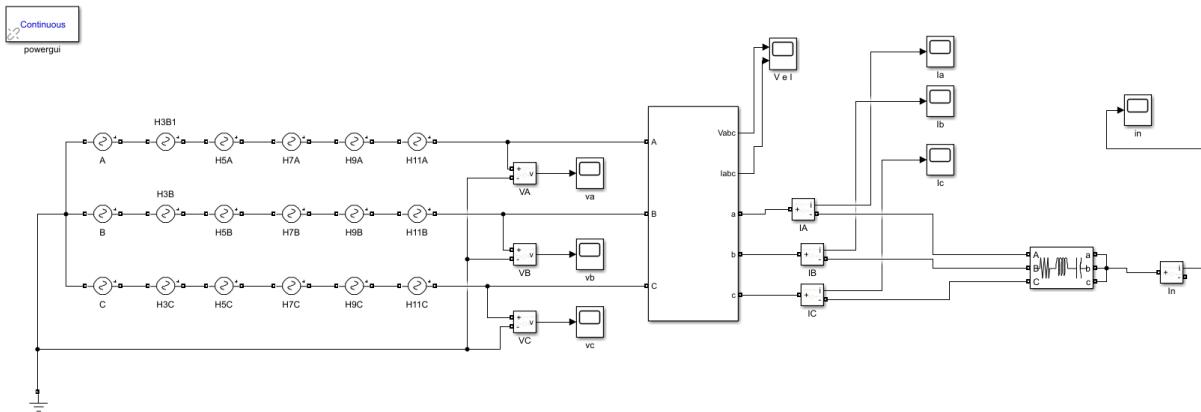
Fonte: Autor

Figura 38 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Neutro



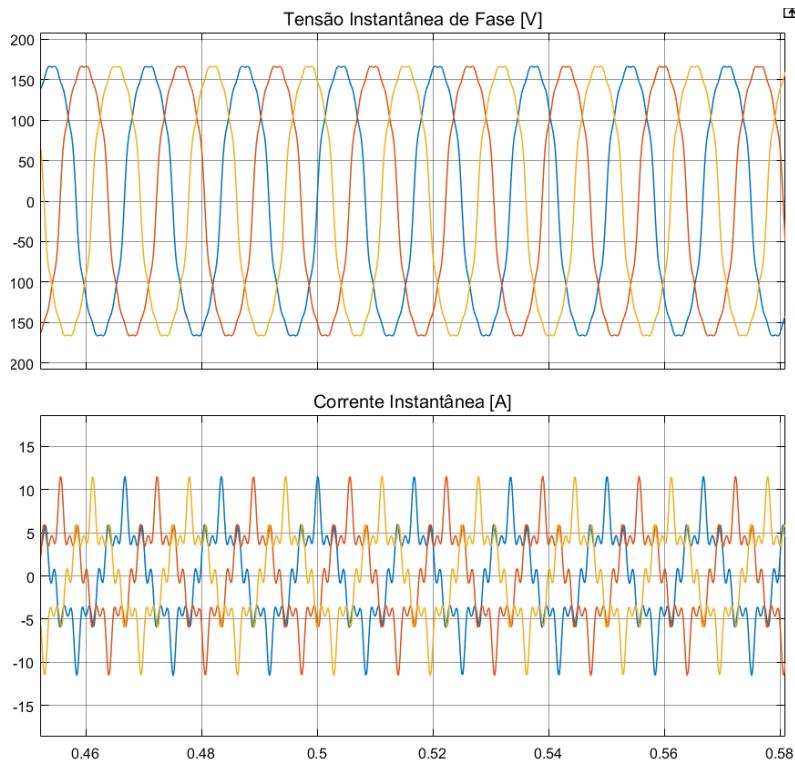
Fonte: Autor

Figura 39 – Circuito com Carga em Y e Sem Neutro



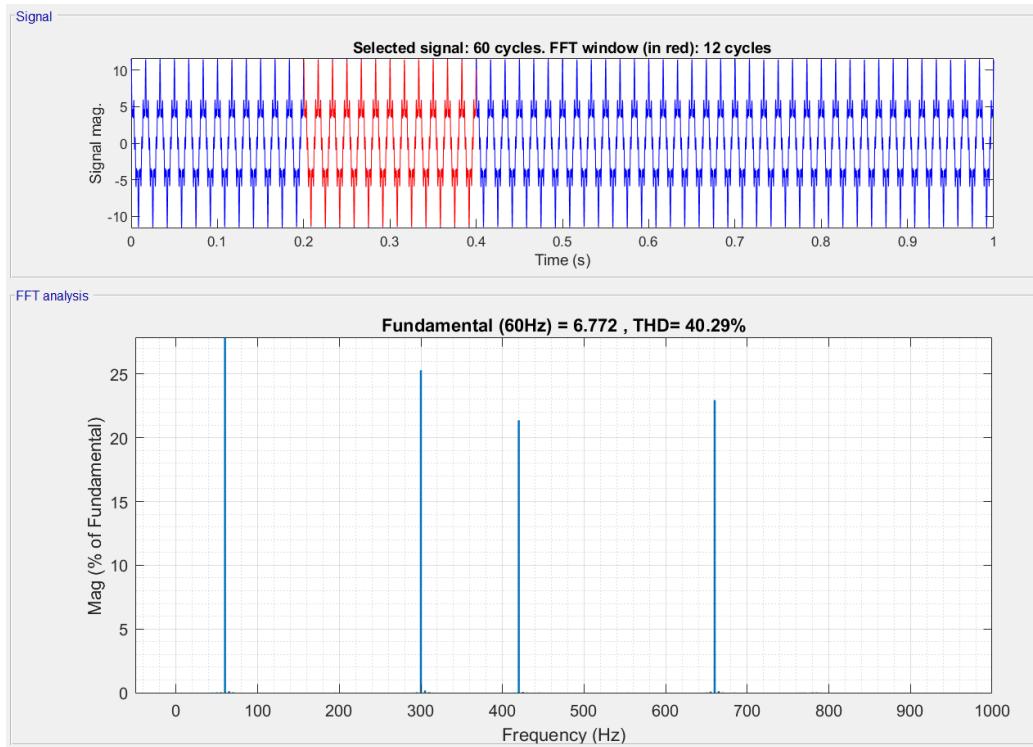
Fonte: Autor

Figura 40 – Forma de Onda de Tensão e Corrente de Fase



Fonte: Autor

Figura 41 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase



Fonte: Autor

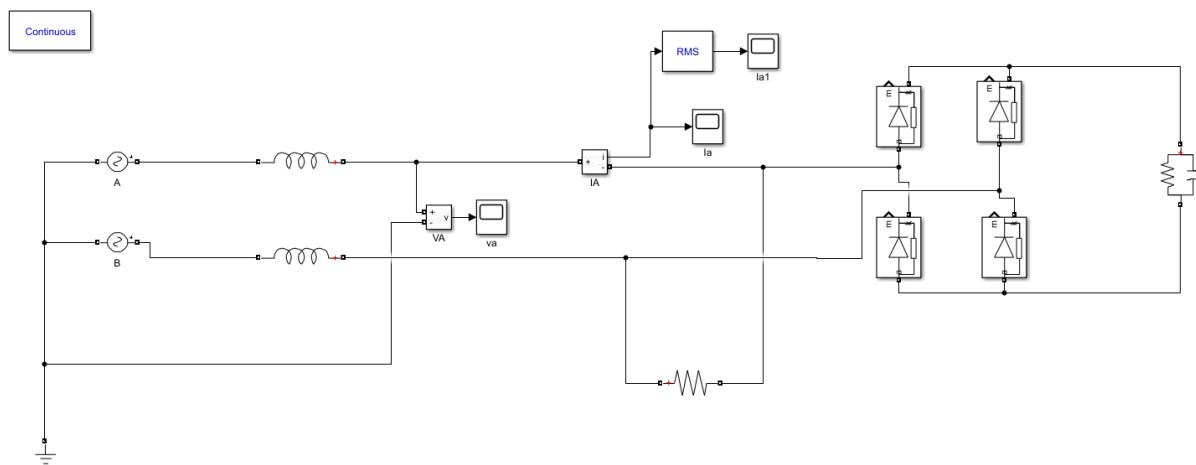
As harmônicas inseridas pela fonte de tensão distorcida, são: 3^a (10%), 5^a (5%), 7^a (3%), 9^a (2%) e 11^a (2%) (Figura 36). A carga alimentada na primeira simulação é equilibrada e possui condutor neutro no conectado no centro-estrela. Neste caso, as harmônicas de sequência zero (3^a e 9^a) também aparecem na corrente consumida junto com as demais (Figura 37). É sabido que as harmônicas de sequência zero fluem apenas pelo neutro, o que pode-se comprovar através do espectro de frequência da corrente de neutro (Figura 38), onde estão presentes as componentes 3^a e 9^a.

Na situação 2 o condutor neutro é retirado do centro-estrela que fica isolado. Como era de se esperar, as harmônica de sequência 0 desaparecem, restando apenas as de sequência positiva e negativa na corrente (Figura 41).

7.3 ESTUDO DE CASO 3

Montou-se no SIMULINK um circuito (E5_3_Harmonicas) onde há uma fonte de tensão (Fase A e B com Neutro) em série com uma impedância de linha que irá inserir harmônicas no sistema, que alimenta um retificador onda completa com carga RC paralela. O objetivo do experimento é analisar a distorção da corrente e a sua respectiva distorção na tensão, comparando com os limites estabelecidos pela IEEE 519.

Figura 42 – Circuito com Com Retificador Onda Completa



Fonte: Autor

Suponha-se que a instalação é alimentada por um transformador de potência nominal de 75 kVA, com impedância de 0.04 j pu (4%). A tensão de linha nominal do lado de baixa do transformador é de 220 V. Sendo assim, a corrente de carga nominal é de 196.8 A, reatância de 0.02581 Ω j, potência de curto circuito de 1875000 VA e corrente de curto circuito de 4920 A. Calculando-se a relação I_{cc}/I_{carga} , encontra-se o valor de 25. De acordo com a Tabela 15, o IEEE define um TDD máximo de 8% para a relação de 25.

Tabela 15 – Limite de Distorção Harmônica de Corrente no PAC para Sistemas de Tensões Entre 120 V e 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^c	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: IEEE 519 [11]

A corrente de carga RMS do circuito em questão é de 61 A. Já a THD de corrente, é de 12.62%. O valor RMS da componente fundamental é de 60.42. Pela definição do IEEE, o TDD é a relação percentual entre a corrente harmônica total e a corrente de carga. Logo, encontra-se um TDD de:

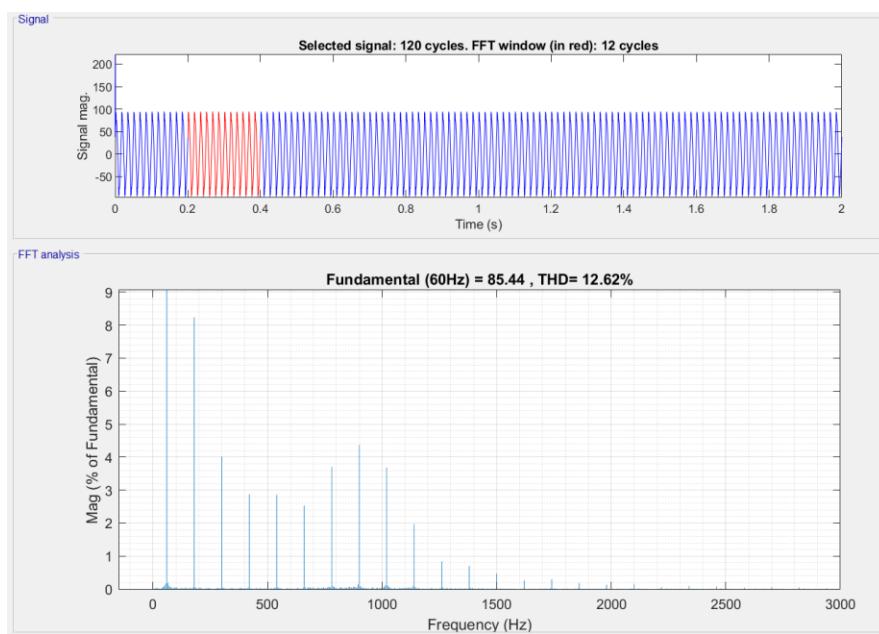
$$TDD = \frac{12.62 * 60.42}{100 * 61} \times 100 = 12.5\%$$

O TDD portanto, está acima do limite estabelecido pelo IEEE. Ainda analisando o espectro de frequência da corrente, nota-se que as harmônicas de número 19 a 50, obedecem os limites estabelecidos, no entanto, as de número 3 a 17, ultrapassam os seus respectivos limiares.

- 60 Hz (Fnd): 100.00%
- 180 Hz (h3): 8.24%

- 300 Hz (h5): 4.01%
- 420 Hz (h7): 2.87%
- 540 Hz (h9): 2.86%
- 660 Hz (h11): 2.53%
- 780 Hz (h13): 3.71%
- 900 Hz (h15): 4.37%
- 1020 Hz (h17): 3.69%

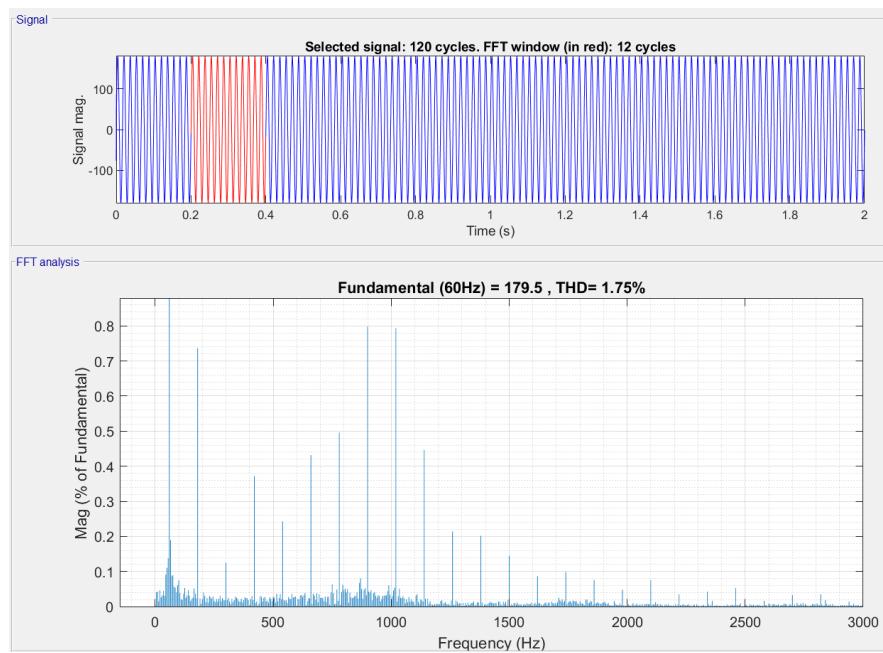
Figura 43 – Espectro de Harmônicas de Corrente de Fase



Fonte: Autor

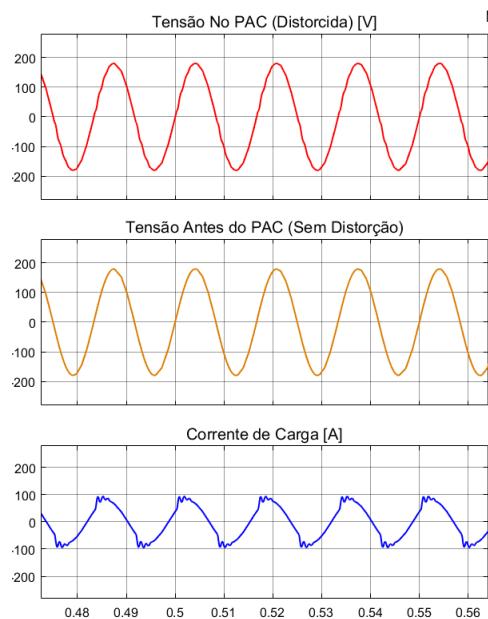
A tensão no PAC apresenta todas as harmônicas com valor inferior a 5% e THD de 1.75%, o que está dentro do limite estabelecido pelo IEEE para sistemas com tensão inferior a 1kV, conforme a Tabela 4. Pode-se notar que, nesta simulação, a corrente com harmônicas que circula pela impedância da linha acaba por distorcer a tensão no PAC.

Figura 44 – Espectro de Harmônicas da Tensão de Fase no PAC



Fonte: Autor

Figura 45 – Tensões e Correntes Instantâneas



Fonte: Autor

8. DESAFIO: COMPONENTES GENERALIZADAS (E6)

O Teorema de Fortescue é de extrema importância para a análise das componentes simétricas de formas de onda de tensão ou correntes desequilibradas, a partir da decomposição destas em componentes de sequência zero, positiva e negativa. No entanto, tal teorema aplica-se apenas às formas de onda puramente senoidais. Com o crescente uso de cargas não lineares nos sistemas elétricos, as formas de onda tendem a ser distorcidas e inviabilizam a utilização do teorema de maneira adequada. Pensando nisso, Tenti, Willems, Mattavelli e Tedeschi [15], propuseram uma nova técnica para analisar formas de onda de tensão e corrente que não são puramente senoidais. A conclusão estabelecida pelos pesquisadores é a de que as componentes de sequência zero, positiva e negativa quando somadas não caracterizavam o sinal original completamente, devido a falta da presença de uma nova componente denominada residual. A nova forma de decomposição traz quatro diferentes categorias:

- Componentes Generalizadas de Sequência Zero:

$$F(t)_0 = \frac{(F(t)_A + F(t)_b + F(t)_c)}{3}$$

- Componentes Generalizadas de Sequência Positiva:

$$F(t)_p = \frac{(F(t)_A - F(t)_0 + F\left(t + \frac{T}{3}\right)_b - F\left(t + \frac{T}{3}\right)_0 + F\left(t + \frac{2T}{3}\right)_c - F\left(t + \frac{2T}{3}\right)_0)}{3}$$

- Componentes Generalizadas de Sequência Negativa:

$$F(t)_n = \frac{(F(t)_A - F(t)_0 + F\left(t - \frac{T}{3}\right)_b - F\left(t - \frac{T}{3}\right)_0 + F\left(t - \frac{2T}{3}\right)_c - F\left(t - \frac{2T}{3}\right)_0)}{3}$$

- Componentes Generalizadas Residuais:

$$\sim F(t)_a = F(t)_a - F(t)_0$$

$$F(t)_{ra} = \frac{\sim F(t)_a + \sim F(t + T/3)_a + \sim F(t + 2T/3)_a}{3}$$

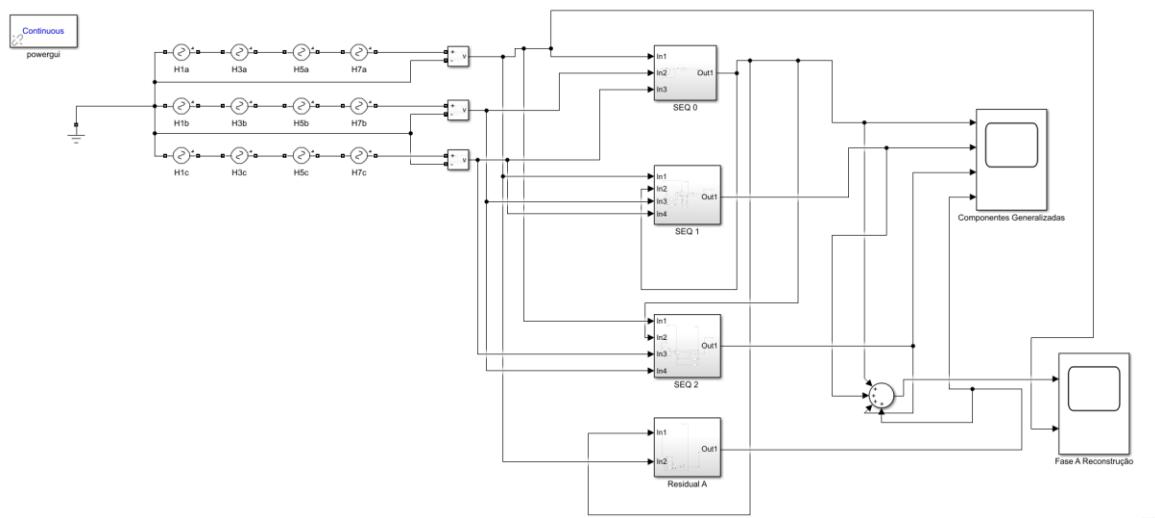
Uma vez estabelecidas as equações, através da plataforma SIMULINK implementou-se um sinal com a intenção de separá-lo nas componentes simétricas generalizadas e verificar se ao somá-las o sinal original era restituído. (Anexo E6_Harmonicas)

Tabela 16 – Sinal Implementado no Simulink

SINAL				
FASE	HARMÔNICA	FREQUÊNCIA [Hz]	AMPLITUDE [V]	FASE [GRAUS]
A	1	60	100	0
B	1	60	120	-130
C	1	60	90	100
A	3	180	50	30
B	3	180	60	150
C	3	180	40	-100
A	5	300	30	0
B	5	300	20	125
C	5	300	10	-90
A	7	420	15	20
B	7	420	8	-150
C	7	420	10	200

Fonte: Autor

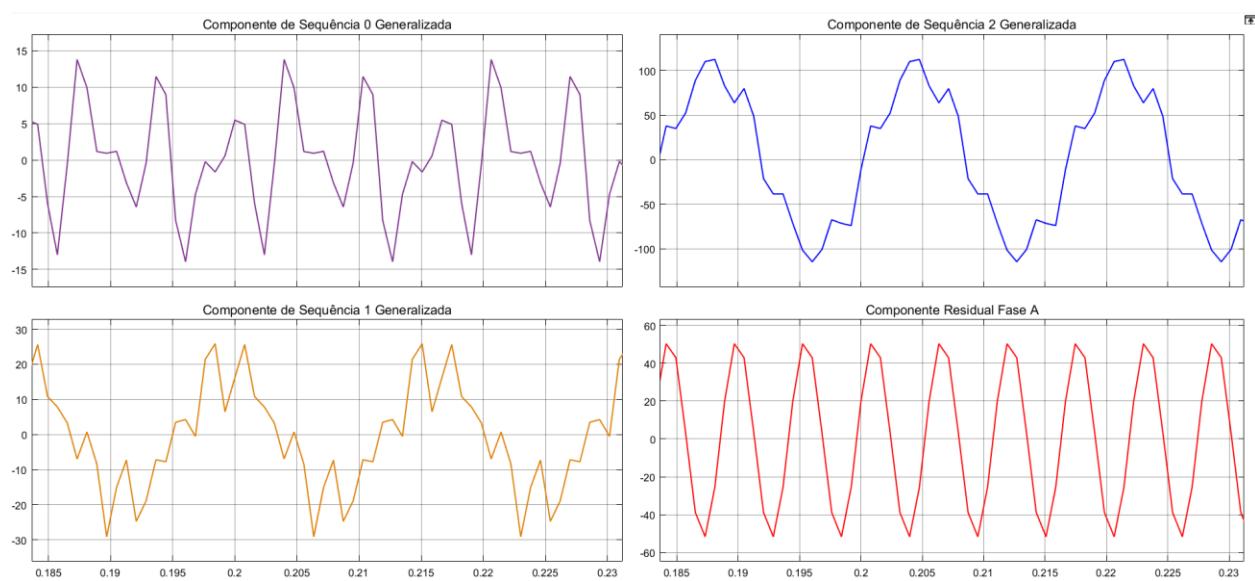
Figura 45 – Circuito Simulado Para o Sinal Proposto



Fonte: Autor

As componentes de Sequência Zero, Positiva, Negativa e Residual da Fase A podem ser vistas abaixo:

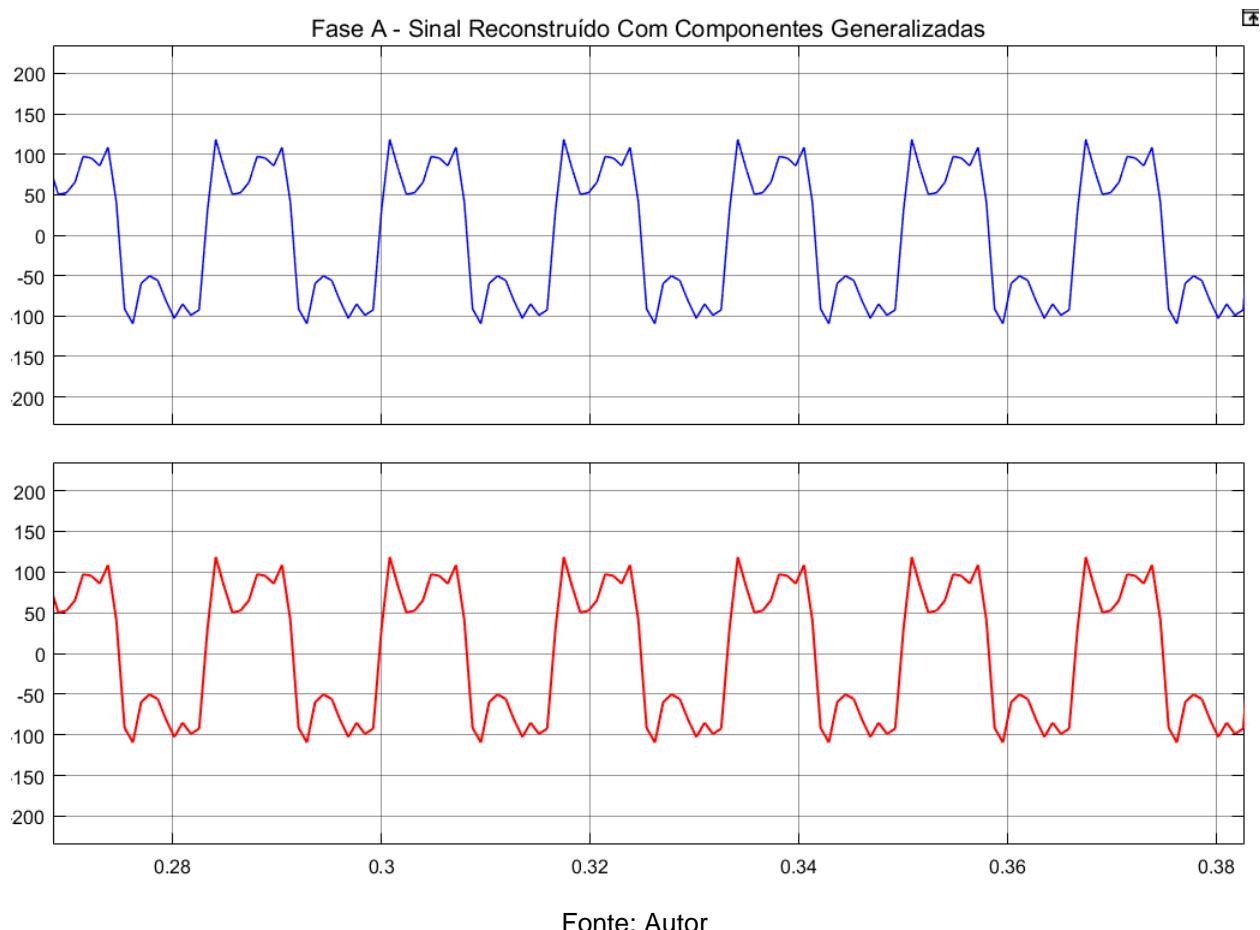
Figura 46 – Componentes Generalizadas



Fonte: Autor

E por fim, o sinal reconstituído em comparação ao original, onde pode-se ver que são exatamente iguais.

Figura 47 – Sinal Reconstituído e Sinal Original



Sendo assim, fica provado a necessidade de uma nova maneira de decomposição que leve em consideração as harmônicas presentes nas formas de onda de tensão e corrente. A metodologia utilizada por Tenti mostrou-se eficaz na decomposição de sinais não puramente senoidais.

9. CONCLUSÕES

Através do presente trabalho, pode-se realizar um amplo estudo a respeito do desequilíbrio de tensão e da distorção de onda devido a harmônicas. Foram realizados levantamentos sobre pontos pertinentes de normas ao redor do mundo, bem como realizadas simulações para o entendimento de como tais fenômenos ocorrem e suas respectivas consequências para os equipamentos e sistema elétrico.

No tocante ao desequilíbrio de tensão, foi desenvolvido um algoritmo que calcula as componentes simétricas de acordo com o Teorema de Fortscue, além de ter sido analisado o impacto da componente de sequência negativa no torque desenvolvido pelo motor, sendo subtrativa e tornando-o pulsante. Nas simulações realizadas observou-se que para cada 1% de desequilíbrio na tensão, o desequilíbrio de corrente tende a ser mais do que 4 vezes superior. Foram calculados os índices de desequilíbrio através das normas referenciadas, sendo os métodos das componentes simétricas e do CIGRÉ (tensões de linha), os melhores.

Em relação às harmônicas, foram desenvolvidas várias simulações para compreender como estas se propagam e suas respectivas consequências. Observou-se como se comportam as harmônicas de sequência negativa, positiva e zero, para diferentes tipos de conexões de carga (Y ou Delta), tanto na tensão como na corrente. A mesma análise aplicada ao torque do motor foi realizada, onde as harmônicas de sequência positiva e negativa contribuem para deixá-lo pulsante.

Por fim, foi analisado o Teorema das Componentes Simétricas Generalizadas, onde provou-se que a decomposição de uma onda não senoidal com harmônicas (distorcida) em componentes de sequência zero, positiva e negativa é incompleta, uma vez que nestas circunstâncias é necessário levar em consideração uma componente denominada residual.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, ***Electrical Power Systems Quality***. Second Edition, McGraw-Hill, 2004.
- [2] S.M.Deckmann e J. A. Pomili, “**CAPÍTULO 1: NORMAS RELATIVAS À CORRENTE DE LINHA: HARMÔNICAS DE BAIXA FREQUÊNCIA E INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA CONDUZIDA,**” . [Online]. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/pfp/Cap1.pdf>>. Acessado em: Set., 9, 2020.
- [3] IEEE, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,**" in *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)* , vol., no., pp.1-98, 13 Aug. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.
- [4] IEEE, **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators,**" in *IEEE Std 112-2017 (Revision of IEEE Std 112-2004)* , vol., no., pp.1-115, 14 Feb. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8291810.
- [5] Adekitan, A.I. & Abdulkareem, Ademola, “**The significance of the mode of voltage imbalance on the operation and energy losses of a 3-phase induction motor**”. Engineering and Applied Science Research. 46. 10.14456/easr.2019.23.
- [6] K. Girigoudar, D. K. Molzahn and L. A. Roald, "On The Relationships Among Different Voltage Unbalance Definitions," *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, Wichita, KS, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000231.
- [7] A. K. Singh, G. K. Singh and R. Mitra, "Some Observations on Definitions of Voltage Unbalance," *2007 39th North American Power Symposium*, Las Cruces, NM, 2007, pp. 473-479, doi: 10.1109/NAPS.2007.4402352.
- [8] ANEEL, “**PRODIST – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica**”. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. [Online]. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acessado em: Ago., 28, 2020.

[9] ONS, “**Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes.**” [Online]. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acessado em: Set, 15, 2020.

[10] A. H. Bonnett, "The impact that voltage and frequency variations have on AC induction motor performance and life in accordance with NEMA MG-1 standards," *Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* (Cat. No.99CH36338), Seattle, WA, USA, 1999, pp. 16-26, doi: 10.1109/PAPCON.1999.779341.

[11] IEEE, **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,**" in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)* , vol., no., pp.1-29, 11 June 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.

[12] G. Paulillo, M. Teixeira, I. Bacca, J. M. C. Filho, “**Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais – Parte III**”. Revista o Setor Elétrico [Online]. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/04/Ed51_fasc_harmonicos_cap4.pdf>. Acessado em: Set., 21, 2020.

[13] S. M. Halpin, "Comparison of IEEE and IEC harmonic standards," *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, San Francisco, CA, 2005, pp. 2214-2216 Vol. 3, doi: 10.1109/PES.2005.1489688.

[14] H. A. Pereira, M. O. Prates “**Aula 11 – Regulamento e Normas**” . [Online]. Disponível em: <http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula11_ELT428-%E2%80%93-Harm%C3%B4nicos-regulamentos-e-normas.pdf>. Acessado em: Set., 15, 2020.

[15] P. Tenti, J. L. Willems, P. Mattavelli, E. Tedeschi, **Generalized Symmetrical Components for Periodic NonSinusoidal Three-Phase Signals**. Seventh International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, July 10-12, 2006, Cagliari.