

**Marcel Marcelino Santee**

**Comparação de arranjos eletromagnéticos para  
conversão de sistemas bifásicos para trifásicos  
visando suprimento de cargas rurais**

**UBERLÂNDIA**

**2020**

**Marcel Marcelino Santee**

**Comparação de arranjos eletromagnéticos para conversão  
de sistemas bifásicos para trifásicos visando suprimento  
de cargas rurais**

Trabalho de conclusão de curso do discente Marcel Marcelino Santee apresentado como exigência parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica. Desenvolvido sobre orientação do professor José Rubens Macedo Junior.

Orientador: José Rubens Macedo Junior

**UBERLÂNDIA**

**2020**

**Marcel Marcelino Santee**

Comparação de arranjos eletromagnéticos para conversão de sistemas bifásicos para trifásicos visando suprimento de cargas rurais/ **Marcel Marcelino Santee. – UBERLÂNDIA, 2020-**

40 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: José Rubens Macedo Junior

Trabalho de Conclusão de Curso – , **2020.**

1. Sistema de distribuição rural. 2. instalações rurais trifásicas. I. Jose Rubens Macedo Junior. II. Universidade Federal de Uberlândia. III. Faculdade de Engenharia Elétrica.

**Marcel Marcelino Santee**

**Comparação de arranjos eletromagnéticos para conversão  
de sistemas bifásicos para trifásicos visando suprimento  
de cargas rurais**

Trabalho de conclusão de curso do discente  
Marcel Marcelino Santee apresentado como  
exigência parcial para obtenção do grau de ba-  
charel em Engenharia Elétrica. Desenvolvido  
sobre orientação do professor José Rubens  
Macedo Junior.

Trabalho aprovado. **UBERLÂNDIA**, de de 2020:

---

**José Rubens Macedo Junior**  
Orientador

---

**Isaque Nogueira Gondim**  
Convidado 1

---

**Paulo Henrique Oliveira Rezende**  
Convidado 2

**UBERLÂNDIA**  
**2020**

*Esse trabalho é dedicado a meu pai e a minha mãe.*

# Agradecimentos

A Deus pelo dom da vida.

A meu pai Donald Mark Santee e minha mãe Rosilene Alves da Silva Santee pelo contínuo apoio que dão em minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior, devido ao suporte e incentivo a esse trabalho.

A Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Elétrica pelo fornecimento de um ensino gratuito e de qualidade.

A todos os meus amigos e colegas que contribuíram de forma direta ou indireta para realização desse trabalho.

*“Todos os homens, por natureza, anseiam o conhecimento”,  
(Aristóteles)*

# Resumo

Em zonas rurais que pretendem expandir sua carga mecânica com a instalação de novos motores, é viável a troca de motores elétricos monofásicos por trifásicos, devido a sua maior eficiência. Porém, a instalação de um sistema trifásico em zonas rurais supridas por uma única fase demanda grande custo financeiro. Para contrapor esse dilema, esse trabalho propõe e compara métodos capazes de suprir um sistema elétrico trifásico com apenas dois fios utilizando apenas arranjos eletromagnéticos. A comparação é feita por meio de simulações de diversas situações visando sempre a qualidade da energia que chega a carga elétrica.

**Palavras-chave:** sistemas de distribuição rural, conversão monofásico para trifásico, instalações rurais trifásicas.

# Abstract

In rural areas that wish to expand its mechanical load with the installation on new motors, it is practical to consider changing single-phase electrical motors to three-phase ones, given its higher efficiency. However, to install a three-phase system in rural areas supplied by a single-phase is very costly. To counter this dilemma, this work compare methods that are able to supply three-phase using only a two wire system and electromagnetic arrangements. Simulations were made to compare and verify the quality on the electrical load.

**Keywords:** rural distribution systems, single-phase to three-phase conversion, three-phase rural facilites.

# Lista de ilustrações

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Diagrama do método 1 . . . . .                                                                                                                                                 | 17 |
| Figura 2 – Taps e terminais de um transformador Scott-T. Imagem de (KAKALEC, 1995). . . . .                                                                                               | 18 |
| Figura 3 – Diagrama do método 3, conforme apresentado em (FANDI et al., 2013)                                                                                                             | 19 |
| Figura 4 – Diagrama de blocos do Simulink do método 2. . . . .                                                                                                                            | 21 |
| Figura 5 – Diagrama de blocos do Simulink do método 3. . . . .                                                                                                                            | 21 |
| Figura 6 – Método 2 funcionando sem carga, não há nenhuma distorção aparente.                                                                                                             | 23 |
| Figura 7 – Método 3 sem carga, não há nenhuma distorção aparente. . . . .                                                                                                                 | 24 |
| Figura 8 – A carga do método 1 em regime permanente, partindo uma carga de 6 KVA e fator de potência 0,8. Não há nenhuma distorção aparente. . . .                                        | 25 |
| Figura 9 – A carga do método 2 funcionando com uma carga nominal, que é 30 kVA, e fator de potência igual a 0,8. A fase em azul apresenta um módulo maior do que as outras fases. . . . . | 26 |
| Figura 10 – O método 3 funcionando com uma carga indutiva com fator de potência 0,8. Não apresenta nenhuma distorção aparente. . . . .                                                    | 27 |
| Figura 11 – Saída do método 1 com 1% de desequilíbrio na fonte . . . . .                                                                                                                  | 28 |
| Figura 12 – Saída do método 2 para 3% de desequilíbrio na fonte . . . . .                                                                                                                 | 29 |
| Figura 13 – Saída do método 3 para 3% de desequilíbrio na fonte . . . . .                                                                                                                 | 30 |
| Figura 14 – Forma da tensão de entrada com 8% de distorção de harmônicos . . . .                                                                                                          | 31 |
| Figura 15 – Método 1 com 8% $DHT_V$ . . . . .                                                                                                                                             | 32 |
| Figura 16 – Método 2 com 8% $DHT_V$ . . . . .                                                                                                                                             | 33 |
| Figura 17 – Método 3 com 8% $DHT_V$ . . . . .                                                                                                                                             | 34 |
| Figura 18 – Método 2 durante o curto-circuito . . . . .                                                                                                                                   | 36 |
| Figura 19 – Método 3 durante o curto-circuito . . . . .                                                                                                                                   | 37 |
| Figura 20 – Método 1 durante o curto-circuito . . . . .                                                                                                                                   | 38 |

# Lista de tabelas

|          |                                                                      |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – Desequilíbrio nas cargas indutivas para uma tensão ideal . . . . . | 22 |
| Tabela 2 | – Desequilíbrio resultante dado uma fonte desequilibrada . . . . .   | 31 |
| Tabela 3 | – Resumo geral das simulações . . . . .                              | 39 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|          |                                                                                       |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $V$      | <i>Volts (unidade de medida)</i>                                                      |
| $A$      | <i>Ampères (unidade de medida)</i>                                                    |
| $V_a$    | <i>Tensão na fase A</i>                                                               |
| $V_b$    | <i>Tensão na fase B</i>                                                               |
| BT       | <i>Baixa Tensão</i>                                                                   |
| $V_{an}$ | <i>Tensão entre a fase A e o neutro</i>                                               |
| $V_{bn}$ | <i>Tensão entre a fase B e o neutro</i>                                               |
| $V_{cn}$ | <i>Tensão entre a fase C e o neutro</i>                                               |
| pu       | <i>por unidade</i>                                                                    |
| $V_0$    | <i>Tensão de sequência 0 em componentes simétricas</i>                                |
| $V_1$    | <i>Tensão de sequência positiva em componentes simétricas</i>                         |
| $V_2$    | <i>Tensão de sequência negativa em componentes simétricas</i>                         |
| $I_0$    | <i>Corrente de sequência 0 em componentes simétricas</i>                              |
| $I_1$    | <i>Corrente de sequência positiva em componentes simétricas</i>                       |
| $I_2$    | <i>Corrente de sequência negativa em componentes simétricas</i>                       |
| PRODIST  | <i>Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional</i> |
| ANEEL    | <i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>                                           |
| $DHT_V$  | <i>Distorção Harmônica Total de Tensão</i>                                            |

# Sumário

|            |                                         |           |
|------------|-----------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                       | <b>13</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Problema</b>                         | <b>13</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Escopo</b>                           | <b>13</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivo</b>                         | <b>14</b> |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>              | <b>15</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Qualidade de Energia</b>             | <b>15</b> |
| 2.1.1      | Sobre e Subtensão                       | 15        |
| 2.1.2      | Desequilíbrio                           | 15        |
| 2.1.3      | Harmônicos                              | 16        |
| <b>2.2</b> | <b>Métodos de Conversão</b>             | <b>16</b> |
| 2.2.1      | Ferraris-Arno                           | 16        |
| 2.2.2      | Scott-T                                 | 17        |
| 2.2.3      | Modelo Proposto                         | 18        |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA</b>                      | <b>20</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>          | <b>22</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Sem Carga</b>                        | <b>22</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Tensão Ideal</b>                     | <b>22</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Desequilíbrio de Tensão na Fonte</b> | <b>22</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Distorção Harmônica Total</b>        | <b>31</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Curto-Circuito Fase-Fase</b>         | <b>35</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>    | <b>39</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>                      | <b>40</b> |

# 1 Introdução

## 1.1 Problema

Diversas zonas rurais no Brasil possuem apenas uma única fase chegando em dois fios. Isso ocorre devido ao baixo consumo mensal e o limite financeiro aos programas de eletrificação rural.

É possível que o proprietário deseje aumentar sua carga, devido a aumento da demanda ou a economia de energia por novas técnicas de irrigação. Com o aumento da demanda, é melhor a utilização de motores trifásicos, pois sua eficiência energética é muito superior aos monofásicos. Porém, o custo da instalação de um sistema trifásico é relativamente alto (FANDI et al., 2013), o que pode fazer com que o aumento da carga se torne inviável.

O custo de elevar um fio neutro, que já é disponível em redes monofásicas, para uma outra fase não é tão alto (FANDI et al., 2013) quanto a instalação de mais duas fases. Com essa configuração de dois fios, cada um com uma fase, é possível disponibilizar uma baixa tensão trifásica para a carga, dispondo-se apenas de arranjos eletromagnéticos. Os primeiros conversores desse tipo eram produzidos por componentes passivos, como capacitores e autotransformadores (MAGGS, 1946).

Na década de 60 já foram propostas soluções em eletrônica de potência que convertem sistemas monofásicos para trifásicos (HISANO, 1966), porém as soluções até hoje requerem um conversor para cada motor elétrico (BUSARELLO et al., 2009), além de não atingirem bons resultados em qualidade de energia (BELLAR et al., 2004).

## 1.2 Escopo

As técnicas estudadas nesse trabalho utilizam apenas arranjos eletromagnéticos, podendo ser dimensionado para grandes potências e múltiplos motores. Os métodos estudados serão Ferraris-Arno (MAGGS, 1946) e Scott-T (KAKALEC, 1995), ambos que já são famosos e utilizados, além de um novo método proposto (FANDI et al., 2013). O estudo é feito analisando diferentes cargas e formas de tensão, visando sempre a qualidade de energia na carga final do sistema.

## 1.3 Objetivo

O objetivo final desse trabalho é descobrir qual melhor maneira de fornecer energia elétrica trifásica para uma zona rural monofásica sem que os gastos sobreponham o ganho financeiro dado pelo aumento das cargas.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Qualidade de Energia

É muito importante que a energia elétrica que chega ao consumidor tenha qualidade, pois a falta dela pode ocasionar danos a carga ou até mesmo a fiação e outros equipamentos necessários para distribuição de energia. Além da continuidade e confiabilidade do sistema, ou seja, a garantia de que quase sempre terá energia, alguns fatores que quantificam a qualidade são: A magnitude da tensão, o desequilíbrio entre as fases e a distorção harmônica.

#### 2.1.1 Sobre e Subtensão

As cargas são projetadas para operar em certo nível de tensão, mas é possível que esse nível diminua devido as perdas joulicas da linha ou aumente por causa da capacitância na linha de transmissão. Existem três condições do módulo da tensão a serem considerados pelo Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), adequado, precário e crítico. Para baixa tensão, que será considerado usado pelo consumidor, os valores considerados adequados da tensão de referência “V” é dado por:

$$0,95pu \leq V \leq 1,05pu \quad (2.1)$$

Ou seja, pode ter 5% a mais ou menos da tensão de referência (ANEEL, ).

#### 2.1.2 Desequilíbrio

Em um sistema trifásico, é ideal que as tensões e correntes tenham a mesma magnitude e que estejam defasadas de  $120^\circ$  elétricos uma das outras. Para fazer uma análise quantitativa de qual sistema é mais ou menos desequilibrado utiliza-se o método componentes simétricas, também chamado de Teorema de Fortescue. Esse método decompõe um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas trifásicos equilibrados, um com mesma sequência de fases, outro com sequência invertida e outra de mesma fase. Chamamos também de sequência positiva, negativa e zero. A negativa indica a oposição a positiva, demonstrando o quanto um motor sofre a mais de frenagem, a zero mostra o desvio de tensão do ponto neutro.

A conversão de um sistema trifásico para um em componentes simétricas é feita pela seguinte matriz fasorial, onde  $a = 1\angle 120^\circ$ :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

### 2.1.3 Harmônicos

Em sistemas de corrente alternada, infere-se que a variação de tensão é uma senoide pura com uma única frequência. Porém devido a cargas não-lineares presentes na rede, como diodos e tiristores, surgem tensões e corrente de frequências múltiplas inteiras da tensão da fonte. Assim, pode chegar ao consumidor a tensão como uma somatória de senoides com diferentes frequências, amplitudes e defasagens.

Existem diversos métodos para se calcular o quanto um sistema é afetado por harmônicos, o que será usado nesse trabalho é a seguinte formula para distorção harmônica total( $THD_V$ ):

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1}$$

Onde o índice da tensão indica a ordem harmônica, sendo 1 a fundamental da rede, 2 sendo duas vezes a frequência natural, 3 é três vezes e assim por diante.

Não é comum a geração de harmônicos pares em redes elétricas, pois para que eles surjam seria necessário geração assimétrica. Apesar de existir a possibilidade de geração pares, aqui só serão considerados harmônicos ímpares.

A ordem das tensões harmônicas possui relação inversamente proporcional a sua amplitude. Ou seja, quanto maior a ordem menor a amplitude.

## 2.2 Métodos de Conversão

Cada um dos métodos possui diferentes configurações de transformadores, com um dos sistemas apresentando ainda a adição de um motor. Nessa seção serão apresentados os princípios físicos de cada método.

### 2.2.1 Ferraris-Arno

O sistema Ferraris-Arno, referido neste trabalho como método 1, consiste em um motor de indução sem carga partindo à vazio com uma fonte monofásica com defasador de fase. Ao partir o motor gera a terceira fase para a carga que realmente será utilizada. O sistema Ferraris-Arno capacitivo testado inclui um capacitor entre uma das fases da rede

e a fase fabricada para gerar defasagem e melhorar o fator de potência. A figura 1 ilustra o esquema de ligação.

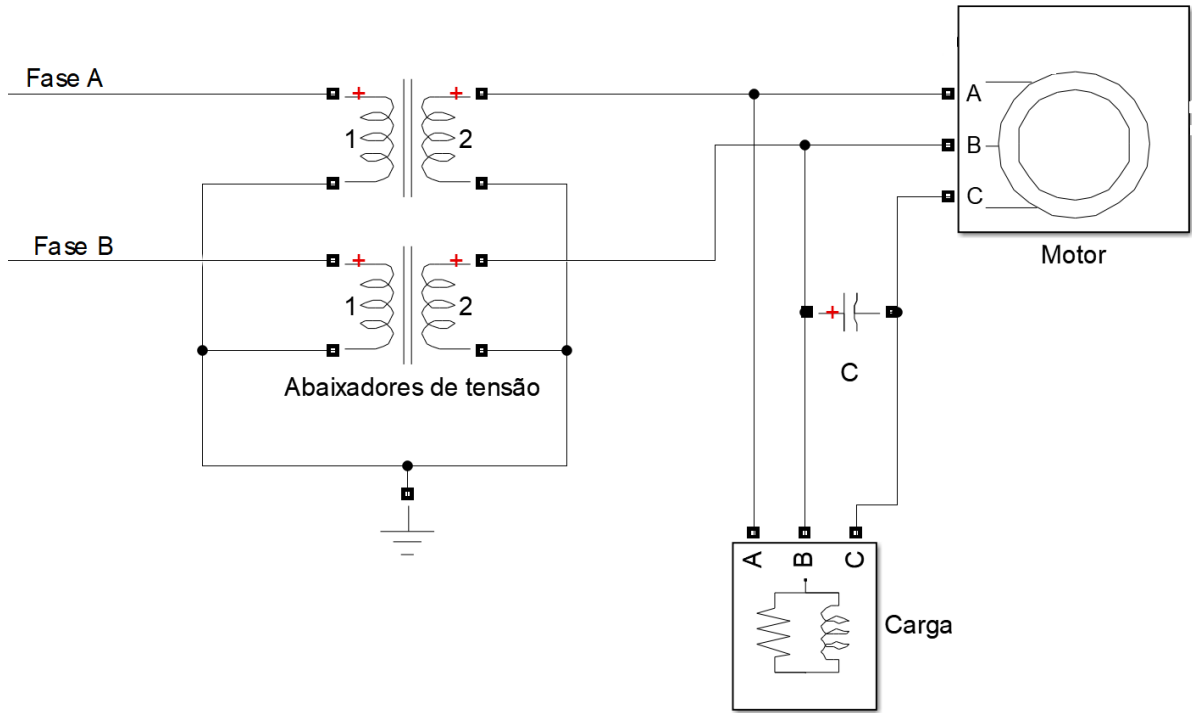


Figura 1 – Diagrama do método 1

### 2.2.2 Scott-T

O transformador Scott-T, referido como método 2, consiste em dois transformadores monofásicos, com as bobinas do lado bifásico conectadas em série. E o lado trifásico com o tap de 50% de uma bobina conectada ao tap de  $\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 86,6\%$  da outra. As fases são obtidas pelo esquema da figura . Foi utilizado tap de 86,7% devido a limitação do software de criar um número finito de taps igualmente espaçados. Para se obter 3 fases na saída do transformador é preciso que a entrada haja dois sinais defasados  $90^\circ$ , porém a rede de distribuição fornece apenas fases defasadas em  $120^\circ$  graus, para contornar a situação é utilizado dois transformadores para realizar as seguintes operações:

$$V_a = 1 \angle 0^\circ pu \quad (2.2)$$

$$V_b = 1 \angle -120^\circ pu \quad (2.3)$$

$$V_c = V_a + 2 * V_b \approx 1,732 \angle -90^\circ pu \quad (2.4)$$

Isso é feito com um transformador monofásico que duplica o módulo da fase B e outro que soma as fases A e B duplicada tendo uma em cada terminal do primário além de ajustar o módulo para que volte a ser de  $1 pu$ . Tendo assim um sistema trifásico equilibrado.

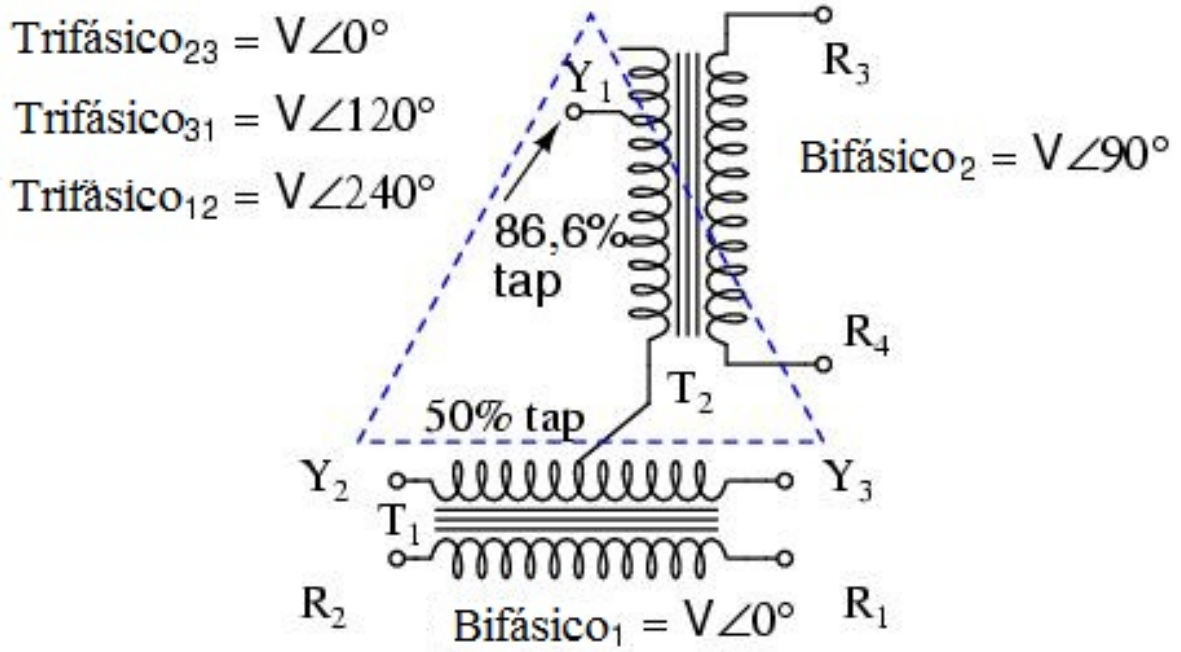


Figura 2 – Taps e terminais de um transformador Scott-T. Imagem de (KAKALEC, 1995).

### 2.2.3 Modelo Proposto

O modelo proposto no trabalho (FANDI et al., 2013), e aqui referido como método 3 consiste em um transformador monofásico para inverter uma das fases e um trifásico delta-estrela aterrada, com uma das fases do primário também aterrada. Como ilustrado na figura 3. As tensões de entrada são:

$$V_{an} = 1,0\angle 0^\circ pu, V_{bn} = 1,0\angle 60^\circ pu, e V_{cn} = 0,0 pu \quad (2.5)$$

.

E por componentes simétricas, temos que:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1,0\angle 0^\circ \\ 1,0\angle 60^\circ \\ 0,0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,577\angle 30^\circ \\ 0,0 \\ 0,577\angle -30^\circ \end{bmatrix} pu \end{aligned} \quad (2.6)$$

Devido a conexão do transformador teremos um defasamento de  $30^\circ$  para sequência positiva e  $-30^\circ$  para negativa. Logo as tensões no secundário serão:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,0\angle 0 \\ 0,0\angle 0^\circ + 30^\circ \\ 0,577\angle -30^\circ(-30^\circ) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0,577\angle -60^\circ \\ 0,577\angle 60^\circ \\ 0,577\angle 180^\circ \end{bmatrix} pu \quad (2.7)$$

O que resulta em três tensões equilibradas de módulo reduzido, o que pode ser facilmente corrigido alterando o número de espiras do transformador, e as tensões são igualmente defasadas em  $120^\circ$ . É importante notar que esse método inverte a sequência de fases.

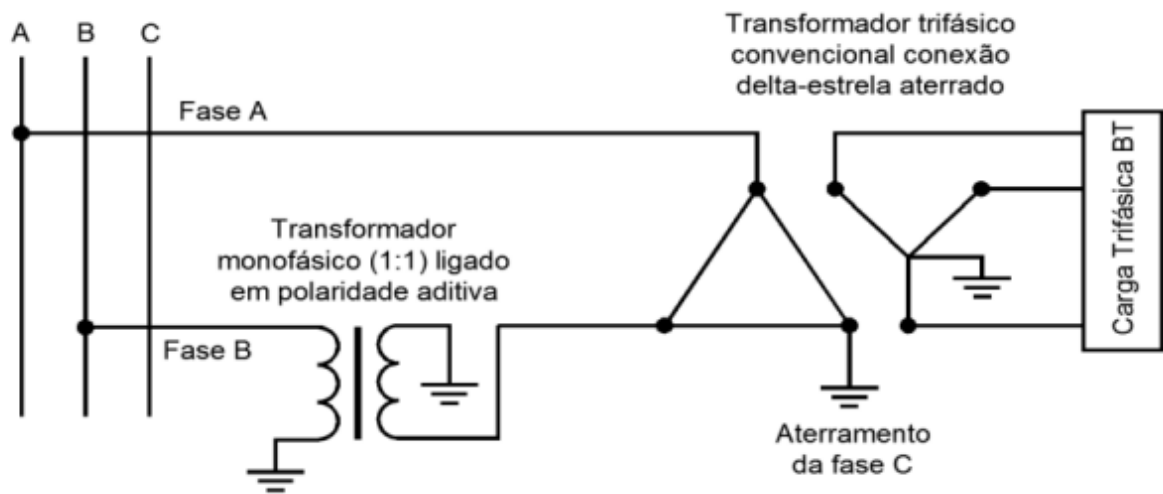


Figura 3 – Diagrama do método 3, conforme apresentado em (FANDI et al., 2013)

### 3 Metodologia

As simulações foram feitas utilizando o software MATLAB, por possuir um ambiente de programação em alto nível e fornecer diversas funções. A ferramenta Simulink embutida no software faz simulação, modelagem e análise de sistemas dinâmicos (TEWARI, 2002), ele será utilizado por possuir uma interface gráfica de diagramação por blocos de fácil montagem e entendimento, além de permitir bastante precisão. A biblioteca do Simulink utilizada será a *Simscape Power Systems Specialized Technology Fundamental Blocks*, que já possui blocos representando transformadores, fontes de tensão, resistências, motores e todos os componentes utilizados nos métodos testados.

A simulação é feita de forma discreta no tempo, utilizando o método Tustin e amostragem de  $1/60/256 \approx 6,5 * 10^{-5}$ . A frequência da rede é de 60 Hertz. As fontes de tensão utilizadas são consideradas partindo da linha de transmissão, portando existe a impedância da linha de distribuição, como exibida na figura 5. O método de discretização escolhido foi o Tustin, que aproxima as equações da seguinte forma:

$$x(k) = x(k-1) + \int_{(k-1)}^{kh} f d\tau \quad (3.1)$$

$$x \approx x(k-1) + \frac{h}{2}[f(k) + f(k-1)] \quad (3.2)$$

Esse método foi escolhido por ter maior precisão do que os métodos Euler e Backwards Euler disponíveis no software (HAUGEN, ).

Para cada um dos métodos, foram estudados diferentes situações: cargas resistivas e indutivas com fator de potência 0,8 e potências de 100%, 75%, 50% e 25% das nominais dos transformadores. Totalizando oito cargas. Para cada carga, foram testadas diferentes tensões de entrada fornecidas as linhas de distribuição: Perfeitamente senoidais, com desequilíbrio entre as fases de 1%, 2% e 3%, e com distorção harmônica total de 3%, 5% e 8%. Além dessas situações, foi simulado o funcionamento sem carga e a reação a curto-circuitos monofásicos de 15 ciclos.

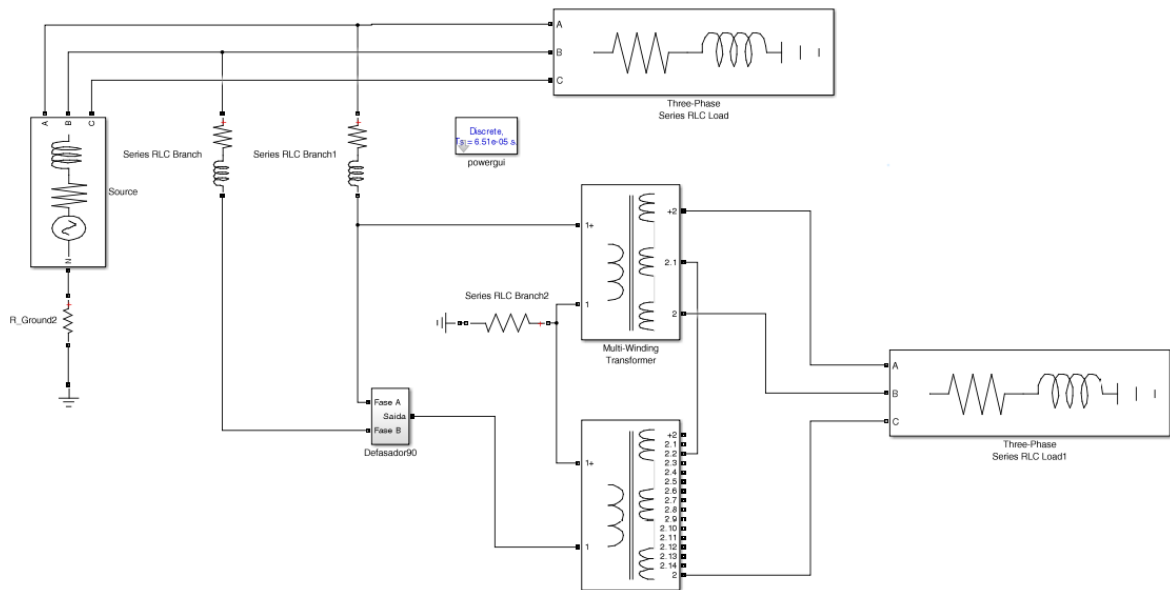


Figura 4 – Diagrama de blocos do Simulink do método 2.

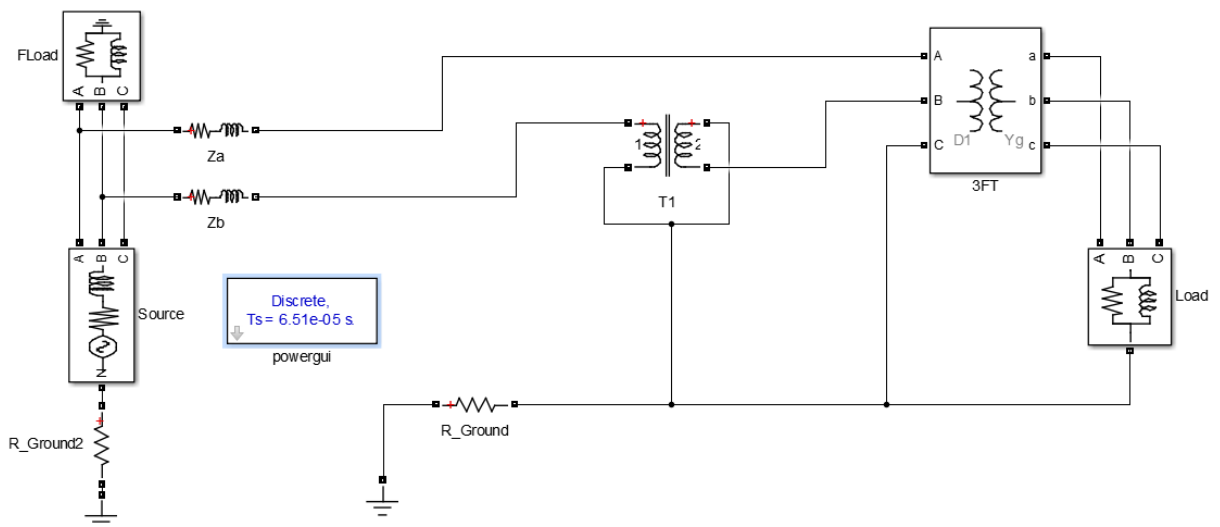


Figura 5 – Diagrama de blocos do Simulink do método 3.

## 4 Resultados e Discussões

Nessa seção serão apresentados os resultados relevantes de cada simulação.

### 4.1 Sem Carga

Como o motor não é capaz de partir utilizando apenas duas fases o método 1 não funciona sem uma carga para fechar um circuito com a terceira fase. O sistema também se mostra inviável para cargas que são muito sensíveis a correntes transitórias. Os outros dois métodos apresentaram resultados satisfatórios, com o método 3 apresentando um desbalanço levemente menor.

### 4.2 Tensão Ideal

Para uma tensão de entrada perfeitamente senoidal, todos os métodos apresentaram resultados satisfatórios, com o método 2 apresentando um desbalanço de fases um pouco maior.

Os valores de cada componente simétrico na carga foram calculados na simulação. Assim pode-se ter uma ideia mais quantitativa da qualidade de energia em cada um dos sistemas. Para cada método funcionando na condição de carga indutiva, obtemos as seguintes distorções, dadas como  $\frac{V_0}{V_1}$ :

| Método 1 | Método 2 | Método 3 |
|----------|----------|----------|
| 76,89%   | 0%       | 0,5982%  |

Tabela 1 – Desequilíbrio nas cargas indutivas para uma tensão ideal

### 4.3 Desequilíbrio de Tensão na Fonte

Mesmo para desequilíbrios de 1% o método 1 não conseguiu providenciar uma terceira fase com mesmo módulo e propriamente defasada, como demonstrado na figura 11. foram usadas as seguintes tensões de entrada:

$$V_a = 222.200 \angle 0^\circ V \quad (4.1)$$

$$V_b = 218.908 \angle -120,499^\circ V \quad (4.2)$$

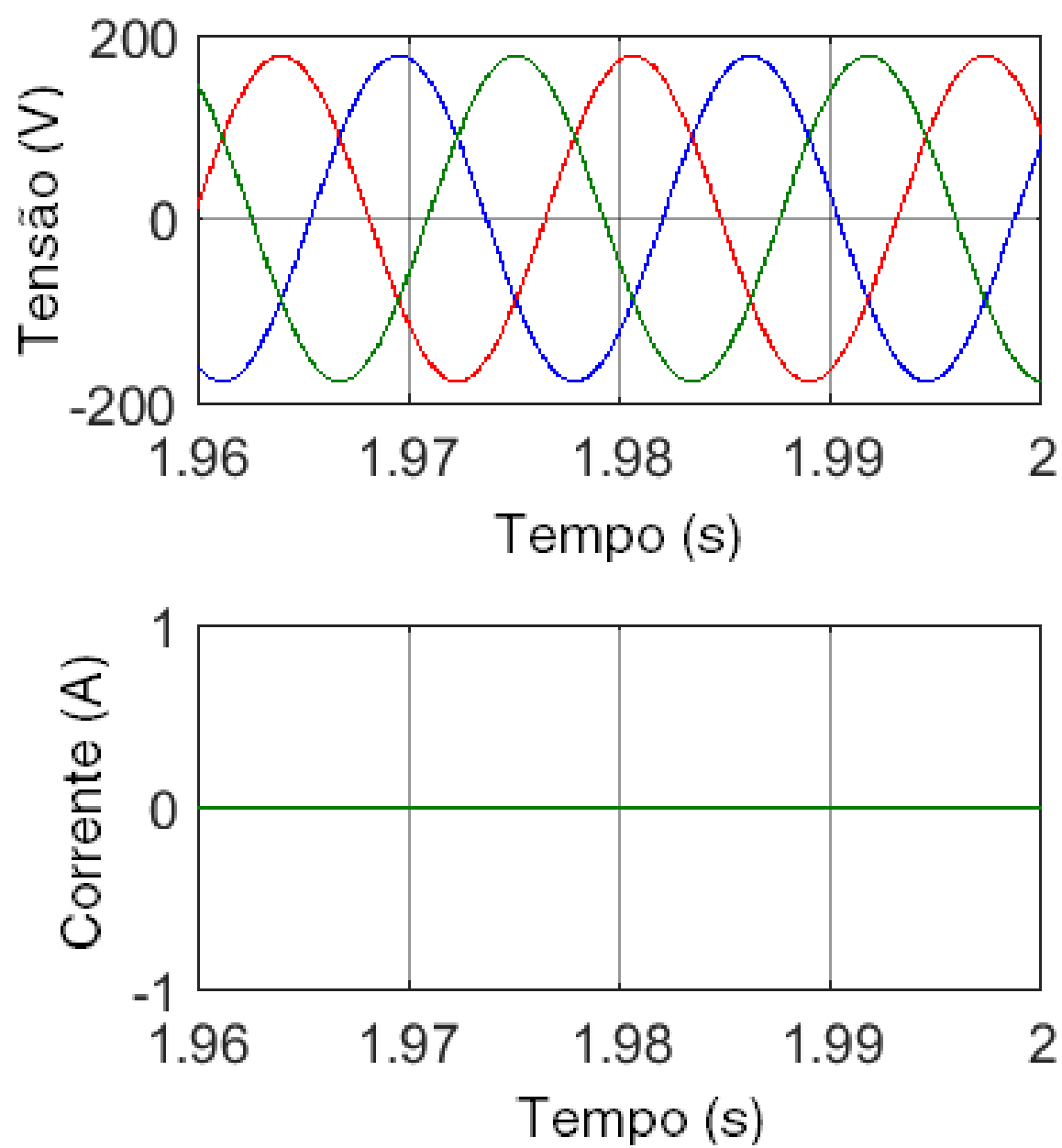


Figura 6 – Método 2 funcionando sem carga, não há nenhuma distorção aparente.

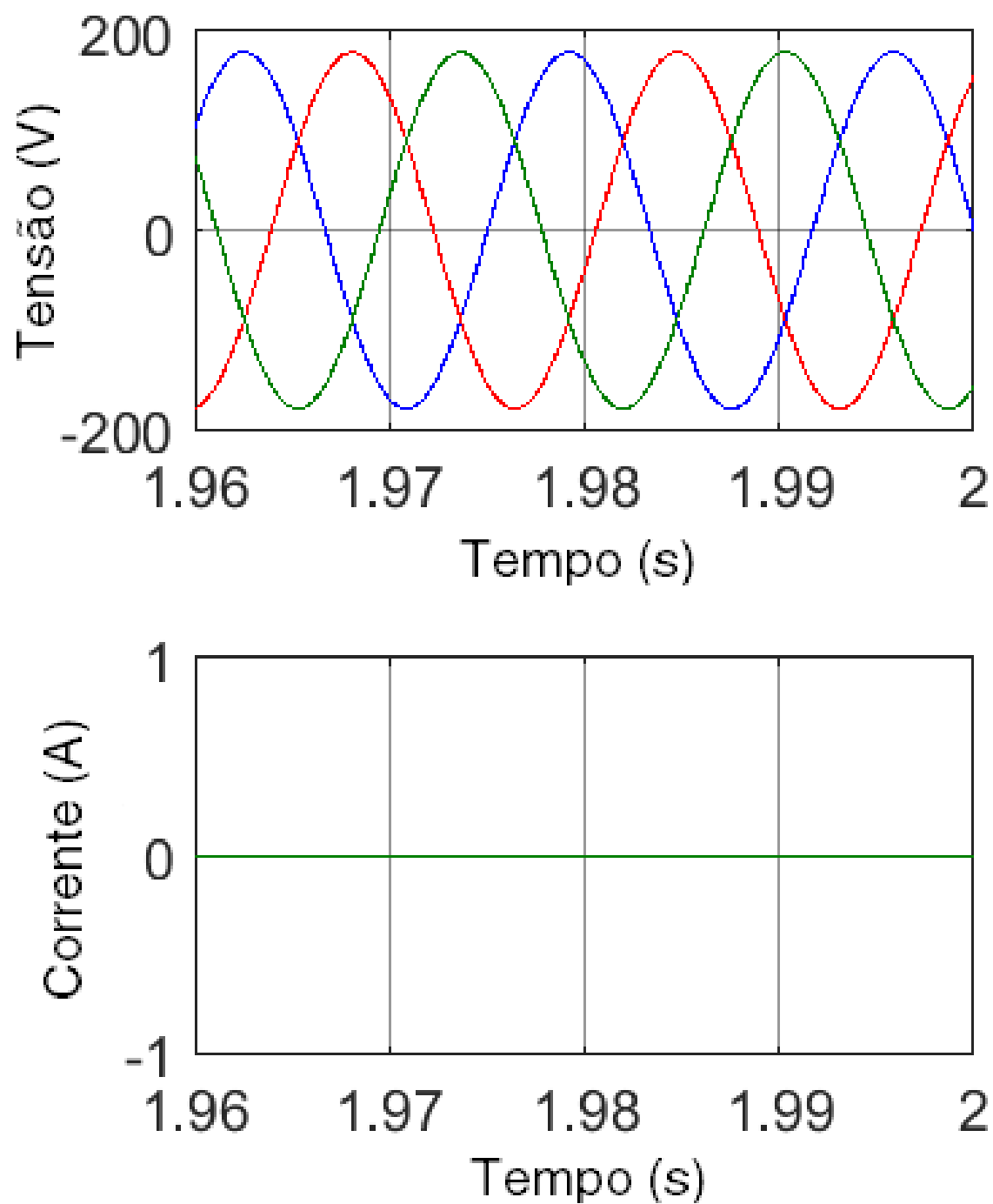


Figura 7 – Método 3 sem carga, não há nenhuma distorção aparente.

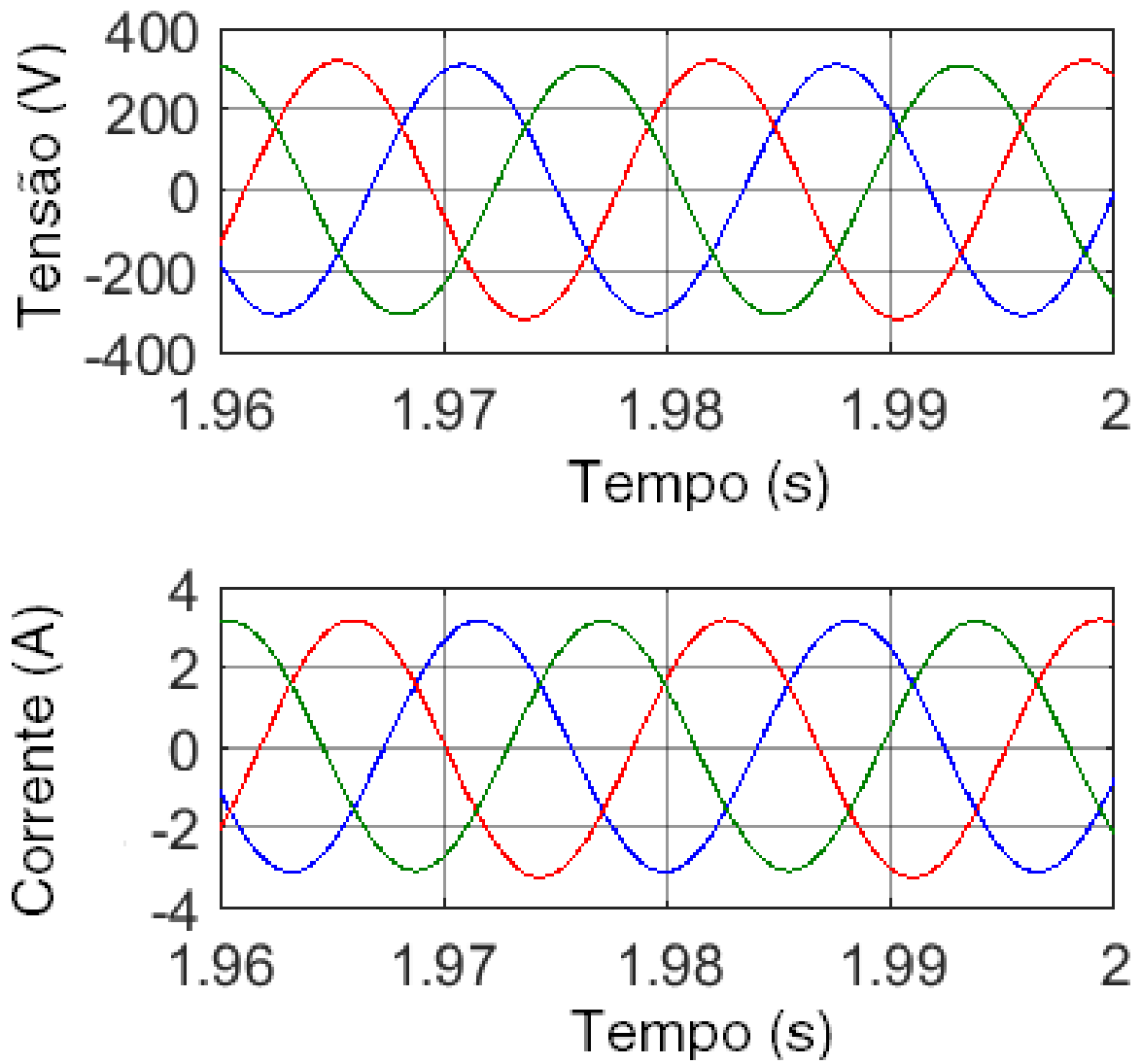


Figura 8 – A carga do método 1 em regime permanente, partindo uma carga de 6 KVA e fator de potência 0,8. Não há nenhuma distorção aparente.

Porém, os métodos 2 e 3 continuaram capazes de fornecer a terceira fase com módulo e ângulo em valores aceitáveis para o desequilíbrio de 3%, que foi definido como:

$$V_a = 226.600 \angle 0^\circ V \quad (4.3)$$

$$V_b = 216.775 \angle -121,511^\circ V \quad (4.4)$$

Dado o mesmo desequilíbrio de 3% na fonte, tem-se os valores de componentes simétricos para de tensão e corrente na tabela 2.

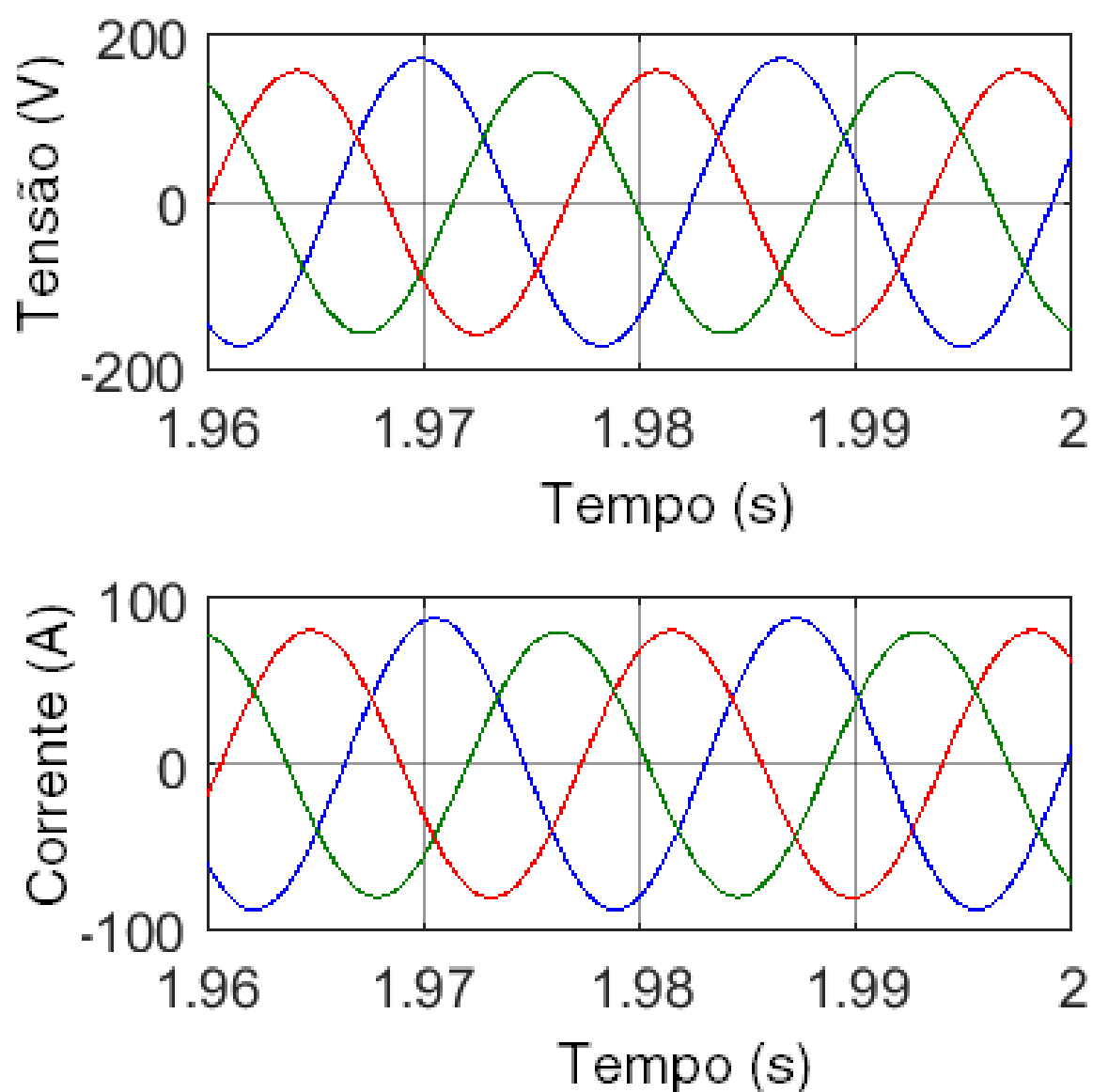


Figura 9 – A carga do método 2 funcionando com uma carga nominal, que é 30 kVA, e fator de potência igual a 0,8. A fase em azul apresenta um módulo maior do que as outras fases.

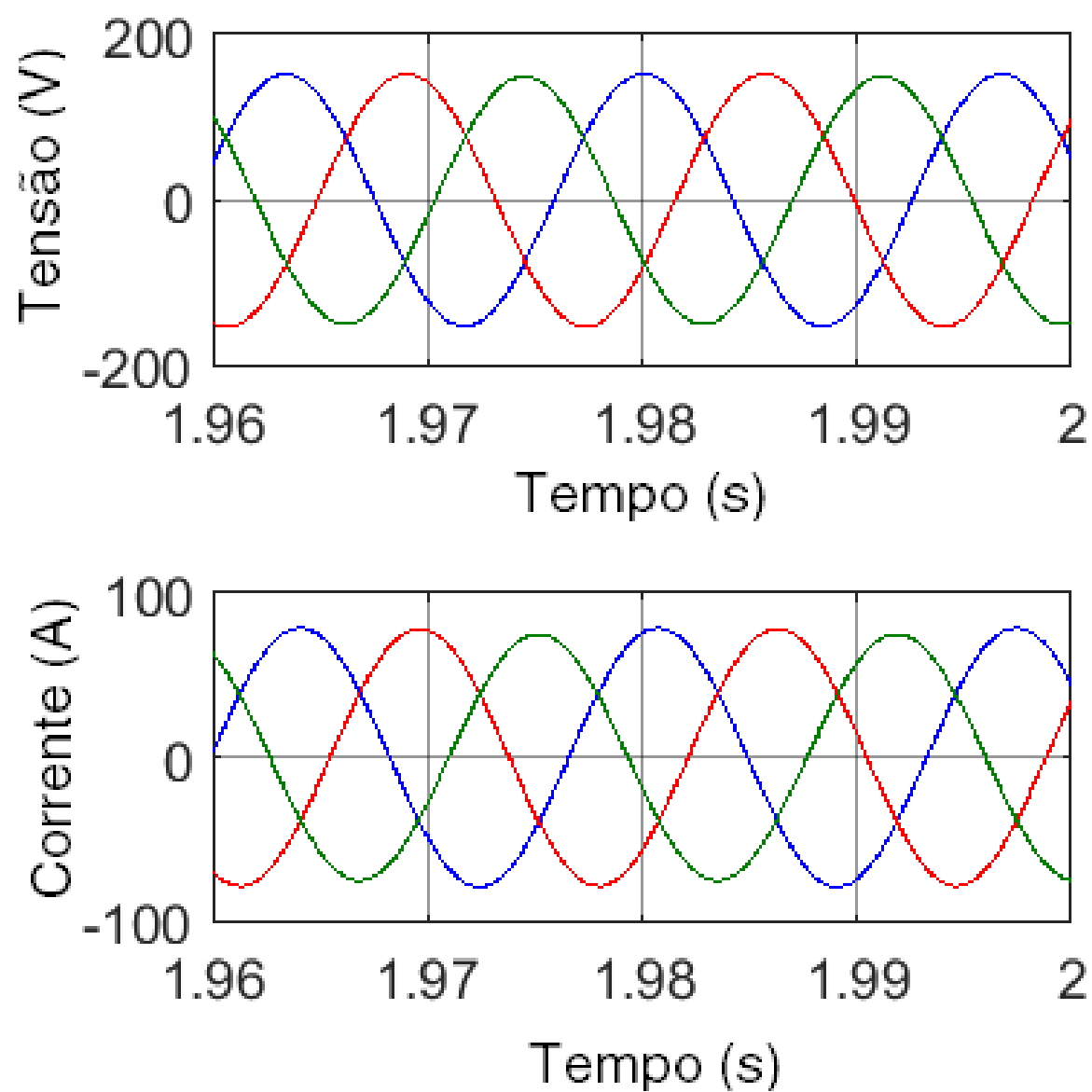


Figura 10 – O método 3 funcionando com uma carga indutiva com fator de potência 0,8. Não apresenta nenhuma distorção aparente.

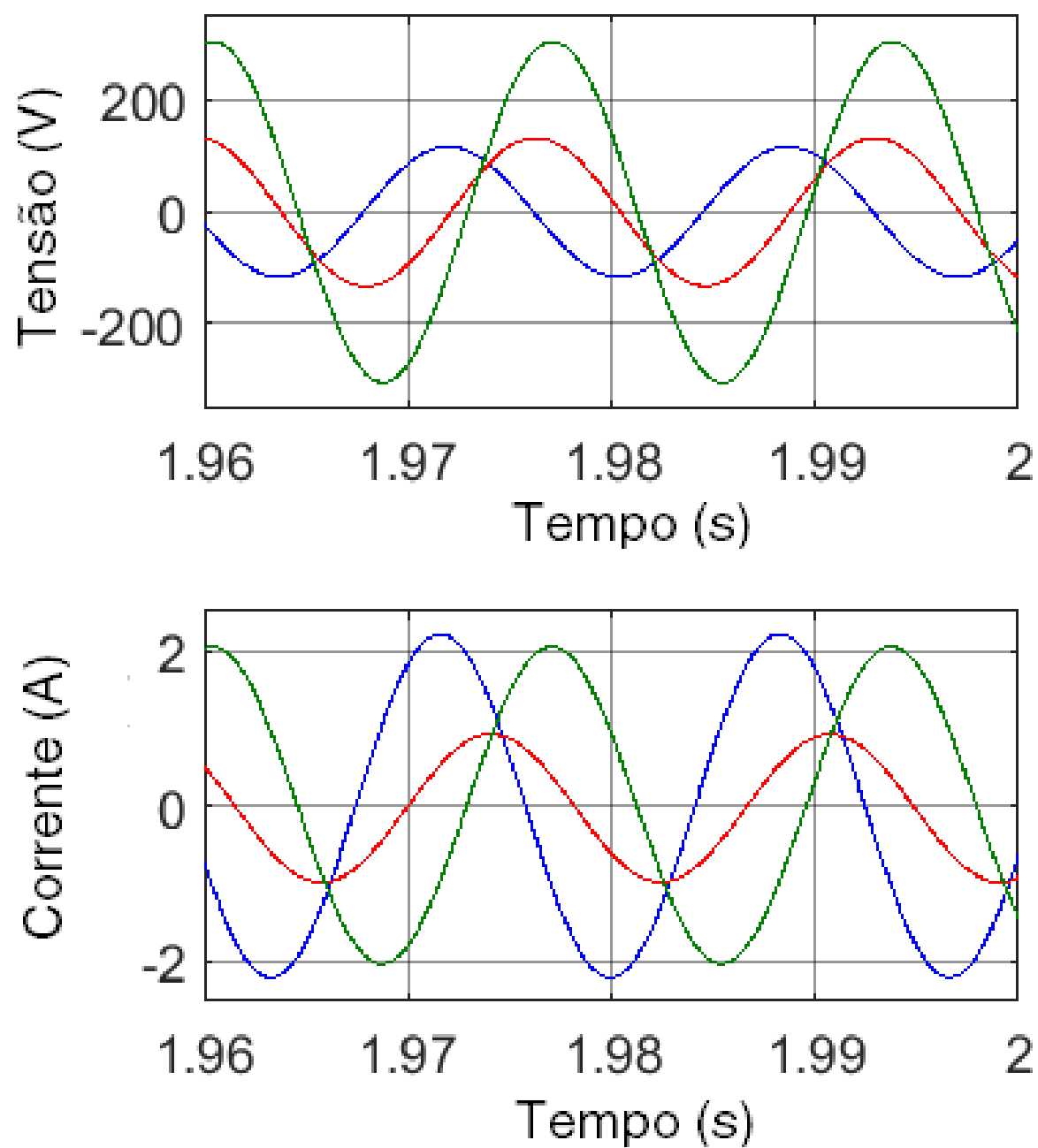


Figura 11 – Saída do método 1 com 1% de desequilíbrio na fonte

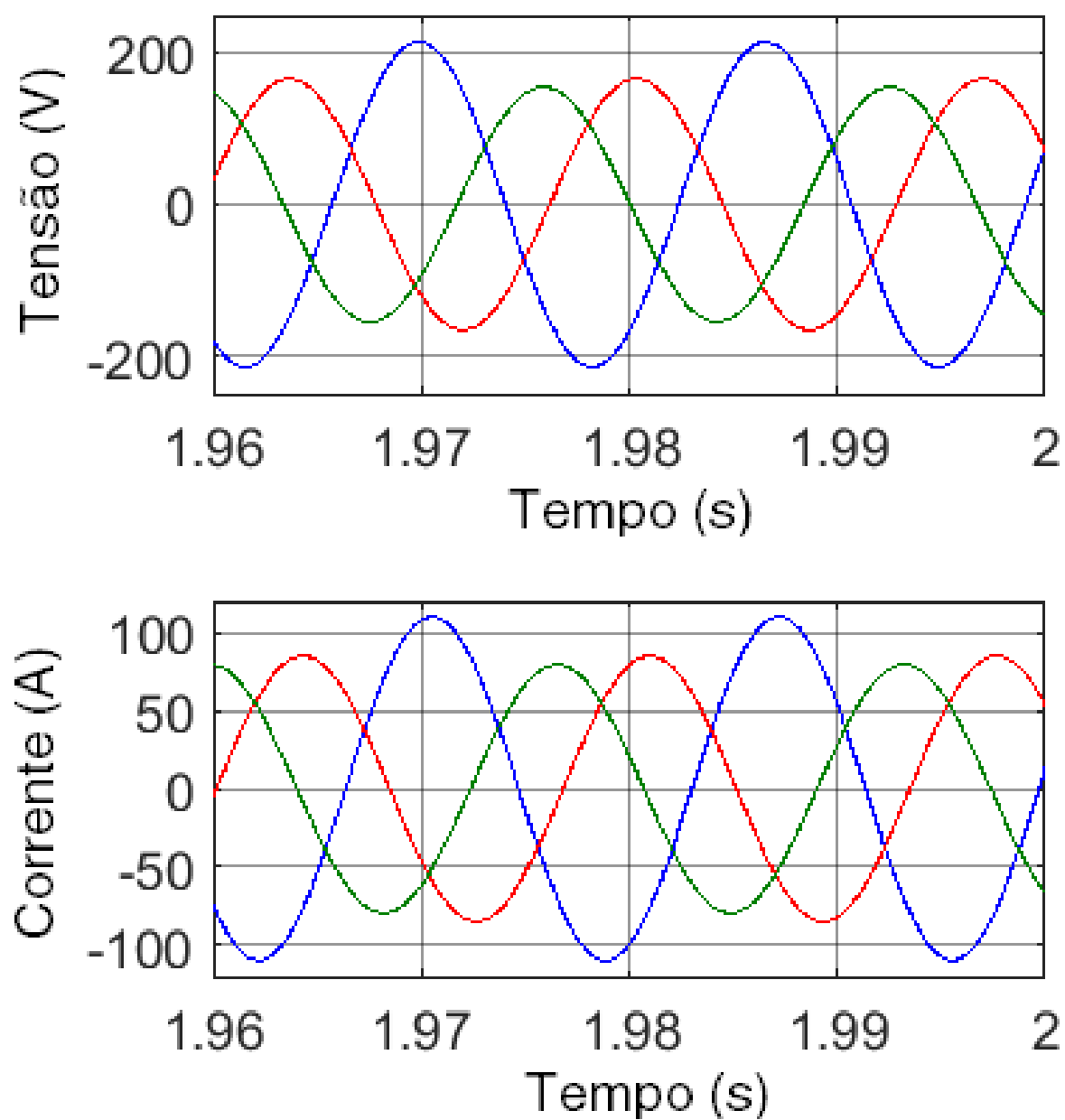


Figura 12 – Saída do método 2 para 3% de desequilíbrio na fonte

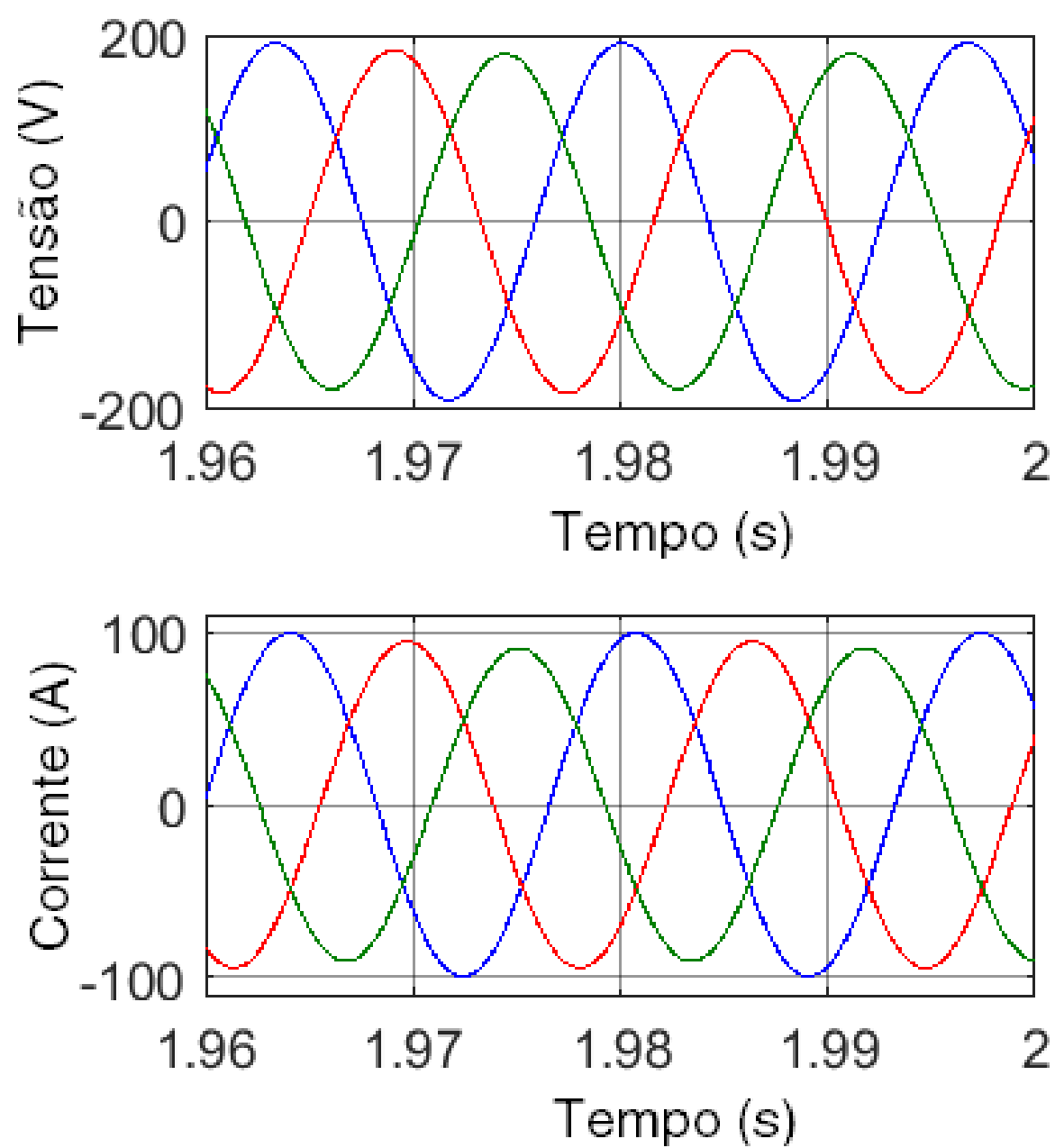


Figura 13 – Saída do método 3 para 3% de desequilíbrio na fonte

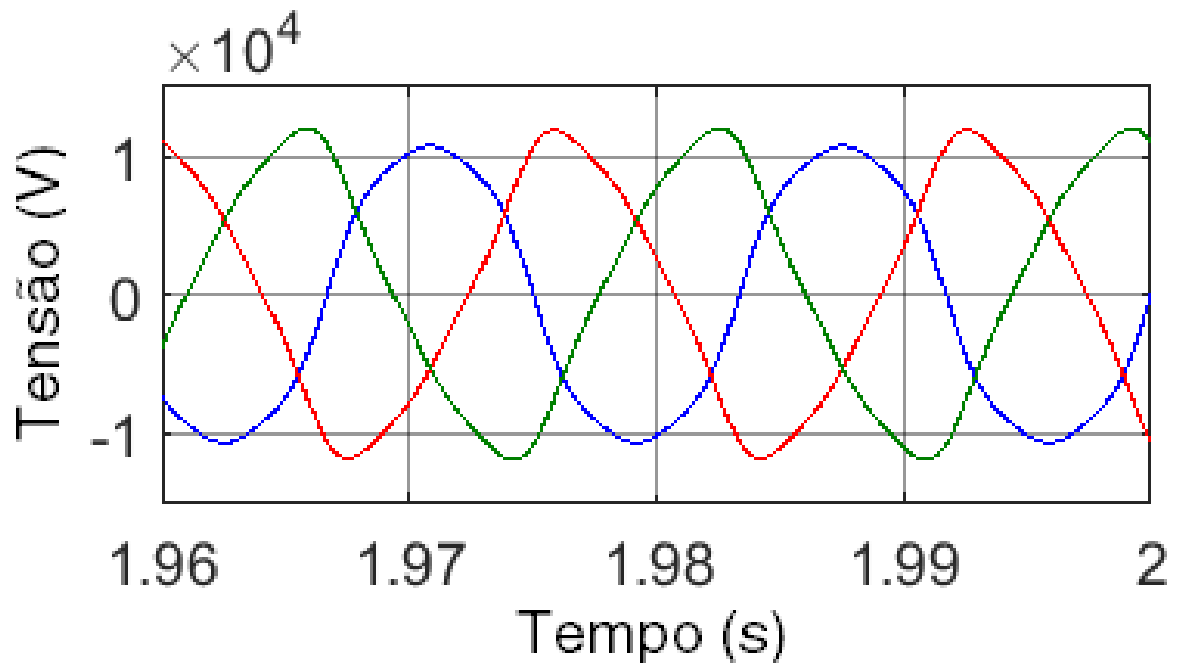


Figura 14 – Forma da tensão de entrada com 8% de distorção de harmônicos

|           | Método 1(%) | Método 2(%) | Método 3(%) |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| $V_0/V_1$ | 107,4       | 0           | 0,5889      |
| $V_2/V_1$ | 105,6       | 454,9       | 4,383       |
| $I_0/I_1$ | 98,24       | 0           | 1,496       |
| $I_2/I_1$ | 94,73       | 454,9       | 4,383       |

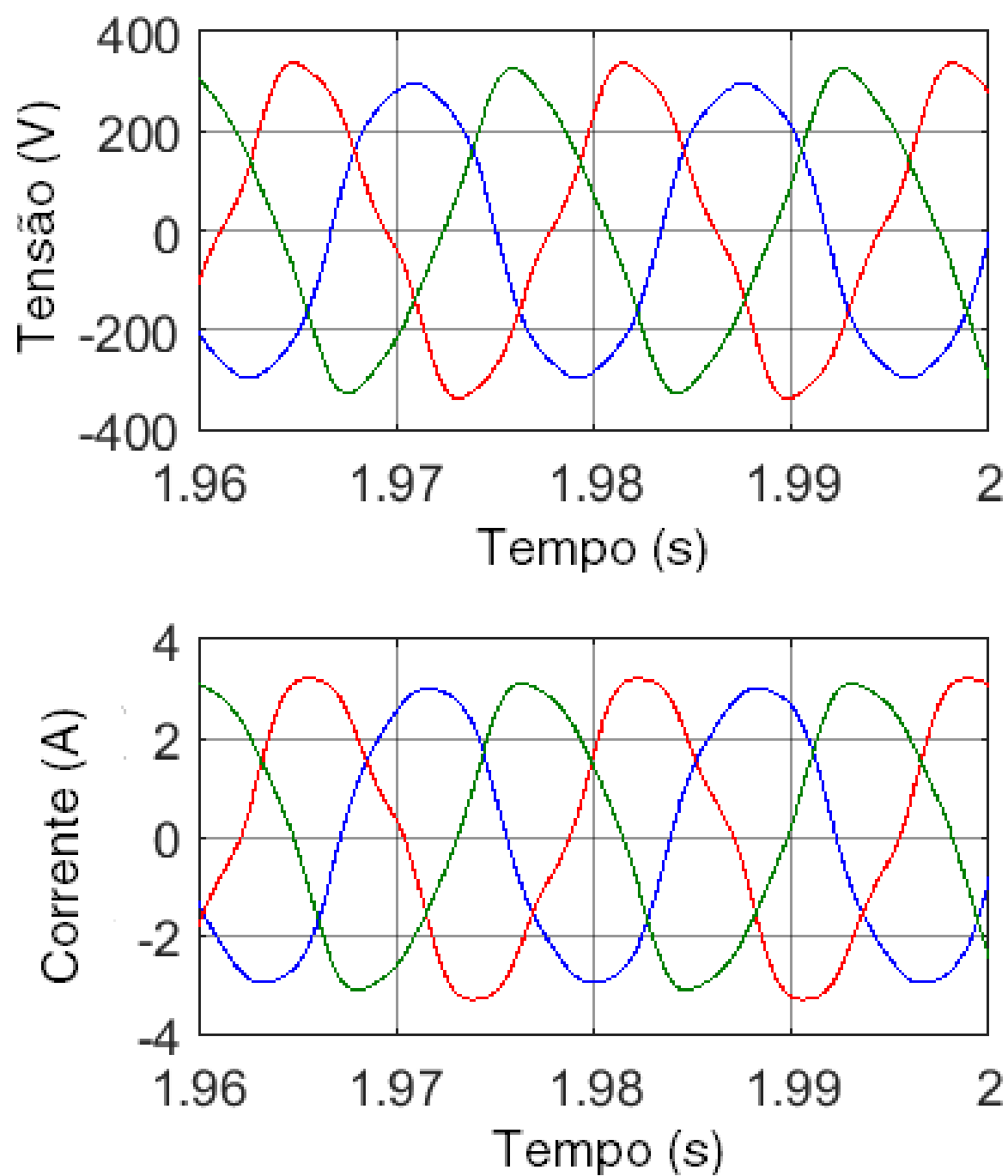
Tabela 2 – Desequilíbrio resultante dado uma fonte desequilibrada

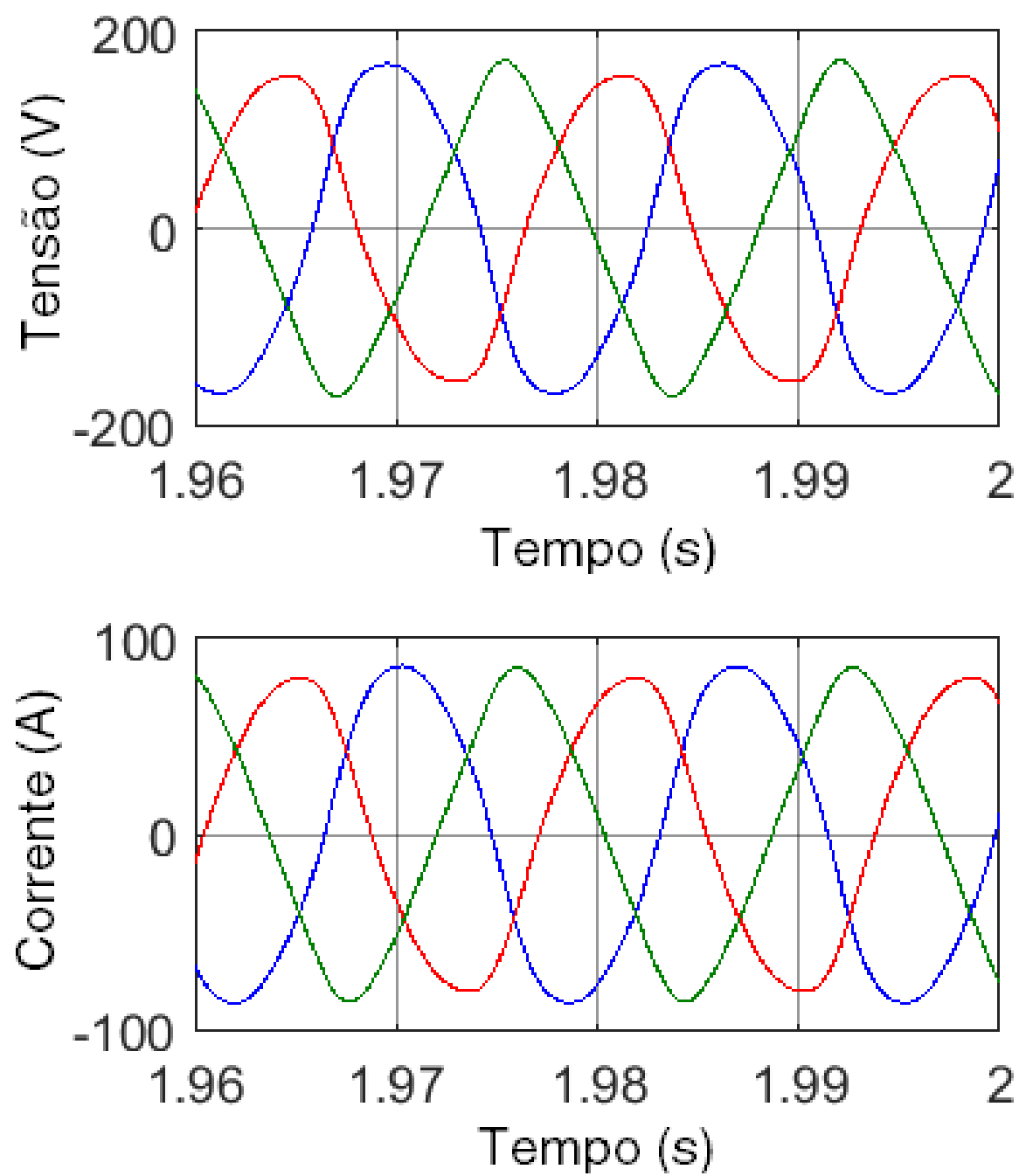
#### 4.4 Distorção Harmônica Total

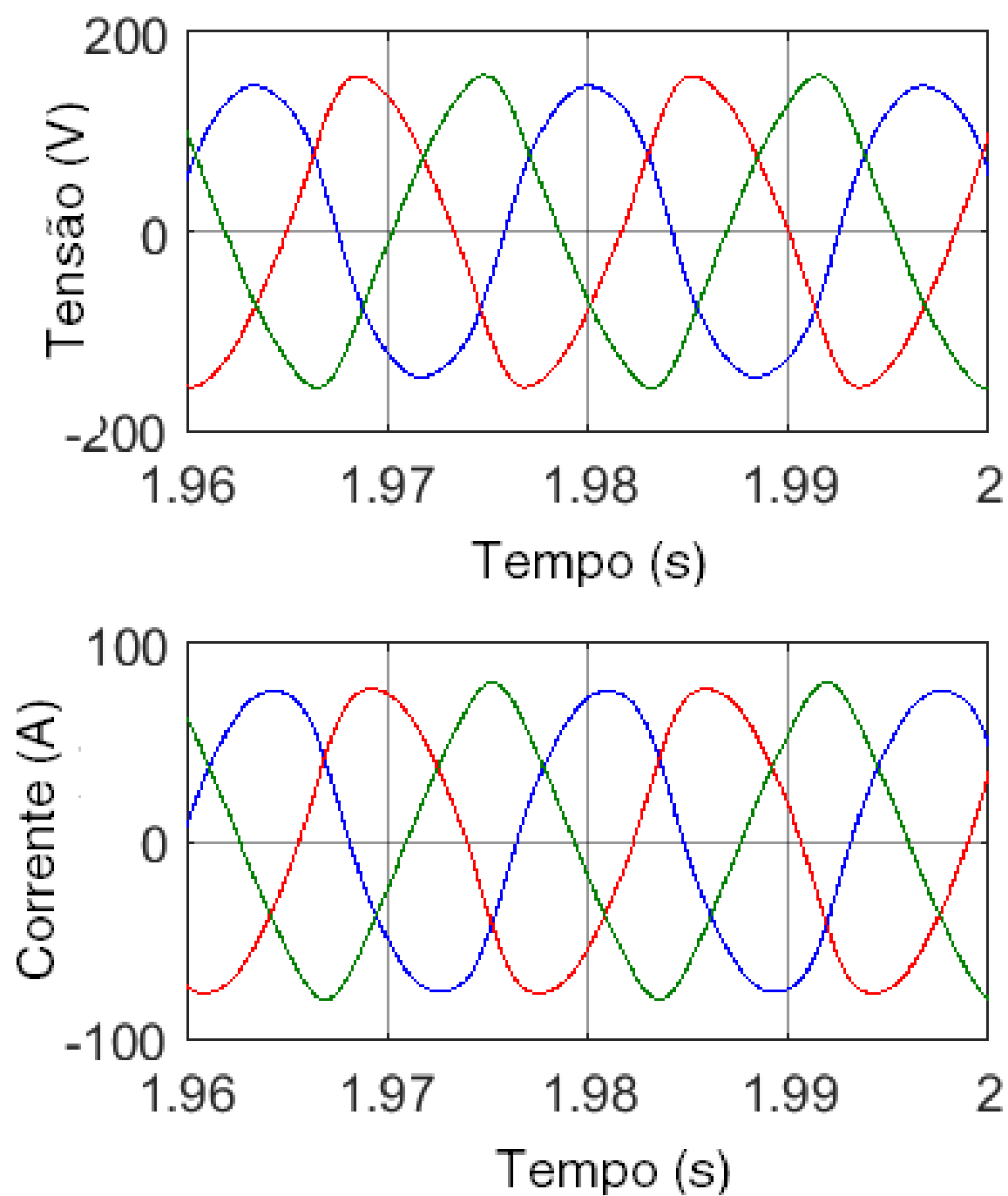
Para 8% de distorção harmônica total, sendo 7,527% de terceira ordem e 2,710% de quinta ordem, todos os métodos funcionaram bem, a figura 14 ilustra o formato da tensão de entrada, as figuras 15, 16 e 17 mostram como são as saídas de cada sistema. Observa-se que as porcentagens não são uma soma direta, mas sim a raiz da soma dos quadrados. De modo que

$$\sqrt{(7,527\%)^2 + (2,710\%)^2} \approx 8\% \quad (4.5)$$

. O método 3 inverte a sequência de fases, o que pode ser percebido pela ordem das cores das ondas. O valor máximo permitido no PRODIST da ANEEL é de 10% para redes de baixa tensão (ANEEL, ), então 8% já é um número próximo do limite. O método 1 apresentou tensões um pouco mais distorcidas, mas ainda satisfatórias.

Figura 15 – Método 1 com 8%  $DHT_V$

Figura 16 – Método 2 com 8%  $DHT_V$

Figura 17 – Método 3 com 8%  $DHT_V$

## 4.5 Curto-Circuito Fase-Fase

Foram testados curtos-circuitos de 15 ciclos entre as duas fases da rede. Todos os métodos reagiram bem aos curtos, com o método 1 apresentando uma demora entre 1 ou 2 ciclos a mais para voltar a tensão normal.

Observa-se também que durante um curto-circuito o método 1 possui duas fases iguais em módulo e ângulo além de perder a terceira fase. O método 2 possui uma redução da tensão em todas as fases, com uma das fases bem próxima de zero. O método 3 tem uma das fases reduzida e a outra perdida.

Por não existir sobretensão nem sobrecorrente é difícil que ocorra também um sobreaquecimento. Portanto os resultados são todos satisfatórios.

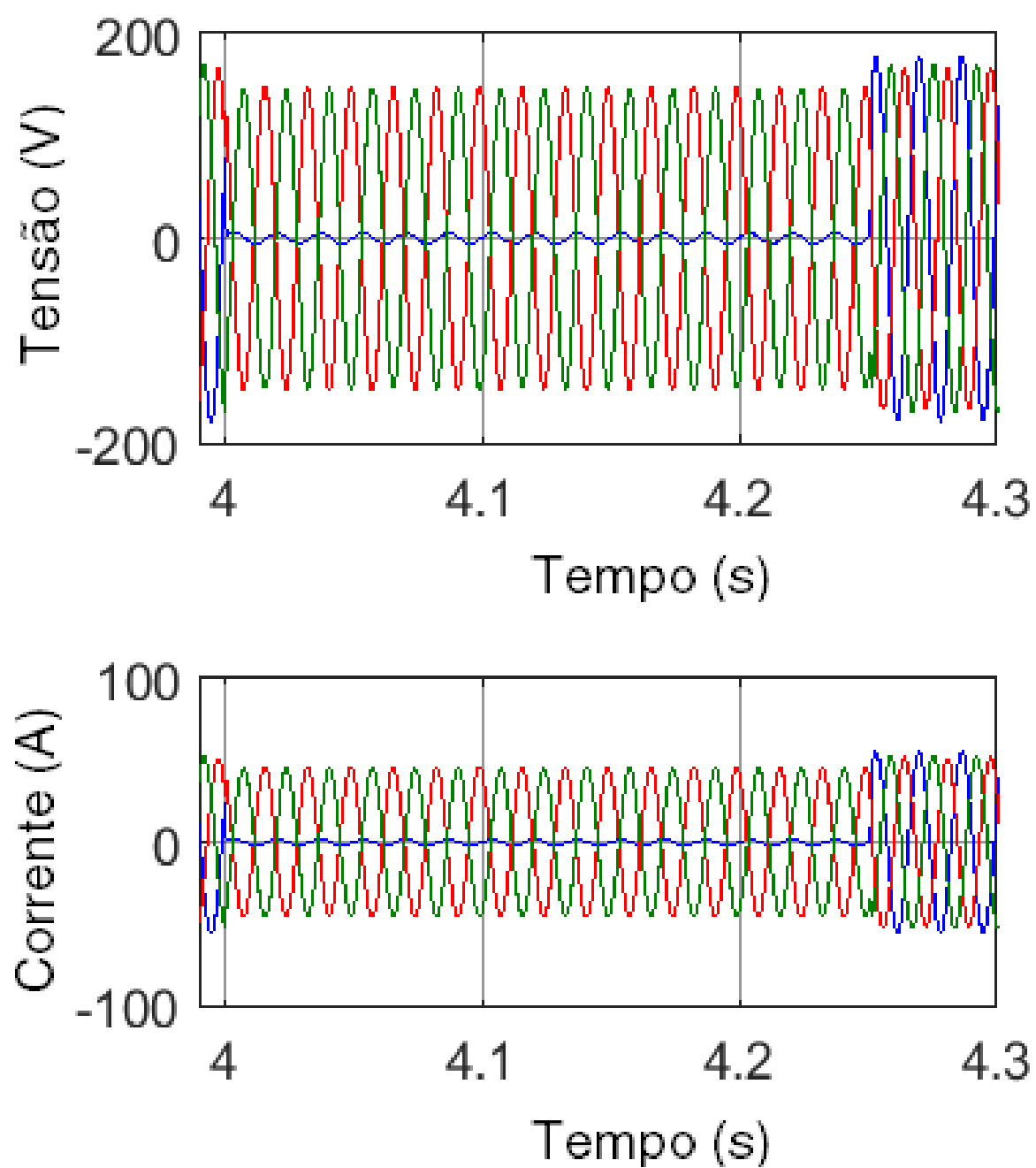


Figura 18 – Método 2 durante o curto-circuito

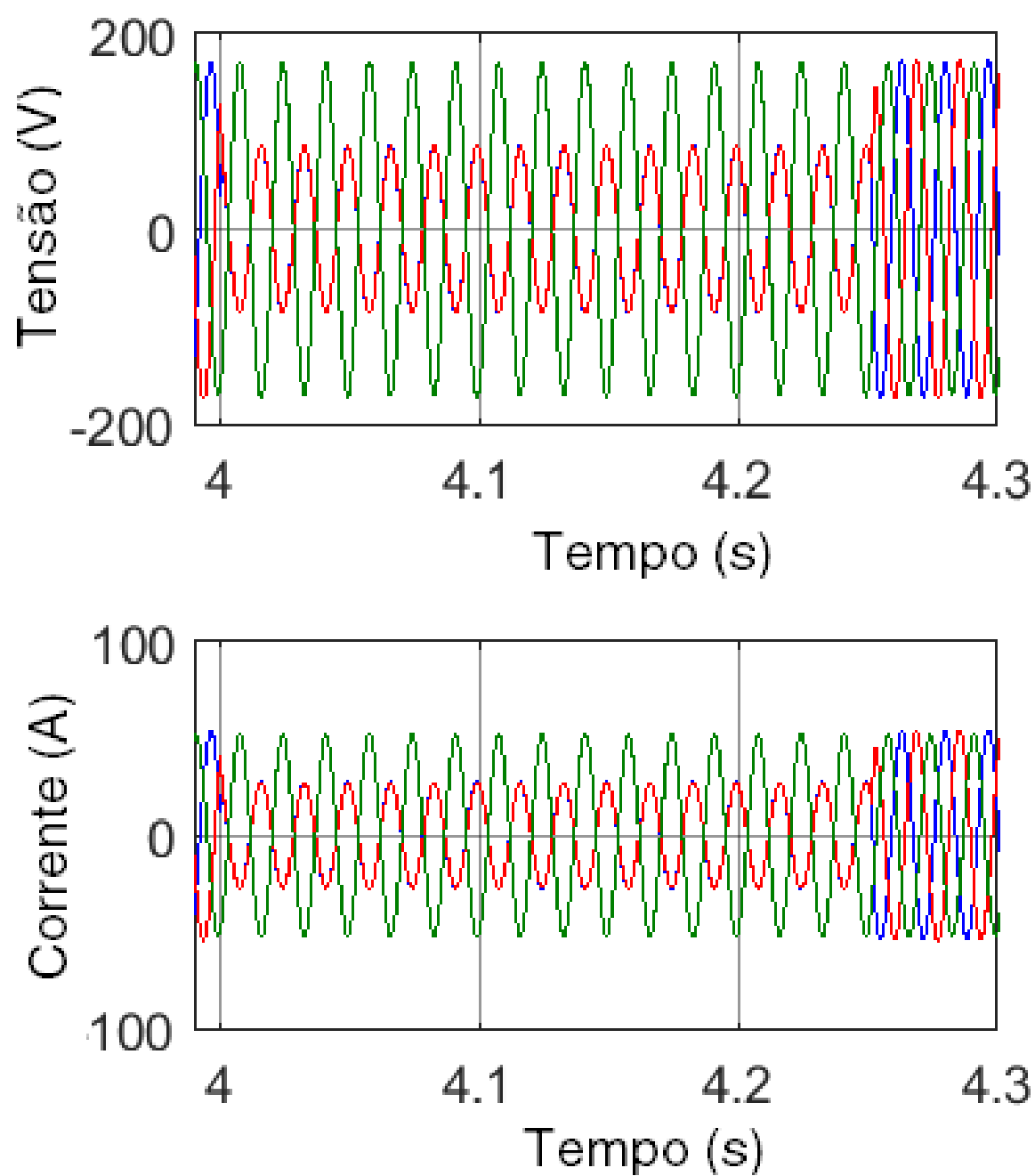


Figura 19 – Método 3 durante o curto-circuito

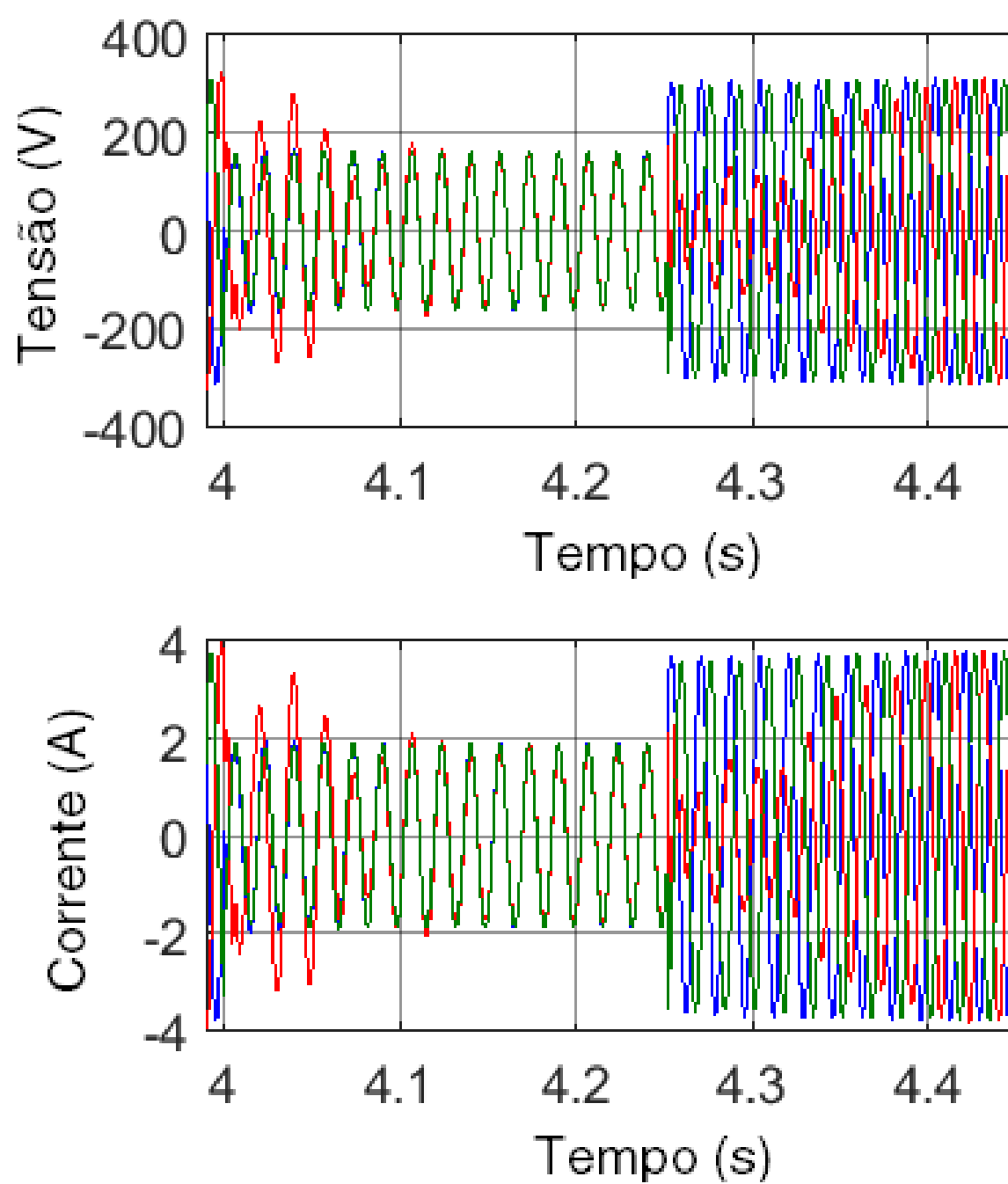


Figura 20 – Método 1 durante o curto-circuito

## 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Analisando o comportamento de cada um dos sistemas para diferentes casos, podemos observar que o método 1 apresenta mais problemas em relação aos demais, devido a elevada tensão transitória, a incapacidade de partir com carga, a sensibilidade com desequilíbrios de tensão e ao retardamento do regime permanente em caso de curto. É possível que esses problemas possam ser resolvidos com técnicas de acionamentos de máquinas elétricas. Em suma:

|                | Método 1           | Método 2     | Método 3     |
|----------------|--------------------|--------------|--------------|
| Sem carga      | Não supre a fase C | Satisfatório | Satisfatório |
| Tensão ideal   | Satisfatório       | Satisfatório | Satisfatório |
| Desequilíbrio  | Insatisfatório     | Satisfatório | Satisfatório |
| Harmônicos     | Satisfatório       | Satisfatório | Satisfatório |
| Curto-circuito | Satisfatório       | Satisfatório | Satisfatório |

Tabela 3 – Resumo geral das simulações

Tanto o método 2 e 3 apresentaram resultados satisfatórios em todos os casos. Para uma carga nominal e uma tensão de entrada puramente senoidal e equilibrada, o método 3 apresenta um pouco a mais de distorção. Para o caso de desequilíbrio na fonte, o método 2 apresentou uma componente simétrica de sequência negativa muito maior que o método 3. Além da qualidade de energia, existem dificuldades na hora de implementar. O método 1 requer a compra de um motor que irá ficar operando a vazio durante o tempo todo. O método 2 demanda um transformador com taps que não são comuns comercialmente, então precisariam ser construídos de forma personalizada. Só o método 3 pode ser implementado com transformadores comuns.

Estudos futuros podem incluir análises experimentais dos métodos e simulação de outros sistemas não abordados nesse trabalho, como conversor Voltano (HISANO, 1966).

# Referências

- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.]. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 31.
- BELLAR, M. et al. Four wire single-phase to three-phase system for rural distribution network. 2004. Citado na página 13.
- BUSARELLO, T. D. C. et al. Three-phase feeding system for rural electrification. *Brazilian Power Electronics Conference*, 2009. Citado na página 13.
- FANDI, J. C. O. et al. Two-wire distribution system for supplying three-phase rural. *IEEE Transactions Latin America*, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 9, 13, 18 e 19.
- HAUGEN, F. *Discrete-time signals and systems*. Citado na página 20.
- HISANO, K. A new type single-phase to three-phase converter. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1966. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 39.
- KAKALEC, R. J. A comparison of three phase scott-t and ferroresonant transformers. *Proceedings:Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 9, 13 e 18.
- MAGGS, A. H. Single-phase to three-phase conversion by the ferraris-arno system. 1946. Citado na página 13.
- TEWARI, A. *Modern Control Design With MATLAB and SIMULINK*. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, 2002. Citado na página 20.