

Francisco Paulo Mendes Custódio

Análise da influência das sobrecorrentes transitórias  
de excitação na proteção diferencial de  
transformadores

Mestrado em: Engenharia Elétrica e Eletrónica

Área de Especialização em Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de: Luís M. R. Oliveira



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

2018





## **Declaração de Autoria de Trabalho**

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

---

Francisco Paulo Mendes Custódio

Copyright © 2018 por Francisco Paulo Mendes Custódio

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## Resumo

Os transformadores são elementos da rede que permitem alterar o nível de tensão, permitindo o transporte de energia elétrica a longas distâncias, a menores custos, o que os torna essenciais em sistemas de produção, transporte e distribuição de energia. Devido à sua importância nos sistemas de energia elétrica é essencial garantir o correto funcionamento dos seus dispositivos de proteção, por forma a isolar os defeitos ainda numa fase inicial, e assim evitar avarias catastróficas, minimizando os danos e reduzindo o período e custos de indisponibilidade. O aperfeiçoamento dos sistemas de proteção dos transformadores revela-se assim de extrema relevância, por forma a aumentar a fiabilidade global dos sistemas de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica.

O relé diferencial pode assumir a sobrecorrente transitória de excitação como uma corrente de defeito, removendo indevidamente o transformador de serviço. Para melhorar e desenvolver novos algoritmos de proteção é necessário caracterizar com rigor as condições onde as sobrecorrentes transitórias de excitação possuam valores reduzidos de segundo harmónico ou este seja gerado por um defeito interno. O objetivo principal deste trabalho consiste nessa caracterização. Para o efeito será utilizada a ferramenta de simulação *Simulink/Matlab* e correspondente validação experimental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bloqueio harmónico, defeitos internos e externos, sobrecorrentes transitórias de excitação e transformadores.

## Abstract

The transformers are the elements in the power grid that allow to adjust the voltage level, enabling power transmission at long distance less expensive, which makes them essential in power production, transmission and distribution systems. Due to their importance in power systems it is fundamental to ensure the correct operation of their protection devices, to isolate at an early stage any type of fault, thus avoiding catastrophic failures, minimizing damage, and reducing unavailability and costs. Transformers protection systems improvements are of extreme importance to increase power systems reliability.

Differential relays may assume an inrush current as a fault current, removing incorrectly the transformer out of service. To improve and develop new protection algorithms it is necessary to characterize accurately the conditions were the inrush current has low second harmonic level, or they are created by internal faults. The main objective of this work is characterizing those conditions. For this purpose, experimental and simulated results were obtained, using a laboratory test setup and MATLAB/Simulink computational models, respectively.

**PALAVRAS-CHAVE:** Harmonic block, internal and external failures, inrush currents and transformers.

## Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Símbolos.....	vi
Lista de Abreviaturas.....	viii
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Organização do Documento.....	3
<b>2. Proteção Diferencial .....</b>	<b>4</b>
2.1. Bloqueio harmónico.....	7
2.2. Sobrecorrentes transitórias de excitação.....	7
2.3. Utilização do segundo harmónico no bloqueio harmónico.....	7
<b>3. Modelo Computacional do Transformador de Potência e Validação Experimental .....</b>	<b>8</b>
3.1. Determinação de Parâmetros do Transformador .....	8
3.2. Transitório de Ligação de Transformadores.....	13
3.3. Transitório de Ligação de Transformadores em Série .....	17
3.4. Transitório de comutação de transformadores ligados ao mesmo barramento .....	20
<b>4. Análise de Transitórios de Ligação com Transformadores de Alta Tensão .....</b>	<b>23</b>
4.1. Ligação do Transformador à Rede .....	24
4.2. Ligação de Transformador situado na Vizinhança da Rede .....	27
4.3. Cálculo de Correntes Diferenciais e Correntes de Estabilização para diferentes ligações dos enrolamentos do transformador .....	30
4.4. Análise da corrente de ligação para vários casos de indução remanescente .....	35
4.5. Influência da carga e do instante de ligação nas correntes de interdependência .....	38
4.6. Comutação síncrona .....	61
4.7. Comutação assíncrona .....	66
4.8. Tipos de ligação de enrolamentos .....	71
4.9. Cavas.....	76
4.10. Sobretensões .....	86
4.11. Ultrassaturação.....	92
4.12. Bloqueio da proteção.....	102
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>110</b>
Referências.....	111
Anexos.....	112

## Lista de Símbolos

- $B$  - Indução (T);
- $B_{m\acute{a}x}$  - Indução remanescente máxima (T);
- $B_{mn}$  - Indução máxima negativa (T);
- $B_{mp}$  - Indução máxima positiva (T);
- $B_r$  - Indução remanescente (T);
- $B_{ra} \dots B_{rc}$  - Indução remanescente por fase (T);
- $F_n$  - Frequência Nominal (Hz);
- $H$  - Intensidade do campo magnético (A/m);
- $I$  - Corrente elétrica (A);
- $i$  - Corrente de alimentação do transformador;
- $i_1 \dots i_3$  - Corrente de linha no lado primário do transformador (A);
- $i_1 \dots i_6$  - Correntes nos enrolamentos do transformador (A);
- $i_{1T1} \dots i_{3T1}$  - Corrente de linha no lado primário de T1 por fase (A);
- $i_{1T2} \dots i_{3T2}$  - Corrente de linha no lado primário de T2 por fase (A);
- $i_{1T}$  - Corrente no enrolamento secundário do TI montado no lado primário do transformador de potência (A);
- $I_2/I_1$  - Razão entre o segundo harmónico e o primeiro harmónico da corrente diferencial (%);
- $I_2/I_{1a} \dots I_2/I_{1c}$  - Razão entre o segundo harmónico e o primeiro harmónico da corrente diferencial por fase (%);
- $i_{2T}$  - Corrente no enrolamento secundário do TI montado no lado secundário do transformador de potência (A);
- $i_a$  - Corrente de alimentação de T1 (A);
- $I_{ah1min\acute{e}f} \dots I_{ch1min\acute{e}f}$  - Valor mínimo eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial por fase (A);
- $I_{aT1} \dots I_{cT1}$  - Correntes de linha no lado primário do transformador T1 por fase (A);
- $I_{aT2} \dots I_{cT2}$  - Correntes de linha no lado primário do transformador T2 por fase (A);
- $i_b$  - Corrente de alimentação de T2 (A);
- $i_d$  - Corrente diferencial instantânea (A);

- $I_d$  - Corrente diferencial eficaz (A);
- $I_{dh1}$  - Primeiro harmónico da corrente diferencial (A);
- $i_{dif1} \dots i_{dif3}$  - Correntes diferenciais na linha por fase (A);
- $i_{difFase1} \dots i_{difFase3}$  - Correntes diferenciais por fase (A);
- $i_{est}$  - Corrente de estabilização (A);
- $I_{est1} \dots I_{est3}$  - Correntes de estabilização na linha (A);
- $i_{exc1} \dots i_{exc3}$  - Correntes de excitação por fase (A);
- $i_{IN}$  - Corrente de entrada (A);
- $i_{L1} \dots i_{L6}$  - Correntes de linha do transformador (A);
- $i_{MIN}$  - Corrente mínima de operação do relé diferencial (%In) (A);
- $i_p$  - Corrente no enrolamento primário do transformador (A);
- $i_s$  - Corrente no enrolamento secundário do transformador (A);
- $k$  - Declive da característica de protecção diferencial;
- $L$  - Indutância (H);
- $L1$  - Indutância do enrolamento primário (H);
- $L2$  - Indutância do enrolamento secundário (H);
- $l_c$  - Comprimento do circuito magnético (m);
- $N_1$  - Número de espiras do enrolamento primário do transformador;
- $N_2$  - Número de espiras do enrolamento secundário do transformador;
- $N_{2TI(1)}$  - Número de espiras no enrolamento secundário do TI montado no lado primário do transformador de potência;
- $N_{2TI(2)}$  - Número de espiras no enrolamento secundário do TI montado no lado secundário do transformador de potência;
- $N_w$  - Número de espiras no enrolamento no lado primário do transformador;
- $r$  - Resistência ( $\Omega$ );
- $R1$  - Resistência do enrolamento primário ( $\Omega$ );
- $R2$  - Resistência do enrolamento secundário ( $\Omega$ );
- $R_m$  - Resistência de perdas no ferro ( $\Omega$ );
- $S$  - Potência aparente nominal do transformador de potência (VA);
- $S_{fe}$  - Secção do entreferro do núcleo ( $m^2$ );
- $v_1 \dots v_3$  - Tensão simples no lado primário do transformador por fase (V);
- $V1$  - Tensão simples no lado primário do transformador (V);

- $V_2$  - Tensão simples no lado secundário do transformador (V);
- $v_4 \dots v_6$  - Tensão simples no lado secundário do transformador por fase (V);
- $V_{LL1}$  - Tensão composta no primário do transformador de potência (V);
- $V_{LL2}$  - Tensão composta no secundário do transformador de potência (V);
- $\alpha$  - Ângulo de comutação (graus);
- $\alpha_a \dots \alpha_c$  - Ângulo de comutação por fase (graus);
- $\beta_a \dots \beta_c$  - Ângulo de início de cava por fase (graus);
- $\gamma_a$  - Ângulo de início de falha entre a fase A e a Terra (graus);
- $\Delta t_a \dots \Delta t_c$  - Intervalo de tempo em que se verificam as condições de disparo por fase (s);
- $\phi$  - Fluxo magnético (Wb);

## Lista de Abreviaturas

- AC - Componente alternada;
- DC - Componente contínua;
- TI - Transformadores de intensidade de Corrente;

# 1. Introdução

Os transformadores são elementos da rede elétrica que permitem a transferência de potência em diferentes níveis de tensão, possibilitando a transmissão de energia a longas distâncias de forma mais econômica e eficiente. Devido à sua importância na rede de energia elétrica é importante protegê-los de forma a minimizar danos e o tempo de reparação. Os transformadores de potência podem ser protegidos por fusíveis, relés de sobreintensidade e relés diferenciais. O tipo de proteção é normalmente escolhido em função da potência do transformador, apesar do nível de tensão e da localização serem também considerados nesta seleção [1]-[3]. Em função da potência considera-se tradicionalmente:

- Até 2500 kVA: fusíveis;
- 2.5 MVA a 10 MVA: fusíveis, relés de sobreintensidade instantâneos, relés diferenciais simples;
- Acima de 10 MVA: relés diferenciais percentuais, com função de inibição harmônica.

Neste trabalho vão ser analisados os relés diferenciais percentuais. Estes apresentam dificuldades na discriminação entre defeitos internos e sobrecorrentes transitórias de excitação.

As sobrecorrentes transitórias de excitação resultam normalmente de uma variação brusca da tensão de alimentação do transformador. As causas mais frequentes para a sua ocorrência são a ligação do transformador à rede, a recuperação súbita de uma cava de tensão, provocada por um defeito externo, e a ligação de outro transformador situado na sua proximidade. Estas sobrecorrentes caracterizam-se por formas de ondas distorcidas, com largo espectro de harmónicos, incluindo componente contínua e harmónicos de ordem par, sendo constituídas por impulsos unipolares ou bipolares assimétricos. O relé diferencial pode assumir a sobrecorrente transitória de excitação como uma corrente de defeito, removendo indevidamente o transformador de serviço. Assim, é indispensável que qualquer dispositivo de proteção diferencial de transformadores tenha em consideração este fenómeno. As sobrecorrentes transitórias de ligação possuem normalmente uma elevada amplitude do segundo harmónico. Pelo contrário, as

verdadeiras correntes diferenciais, motivadas pela ocorrência de avarias internas, caracterizam-se por componentes harmônicos com amplitude reduzida, possuindo tipicamente uma forma de onda que conjuga uma senoide com uma componente contínua amortecida. Assim, em princípio, a presença do segundo harmônico na corrente diferencial permite identificar a ocorrência de uma sobrecorrente de ligação. Quando tal sucede o disparo do relé é bloqueado pelo algoritmo de proteção (bloqueio harmônico).

A esmagadora maioria dos dispositivos para proteção de transformadores atualmente disponíveis no mercado utilizam as técnicas de bloqueio harmônico para detetar a ocorrência de sobrecorrentes transitórias de excitação e impedir a operação incorreta da proteção. No entanto, têm-se verificado frequentemente falhas na atuação destes relés, provocadas maioritariamente pelos seguintes fatores:

- Valor reduzido do segundo harmônico nas sobrecorrentes transitórias de excitação, devido à utilização de novos materiais ferromagnéticos e a condições de funcionamento específicas (ligação dos enrolamentos, alimentação desequilibrada, ligação de outro transformador em série ou em paralelo, etc.);
- Presença do segundo harmônico na corrente diferencial devido a uma avaria interna: existem certas condições onde uma avaria interna pode gerar correntes diferenciais com percentagem significativa do segundo harmônico. A saturação assimétrica dos transformadores de corrente ou a presença da capacidade distribuída ao longo de uma linha de transporte na vizinhança do transformador são exemplos de situações onde o segundo harmônico pode ser gerado em simultâneo com uma avaria no interior da zona de proteção.

O objetivo principal deste trabalho consiste na caracterização detalhada das condições onde as sobrecorrentes transitórias de excitação possuam valores reduzidos de segundo harmônico. Essa caracterização revela-se útil, pois permite melhorar e desenvolver novos algoritmos de proteção. Para o efeito serão utilizados resultados experimentais e de simulação, sendo utilizada a ferramenta *Simulink/Matlab*.

## 1.1. Organização do Documento

O presente documento está organizado como se descreve de seguida.

No capítulo 2 é efetuada uma comparação entre o relé diferencial de proteção irrestrita e o relé diferencial de proteção percentual, apresentando-se as vantagens e limitações de cada tipo. São apresentadas as principais causas de disparo intempestivo dos relés diferenciais e sugeridas soluções para ultrapassar estes problemas.

O capítulo 3 tem por objetivo obter a validação experimental do modelo *Simulink*, demonstrando a possibilidade de utilizar esta ferramenta para simular as sobrecorrentes de excitação nos transformadores.

No capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações realizadas para diversas condições de funcionamento, que permitem testar as várias situações que resultam no disparo intempestivo das proteções. Apresentam-se ainda as principais características do relé numérico e o método de cálculo das correntes diferenciais e de estabilização.

Por último, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho.

## 2. Proteção Diferencial

A corrente diferencial é obtida efetuando a diferença entre as correntes no lado primário e no lado secundário do transformador, medidas através de transformadores de intensidade de corrente (TI), referidas a uma base comum. Em regime de funcionamento normal, a corrente diferencial é aproximadamente nula. Quando ocorre um defeito interno a corrente diferencial toma valores significativos, permitindo identificar a anomalia. Alguns fenómenos, como aqueles que ocorrem durante a ligação do transformador, podem provocar também correntes diferenciais elevadas, sendo necessário distinguir o defeito dessas condições. Para evitar a atuação intempestiva da proteção é utilizado o bloqueio harmónico, que analisa a razão entre o segundo e primeiro harmónicos ( $I_2 / I_1$ )<sup>1</sup> da corrente diferencial. Se a razão for superior a 20% é ativado o bloqueio harmónico, que impede a atuação da proteção. A corrente diferencial constitui assim um método simples e eficaz de proteção [1].

Desprezando as correntes de excitação, durante o funcionamento normal do transformador tem-se:

$$N_1 \cdot i_p + N_2 \cdot i_s \approx 0 \quad (2.1)$$

onde  $N_1$  e  $N_2$  representam o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência, respetivamente, e  $i_p$  e  $i_s$  representam as correntes nos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência, respetivamente (notação segundo a Figura 2-1).

Os TI medem as correntes de entrada e saída do transformador, resultando [3]:

$$-N_1 \cdot N_{2TI(1)} \cdot i_{1TI} + N_2 \cdot N_{2TI(2)} \cdot i_{2TI} \approx 0 \quad (2.2)$$

---

<sup>1</sup> Por simplicidade de notação esta relação é futuramente indicada como  $I_2/I_1$ .

Onde  $N_{2TI(1)}$  e  $N_{2TI(2)}$  representam o número de espiras no secundário dos TI localizados no primário e secundário do transformador de potência, respectivamente, e  $i_{1TI}$  e  $i_{2TI}$  representam as correntes no secundário dos TI localizados no lado primário e secundário do transformador de potência, respectivamente (notação segundo a Figura 2-1).

Para converter as correntes no relé para uma base comum podem utilizar-se relações de transformação adequadas nos TI, ou seja [3]:

$$N_1 \cdot N_{2TI(1)} = N_2 \cdot N_{2TI(2)} \quad (2.3)$$

resultando:

$$i_{1TI} - i_{2TI} \approx 0 \quad (2.4)$$

A corrente diferencial vem [3]:

$$i_d = i_{1TI} - i_{2TI} \quad (2.5)$$

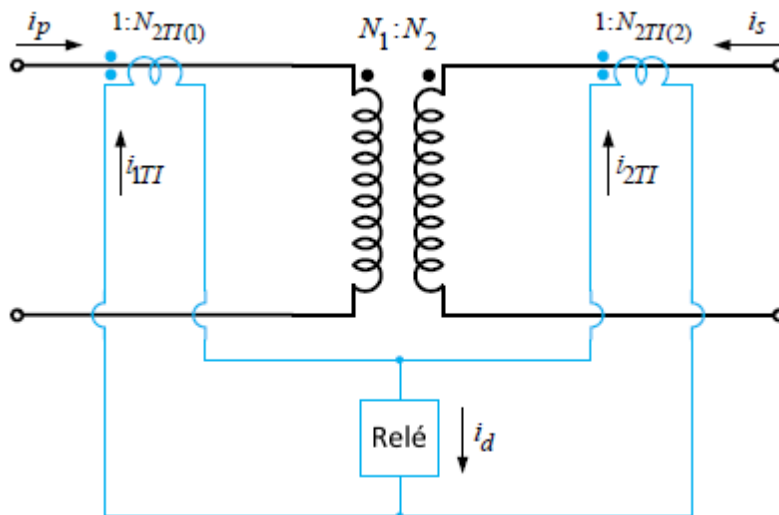


Figura 2-1 Esquema do relé diferencial (monofásico), [2].

Na proteção diferencial irrestrita o relé atua quando o valor eficaz da corrente diferencial,  $I_d$ , ultrapassa um valor fixo predefinido:

$$I_d > k \cdot I_{IMIN} \quad (2.6)$$

Para compensar os erros introduzidos na medição e no cálculo da corrente diferencial, particularmente quando as correntes medidas são elevadas, por exemplo no caso de defeitos externos, utiliza-se a proteção diferencial proporcional. Este método garante maior estabilidade dado que não impõe um limite fixo de ativação. O relé é ativado quando a corrente diferencial for superior a uma percentagem pré-definida da corrente de estabilização, conforme indicado na equação (2.7).

$$I_d \geq k \cdot I_{est} \quad (2.7)$$

Onde  $I_{est}$  é o valor eficaz da corrente de estabilização, calculada por:

$$i_{est} = \frac{i_{1TI} + i_{2TI}}{2} \quad (2.8)$$

Neste trabalho foi utilizado um relé virtual com uma característica de proteção diferencial proporcional (Figura 2-2).

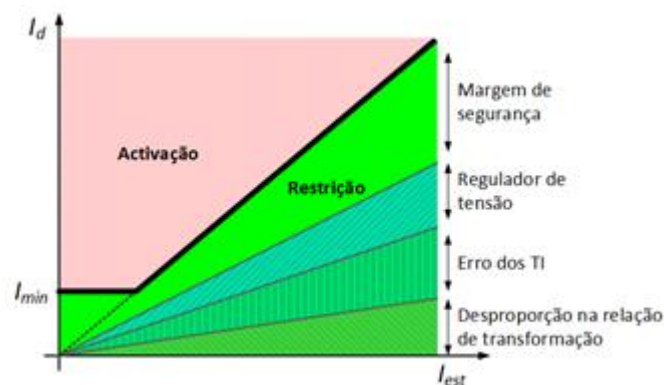


Figura 2-2 : Característica da proteção diferencial proporcional, adaptado de [1].

## 2.1. Bloqueio harmónico

O bloqueio harmónico consiste num algoritmo de proteção que impede o relé de atuar na presença de uma sobrecorrente transitória. Este algoritmo analisa a percentagem do segundo harmónico em relação à componente fundamental da corrente diferencial e quando esta razão é superior a um determinado valor (tipicamente 20%) o relé é bloqueado.

## 2.2. Sobrecorrentes transitórias de excitação

As sobrecorrentes transitórias de excitação são originadas por variações bruscas de tensão aos terminais do transformador. Estas variações bruscas podem ser originadas pela ligação do transformador à rede, ligação de outros transformadores situados numa zona próxima, recuperação de cavas, religação do transformador, sobretensões, ou durante um processo de recuperação de um defeito fora da zona de proteção do relé.

Estas sobrecorrentes caracterizam-se por formas de ondas distorcidas, incluindo componente contínua e harmónicos de ordem par, sendo constituídas por impulsos unipolares ou bipolares assimétricos [3].

O aparecimento destas sobrecorrentes depende de:

- Indução remanescente;
- Valor da tensão no momento de ligação (ângulo de comutação).

## 2.3. Utilização do segundo harmónico no bloqueio harmónico

As sobrecorrentes transitórias de excitação possuem normalmente uma elevada amplitude do segundo harmónico, dependendo das perturbações na tensão, ou das condições de ligação do transformador. Já as correntes diferenciais originadas pela ocorrência de avarias internas possuem tipicamente uma forma de onda que aparenta uma senoide com uma componente contínua amortecida, pelo que as componentes harmónicas têm amplitudes reduzidas. Assim, que a presença de sobrecorrentes

transitórias de excitação pode ser detetada através do aparecimento de amplitudes elevadas do segundo harmónico.

### 3. Modelo Computacional do Transformador de Potência e Validação Experimental

Para caracterizar com rigor as condições onde as sobrecorrentes transitórias de excitação possuam valores reduzidos de segundo harmónico, ou este seja gerado por um defeito interno, é necessário um conhecimento detalhado sobre o funcionamento do transformador. Para analisar estes fenómenos é necessário desenvolver modelos computacionais dos transformadores, em condições de funcionamento normal e de avaria, que permitam analisar o comportamento transitório da máquina aquando da sua entrada em serviço, durante a ocorrência de avarias externas ou sob a influência de perturbações na tensão de alimentação. Os modelos disponibilizados pela ferramenta *Powerlib* do *Simulink/Matlab* foram utilizados para simular o funcionamento dos transformadores de potência.

A validação experimental dos modelos foi realizada utilizando um sistema laboratorial, constituído por dois transformadores trifásicos, um dos quais especialmente concebido para permitir investigar a ocorrência de avarias, sistema de instrumentação e de aquisição digital de dados.

De seguida apresenta-se a metodologia utilizada para determinar os parâmetros do modelo computacional.

#### 3.1. Determinação de Parâmetros do Transformador

As características foram obtidas através da realização de ensaios em vazio e de curto-circuito em transformadores trifásicos de três colunas. Os ensaios foram realizados utilizando a coluna central dos transformadores. Para determinar com maior exatidão o valor das resistências dos enrolamentos, foi realizado um ensaio em corrente contínua. Na Tabela 3-1 encontram-se apresentadas as características dos transformadores utilizados.

Tabela 3-1: Características dos transformadores utilizados em laboratório.

S (kVA)	V1 (V)	V2 (V)	R1 (mΩ)	L1 (μH)	R2 (mΩ)	L2 (μH)	Rm (Ω)
10,3	230	132	200	344	72	124	1167,4
4	230	76	445	992	75	108	3617,5

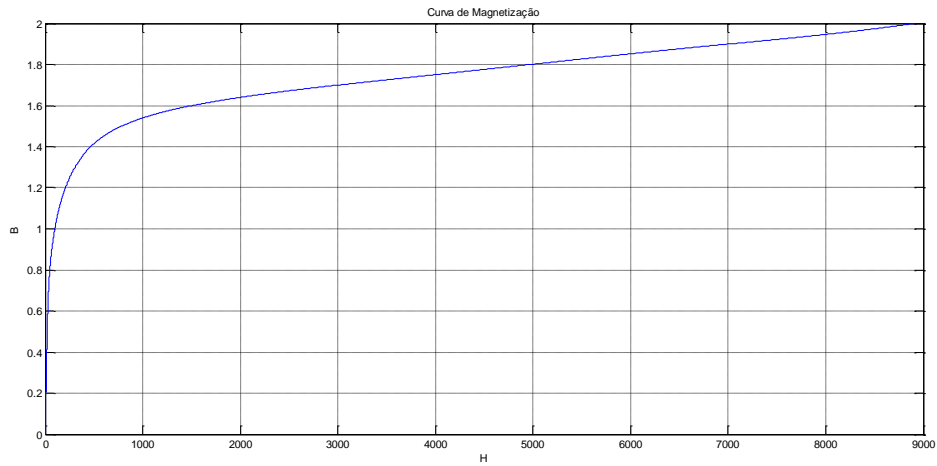


Figura 3-1 Curva de magnetização B-H, [3].

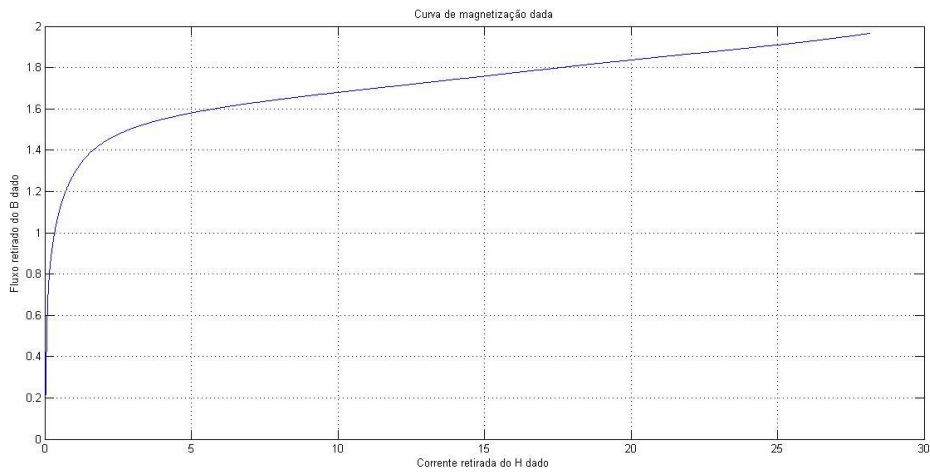


Figura 3-2 Curva  $\phi$ -I.

Para incluir no modelo o fenômeno de saturação do núcleo utilizou-se a curva de magnetização apresentada em [3], Figura 3-1.

Esta curva B-H foi convertida para a curva  $\phi$ -I, requerida no modelo do *Simulink/Matlab*, apresentada na Figura 3-2.

Para efetuar a conversão utilizaram-se as seguintes relações:

$$\phi = B \times S_{fe} \times N_w \quad (3.1)$$

$$I = \frac{H \times l_c}{N_w} \quad (3.2)$$

Com a secção do entreferro,  $S_{fe}$  de  $6,468 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , comprimento do circuito magnético,  $l_c$  de 0,48 m e o número de espiras do enrolamento do lado de tensão alta,  $N_w$  de 152 espiras.

Desta curva (Figura 3-2) foram retirados sete pontos para definir a curva de saturação no modelo computacional. Quantos mais pontos forem utilizados para definir a curva, maior será a semelhança desta com a curva de magnetização real, mas maior será o tempo de simulação, pelo que se tem de arranjar um compromisso entre estes dois fatores. A afinação destes pontos foi realizada da seguinte forma: realizou-se um ensaio em vazio no laboratório, no qual o transformador foi alimentado no enrolamento da coluna central com a tensão nominal, de onde se obteve a corrente de magnetização, esta curva serve para afinar a zona de funcionamento normal (zona linear). Realizando uma simulação do ensaio em vazio, verificou-se que a corrente de magnetização da simulação não era semelhante à obtida em laboratório. Para afinar a parte do joelho e de saturação da curva de magnetização, obteve-se em laboratório a curva da corrente de magnetização para quando o transformador é ligado em  $\alpha = 180$  graus (define-se como  $\alpha = 0^\circ$ , o instante em que a tensão passa por 0), porque neste instante ocorre o transitório de maior amplitude, é simulada a ligação do transformador nas mesmas condições. A curva da corrente de magnetização obtida através da simulação é aproximada da obtida em laboratório através da alteração dos pontos da curva de magnetização, esta aproximação foi conseguida através do método de tentativa e erro.

Os dois transformadores laboratoriais utilizados neste trabalho foram fabricados com núcleo ferromagnético com as mesmas características. Assim, foi utilizada a mesma curva B-H para caracterizar o seu material ferromagnético. Foi efetuado um processo de

afinação da curva para cada um dos transformadores, devido à diferença nas dimensões e ligeiras alterações introduzidas no processo de fabrico.

Para simular os transformadores de 10,3 kVA e 4 kVA foi utilizado o bloco *Three-Phase Transformer (Two Windings)* da ferramenta *Simulink/Matlab* para simulações trifásicas, Figura 3-3 a) e b) respetivamente.

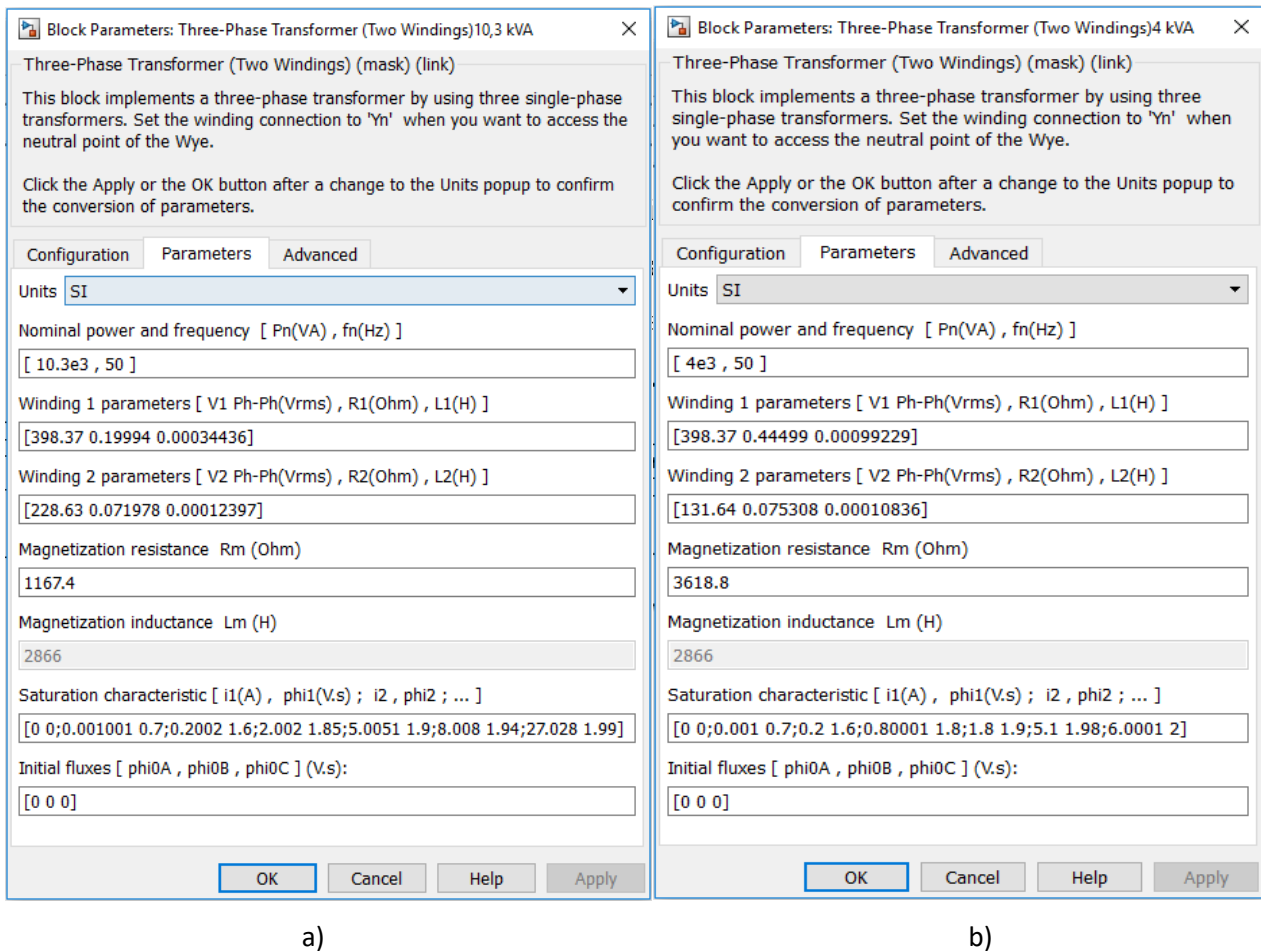
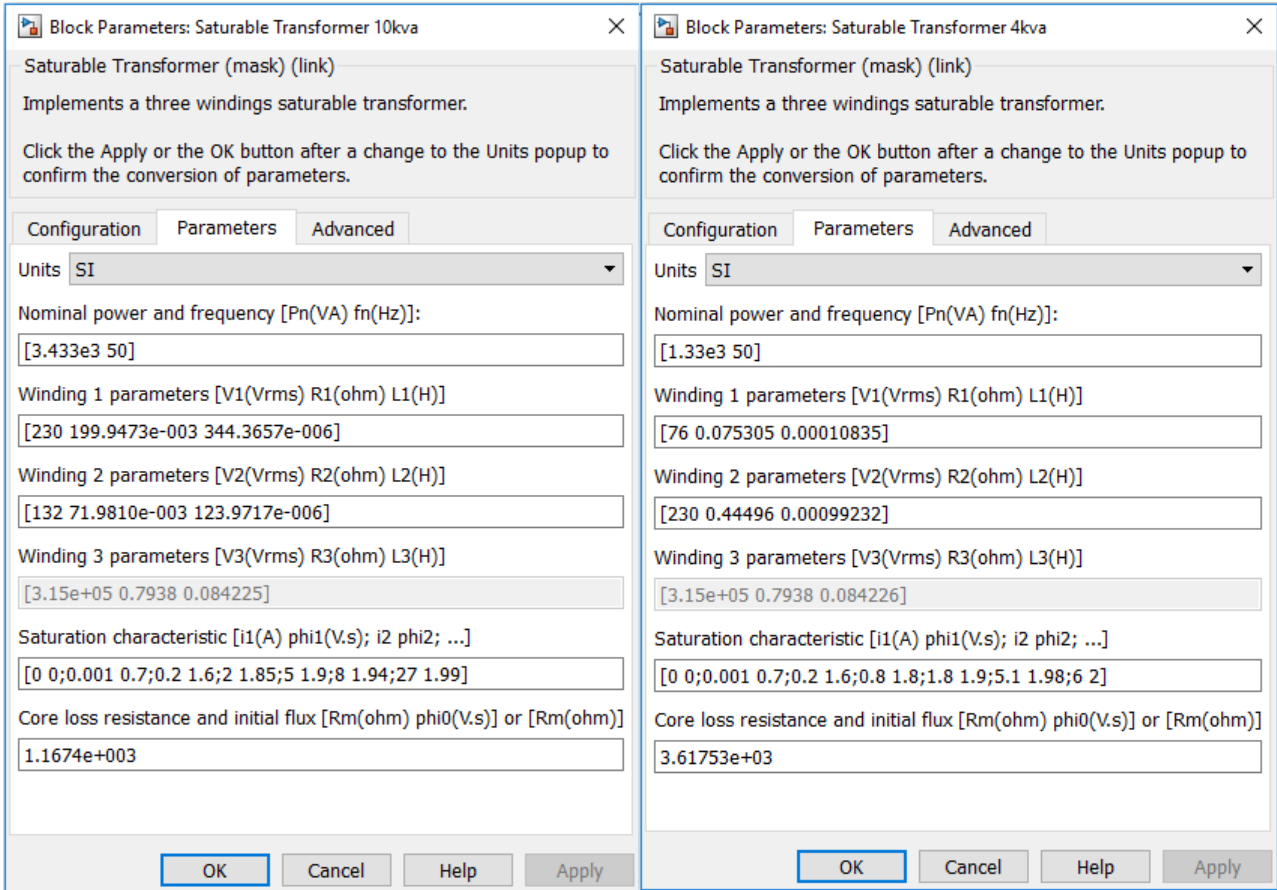


Figura 3-3 Parâmetros do transformador, a) 10,3 kVA e b) 4 kVA.

Para as simulações com transformadores monofásicos, foram utilizados os parâmetros da Figura 3-4.



a)

b)

Figura 3-4 Parâmetros do transformador, a) 10,3 kVA e b) 4 kVA para simulações em monofásico.

### 3.2. Transitório de Ligação de Transformadores

Quando se efetua a ligação do transformador a sobrecorrente transitória é praticamente inevitável, pois o instante de comutação não é fácil de controlar. Para evitar o transitório, o transformador teria de ser ligado no instante em que a tensão corresponde à densidade de fluxo presente no núcleo.

Na Figura 3-5, demonstra-se o processo em que se obtém um transitório de grande amplitude. Como se pode observar, quando o transformador é desligado e a corrente se anula, a densidade de fluxo mantém-se com um valor residual de  $B_r$ .

Nestas condições a corrente de ligação é máxima quando o transformador é ligado no instante em que a tensão aplicada inicia o semiciclo positivo, como demonstrado na Figura 3-5. Imediatamente após fechar o interruptor (em  $t=0+$ ) o fluxo permanece igual ao valor que possuía em  $t=0-$ , pois o fluxo magnético não pode variar bruscamente. Assim, a densidade de fluxo, em vez de começar do valor máximo negativo ( $-B_{mp}$ ), começa a partir  $B_r$  e atinge o valor de pico positivo de  $(B_r+2B_{mp})$  levando o núcleo à saturação.

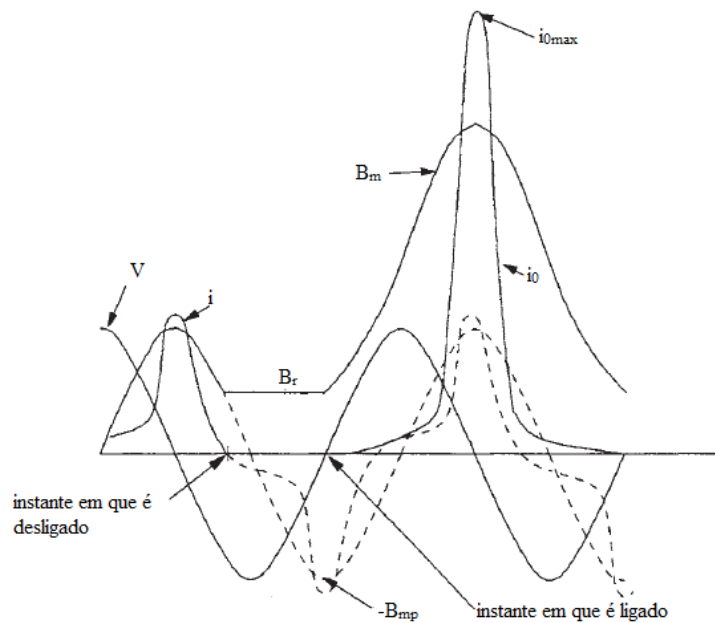


Figura 3-5 Caso de transitório na ligação do transformador (adaptado de [4]).

O processo de ligação do transformador dá origem a sobrecorrentes transitórias de excitação. A análise destes casos foi efetuada utilizando o esquema da Figura 3-6, para ensaios monofásicos. O transformador foi ligado em vazio para diferentes ângulos de comutação.

As comutações em laboratório foram efetuadas manualmente, pelo que as simulações foram adequadas aos resultados experimentais.

Na Figura 3-6 apresenta-se o esquema relativo à análise do transitório de ligação do transformador.

Como exemplo, apresenta-se na Figura 3-7 o resultado laboratorial referente à forma de onda da corrente de ligação do transformador de 10,3 kVA, nas seguintes condições:

- Fecho do interruptor quando a tensão de alimentação inicia a alternância positiva (define-se nesta condição o ângulo de comutação  $\alpha=0^\circ$ );
- Indução remanescente nula, tendo-se desmagnetizado previamente o núcleo.

Na Figura 3-8 apresenta-se o correspondente resultado de simulação, o qual se encontra em razoável concordância com o resultado experimental.

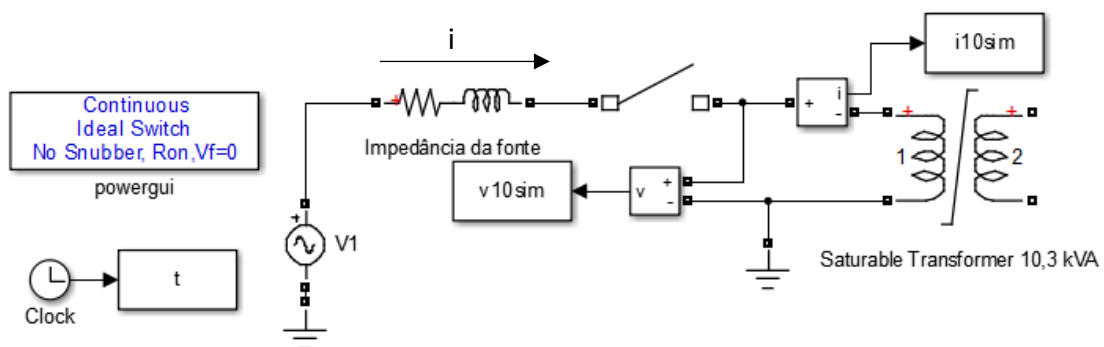


Figura 3-6 Modelo do circuito de ligação de um transformador à rede.

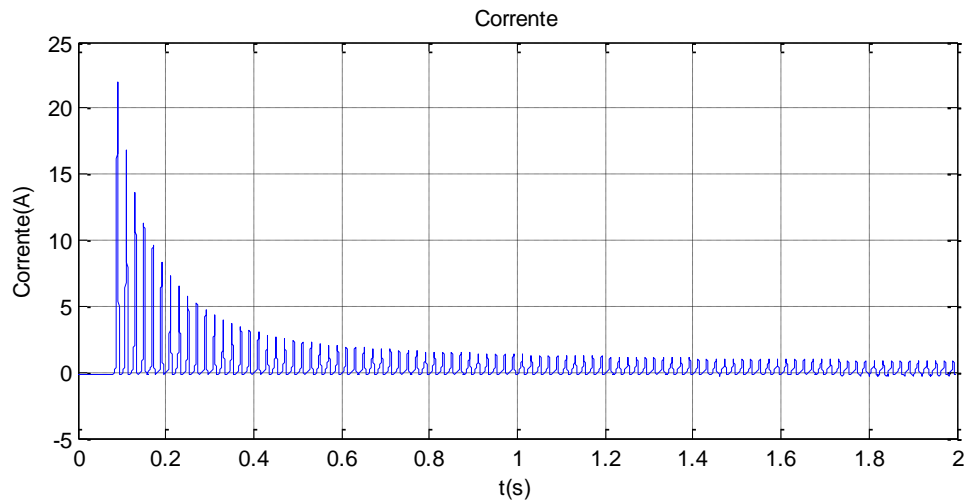


Figura 3-7 Corrente de ligação do transformador 10,3 kVA, resultado laboratorial (esquema da Figura 3-6).

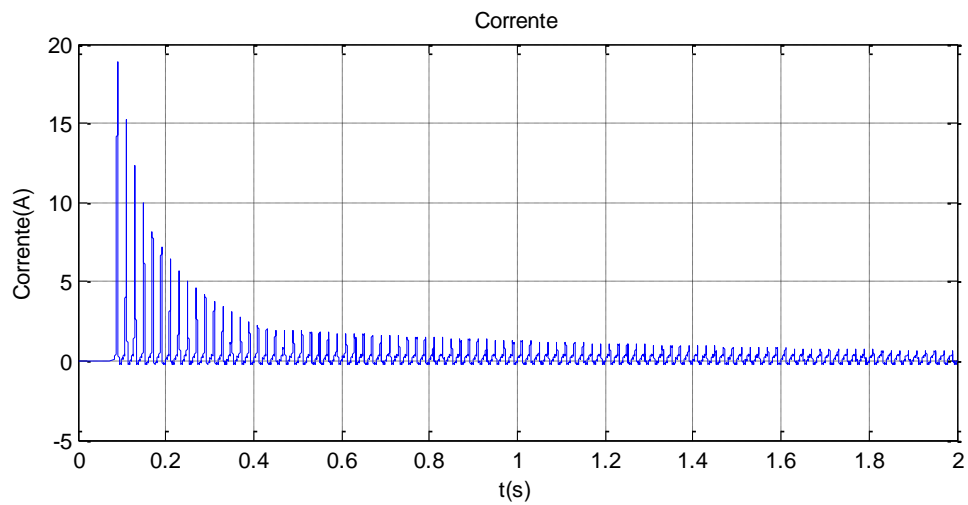


Figura 3-8 Corrente de ligação do transformador de 10,3 kVA, resultado de simulação (esquema da Figura 3-6).

Observa-se na Figura 3-9 o caso onde ocorre uma comutação ideal, não existindo transitório, situação que se verifica quando, no instante de ligação, a tensão corresponde à densidade de fluxo remanescente presente no núcleo, ou seja, para  $\alpha=90^\circ$ .

Na Figura 3-10 observa-se uma situação onde a amplitude da corrente durante o transitório toma valores relativamente reduzidos, para  $\alpha=45^\circ$ .

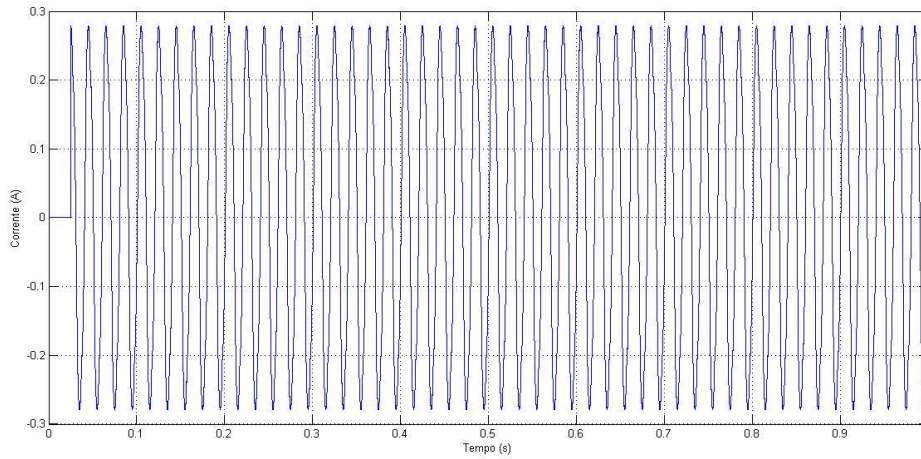


Figura 3-9 Corrente no primário do transformador de 10,3 kVA,  $\alpha = 90$  graus, resultado de simulação.

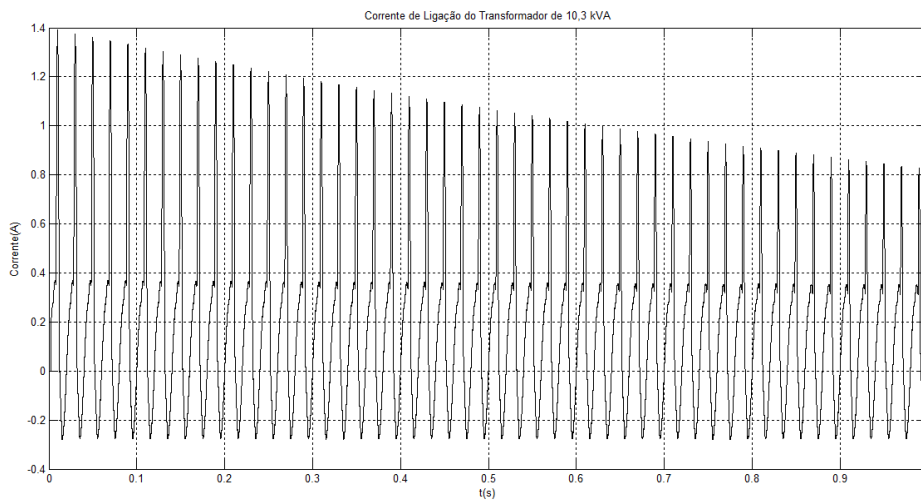


Figura 3-10 Corrente no primário do transformador de 10,3 kVA, quando este é ligado no momento em que  $\alpha = 45$  graus, resultado de simulação.

### 3.3. Transitório de Ligação de Transformadores em Série

A análise do transitório resultante da comutação de um transformador quando este se encontra ligado em série com outro foi efetuada utilizando o esquema da Figura 3-11. o transformador T1 (4 kVA) foi utilizado como elevador (76 V-230V) e o transformador a comutar, T2 (10,3 kVA), foi utilizado como redutor (230 V-132V).

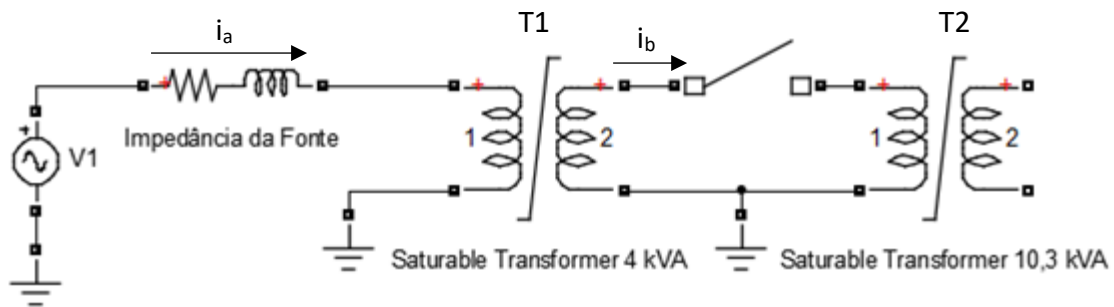
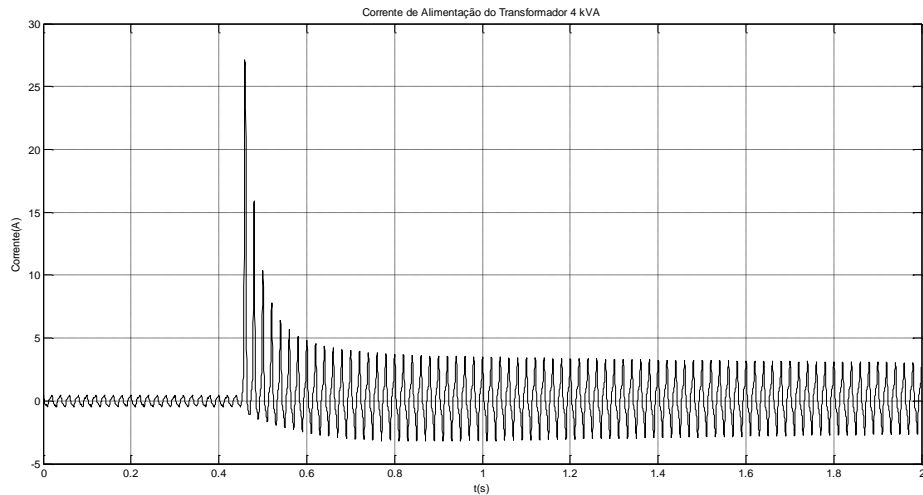


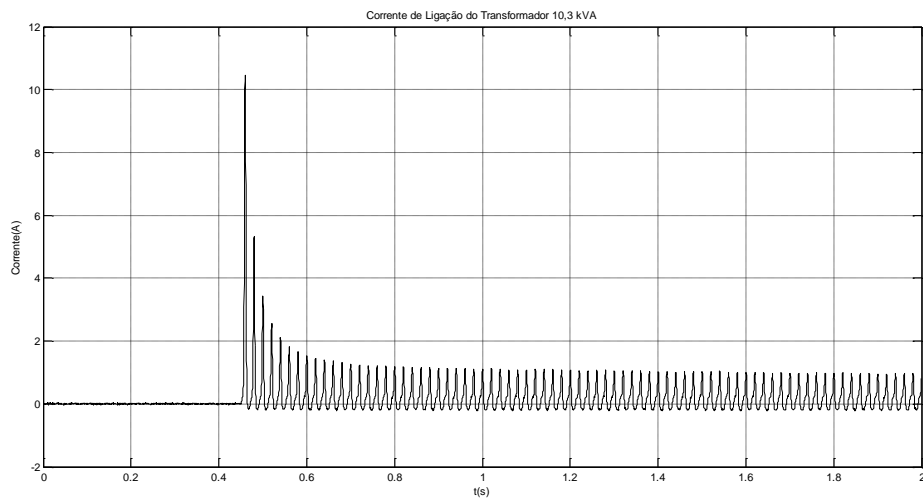
Figura 3-11 Esquema de ligação em série.

Para confirmar que se pode utilizar o modelo para simular a ligação em série de dois transformadores foi realizado em laboratório o ensaio quando o interruptor fecha em  $\alpha=356,4^\circ$ .

Em laboratório foram obtidas a corrente de alimentação de T1 (Figura 3-12 a)) e a corrente de ligação de T2 (Figura 3-12 b)). Os correspondentes resultados de simulação são apresentados na Figura 3-13.

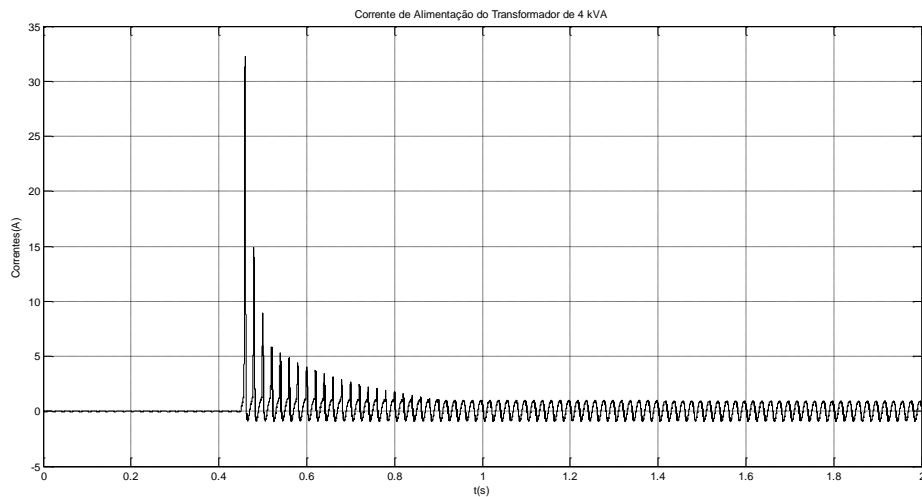


a)

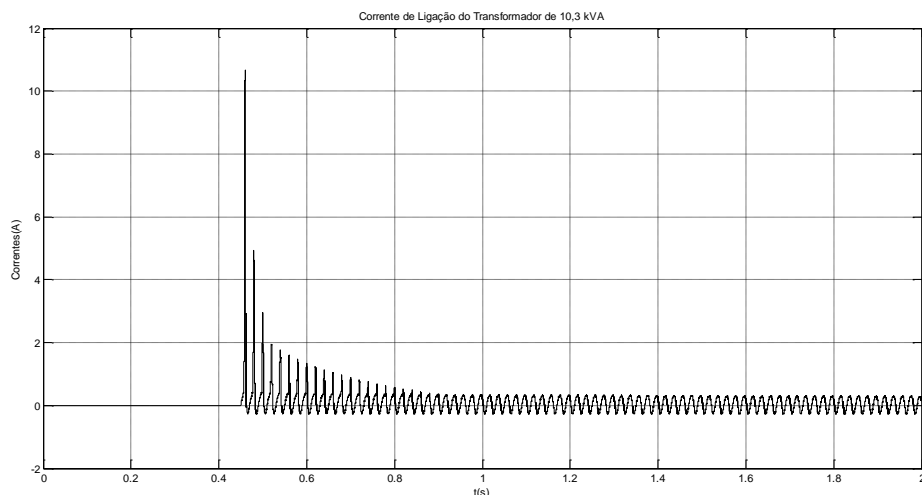


b)

Figura 3-12 Correntes obtidas através de ensaio laboratorial. a) Corrente de alimentação de T1 ( $i_a$ ); b) Corrente de ligação de T2 ( $i_b$ ).



a)



b)

Figura 3-13 Correntes obtidas através de simulação. a) Corrente de alimentação de T1 ( $i_a$ ); b) Corrente de ligação de T2 ( $i_b$ ).

A corrente de magnetização do T1 aumenta a sua amplitude abruptamente quando se liga o T2, demonstrando que há um fenómeno de interligação entre os transformadores.

As correntes simuladas apresentam-se com grande semelhança às obtidas em laboratório, as diferenças devem-se em grande parte à forma aproximada como a saturação do núcleo é tomada em consideração no modelo *Simulink/MATLAB* (linearização por retas, com sete pontos).

### 3.4. Transitório de comutação de transformadores ligados ao mesmo barramento

Quando se liga um transformador à rede este absorve uma corrente de magnetização que pode ter uma amplitude significativa e provocar uma queda de tensão na impedância do circuito que o alimenta. Se um transformador já se encontra em funcionamento pode entrar em saturação devido a uma corrente de magnetização de compensação causada pela queda de tensão assimétrica no sistema, originada pela sobrecorrente transitória da entrada em funcionamento de outro transformador que se ligue na sua proximidade. Este fenómeno pode ocorrer, por exemplo, quando dois transformadores se encontram ligados no mesmo barramento, Figura 3-14.

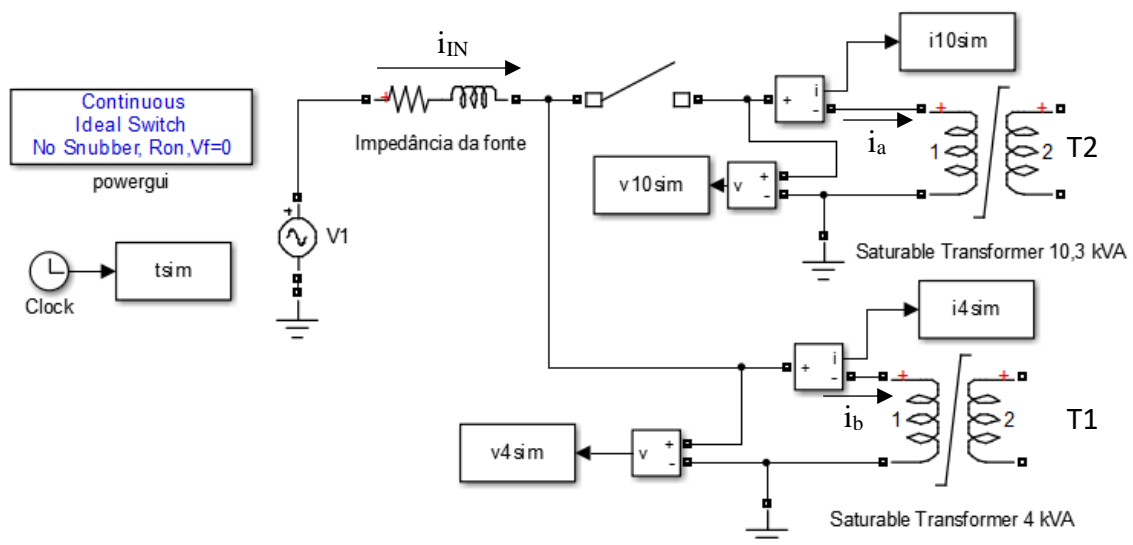
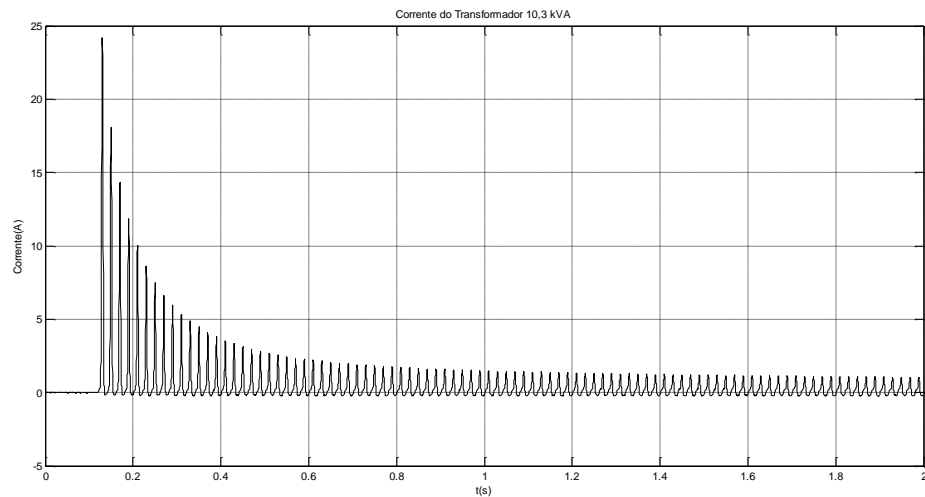


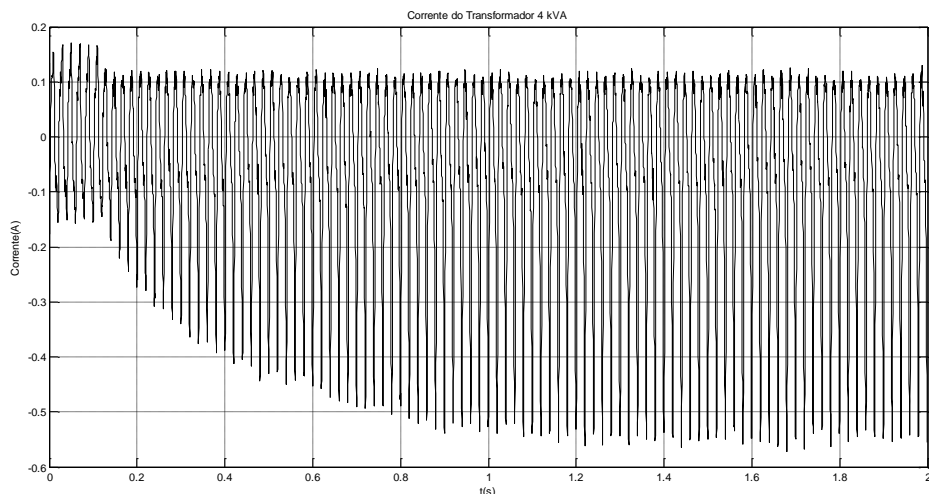
Figura 3-14 Modelo do circuito de ligação de um transformador à rede quando outro transformador já se encontra ligado.

A validação experimental do modelo foi realizada com dois transformadores trifásicos (mas utilizados em ensaio monofásico), alimentados na coluna central do primário através de um autotransformador. Nos ensaios utilizou-se o transformador de 4 kVA (T1) previamente ligado, e analisou-se o transitório de ligação do transformador de 10,3 kVA (T2). O transformador de 10,3 kVA foi sempre desmagnetizado antes de cada ensaio para que as condições pudessem ser as mais semelhantes possíveis entre diversos ensaios e, consequentemente, permitissem efetuar uma análise comparativa.

Quando T2 é comutado em  $\alpha = 3,6^\circ$ , origina uma corrente transitória, conforme apresentado na Figura 3-15 a).



a)



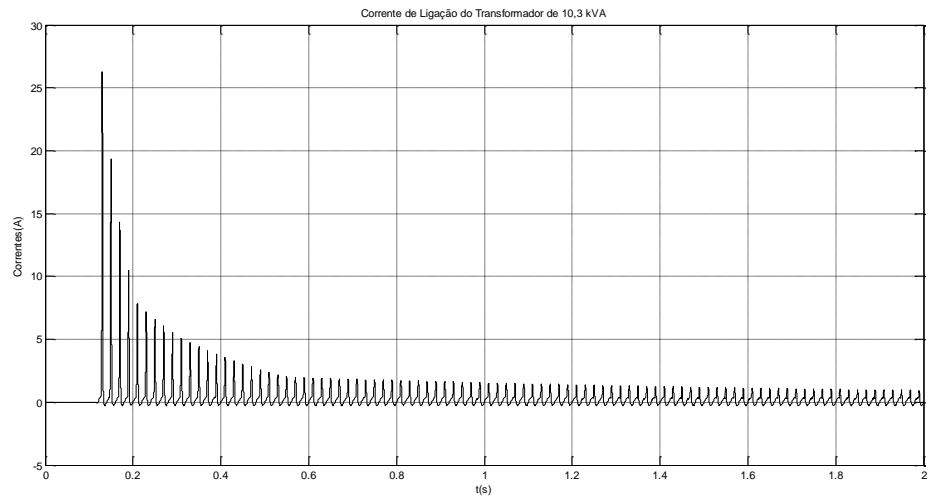
b)

Figura 3-15 Correntes obtidas em laboratório. a) Corrente de ligação de T2,  $i_o$ ; b) Corrente de magnetização de T1,  $i_b$ .

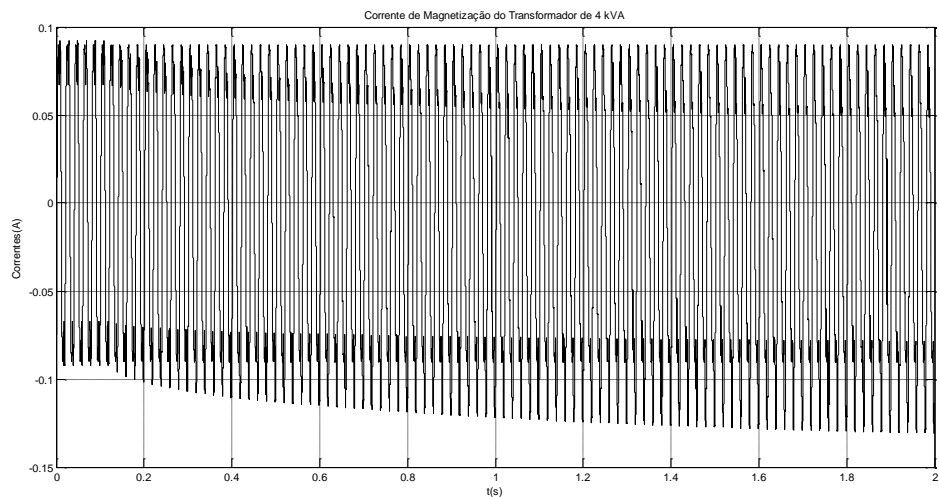
Ao comutar o transformador a corrente de ligação provoca uma queda de tensão assimétrica na impedância do sistema a que os transformadores estão ligados (impedância da fonte), o que resulta na perturbação da corrente em T1, com características típicas de uma sobrecorrente transitória de excitação, mas com polaridade oposta à corrente de ligação de T2 (Figura 3-15 b)).

Através de simulação obtiveram-se as correntes nos transformadores de 4 kVA e 10,3 kVA, Figura 3-16. Os resultados de simulação e laboratoriais encontram-se em razoável concordância. Os resultados de simulação obtidos permitem concluir que os modelos

computacionais utilizados são adequados para analisar os fenômenos transitórios associados à ligação de transformadores.



a)



b)

Figura 3-16 Correntes obtidas através de simulação. a) Corrente de ligação de T2,  $i_a$ ; b) Corrente de magnetização de T1,  $i_b$ .

## 4. Análise de Transitórios de Ligação com Transformadores de Alta Tensão

Com a utilização dos transformadores do laboratório, que possuem potência reduzida, obtêm-se correntes de ligação com amplitude insuficiente para provocar disparos intempestivos. Assim, para uma análise mais realística e rigorosa dos fenômenos envolvidos, houve a necessidade de utilizar transformadores de maior potência. Foi selecionado um transformador de 180 MVA cujas características são apresentadas na Tabela 4-1 [5].

Tabela 4-1 Parâmetros do transformador de 180 MVA.

S (MVA)	V1 (kV)	V2 (kV)	R1 (mΩ)	L1 (mH)	R2 (mΩ)	L2 (H)	Rm (Ω)
180	275	66	756,25	288,87	130,69	0,049895	33334

Para simular o transformador de 180 MVA, foi utilizado o bloco “*Three-Phase Transformer (Two Windings)*” (Figura 4-1). Nas simulações foi utilizada uma fonte trifásica com uma impedância constituída por  $r = 15,125 \Omega$  e  $L = 0,2407 \text{ H}$ .

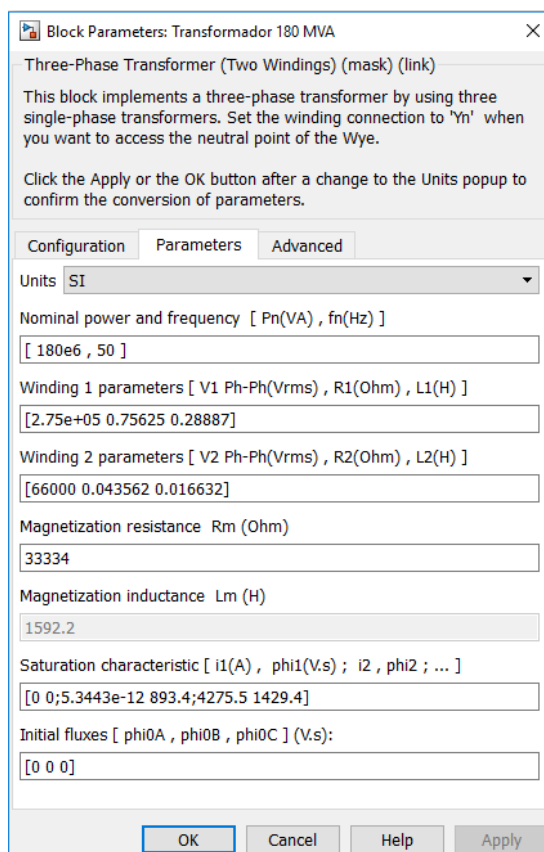


Figura 4-1 Parâmetros do transformador de 180 MVA.

#### 4.1. Ligação do Transformador à Rede

O esquema da Figura 4-3 foi utilizado para estudar os fenômenos associados à ligação do transformador à rede e caracterizar a influência da indução remanescente, da carga, do instante de ligação, do tipo de ligação dos enrolamentos, das cavas de tensão e dos processos de religação.

Os ângulos de comutação no caso trifásico são definidos na Figura 4-2. Neste exemplo a comutação da fase A ocorre em  $\alpha_a=60^\circ$ , quando a tensão dessa fase já iniciou a alternância positiva à  $60^\circ$ . Os ângulos de comutação das fases B e C são definidos a partir da mesma origem (início da alternância positiva da tensão na fase A). No exemplo da Figura 4-2 as fases B e C são ligadas  $90^\circ$  e  $180^\circ$  depois da tensão na fase A iniciar o semiciclo positivo, definindo-se  $\alpha_b=90^\circ$  e  $\alpha_c=180^\circ$ .

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para a ligação do transformador à rede. O transformador encontra-se previamente desmagnetizado e está em vazio, é comutado quando a tensão na fase A passa por 0 ( $\alpha_a = 0^\circ$ ), Figura 4-4, e  $\alpha_a = 90^\circ$ , Figura 4-5.

Os resultados são idênticos àqueles obtidos com os transformadores laboratoriais de potência reduzida.

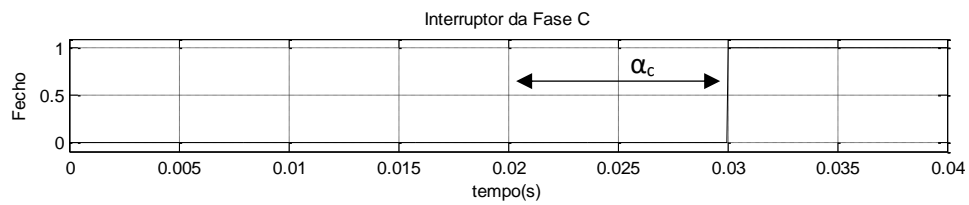
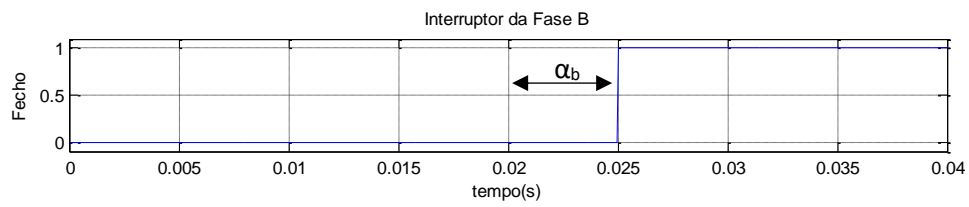
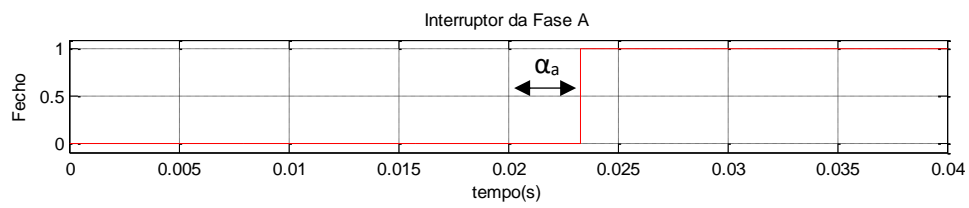
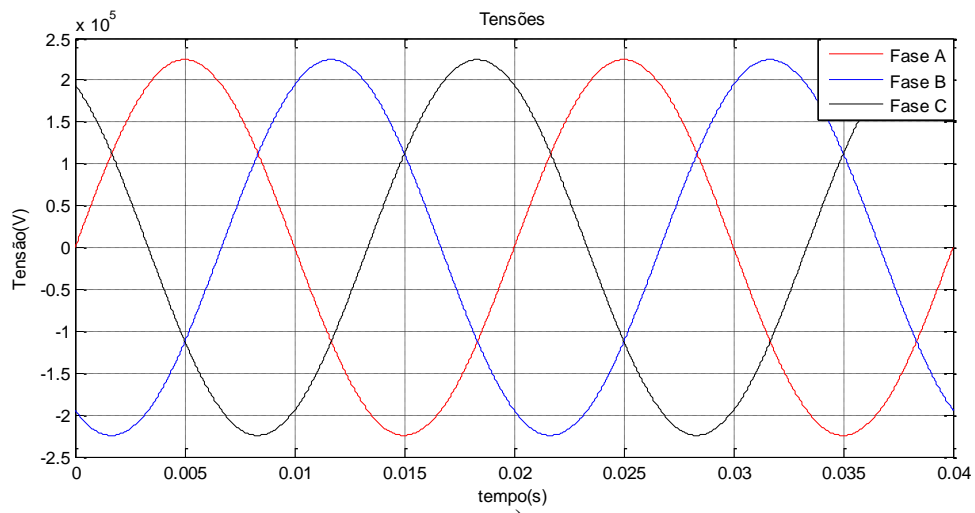


Figura 4-2 Comutação assíncrona: Tensões simples, a), Comutação do interruptor da Fase A, b), Comutação do interruptor da Fase B, c) e Comutação do interruptor da Fase C, d).

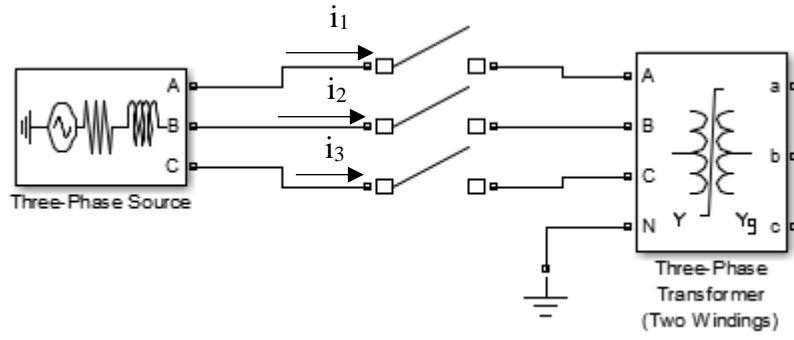


Figura 4-3 Esquema de ligação do transformador isolado.

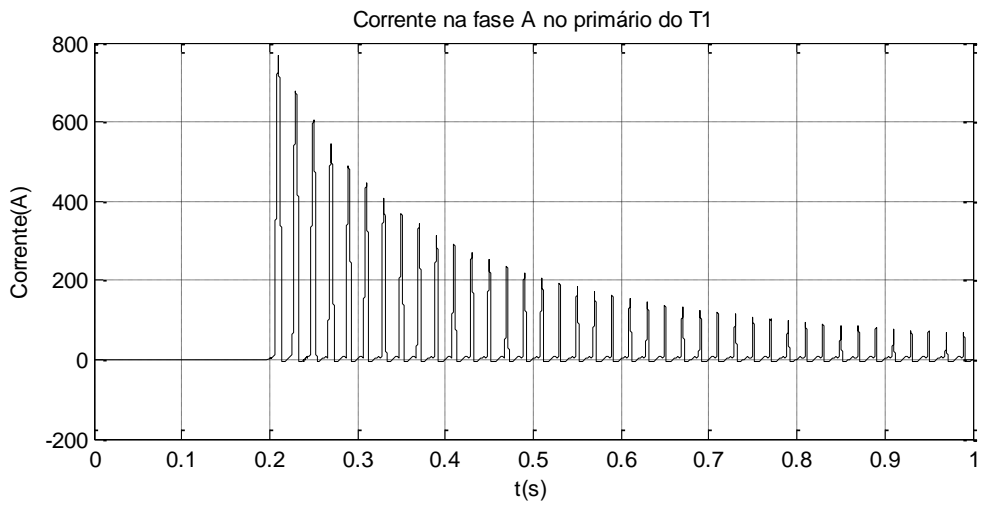


Figura 4-4 Corrente de ligação na fase A,  $\alpha_o = 0^\circ$ , esquema da Figura 4-3.

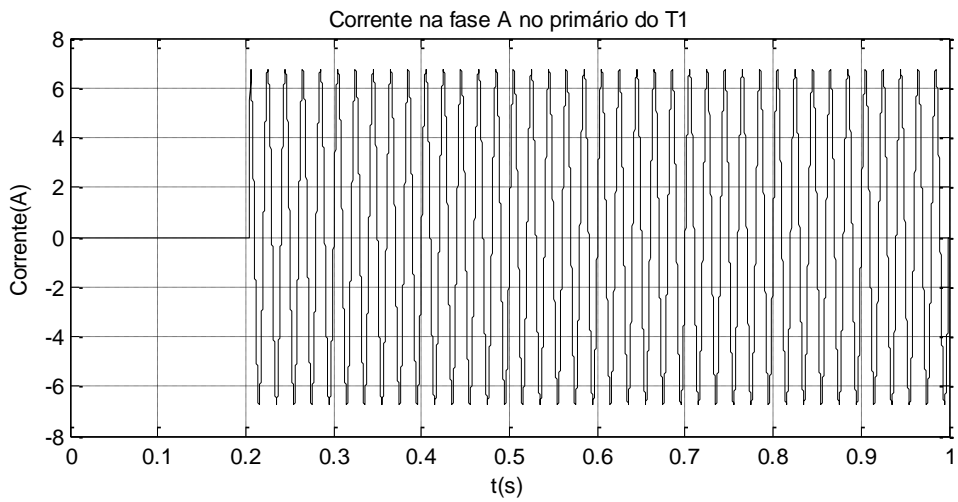


Figura 4-5 Corrente de arranque na fase A,  $\alpha_o = 90^\circ$ , esquema da Figura 4-3.

## 4.2. Ligação de Transformador situado na Vizinhança da Rede

A análise dos fenômenos associados à ligação de um transformador na presença de outro permite compreender a interação entre as duas máquinas. Nestas simulações é possível observar o efeito da corrente de ligação, assim como a interação entre os dois transformadores, que provoca uma sobrecorrente transitória no transformador já ligado (corrente de interdependência). Este fenômeno também é vulgarmente conhecido como *sympathetic current* [5], [6]. Na Figura 4-6 encontra-se representado o esquema utilizado para analisar estes fenômenos. Este esquema foi também utilizado para analisar a influência da indução remanescente, da carga, do tipo de ligação dos enrolamentos e dos processos de ligação.

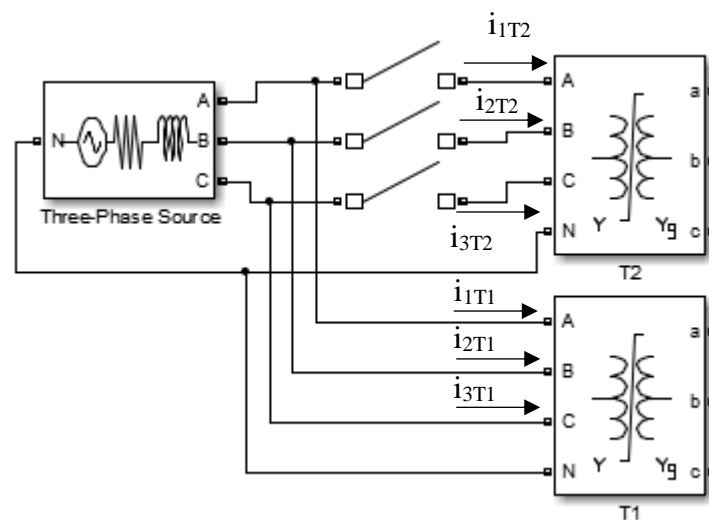


Figura 4-6 Esquema de ligação de transformador na vizinhança.

Quando o transformador T2 é ligado à rede, na presença de outro transformador (T1) já alimentado no mesmo barramento, a sobrecorrente transitória de excitação do transformador que é ligado circula pela fonte e produz no transformador T1 um fluxo DC que é sobreposto ao seu fluxo magnético AC normal. Isto leva ao aumento da densidade de fluxo e ao correspondente aumento das correntes de magnetização do outro transformador. Normalmente a corrente de interdependência no transformador já ligado (T1), é inferior à sua própria corrente de ligação [4].

Para efetuar a validação do modelo computacional foram utilizados os resultados publicados em [5]. Na Figura 4-7 a) pode observar-se a forma de onda da corrente de interdependência em T1 e na Figura 4-7 b) a corrente de ligação de T2 (resultados obtidos em [5]). Os resultados obtidos para as mesmas condições são apresentados na Figura 4-8.

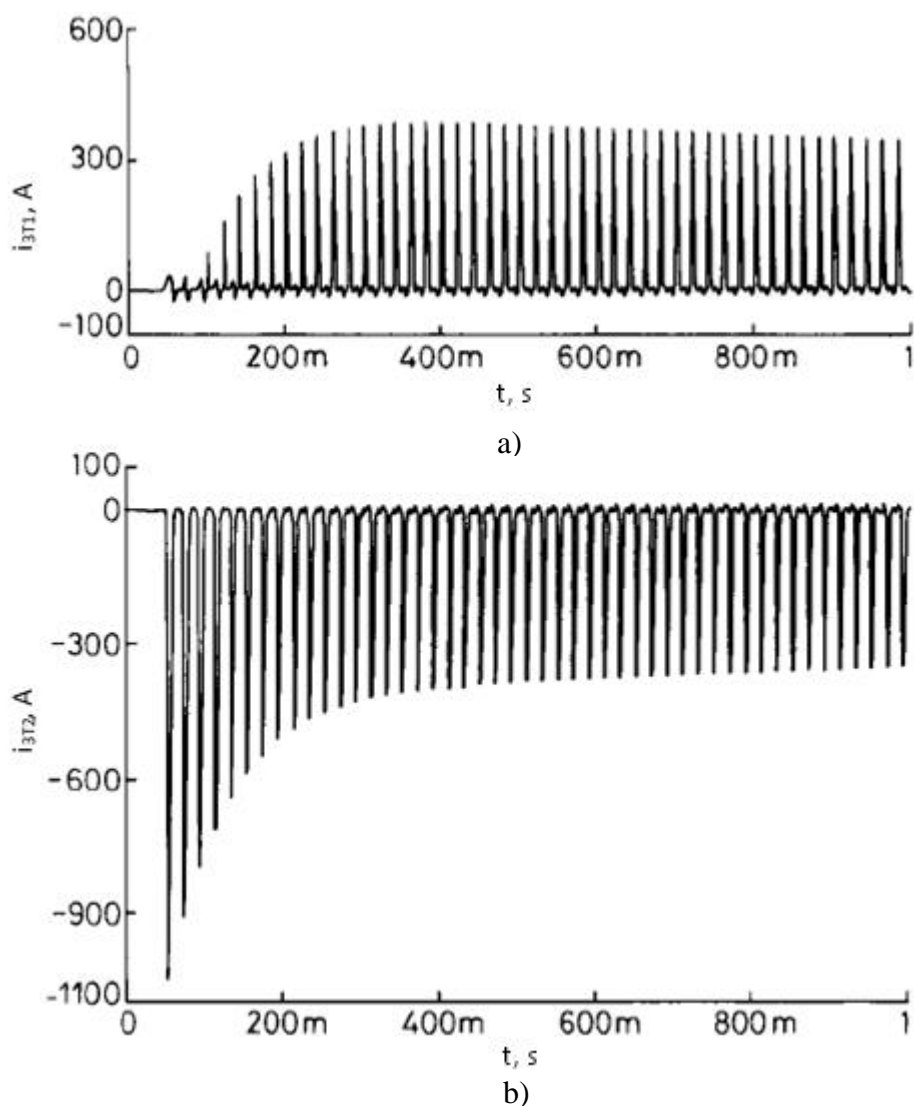
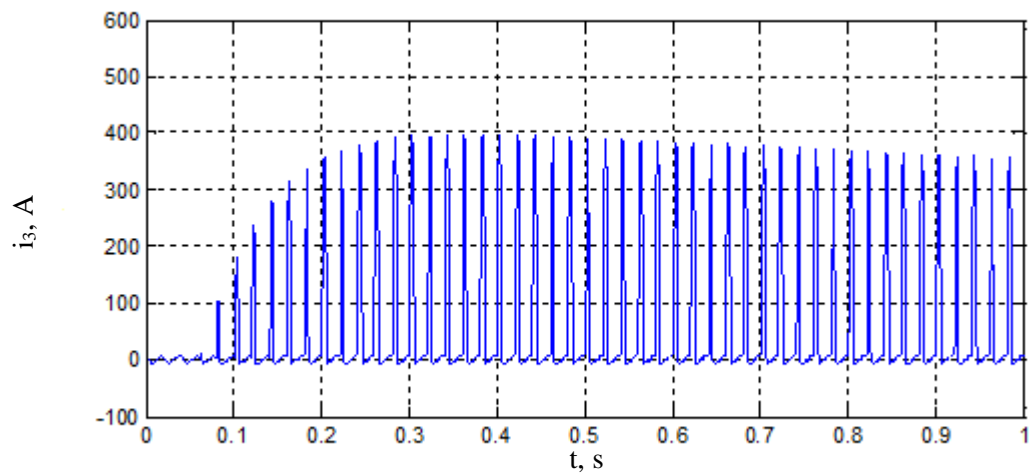
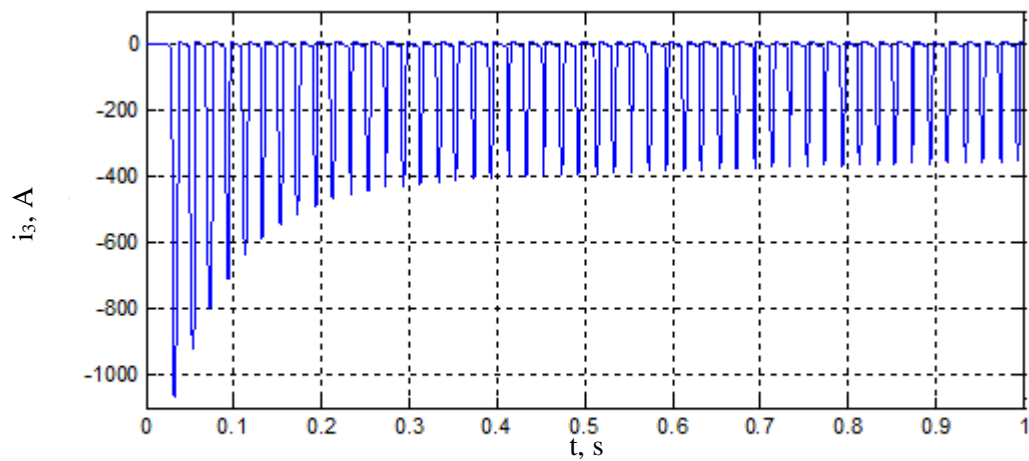


Figura 4-7 Resultado apresentado em [7]; a) Corrente de magnetização  $i_3$  no transformador T1; b) Corrente de ligação  $i_3$  no transformador T2 (esquema da Figura 4-6).



a)



b)

Figura 4-8 Correntes obtidas através de simulação; a) Corrente de magnetização  $i_3$  no transformador T1; b) Corrente de ligação  $i_3$  no transformador T2 (esquema da Figura 4-6).

Após comparação, verifica-se que os resultados apresentados em [5] são semelhantes àqueles obtidos através da simulação em *Simulink/Matlab*, podendo concluir-se que o modelo computacional é adequado para analisar estes fenómenos.

### 4.3. Cálculo de Correntes Diferenciais e Correntes de Estabilização para diferentes ligações dos enrolamentos do transformador

O modelo computacional foi utilizado para analisar a influência do tipo de ligação dos enrolamentos nas sobrecorrentes transitórias de excitação. Assim, é necessário calcular as correntes diferenciais para as diferentes ligações dos enrolamentos.

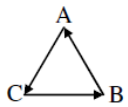
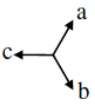
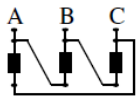
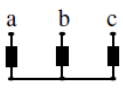
Em funcionamento normal as correntes diferenciais são iguais às correntes de excitação. As correntes diferenciais podem ser obtidas através da soma das correntes no primário e secundário, por fase (simbologia conforme apresentada na Figura 4-9), referidas a uma base comum. Considere-se o transformador de potência com ligação Dyn1 (Figura 4-9), o qual apresenta um desfasamento de 30° entre a tensão simples de entrada e saída (índice horário 1, Tabela 4-2). A soma das forças magnetomotriz por coluna resulta em:

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_4 = N_1 \cdot i_{exc1} = N_1 \cdot i_{diffase1} \quad (4.1)$$

$$N_1 \cdot i_2 - N_2 \cdot i_5 = N_1 \cdot i_{exc2} = N_1 \cdot i_{diffase2} \quad (4.2)$$

$$N_1 \cdot i_3 - N_2 \cdot i_6 = N_1 \cdot i_{exc3} = N_1 \cdot i_{diffase3} \quad (4.3)$$

Tabela 4-2: Resumo da ligação Dyn1 (adaptado de [8]).

Índice horário	Símbolo da ligação	Diagrama vectorial		Esquema de ligações		Razão global de transf.
		Tensão primária	Tensão secundária	Primário	Secundário	
1 (30°)	Dy1					$\frac{N_1}{N_2}$

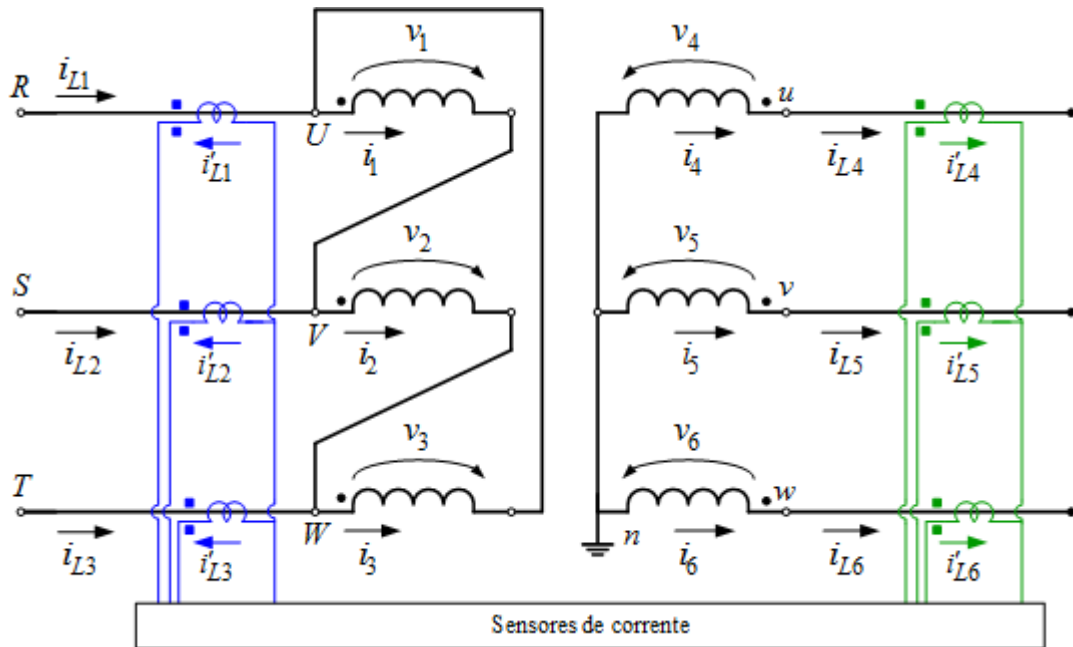


Figura 4-9 Esquema da ligação DYN1 do transformador, [9].

Os TI medem as correntes de linha, pelo que as correntes diferenciais devem ser calculadas em função destas. Da análise da Figura 4-9 resulta:

$$\begin{cases} i_{L1} = i_1 - i_3 \\ i_{L2} = i_2 - i_1 \\ i_{L3} = i_3 - i_2 \\ i_{L4} = i_4 \\ i_{L5} = i_5 \\ i_{L6} = i_6 \end{cases} \quad (4.4)$$

Definem-se ainda as correntes diferenciais de linha como:

$$\begin{aligned} i_{dif1} &= i_{difFase1} - i_{difFase3} \\ i_{dif2} &= i_{difFase2} - i_{difFase1} \\ i_{dif3} &= i_{difFase3} - i_{difFase2} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Subtraindo as equações (4.1) e (4.3), (4.2) e (4.1), (4.3) e (4.2) resulta:

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_4 - N_1 \cdot i_3 + N_2 \cdot i_6 = N_1 \cdot i_{difFase1} - N_1 \cdot i_{difFase3} \quad (4.6)$$

$$N_1 \cdot i_2 - N_2 \cdot i_5 - N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_4 = N_1 \cdot i_{difFase2} - N_1 \cdot i_{difFase1} \quad (4.7)$$

$$N_1 \cdot i_3 - N_2 \cdot i_6 - N_1 \cdot i_2 + N_2 \cdot i_5 = N_1 \cdot i_{difFase3} - N_1 \cdot i_{difFase2} \quad (4.8)$$

Aplicando (4.4) e (4.5) resulta:

$$\begin{bmatrix} i_{dif1} \\ i_{dif2} \\ i_{dif3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

A diferença entre as amplitudes das correntes no primário e no secundário é compensada através da razão entre o número de espiras do transformador de potência:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{LL1}}{V_{LL2} / \sqrt{3}} \quad (4.10)$$

O índice horário é compensado com a subtração das correntes do secundário.

As correntes de estabilização são calculadas efetuando a média entre as correntes no primário e no secundário, referidas a uma base comum. Na prática basta utilizar (4.9) e fazer as alterações necessárias.

$$\begin{bmatrix} I_{est1} \\ I_{est2} \\ I_{est3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} - \frac{N_1}{N_2} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.11)$$

Para as outras ligações, basta seguir o mesmo raciocínio, apresentando-se de seguida as equações correspondentes:

- Ynd1

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{LL1} / \sqrt{3}}{V_{LL2}} \quad (4.12)$$

Correntes diferenciais:

$$\begin{bmatrix} I_{dif1} \\ I_{dif2} \\ I_{dif3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Correntes de estabilização:

$$\begin{bmatrix} I_{est1} \\ I_{est2} \\ I_{est3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} - \frac{1}{3} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.14)$$

- Dd0

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{LL1}}{V_{LL2}} \quad (4.15)$$

Correntes diferenciais:

$$\begin{bmatrix} I_{dif1} \\ I_{dif2} \\ I_{dif3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Correntes de estabilização:

$$\begin{bmatrix} I_{est1} \\ I_{est2} \\ I_{est3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} - \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.17)$$

- Ynyn0

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{LL1} / \sqrt{3}}{V_{LL2} / \sqrt{3}} \quad (4.18)$$

Correntes diferenciais:

$$\begin{bmatrix} I_{dif1} \\ I_{dif2} \\ I_{dif3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Correntes de estabilização:

$$\begin{bmatrix} I_{est1} \\ I_{est2} \\ I_{est3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} - \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.20)$$

#### 4.4. Análise da corrente de ligação para vários casos de indução remanescente

As sobrecorrentes transitórias de excitação são afetadas pela indução remanescente presente no núcleo. O modelo computacional apresentado na Figura 4-6 foi utilizado para analisar as sobrecorrentes transitórias de excitação para diferentes níveis de indução remanescente. Apresenta-se na Figura 4-10 o resultado da simulação referente à forma de onda da corrente de ligação do transformador de 180 MVA, nas seguintes condições:

- Fecho do interruptor em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$ ;
- Os transformadores em vazio;
- Os enrolamentos dos transformadores ligados em Ynyn0;
- T1 em estado permanente;
- Indução remanescente em T2 de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0.5$  pu e  $B_{rc} = 0.5$  pu.

Nestas condições não ocorre qualquer transitório após a ligação do transformador.

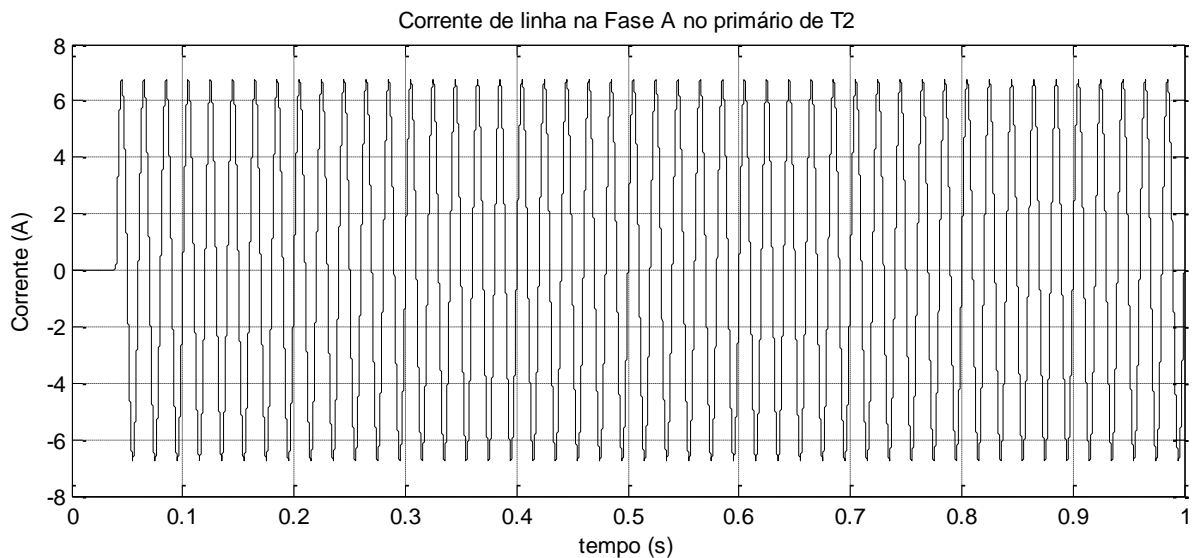


Figura 4-10 Corrente de ligação na fase a para  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0.5$  pu e  $B_{rc} = 0.5$  pu (esquema da Figura 4-6).

Na Figura 4-11 apresenta-se o resultado da simulação referente à forma de onda da corrente de ligação na linha (Fase A) do transformador T2, nas seguintes condições:

- Fecho dos interruptores em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$ ;
- Os transformadores em vazio;
- T1 em estado permanente;

- Os enrolamentos dos transformadores ligados em Ynyn0;
- Indução remanescente no transformador T2 de 0 pu, -0,866 pu e 0,866 pu, nas fases A, B e C, respetivamente.

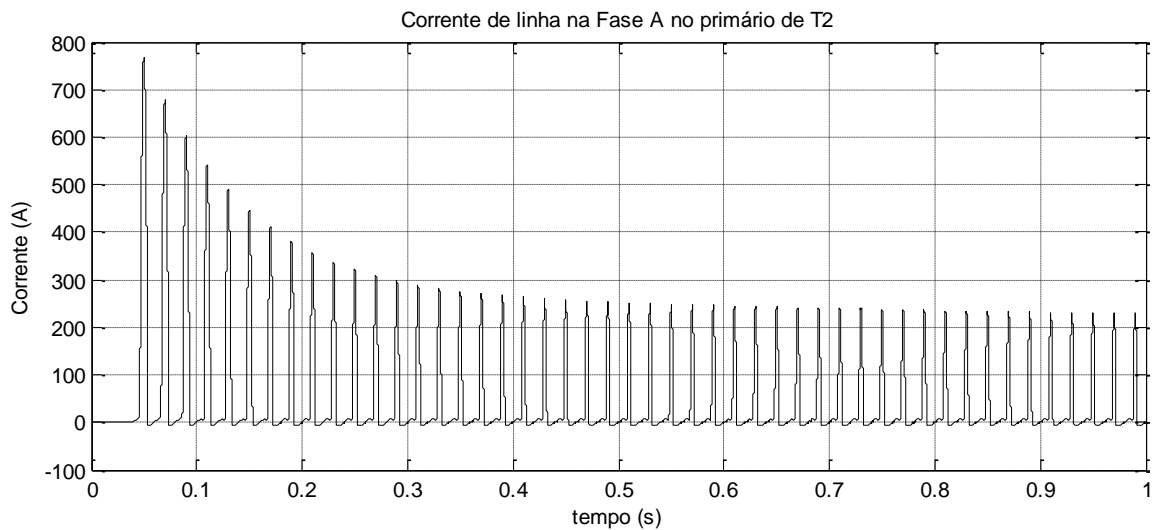


Figura 4-11 Corrente de ligação na fase a para  $B_{ra} = 0$  pu,  $B_{rb} = -0,866$  pu e  $B_{rc} = 0,866$  (esquema da Figura 4-6).

Na Tabela 4-3 são apresentadas as situações em que ocorrem disparos intempestivos para as seguintes condições:

- Fecho dos interruptores em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$ ;
- Os transformadores em vazio;
- T1 em estado permanente;
- Os enrolamentos dos transformadores ligados em Ynyn0;
- Vários valores para a indução remanescente em T2.

Na Tabela 4-3 apresentam-se as seguintes grandezas:

- Razão entre o 2º e o 1º harmónico para as três fases,  $I_2/I_{1a}$ ,  $I_2/I_{1b}$  e  $I_2/I_{1c}$ ;
- Intervalo de tempo em que se verificam as condições de disparo,  $\Delta t_a$ ,  $\Delta t_b$  e  $\Delta t_c$ ;
- Valor eficaz mínimo do fundamental da corrente diferencial durante o transitório,  $I_{ah1\min ef}$ ,  $I_{bh1\min ef}$  e  $I_{ch1\min ef}$ .

A condição de disparo da proteção foi definida com as seguintes condições:

1. O valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial for superior a 20% da corrente nominal,  $I_{dh1} > 0,2 \times I_n$  ( $I_{dh1} > 75.58 \text{ A}$ ).
2. A razão entre o segundo e o primeiro harmónicos da corrente diferencial for inferior a 20%,  $I_2/I_1 < 20\%$ .

Qualquer disparo da proteção sem que tenha ocorrido um defeito é considerado um disparo intempestivo.

Tabela 4-3 Tabela de disparos intempestivos para diversas induções remanescentes.

		$B_{ra} = -1$ $B_{rb} = 0,5$ $B_{rc} = 0,5$	$B_{ra} = -0,866$ $B_{rb} = 0$ $B_{rc} = 0,866$	$B_{ra} = -0,5$ $B_{rb} = -0,5$ $B_{rc} = 1$	$B_{ra} = 0$ $B_{rb} = -0,866$ $B_{rc} = 0,866$	$B_{ra} = 0,5$ $B_{rb} = -1$ $B_{rc} = 0,5$	$B_{ra} = 0,866$ $B_{rb} = -0,866$ $B_{rc} = 0$
T1	I <sub>2</sub> /I <sub>1a</sub> (%)						
	Δt <sub>a</sub> (s)						
	I <sub>ah1</sub> minef (A)						
	I <sub>2</sub> /I <sub>1b</sub> (%)						
	Δt <sub>b</sub> (s)						
	I <sub>bh1</sub> minef (A)						
	I <sub>2</sub> /I <sub>1c</sub> (%)						
	Δt <sub>c</sub> (s)						
	I <sub>ch1</sub> minef (A)						
T2	I <sub>2</sub> /I <sub>1a</sub> (%)						10,28
	Δt <sub>a</sub> (s)						0,02985
	I <sub>ah1</sub> minef (A)						398,3
	I <sub>2</sub> /I <sub>1b</sub> (%)						
	Δt <sub>b</sub> (s)						
	I <sub>bh1</sub> minef (A)						
	I <sub>2</sub> /I <sub>1c</sub> (%)						
	Δt <sub>c</sub> (s)						
	I <sub>ch1</sub> minef (A)						

Foram analisadas outras condições de funcionamento relativamente aos ângulos de comutação, resultados esses que se apresentam no Anexo 1, os quais são fornecidos em formato electrónico.

Verifica-se um número reduzido de disparos intempestivos.

#### 4.5. Influência da carga e do instante de ligação nas correntes de interdependência

Foi analisada a influência da carga do transformador no processo transitório de comutação. Utilizou-se a ligação de dois transformadores a um barramento comum (Figura 4-12): um foi comutado (T2) e o outro (T1) encontrava-se previamente ligado.

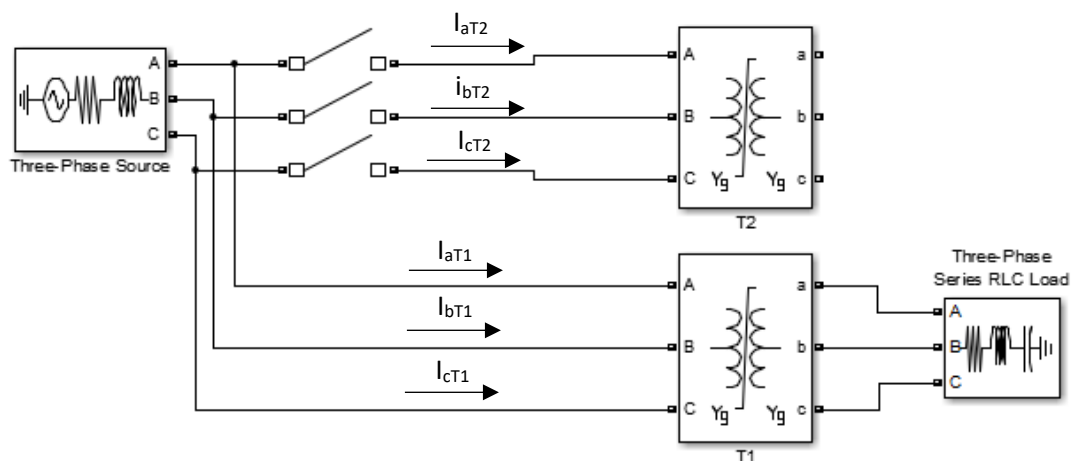


Figura 4-12 Esquema da ligação de um transformador à rede onde já se encontra outro ligado com carga.

Na Tabela 4-4 apresenta-se os resultados das simulações referentes ao esquema da Figura 4-12, com as seguintes condições:

- Transformador T1 com os enrolamentos em Dd0, a operar em regime permanente, em carga;
- Interruptor comutado com  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$  e três condições distintas para  $\alpha_a$ ;
- Indução remanescente no transformador T2 de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu;
- Transformador T2 com os enrolamentos em Dyn1, em vazio.

Tabela 4-4 Tabela de disparos intermpestivos para diversas cargas.

	RC			R			RL Fp 0,8 ind.			L			Linha		
	$\alpha_3=160^\circ$	$\alpha_3=170^\circ$	$\alpha_3=180^\circ$	$\alpha_3=160^\circ$	$\alpha_3=170^\circ$	$\alpha_3=180^\circ$	$\alpha_3=160^\circ$	$\alpha_3=170^\circ$	$\alpha_3=180^\circ$	$\alpha_3=160^\circ$	$\alpha_3=170^\circ$	$\alpha_3=180^\circ$	$\alpha_3=160^\circ$	$\alpha_3=170^\circ$	$\alpha_3=180^\circ$
T1	I2/I1a (%)														
	$\Delta$ ta (s)														
	IahIminief (A)														
	I2/I1b (%)														
	$\Delta$ tb (s)														
	IbhIminief (A)														
	I2/I1c (%)														
	$\Delta$ tc (s)														
	Ichlminief (A)														
	I2/I1a (%)	9,267	8,859	8,792	8,523	7,697	7,338	8,746	7,797	7,24	8,375	7,785	7,589	8,341	7,682
$\Delta$ ta (s)	0,03186	0,03221	0,03228	0,03152	0,03193	0,03214	0,03109	0,03161	0,03187	0,03225	0,03272	0,03293	0,03164	0,03199	0,03212
IahIminief (A)	433,7	443,8	445,6	399,6	409,9	415,4	359,4	369,1	374,5	403,3	412	415,6	407,4	416,4	420,2
I2/I1b (%)	6,368	5,835	5,743	8,119	7,36	6,966	8,993	8,082	7,58	8,499	7,804	7,527	8,366	7,669	7,386
$\Delta$ tb (s)	0,03216	0,03242	0,03247	0,03113	0,0314	0,03155	0,03085	0,03111	0,03126	0,0313	0,03157	0,03169	0,03099	0,03122	0,03131
IbhIminief (A)	435,2	441,2	442,2	407,3	413,4	416,6	367,6	373,6	376,9	401	406,2	408,3	407,1	412,4	414,6
I2/I1c (%)															
$\Delta$ tc (s)															
Ichlminief (A)															

As cargas utilizadas foram as seguintes:

- RC – P=1 MW e Qc= -45 Mvar;
- R – P= 45 MW;
- RL – P= 144 MW e Ql= 108 Mvar;
- L – Ql= 45 Mvar;
- Linha de transmissão de energia, cujos parâmetros são apresentados na Figura 4-13.

Foram realizadas simulações para outros tipos de enrolamentos que se apresentam no anexo 2, as quais são disponibilizadas em formato digital.

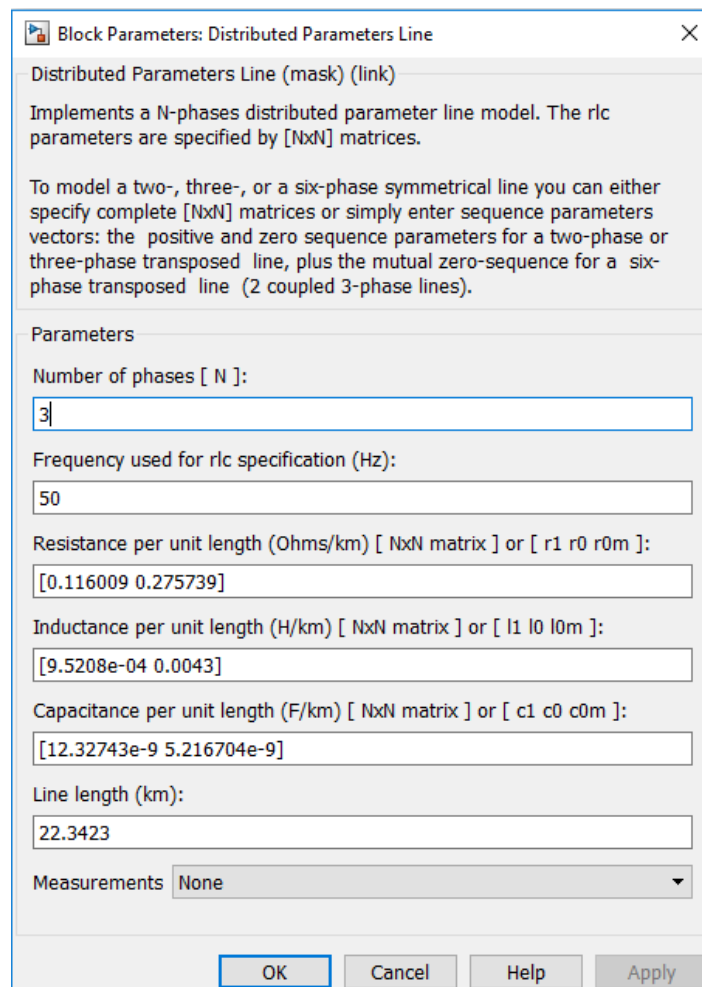


Figura 4-13 Parâmetros da linha de média tensão.

Nas figuras Figura 4-14 a Figura 4-16 são apresentados os resultados da simulação para as seguintes condições:

- T1 (Dd0) em estado permanente com a carga RC;
- T2 (Dyn1) em vazio, com indução remanescente de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu;
- Comutação para  $\alpha_a = 180^\circ$  e  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$ ;
- Comutação a partir do instante 0,04 s.

Na Figura 4-14 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1, verificando-se que existe uma perturbação após a ligação de T2 (devido à queda de tensão na impedância da fonte). Na Figura 4-14 b) apresenta-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor. Na Figura 4-14 c) ilustram-se as correntes de ligação de T1, nas quais se observa o fenómeno de interdependência entre transformadores. A Figura 4-14 d) ilustra a forma de onda das correntes de alimentação de T2, as quais possuem as características típicas de correntes de ligação de transformadores.

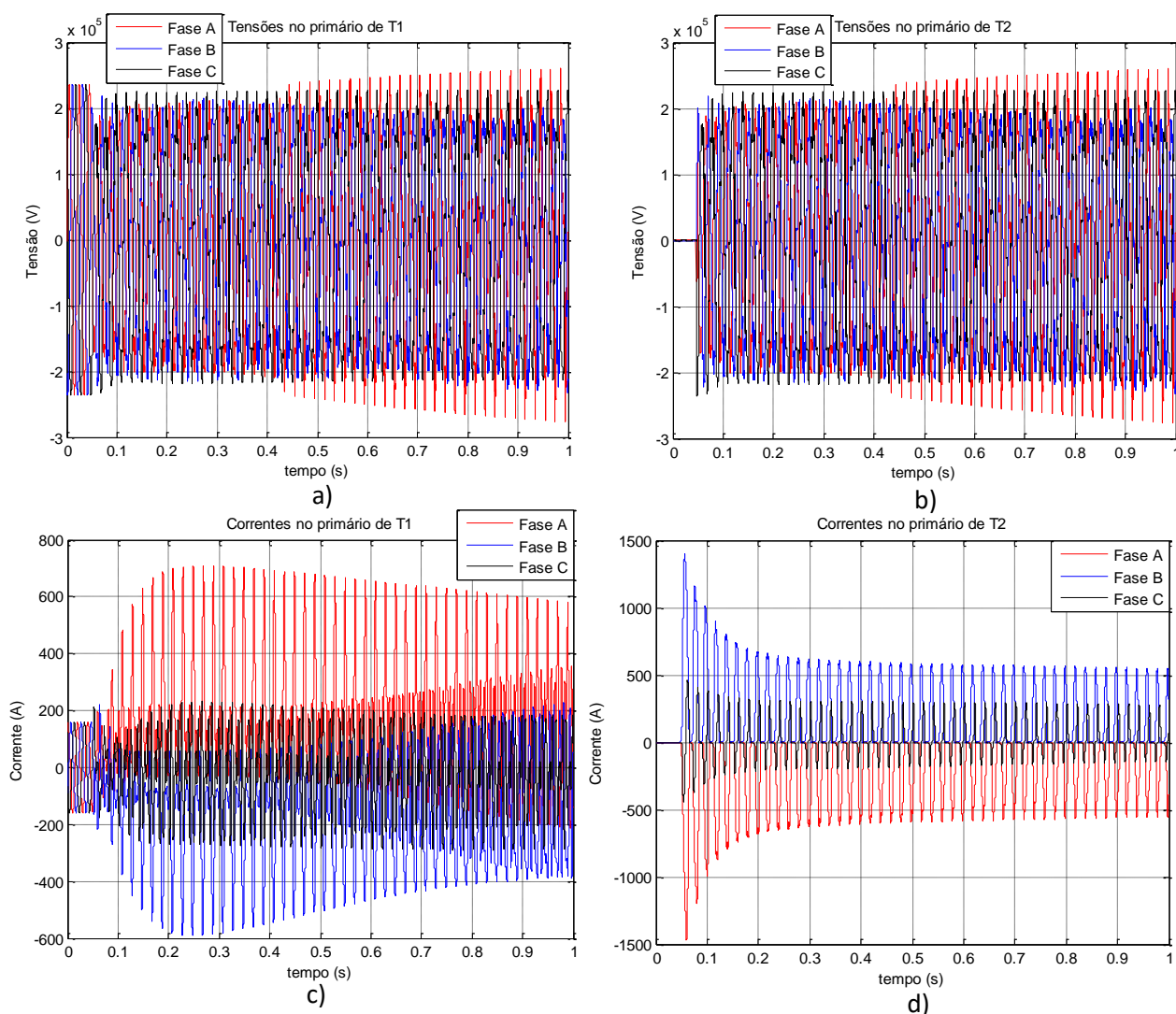
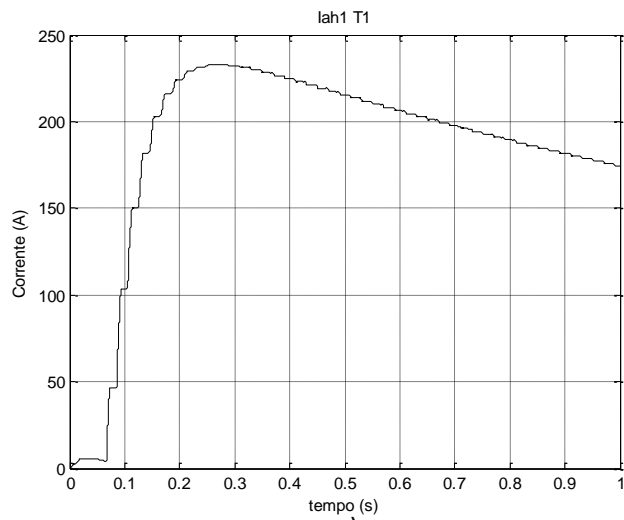


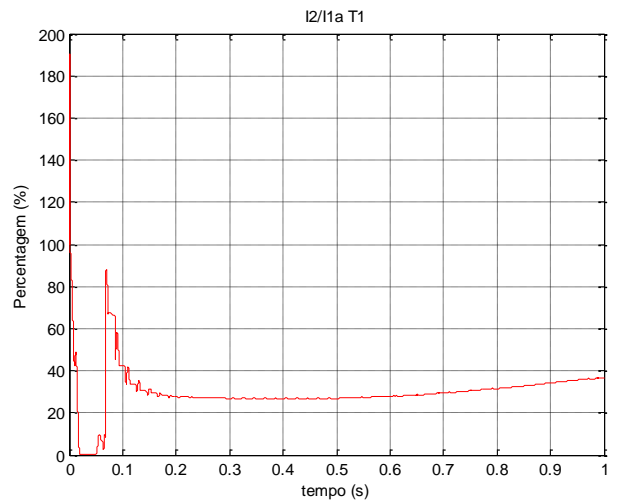
Figura 4-14 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) para a carga RC.

Nas Figura 4-15 a), b) e c) ilustra-se a evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador T1 nas fases A, B e C, respetivamente. Verifica-se que estes sinais têm amplitude suficiente ( $>20\%$ ) para ativar a proteção do transformador. No entanto o bloqueio harmónico atua corretamente, ( $I_2/I_1 > 20\%$ , Figura 4-15 d), e) e f)), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

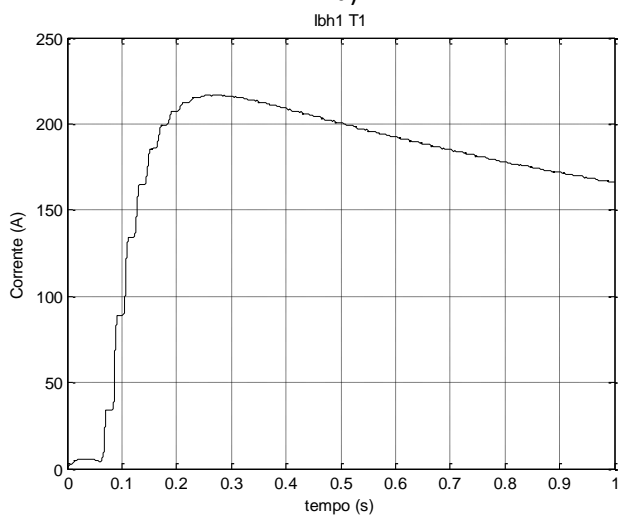
A Figura 4-16 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Neste caso o relé provoca um disparo intempestivo, pois a razão  $I_2/I_1$  é menor que 20% nas fases A e B, durante cerca de 30 ms.



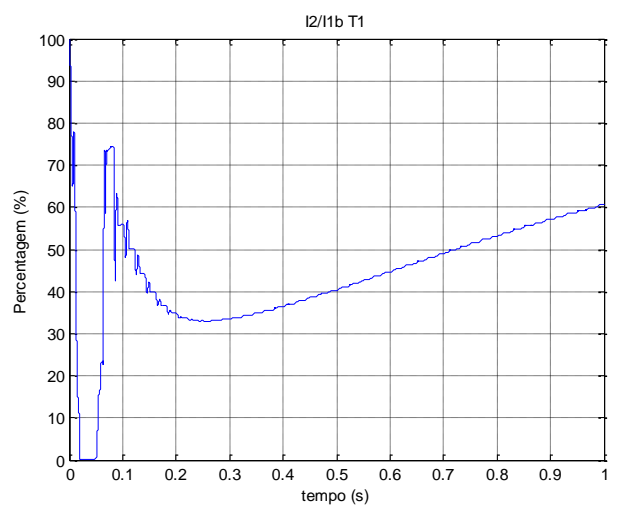
a)



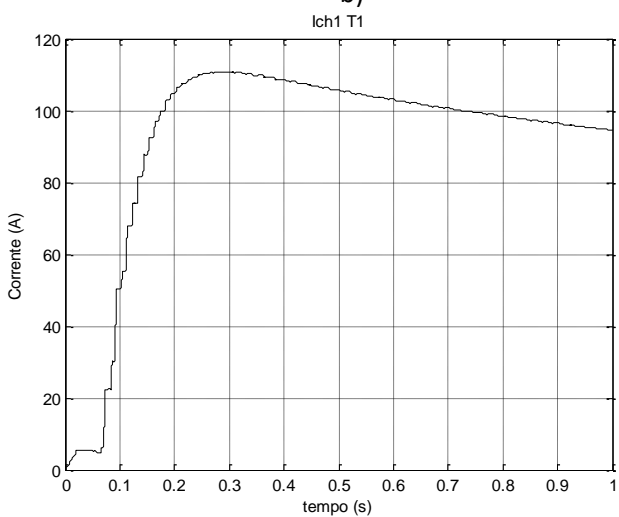
d)



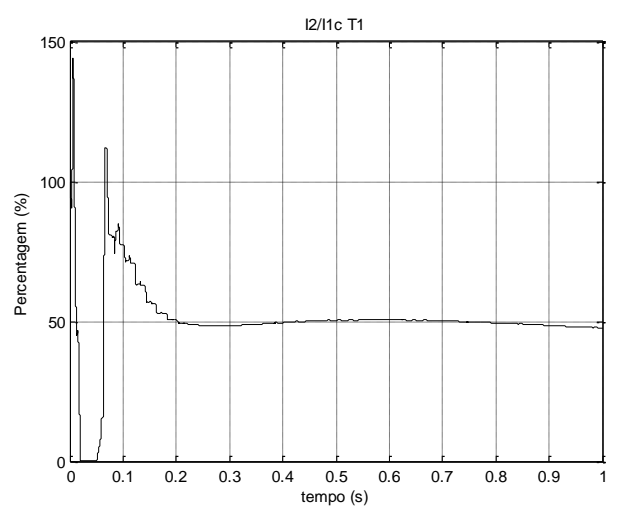
b)



e)

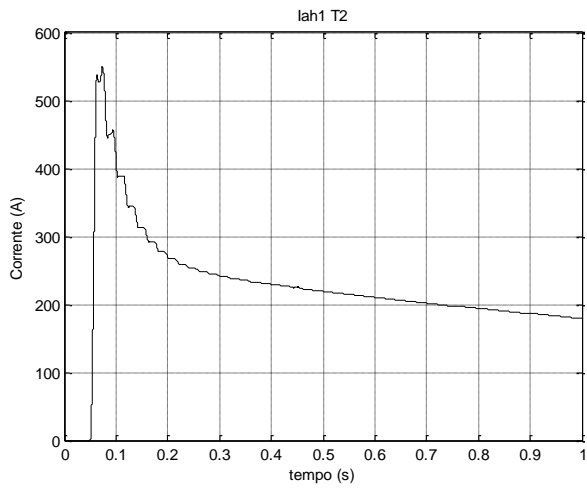


c)

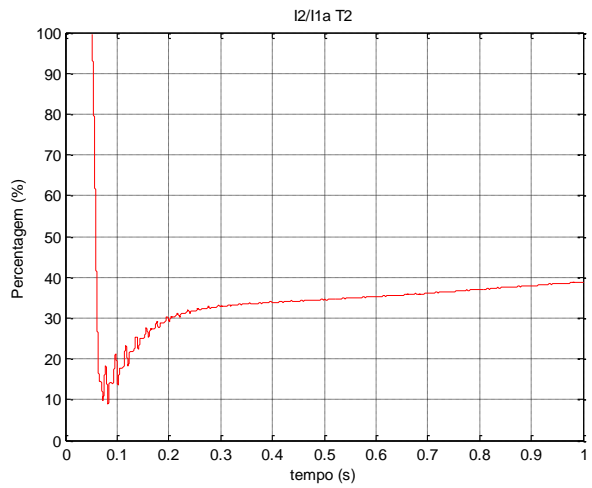


f)

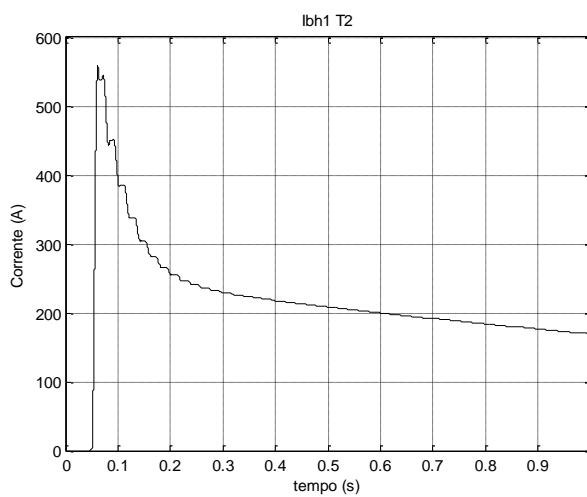
Figura 4-15 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente para a carga RC.



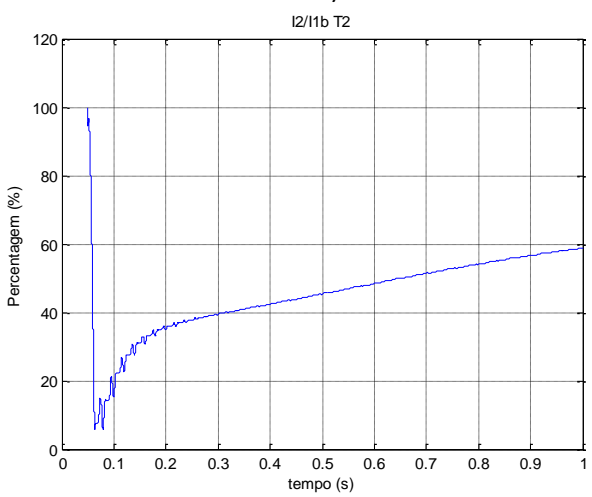
a)



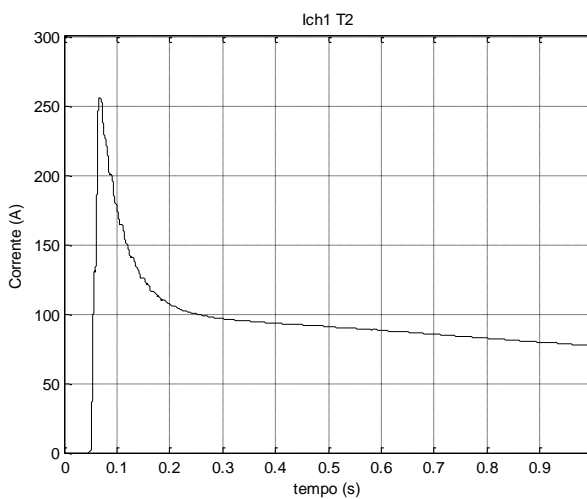
d)



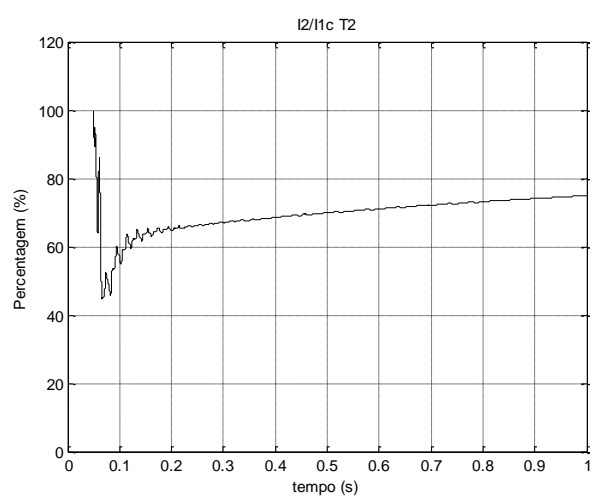
b)



e)



c)



f)

Figura 4-16 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente para a carga RC.

Nas figuras Figura 4-17 a Figura 4-19 estão apresentados os resultados da simulação para as seguintes condições:

- T1 (Dd0) em estado permanente com a carga R;
- T2 (Dyn1) em vazio, com indução remanescente de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu;
- Comutação para  $\alpha_a = 180^\circ$  e  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$ ;
- Comutação a partir do instante 0,04 s.

Na Figura 4-17 ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1 (Figura 4-17 a)), a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2 (Figura 4-17 b)), as correntes de ligação de T1 (Figura 4-17 c)) e a forma de onda das correntes de alimentação de T2 (Figura 4-17 d)).

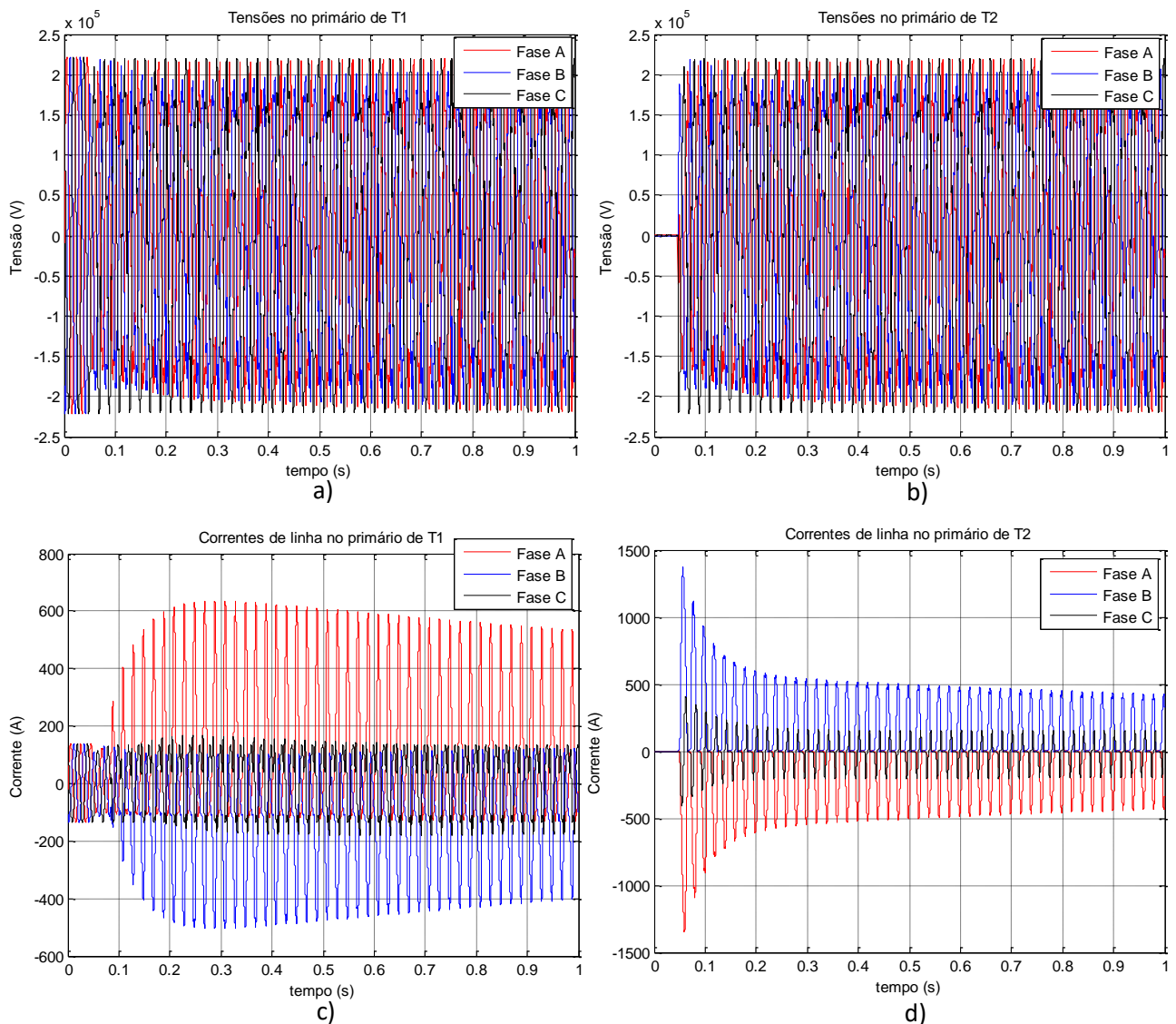
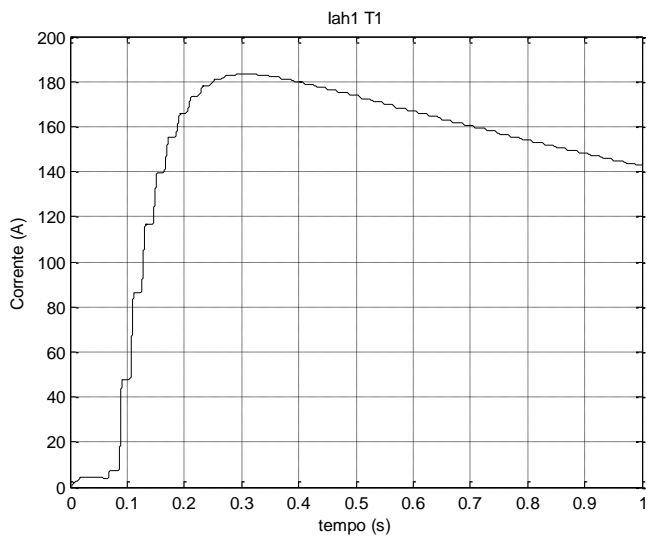


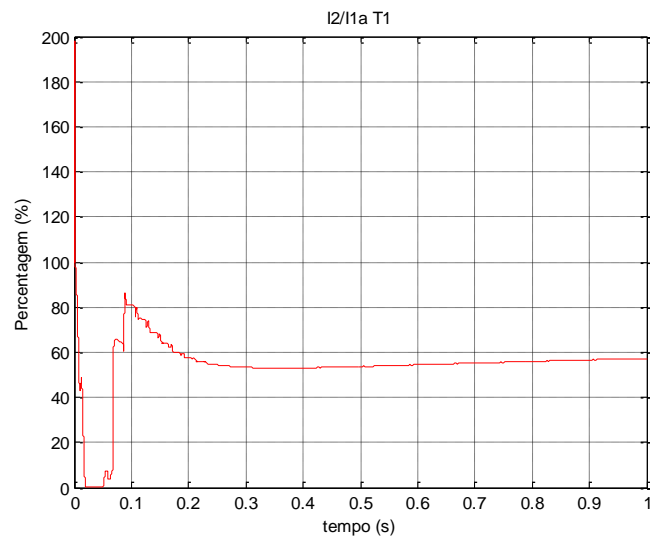
Figura 4-17 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) para a carga R.

A Figura 4-18 apresenta os resultados relativos ao relé de T1. Não se verificam disparos intempestivos apesar dos sinais das fases A e B (Figura 4-18 a) e b)) terem amplitude suficiente para ativar a proteção do transformador, visto que o bloqueio harmónico atua corretamente, (Figura 4-18 d) e e)), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

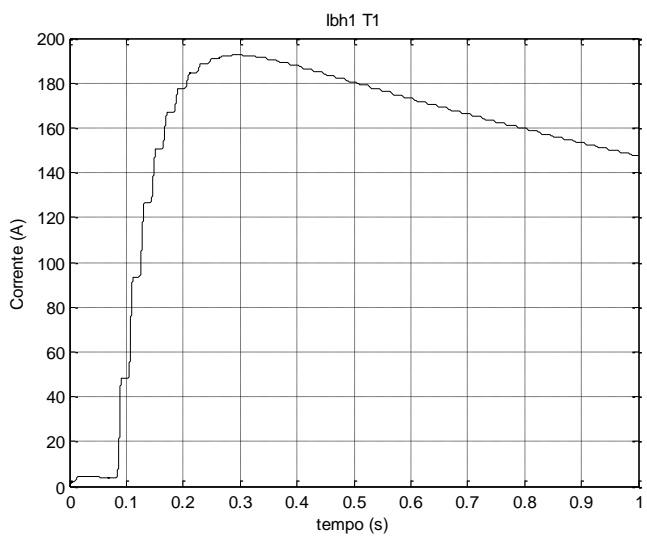
A Figura 4-19 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Verifica-se a ocorrência de disparo intempestivo nas fases A e B.



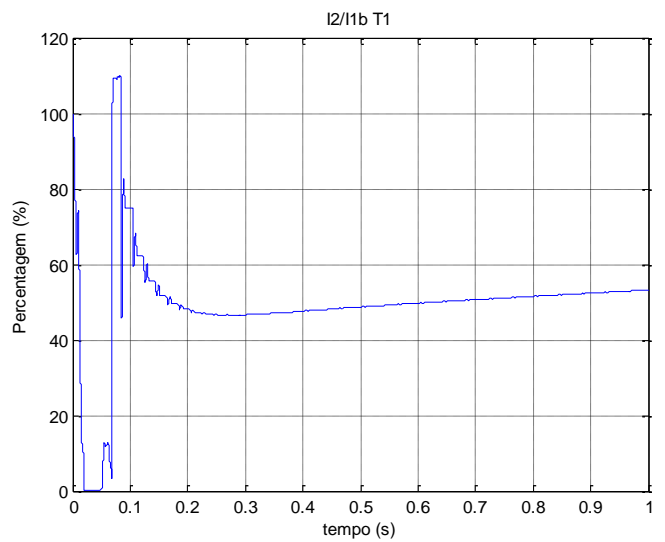
a)



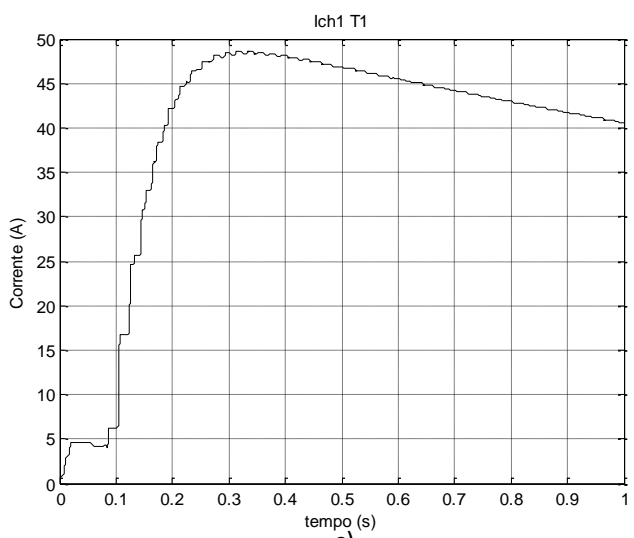
d)



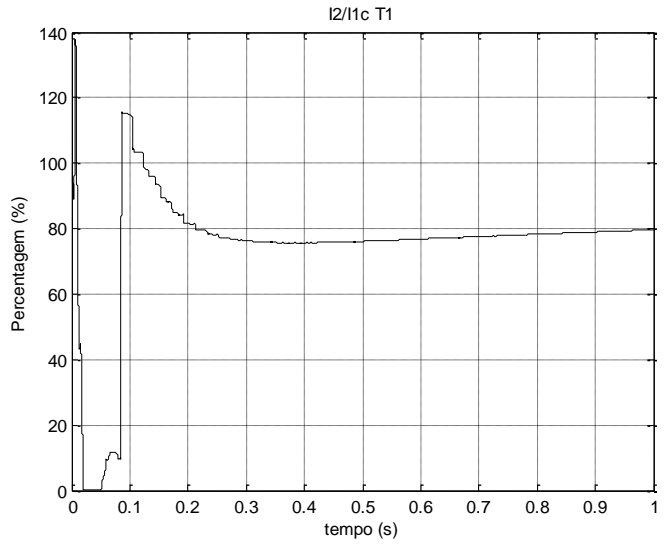
b)



e)



c)



f)

Figura 4-18 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente para a carga R.

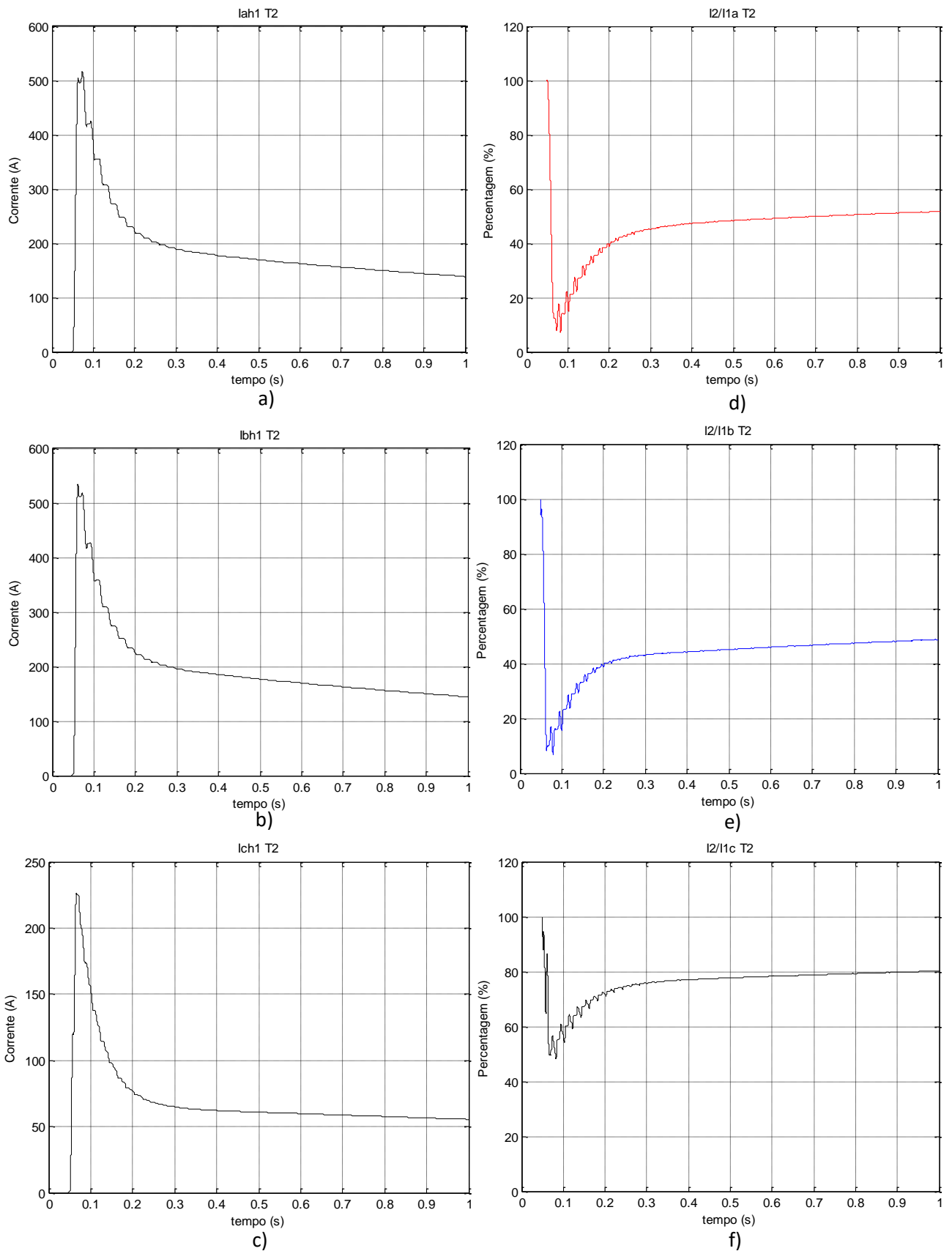


Figura 4-19 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respetivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmónico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respetivamente para a carga R.

Nas figuras Figura 4-20 a Figura 4-22 estão apresentados os resultados da simulação para as seguintes condições:

- T1 (Dd0) em estado permanente com a carga RL com Fp. de 0,8 indutivo;
- T2 (Dyn1) em vazio, com indução remanescente de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu;
- Comutação para  $\alpha_a = 180^\circ$  e  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$ ;
- Comutação a partir do instante 0,04 s.

Na Figura 4-20 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1. Na Figura 4-20 b) apresenta-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor. Na Figura 4-20 c) ilustram-se as correntes de ligação de T1, nas quais se observa o fenómeno de interdependência entre transformadores. A Figura 4-20 d) ilustra a forma de onda das correntes de alimentação de T2, as quais possuem as características típicas de correntes de ligação de transformadores.

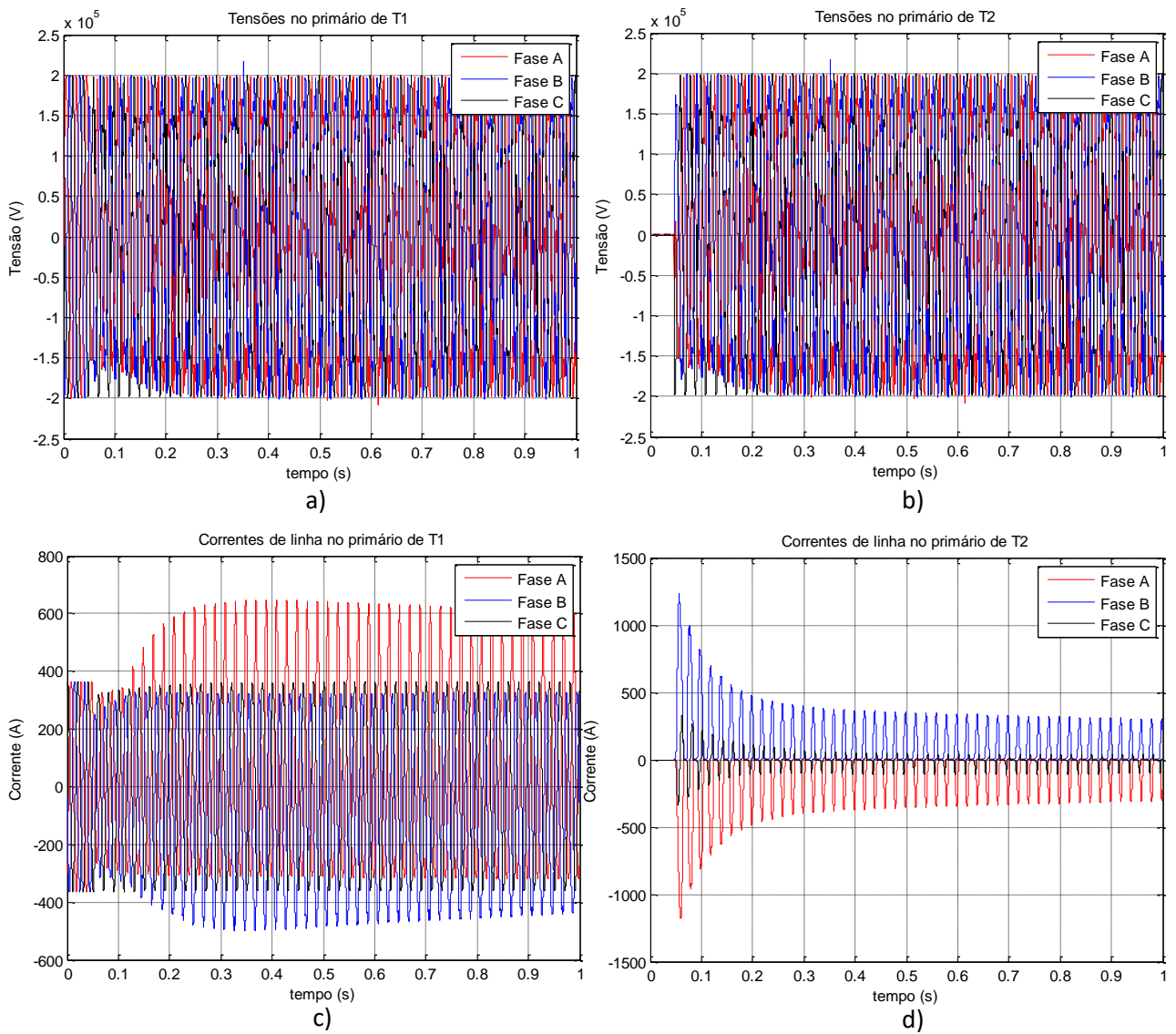
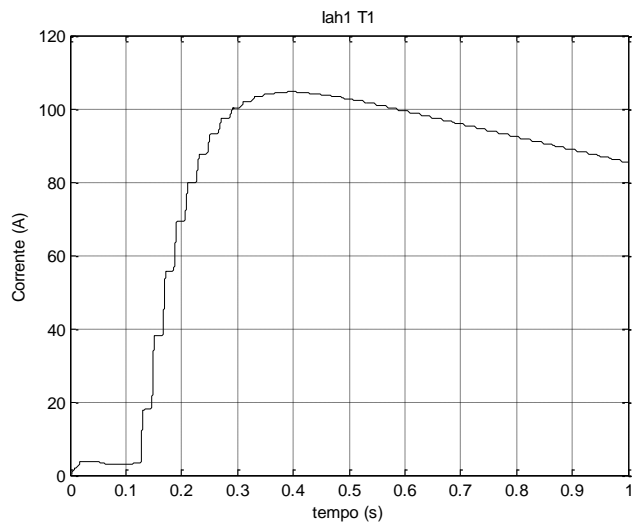
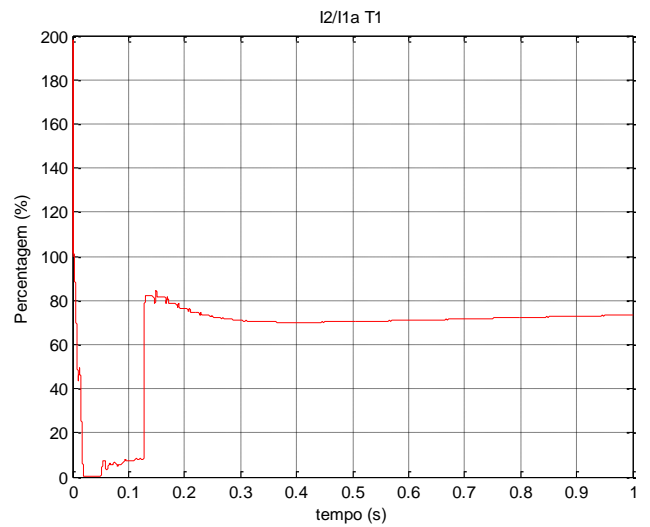


Figura 4-20 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) para a carga RL.

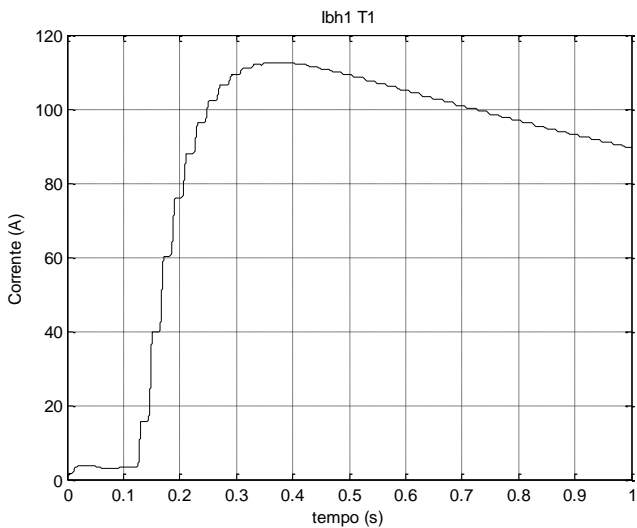
A Figura 4-21 apresenta os resultados relativos ao relé de T1. Não se verifica a ocorrência de disparos intempestivos. A Figura 4-22 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Verifica-se a ocorrência de disparo intempestivo nas fases A e B.



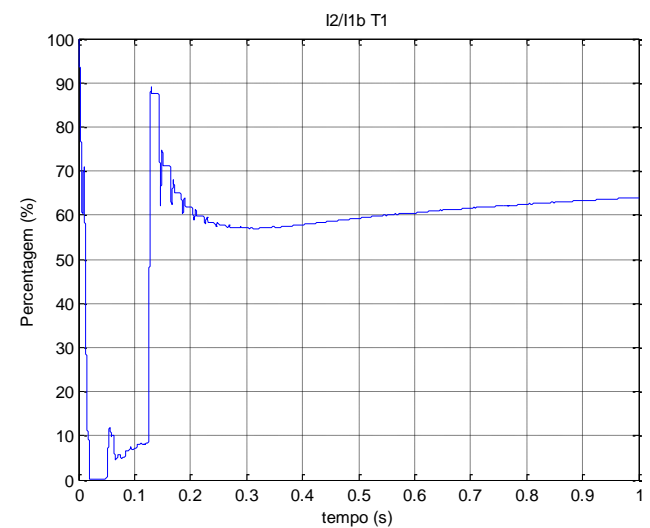
a)



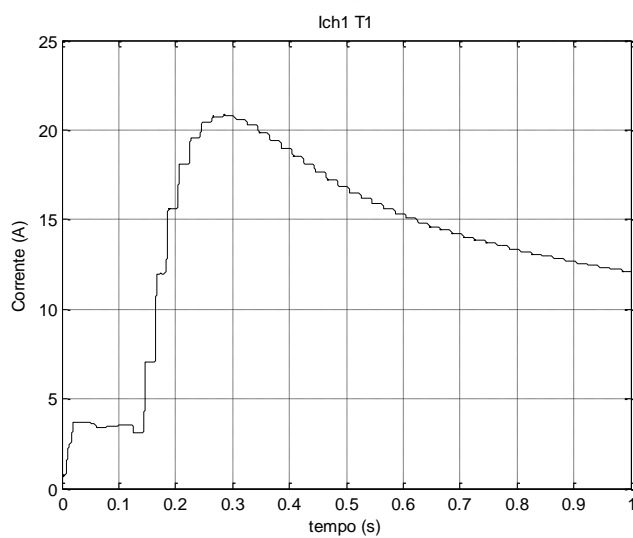
d)



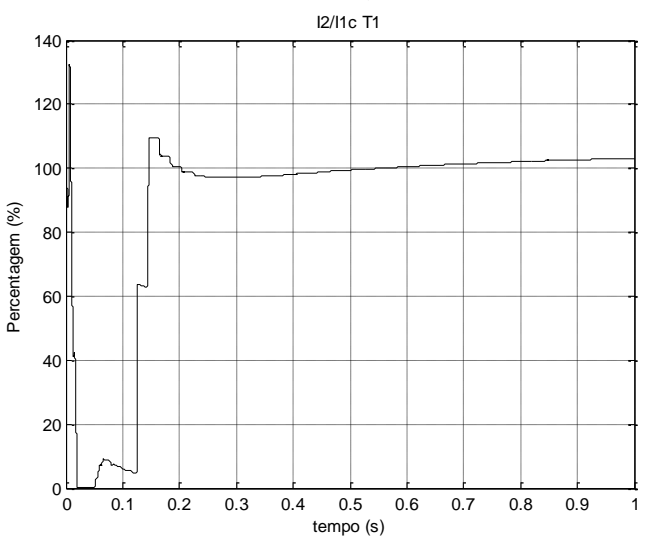
b)



e)

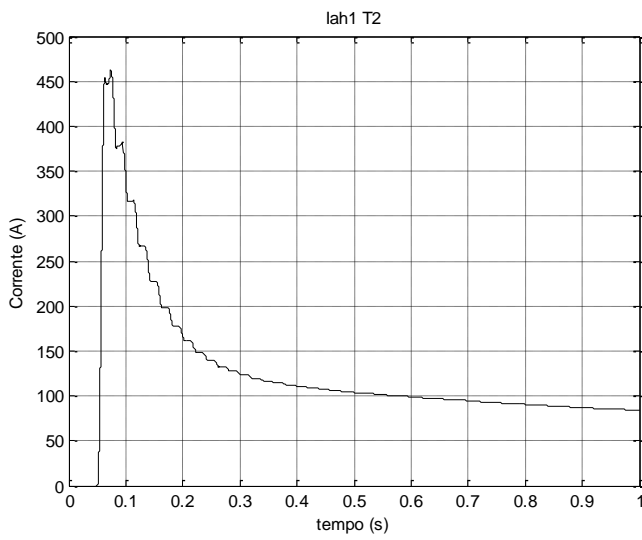


c)

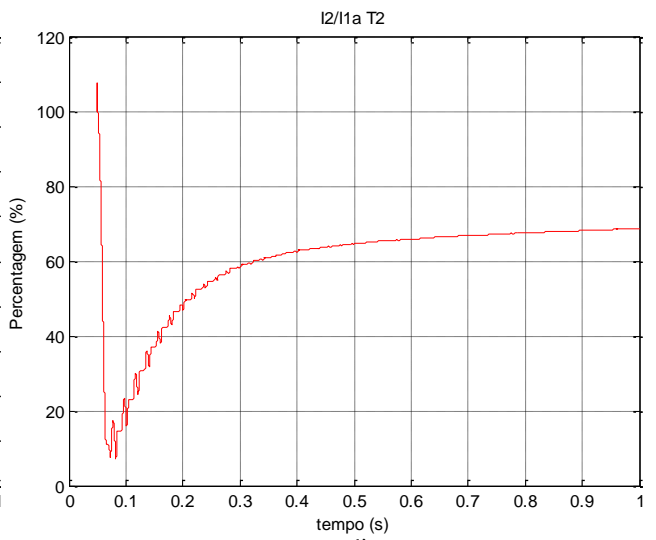


f)

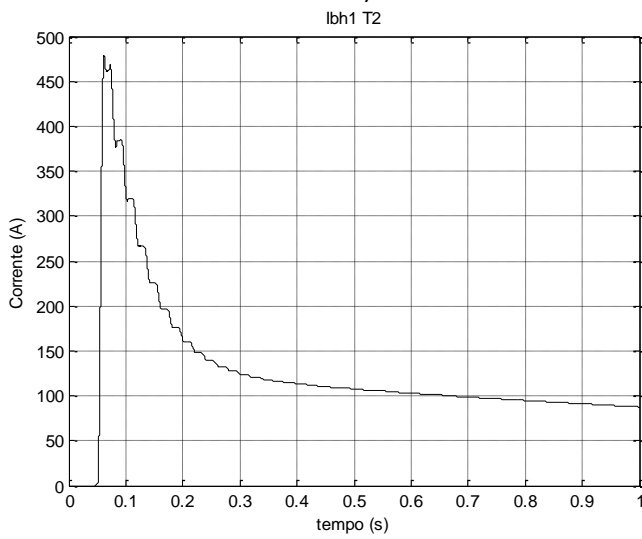
Figura 4-21 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente para a carga RL.



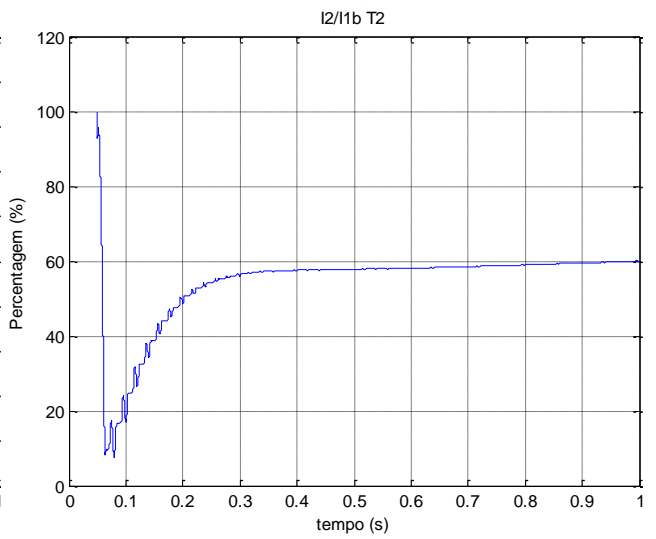
a)



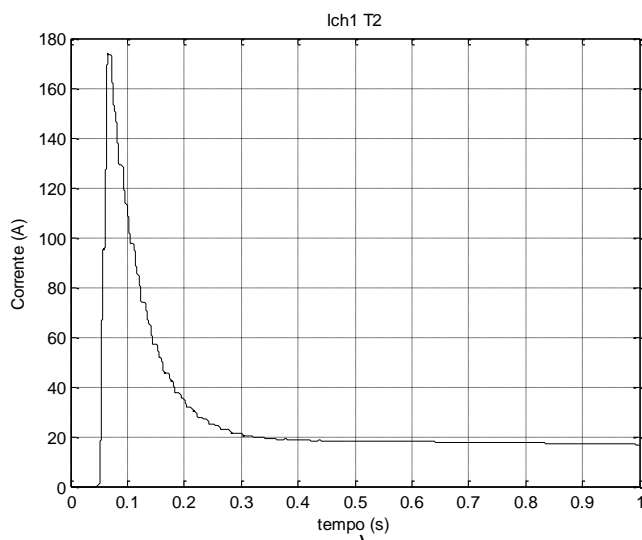
d)



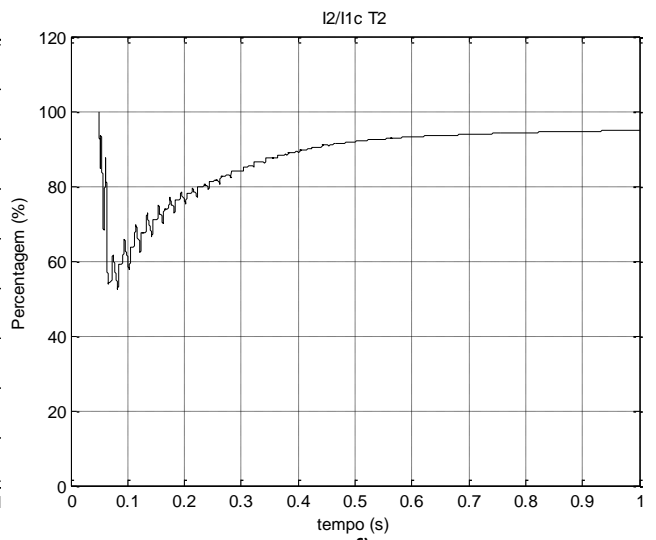
b)



e)



c)



f)

Figura 4-22 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente para a carga RL.

Nas figuras Figura 4-23 a Figura 4-25 estão apresentados os resultados da simulação para as seguintes condições:

- T1 (Dd0) em estado permanente com a carga L;
- T2 (Dyn1) em vazio, com indução remanescente de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu;
- Comutação para  $\alpha_a = 180^\circ$  e  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$ ;
- Comutação a partir do instante 0,04 s.

Na Figura 4-23 apresentam-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1 (Figura 4-23 a)), a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2 (Figura 4-23 b)), as correntes de ligação de T1 (Figura 4-23 c)) e a forma de onda das correntes de alimentação de T2 (Figura 4-23 d)). Pode-se constatar que as formas de onda presentes na Figura 4-23 são semelhantes às apresentadas na Figura 4-17.

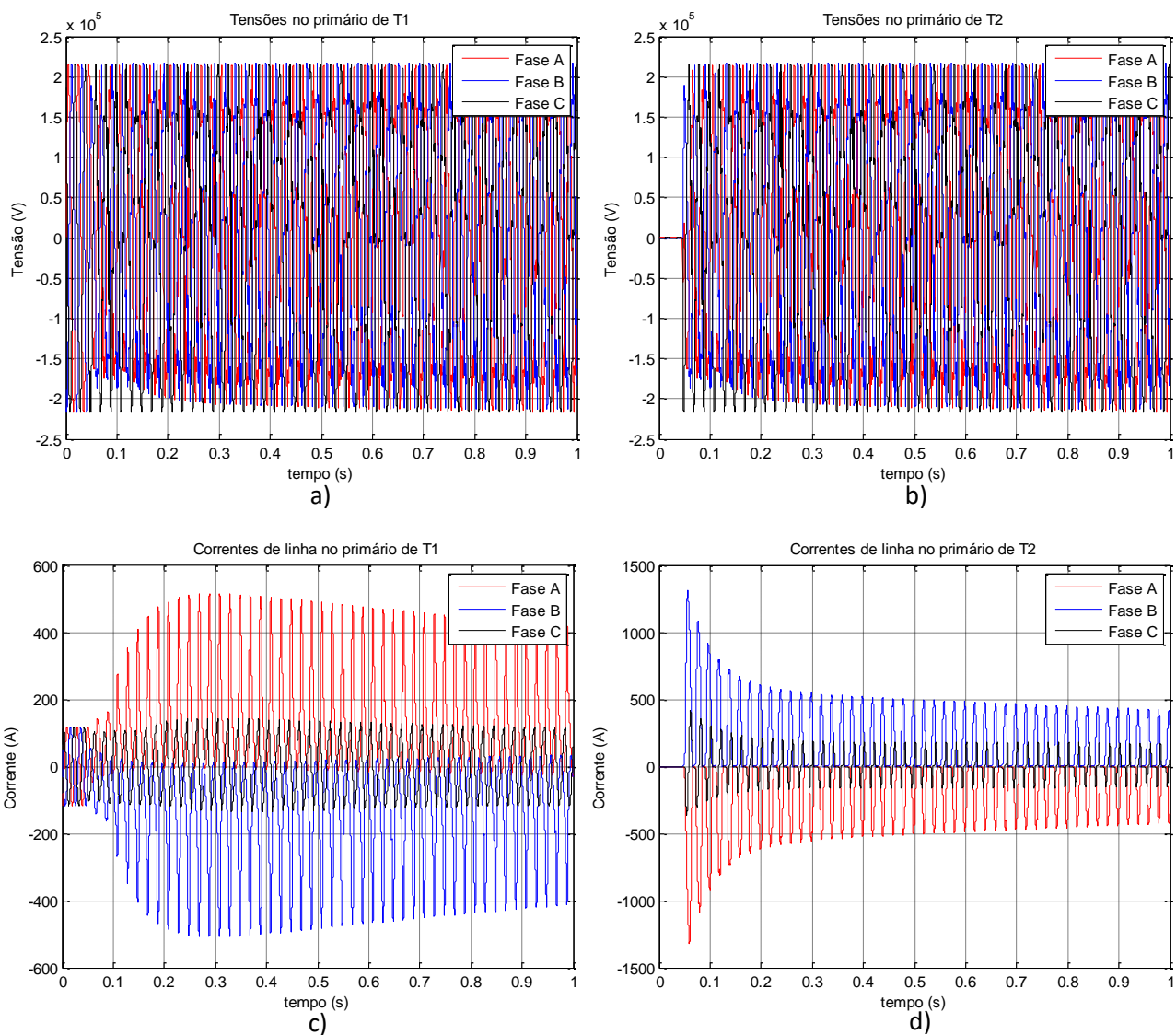


Figura 4-23 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) para a carga L.

A Figura 4-24 apresenta os resultados relativos ao relé de T1. Verifica-se que apesar dos sinais das fases A e B (Figura 4-24 a) e b)) terem amplitude suficiente para ativar a proteção do transformador não ocorrem disparos intempestivos devido à correta atuação do bloqueio harmónico (Figura 4-24 d) e e)), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

A Figura 4-25 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Verifica-se a ocorrência de disparo intempestivo nas fases A e B.

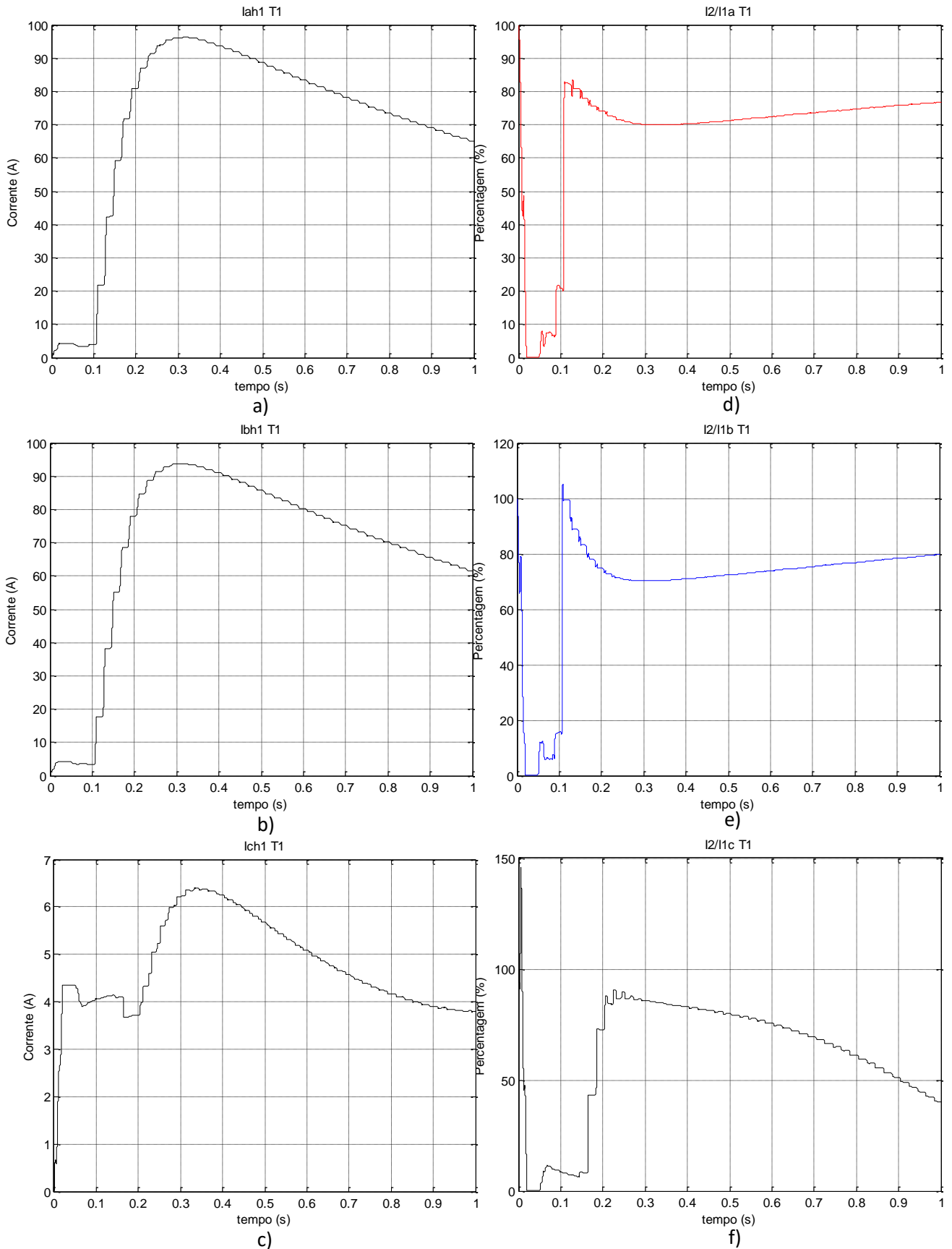


Figura 4-24 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respetivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmónico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respetivamente para a carga L.

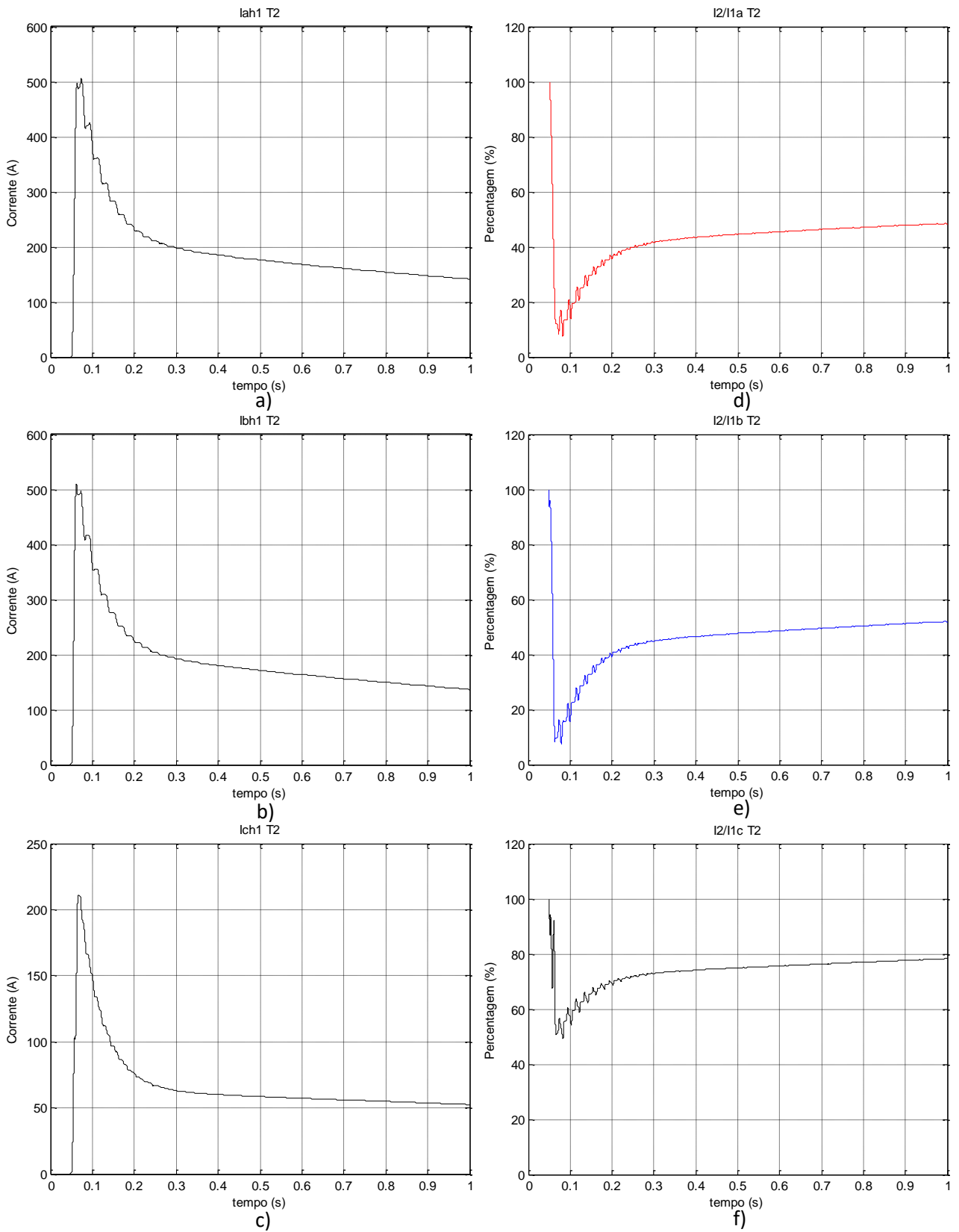


Figura 4-25 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente para a carga L.

Nas figuras Figura 4-26 a Figura 4-28 estão apresentados os resultados da simulação para as seguintes condições:

- T1 (Dd0) em estado permanente com a carga Linha de média tensão;
- T2 (Dyn1) em vazio, com indução remanescente de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu;
- Comutação para  $\alpha_a = 180^\circ$  e  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$ ;
- Comutação a partir do instante 0,04 s.

As formas de onda das tensões simples no lado primário de T1 são apresentadas na Figura 4-26 a), nestas pode-se observar uma perturbação quando se comuta T2. Na Figura 4-26 b) ilustra-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que permanecem nulas até que T2 é comutado. Na Figura 4-26 c) apresentam-se as correntes de de linha no lado do primário de T1, onde é evidente o fenómeno de interdependência quando T2 é comutado. A Figura 4-26 d) ilustra a forma de onda das correntes de ligação de T2.

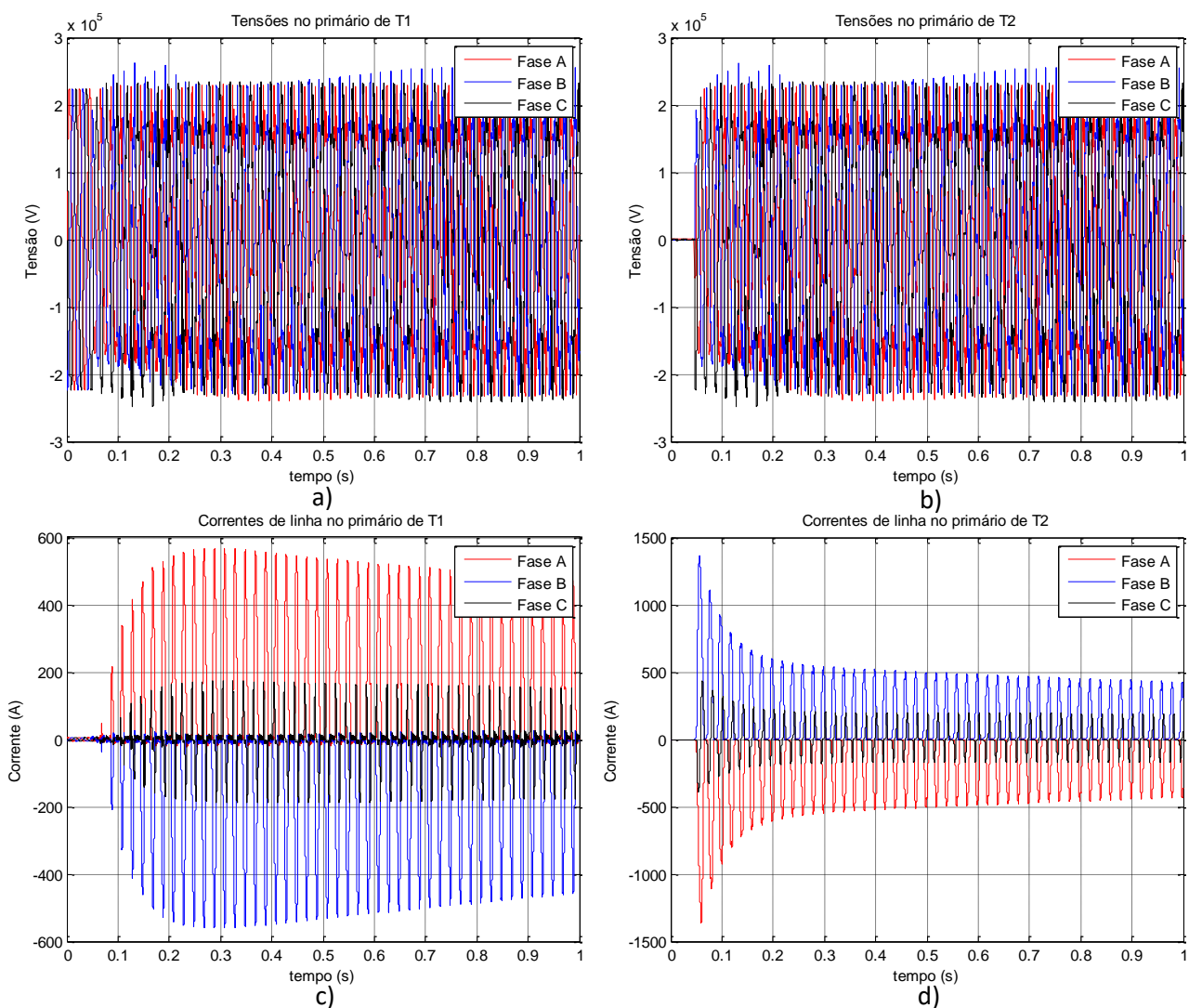


Figura 4-26 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) para a carga Linha de média tensão.

Os resultados relativos ao relé de T1 são apresentados na Figura 4-27 apresenta. Apesar de se verificar que os sinais das fases A e B (Figura 4-27 a) e b)) têm amplitude suficiente para ativar a proteção do transformador, não ocorrem disparos intempestivos devido à correta atuação do bloqueio harmónico (Figura 4-27 d) e e)).

A Figura 4-28 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Verifica-se a ocorrência de disparo intempestivo nas fases A e B.

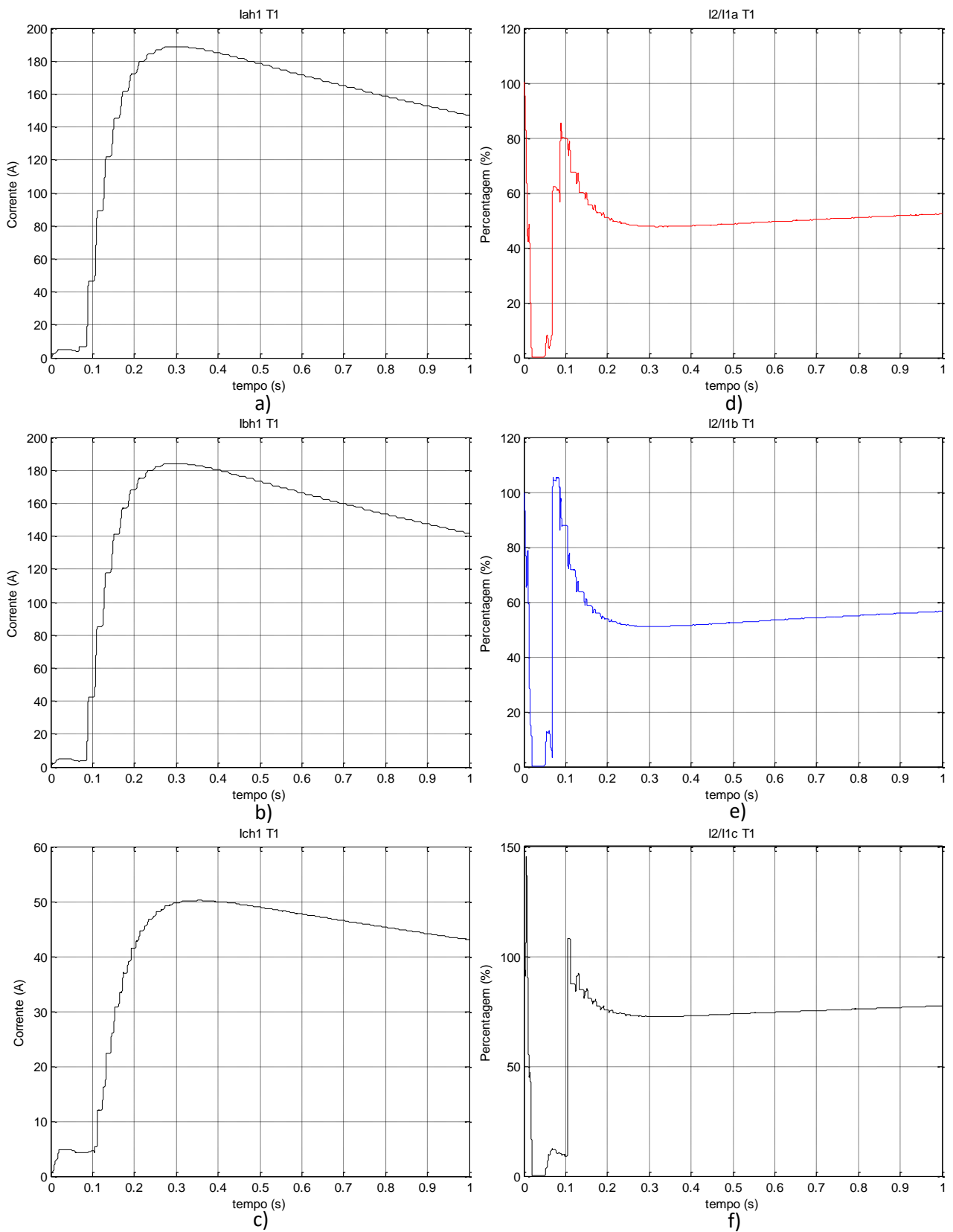


Figura 4-27 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente para a carga Linha de média tensão.

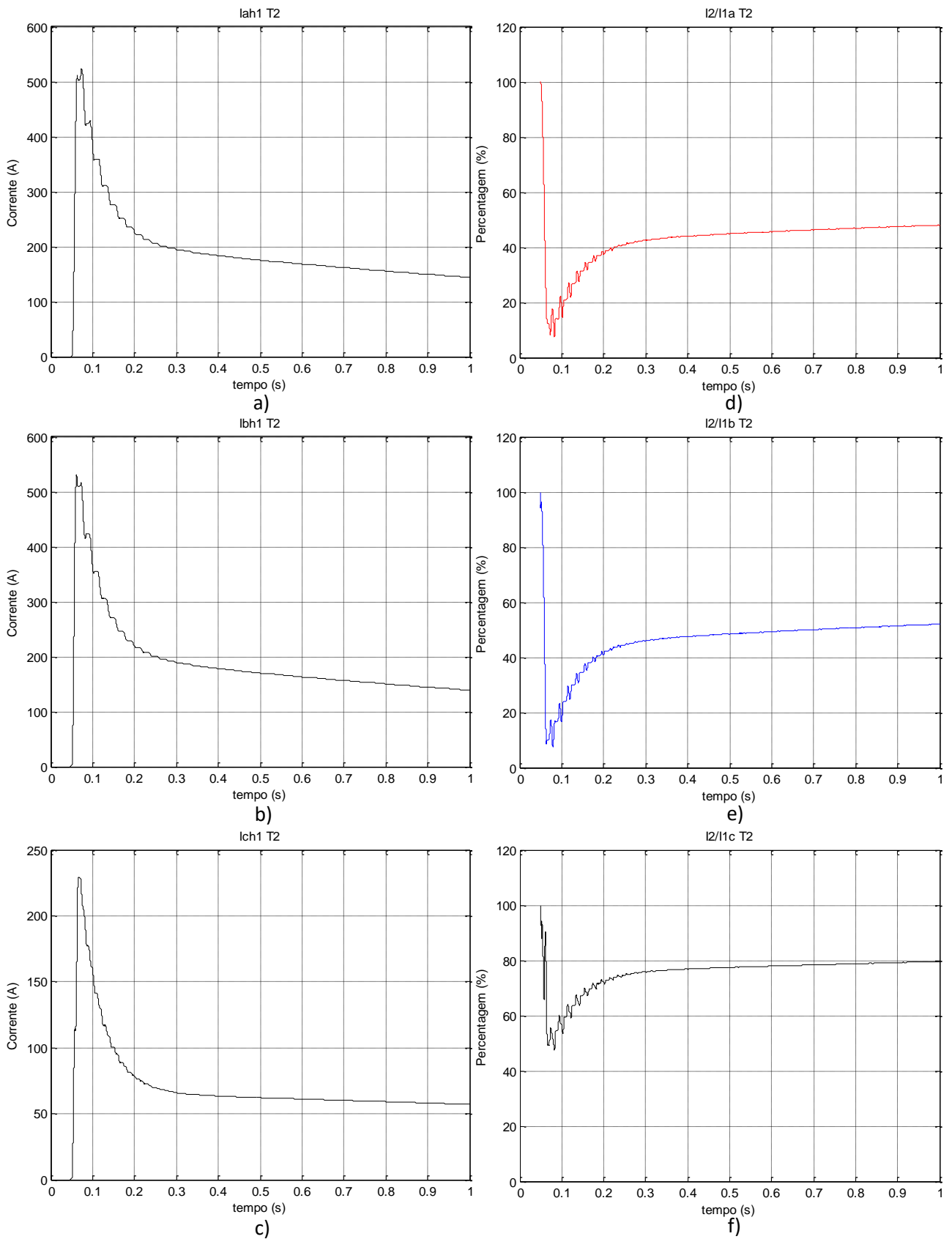


Figura 4-28 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respetivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmónico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respetivamente para a carga Linha de média tensão.

O tipo de carga não influencia significativamente o número de ocorrências de disparo intempestivo.

Ocorreram disparos intempestivos no transformador T2 para todas as cargas, nas fases A e B. Os períodos em que são detetadas as condições de disparo têm aproximadamente a mesma duração ( $\approx 30$  ms).

#### 4.6. Comutação síncrona

Foi analisada a influência da comutação síncrona de um transformador quando outro se encontra ligado ao mesmo barramento. Utilizou-se a ligação ao mesmo barramento dos dois transformadores: um foi comutado (T2) e outro (T1) encontrava-se previamente ligado.

Na Tabela 4-, são apresentadas as situações onde ocorrem disparos intempestivos para as seguintes condições:

- Transformador T1 (Dyn1) permanentemente alimentado;
- T1 em vazio;
- Transformador T2 (Dyn1) é comutado em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c$ ;
- T2 em vazio;
- T2 com indução remanescente de  $B_{ra} = -0,866$  pu;  $B_{rb} = 0$  pu e  $B_{rc} = 0,866$  pu.

Verifica-se que só existe disparos intempestivos em T2, para  $\alpha_a = 120^\circ$  e  $\alpha_a = 150^\circ$ .

Tabela 4-5 Comutação síncrona T1 Dyn1 T2 Dyn1

$\alpha_a=\alpha_b=\alpha_c$	0°	30°	60°	90°	120°	150°
T1	I2/I1a (%)					
	$\Delta t_a$ (s)					
	Iah1minef (A)					
	I2/I1b (%)					
	$\Delta t_b$ (s)					
	Ibh1minef (A)					
	I2/I1c (%)					
	$\Delta t_c$ (s)					
	Ich1minef (A)					
T2	I2/I1a (%)				16,14	9,581
	$\Delta t_a$ (s)				0,01061	0,03101
	Iah1minef (A)				399,3	409,5
	I2/I1b (%)				18,19	19,73
	$\Delta t_b$ (s)				0,00961	0,00795
	Ibh1minef (A)				407	396,5
	I2/I1c (%)					
	$\Delta t_c$ (s)					
	Ich1minef (A)					

Devido ao desfasamento de 120° entre fases, quando a comutação é propícia a causar o disparo intempestivo para uma fase, não o é para as outras.

Foram realizadas simulações para diversos tipos de enrolamentos e induções remanescentes, resultados esses que se apresentam no anexo 1 fornecido em formato digital.

Nas figuras Figura 4-29 a Figura 4-31 apresentam-se os resultados obtidos através de simulação para as seguintes condições:

- Transformador T1 (Dyn) se encontra previamente ligado;
- T1 e T2 em vazio;
- Transformador T2 (Dyn) é comutado em  $\alpha_a=\alpha_b=\alpha_c=120^\circ$ ;
- Comutação a partir de 0,04 s;
- T2 com indução remanescente  $B_{ra}=-0,866$  pu,  $B_{rb}=0$  pu e  $B_{rc}=0,866$  pu.

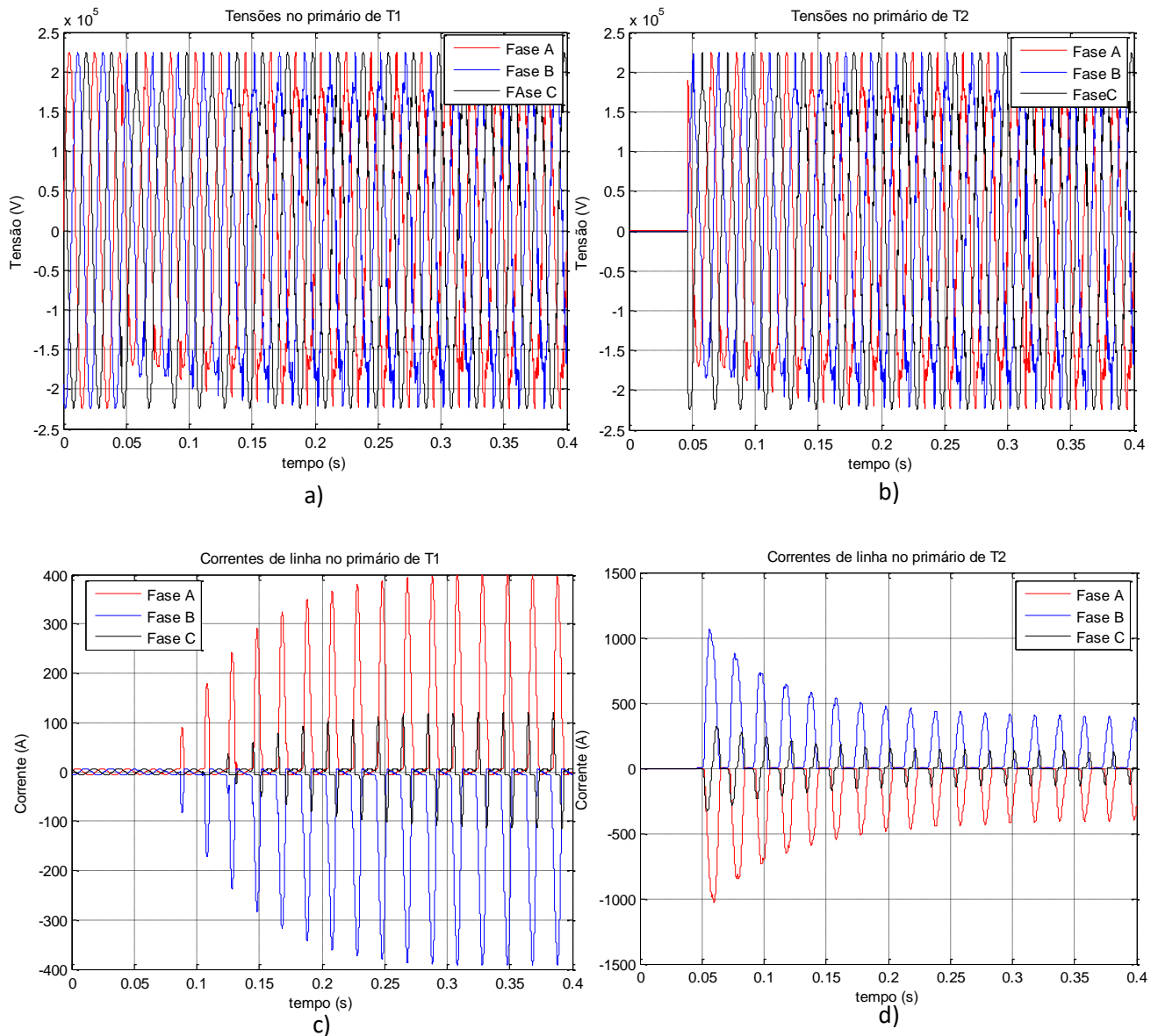


Figura 4-29 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) para o caso de comutação síncrona.

O transformador T2 apresenta correntes de ligação elevadas (Figura 4-29), sendo a menor na fase C, devido à indução remanescente e ângulo de comutação utilizados neste caso. Devido às correntes de ligação de T2 ocorre uma perturbação na tensão de alimentação (Figura 4-29), que por sua vez provoca o aparecimento de correntes de interdependência. Estas possuem uma razão  $I_2/I_1$ , com valor elevado (Figura 4-30) pelo que não há disparos em T1. Em T2 as correntes de ligação com maior amplitude têm componentes harmônicas de valor elevado, o que provoca a ocorrência de condições de disparo nas fases A e B, Figura 4-31.

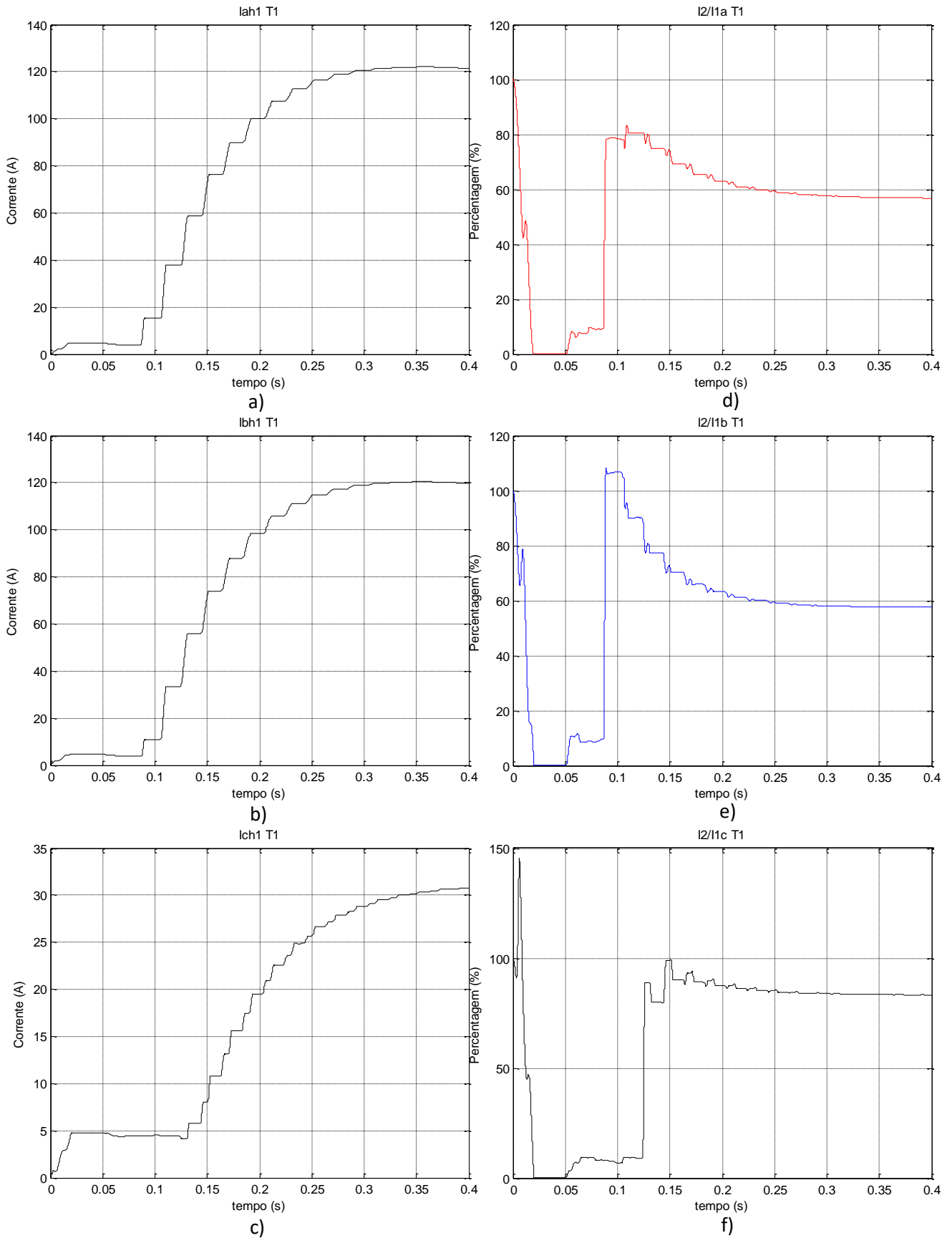


Figura 4-30 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente para o caso de comutação síncrona.

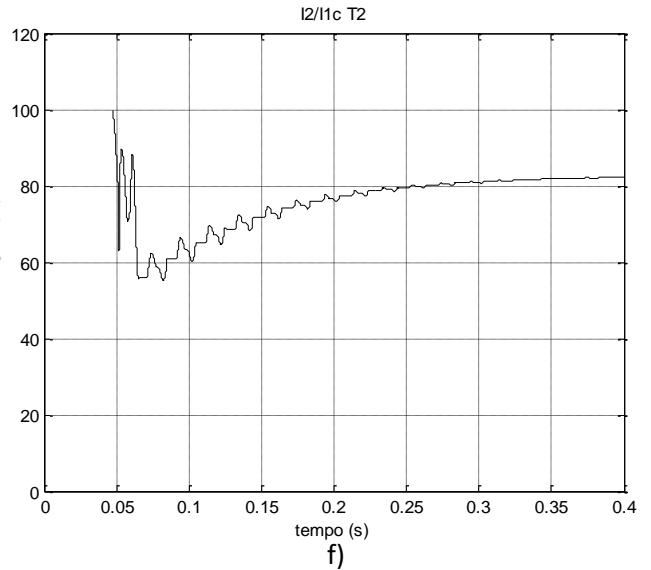
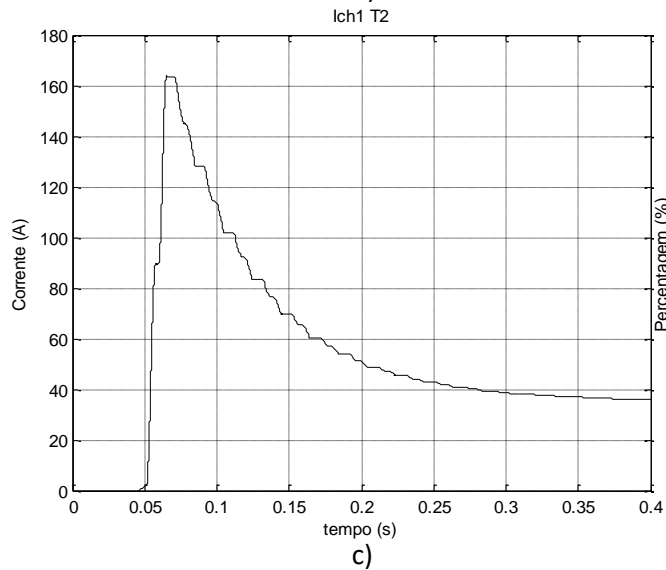
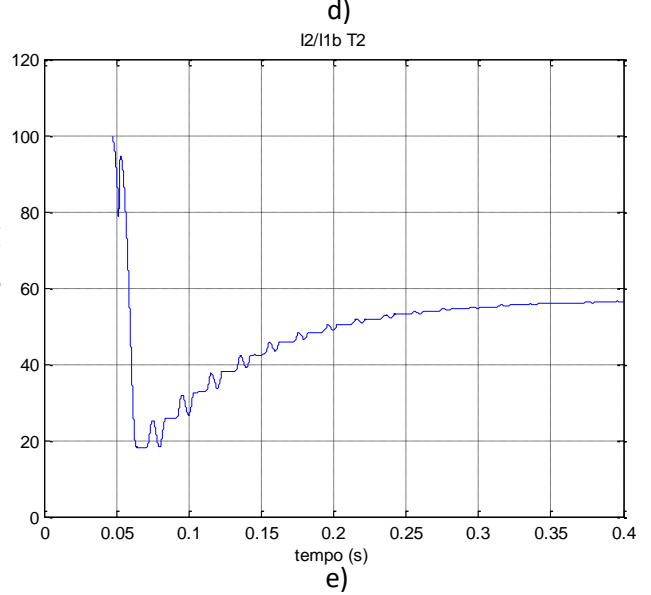
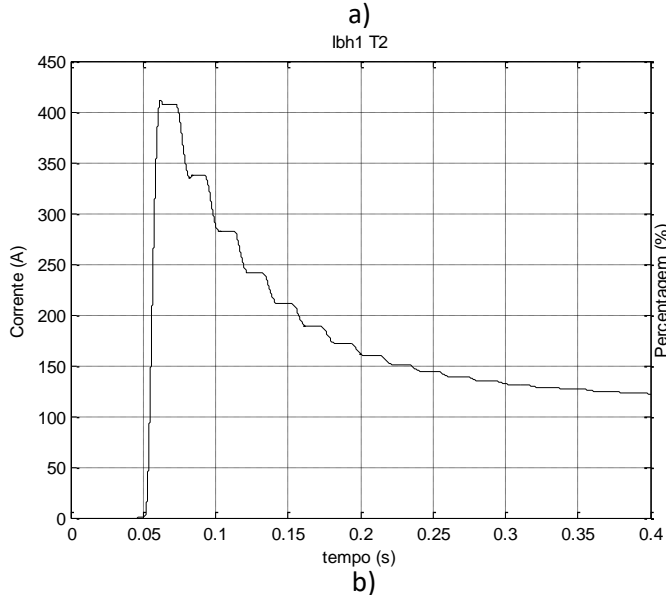
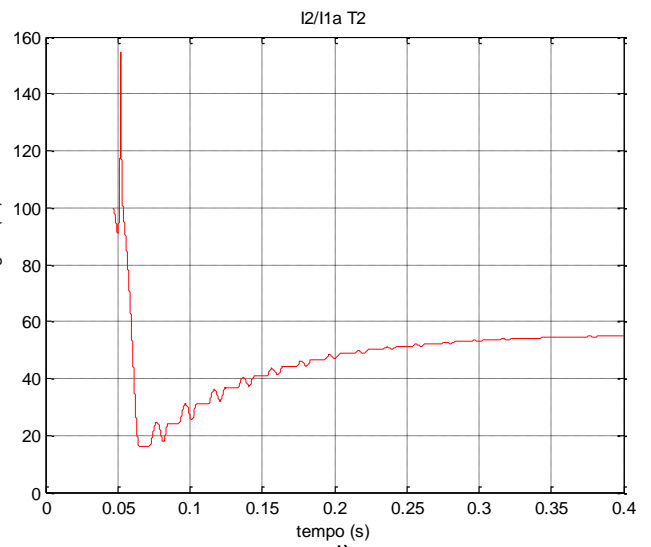
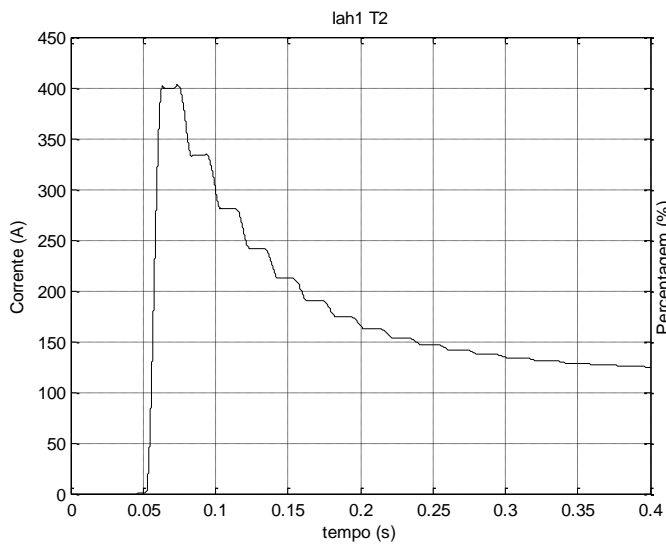


Figura 4-31 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente para o caso de comutação síncrona.

#### 4.7. Comutação assíncrona

A comutação assíncrona provoca um desequilíbrio no sistema de tensões que alimenta o transformador, desequilíbrio que é uma das causas de sobrecorrentes transitórias de excitação. Para analisar este fenómeno, foi utilizado o modelo da Figura 4-6.

Na Tabela 4- apresentam-se os resultados das simulações referentes à comutação assíncrona de um transformador (T2) (Ynyn0), quando T1 (Ynyn0) já se encontra em funcionamento, nas seguintes condições:

- Fecho do interruptor em  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$ , com vários casos para  $\alpha_a$ ;
- Transformador T1 em regime permanente;
- T1 em vazio;
- Indução remanescente em T2 de  $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu;
- T2 em vazio.

Tabela 4-5 Comutação assíncrona de T2 (Ynyn0), quando T1 (Ynyn0) se encontra em funcionamento.

		$\alpha_a=120^\circ$	$\alpha_a=130^\circ$	$\alpha_a=140^\circ$	$\alpha_a=160^\circ$	$\alpha_a=170^\circ$	$\alpha_a=180^\circ$
T1	I2/I1a (%)						
	$\Delta t_a$ (s)						
	Iah1minef (A)						
	I2/I1b (%)						
	$\Delta t_b$ (s)						
	Ibh1minef (A)						
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
	Ich1minef (A)						
T2	I2/I1a (%)	19,67	16,7	13,92	8,593	7,579	7,145
	$\Delta t_a$ (s)	0,00115	0,01042	0,01143	0,03086	0,03114	0,03126
	Iah1minef (A)	324	433,5	463,8	412,2	419,7	423
	I2/I1b (%)						
	$\Delta t_b$ (s)						
	Ibh1minef (A)						
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
	Ich1minef (A)						

Nestas condições só ocorrem disparos intempestivos no transformador T2, tendo os respetivos rácios  $I_2/I_1$  na fase A valores reduzidos ( $\approx 8\%$ ) para  $\alpha_a=160^\circ$  a  $\alpha_a=180^\circ$ .

Foram realizadas simulações para diversos tipos de enrolamentos e induções remanescentes, resultados esses que se apresentam no anexo 1 fornecido em formato digital.

Nas figuras Figura 4-32 a Figura 4-34 apresentam-se os resultados obtidos através de simulação para as seguintes condições:

- T1 (Ynyn0) encontra-se previamente ligado;
- T1 em vazio;
- T2 (Ynyn0) em vazio;
- T2 com indução remanescente de  $B_{ra} = -0,866$  pu,  $B_{rb} = 0$  pu e  $B_{rc} = 0,866$  pu;
- T2 comutado em  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$  e  $\alpha_a = 180^\circ$ ;
- Comutação a partir do instante 0,04 s.

Nesta situação as fases A, B e C de T2 são ligadas simultaneamente e só após  $30^\circ$  a fase A é comutada.

Na Figura 4-32 ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1 (Figura 4-32 a)), a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2 (Figura 4-32 b)), as correntes de ligação de T1 (Figura 4-32 c)) e a forma de onda das correntes de alimentação de T2 (Figura 4-32 d)).

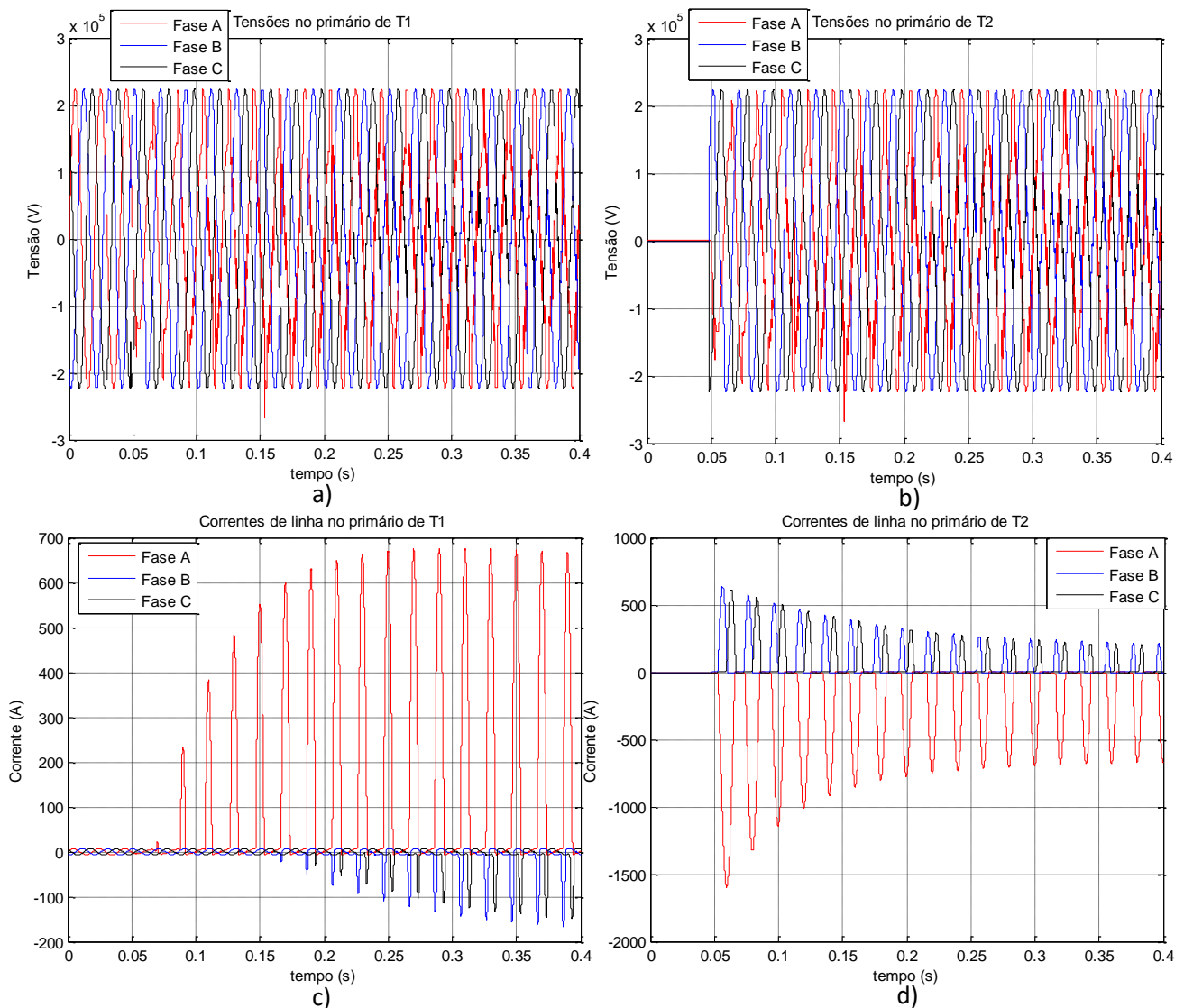


Figura 4-32 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) para o caso de comutação assíncrona.

A Figura 4-33 apresenta os resultados relativos ao relé de T1. Não se verifica a ocorrência de disparos intempestivos apesar do sinal da fase A (Figura 4-33 a) ter amplitude suficiente para ativar a proteção do transformador. No entanto o bloqueio harmónico atua corretamente, Figura 4-33 d), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

A Figura 4-34 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Verifica-se a ocorrência de disparo intempestivo na fase A.

As condições de comutação e indução remanescente em T2 provoca correntes elevadas em T2 e T1. No entanto só ocorrem condições de disparo (intempestivo) em T2.

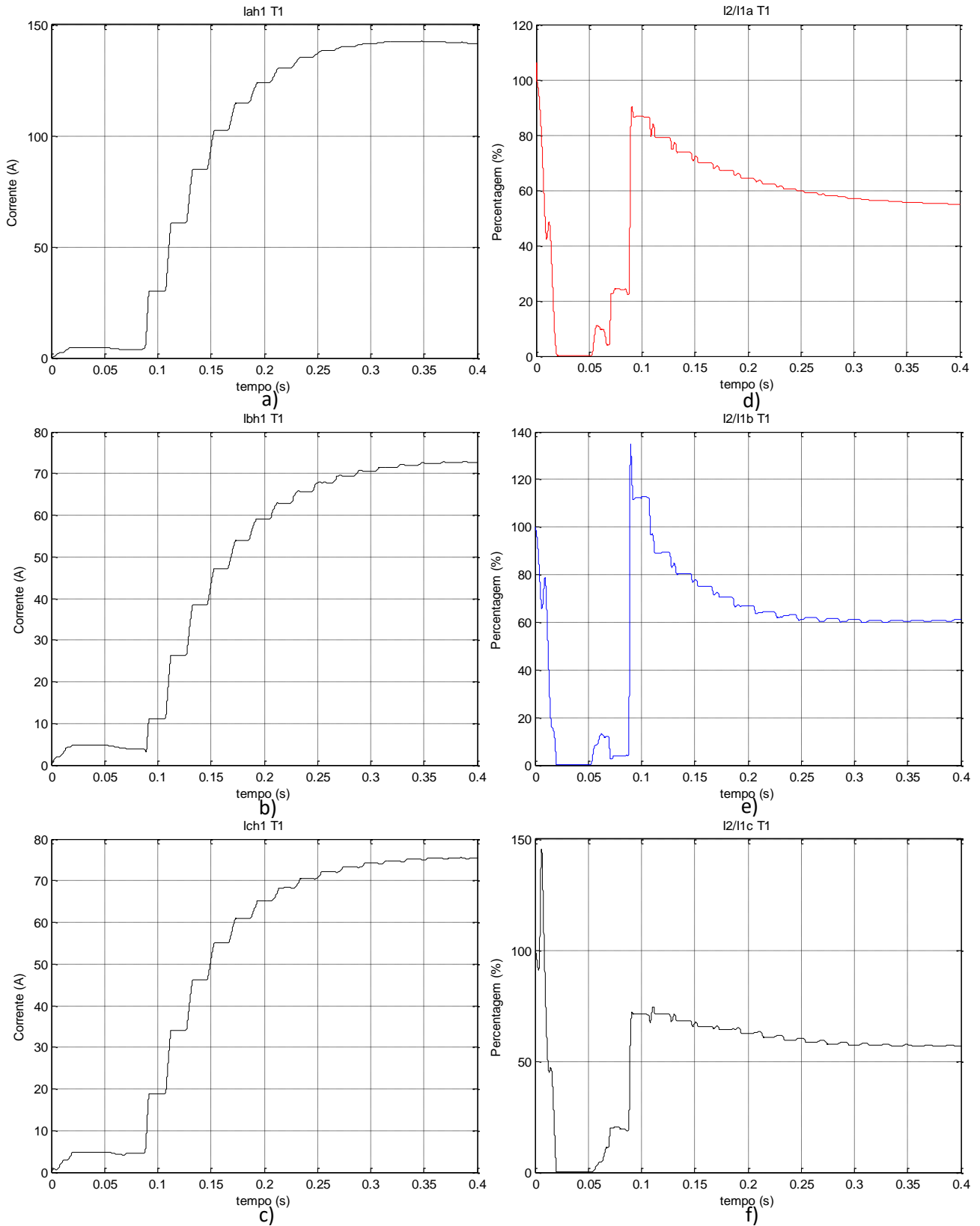


Figura 4-33 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente para o caso de comutação assíncrona.

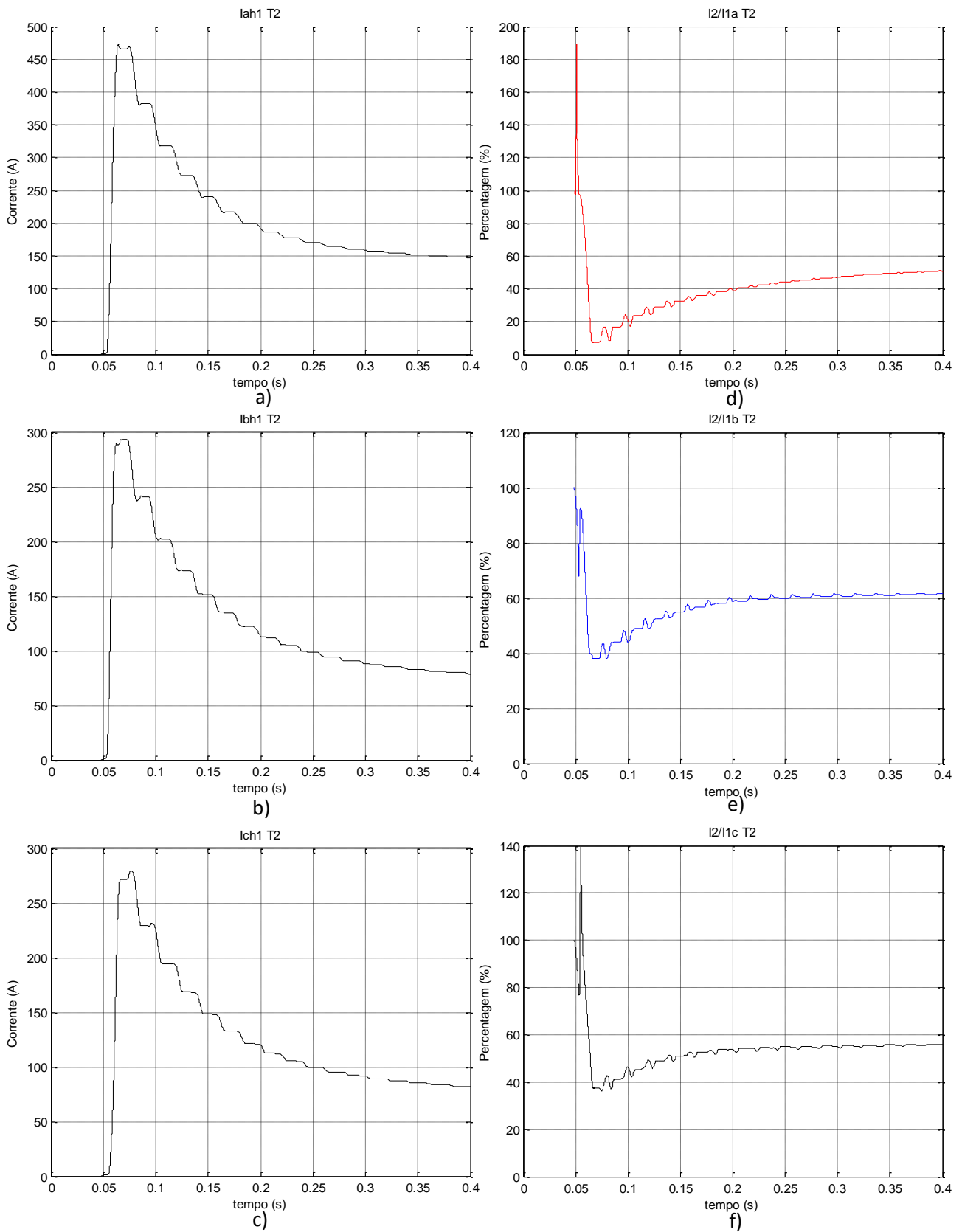


Figura 4-34 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente para o caso de comutação assíncrona.

#### 4.8. Tipos de ligação de enrolamentos

Para analisar a influência do tipo de ligação dos enrolamentos, foi utilizado o modelo da Figura 4-6.

Na Tabela 4-6 apresentam-se os resultados das simulações referentes à comutação assíncrona de um transformador (T2), quando T1 já se encontra em funcionamento, nas seguintes condições:

- Fecho do interruptor em  $\alpha_a = 180^\circ$  e  $\alpha_b = \alpha_c = 150^\circ$ ;
- T1 em estado permanente e em vazio;
- Indução remanescente em T2 de  $B_{ra} = -0,866$  pu,  $B_{rb} = 0$  pu e  $B_{rc} = 0,866$  pu;
- T2 em vazio.

Tabela 4-6 Tipos de ligação de enrolamentos.

	T1/T2	Dd/Dyn	Dd/Ynyn	Dyn/Dyn	Dyn/Ynyn	Ynd/Dyn	Ynd/Ynyn	Ynyn/Dyn	Ynyn/Ynyn
T1	I2/I1a (%)								
	$\Delta t_a$ (s)								
	Iah1minef (A)								
	I2/I1b (%)								
	$\Delta t_b$ (s)								
	Ibh1minef (A)								
	I2/I1c (%)								
	$\Delta t_c$ (s)								
T2	Ich1minef (A)								
	I2/I1a (%)	7,454	7,271	7,454	7,271	7,462	7,537	7,46	7,275
	$\Delta t_a$ (s)	0,0321	0,0314	0,03207	0,0314	0,03206	0,03114	0,03202	0,03141
	Iah1minef (A)	442,9	379	442,9	379	443	388,1	443	379,1
	I2/I1b (%)	15,28		15,28		15,28		15,28	
	$\Delta t_b$ (s)	0,01017		0,01017		0,01017		0,01017	
	Ibh1minef (A)	422,5		422,5		422,5		422,5	
	I2/I1c (%)								
$\Delta t_c$ (s)									
	Ich1minef (A)								

Foram realizadas simulações para diversos tipos de enrolamentos e induções remanescentes, resultados esses que se apresentam no anexo 1 fornecido em formato digital.

Nas figuras Figura 4-35 a Figura 4-37 apresentam-se os resultados obtidos através de simulação para as seguintes condições:

- Transformador T1 se encontra previamente ligado (Ynyn0), em vazio;
- Transformador T2 (Dyn1) é comutado em  $\alpha_b=\alpha_c=150^\circ$  e  $\alpha_a=180^\circ$ ;
- T2 em vazio;
- Comutação a partir de 0,04 s;
- T2 com  $B_{ra}=-0,866$  pu,  $B_{rb}=0$  pu e  $B_{rc}=0,866$  pu.

Nesta situação as fases B e C do transformador T2 são ligadas simetricamente e só após  $30^\circ$  a fase A é comutada.

Na Figura 4-35 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1, verificando-se que existe uma perturbação após a ligação de T2 (devido à queda de tensão na impedância da fonte). Na Figura 4-35 b) apresenta-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor. Na Figura 4-35 c) ilustram-se as correntes de ligação de T1, nas quais se observa o fenómeno de interdependência entre transformadores. A Figura 4-35 d) ilustra a forma de onda das correntes de alimentação de T2, as quais possuem as características típicas de correntes de ligação de transformadores.

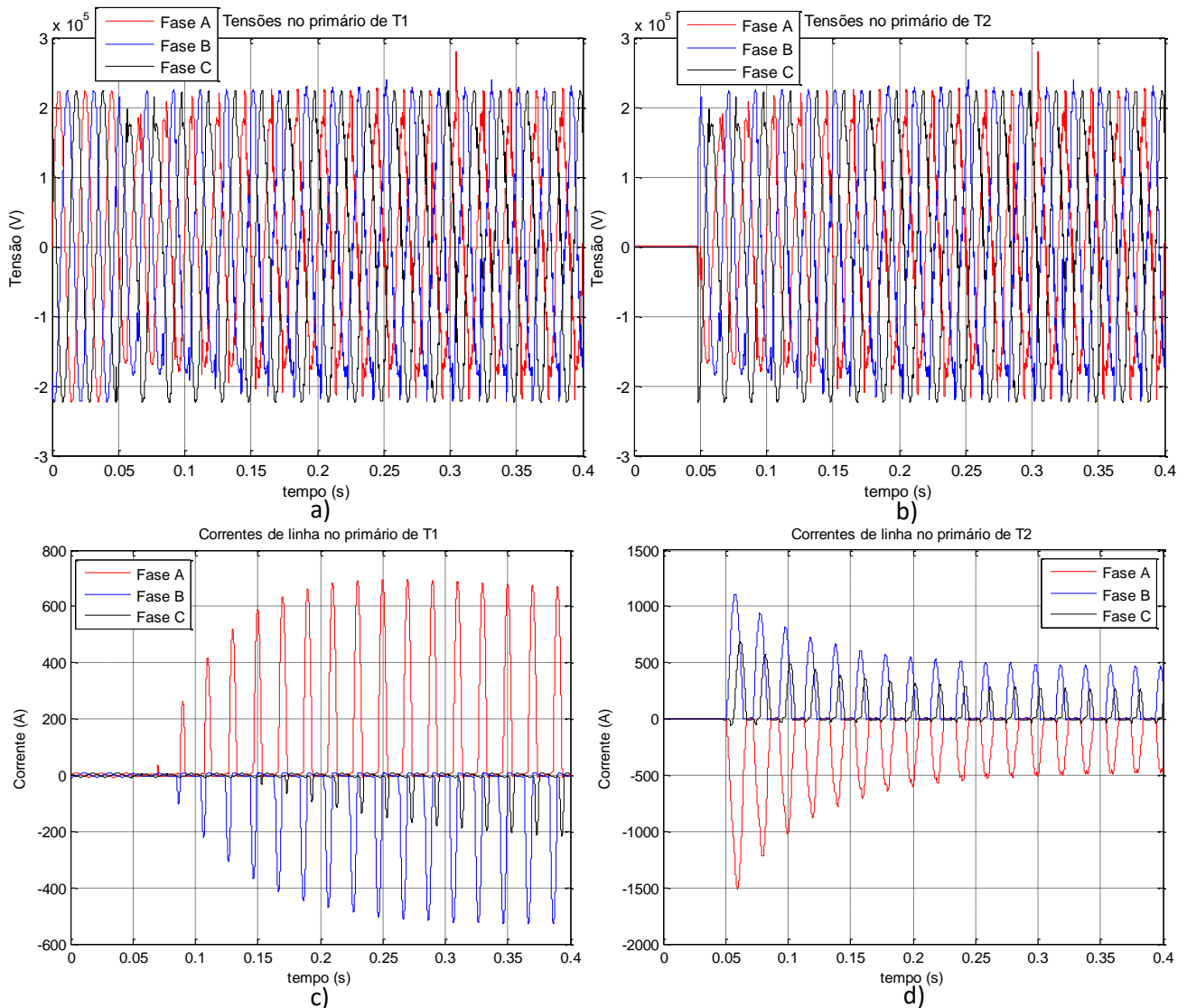


Figura 4-35 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d).

A Figura 4-36 apresenta os resultados relativos ao relé de T1. Não se verifica a ocorrência de disparos intempestivos apesar dos sinais das fases A, B e C (Figura 4-36 a), b) e c)) terem amplitude suficiente para ativar a proteção do transformador. No entanto o bloqueio harmónico atua corretamente, (Figura 4-36 d), e) e f)), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

A Figura 4-37 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Verifica-se a ocorrência de disparo intempestivo nas fases A e B. As condições de comutação e indução remanescente em T2 provoca correntes elevadas em T2 e T1. No entanto só ocorrem condições de disparo (intempestivo) em T2. Devido à indução remanescente e aos desfasamentos em T2, ocorrem situações de disparo para as suas fases A e B.

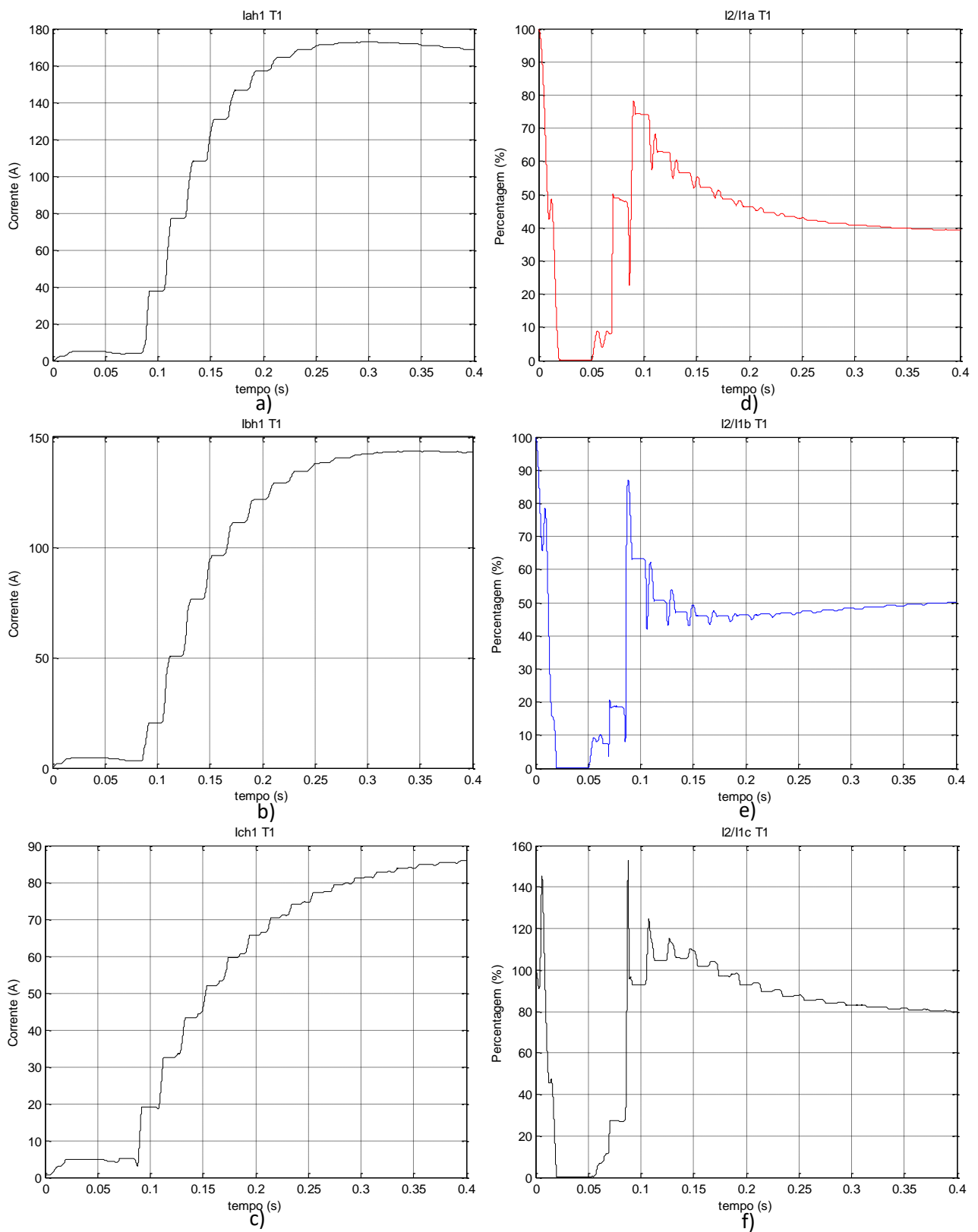


Figura 4-36 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente.

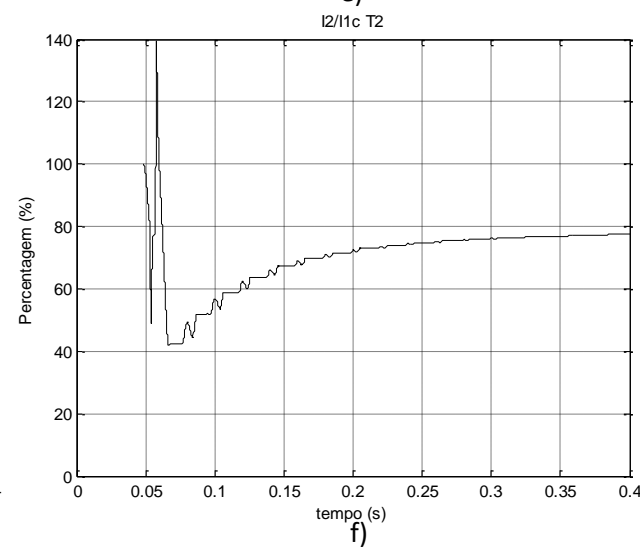
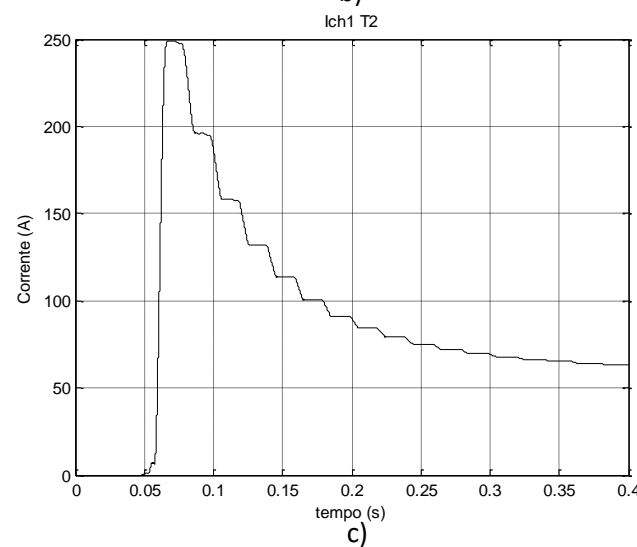
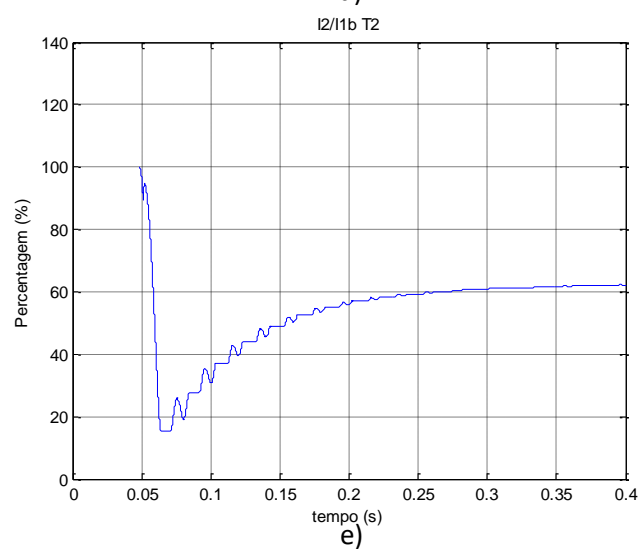
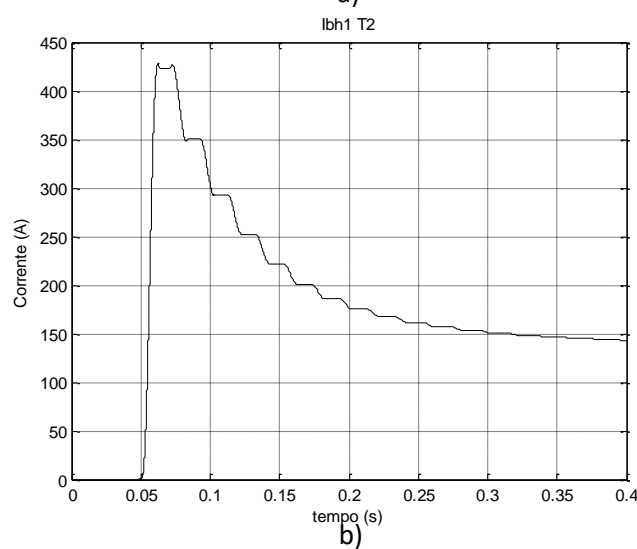
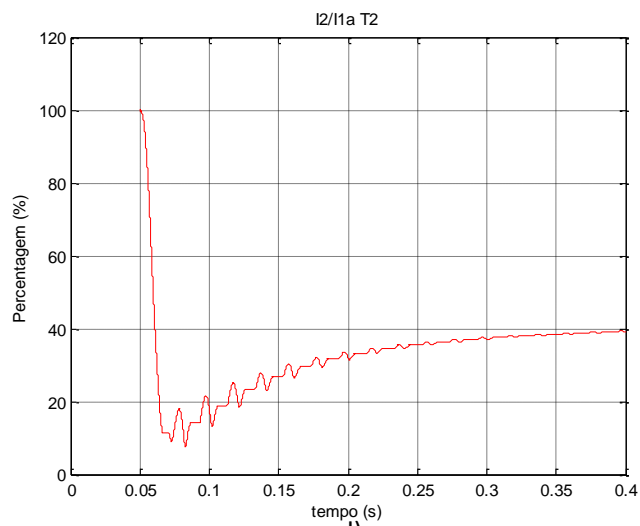
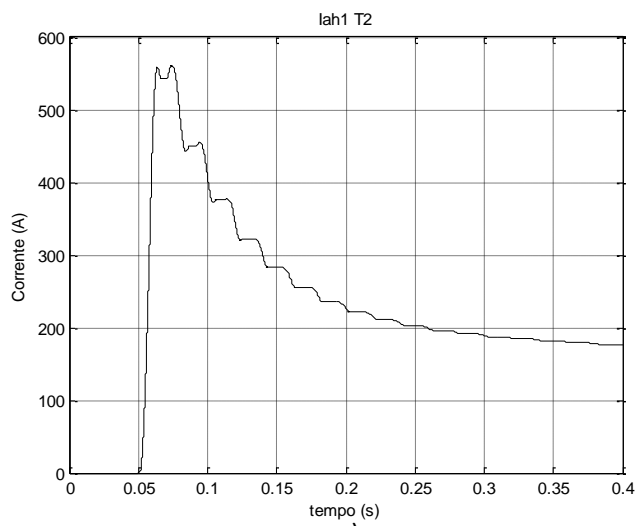


Figura 4-37 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respetivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmónico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respetivamente.

#### 4.9. Cavas

As cavas de tensão são um fenômeno em que ocorre uma diminuição brusca da tensão para valores entre 90 % e 1 % da tensão nominal, e de seguida o restabelecimento da tensão depois de um curto período de tempo. Para analisar este fenômeno foi utilizado o modelo da Figura 4-38, onde se utilizam duas fontes, uma para a situação de funcionamento normal e a outra para a situação de cava.

Os ângulos de início da cava nas fases A, B e C ( $\beta_a$ ,  $\beta_b$  e  $\beta_c$ ) são definidos a partir da mesma origem (início da alternância positiva da tensão na fase A) da mesma forma que os ângulos de comutação na Figura 4-2.

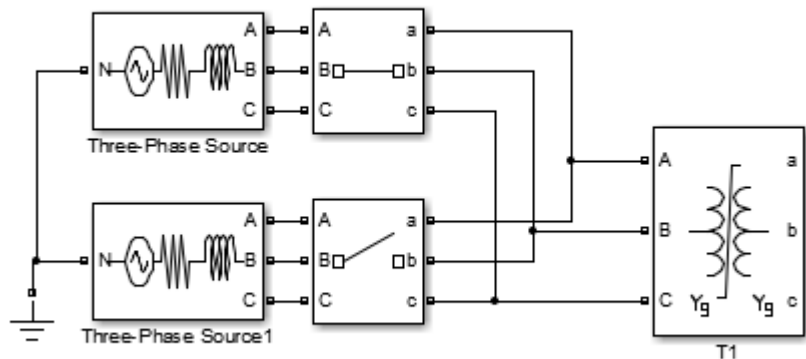


Figura 4-38 Esquema para a introdução de cavas.

Na Tabela 4- apresentam-se os resultados das simulações referentes à introdução de cavas nas seguintes condições:

- Introdução da cava em  $\beta_a = \beta_b = \beta_c$ ;
- Duração da cava de 90 ms;
- Tensão durante a cava de 1% da tensão nominal;
- Transformador T1 (Dyn1) em vazio;
- T1 em estado permanente ( $B_{ra} = -0.866$  pu,  $B_{rb} = 0$  pu e  $B_{rc} = 0,866$  pu).

Tabela 4-7 Cavas Dyn

		$\beta_a=0^\circ$	$\beta_a=30^\circ$	$\beta_a=60^\circ$	$\beta_a=90^\circ$	$\beta_a=120^\circ$	$\beta_a=150^\circ$
T1	I2/I1a (%)						4,964
	$\Delta t_a$ (s)						0,0169
	Iah1minef (A)						280,8
	I2/I1b (%)						
	$\Delta t_b$ (s)						
	Ibh1minef (A)						
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
	Ich1minef (A)						

As situações de disparo intempestivo praticamente não ocorrem, com a exceção de  $\beta_a=\beta_b=\beta_c=150^\circ$ .

Foram realizadas simulações para diversos tipos de enrolamentos, resultados esses que se apresentam no anexo 3 fornecido em formato digital.

Na Figura 4- e Figura 4-40 apresentam-se os resultados obtidos através de simulação para as seguintes condições:

- Início da cava em  $\beta_a=\beta_b=\beta_c=150^\circ$ ;
- Duração da cava de 90 ms;
- Tensão durante a cava de 1% da tensão nominal;
- Transformador (Dyn1) em funcionamento;
- Transformador em vazio.

Na Figura 4-39 a) apresenta-se a forma de onda das tensões simples no primário de T1. Durante a cava a amplitude é 1% da tensão nominal e quando a cava termina as formas de onda apresentam perturbação. Na Figura 4-39 b) ilustram-se as formas de onda das correntes de alimentação de T1. Após a cava apresentam a forma de onda de correntes de ligação. A Figura 4-39 c) apresenta a forma de onda dos fluxos em T1. Durante a cava estes permanecem praticamente constantes.

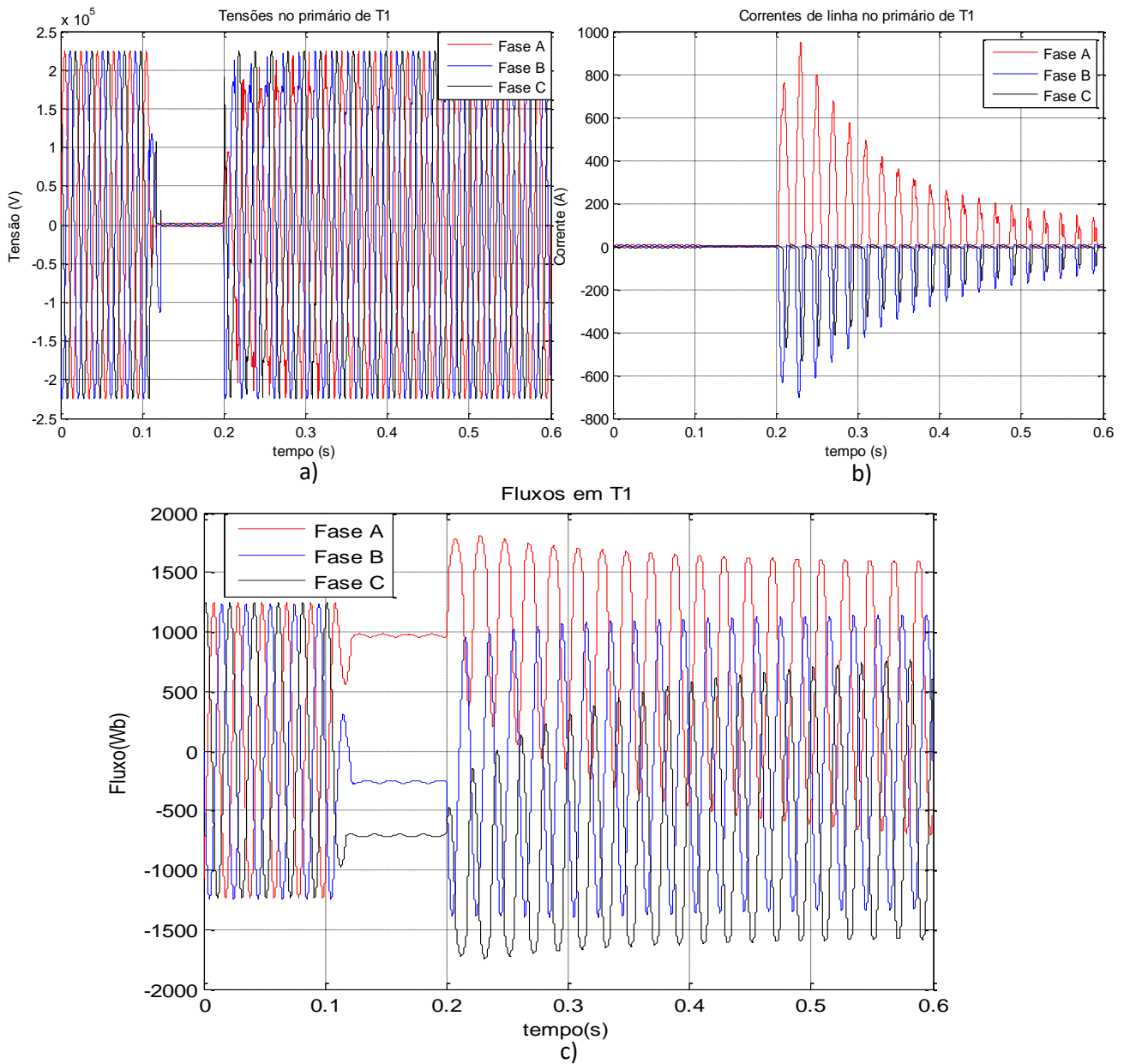


Figura 4-39 Tensões de alimentação, a), correntes de linha no lado primário, b), e fluxos de T1, c).

A Figura 4-40 apresenta os resultados relativos ao relé de T1. Verifica-se a ocorrência de disparo intempestivo na fase A, durante aproximadamente 17 ms, apesar dos sinais das fases A, B e C (Figura 4-40 a), b) e c)) terem amplitude suficiente para ativar a proteção do transformador, isto deve-se ao bloqueio harmónico das fases B e C ter atuado corretamente (Figura 4-40 e) e f)).

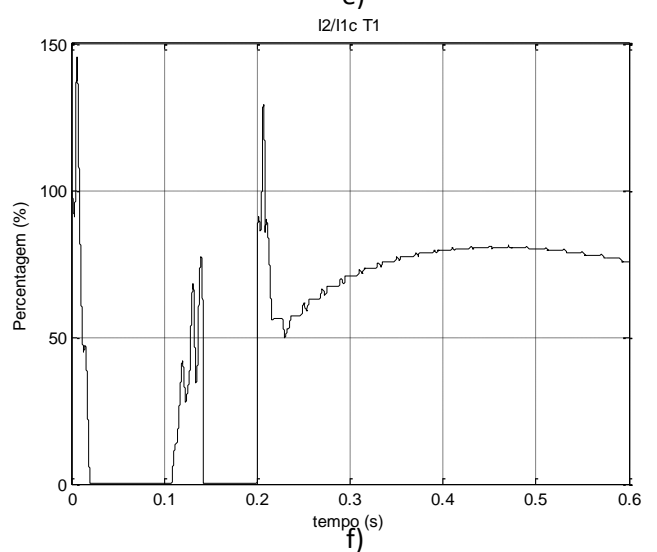
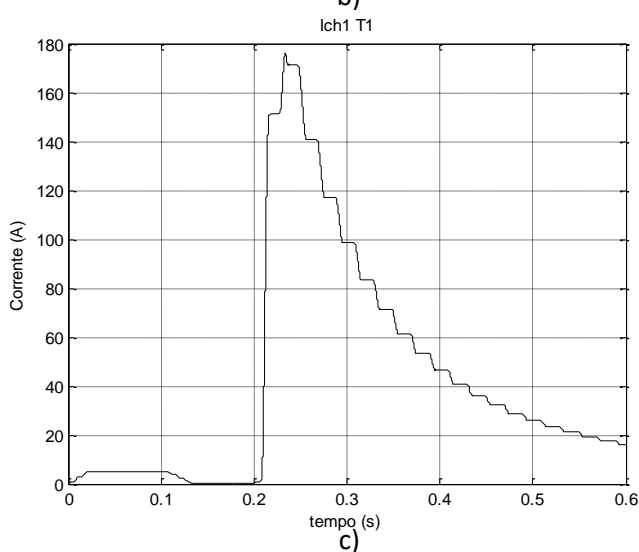
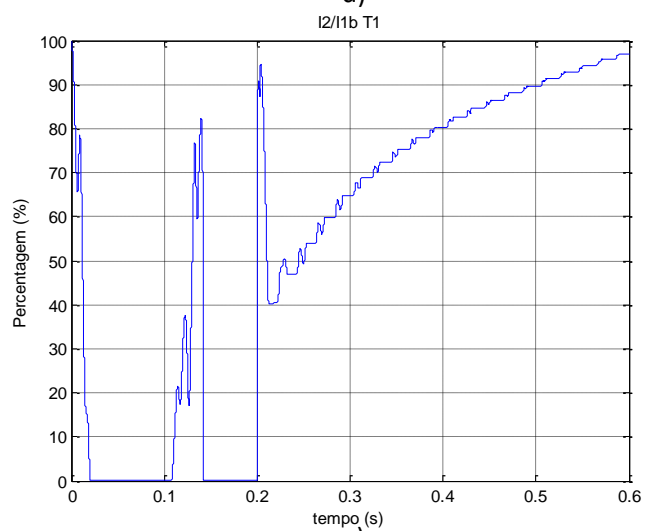
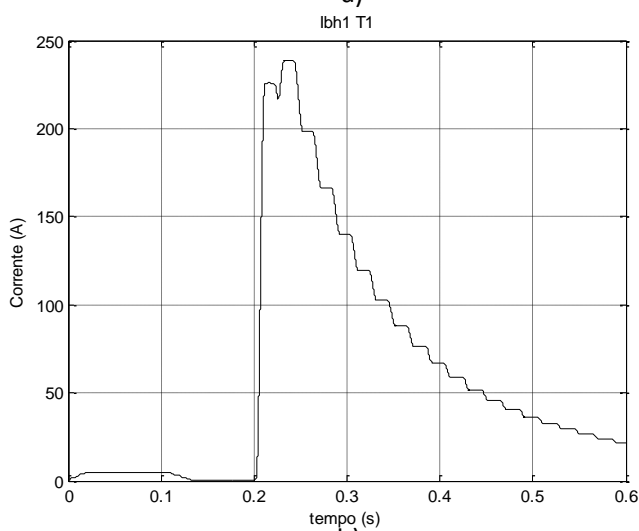
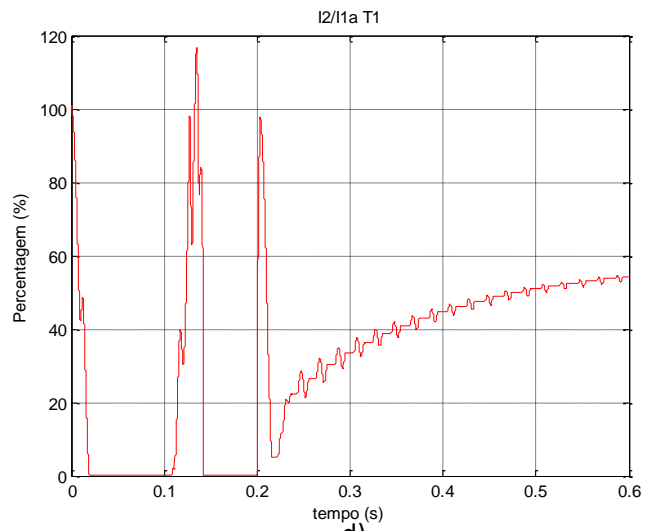
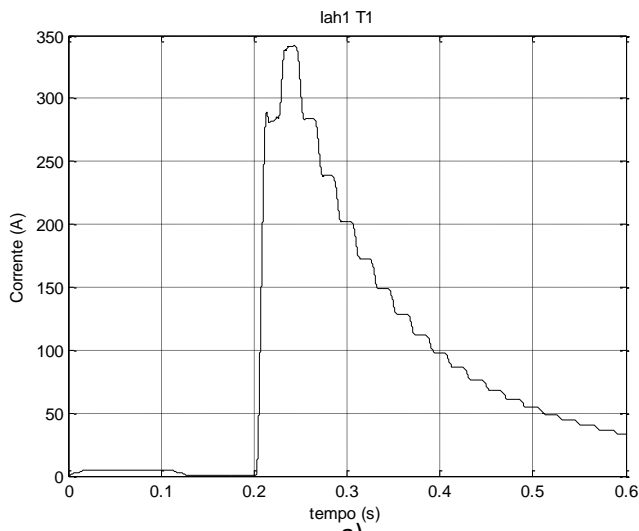


Figura 4-380 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respetivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmónico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respetivamente em situação de cava.

Para analisar os fenômenos que ocorrem quando é introduzida uma cava na presença de dois transformadores a funcionar em simultâneo, foi utilizado o esquema da Figura 4-41, onde se utilizam duas fontes, uma para a situação de funcionamento normal e outra para a situação de cava.

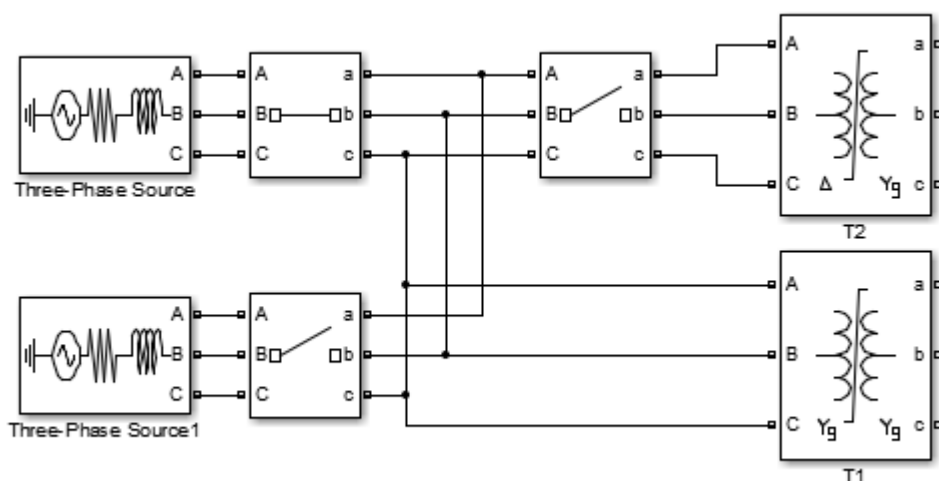


Figura 4-391 Esquema de introdução de cava para a ligação de dois transformadores ao mesmo barramento.

Na Tabela 4-8 apresenta-se o resultado da simulação referente ao modelo da Figura 4-41 com as seguintes condições:

- Introdução da cava em  $\beta_a = \beta_b = \beta_c$ , a partir do instante 0.1 s;
- Duração da cava de 90 ms;
- Tensão durante a cava de 1% da tensão nominal;
- T1 em vazio;
- T2 em vazio;
- T2 comutado em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$ , no instante 0,04 s;
- T1 em regime permanente ( $B_{ra} = -1$  pu,  $B_{rb} = 0,5$  pu e  $B_{rc} = 0,5$  pu);
- T2 em regime permanente ( $B_{ra} = -0,866$  pu,  $B_{rb} = 0$  pu e  $B_{rc} = 0,866$  pu).

Tabela 4-8 Cavas T1 Ynyn e T2 Dyn

		$\beta_a = 0^\circ$	$\beta_a = 30^\circ$	$\beta_a = 60^\circ$	$\beta_a = 90^\circ$	$\beta_a = 120^\circ$	$\beta_a = 150^\circ$
T1	I2/I1a (%)						19,19
	$\Delta t_a$ (s)						0,0087
	Iah1minef (A)						178,5
	I2/I1b (%)						
	$\Delta t_b$ (s)						
	Ibh1minef (A)						
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
	Ich1minef (A)						
T2	I2/I1a (%)						4,611
	$\Delta t_a$ (s)						0,03
	Iah1minef (A)						228,6
	I2/I1b (%)						
	$\Delta t_b$ (s)						
	Ibh1minef (A)						
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
	Ich1minef (A)						

As situações de disparo intempestivo praticamente não ocorrem, com a exceção de  $\beta_a = \beta_b = \beta_c = 150^\circ$ . Verifica-se que a interdependência dos transformadores não provoca alterações significativas no número de disparos. Foram realizadas simulações para diversos tipos de enrolamentos, resultados esses que se apresentam no anexo 3 fornecido em formato digital.

Nas figuras Figura 4-42 a Figura 4-44 apresentam-se os resultados obtidos através de simulação para as seguintes condições:

- T1 encontra-se previamente ligado (Ynyn);
- T1 em vazio;
- O transformador T2 (Dyn) é comutado em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$ , no instante 0,04 s;
- T2 em vazio;
- T2 com indução remanescente de  $B_{ra} = -0,866$  pu,  $B_{rb} = 0$  pu e  $B_{rc} = 0,866$  pu;
- Início da cava em  $\beta_a = \beta_b = \beta_c = 150^\circ$ , a partir do instante 0,1 s;
- Duração da cava de 90 ms;
- Tensão durante a cava de 1% da tensão nominal.

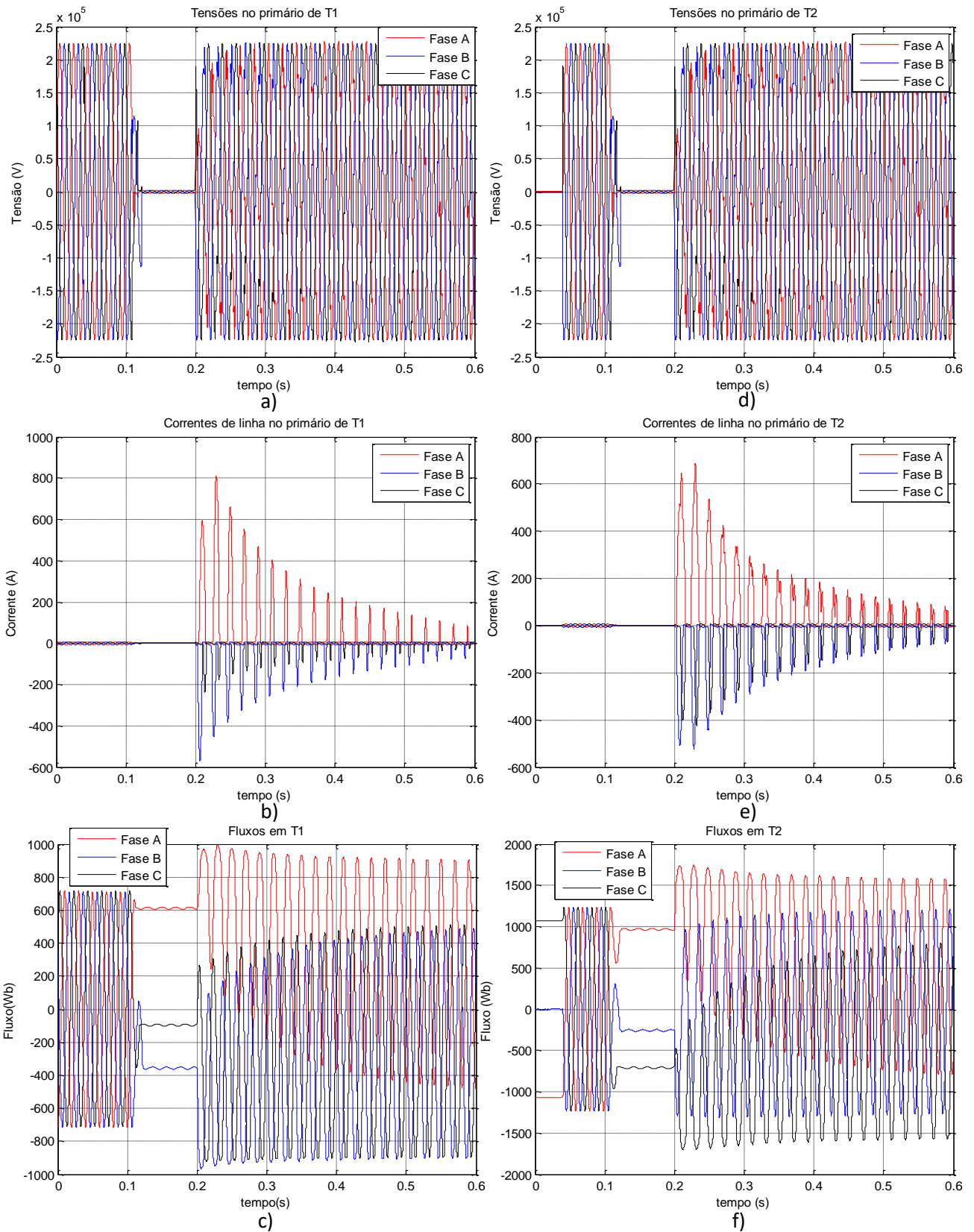


Figura 4-402 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, d), Correntes de linha no lado primário de T1, b), e T2, e) e fluxos em T1, c), e em T2, f).

Na Figura 4-42 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1, verificando-se durante a cava as amplitudes têm 1% do seu valor nominal e que existe uma perturbação quando esta termina (devido à queda de tensão na impedância da fonte provocada pela ligação dos dois transformadores). Na Figura 4-42 b) apresenta-se a forma de onda das correntes de alimentação de T1, verifica-se que após a cava estas apresentem características de correntes de ligação. A Figura 4-42 c) apresenta a forma de onda dos fluxos em T1, que permanecem praticamente constantes durante a cava. Na Figura 4-42 d) ilustra-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor, durante a cava as amplitudes têm 1% do seu valor nominal e que existe uma perturbação quando esta termina. Na Figura 4-42 e) apresentam-se as correntes de ligação de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor e após a cava têm características de correntes de ligação. A Figura 4-42 f) ilustra a forma de onda dos fluxos de T2, que como os fluxos de T1 permanecem praticamente constantes durante a cava.

Nas Figura 4-43 a), b) e c) ilustra-se a evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador T1 nas fases A, B e C, respetivamente. Verifica-se que estes sinais têm amplitude suficiente ( $>20\%$ ) para ativar a proteção do transformador. Ocorre um disparo intempestivo na fase A, no entanto o bloqueio harmónico atua corretamente nas Fases B e C, ( $I_2/I_1 > 20\%$ , Figura 4-43 e) e f)), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

A Figura 4-44 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Neste caso o relé provoca um disparo intempestivo, pois a razão  $I_2/I_1$  é menor que 20% na fase A, durante cerca de 30 ms.

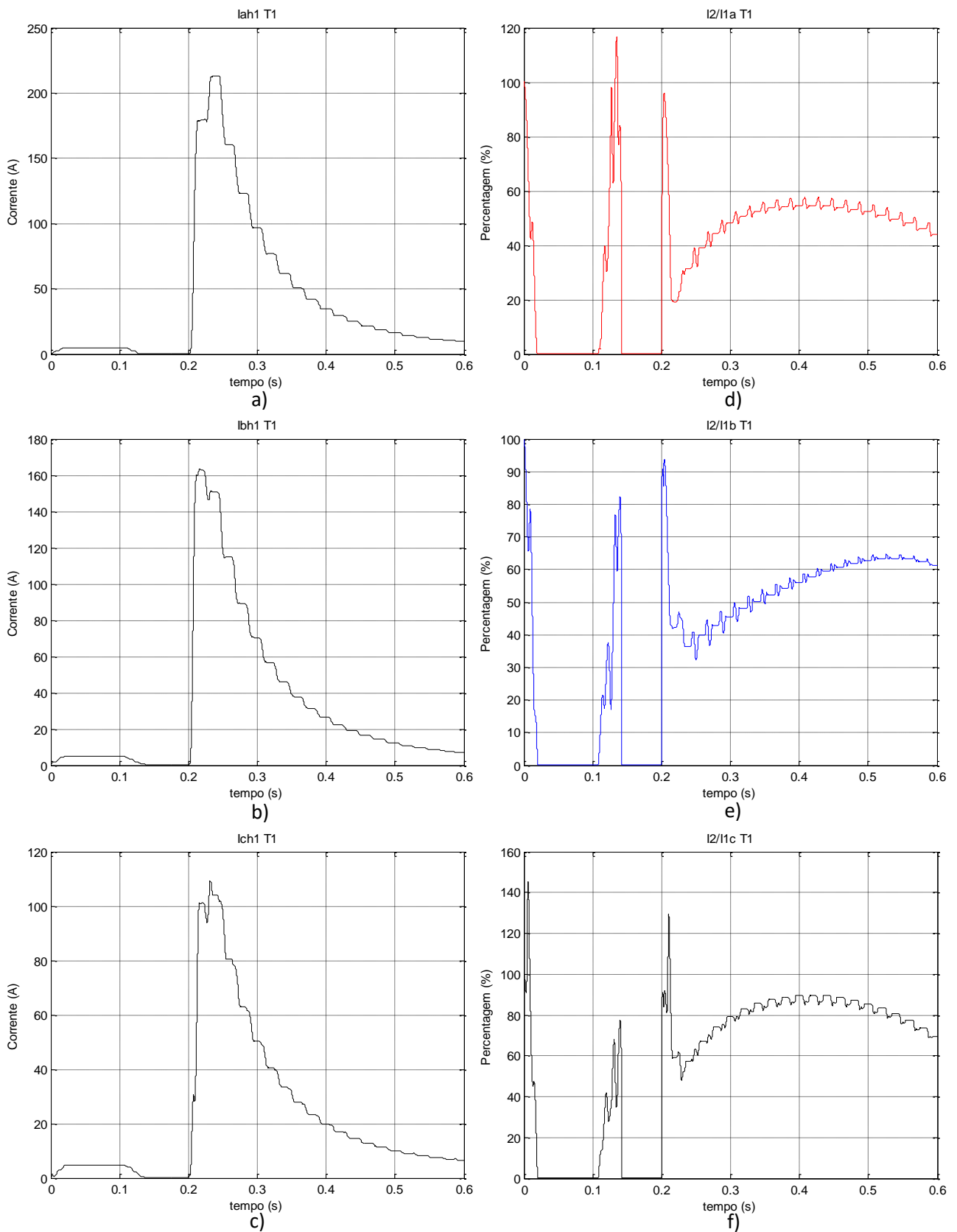
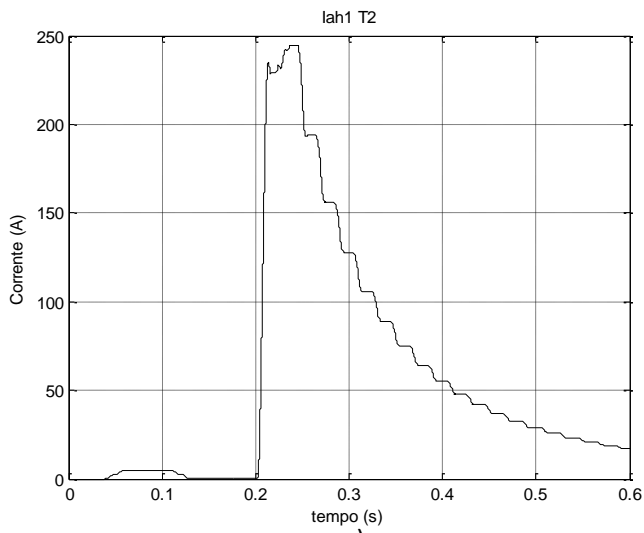
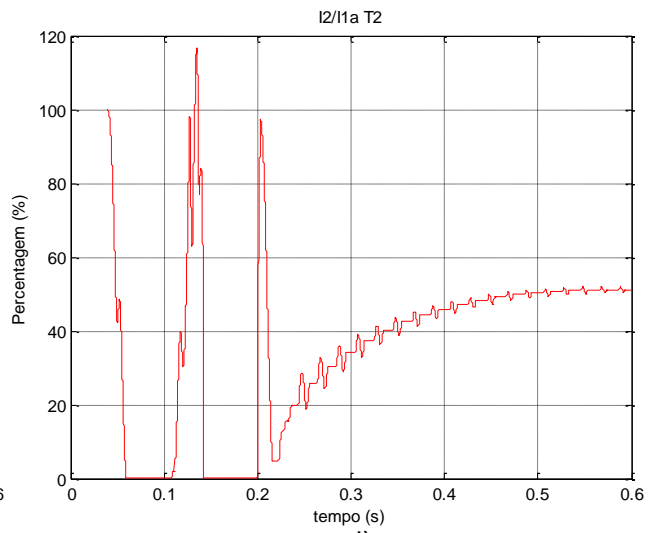


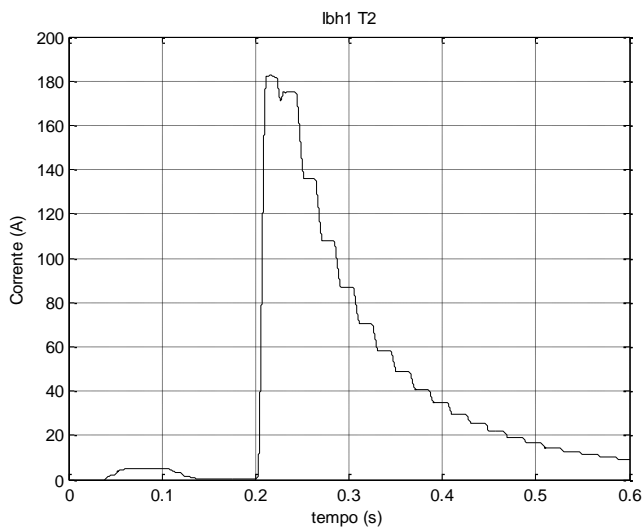
Figura 4-413 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente em caso de cava com dois transformadores.



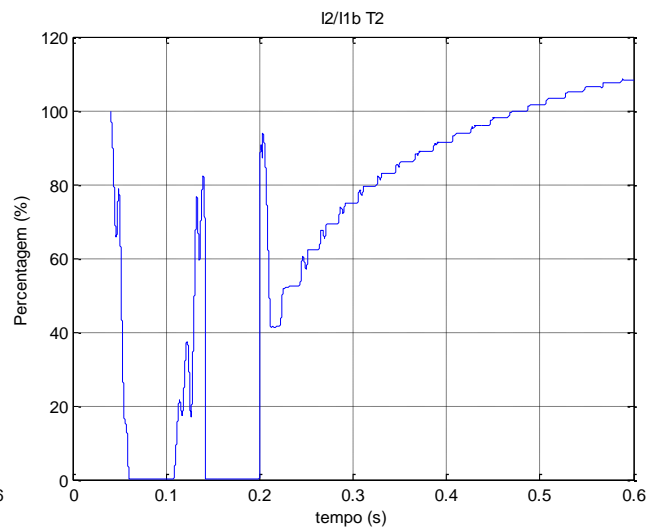
a)



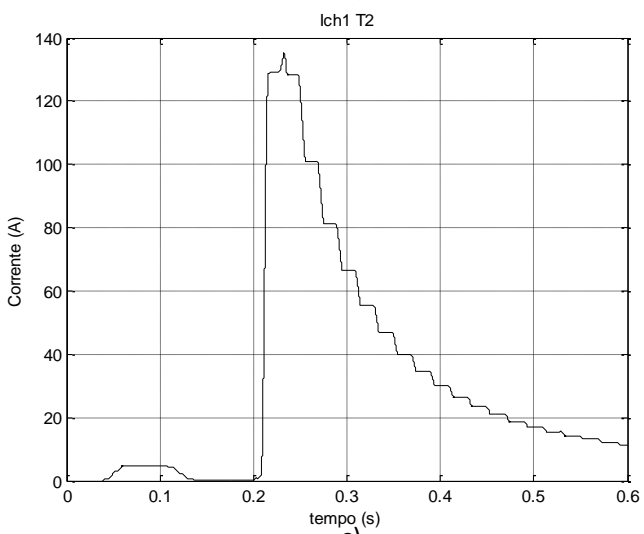
d)



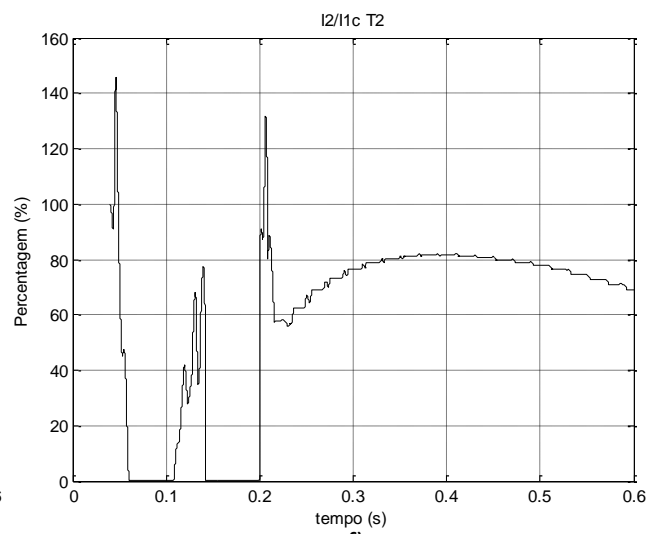
b)



e)



c)



f)

Figura 4-424 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente em caso de cava com dois transformadores.

#### 4.10. Sobretensões

As sobretensões são fenômenos em que a tensão de alimentação atingem valores acima de 110% da tensão nominal. Para analisar este fenômeno, foi utilizado o modelo da Figura 4-49.

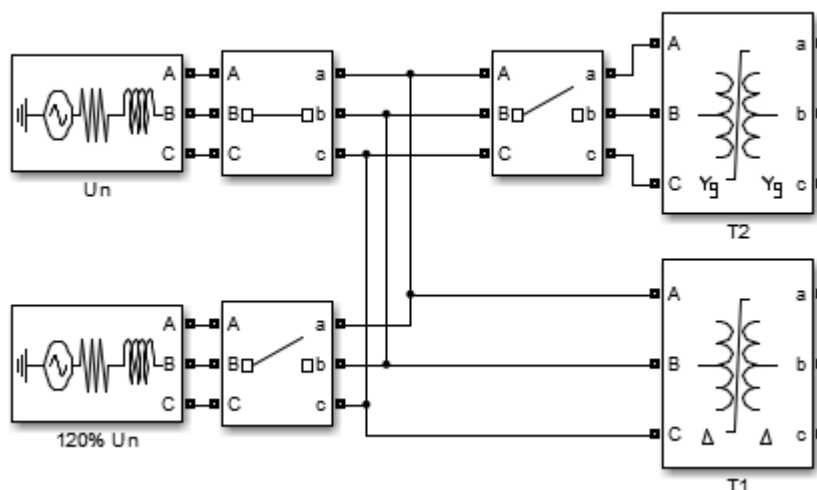


Figura 4-49 Esquema de sobretensão.

Na Tabela 4-9 apresenta-se os casos onde ocorrem disparos intempestivos para as seguintes condições:

- T1 (Dd0) em regime permanente;
- T2 (Ynyn0) em regime permanente;
- T2 comutado em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$  no instante 0,04 s;
- T1 em vazio;
- T2 em vazio;
- Introdução da sobretensão em  $\gamma_a = \gamma_b = \gamma_c$ , a partir do instante 0.1 s;
- Duração da sobretensão de 90 ms;
- Tensão durante a sobretensão de 120% da tensão nominal.

Tabela 4-9 Sobretensão, T1 Dd0 e T2 Ynyn0

		$\gamma_a = 0^\circ$	$\gamma_a = 30^\circ$	$\gamma_a = 60^\circ$	$\gamma_a = 90^\circ$	$\gamma_a = 120^\circ$	$\gamma_a = 150^\circ$
T1	I2/I1a (%)		13,98	14,15	13,3	14,12	16,74
	$\Delta t_a$ (s)		0,011	0,0111	0,0112	0,011	0,0105
	Iah1minef (A)		216	202,4	195,7	191,2	186,6
	I2/I1b (%)						
	$\Delta t_b$ (s)						
	Ibh1minef (A)						
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
	Ich1minef (A)						
T2	I2/I1a (%)		7,851	6,325	7	5,423	4,884
	$\Delta t_a$ (s)		0,0124	0,0133	0,0128	0,0216	0,0219
	Iah1minef (A)		407,5	418	416,8	348	352,4
	I2/I1b (%)		8,125	6,557	7,245	5,63	5,074
	$\Delta t_b$ (s)		0,012	0,0128	0,0122	0,0211	0,0214
	Ibh1minef (A)		199,5	204,8	204,2	170	172,2
	I2/I1c (%)		7,586	6,101	6,765	5,225	4,702
	$\Delta t_c$ (s)		0,0129	0,0216	0,0133	0,022	0,0224
	Ich1minef (A)		208	174,4	210,5	178	180,2

Nas figuras Figura 4-50 a Figura 4-52 estão apresentados os resultados da simulação para as seguintes condições:

- T1 (Dd0) em regime permanente;
- T2 (Ynyn0) em regime permanente;
- T1 em vazio;
- T2 em vazio;
- T2 comutado em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$  no instante 0,04 s;
- Introdução da cava em  $\gamma_a = \gamma_b = \gamma_c = 150^\circ$ , a partir do instante 0.04 s;
- Duração da sobretensão de 50 ms;
- Tensão durante a sobretensão de 120% da tensão nominal.

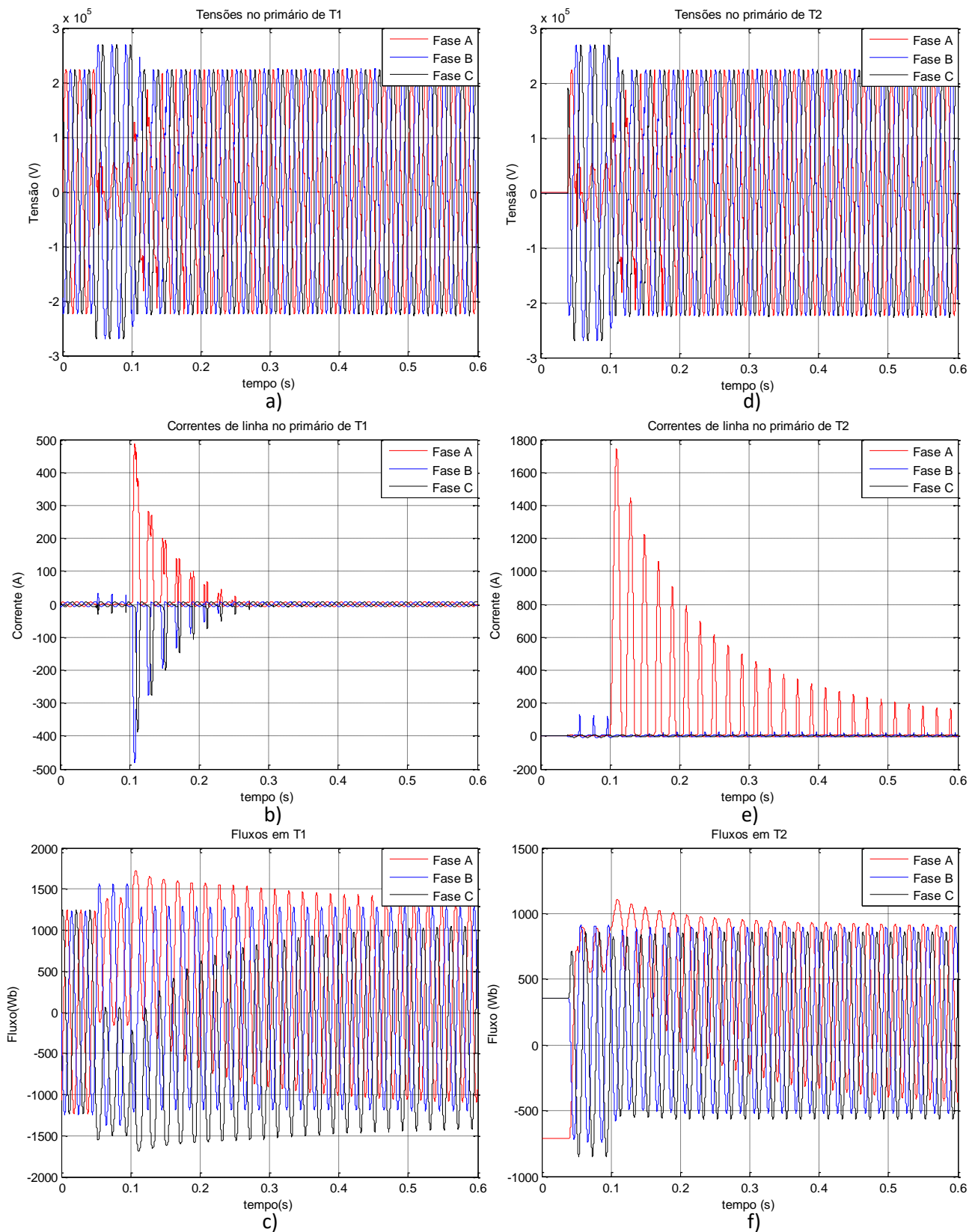


Figura 4-430 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d) e fluxos de T1, e) e de T2, f).

Na Figura 4-50 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1, verificando-se que existe uma perturbação após a sobretensão. Na Figura 4-50 b) apresenta-se a forma de onda das correntes de alimentação de T1, que apresentam características de correntes de ligação após a sobretensão. Na Figura 4-50 c) ilustra-se a forma de onda dos fluxos em T1, que após a sobretensão retornam lentamente à sua forma (saturação do núcleo). Na Figura 4-50 d) apresenta-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor. Na Figura 4-50 e) ilustram-se as correntes de ligação de T2, nas quais se observa características de correntes de ligação após a sobretensão. A Figura 4-50 f) ilustra a forma de onda dos fluxos em T2, que apresentam características de saturação do núcleo.

Nas Figura 4-51 a), b) e c) ilustra-se a evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador T1 nas fases A, B e C, respetivamente. Verifica-se que estes sinais têm amplitude suficiente ( $>20\%$ ) para ativar a proteção do transformador. No entanto o bloqueio harmónico atua corretamente, ( $I_2/I_1 > 20\%$ , Figura 4-51 d), e) e f)), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

A Figura 4-52 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Neste caso o relé provoca disparos intempestivos, pois a razão  $I_2/I_1$  é menor que 20% nas fases A, B e C, durante cerca de 20 ms.

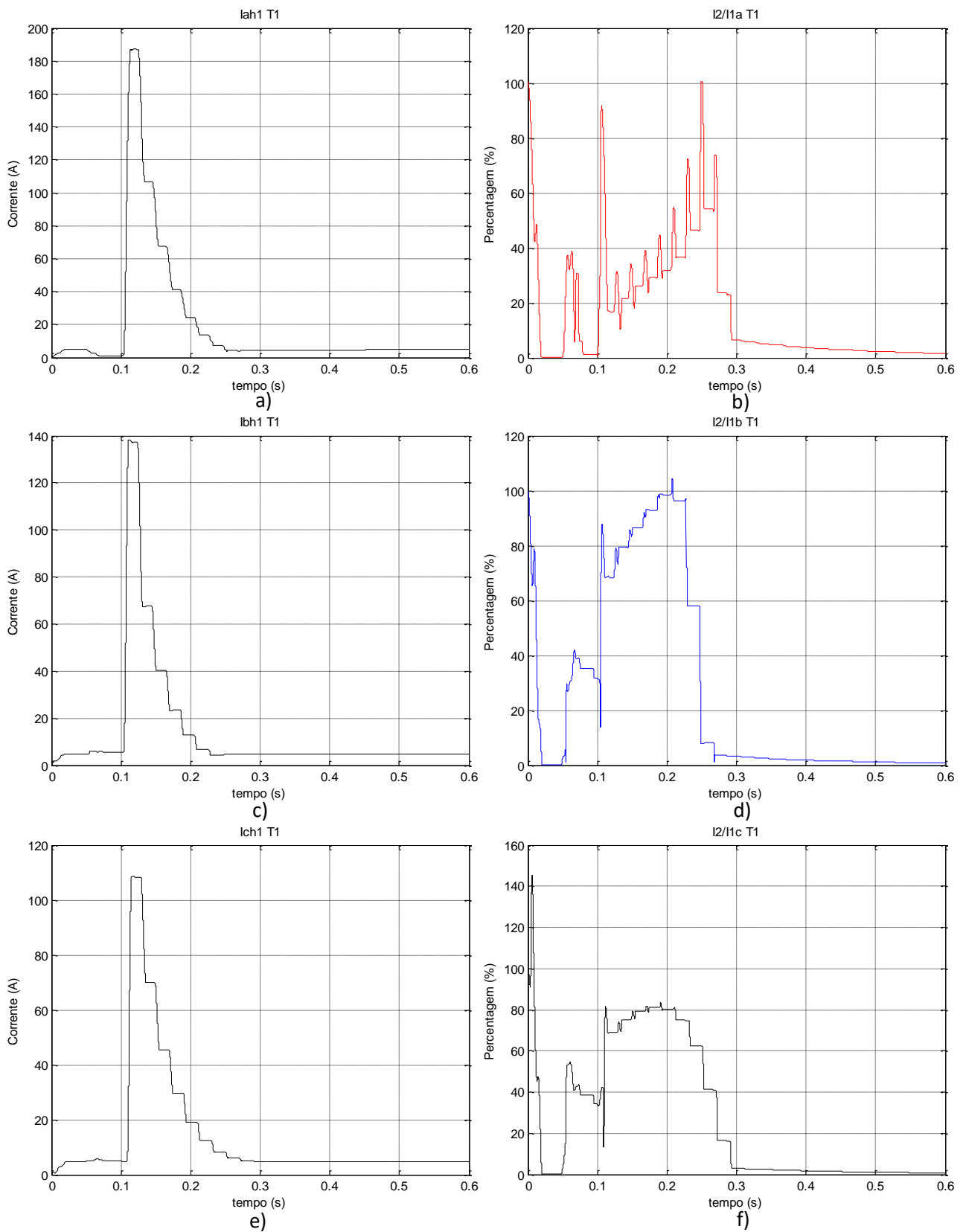


Figura 4-441 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente em caso de sobretensão.

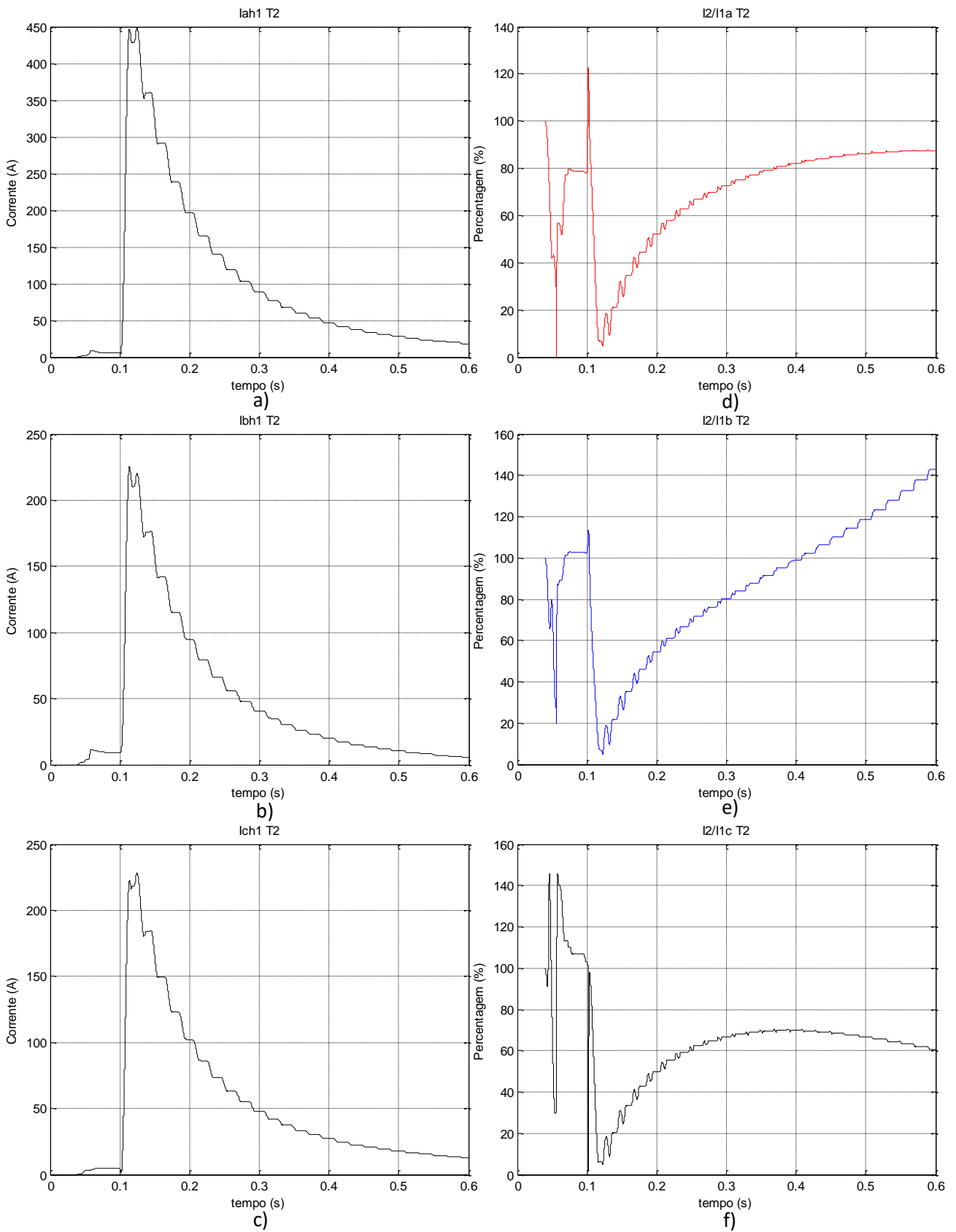


Figura 4-452 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respetivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmónico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respetivamente em caso de sobretensão.

#### 4.11. Ultrassaturação

O fenómeno de ultrassaturação ocorre quando o transformador está a operar com valores de fluxo próximo do ponto de saturação. Para analisar este fenómeno, foi utilizado o modelo da Figura 4-53.

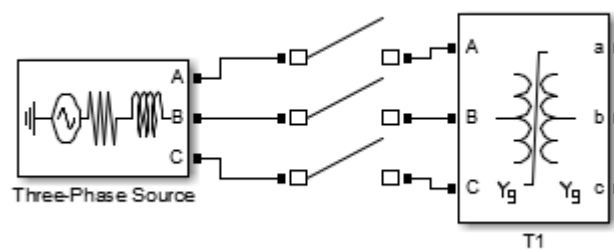


Figura 4-463 Esquema para análise do fenómeno de ultrassaturação.

Na Tabela 4-50 apresentam-se os disparos intempestivos obtidos para a ligação de um transformador com as seguintes condições:

- Transformador (Ynyn0) em vazio;
- Comutação do transformador em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$ ;
- Transformador com indução remanescente de  $1,5 \times B_{\text{máx}}$  e  $2 \times B_{\text{máx}}$ .

Tabela 4-50 Ultrassaturação num transformador com ligação Yyn0.

	$B_{ra}=-1,5$ $B_{rb}=0,75$ $B_{rc}=0,75$	$B_{ra}=-1,299$ $B_{rb}=0$ $B_{rc}=1,299$	$B_{ra}=-0,75$ $B_{rb}=-0,75$ $B_{rc}=1,5$	$B_{ra}=0$ $B_{rb}=-1,299$ $B_{rc}=1,299$	$B_{ra}=0,75$ $B_{rb}=-1,5$ $B_{rc}=0,75$	$B_{ra}=1,299$ $B_{rb}=-1,299$ $B_{rc}=0$
I2/I1a (%)					14,62	1,686
$\Delta t_a$ (s)					0,01087	0,03333
Iah1minef (A)					496,2	477,7
I2/I1b (%)				12,36	14,75	13,93
$\Delta t_b$ (s)				0,01223	0,01028	0,00993
Ibh1minef (A)				421	494,2	534,9
I2/I1c (%)						
$\Delta t_c$ (s)						
Ich1minef (A)						
	$B_{ra}=-2$ $B_{rb}=1$ $B_{rc}=1$	$B_{ra}=-1,732$ $B_{rb}=0$ $B_{rc}=1,732$	$B_{ra}=-1$ $B_{rb}=-1$ $B_{rc}=2$	$B_{ra}=0$ $B_{rb}=-1,732$ $B_{rc}=1,732$	$B_{ra}=1$ $B_{rb}=-2$ $B_{rc}=1$	$B_{ra}=1,732$ $B_{rb}=-1,732$ $B_{rc}=0$
I2/I1a (%)					11,43	0,4848
$\Delta t_a$ (s)					0,0118	0,05065
Iah1minef (A)					559,4	403,8
I2/I1b (%)				10,56	11,01	12,35
$\Delta t_b$ (s)				0,03049	0,01198	0,01043
Ibh1minef (A)				357,6	526,2	549
I2/I1c (%)						
$\Delta t_c$ (s)						
Ich1minef (A)						

Foram realizadas simulações para diversos tipos de ligação de enrolamentos, resultados esses que se apresentam no anexo 4 fornecido em formato digital.

Na Figura 4-54 e Figura 4-55 apresentam-se os resultados da simulação para as seguintes condições:

- Transformador (Yyn0) em vazio;
- Comutação do transformador em  $\alpha_a=\alpha_b=\alpha_c=0^\circ$  no instante 0,04 s;
- Transformador com induções remanescentes de  $B_{ra}= 1$  pu,  $B_{rb}= -2$  pu e  $B_{rc}= 1$  pu.

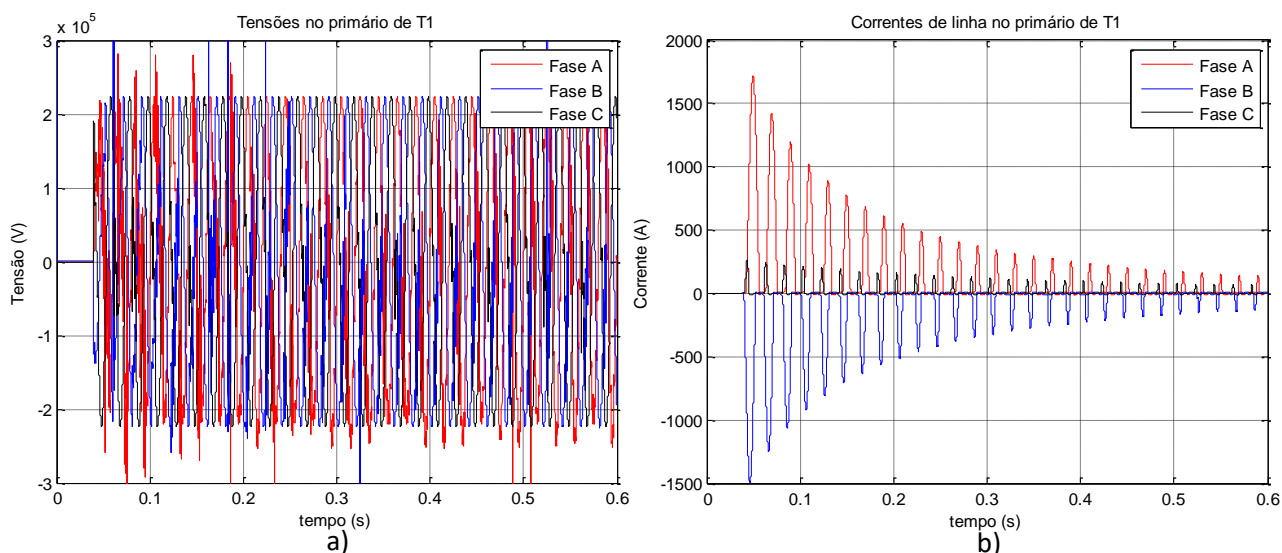


Figura 4-474 Tensões de alimentação, a), e Correntes de linha no lado primário de T1, b).

Na Figura 4-54 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor. Na Figura 4-54 b) apresenta-se a forma de onda das correntes de ligação de T1, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor.

Nas Figura 4-55 a), b) e c) ilustra-se a evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador T1 nas fases A, B e C, respetivamente. Verifica-se que ocorrem disparos intempestivos nas fases A e B.

O fenómeno de ultrassaturação provoca correntes de grande amplitude, cuja forma de onda é provocada pela saturação do núcleo do transformador.

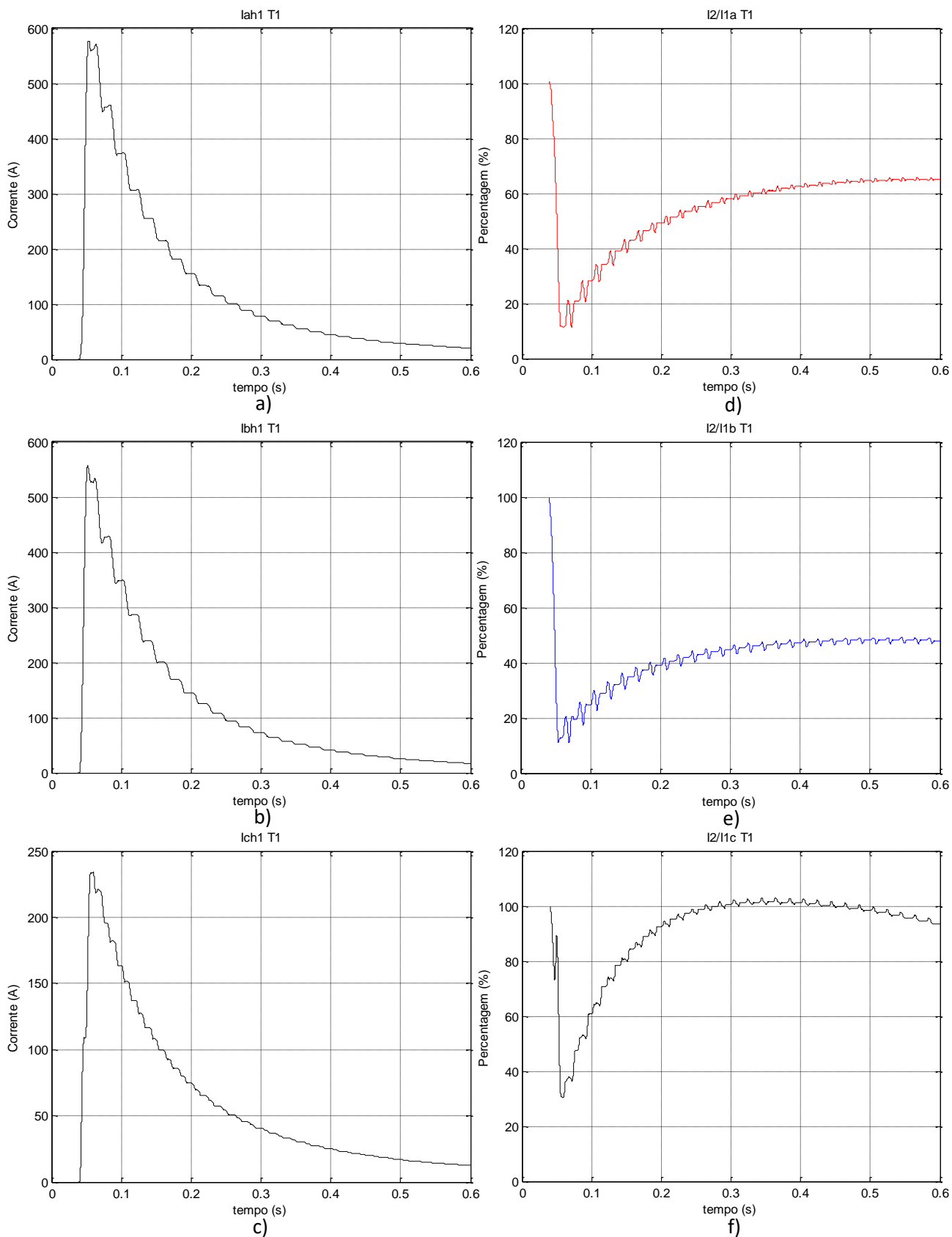


Figura 4-485 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente em caso de ultrassaturação.

Foi analisado o fenômeno de ultrassaturação na presença de dois transformadores utilizando o modelo da Figura 4-56.

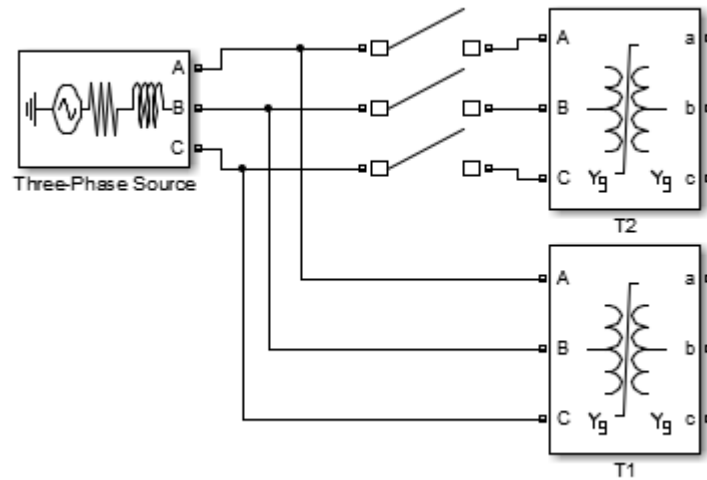


Figura 4-496 Esquema da ligação de dois transformadores ao mesmo barramento para análise do fenômeno de ultrassaturação.

Na Tabela 4-61 apresentam-se os resultados para a simulação do modelo da Figura 4-56 com as seguintes condições:

- Transformador T1 (Ynyn0) em vazio;
- T1 em regime permanente;
- Transformador T2 (Ynyn0) em vazio;
- T2 comutado em  $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c = 0^\circ$ ;
- Transformador com indução remanescente de  $1,5 \times B_{\text{máx}}$  e  $2 \times B_{\text{máx}}$ .

Como não houve disparos intempestivos em T1, este não é representado na tabela.

Tabela 4-61 Ultrassaturação para a ligação T1 Ynyn e T2 Ynyn

		$B_{ra}=-1,5$ $B_{rb}=0,75$ $B_{rc}=0,75$	$B_{ra}=-1,299$ $B_{rb}=0$ $B_{rc}=1,299$	$B_{ra}=-0,75$ $B_{rb}=-0,75$ $B_{rc}=1,5$	$B_{ra}=0$ $B_{rb}=-1,299$ $B_{rc}=1,299$	$B_{ra}=0,75$ $B_{rb}=-1,5$ $B_{rc}=0,75$	$B_{ra}=1,299$ $B_{rb}=-1,299$ $B_{rc}=0$
T2	I2/I1a (%)					14,62	0,05276
	$\Delta t_a$ (s)					0,01088	0,05154
	Iah1minef (A)					496,2	415,2
	I2/I1b (%)				10,49	14,7	12,27
	$\Delta t_b$ (s)				0,03052	0,0103	0,01045
	Ibh1minef (A)				358,1	494,5	549,2
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
Ich1minef (A)							
		$B_{ra}=-2$ $B_{rb}=1$ $B_{rc}=1$	$B_{ra}=-1,732$ $B_{rb}=0$ $B_{rc}=1,732$	$B_{ra}=-1$ $B_{rb}=-1$ $B_{rc}=2$	$B_{ra}=0$ $B_{rb}=-1,732$ $B_{rc}=1,732$	$B_{ra}=1$ $B_{rb}=-2$ $B_{rc}=1$	$B_{ra}=1,732$ $B_{rb}=-1,732$ $B_{rc}=0$
T2	I2/I1a (%)					11,45	0,5063
	$\Delta t_a$ (s)					0,0118	0,05154
	Iah1minef (A)					559,4	415,2
	I2/I1b (%)				10,48	10,95	12,27
	$\Delta t_b$ (s)				0,03053	0,01203	0,01045
	Ibh1minef (A)				358,1	526,6	549,3
	I2/I1c (%)						
	$\Delta t_c$ (s)						
Ich1minef (A)							

Foram realizadas simulações para diversos tipos de ligação de enrolamentos, resultados esses que se apresentam no anexo 4 fornecido em formato digital.

Nas figuras Figura 4-57 a Figura 4-5959 apresentam-se os resultados obtidos através de simulação para as seguintes condições:

- Transformador T1 (Ynyn0) em vazio;
- T1 em regime permanente;
- Transformador T2 (Ynyn0) em vazio;
- T2 comutado em  $\alpha_a=\alpha_b=\alpha_c=0^\circ$ ;
- T2 com induções remanescentes de com  $B_{ra}= 1$  u,  $B_{rb}= -2$  pu e  $B_{rc}= 1$  pu.

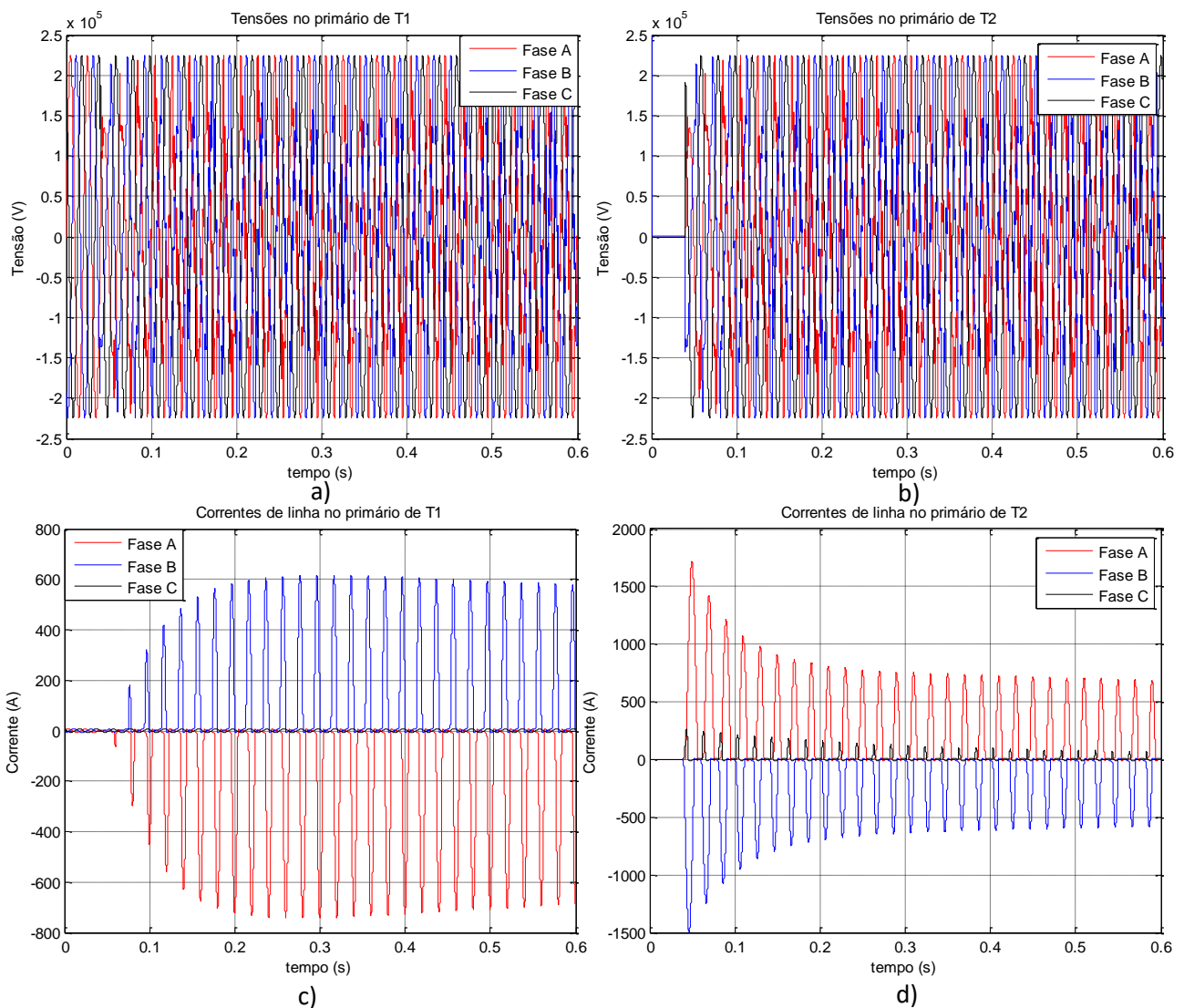


Figura 4-507 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d).

Na Figura 4-57 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1, verificando-se que existe uma perturbação após a ligação de T2 (devido à queda de tensão na impedância da fonte). Figura 4-57 b) apresenta-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor. Na Figura 4-57 c) ilustram-se as correntes de ligação de T1, nas quais se observa o fenómeno de interdependência entre transformadores. A Figura 4-57 d) ilustra a forma de onda das correntes de alimentação de T2, as quais possuem as características típicas de correntes de ligação de transformadores.

Nas Figura 4-58 a), b) e c) ilustra-se a evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador T1 nas fases A, B e C, respetivamente. Verifica-se que os sinais nas fases A e B têm amplitude suficiente ( $>20\%$ ) para ativar a proteção do transformador. No entanto o bloqueio harmónico atua corretamente, ( $I_2/I_1 > 20\%$ , Figura 4-58 d) e e)), inibindo o relé e impedindo o seu disparo intempestivo.

A Figura 4-59 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Neste caso o relé provoca disparos intempestivos nas fases A e B.

Quando se comuta um transformador que atinge a ultrassaturação num barramento onde outro já se encontra em funcionamento, este provoca correntes de interdependência, mas estas não são suficientes para retirar o outro transformador de serviço. Os resultados de T2 são os esperados, estando em concordância com os apresentados na ultrassaturação de um transformador (Ynyn0).

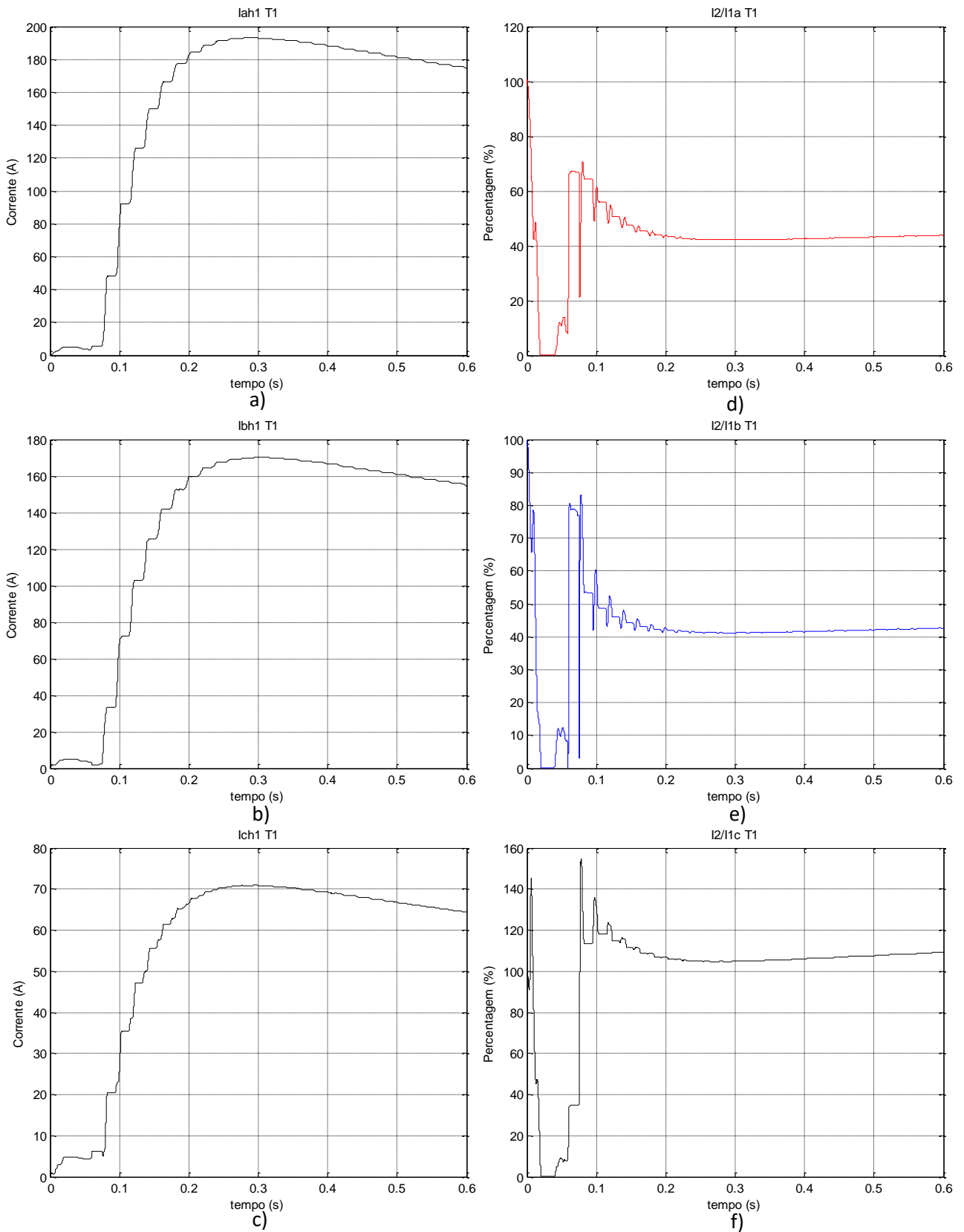


Figura 4-518 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente em caso de ultrassaturação com dois transformadores.

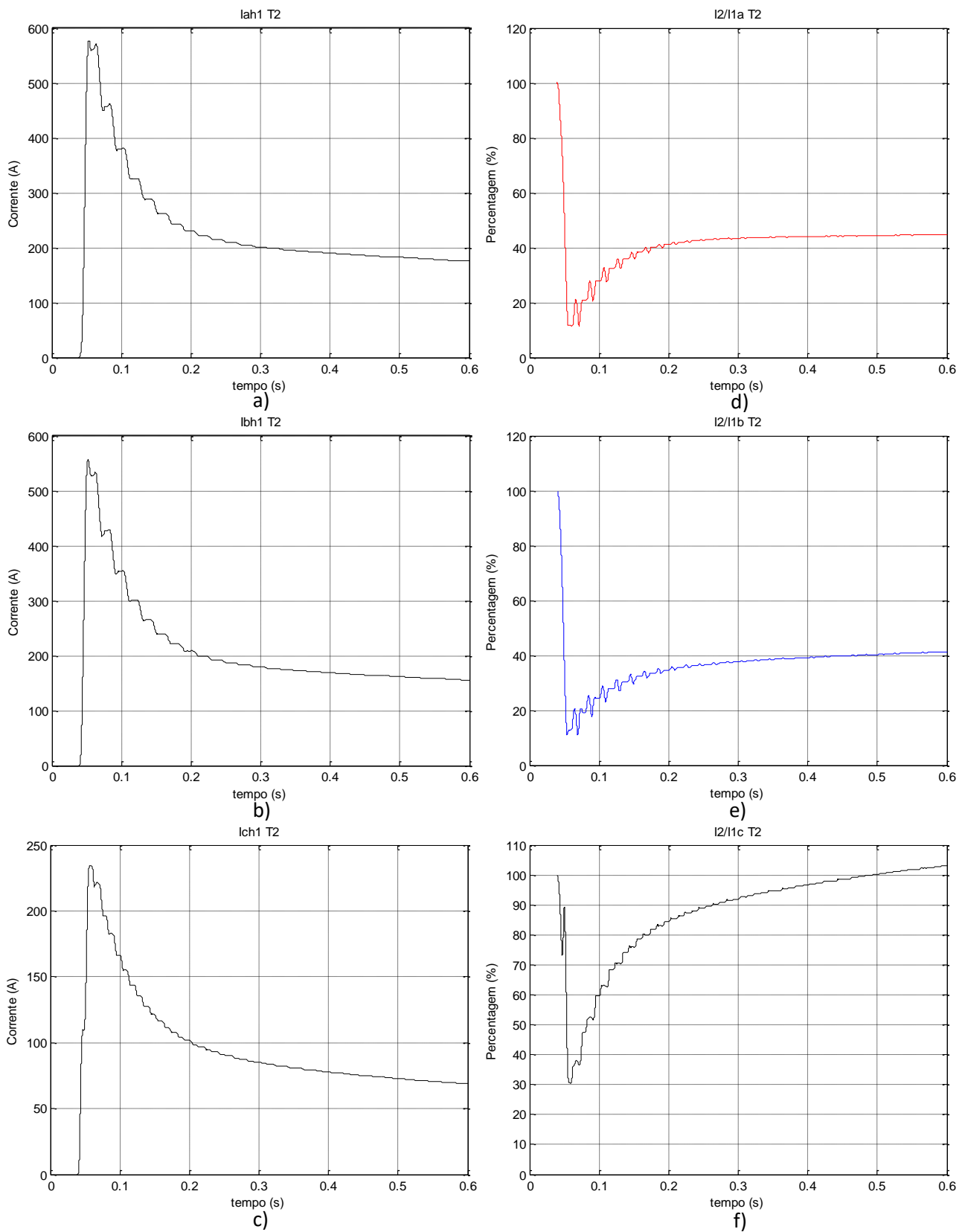


Figura 4-5952 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente em caso de ultrassaturação com dois transformadores.

#### 4.12. Bloqueio da proteção

Para analisar o comportamento da proteção, foi simulada a ocorrência de uma falha entre uma fase e a terra utilizando o esquema da Figura 4-53.

Os ângulos de início da falha na fase A ( $\gamma_a$ ) é definido a partir da mesma origem (início da alternância positiva da tensão na fase A) da mesma forma que o ângulo de comutação ( $\alpha_a$ ) na Figura 4-2.

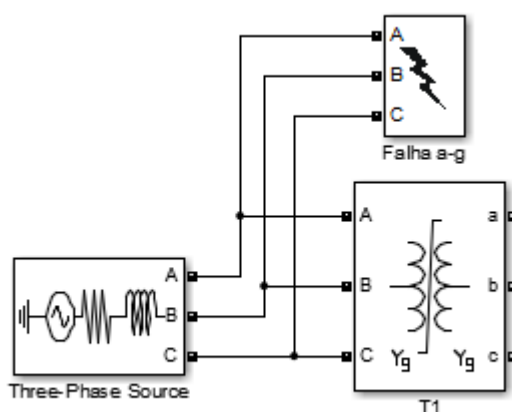


Figura 4-530 Modelo de introdução de falha.

Na Figura 4-61 e Figura 4-62 estão apresentados os resultados da simulação do esquema da Figura 4-530 para as seguintes condições:

- T1 em estado permanente;
- Falha entre Fase A e Terra;
- Falha absorve 30%  $I_n$  ( $1470\Omega$ );
- Falha comutada em  $\gamma_a=120^\circ$  a partir do instante 0,04 s.

Na Figura 4-61 a) ilustra-se a forma de onda das tensões no lado primário do transformador T1. Na Figura 4-61 b) apresenta-se a forma de onda das correntes de alimentação do transformador T1, verifica-se o aumento da amplitude da corrente na fase A após a comutação da falha entre a fase A e a Terra.

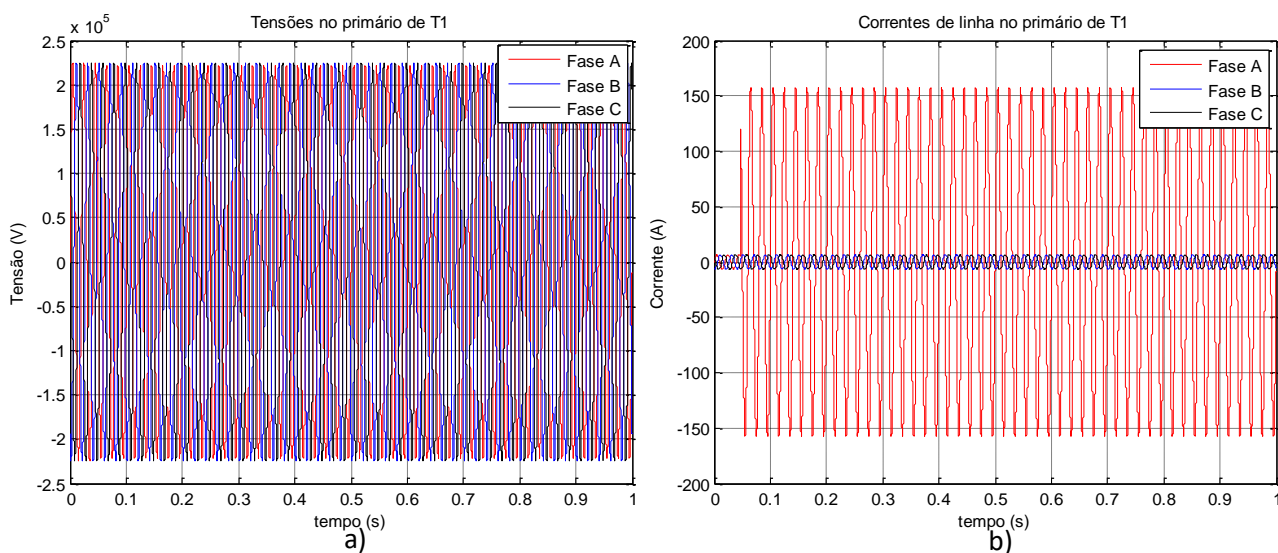


Figura 4-541 Tensões de alimentação e correntes de linha de T1, a) e b) respectivamente.

Nas Figura 4-62 a), b) e c) ilustra-se a evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador T1 nas fases A, B e C, respetivamente. Verifica-se que apenas o sinal da fase A (Figura 4-62 a)) tem amplitude para ativar a proteção do transformador, e que esta é ativada assim que o valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial da fase A é superior a 20% da corrente nominal. Porém ao analisar a Figura 4-62 é visível que a introdução da falha provocou um desequilíbrio da tensão de alimentação, através da evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador.

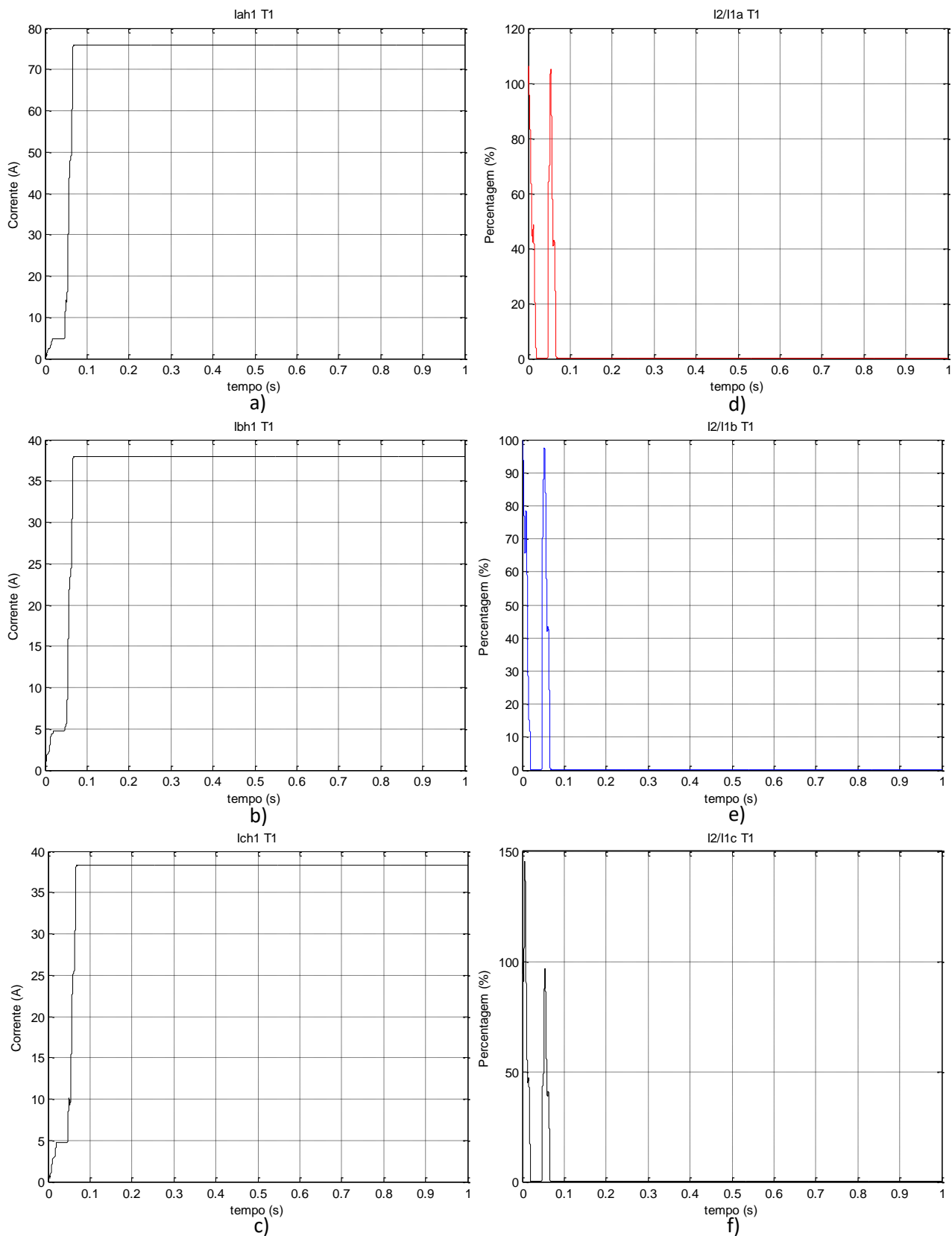


Figura 4-552 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente em caso de introdução de uma falha.

Para analisar o comportamento da proteção quando existem dois transformadores na linha e ocorre um defeito entre uma fase e a Terra do que está em funcionamento e outro é comutado, foi utilizado o esquema da Figura 4-63.

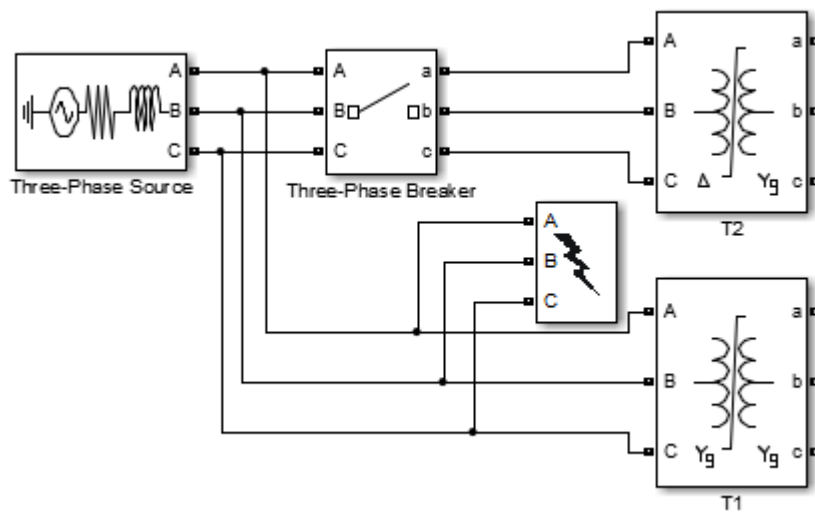


Figura 4-563 Modelo de introdução de falha para ligação de dois transformadores ao mesmo barramento.

Na Figura 4-64 a Figura 4-66 estão apresentados os resultados obtidos através da simulação do modelo da Figura 4-63 para as seguintes condições:

- Transformador T1 (Ynyn0) em regime permanente;
- Transformador T2 (Dyn1) comutado em  $\alpha_a=\alpha_b=\alpha_c =120^\circ$  a partir do instante 0,04 s;
- T2 com induções remanescentes de com  $B_{ra}= -0,5$  u,  $B_{rb}= -0,5$  pu e  $B_{rc}= 1$  pu.
- Falha entre Fase A de T1 e Terra;
- Falha absorve 30%  $I_n$  ( $1470\Omega$ );
- Falha comutada em  $\gamma_a=120^\circ$  a partir do instante 0,04 s.

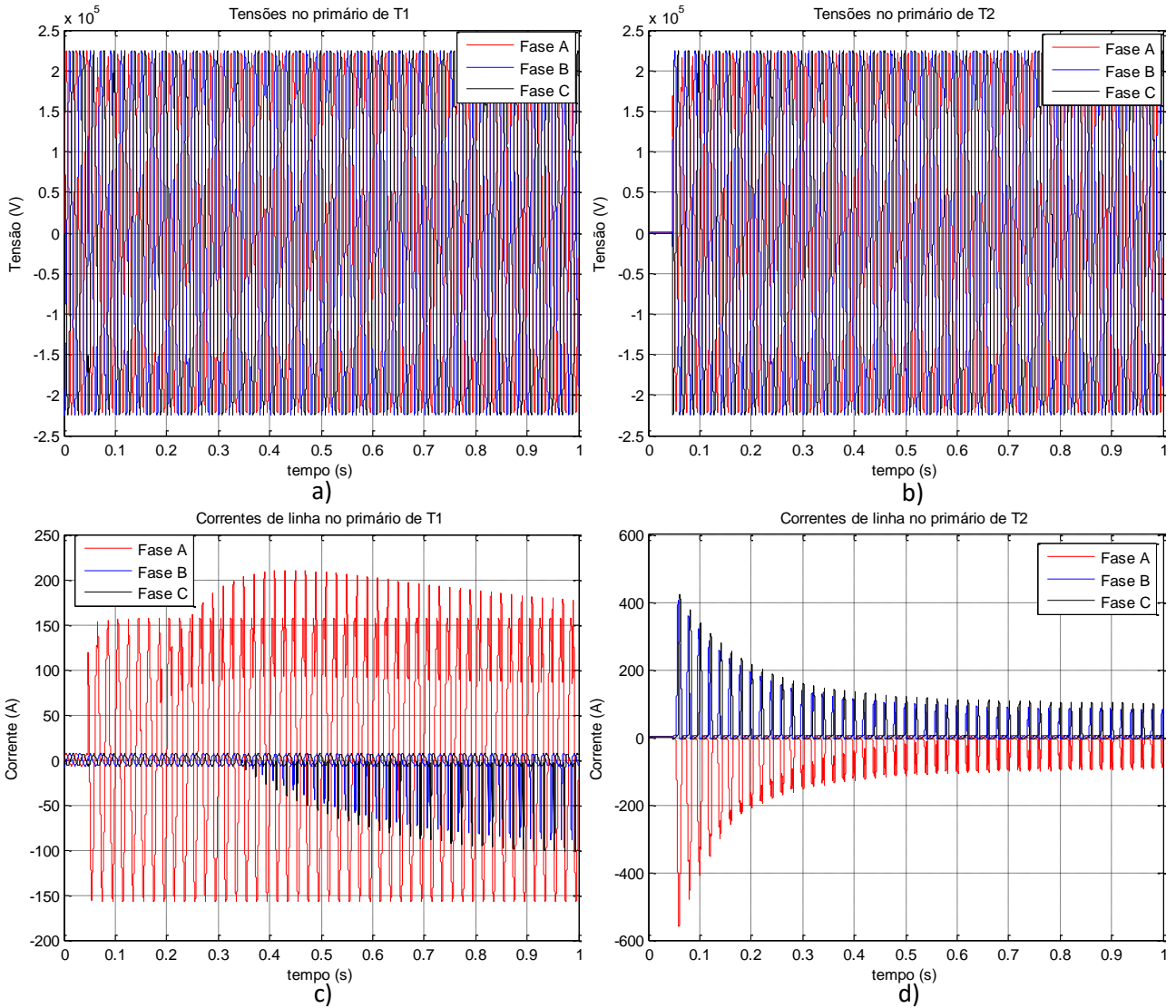


Figura 4-574 Tensões de alimentação de T1, a), e T2, b), e Correntes de linha no lado primário de T1, c), e T2, d).

Na Figura 4-64 a) ilustram-se as formas de onda das tensões simples no lado primário de T1. Figura 4-64 b) apresenta-se a forma de onda das tensões simples aos terminais de T2, que possuem valor nulo até ao instante de fecho do interruptor. Na Figura 4-64 c) ilustram-se as correntes de alimentação de T1, nas quais se observa o aumento da amplitude da corrente da fase A devido à introdução da falha e o fenómeno de interdependência entre transformadores. A Figura 4-64 d) ilustra a forma de onda das correntes de ligação de T2, as quais possuem as características típicas de correntes de ligação de transformadores.

Nas Figura 4-65 a), b) e c) ilustra-se a evolução do valor eficaz da fundamental das correntes diferenciais no transformador T1 nas fases A, B e C, respetivamente. Verifica-se que apenas o sinal da fase A tem amplitude suficiente ( $>20\%$ ) para ativar a proteção do transformador, devido à falha. No entanto o bloqueio harmónico, ( $I_2/I_1 > 20\%$ , Figura 4-65 d)), inibindo o relé e impediu o seu disparo durante 500 s.

A Figura 4-66 apresenta os resultados relativos ao relé de T2. Neste verifica-se que os sinais das fases A, B e C (Figura 4-66 a), b) e c)) têm amplitude suficiente para atuar a proteção do transformador, mas o bloqueio harmónico atua corretamente (Figura 4-66 d), e) e f)) inibindo e bloqueando o relé, evitando o disparo intempestivo.

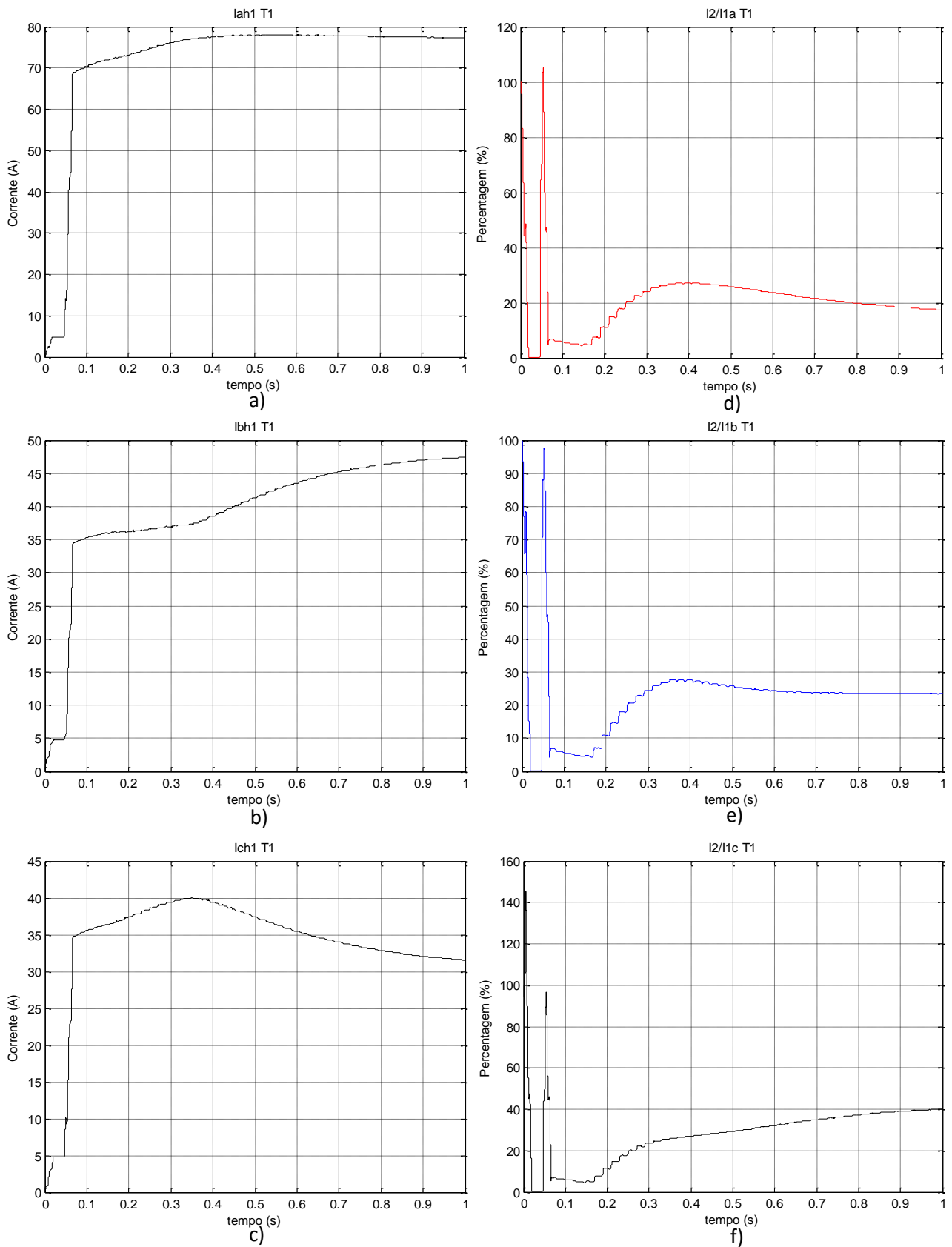


Figura 4-585 Sinais do relé de T1: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T1 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T1 nas fases A, B e C respectivamente em caso de introdução de uma falha com dois transformadores.

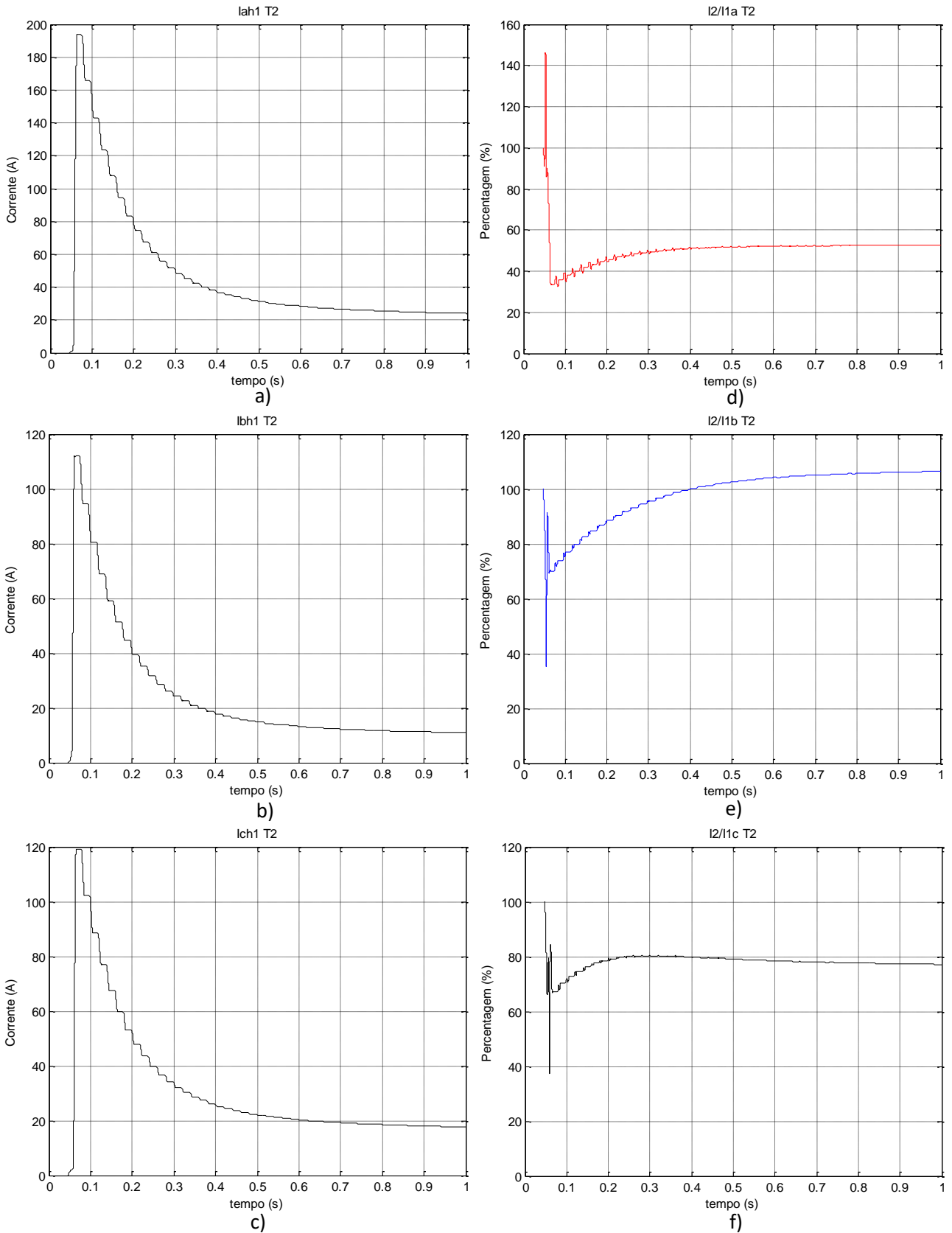


Figura 4-596 Sinais do relé de T2: a), b) e c): Valor eficaz do primeiro harmônico da corrente diferencial de T2 nas fases A, B e C respectivamente; d), e) e f): Razão entre o segundo e primeiro harmônico das correntes diferenciais em T2 nas fases A, B e C respectivamente em caso de introdução de uma falha com dois transformadores.

## 5. Conclusões

O objetivo principal deste trabalho consiste na caracterização detalhada das condições onde as sobrecorrentes transitórias de excitação possuam valores reduzidos de segundo harmónico. Para o efeito foi utilizada a ferramenta de simulação *Simulink/Matlab* e correspondente validação experimental.

O desempenho dos modelos computacionais foi validado com recurso a resultados experimentais, os quais se encontram, globalmente, em concordância com os resultados das simulações. O estudo efetuado mostra que se podem utilizar estes modelos para analisar estes fenómenos.

Nas simulações com a utilização de diferentes tipos de cargas, ao utilizar cargas capacitivas, a corrente de ligação e a corrente de alimentação apresentam maior amplitude.

As comutações assíncronas apresentam mais condições de disparo intempestivo que as comutações síncronas devido ao desequilíbrio nas tensões de alimentação dos transformadores.

Para as condições utilizadas nas simulações, a ligação em triângulo apresenta mais condições de disparo intempestivo.

Nos resultados das simulações com cavas de tensão não são visíveis as correntes de interdependência.

Verificou-se que para as simulações com sobretensões, ambos os transformadores experienciam condições de disparo.

Nas simulações em que foram utilizados transformadores que ficam em ultrassaturação, estes não provocam condições de disparo para outros ligados ao mesmo barramento.

Foram detetadas situações em que o disparo da proteção perante uma falha é atrasado, ficando o equipamento em risco.

## Referências

- [1] L. Oliveira, Apontamentos das aulas de Comando e Protecção de Redes Eléctricas, UALG: DEE-ISE, 2014.
- [2] ALSTOM, Network Protection and Application Guide, 2011 Edition.
- [3] L. Oliveira, Desenvolvimento de Métodos de Detecção de Avarias e Algoritmos de Protecção para Aplicação em Sistemas de Monitorização Contínua de Transformadores Trifásicos, Universidade de Coimbra: Tese de Doutoramento, 2013.
- [4] S. V. Kulkarni e S. A. Khaparde, Transformer Engineering Design and Practice, New York: Marcel Dekker, 2004.
- [5] H. Bronzeado e R. Yacamini, Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients, IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 1995.
- [6] H. A. Halim, B. T. Phung e J. Fletcher, Investigation and modelling of sympathetic inrush due to transformer energization, 2014 International Conference on. IEEE: In: Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS), 2014.
- [7] S. H. Horowitz e A. G. Phadke, Power system relaying, New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [8] C. Cabral, Sebenta de Máquinas Eléctricas I, DEE-ISE, UALG, 2013L..
- [9] Oliveira, Sebenta de Electrotecnia Aplicada, DEE-ISE: UALG, 2011.

## Anexos

Anexo 1 - Comutação de dois transformadores ao mesmo barramento em vazio com vários ângulos de comutação, vários tipos de ligação de enrolamentos e diversas induções remanescentes.

Anexo 2 - Comutação de dois transformadores ao mesmo barramento para várias cargas com diversos tipos de ligação de enrolamentos.

Anexo 3 – Introdução de uma cava para diversos tipos de ligação de enrolamentos.

Anexo 4 – Introdução de sobretensão para diversos tipos de ligação de enrolamentos.