



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

**Relé diferencial numérico  
para proteção de transformadores**

Filipe Monteiro Rafael

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Elétrica e Eletrónica

Área de Especialização em Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Luís Manuel Ramos de Oliveira

2015



Família e Amigos







# Agradecimentos

---

Em primeiro lugar tenho agradecer a uma pessoa fundamental para que este trabalho chegasse até este ponto, o meu professor e orientador Luís Oliveira. Obrigado pela sua dedicação, pela paciência, pela disponibilidade de ajudar sempre, pelo profissionalismo, pelos ensinamentos. Sem o seu apoio não teria conseguido. Muito obrigado!

Durante a realização deste trabalho muitas foram as pessoas que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para o seu sucesso. Quero agradecer a todos os professores que me acompanharam ao longo desta aventura que foi a licenciatura e o mestrado, obrigado pelo apoio e ensinamentos.

Agradeço aos técnicos de laboratório António Costa e Nuno Portela por todo o apoio prestado no laboratório.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve os meios disponibilizados para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos que me apoiaram.

Um obrigado especial aos meus pais pelo esforço por eles realizados para me possibilitarem esta oportunidade, por toda a educação e incentivo que me deram. Quero também deixar uma palavra de agradecimento ao meu irmão. Um agradecimento a todos os meus familiares que sempre acreditaram em mim.



# Resumo

---

Devido ao seu elevado custo e à importância que os transformadores têm 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 no transformador 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 desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos dispositivos de proteção requer um sistema de teste e aquisição de dados que permita ensaiar de forma rápida e flexível as diferentes especificidades dos algoritmos de proteção.

O trabalho apresentado nesta dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de um relé diferencial numérico. O *hardware* do relé assenta na placa de aquisição de dados *PCI-6070E* da *National Instruments*, cujas entradas analógicas vão ser utilizadas para efetuar a aquisição digital dos sinais de corrente e de tensão. As saídas analógicas permitem emitir um sinal relativo ao disparo da proteção e enviar um sinal para introduzir uma avaria no sistema. Através de uma aplicação desenvolvida em ambiente *Simulink*, o relé diferencial numérico permite ensaiar de forma rápida e flexível as diferentes especificidades dos algoritmos de proteção. Permite ainda, em tempo real, detetar a ocorrência de defeitos internos no transformador, identificar e distinguir outras perturbações no sistema de energia elétrica, registar automaticamente as anomalias que ocorram no sistema de energia elétrica e emitir o sinal para abertura do circuito.

O correto funcionamento do relé diferencial numérico proposto é demonstrado através da realização de diversos ensaios, que permitem testar as várias características do sistema desenvolvido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transformadores, sistemas de aquisição de dados, relés de proteção, defeitos internos e externos.



# Abstract

---

Due to power transformers high cost and importance it is essential to ensure the correct operation of their protecting devices, in order to isolate the defects at an early stage and avoid catastrophic faults, minimizing the damage in the transformer and reducing downtime and related costs. The improvement of transformer protection systems it therefore of critical importance in order to increase the global reliability of the production, transmission and distribution systems.

The development and improvement of new protection devices requires a data acquisition and test system that allows for the rapid and flexible testing of the different characteristics of the protection algorithms.

The work presented in this dissertation aims at the development of a numerical differential relay. The relay's hardware is based on data acquisition PCI-6070E card of National Instruments. The analog inputs will be used for the digital acquisition of the current and voltage signals. The analog outputs are used to send the trip signal to the circuit-breakers and to introduce faults in the power transformer. The numerical differential relay was developed in Simulink environment, and allows for the fast and flexible testing of the different features of protection algorithms. The application allows to detect the faults in real-time, to identify and distinguish other disturbances in the electric power system, to send the proper signal to the circuit-breakers and to register the digital data.

The correct operation of the developed differential relay is demonstrated through various tests, which allow to examine the several characteristics of the protection algorithm.

**KEYWORDS:** Transformers, data acquisition systems, protection relays, internal and external defects.



# Índice

---

Agradecimentos .....	i
Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Índice.....	vii
Lista de Símbolos.....	xiii
Lista de Abreviaturas.....	xvi
1. Introdução .....	1
1.1 Organização do Documento .....	3
2. Proteção dos transformadores.....	5
2.1 Proteção diferencial.....	7
2.1.1 Proteção diferencial irrestrita .....	7
2.1.2 Proteção diferencial proporcional.....	10
2.2 Disparos intempestivos dos relés .....	11
2.2.1 Sobrecorrentes transitórias de excitação.....	11
2.2.2 Sobreexcitação .....	14
2.2.3 Saturação dos TI .....	14
2.3 Relés numéricos.....	14
2.4 Outros algoritmos de proteção propostos para superar as limitações dos relés numéricos convencionais.....	15
2.5 Obtenção das correntes diferenciais e de estabilização .....	16
3. Implementação do relé em ambiente <i>Simulink</i> .....	19
3.1 Configuração da <i>Real Time Windows target</i> .....	19
3.2 Sistema de teste e aquisição de dados.....	20
3.2.1 Aquisição de sinais analógicos.....	22
3.2.2 Filtragem dos sinais (correntes/tensões) .....	23

3.2.3 Remoção da componente DC .....	24
3.2.3.1 Remoção da componente DC em regime permanente (remoção com janela deslizante) .....	25
3.2.3.2 Remoção da componente DC para ensaios referentes à ligação do transformador à rede .....	26
3.2.4 Ganhos dos sensores e razão de transformação dos TI .....	26
3.2.5 Visualização da forma de onda das correntes.....	27
3.2.6 Remoção da componente homopolar.....	27
3.2.7 Calculo das correntes diferenciais e de estabilização .....	29
3.2.8 Análise de Fourier das correntes diferenciais/estabilização .....	29
3.2.9 Proteção diferencial .....	31
3.2.9.1 Sinal de deteção de defeito.....	31
3.2.9.2 Sinal de bloqueio .....	34
3.2.10 Introdução de defeitos no transformador .....	35
3.2.11 Subsistema de comando .....	37
3.2.11.1 Sinal de disparo da proteção diferencial .....	37
3.2.11.2 Sinal de fecho dos contadores das linhas de alimentação do transformador.....	38
3.2.11.3 Sinal enviado para os contadores.....	39
3.3 Aplicação <i>Simulink</i> “Teste” .....	41
3.4 Construção do <i>layout</i> da <i>Graphical User Interface</i> .....	42
3.4.1 Separadores da interface gráfica.....	42
3.5 Alterações a efetuar para implementação de outros algoritmos de proteção .....	50
4. Validação Experimental.....	53
4.1 Montagem laboratorial.....	53
4.2 Ensaios Laboratoriais .....	61
4.2.1 Ensaio 1: Regime permanente em carga – Sem defeito .....	61
4.2.2 Ensaio 2: Introdução de defeito A-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	66

4.2.3 Ensaio 3: Introdução de defeito A-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$ .....	71
4.2.4 Ensaio 4: Introdução de defeito A-B, $R_{Falha} = 64 \Omega$ .....	75
4.2.5 Ensaio 5: Introdução de defeito A-B, $R_{Falha} = 96 \Omega$ .....	79
4.2.6 Ensaio 6: Ligação do transformador à rede – Sem defeito .....	82
4.2.7 Ensaio 7: Ligação do transformador à rede – Com defeito A-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ ...	87
4.2.8 Ensaio 8: Ligação do transformador à rede –Com defeito A-B, $R_{Falha} = 64 \Omega$ ....	91
4.2.9 Ensaio 9: Introdução de defeito externo u-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	95
4.2.10 Influência do filtro e dos transformadores de corrente nos ensaios .....	96
5. Conclusões.....	97
Referências.....	101
Anexo I – Configuração da <i>RTWT</i> .....	105
1) Configuração do modo de simulação .....	105
2) Configuração do painel <i>Solver</i> .....	105
3) Configuração do painel <i>Hardware</i> .....	106
4) Configuração do painel <i>Real- time Workshop</i> .....	107
5) Configuração do painel <i>Real-Time Windows Target</i> .....	107
6) Configuração da função <i>External Mode Control Panel</i> .....	108
7) Configuração dos <i>Scopes</i> .....	110
Anexos II – Código <i>Matlab</i> para desenvolvimento da Interface Gráfica .....	111
All.1 – Construção do <i>layout</i> da <i>Graphical User Interface</i> .....	111
All.2 - Código <i>Matlab</i> da <i>Graphical User Interface</i> .....	113
All.2.1 – Exemplos de código.....	113
1) Criar separadores.....	113
2) Carregar uma imagem para a janela da <i>GUI</i> .....	115
3) Botão enviar dados .....	115
4) Código para selecionar a remoção da componente DC dos sinais provenientes dos sensores de corrente .....	117
5) Característica operacional da proteção diferencial.....	118

6) Código do botão <i>Start</i> .....	119
7) Botão <i>Stop</i> .....	120
8) Botão <i>Plot</i> .....	121
9) Botão <i>To Figure</i> .....	122
10) Código do botão <i>Instruções</i> .....	123
11) Código do botão <i>Informação Importante</i> .....	124
12) Botão <i>Start Teste</i> .....	125
All.2.2 –Código completo da <i>GUI</i> .....	127
Anexos III – Esquemas dos protótipos laboratoriais .....	169
Anexo IV - Ensaio .....	171
Ensaio 10: Introdução de defeito B-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	171
Ensaio 11: Introdução de defeito C-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	174
Ensaio 12: Introdução de defeito u-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	177
Ensaio 13: Introdução de defeito v-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	180
Ensaio 14: Introdução de defeito w-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	183
Ensaio 15: Introdução de defeito B-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$ .....	186
Ensaio 16: Introdução de defeito C-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$ .....	189
Ensaio 17: Introdução de defeito u-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$ .....	192
Ensaio 18: Introdução de defeito v-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$ .....	195
Ensaio 19: Introdução de defeito w-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$ .....	198
Ensaio 20: Introdução de defeito B-C, $R_{Falha} = 64 \Omega$ .....	201
Ensaio 21: Introdução de defeito C-A, $R_{Falha} = 64 \Omega$ .....	204
Ensaio 22: Introdução de defeito u-v, $R_{Falha} = 64 \Omega$ .....	207
Ensaio 23: Introdução de defeito v-w, $R_{Falha} = 64 \Omega$ .....	210
Ensaio 24: Introdução de defeito w-u, $R_{Falha} = 64 \Omega$ .....	213
Ensaio 25: Introdução de defeito B-C, $R_{Falha} = 96 \Omega$ .....	216
Ensaio 26: Introdução de defeito C-A, $R_{Falha} = 96 \Omega$ .....	219
Ensaio 27: Introdução de defeito u-v, $R_{Falha} = 96 \Omega$ .....	222

Ensaio 28: Introdução de defeito v-w, $R_{Falha} = 96 \Omega$ .....	225
Ensaio 29: Introdução de defeito w-u, $R_{Falha} = 96 \Omega$ .....	228
Ensaio 30: Introdução de defeito externo v-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	231
Ensaio 31: Introdução de defeito externo w-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$ .....	232
Ensaio 32: Introdução de defeito A-n, $R_{Falha} = 64 \Omega$ , (Nova característica operacional da protecção diferencial). .....	233



## Lista de Símbolos

---

$Amp$	– Ganho do amplificador de isolamento;
$i_1 \dots i_6$	– Valor instantâneo das correntes nos enrolamentos do transformador (A);
$I_1/I_2$	– Razão entre o 2.ºh e o 1.ºh das correntes diferenciais (A);
$i_{1TI}$	– Valor instantâneo da corrente no enrolamento secundário do TI, localizado no lado primário do transformador de potência (A);
$i_{2TI}$	– Valor instantâneo da corrente no enrolamento secundário do TI, localizado no lado secundário do transformador de potência (A);
$id$	– Valor instantâneo da corrente diferencial (A);
$i_{dif1} \dots i_{dif3}$	– Valor instantâneo das correntes diferenciais na linha (A);
$Idif\ Eficaz\ 1^{º}h$	– Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial (A);
$Idif\ Eficaz\ 2^{º}h$	– Valor eficaz do segundo harmónico da corrente diferencial (A);
$i_{difFase1} \dots i_{difFase3}$	– Valor instantâneo das correntes diferenciais por fase (A);
$I_{E1}$	– Corrente de estabilização máxima para definição da 1.ª Zona da característica operacional (% $I_n$ ) (A);
$i_{exc1} \dots i_{exc3}$	– Valor instantâneo das correntes de excitação (A);
$iest$	– Valor instantâneo da corrente de estabilização (A);
$I_{est1^{º}h}$	– Valor eficaz do primeiro harmónico da corrente de estabilização (A);
$i_{est1} \dots i_{est3}$	– Valor instantâneo das correntes de estabilização na linha (A);
$I_F$	– Tempo definido para a introdução do defeito no transformador (s);

$I_L$	– Tempo definido para o fecho dos contadores das linhas de alimentação do transformador de potência (s);
$i_{L1} \dots i_{L6}$	– Valor instantâneo das correntes de linha do transformador (A);
$\hat{i}_{L1}$	– Valor de pico da corrente da linha 1 (A);
$i_{L1}^* \dots i_{L6}^*$	– Valor instantâneo das correntes de linha do transformador sem a componente homopolar (A);
$I_{Limite_{Dif1}}$	– Limite definido na primeira zona da característica operacional da proteção diferencial (A);
$I_{Limite_{Dif2}}$	– Limite definido na segunda zona da característica operacional da proteção diferencial (A);
$I_{min}$	– Corrente mínima de operação do relé diferencial (% $I_n$ ) (A);
$I_n$	– Corrente da linha nominal no primário do transformador de potência (A);
$i_p$	– Valor instantâneo da corrente no enrolamento primário (A);
$i_s$	– Valor instantâneo da corrente no enrolamento secundário (A);
$k$	– Declive da segunda reta da característica operacional da proteção diferencial (%);
$k_b$	– Limite pré-definido para o bloqueio harmónico;
$N_1$	– Número de espiras do enrolamento do primário do transformador;
$N_2$	– Número de espiras do enrolamento do secundário do transformador;
$N_{2TI(1)}$	– Número de espiras no secundário dos TI no primário do transformador de potência;
$N_{2TI(2)}$	– Número de espiras no secundário dos TI no secundário do transformador de potência;
$R$	– Escolha do ensaio pretendido;
$R_1 \dots R_6$	– Componente contínua de cada sensor de corrente;

$S$	– Ganho dos sensores de corrente;
$S_n$	– Potência aparente nominal do transformador de potência (VA);
$V_{LL1}$	– Tensão composta do primário do transformador de potência (V);
$V_{LL2}$	– Tensão composta do secundário do transformador de potência (V);
$\Phi_{Max}$	– Valor máximo do fluxo magnético (Wb);
$\Phi_R$	– Fluxo magnético remanescente (Wb).

## Lista de Abreviaturas

---

AC	– Corrente alternada;
DC	– Componente contínua;
GUI	– Graphical User Interface;
GUIDE	– Graphical User Interface Design Environment;
inf	– Infinito;
NA	– Normalmente aberto;
NF	– Normalmente fechado;
NI	– National instruments;
NRSE	– Non-Referenced Single-Ended;
RTWT	– Real-Time do Windows Target;
SEE	– Sistemas de energia elétrico;
TI	– Transformadores de intensidade de corrente.

# 1. Introdução

---

O transporte de energia elétrica a longas distâncias só é possível graças à utilização de transformadores de potência. Estes desempenham um papel fundamental nos sistemas de transporte e distribuição de energia, aumentando a tensão durante a transmissão de forma a minimizar as perdas e reduzindo-a novamente quando necessário para valores mais baixos e seguros para o consumo [1].

Devido à relevância e custo dos transformadores é importante detetar as suas avarias numa condição ainda incipiente, por forma a minimizar os danos e o tempo de reparação da unidade afetada. 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 [2]-[4]. 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 harmónica.

Os relés de proteção modernos, com funcionamento baseado em microprocessadores, têm vindo a substituir gradualmente os relés eletromecânicos e eletrónicos convencionais, sendo economicamente viável a sua utilização em transformadores de menor potência, devido ao seu menor custo, configuração mais flexível e sistema multifunções.

Apesar destas funcionalidades, os atuais dispositivos de proteção diferencial de transformadores apresentam ainda algumas limitações, como a reduzida sensibilidade na deteção de avarias incipientes e a dificuldade na discriminação entre defeitos internos e outras perturbações externas, como sobrecorrentes transitórias de excitação [5]. O desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos algoritmos de proteção é assim de primordial importância para melhorar a fiabilidade dos dispositivos de proteção dos transformadores. Para o efeito é necessário testar e comparar de forma rápida e flexível

as diferentes especificidades dos algoritmos de proteção. Em [6] e [7] foram já propostos relés numéricos que permitem efetuar estes testes. Nestes trabalhos foram utilizados sistemas não dedicados para aquisição de dados, com recurso a microprocessadores DSP32C e TMS32010, respetivamente, e linguagem de baixo nível. O desenvolvimento dos algoritmos de proteção nestes sistemas torna-se mais complexo, devido às dificuldades de implementação das estratégias de deteção de defeitos em ambiente (*hardware* e *software*) pouco amigável.

O principal objetivo deste trabalho consiste na realização de um relé diferencial numérico, que permita implementar e testar algoritmos de proteção para deteção de defeitos em transformadores. Pretende-se que os algoritmos de proteção sejam implementados em ambiente *Matalb/Simulink*, por forma a facilitar o desenvolvimento de novos métodos de deteção de avarias e, adicionalmente, permitir utilizar as ferramentas de computação, visualização e de processamento digital de sinal já disponíveis neste *software*. A utilização da linguagem de alto nível do *MATLAB* permite assim obter uma aplicação flexível com um interface amigável com o utilizador. O *hardware* do relé assenta na placa de aquisição de dados *PCI-6070E da National Instruments*, cujas entradas analógicas vão ser utilizadas para efetuar a aquisição digital dos sinais dos transformadores de intensidade de corrente (TI) e das tensões aos terminais do transformador. As saídas analógicas permitem emitir um sinal relativo ao disparo da proteção e enviar um sinal para introduzir uma anomalia no sistema. Pretende-se ainda que o algoritmo de proteção detete em tempo real a ocorrência de defeitos internos no transformador, identifique e distinga outras perturbações no sistema de energia elétrica e, caso se justifique, emita o sinal para efetuar o corte da alimentação do transformador. O sistema deve também registar automaticamente as anomalias que ocorram no sistema de energia elétrica.

O relé diferencial numérico é controlado por uma interface gráfica de forma a permitir que o utilizador execute as tarefas em ambiente amigável.

## 1.1 Organização do Documento

O presente documento está organizado como se descreve em 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. Apresentam-se ainda as principais características do relé numérico e o método de cálculo das correntes diferenciais e de estabilização.

No capítulo 3 descrevem-se as configurações da ferramenta *Matlab Real Time Windows Target*, da placa de aquisição, da aplicação gráfica e do algoritmo de proteção.

Os resultados dos ensaios realizados são apresentados no capítulo 4. Este capítulo tem por objetivo obter a validação experimental do modelo *Simulink* do relé diferencial numérico e da interface gráfica desenvolvida. Para tal são realizados diversos ensaios, que permitem testar as várias especificações do sistema desenvolvido.

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



## 2. Proteção dos transformadores

---

A ocorrência de defeitos em transformadores é um fenômeno relativamente raro. No entanto, uma avaria inesperada num transformador pode provocar prejuízos elevados, onde se incluem não só a reparação ou substituição do equipamento, mas também os custos relativos à energia não vendida e às eventuais penalidades devido ao incumprimento dos padrões de continuidade de serviço [5].

Os defeitos nos transformadores são geralmente classificados em cinco categorias [4]:

- a) Defeitos nos enrolamentos, onde se incluem os defeitos fase-terra, defeitos fase-fase e defeitos entre espiras;
- b) Defeitos no regulador de tensão em carga;
- c) Defeitos no núcleo;
- d) Defeitos no tanque;
- e) Defeitos externos.

**Defeitos nos enrolamentos:** os defeitos nos enrolamentos ocorrem quando existe uma deterioração do seu isolamento sólido (normalmente papel isolante). Ao longo da sua vida os transformadores são sujeitos a uma larga variedade de esforços térmicos, mecânicos e elétricos, os quais, atuando individualmente ou em conjunto, contribuem para o envelhecimento dos materiais orgânicos de isolamento. O enfraquecimento da rigidez dielétrica e mecânica do papel pode levar à ruptura do material isolante, a qual pode ser desencadeada por um esforço externo, como um curto-circuito externo ou uma descarga atmosférica. Se a descarga através do material isolante tiver energia suficiente vão formar-se pontos de carbonização local no papel, acelerando assim o processo de deterioração do isolamento até à perfuração da sua estrutura, resultando num defeito permanente no enrolamento.

***Defeitos fase-terra:*** O grau de severidade destes defeitos depende do tipo de ligação dos enrolamentos (estrela ou triângulo) e da forma como o neutro se encontra ligado à terra: ligação direta ou através de uma impedância de neutro. No caso de enrolamentos ligados em estrela e de ligação direta do neutro à terra

a corrente de defeito pode atingir valores muito elevados, pois é apenas limitada pela resistência e reactância de fugas relativa à parcela afetada do enrolamento. Esta reactância varia de forma complexa com a posição do defeito [8]. Para defeitos próximos do ponto neutro a reactância é muito baixa, o que origina correntes de defeitos elevadas. No caso do neutro ser ligado à terra através de uma impedância a corrente de defeito é proporcional à distância a que este ocorre do ponto neutro e toma valores mais reduzidos que no caso anterior. No caso de defeitos fase-neutro em enrolamentos ligados em triângulo a corrente de defeito possui habitualmente um valor mais reduzido, comparativamente com o caso dos enrolamentos ligados em estrela, e depende, de forma não linear, com a posição do defeito [9].

***Defeitos fase-fase:*** Os defeitos fase-fase nos transformadores são relativamente raros, mas quando ocorrem originam uma corrente de defeito semelhante ao caso de um curto-circuito fase-neutro (neutro ligado diretamente a terra) [4].

***Defeitos entre espiras:*** Um curto-circuito entre duas espiras poderá resultar, inicialmente, numa corrente de entrada dos enrolamentos menor que a corrente de ativação dos circuitos de proteção do transformador. Habitualmente, os dispositivos de proteção não são suficientemente sensíveis para detetar este tipo de avarias, pelo que o transformador só é desligado automaticamente da rede quando o defeito se expandiu já a uma porção considerável do enrolamento afetado [5].

A deteção atempada dos defeitos de isolamento nos enrolamentos é crucial para evitar que a avaria se propague e culmine numa avaria catastrófica. Os sistemas de proteção desempenham aqui um papel decisivo, pois é indispensável detetar a avaria numa fase ainda incipiente, por forma a isolar o transformador da rede o mais rapidamente possível e assim minimizar os danos e garantir a segurança das pessoas e bens nas proximidades da instalação.

**Defeitos no regulador de tensão em carga:** Os reguladores de tensão em carga são dos poucos componentes do transformador cuja função requer movimento mecânico, estando assim sujeitos a um maior desgaste. Estes equipamentos requerem planos de manutenção bastante exigentes, por forma a substituir os componentes antes do final da sua vida útil. Este tipo de defeitos pode também conduzir a uma falha catastrófica do transformador.

**Defeitos no núcleo:** Quando existe uma ruptura do isolamento entre as lâminas do núcleo ferromagnético são induzidas correntes de *Foucault*. A circulação destas correntes provoca um sobreaquecimento local que poderá propagar-se e danificar o núcleo e os enrolamentos.

**Defeitos no tanque:** Quando o nível do óleo do tanque não é o adequado, pode ocorrer um sobreaquecimento dos enrolamentos. O sobreaquecimento pode ainda ocorrer devido a uma sobrecarga prolongada, ou devido a problemas de refrigeração.

**Defeitos externos:** Os defeitos externos (curtos-circuitos externos, sobrecargas, sobretensões, fenómenos de subfrequência) podem produzir sobreaquecimentos e esforços mecânicos significativos no transformador.

## 2.1 Proteção diferencial

### 2.1.1 Proteção diferencial irrestrita

O funcionamento do relé diferencial baseia-se na comparação das correntes do primário e do secundário do transformador de potência. Para efetuar a medição destas grandezas são utilizados TI. A corrente diferencial é obtida efetuando a diferença entre as correntes no lado primário e no lado secundário, referidas a uma base comum. A corrente diferencial é aproximadamente nula em regime de funcionamento normal do transformador, sofrendo um aumento significativo quando ocorre um defeito no seu interior. A corrente diferencial constitui assim um método simples e eficaz de proteção contra curto-circuitos na zona de proteção do transformador, a qual é delimitada pelos TI [3], [5] e [9].

Quando ocorre um defeito externo à zona de proteção do transformador o relé diferencial não deve atuar, devendo ser os dispositivos mas próximos do defeito a retirar de serviço o circuito afetado [3], [5] e [9].

Durante o funcionamento normal do transformador, sem avarias e desprezando as correntes de excitação, têm-se [5]:

$$N_1 \cdot i_p + N_2 \cdot i_s \approx 0 \quad (2-1)$$

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 Fig. 2.1).

As correntes de entrada e saída do transformador são lidas através dos TI, resultando, [5]:

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

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, respetivamente, e  $i_{1TI}$  e  $i_{2TI}$  representam as correntes no secundário dos TI localizados no lado primário e secundário do transformador de potência, respetivamente (notação segundo a Fig. 2.1).

Para converter as correntes no relé para uma base comum podem utilizar-se relações de transformação adequadas nos TI, ou seja [5]:

$$N_1 \cdot N_{2TI(1)} = N_2 \cdot N_{2TI(2)} \quad (2-3)$$

resultando:

$$i_{1TI} - i_{2TI} \approx 0 \quad (2-4)$$

Nos relés modernos, que utilizam cálculo numérico baseado em microprocessadores, esta conversão é incluída na programação do dispositivo, não sendo necessário que a relação de transformação dos TI cumpra (2-3) [5].

A corrente diferencial vem [5]:

$$id = i_{1TI} - i_{2TI} \quad (2-5)$$

Verifica-se que, em condições de funcionamento normal, aplicando (2-2) a (2-5), a corrente diferencial é aproximadamente nula. Pelo contrário, se ocorrer uma avaria interna no transformador a relação (2-3) já não é válida, resultando numa corrente diferencial cujo valor é proporcional à corrente de falha. A corrente diferencial resulta assim numa medida extremamente sensível da corrente de falha [5].

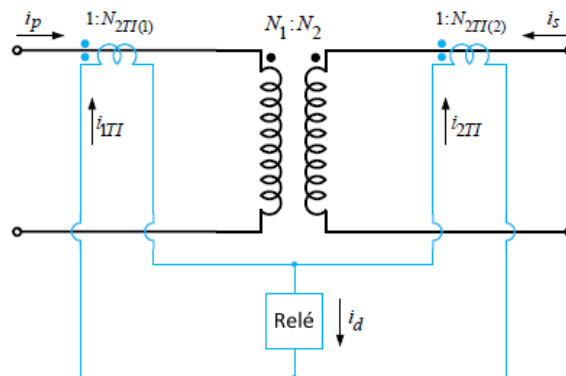


Figura 2.1 - Esquema do relé diferencial (monofásico), [2].

Não é aconselhável utilizar diretamente a corrente diferencial como forma de detetar defeitos, dado que existem diversos fatores que provocam erros que podem levar a atuação indevida do relé [3], [5] e [9]:

- 1º. Nem sempre é possível converter as correntes no secundário dos TI para a mesma base. Este problema é particularmente importante nos relés eletromecânicos pois é difícil obter transformadores de corrente com relações de transformação que satisfaçam (2-3). Nos relés numéricos este aspeto não é relevante, pois esta compensação é habitualmente efetuada no código do algoritmo. Um problema similar ocorre devido à variação da relação de transformação do transformador de potência, por atuação do regulador de tensão. Quando a posição das tomadas é alterada vai existir uma corrente de desequilíbrio no relé que poderá resultar numa ativação incorreta da proteção. Os erros na relação de transformação dos TI podem ser diferentes, produzindo também uma corrente de desequilíbrio que depende da corrente que circula no transformador de potência.
  
- 2º. No caso de se utilizar um transformador trifásico pode verificar-se um desfasamento entre as correntes de linha do primário e do secundário, desfasamento esse que depende da forma de ligação dos enrolamentos, (índice horário). A compensação no caso dos relés eletromecânicos é realizada alterando a forma como os TI estão ligados: se os enrolamentos do transformador de potência estiverem ligado em triângulo é necessário ligar os TI em estrela; se os enrolamentos estiverem ligados em estrela, os TI são ligados em triângulo. Consegue-se assim anular o desfasamento entre as correntes de entrada e saída do transformador de potência. No caso dos relés numéricos a compensação é efetuada no algoritmo através da subtração das correntes de fase.
  
- 3º. Nos enrolamentos ligados em triângulo a componente homopolar está presente nas correntes de fase, não estando nas correntes de linha. Nos enrolamentos ligados em estrela com, o neutro ligado à terra, pode

verificar-se a existência de uma componente homopolar significativa, que pode resultar de um defeito no interior ou no exterior da zona de proteção de relé. A existência da componente homopolar das correntes apenas num dos lados do transformador pode dar origem à atuação incorreta do relé, quando ocorrer um defeito (ou um outro fenómeno que provoque um desequilíbrio) fora da sua zona de proteção.

A compensação da componente homopolar efetuada utilizando as ligações dos TI referidas anteriormente ou através do código do algoritmo, removendo a componente homopolar das correntes na entrada do relé.

### 2.1.2 Proteção diferencial proporcional

A proteção diferencial proporcional garante mais 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 (2-6). A corrente de estabilização refere-se à corrente equivalente que circula através do transformador. Normalmente é calculada como a média das correntes de entrada e saída do transformador, referidas a uma base comum e vistas no secundário dos TI, conforme indicado na equação (2-7). Para evitar que ocorram disparos intempestivos do relé é definido um valor mínimo da corrente diferencial que provoca a sua ativação ( $I_{min}$ ), Fig. 2.2(a), que toma em consideração o desequilíbrio na relação de transformação do transformador, os erros originados pelos TI, os erros que o regulador de tensão pode provocar na razão de transformação e uma margem de segurança [3], [5] e [9].

$$i_d \geq k * i_{est} \quad (2-6)$$

$$i_{est} = \frac{i_{1TI} + i_{2TI}}{2} \quad (2-7)$$

Podem-se utilizar vários declives para ajustar a característica de proteção, conforme ilustrado na Fig. 2.2(b). Para correntes diferenciais muito elevadas pode-se remover imediatamente o transformador de serviço através da utilização de uma zona irrestrita na característica, Fig. 2.2(b).

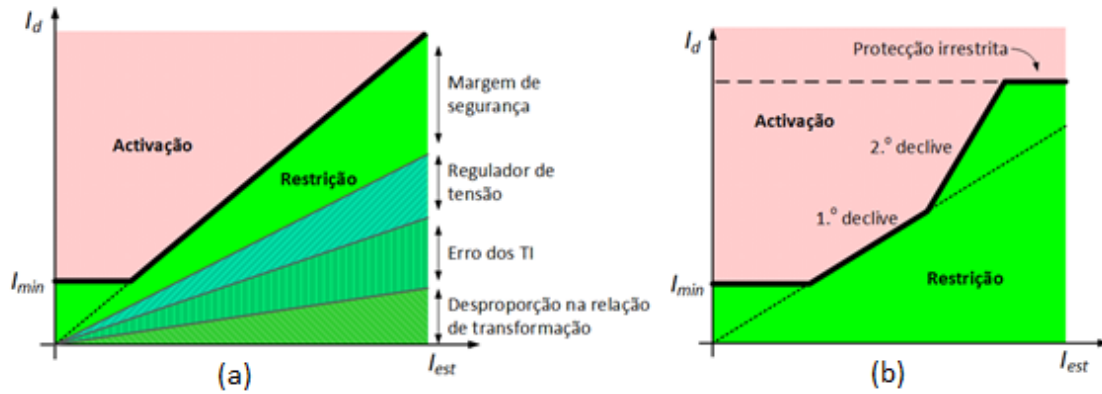


Figura 2.2 – (a): Característica da proteção diferencial proporcional; (b): Característica da proteção diferencial proporcional, com múltiplos declives, [2].

## 2.2 Disparos intempestivos dos relés

Os disparos intempestivos dos relés diferenciais de proteção do transformador devem-se principalmente às sobrecorrentes transitórias de excitação, sobreexcitação e à saturação dos TI.

### 2.2.1 Sobrecorrentes transitórias de excitação

Quando se realiza a ligação do transformador à rede existe uma variação brusca da tensão (a variação da tensão é diretamente proporcional à variação do fluxo magnético do núcleo, lei de Faraday). Nestas condições o valor do fluxo pode duplicar em relação ao valor de regime permanente, originando sobrecorrentes 10 a 20 vezes superiores à corrente nominal. Além do processo de ligação do transformador à rede, estas sobrecorrentes transitórias de excitação podem ainda ser originadas devido à ligação de outros transformadores situados numa zona próxima ou quando ocorrem perturbações na tensão, por exemplo durante um processo de recuperação de um defeito fora da zona de proteção do relé [3] e [5].

As sobrecorrentes transitórias de excitação caracterizam-se por formas de onda distorcidas, incluem componente DC e harmónicas de ordem par [3] e [5].

O aparecimento de sobrecorrentes transitórias de excitação depende de:

- Indução remanescente inicial;
- Fluxo de saturação do núcleo;
- Valor da tensão da tensão no momento de ligação;

- Característica do núcleo ferromagnético;

Na Fig. 2.3, ilustra-se o fenómeno de ligação do transformador, onde, devido à aplicação da tensão, o fluxo em regime transitório atinge o dobro do valor do fluxo em regime permanente. O aumento do fluxo provoca uma sobrecorrente transitória de excitação, cujo valor máximo ocorre no instante em que o fluxo é máximo. No caso da Fig. 2.3 considerou-se uma magnetização inicial nula no núcleo.

Na Fig. 2.4, ilustra-se o fenómeno de ligação do transformador considerando magnetização inicial não nula no núcleo. Este pode constituir o pior caso, onde a sobrecorrente transitória de excitação toma valores ainda mais elevados, devido à contribuição aditiva do fluxo inicial. O fluxo inicial poderá também ter uma contribuição subtrativa, que tenderá a diminuir o valor de pico da corrente transitória de excitação.

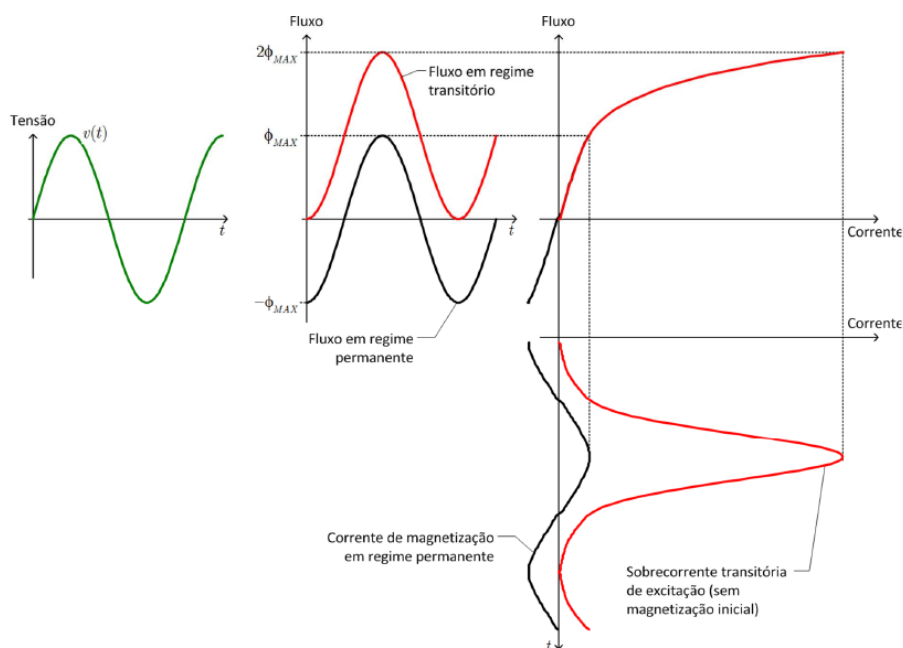


Figura 2.3 - Fenómeno da ligação do transformador a rede (sem magnetização inicial), [2].

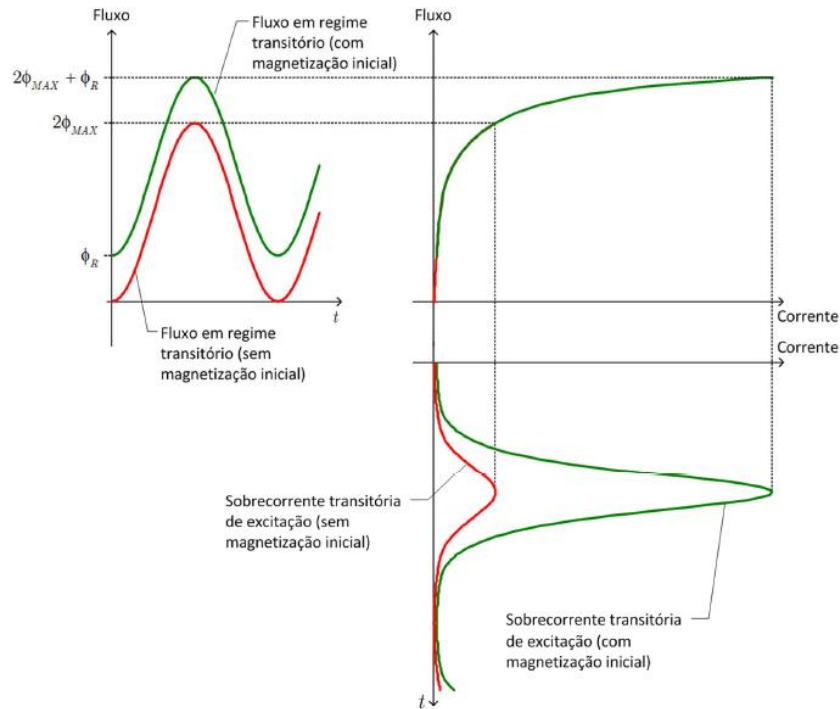


Figura 2.4 - Fenómeno da ligação do transformador rede (com magnetização inicial), [2].

A sobrecorrente transitória de excitação surge apenas num dos lados do transformador, podendo ser tomada pelo relé como uma corrente de defeito e provocar disparos intempestivos da proteção. Este funcionamento incorreto tem de ser evitado, sendo necessário que o relé efetue a distinção entre a situação de defeito e sobrecorrentes transitórias de excitação. Esta distinção é efetuada através das características distorcidas das sobrecorrentes de ligação, que possuem normalmente um valor do segundo harmónico elevado. Pelo contrário, as correntes de defeito não incluem este harmónico, o que possibilita efetuar a discriminação entre estas situações de funcionamento. Assim, quando a percentagem do 2.º harmónico em relação ao 1.º  $(I_{2h}/I_{1h})^1$  for superior a um valor pré-definido (15% a 25%) o relé é inibido de atuar. Se o valor pré-definido for muito baixo o relé pode ser inibido de atuar quando ocorre um defeito. Por outro lado, se  $I_2/I_1$  for elevado a sobrecorrente de excitação pode não ser detetada e provocar um disparo intempestivo. Assim, a escolha do valor pré-definido de  $I_2/I_1$  que provoca a inibição do relé, constitui também um compromisso entre a segurança e a dependabilidade da proteção [5].

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

## 2.2.2 Sobreexcitação

Se ocorrer uma sobretensão no transformador vai existir um aumento do fluxo, que dará origem à saturação do circuito magnético. Este fenómeno provoca uma corrente de excitação elevada, que poderá levar a uma ativação incorreta do relé diferencial. No caso de ocorrer uma diminuição da frequência irá ocorrer um fenómeno similar. Nestas situações o correto funcionamento do relé é assegurado efetuando a sua inibição através da deteção do 5.º harmónico da corrente diferencial, situação que é indicativa da ocorrência deste tipo de fenómenos [3] e [5].

## 2.2.3 Saturação dos TI

Se os TI saturarem as correntes medidas no seu lado secundário não refletem com rigor a corrente na entrada/saída do transformador de potência, Fig. 2.5. Isto pode provocar um erro significativo no cálculo da corrente diferencial e originar um funcionamento incorreto do relé.

Por forma a minimizar esta situação são habitualmente utilizados nos relés numéricos algoritmos que permitem detetar a saturação dos TI e bloquear a ação do relé [3] e [5].

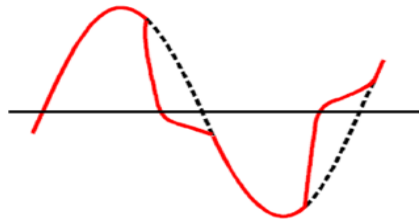


Figura 2.5 - Onda distorcida devido a saturação dos TI, [2].

## 2.3 Relés numéricos

Nos relés numéricos as funções de proteção são realizadas através de código executado em microprocessador. A sua parametrização é assim mais fácil e versátil, comparativamente com os relés eletromecânicos. Normalmente os relés numéricos incluem as seguintes características [2] e [10]:

- Multifunção: realizam a função de proteção, monitorização e registador de ocorrências.
- Comunicação: possuem módulos de comunicação integrados.
- Autodiagnóstico: efetuam testes para diagnosticar o estado de funcionamento do próprio relé, emitindo alarmes no caso de ser detetada qualquer anomalia.
- Algoritmos auto-adaptativos: permitem adaptar os parâmetros do relé em função do estado e configuração do sistema de energia elétrico (SEE), utilizando os protocolos de comunicação.
- As características do transformador de potência e dos TI são incluídas na parametrização do relé. A compensação do índice horário, a filtragem da componente homopolar e a conversão das grandezas a uma base comum é efetuada diretamente na programação do relé.

## **2.4 Outros algoritmos de proteção propostos para superar as limitações dos relés numéricos convencionais**

A esmagadora maioria dos dispositivos para proteção de transformadores atualmente disponíveis no mercado utilizam as técnicas de restrição/bloqueio harmónico para detetar a ocorrência de sobrecorrentes transitórias de excitação e impedir a operação incorreta da proteção. No entanto, tem-se verificado frequentemente falhas na atuação destes relés, provocadas maioritariamente por sobrecorrentes transitórias de excitação. Adicionalmente, os relés diferenciais convencionais não são suficientemente sensíveis para detetar avarias incipientes, como curtos-circuitos entre espiras, antes que estas evoluam para falhas de maior gravidade como defeitos fase-terra [5] e [9].

As limitações das técnicas utilizadas nos sistemas de proteção diferencial, anteriormente referidas, motivaram o desenvolvimento de novas estratégias numa tentativa de melhorar a sensibilidade do relé para detetar avarias incipientes nos enrolamentos do transformador e fornecer uma solução para a incerteza que as técnicas de bloqueio convencionais introduzem no comportamento da proteção. Foram assim propostos ao longo dos últimos anos uma grande variedade de estratégias de proteção diferencial, muitas delas combinando diferentes métodos de restrição/bloqueio. Entre estas destacam-se as que propõem versões aperfeiçoadas dos algoritmos de proteção e bloqueio harmónico convencionais [11]-[13], as que utilizam técnicas de

reconhecimento das formas de onda das correntes diferenciais [11] e [14], as que sugerem outros sinais para efetuar o disparo e bloqueio [15]-[19] ou as que utilizam técnicas avançadas de processamento de sinal [20], lógica difusa [21] e inteligência artificial [22]. A realização de ensaios comparativos entre esta vasta variedade de algoritmos revela-se bastante complexa e trabalhosa, devido à diversidade de técnicas e condições de teste utilizadas. Este trabalho pretende desenvolver um relé diferencial numérico que permita facilitar a comparação entre os diversos algoritmos de proteção e assim simplificar a identificação das técnicas mais competentes.

## 2.5 Obtenção das correntes diferenciais e de estabilização

Apresenta-se nesta Secção o método de cálculo das correntes diferenciais e de estabilização do relé [2]. Considera-se o transformador de potência com ligação DYn5 (esquema na Fig. 2.6), o qual apresenta um desfasamento de 150° entre a tensão simples de entrada e saída (índice horário 5, Tabela 1).





Em funcionamento normal as correntes diferenciais são iguais às correntes de excitação; estas podem ser obtidas somando as correntes nos enrolamentos primário e secundário, por fase (simbologia conforme apresentada na Fig. 2.6), referidas a uma base comum:

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_4 = N_1 \cdot i_{exc1} = N_1 \cdot i_{dif_{Fase1}} \quad (2-8)$$

$$N_1 \cdot i_2 + N_2 \cdot i_5 = N_1 \cdot i_{exc2} = N_1 \cdot i_{dif_{Fase2}} \quad (2-9)$$

$$N_1 \cdot i_3 + N_2 \cdot i_6 = N_1 \cdot i_{exc3} = N_1 \cdot i_{dif_{Fase3}} \quad (2-10)$$

Tabela 1 – Resumo da ligação DYn5 [1].

Índice horário	Símbolo da ligação	Diagrama vectorial		Esquema de ligações		Razão global de transf.
		Tensão primária	Tensão secundária	Primário	Secundário	
5 (150°)	Dy5					$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$

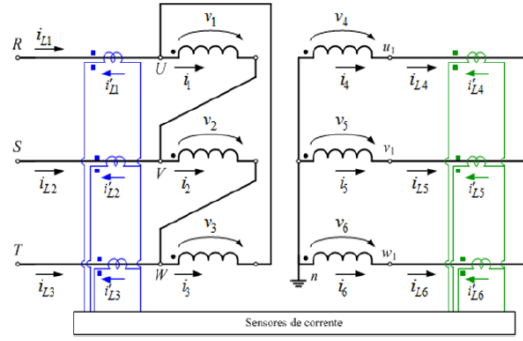


Figura 2.6 - Esquema da ligação DYN5 do transformador, [2].

Os TI medem as correntes de linha, pelo que correntes diferenciais devem ser calculadas em função destas. Da análise da Fig. 2.6 resulta:

$$\begin{cases} i_{L1} = i_1 - i_3 \\ i_{L2} = i_2 - i_1 \\ i_{L3} = i_3 - i_2 \\ i_{L4} = i_4 \\ i_{L5} = i_5 \\ i_{L6} = i_6 \end{cases} \quad (2-11)$$

Definem-se ainda as correntes diferenciais de linha como:

$$\begin{aligned} i_{dif1} &= i_{dif_{Fase1}} - i_{dif_{Fase3}} \\ i_{dif2} &= i_{dif_{Fase2}} - i_{dif_{Fase1}} \\ i_{dif3} &= i_{dif_{Fase3}} - i_{dif_{Fase2}} \end{aligned} \quad (2-12)$$

Subtraindo as equações (2-8) e (2-10), (2-9) e (2-8), (2-10) e (2-9) resulta:

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_4 - N_1 \cdot i_3 - N_2 \cdot i_6 = N_1 \cdot i_{dif_{Fase1}} - N_1 \cdot i_{dif_{Fase3}} \quad (2-13)$$

$$N_1 \cdot i_2 + N_2 \cdot i_5 - N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_4 = N_1 \cdot i_{dif_{Fase2}} - N_1 \cdot i_{dif_{Fase1}} \quad (2-14)$$

$$N_1 \cdot i_3 + N_2 \cdot i_6 - N_1 \cdot i_2 - N_2 \cdot i_5 = N_1 \cdot i_{dif_{Fase3}} - N_1 \cdot i_{dif_{Fase2}} \quad (2-15)$$

Aplicando (2-11) e (2-12) resulta:

$$\begin{bmatrix} I_{dif1} \\ I_{dif2} \\ I_{dif3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

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

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{LL1}}{V_{LL2}/\sqrt{3}} \quad (2-17)$$

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 a equação (2-16) e fazer as alterações necessárias.

$$\begin{bmatrix} I_{est1} \\ I_{est2} \\ I_{est3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} - \frac{N_2}{N_1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L4} \\ i_{L5} \\ i_{L6} \end{bmatrix} \right\} \quad (2-18)$$

Neste trabalho optou-se por simplicidade por utilizar sempre a ligação DYn5. A obtenção das correntes diferenciais e de estabilização para outros tipos de ligação segue um raciocínio análogo.

### 3. Implementação do relé em ambiente *Simulink*

---

O relé diferencial foi implementado em ambiente *Simulink*. O *hardware* do relé tem como componente principal a placa de aquisição de dados *PCI – 6070E da National Instruments*. Esta placa constitui o interface do relé diferencial com o sistema de energia elétrica a simular: permite adquirir digitalmente os sinais das correntes e emitir (caso seja detetado um defeito) o sinal de ativação da proteção. A comunicação com a placa e o controlo em tempo real das suas entradas/saídas faz-se através da ferramenta do *Matlab RTWT (Real Time Windows Target)* [23]. Neste capítulo descrevem-se as configurações da *RTWT*, da placa de aquisição, da aplicação gráfica e do algoritmo de proteção.

#### 3.1 Configuração da *Real Time Windows target*

A *RTWT* é uma ferramenta do *Matlab* que permite projetar e testar sistemas em tempo real. Esta ferramenta foi utilizada neste trabalho para efetuar a comunicação com a placa de aquisição de dados, a configuração de alguns dos seus parâmetros e a execução de código em tempo real.

A lista de passos necessária para configurar a *RTWT* é a seguinte:

- 1) Configuração do modo de simulação (modo do *Simulink*): *External*.
- 2) Configuração do painel *Hardware*.
- 3) Configuração do painel *Real Time Workshop*.
- 4) Configuração do painel *Real Time Windows Target*.
- 5) Configuração da função *External Mode Control Panel*.
- 6) Configuração dos gráficos *Scopes*.

No Anexo I apresenta-se uma descrição detalhada sobre as configurações utilizadas na *RTWT*.

## 3.2 Sistema de teste e aquisição de dados

Foi desenvolvido em ambiente *Simulink* uma aplicação que permite ensaiar de forma rápida e flexível a aquisição e processamento dos sinais relativos às correntes e tensões do transformador. Essa aplicação foi designada de “Sistema de teste e aquisição de dados”. Os sinais das correntes elétricas são obtidos através de transformadores de correntes e sensores de corrente. Os sinais das tensões são medidos através de um amplificador de isolamento. A aquisição digital destes sinais é efetuada utilizando as entradas da placa *PCI-6070E da National Instruments*.

Os dois terminais de saída da placa são utilizados para enviar sinais responsáveis pela remoção ou colocação do transformador em serviço e para a introdução forçada de defeitos, de forma a testar os algoritmos de proteção.

O algoritmo de proteção deve detetar em tempo real a ocorrência de defeitos internos do transformador (a zona de proteção do relé é delimitada pelos TI), identificar e distinguir outras perturbações no sistema de energia elétrica. O sistema deve ainda registar automaticamente as anomalias que ocorram no sistema de energia elétrica.

Na Fig. 3.1 é apresentado o esquema da aplicação designado por “Sistema de teste e aquisição de dados”. O desenvolvimento desta aplicação e o princípio de funcionamento das respetivas funções é descrito de seguida.

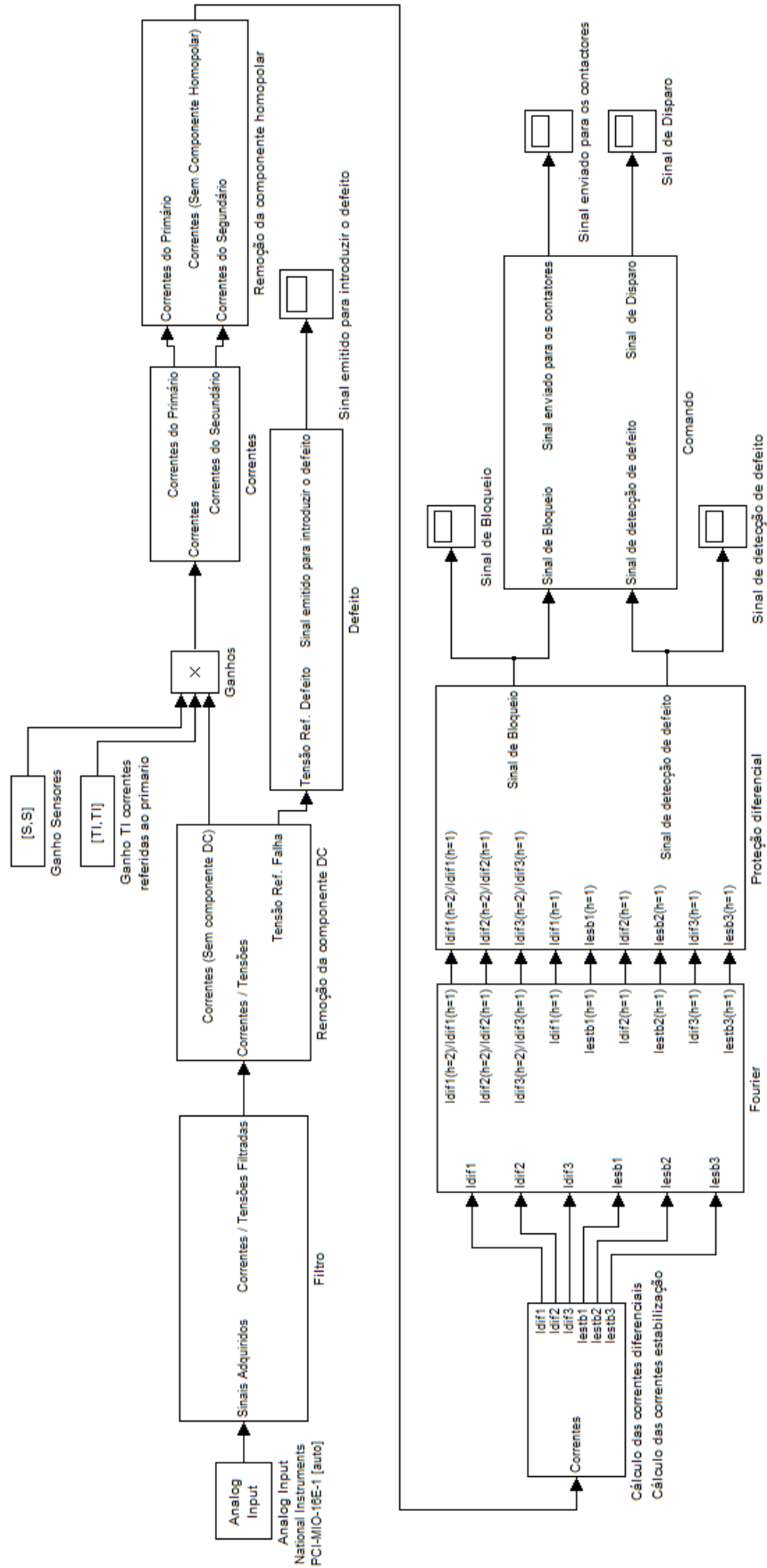


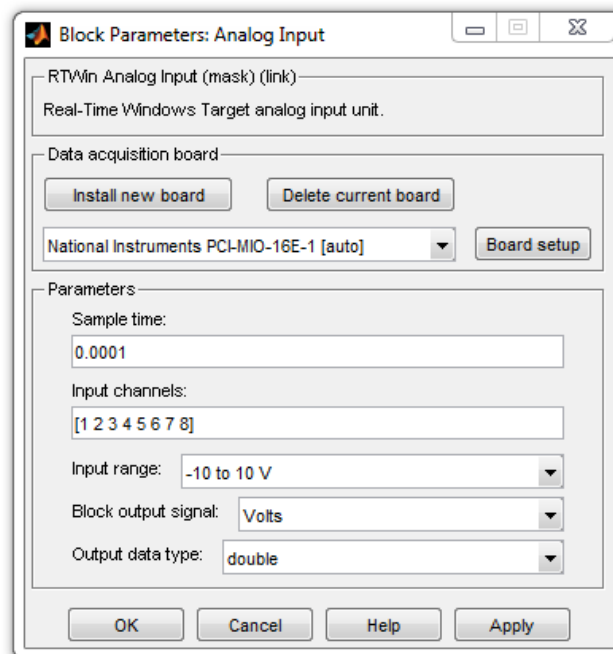
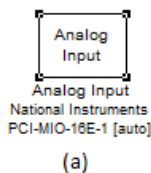
Figura 3.1- Aplicação *Simulink* "Sistema\_de\_teste\_aquisicao".

### 3.2.1 Aquisição de sinais analógicos

Os sinais analógicos (tensões e correntes) são adquiridos utilizando a placa *PCI-6070E (PCI-MIO-16E-1)*. O bloco que gere a aquisição dos sinais encontra-se na biblioteca *RTWT* do *Simulink* e designa-se por *Analog Input*, Fig. 3.2(a). Neste trabalho a placa foi configurada como *Non-Referenced Single-Ended (NRSE)*, Fig. 3.3(b). Com esta opção utiliza-se um terminal da placa para cada canal de entrada. A massa é comum a todos os canais de entrada, Fig. 3.3(a) [24]. Idealmente cada canal deveria possuir dois terminais distintos (modo diferencial), mas neste caso a placa ficaria limitada a 8 canais. Com a ligação *NRSE* conseguem-se obter 16 canais, apesar de existir maior ruído na aquisição.

A placa foi instalada utilizando a opção *Install new board*, sendo necessário seleccionar o tipo de placa e configurar o tipo de ligação dos terminais (*NRSE*) e o período de amostragem. Este último deve ser igual ao *Fixed-step size* do menu *Configuration Parameters* (0.0001 s), Fig. 3.2(b).

No campo *Input channels*, indicam-se os canais que vão ser adquiridos, Fig. 3.2(b), com os sinais das correntes e tensões. As restantes configurações já se encontram efetuadas por defeito.



(b)

Figura 3.2 – (a): Bloco *Simulink* “*Analog Input*”; (b): Configuração dos parâmetros do bloco “*Analog Input*”.

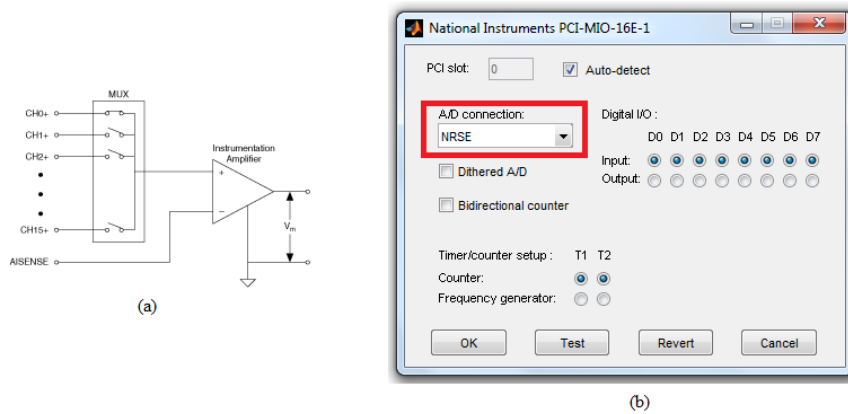


Figura 3.3 – (a): Esquema de ligação *NRSE*, [24]; (b): Configuração no *Simulink* da opção *NRSE*.

### 3.2.2 Filtragem dos sinais (correntes/tensões)

No subsistema “Filtro”, Fig. 3.4 e 3.5 são filtrados todos os sinais (correntes e tensões) de forma a remover algum do ruído de alta frequência. É utilizado o bloco *Discrete Butterworth Filter* da biblioteca *SimPowerSystems*. Optou-se por utilizar um filtro-passa baixo de ordem 5, com uma frequência de corte de 500 Hz, uma largura de banda de 512 Hz e *Sample time* igual ao *Fixed-step size* (0.0001 s).



Figura 3.4 - Subsistema *Simulink* "Filtro".

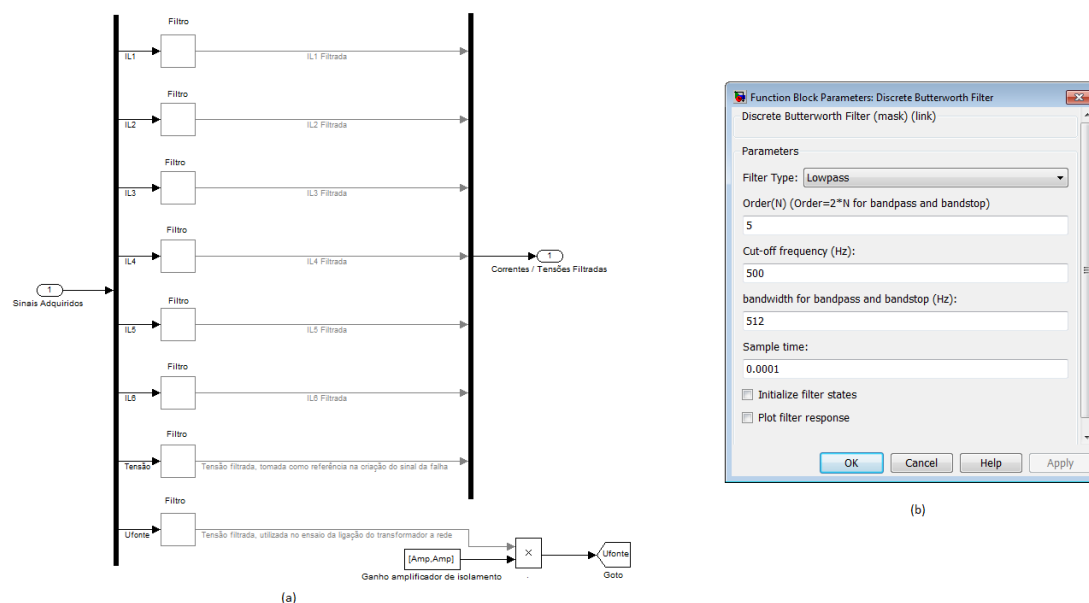


Figura 3.5 – (a): Esquema *Simulink* do processo de filtragem dos sinais; (b): Configuração dos parâmetros do bloco *Simulink* "Discrete Butterworth Filter".

### 3.2.3 Remoção da componente DC

Alguns dos sensores de corrente utilizados fornecem um sinal que, além da componente alternada, possui uma componente contínua. Esta componente DC afeta o cálculo das correntes diferenciais, o que dificulta a compreensão do funcionamento do sistema de proteção. Em situações previamente analisadas e devidamente ponderadas é conveniente remover a referida componente DC, por forma a simplificar a análise de resultados e as relações causa-efeito.

Assim, em fenómenos que não envolvam transitórios que originem componente DC nas correntes efetua-se continuamente a remoção dessa componente nos sinais adquiridos. Esta situação ocorre normalmente quando é introduzido um defeito no transformador, quando este se encontra a operar em regime permanente.

A remoção da componente DC das correntes não deve ser efetuada quando se realizam ensaios que originam sobrecorrentes transitórias de excitação (por exemplo, a ligação do transformador à rede). Nestes casos é necessário efetuar um primeiro ensaio de forma a caracterizar a componente DC que o sensor introduz. Este valor é guardado e depois utilizado para remover a componente DC dos sinais adquiridos neste tipo de ensaios.

O método usado para remover a componente contínua é escolhido pelo utilizador na interface gráfica do relé. Os dois métodos são apresentados de seguida.

### 3.2.3.1 Remoção da componente DC em regime permanente (remoção com janela deslizante)

Assume-se neste caso que os sinais adquiridos possuem originalmente uma componente contínua nula, e a existência desta se deve unicamente às características dos sensores. A componente DC dos sinais adquiridos é removida com o bloco “Remoção da componente DC”, Fig. 3.6. O seu esquema é representado na Fig. 3.7. O princípio de funcionamento consiste em calcular a componente contínua do sinal, o que é conseguido utilizando o bloco *FFT* do *Simulink*. Este bloco tem duas saídas (*Magnitude* e *Angle*). As saídas do bloco *FFT* são calculadas no último período do sinal adquirido, utilizando uma janela deslizante: a janela deslizante é atualizada tomando em consideração a última amostra adquirida e excluindo a primeira amostra da janela anterior. A saída *Magnitude* tem sempre um valor positivo, pelo que é necessário primeiro verificar a polaridade da componente DC. Essa informação é obtida através da saída *Angle*: se o valor de *Angle* for  $90^\circ$  a componente DC é positiva; se for de  $-90^\circ$  é negativa. Multiplicando a saída *Magnitude* pelo seno da saída *Angle* obtém-se uma variável que inclui a informação sobre a amplitude e polaridade da componente DC. Após esta operação a componente DC é subtraída ao sinal original.

Este processo repete-se para todos os sinais de correntes adquiridos. No caso dos sinais das tensões a componente DC é desprezável, não sendo necessário efetuar a sua remoção.

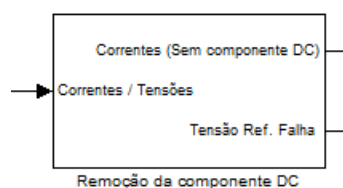


Figura 3.6 - Subsistema *Simulink* "Remoção da componente DC".

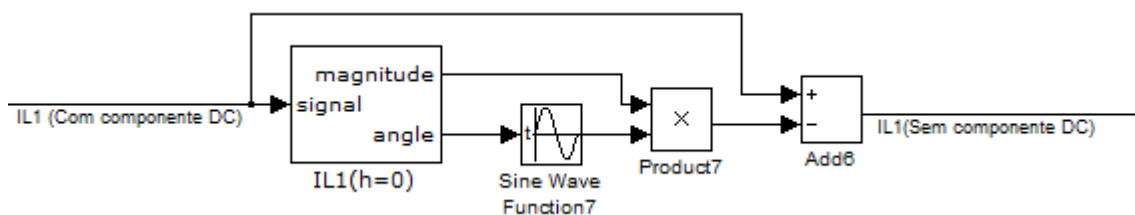


Figura 3.7 - Esquema *Simulink* do processo de remoção da componente DC (Ensaio em regime permanente).

### 3.2.3.2 Remoção da componente DC para ensaios referentes à ligação do transformador à rede

Neste caso é efetuado um teste prévio para caracterizar a componente contínua introduzida pelos sensores nos sinais. A componente DC de cada sensor é calculada (utilizando o método idêntico ao anterior) e registada no *Workspace* do *Matlab*. Estes valores são depois carregados para a aplicação através do bloco *From Workspace* por forma a efetuar a remoção da componente DC nos ensaios da ligação do transformador à rede, Fig. 3.8.

### 3.2.4 Ganhos dos sensores e razão de transformação dos TI

As correntes necessitam de ser multiplicadas pelos ganhos dos sensores e dos TI, Fig. 3.9. Estes ganhos vão depender do tipo de sensores e TI utilizados. Os valores dos ganhos são inseridos pelo utilizador na interface gráfica.

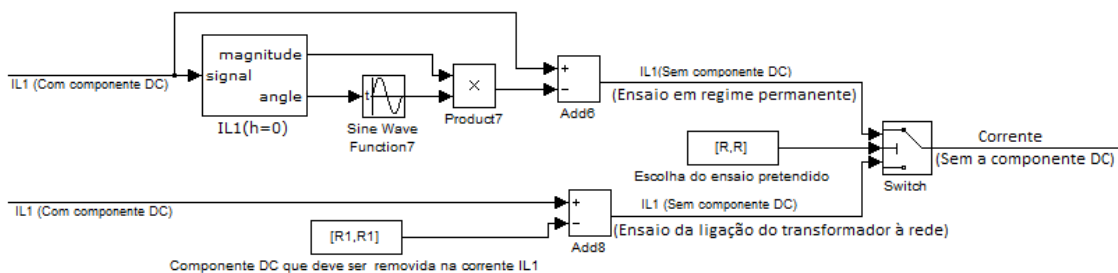


Figura 3.8 – Esquema *Simulink* do processo de remoção da componente DC (Ensaio em regime permanente/ Ensaio da ligação do transformador à rede).

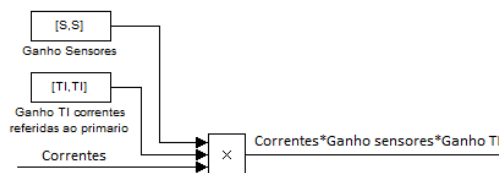


Figura 3.9 – Esquema *Simulink* do processo da multiplicação das correntes por os ganhos dos sensores e TI.

### 3.2.5 Visualização da forma de onda das correntes

No subsistema “Correntes”, é possível visualizar a forma de onda das correntes já filtradas, sem a componente DC e multiplicadas pelos ganhos. As correntes que até aí se encontravam num *bus* de seis são agrupadas em dois *bus* de 3 correntes, juntando as três do primário e as três do secundário, Figs. 3.10 e 3.11.

### 3.2.6 Remoção da componente homopolar

No subsistema “Remoção da componente homopolar”, como o próprio nome indica, é removida a componente homopolar de cada uma das correntes, Fig. 3.12.

Através do bloco *Fcn* da biblioteca *User –Defined Functions* do *Simulink* é possível escrever as equações necessárias para se remover a componente homopolar de cada uma das correntes. Fig. 3.13, As equações aplicadas na remoção da componente homopolar no bloco *Fcn* são (notação segundo Fig. 2.6):

$$i_{L1}^* = i_1 - \frac{1}{3} * (i_{L1} + i_{L2} + i_{L3})$$

$$i_{L2}^* = i_2 - \frac{1}{3} * (i_{L1} + i_{L2} + i_{L3})$$

$$i_{L3}^* = i_3 - \frac{1}{3} * (i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}) \quad (3-1)$$

$$i_{L4}^* = i_4 - \frac{1}{3} * (i_{L4} + i_{L5} + i_{L6})$$

$$i_{L5}^* = i_5 - \frac{1}{3} * (i_{L4} + i_{L5} + i_{L6})$$

$$i_{L6}^* = i_6 - \frac{1}{3} * (i_{L4} + i_{L5} + i_{L6})$$

Em enrolamentos ligados em triângulo ou em estrela sem neutro aterrado não é necessário efetuar a remoção da componente homopolar. Neste trabalho optou-se por efetuar a remoção da componente homopolar para todos os tipos de ligação.

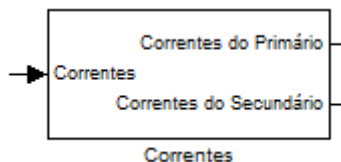


Figura 3.10 - Subistema *Simulink* "Correntes".

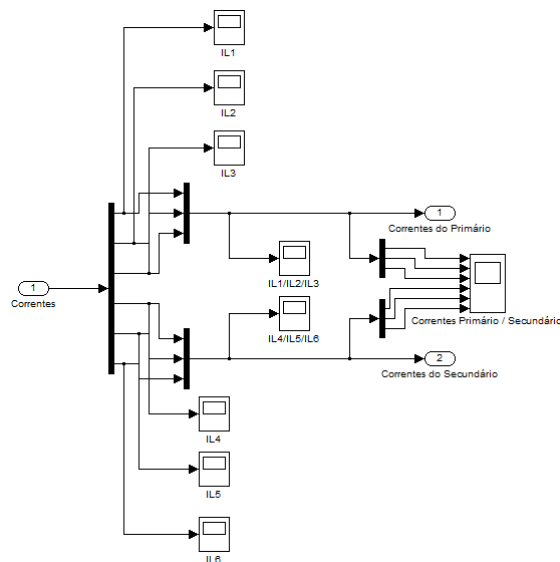


Figura 3.11 – Esquema *Simulink* do processo de visualização das correntes.

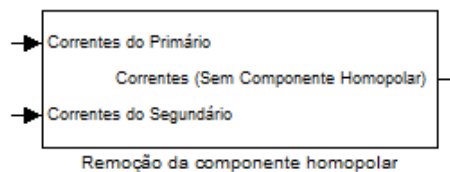


Figura 3.12- Subistema *Simulink* "Remoção da componente homopolar".

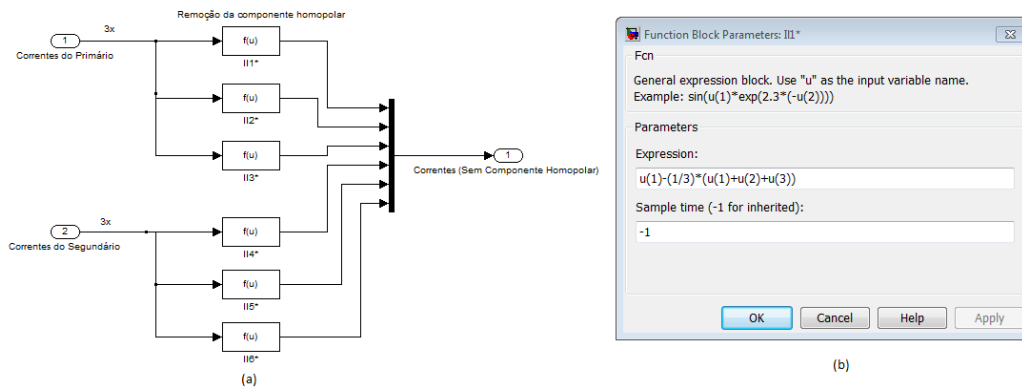


Figura 3.13 – (a): Esquema *Simulink* do processo de remoção da componente homopolar; (b): Exemplo da aplicação de uma equação da remoção da componente homopolar no bloco *Simulink* "Fcn".

### 3.2.7 Cálculo das correntes diferenciais e de estabilização

No subsistema “Cálculo das correntes diferenciais/Cálculo das correntes estabilização”, são calculadas as correntes diferenciais e de estabilização, Fig. 3.14. Para realizar o cálculo utiliza-se o bloco *Fcn*, Fig. 3.15. As equações implementadas já foram apresentadas na Secção 2.5, [equações (2-16) e (2-18)].

### 3.2.8 Análise de Fourier das correntes diferenciais/estabilização

No subsistema "Fourier" são calculados os harmónicos das 3 correntes diferenciais (1.º e 2.º harmónicos) e das 3 correntes de estabilização (1.º harmónico), com auxílio do bloco *Fourier* da biblioteca *SimPowerSystems*, Figs. 3.16 – 3.18.

A saída *Magnitude* do bloco *Fourier* fornece a amplitude (valor máximo) do harmónico calculado.

Na saída deste subsistema inclui-se ainda a razão entre o 2.º e 1.º harmónicos das correntes diferenciais, Fig. 3.17(a), grandeza necessária para efetuar o bloqueio harmónico do relé.

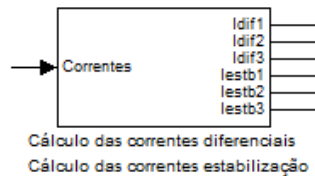


Figura 3.14- Subsistema *Simulink* “Cálculo das correntes diferenciais/Cálculo das correntes de estabilização”.

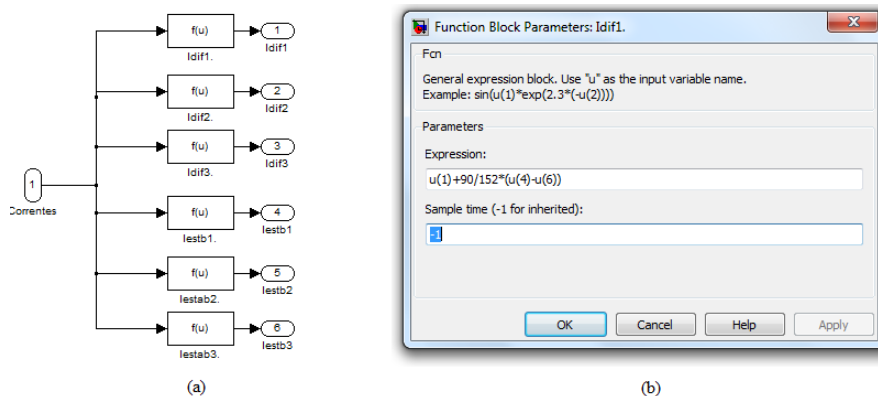


Figura 3.15 – (a): Esquema *Simulink* do processo de cálculo das correntes diferenciais e de estabilização; (b): Exemplo da aplicação de uma equação no cálculo de uma corrente diferencial no bloco *Simulink* “*Fcn*”.

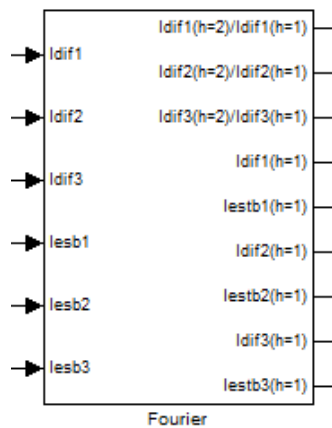


Figura 3.16 - Subsistema *Simulink* "Fourier".

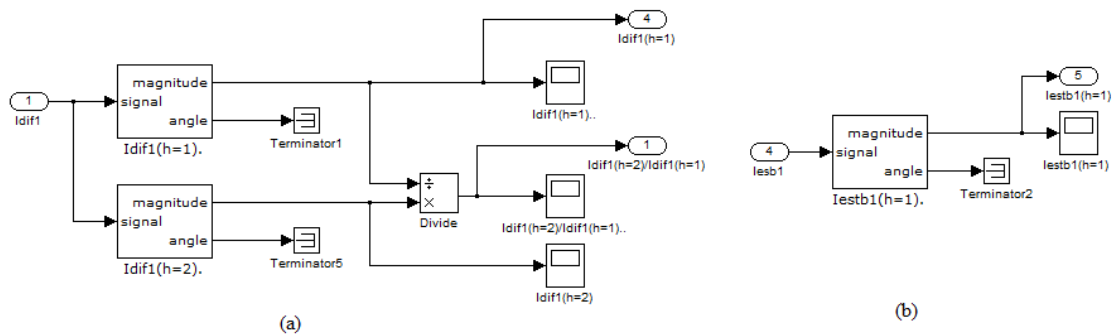


Figura 3.17 – (a): Esquema *Simulink* do processo de cálculo do primeiro e segundo harmônicos da corrente diferencial; (b): Esquema *Simulink* do processo de cálculo do primeiro harmônico da corrente de estabilização.

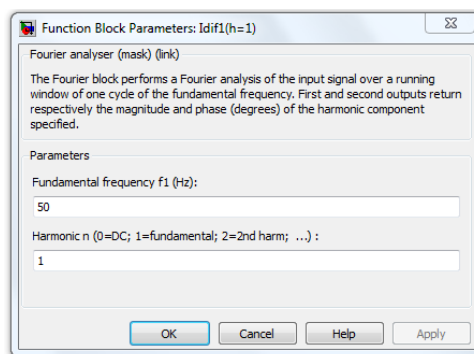


Figura 3.18 - Configuração dos parâmetros para o cálculo do primeiro harmônico da corrente diferencial através do bloco *Simulink* *Fourier*.

### 3.2.9 Proteção diferencial

O subsistema “Proteção diferencial” encontra-se dividido em duas partes: na primeira obtém-se o sinal de deteção de defeito (3.2.9.1, subsistema “Deteção de defeito”) e na segunda o sinal de bloqueio da proteção (3.2.9.2, subsistema “Bloqueio”), Figs. 3.19 e 3.20.

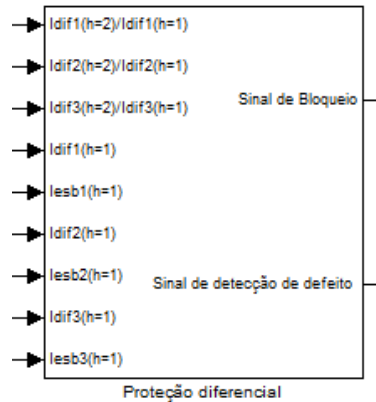


Figura 3.19 - Subsistema *Simulink* "Proteção diferencial".

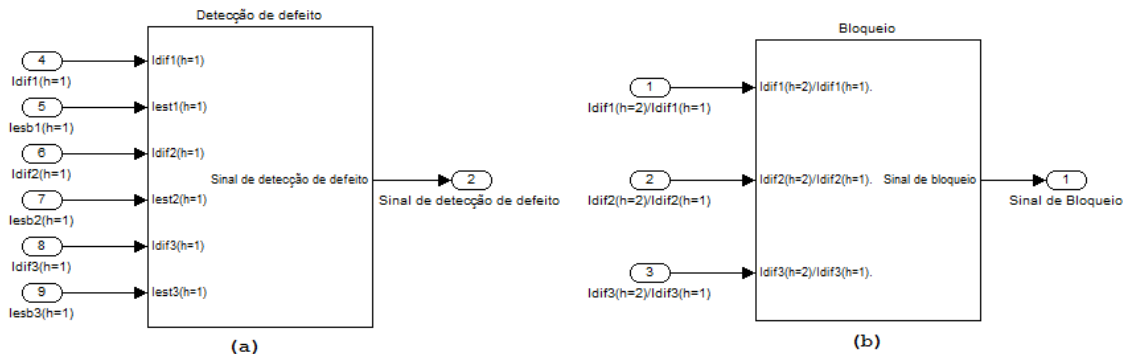


Figura 3.20 – (a): Subsistema "Deteção de defeito"; (b): Subsistema "Bloqueio"

#### 3.2.9.1 Sinal de deteção de defeito

A proteção deve atuar quando ocorre um defeito interno em qualquer uma das fases, desde que esta provoque um aumento no valor eficaz do primeiro harmónico da corrente diferencial ( $I_{dif}$  Eficaz  $1^o h$ ) acima dos limites definidos pela característica operacional da proteção diferencial.

O disparo da proteção é efetuado em função da amplitude do fundamental das correntes diferenciais, pois em caso de defeito estas permanecem praticamente sinusoidais. A distorção que possa surgir nas correntes diferenciais é normalmente provocada por outros fenómenos, como sobrecorrentes transitórias de excitação e saturação dos TI, que não devem fazer ativar a proteção.

A característica operacional da proteção é definida por duas retas, Fig. 3.21, cujos parâmetros são definidos pelo utilizador através da interface gráfica (esta interface será analisada posteriormente). Estes dados são carregados para o *Simulink* utilizando o bloco *From Workspace*, Fig. 3.22.

Os parâmetros são:

- $I_n$  – Corrente nominal do primário do transformador;
- $I_{min}$  – Percentagem mínima da corrente nominal do transformador que ativa a proteção (zona 1, Fig. 3.21);
- $I_{E1}$  - Percentagem da corrente nominal a partir da qual o limite da característica operacional se situa na zona 2 (Fig. 3.21);
- $k$  – Declive da segunda reta da característica operacional da proteção diferencial;

Para o transformador em estudo  $I_n = 25 \text{ A}$ . Tipicamente  $I_{min}$  varia entre 15% e 25%. O valor eficaz das correntes diferenciais e de estabilização calcula-se dividindo a amplitude por  $\sqrt{2}$ , Fig. 3.23.

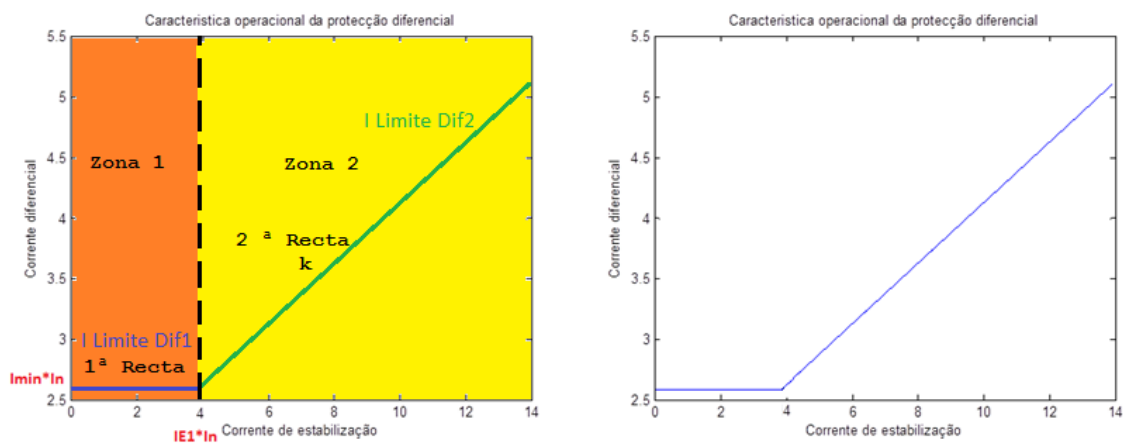


Figura 3.21 - Esquemático/Gráfico da característica operacional da protecção diferencial.

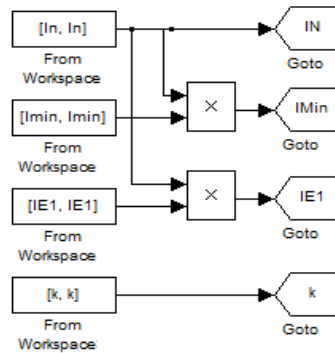


Figura 3.22 - Esquema *Simulink* do processo de leitura dos dados, (inseridos na interface gráfica) da característica operacional da proteção diferencial.

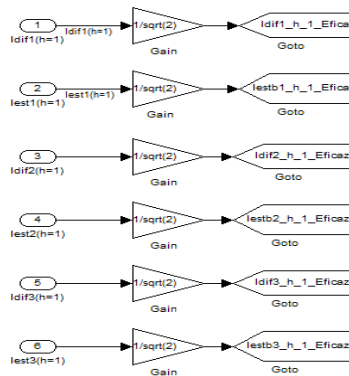


Figura 3.23 - Esquema *Simulink* do processo de cálculo dos valores eficazes das correntes diferenciais e de estabilização.

A característica operacional do relé diferencial é definida da seguinte forma, (Fig. 3.21).

$$\begin{cases} I_{Limite_{Dif1}} = I_n \cdot I_{min} & se I_{est_{1.9h}} \leq I_n \text{ (Zona 1)} \\ I_{Limite_{Dif2}} = k * (I_{est_{1.9h}} - I_n \cdot I_{E1}) + I_n * I_{min} & se I_{est_{1.9h}} > I_n \cdot I_{E1} \text{ (Zona 2)} \end{cases} \quad (3-2)$$

Onde:

- $I_{Limite_{Dif1}}$  – Limite definido na primeira zona da característica operacional da protecção diferencial (zona 1, Fig 3.21);
- $I_{Limite_{Dif2}}$  – Limite definido na segunda zona da característica operacional da protecção diferencial (zona 2, Fig 3.21);

- $I_n$  – Corrente nominal do primário do transformador;
- $I_{est_{1.ªh}}$  – Valor eficaz da do primeiro harmónico da corrente de estabilização;
- $I_{min}$  – Percentagem mínima da corrente nominal do transformador que ativa a proteção (zona 1, Fig 3.21);
- $I_{E1}$  - Percentagem da corrente nominal a partir da qual o limite da característica operacional se situa na zona 2 (Fig. 3.21);
- $k$  – Declive da segunda reta da característica operacional da proteção diferencial;

A equação (3-2) foi implementada em *Simulink*, Fig. 3.24 (representa-se apenas para uma das fases). Neste bloco deteta-se se o ponto de funcionamento se situa na 1.<sup>a</sup> ou 2.<sup>a</sup> zona da característica operacional da proteção diferencial e é emitido o sinal da deteção de defeito caso as respetivas condições sejam satisfeitas (é utilizado o bloco *Simulink* “If” para verificar as condições da equação (3-2)).

O uso do bloco “If” obriga à utilização de dois blocos “If Action Subsystem” (estes executam a ação resultante na saída do “If”). Por exemplo, no “If12” da Fig. 3.24, se a condição verificada pelo “If” for verdadeira o “If Action Subsystem 5”, (indicado como “Defeito detetado” na Fig. 3.24) gera na saída um sinal a 1. Caso contrário o “If Action Subsystem 21”, (indicado como “Sem defeito” na Fig. 3.24) gera na saída o valor 0. O bloco “Merge” combina a saída dos dois “If Action Subsystem”.

### 3.2.9.2 Sinal de bloqueio

A ativação da proteção deve ser bloqueada quando for detetada uma sobrecorrente transitória de excitação. Este bloqueio é efetuado quando a relação entre o 2.º e o 1.º harmónico das correntes diferenciais ultrapassa um valor pré-definido pelo utilizador. O bloqueio harmónico é implementado utilizando o algoritmo representado na Fig. 3.25 (representa-se apenas para uma das fases).

A comparação é realizada com recurso aos blocos “If”, de forma idêntica ao explicado anteriormente.

A deteção de uma sobrecorrente transitória de excitação numa das fases bloqueia a ativação do relé em todas as fases.

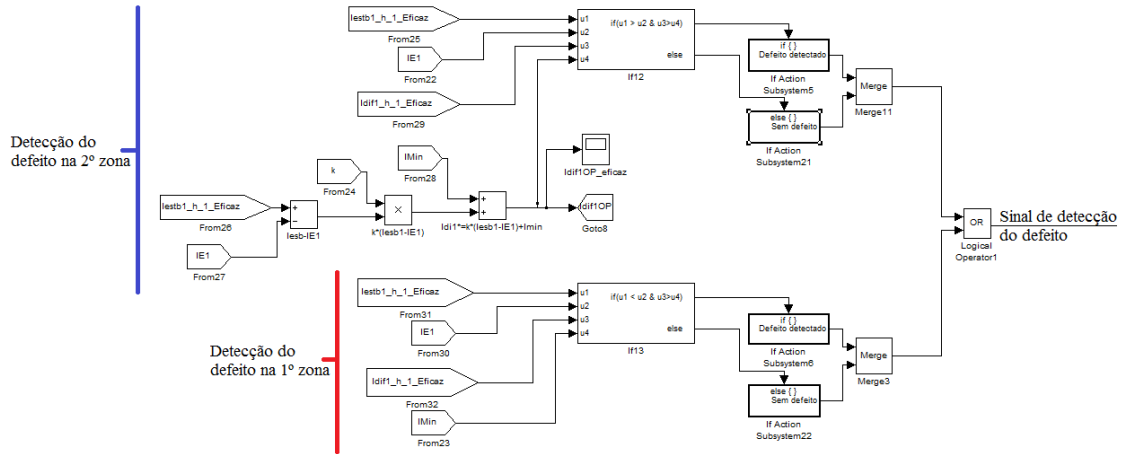


Figura 3.24 - Esquema *Simulink* do processo da obtenção do sinal de detecção de defeito para uma das fases.

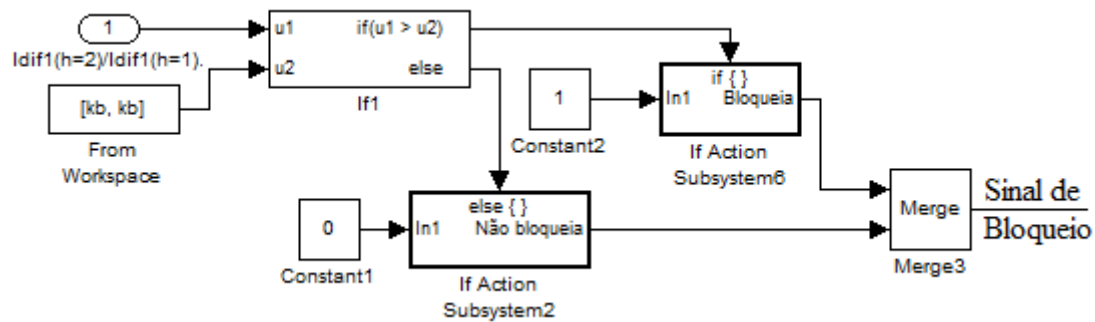


Figura 3.25 - Esquema *Simulink* do processo de obtenção do sinal de bloqueio para uma das fases.

### 3.2.10 Introdução de defeitos no transformador

No subsistema “Defeito” são definidas as condições para que seja introduzido um defeito no transformador, Fig. 3.26.

A introdução do defeito está sincronizada com uma das tensões de entrada (tensão de referência). Para o efeito a tensão de referência é adquirida através de uma das entradas da placa de aquisição.

O utilizador deve definir, na interface gráfica, o instante em que deve ocorrer o defeito. O bloco *Hit Crossing*, Fig. 3.27, deteta quando a tensão de referência passa por zero, fornecendo nesse caso na sua saída um sinal 1. A introdução do defeito ocorre

quando as seguintes condições se verificam simultaneamente, Fig. 3.28 (bloco *If* designado por “Condições para que ocorra o defeito”):

- i. Tempo de simulação  $\geq$  Tempo definido pelo utilizador ( $u1 \geq u2$ );
- ii. Saída do *Hit Crossing* igual a 1 ( $u3==1$ );
- iii. Tensão de referência positiva ( $u4 >= 0$ );

Quando ativado o sinal de introdução do defeito é enviado para uma saída analógica da placa *PCI-6070E*, através do bloco *Analog Output* da *Real Time Windows Target*. Na configuração deste bloco é necessário utilizar o *Sample time* igual ao *Fixed-step size*, anteriormente definido em *Configuration Parameters*, Fig. 3.29.

A placa *NI PCI-6070E* possui 2 saídas analógicas. Para a introdução do defeito foi utilizada a saída 1, Fig. 3.29.



Figura 3.26 - Subsistema *Simulink* “Defeito”.

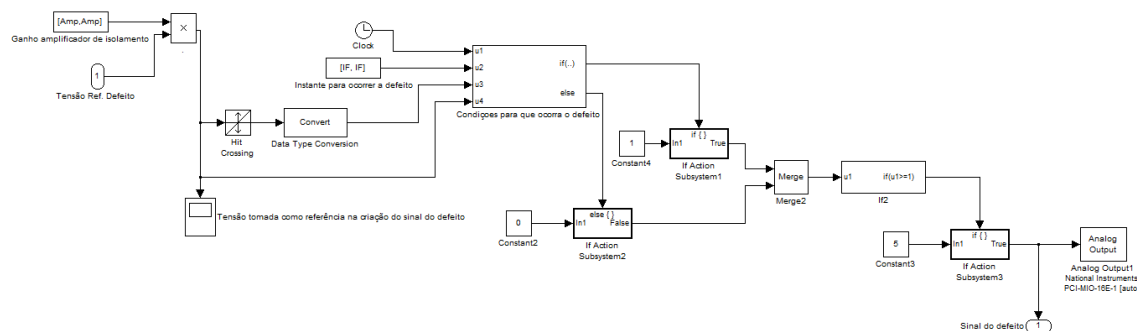


Figura 3.27 - Esquema *Simulink* do processo para obter o sinal do defeito.

If expression (e.g.  $u1 \sim= 0$ ):  
 $u1 \geq u2 \ \& \ u3==1 \ \& \ u4 \geq 0$

Figura 3.28 - Condições do *If* do sinal do defeito.

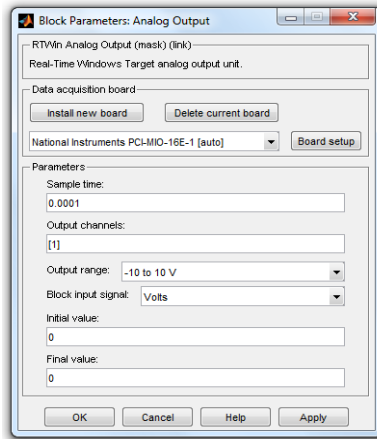


Figura 3.29 - Configuração dos parâmetros do bloco “Analog Output” referente ao sinal do defeito.

### 3.2.11 Subsistema de comando

O subsistema de comando, Fig. 3.30, controla os interruptores que ligam ou desligam a alimentação do transformador.

No caso de ser detetado um defeito efetivo (devidamente distinguido de uma sobrecorrente transitória de excitação) o subsistema “Comando” irá emitir um sinal para remover o transformador de serviço.

No caso de se pretender analisar fenómenos relacionados com as sobrecorrentes transitórias de excitação é necessário controlar o instante em que o transformador é ligado à rede. Nesta situação a aplicação do *Simulink* terá também de controlar (e emitir) o sinal de fecho dos interruptores do circuito de potência.

O utilizador seleciona na interface gráfica qual o tipo de ensaio que quer realizar: ocorrência de um defeito quando o transformador opera em regime permanente ou análise de fenómenos transitórios quando o transformador é ligado à rede.

#### 3.2.11.1 Sinal de disparo da proteção diferencial

O sinal de disparo da proteção resulta da articulação do sinal de deteção do defeito com o sinal de bloqueio, através do operador lógico AND, conforme ilustrado na Fig. 3.31 – caixa A.

A emissão do sinal de disparo depende do tipo de ensaio a realizar:

- Transformador ligado, a operar em regime permanente, e posterior introdução do defeito. Neste ensaio os contadores estão configurados como “normalmente fechados” (NF) e é emitido um sinal para abrirem após o defeito ser detetado.
- Transformador inicialmente desligado, pretendendo-se analisar o transitório de ligação, com possível introdução posterior do defeito. Neste ensaio os contadores estão configurados como “normalmente abertos” (NA). A ligação do transformador é efetuada enviando um sinal (Sinal lógico 1) para fechar os contadores. No caso de ser detetado um defeito o referido sinal é colocado a zero, por forma a abrir os contadores e isolar o transformador da rede.

Assim, antes de ocorrer o defeito, é necessário ter em consideração o tipo de ensaio selecionado pelo utilizador para definir o sinal enviado para os contadores e respetiva configuração inicial NF/NA (transformador ligado e em regime permanente: contadores NF; transformador inicialmente desligado para posterior análise do fenómeno transitório na ligação: contadores NA).

### **3.2.11.2 Sinal de fecho dos contadores das linhas de alimentação do transformador**

O comando para os interruptores fecharem é sincronizado com uma das tensões de entrada (tensão de referência). Esta tensão é medida aos terminais da fonte de alimentação. O processo de sincronização do sinal de fecho dos interruptores com a tensão de referência, Fig. 3.31- caixa B, é aquele apresentado anteriormente para a introdução do defeito (Fig. 3.27).

Os interruptores utilizados para efetuar a ligação do transformador à rede poderão não ser instantâneos (comutação lenta). A utilização de contadores eletromecânicos constitui uma dessas situações, que foi implementada neste trabalho.

O tempo de atraso (12 ms) introduzido pelos contadores eletromecânicos foi compensado, por forma a que estes fechem aproximadamente no instante definido pelo utilizador, Fig. 3.31- caixa B.

No caso de o utilizador escolher realizar o ensaio da ocorrência de um defeito quando o transformador opera em regime permanente o sinal de fecho dos contadores possui sinal lógico 1, Fig. 3.31- caixa B.

### 3.2.11.3 Sinal enviado para os contadores

Da articulação (através do operador logico AND) do sinal de disparo da proteção diferencial e do sinal de fecho dos contadores resulta o sinal enviado para os contadores, Fig. 3.31- caixa C, sendo que este é enviado para uma saída analógica da placa *PCI-6070E*, através do bloco *Analog Output* da *Real Time Windows Target*. Na configuração deste bloco é necessário utilizar o *Sample time* igual ao *Fixed-step size*, anteriormente definido em *Configuration Parameters*, Fig. 3.32.

A placa *NI PCI-6070E* possui 2 saídas analógicas. Para a introdução do defeito foi utilizado a saída 2, Fig. 3.32.

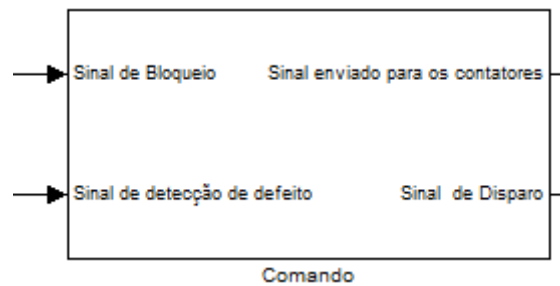


Figura 3.30 - Subsistema *Simulink* "Comando".

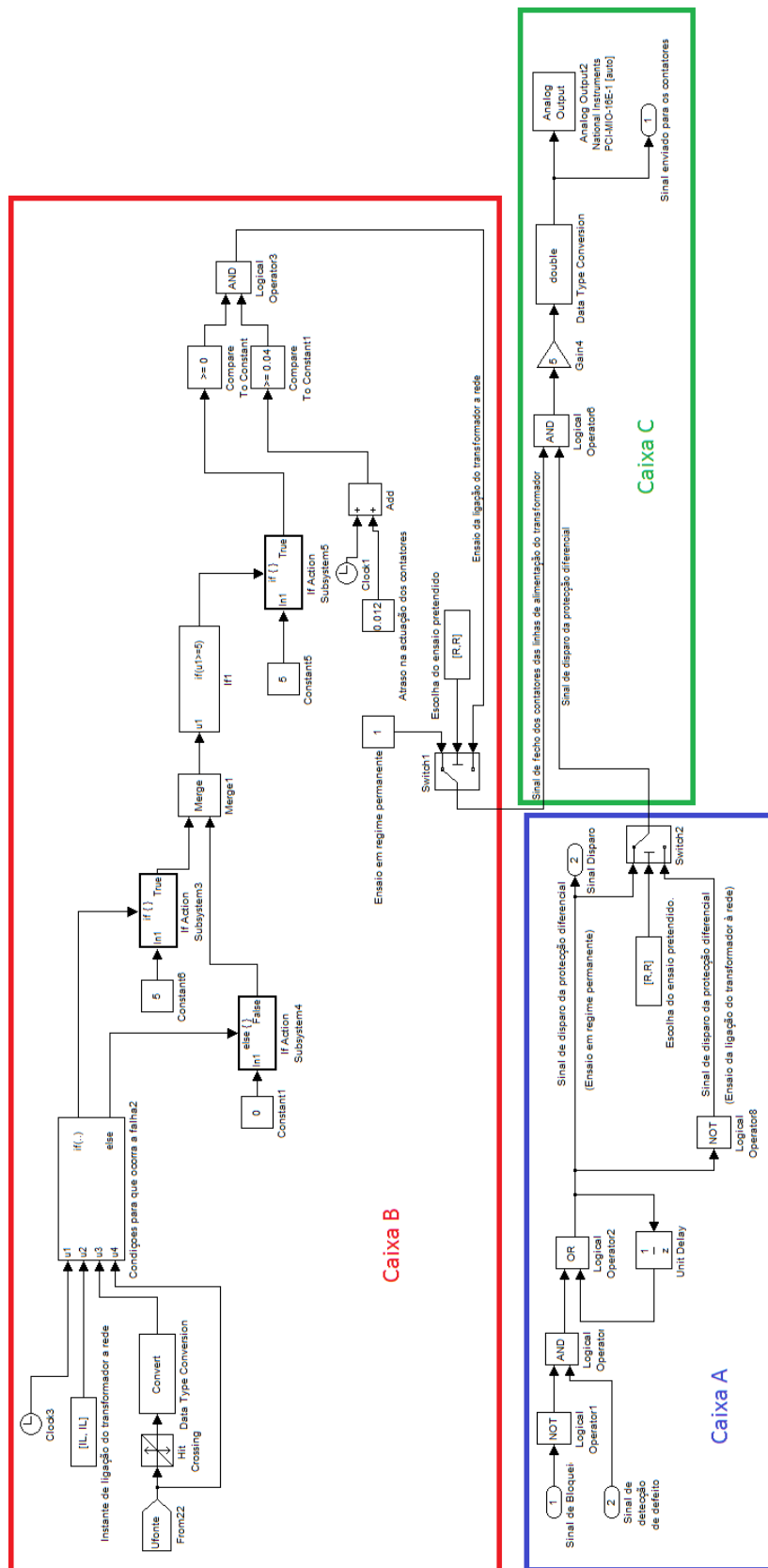


Figura 3.31 – Esquema *Simulink* do processo de obtenção dos sinais: Caixa A – Sinal de disparo da proteção diferencial; Caixa B – Sinal de fecho dos contactores das linhas de alimentação do transformador; Caixa C – Sinal enviado para os contactores.

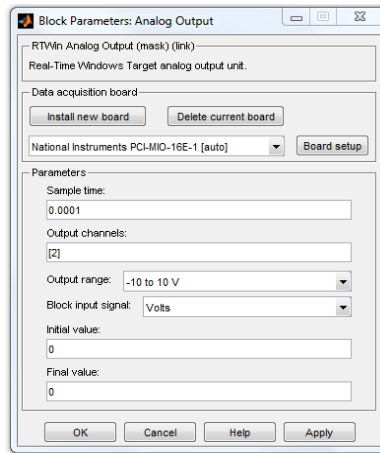


Figura 3.32 - Configuração dos parâmetros do bloco “Analog Output” referente ao sinal enviado para os contadores.

### 3.3 Aplicação *Simulink* “Teste”

Além da aplicação apresentada anteriormente foi ainda criado um outro modelo designado de “Teste” que permite verificar se as correntes do transformador do primário e do secundário estão a ser medidas corretamente.

O modelo “Teste” efetua a medição, filtragem e visualização dos sinais das correntes, conforme representado na Fig. 3.33. Este modelo é também utilizado para caracterizar os sensores de corrente e calcular a componente DC introduzida por cada um destes dispositivos. Após efetuar um ensaio em regime permanente as componentes DC são calculadas e disponibilizadas no *Workspace* do *Matlab*. Estes valores são usados posteriormente pela aplicação principal “Sistema de teste e aquisição” para calibrar os sensores de corrente.

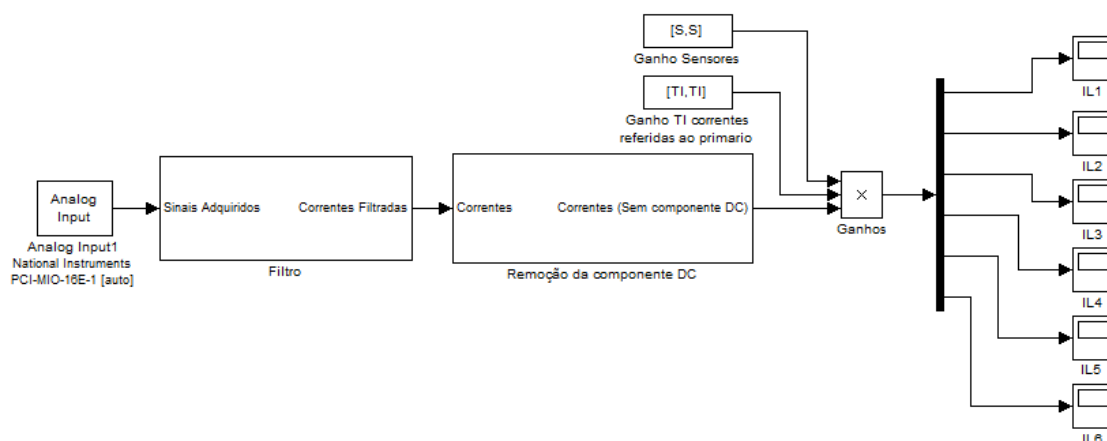


Figura 3.33 – Modelo *Simulink* “Teste”.

### 3.4 Construção do *layout* da *Graphical User Interface*

De forma a facilitar o controlo e visualização dos resultados obtidos nas simulações do modelo *Simulink* utiliza-se uma interface gráfica, criada através da opção *GUIDE* (*Graphical User Interface Design Environment*), do *Matlab*. Esta ferramenta permite apresentar os resultados e os controlos da aplicação numa ou mais janelas. A interface gráfica constitui assim a ligação entre o utilizador e o código do relé numérico. O utilizador não precisa de perceber os detalhes do código possibilitando uma utilização mais amigável da aplicação [25].

#### 3.4.1 Separadores da interface gráfica

Para facilitar o manuseamento e a visualização dos resultados foram criados vários separadores (ou abas) [26] na janela da interface gráfica. A interface gráfica tem 8 separadores, Fig. 3.34.

**Separador 1: Simulação/Dados:** Tem como função o controlo do relé diferencial numérico (aplicação “Sistema de teste e aquisição de dados”). É constituído por 3 zonas: introdução de parâmetros, botões e gráfico da característica operacional da proteção diferencial, Fig. 3.34.

- A) Zona 1 – Introdução de parâmetros: São aqui definidos todos os parâmetros necessários para realizar os ensaios do relé diferencial numérico:

- Corrente nominal na linha do transformador (designada por  $I_n$  do lado primário): valor utilizado para definir as correntes de ativação da proteção:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} * V_{LL1}} \quad (3-3)$$

- Corrente mínima de operação do relé diferencial (designada por  $I_{min} = \% I_n$ ): vem definida em função da corrente nominal do transformador. Este valor é utilizado na definição da característica operacional da proteção diferencial, anteriormente apresentada na Fig. 3.21. Faz parte dos parâmetros de entrada do esquema *Simulink* associado ao sinal de deteção do defeito (Secção 3.2.9.1).
- Corrente de estabilização máxima para definição da 1.<sup>a</sup> zona da característica operacional (designada por  $I_{E1} = \% I_n$ ): vem definida em função da corrente nominal do transformador. É utilizado na definição da característica operacional da proteção diferencial, anteriormente apresentado na Fig. 3.21. Faz parte dos parâmetros de entrada do esquema *Simulink* associado ao sinal de deteção do defeito (Secção 3.2.9.1).
- Declive da característica operacional da proteção diferencial (designado por  $k$  em %): É utilizado na definição da característica operacional da proteção diferencial, anteriormente apresentado na Fig. 3.21. Faz parte dos parâmetros de entrada do esquema *Simulink* associado ao sinal de deteção do defeito (Secção 3.2.9.1).
- Limite pré-definido para o bloqueio harmónico (designado por  $kb$ ): É utilizado no bloqueio da ativação da proteção. Faz parte dos parâmetros de entrada do esquema *Simulink* associado ao sinal de bloqueio da proteção (Secção 3.2.9.2).

- Qual o ensaio que pretende realizar? (designado por  $R = 1$  ou  $0$ ): É utilizado na distinção de processos a aplicar no caso de ser escolhido o ensaio da ocorrência de um defeito quando o transformador opera em regime permanente ou análise de fenómenos transitórios quando o transformador é ligado à rede. Faz parte dos parâmetros de entrada dos esquemas *Simulink* associados à remoção da componente DC e do subsistema comando (Secções 3.2.3 e 3.2.11).
- Instante mínimo da ligação do transformador à rede (designado por  $IL$  em s): É utilizado no processo do ensaio da ligação do transformador à rede. Faz parte dos parâmetros de entrada do esquema *Simulink* associado ao sinal de fecho dos contactores das linhas de alimentação do transformador (Secção 3.2.11.2).
- Instante mínimo para ocorrer um defeito (designado por  $IF$  em s): É utilizado no processo da introdução de um defeito no transformador. Faz parte dos parâmetros de entrada do esquema *Simulink* associado à introdução de defeitos no transformador (Secção 3.2.10).
- Razão de transformação dos TI (designada por  $TI$ ) / Ganho dos sensores de corrente (designado por  $S$ ): Fazem parte dos parâmetros de entrada do esquema *Simulink* associado ao ganho dos sensores e razão de transformação do TI (Secção 3.2.4).
- Ganho do amplificador de isolamento (designado por  $Amp$ ): Faz parte dos parâmetros de entrada dos esquemas *Simulink* associados à filtragem dos sinais e do subsistema comando (Secções 3.2.2 e 3.2.11).

#### B) Zona 2 – Botões

- **Botão Enviar dados:** Envia os parâmetros introduzidos para a *Workspace* do *Matlab*;
- **Botão Start:** Executa a aplicação;

- **Botão *Stop***: Termina a execução;
- **Botão *Plot***: Traça os gráficos;
- **Botão *To figure***: Converte os gráficos em figuras e guarda-os no formato jpeg;
- **Botão *Instruções***: Apresenta uma lista de instruções;
- **Botão *Informação Importante***: Apresenta informações importantes da utilização da aplicação.

C) Zona 3 – Característica operacional do relé diferencial numérico: Esboça a característica com base nos parâmetros introduzidos.

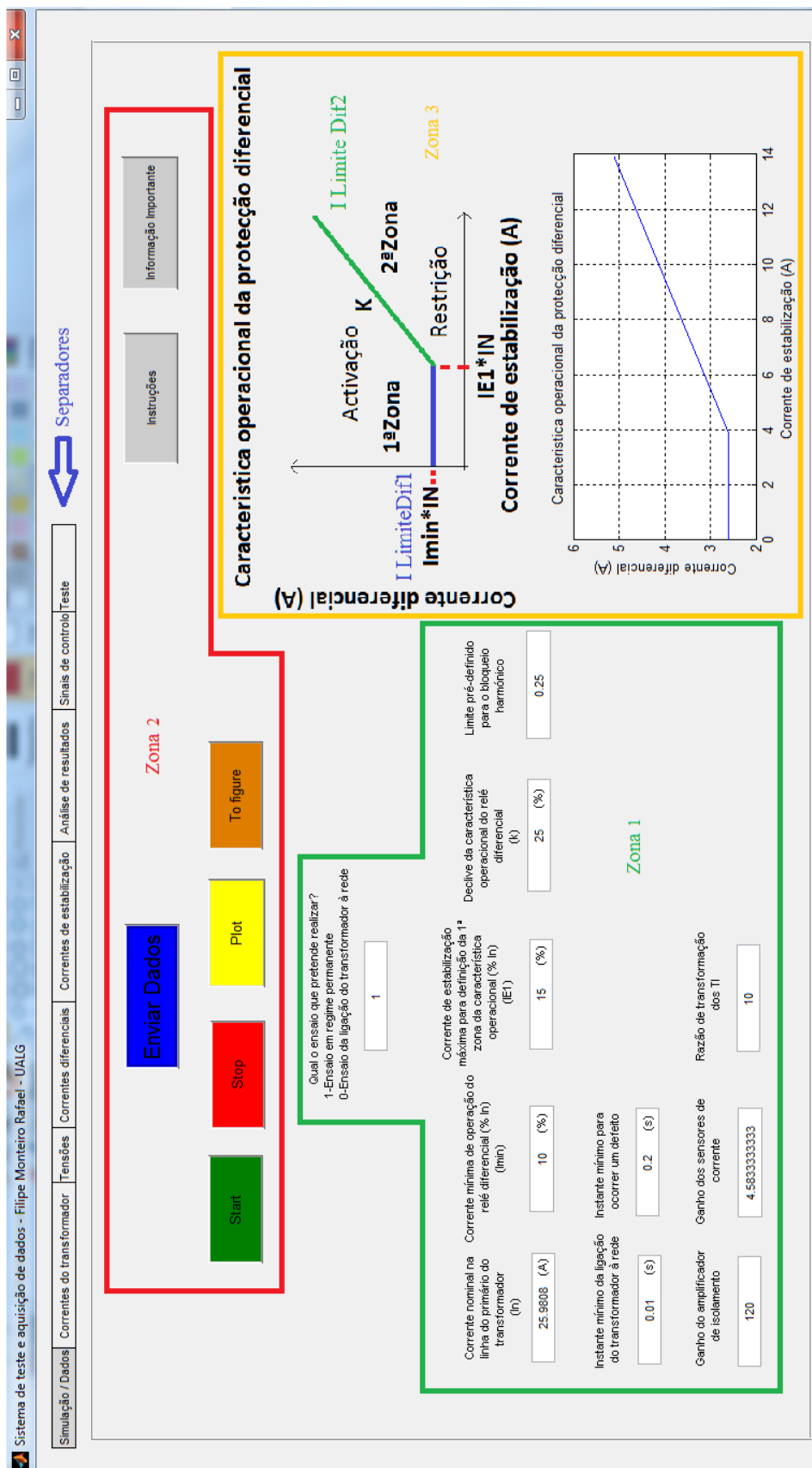


Figura 3.34 – Separador 1 (Simulação/Dados).

**Separador 2: Correntes do transformador:** Permite visualizar a forma de onda das correntes de entrada e saída do transformador, Fig. 3.35. Os gráficos apresentados referem-se ao processo do esquema *Simulink* da Fig. 3.11.

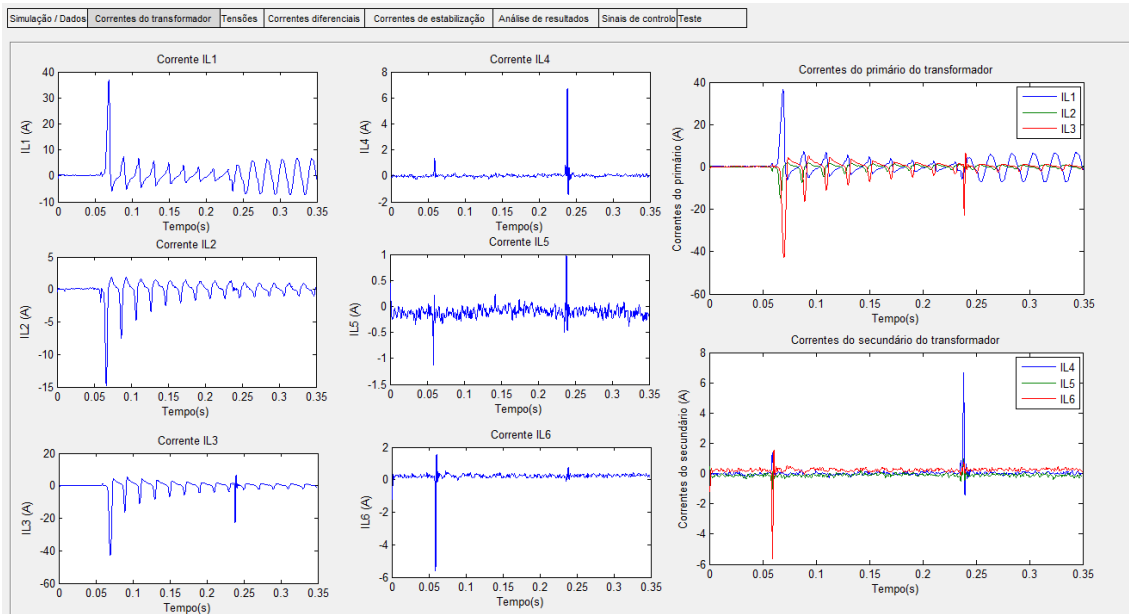


Figura 3.35 – Separador 2 (Correntes do transformador).

**Separador 3: Tensões:** Permite visualizar a forma de onda das tensões de alimentação do transformador, Fig. 3.36.

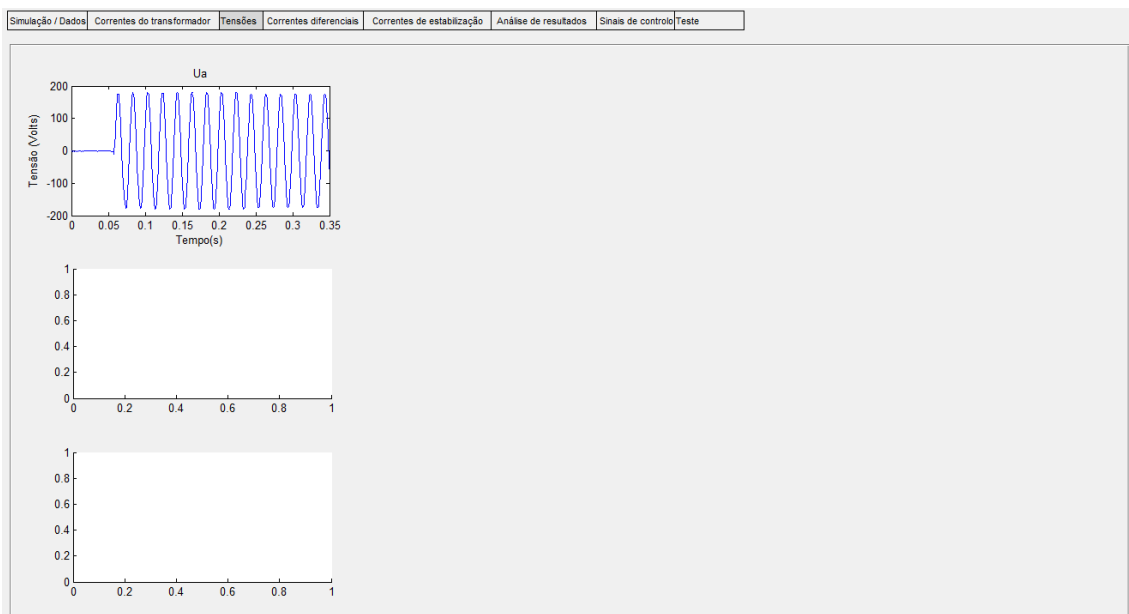


Figura 3.36 – Separador 3 (Tensões).

**Separador 4: Correntes diferenciais:** Permite visualizar a evolução temporal das correntes diferenciais e do valor eficaz do 1.º e 2.º harmônicos das correntes diferenciais, Fig. 3.37. Os gráficos apresentados referem-se aos processos dos esquemas *Simulink* das Figs. 3.15 e 3.17.

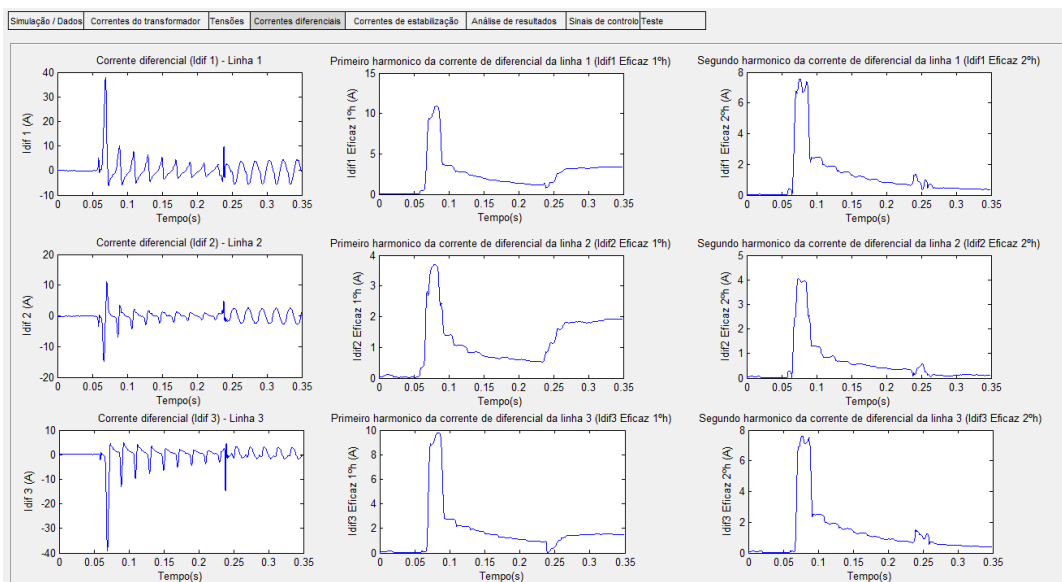


Figura 3.37 – Separador 4 (Correntes diferenciais).

**Separador 5: Correntes de estabilização:** Permite visualizar a evolução temporal das correntes de estabilização e do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes de estabilização, Fig. 3.38. Os gráficos apresentados referem-se aos processos dos esquemas *Simulink* das Figs. 3.15 e 3.17.

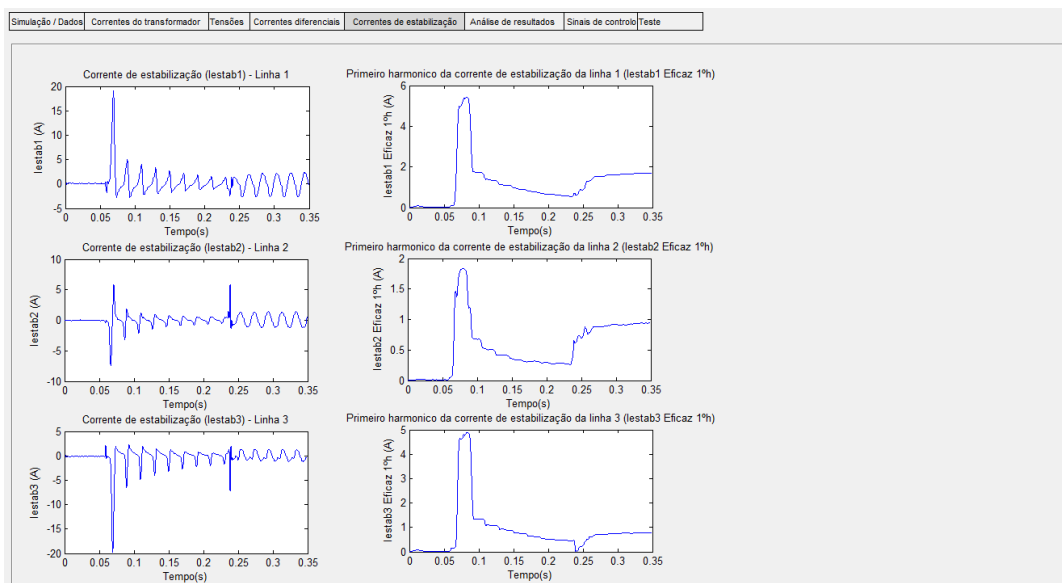


Figura 3.38 – Separador 5 (Correntes de estabilização).

**Separador 6: Análise de resultados:** Permite visualizar evolução temporal do valor eficaz dos 1.º e 2.º harmónicos das correntes diferenciais, do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes de estabilização, dos limites da característica operacional da proteção diferencial e da relação entre o 2.º e 1.º harmónicos das correntes diferenciais, Fig. 3.39. Os gráficos apresentados referem-se aos processos dos esquemas *Simulink* das Fig. 3.17 e 3.22.

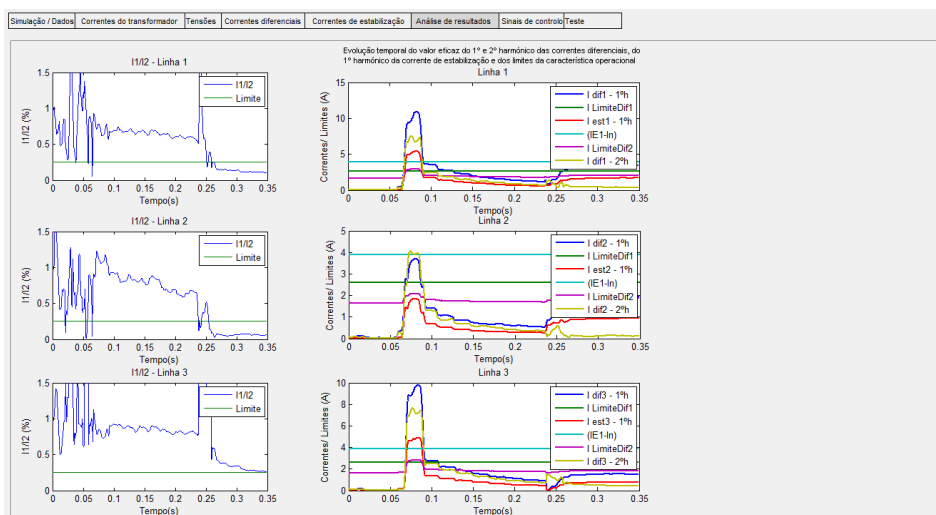


Figura 3.39 – Separador 6 (Análise de resultados).

**Separador 7: Sinais de controlo:** Permite visualizar a evolução temporal dos sinais gerados pelo relé (sinal emitido para introduzir o defeito, sinal de deteção de defeito, sinal de bloqueio, sinal de disparo, sinal enviado para os contactores), Fig. 3.40. Os gráficos apresentados referem-se aos processos dos esquemas *Simulink* das Figs. 3.24, 3.25, 3.27 e 3.31.

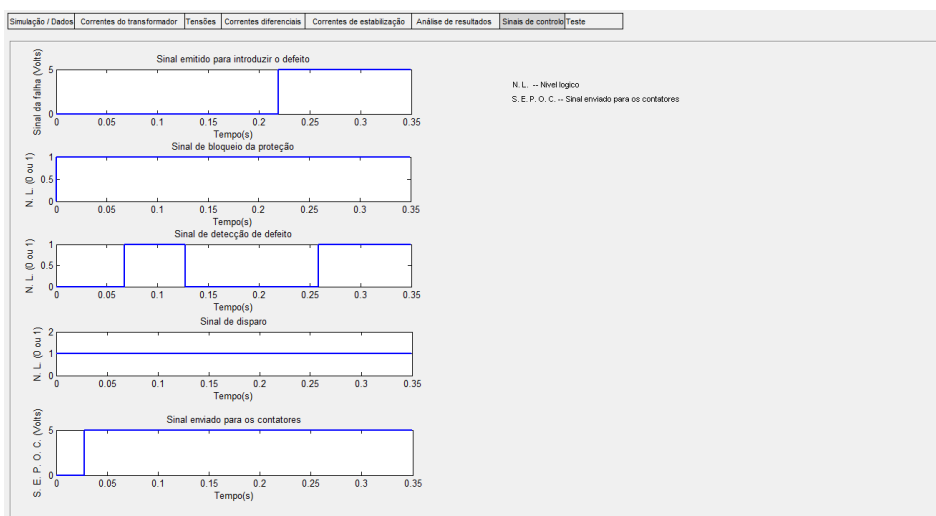


Figura 3.40 – Separador 7 (Sinais de controlo).

**Separador 8: Teste:** Tem como função permitir verificar se as correntes no primário e secundário do transformador estão a ser adquiridas corretamente, caracterizar a resposta dos sensores de corrente e calcular as componentes DC introduzidas nos respetivos sinais, Fig. 3.41. Este separador corresponde ao esquema *Simulink* da Fig. 3.33.

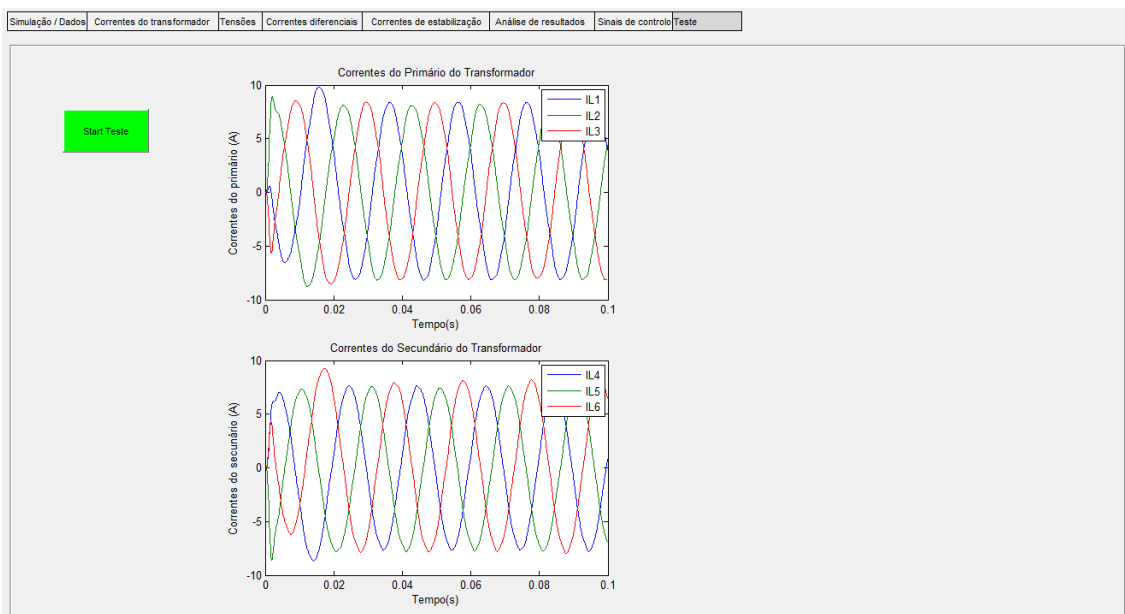


Figura 3.41 – Separador 8 (Teste).

No Anexo II encontra-se uma explicação detalhada sobre o processo de construção e desenvolvimento da interface gráfica.

### 3.5 Alterações a efetuar para implementação de outros algoritmos de proteção

O desenvolvimento de novas técnicas de deteção de avarias requer um sistema de teste e aquisição de dados que permita ensaiar de forma rápida e flexível as diferentes especificidades dos algoritmos de proteção. Neste trabalho foi desenvolvido um relé diferencial numérico, onde foi implementado o algoritmo de proteção convencional.

O processo de implementação de um novo algoritmo de proteção é relativamente simples, bastando substituir na aplicação *Simulink* “Sistema de teste e aquisição” o subsistema “Proteção diferencial”, Fig. 3.42 pelo novo algoritmo de proteção a testar. Podem ainda ser necessárias alterações no subsistema “Comando”, onde é gerado o

signal da saída da placa *NI* que controla o estado dos contactores das linhas de alimentação do transformador.

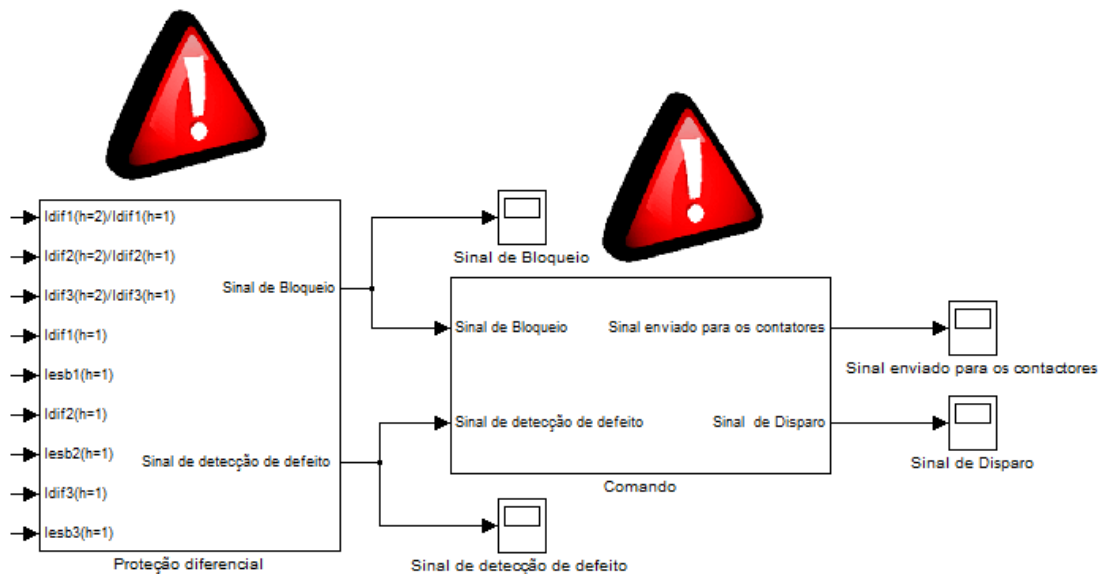


Figura 3.42 – Subsistema “Proteção diferencial”/“Comando” que se deve ter em atenção na implementação de novos algoritmos de proteção.



## 4. Validação Experimental

O relé diferencial numérico foi submetido a um vasto número de ensaios para verificar o seu funcionamento.

Apresenta-se de seguida uma descrição da montagem laboratorial e dos principais equipamentos utilizados.

### 4.1 Montagem laboratorial

O esquema simplificado da montagem é ilustrado na Fig. 4.1. Um esquema mais detalhado é apresentado no Anexo III. Na Fig. 4.2 ilustra-se a montagem laboratorial.

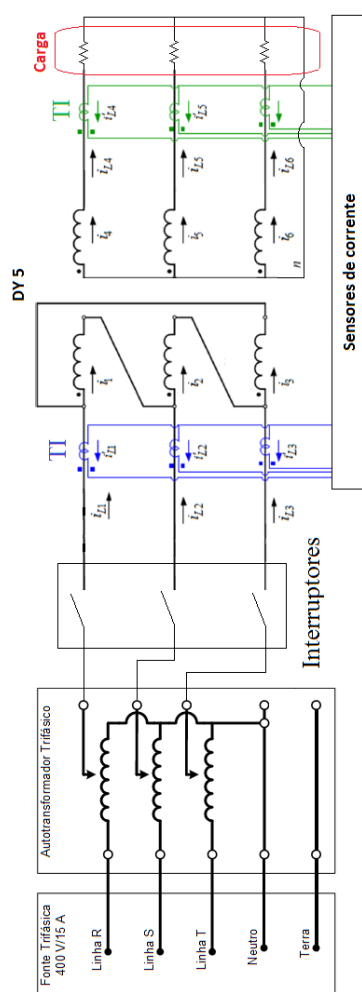


Figura 4.1 – Esquema simplificado da montagem.

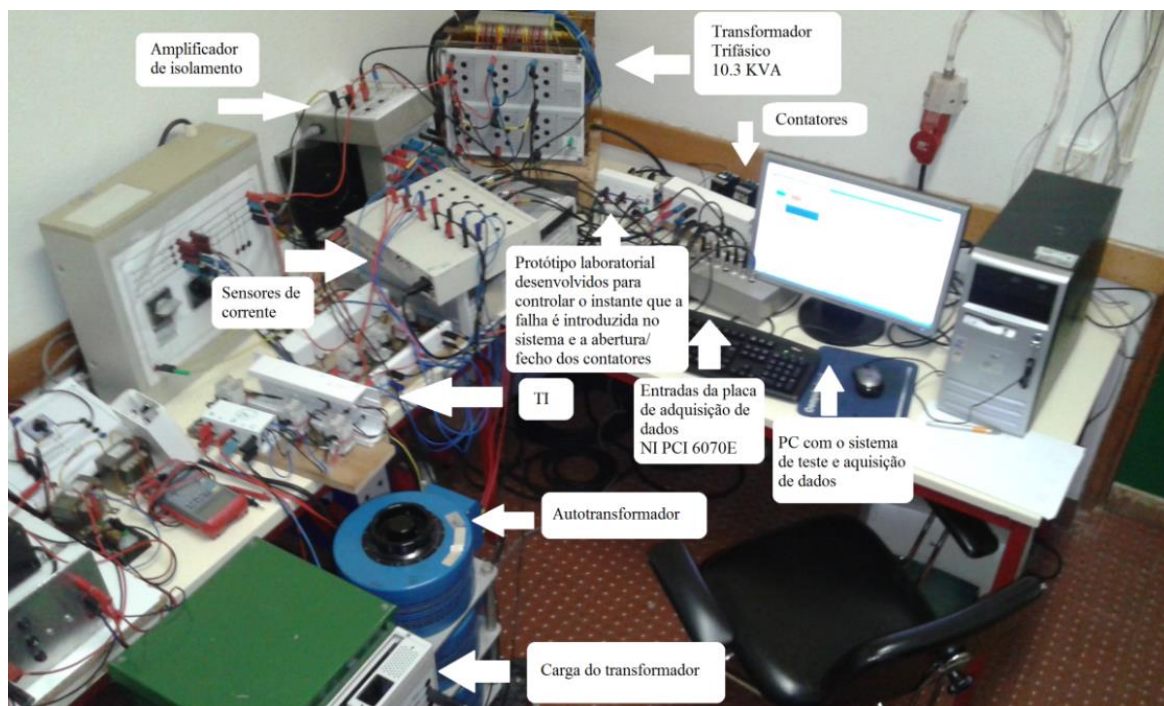


Figura 4.2 – Montagem laboratorial.

O transformador em teste é alimentado através de um autotransformador.

Para analisar os fenómenos que ocorrem quando o transformador é ligado à rede é necessário controlar o instante em que essa ligação ocorre. Esse instante de ligação é sincronizado com a tensão de alimentação. Para o efeito utiliza-se uma saída analógica da placa *NI* para comandar os interruptores ilustrados na Fig. 4.1. Foram utilizados contadores, Fig. 4.3(a) para realizar a função dos interruptores.

Foi desenvolvido um circuito que efetua o interface entre a saída analógica e os contadores, Fig. 4.3(b). O respetivo esquema é apresentado no Anexo III.

As correntes de entrada e saída do transformador são propositadamente medidas através de transformadores de corrente, Fig. 4.4(a). Os erros introduzidos pelos TI na medição das correntes são assim tomados em consideração.

A corrente no secundário dos TI é medida utilizando sensores de corrente de efeito Hall, Fig. 4.4(b). O esquema do circuito dos sensores de corrente é apresentado no Anexo III.

Os sinais de tensão são medidos através de um módulo com amplificador de isolamento, Fig. 4.5(a). O respetivo circuito é também apresentado no Anexo III.

A caixa de terminais da placa *NI* é ilustrada na Fig. 4.5(b).

O transformador de potência é ilustrado na Fig. 4.6(a).

A Fig. 4.6(b) ilustra o monitor com a interface gráfica.

A introdução dos defeitos no transformador foi também efetuada de forma controlada, utilizando um sinal de comando proveniente da placa *NI*. Para efetuar a introdução do defeito utilizou-se um relé eletromecânico, Fig. 4.3(b), (esquema no anexo III). Nos ensaios laboratoriais foram introduzidos defeitos internos fase-neutro e fase-fase. Foram também considerados defeitos externos (fase-neutro).

As características principais dos dispositivos utilizados nos ensaios laboratoriais são apresentadas na Tabela 4.1.

O esquema da Fig. 4.7, ilustra as ligações da montagem quando se pretende analisar a ocorrência de um defeito interno A-n no lado do primário do transformador. Neste caso o transformador encontra-se inicialmente a operar em regime permanente com carga resistiva. O defeito é introduzido utilizando um contator comandado através de uma saída analógica da placa *NI*. Utiliza-se uma resistência externa para limitar a corrente de curto-circuito.

A Fig. 4.8, ilustra o esquema da montagem quando se pretende analisar o fenómeno da ligação do transformador. Nesta situação pode ainda ser introduzido um defeito, caso seja desejado.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo das condições de realização dos ensaios laboratoriais.

Apresentam-se de seguida os resultados laboratoriais obtidos para alguns ensaios selecionados. Foram realizados outros ensaios que conduzem a conclusões similares, cujos resultados são apresentados no Anexo IV.

Tabela 4.1 – Características dos dispositivos utilizados na montagem laboratorial.

Placa NI PCI-6070E [27]	
Bus	PCI
Entradas Analógicas	16 SE/ 8 DI
Resolução das entradas	12 bits
Taxa máxima de amostragem	1.25 MS/s
Gama dos sinais de entrada	±10
Saídas analógicas	2
Resolução das saídas	12 bits
Taxa de saída	1 MS/s
Gama dos sinais de saída	±10
Transformadores de Corrente	
Modelo	Merlin Gerin 16501
Tensão de funcionamento nominal	< 720 V (AC)
Frequência	50/60 Hz
Razão de transformação $I_1/I_2$	50/5
Classe de precisão	1
Potência nominal (VA)	1.25
Transformador Trifásico de Potência	
	400V/ 230V
Potência Nominal	10.3 KVA
$V_{1n(fase)}$	230 V
$I_{1n(fase)}$	15 A
$V_{2n(fase)}$	132 V
$I_{2n(fase)}$	26 A
Sensores de Corrente	
Tipo	HAS50-P
Número de entradas	6
Número de saídas	6
Ganho	50/12
Corrente máxima	16 A
Amplificador de isolamento	
Número de entradas	3
Número de saídas	3
Atenuação	120x



Figura 4.3 – (a): Fotografia dos contadores utilizados na abertura/fecho das linhas de alimentação do transformador; (b): Fotografia dos protótipos laboratoriais desenvolvidos para controlar o instante da introdução do defeito e a abertura/fecho dos contadores.

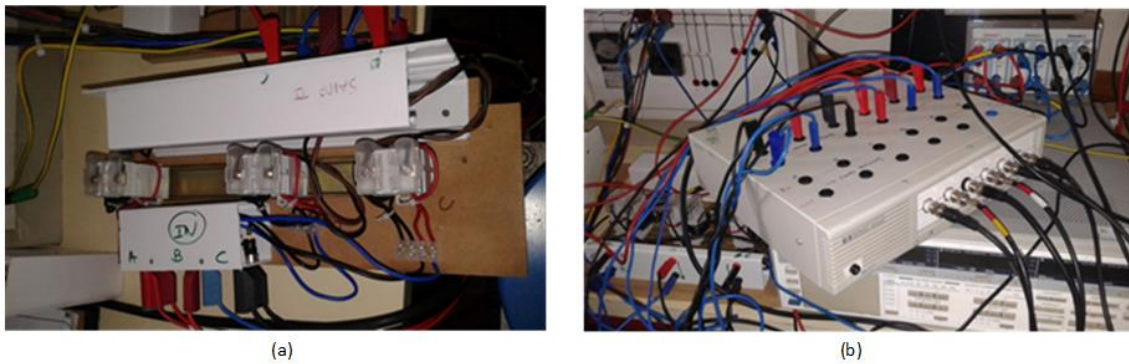


Figura 4.4 – (a): Fotografia dos TI; (b): Fotografia do módulo dos sensores de corrente.



Figura 4.5 – (a): Fotografia do amplificador de isolamento; (b): Caixa de terminais da placa NI PCI – 6070E.

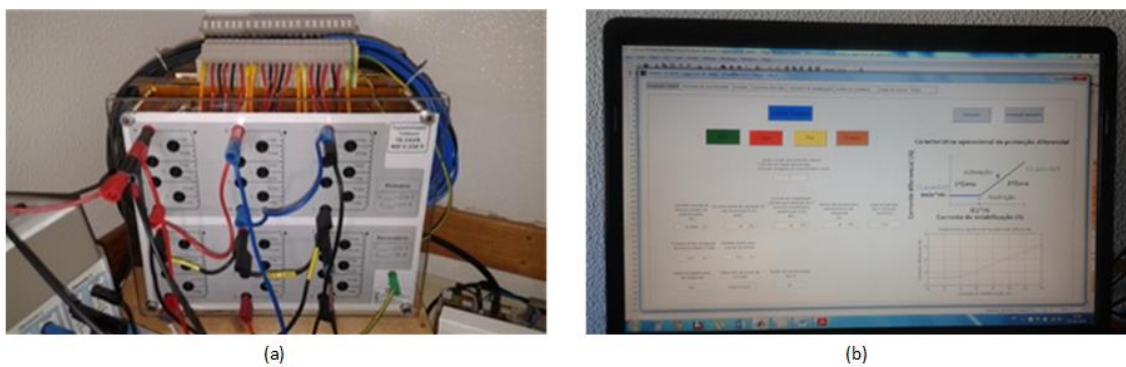


Figura 4.6 – (a): Fotografia do transformador trifásico de potência; (b): Fotografia do sistema de teste e aquisição de dados desenvolvido.

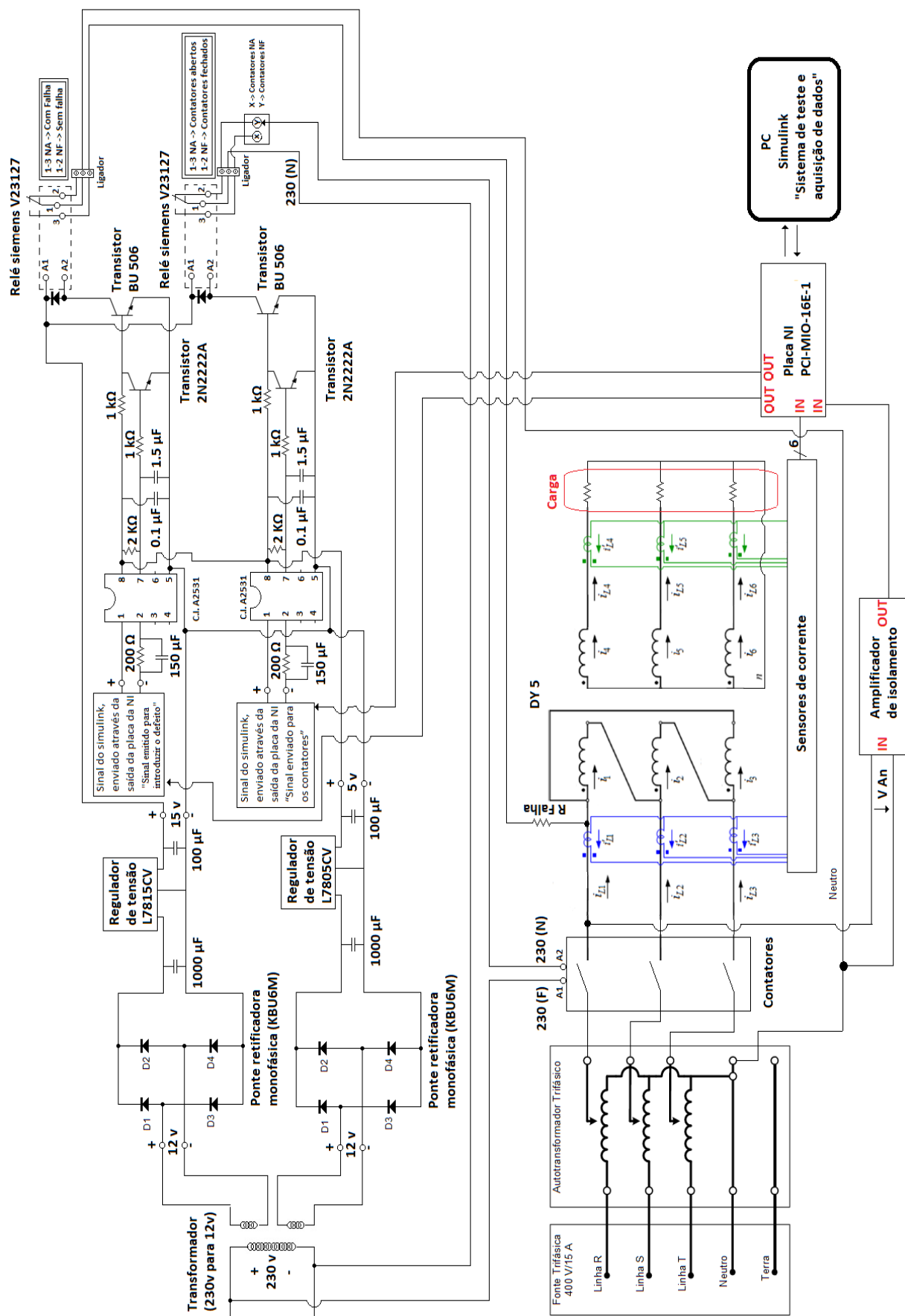


Figura 4.7 – Esquema da montagem laboratorial do ensaio em regime permanente com defeito A-n.

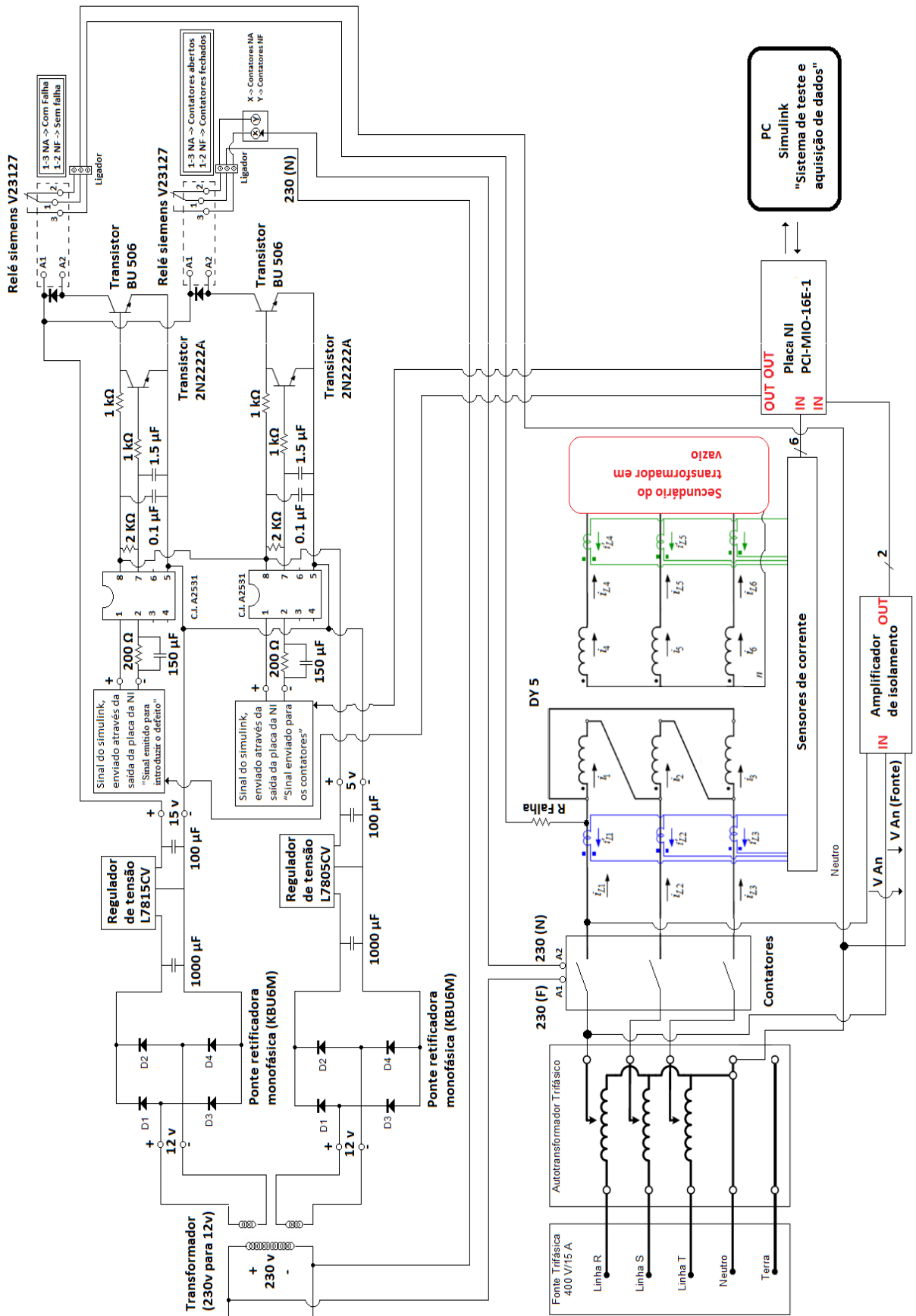


Figura 4.8 – Esquema da montagem laboratorial do ensaio da ligação do transformador à rede com defeito A-n.

Tabela 4.2 – Resumo de todos os ensaios apresentados.

Ensaio	Situação	Ligação do Transformador	Tensão Composta do 1.º VLL (V)	Carga R carga (Ω)	Tipo de Falha	Falha R falha (Ω)	Dados da característica operacional da proteção diferencial I <sub>min</sub> (%)	IE1 (%)	kdif (%)
Ensaio 1	Regime Permanente	DYn5	230	24	Nenhuma	0	10	15	25
Ensaio 2	Regime Permanente	DYn5	230	24	A-n	24	10	15	25
Ensaio 3	Regime Permanente	DYn5	230	24	A-n	48	10	15	25
Ensaio 4	Regime Permanente	DYn5	230	24	A-B	64	10	15	25
Ensaio 5	Regime Permanente	DYn5	230	24	A-B	96	10	15	25
Ensaio 6	Lig. do transf. à rede	DYn5	230	Vazio	Nenhuma	0	10	15	25
Ensaio 7	Lig. do transf. à rede	DYn5	230	Vazio	A-n	24	10	15	25
Ensaio 8	Lig. do transf. à rede	DYn5	230	Vazio	A-B	64	10	15	25
Ensaio 9	Regime Permanente	DYn5	230	24	u-n (Externa)	24	10	15	25
Ensaio 10	Regime Permanente	DYn5	230	24	B-n	24	10	15	25
Ensaio 11	Regime Permanente	DYn5	230	24	C-n	24	10	15	25
Ensaio 12	Regime Permanente	DYn5	230	24	u-n	24	10	15	25
Ensaio 13	Regime Permanente	DYn5	230	24	v-n	24	10	15	25
Ensaio 14	Regime Permanente	DYn5	230	24	w-n	24	10	15	25
Ensaio 15	Regime Permanente	DYn5	230	24	B-n	48	10	15	25
Ensaio 16	Regime Permanente	DYn5	230	24	C-n	48	10	15	25
Ensaio 17	Regime Permanente	DYn5	230	24	u-n	48	10	15	25
Ensaio 18	Regime Permanente	DYn5	230	24	v-n	48	10	15	25
Ensaio 19	Regime Permanente	DYn5	230	24	w-n	48	10	15	25
Ensaio 20	Regime Permanente	DYn5	230	24	B-C	64	10	15	25
Ensaio 21	Regime Permanente	DYn5	230	24	C-A	64	10	15	25
Ensaio 22	Regime Permanente	DYn5	230	24	u-v	64	10	15	25
Ensaio 23	Regime Permanente	DYn5	230	24	v-w	64	10	15	25
Ensaio 24	Regime Permanente	DYn5	230	24	w-u	64	10	15	25
Ensaio 25	Regime Permanente	DYn5	230	24	B-C	96	10	15	25
Ensaio 26	Regime Permanente	DYn5	230	24	C-A	96	10	15	25
Ensaio 27	Regime Permanente	DYn5	230	24	u-v	96	10	15	25
Ensaio 28	Regime Permanente	DYn5	230	24	v-w	96	10	15	25
Ensaio 29	Regime Permanente	DYn5	230	24	w-u	96	10	15	25
Ensaio 30	Regime Permanente	DYn5	230	24	v-n (Externa)	24	10	15	25
Ensaio 31	Regime Permanente	DYn5	230	24	w-n (Externa)	24	10	15	25
Ensaio 32	Regime Permanente	DYn5	230	24	A-n	64	5	20	25

## 4.2 Ensaio Laboratoriais

### 4.2.1 Ensaio 1: Regime permanente em carga – Sem defeito

Neste ensaio utiliza-se o sistema desenvolvido para adquirir os sinais e analisar o comportamento do transformador em carga, sem qualquer defeito. As condições do ensaio são apresentadas na Tabela 4-2.

O sinal emitido para introduzir o defeito no transformador permanece sempre a zero, Fig. 4.9(a), pois neste ensaio o transformador opera sem avaria.

Nas Figs. 4.9(b) e (c) ilustra-se a forma de onda das correntes de entrada e saída do transformador. Estas ondas apresentam-se inicialmente distorcidas, devido à remoção da componente DC e à atuação do filtro ainda não ter estabilizado no 1.º ciclo de aquisição. Após os sinais terem estabilizado verifica-se que as correntes no secundário possuem uma amplitude de 8 A, valor próximo do previsto (a tensão no secundário é de 132 V, a resistência de carga é de 24  $\Omega$  o que resulta numa corrente de pico de  $\sqrt{2} \cdot \frac{132}{24} \approx 8$  A). As correntes no lado primário possuem também a amplitude expectável ( $8 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{N_2}{N_1} \approx 8$  A), encontrando-se desfasadas de 150° das correntes respetivas no lado secundário, devido à ligação DYn5 utilizada.

As correntes diferenciais têm uma forma de onda idêntica à das correntes de vazio do transformador, Fig. 4.10, possuindo um valor bastante reduzido. As correntes de estabilização que representam a média das correntes de entrada e saída do transformador, referenciadas a uma base comum (primário), têm também a evolução temporal ilustrada na Fig. 4.10.

As Figs. 4.11(a), (b) e (c), ilustram a evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico da corrente de diferencial e do 1.º harmónico da corrente de estabilização para as 3 linhas do sistema trifásico. Ilustra-se também o valor mínimo da corrente acima do qual o relé emite o sinal de disparo na zona 1 da característica operacional da proteção diferencial ( $I_{Limite_{Dif1}}$ ) e o valor da corrente de estabilização necessário para que o relé passe a operar na zona 2 da característica operacional ( $I_{E1} \cdot I_n$ ), Fig. 3.21. A comparação desta última grandeza com o 1.º harmónico da corrente de estabilização

permite verificar se o ponto de funcionamento do relé se situa na 1.<sup>a</sup> ( $I_{est_{1.ºh}} < I_{E1} \cdot I_n$ ) ou na 2.<sup>a</sup> ( $I_{est_{1.ºh}} > I_{E1} \cdot I_n$ ) zona da característica operacional.

É ainda ilustrado o valor mínimo da corrente acima do qual o relé emite o sinal de disparo na zona 2 da característica operacional da proteção diferencial ( $I_{Limite_{Dif2}}$ ), calculado pela equação (3-2).

A Fig. 4.12 apresenta o ponto de funcionamento (da linha 1) relativo às condições deste ensaio, esboçado na característica operacional da proteção diferencial. Este ponto situa-se claramente na zona de não atuação da proteção.

A ativação do relé é bloqueada quando a razão entre o 2.<sup>º</sup> e 1.<sup>º</sup> harmónicos ( $I_2/I_1$ ) das correntes diferenciais ultrapassa um valor pré-definido. Conforme referido anteriormente, esta ação é necessária para impedir disparos intempestivos durante sobrecorrentes transitórias de excitação. A evolução da razão  $I_2/I_1$ , para as três fases, é ilustrada nas Figs. 4.11(e), (f) e (g). Neste caso define-se que o bloqueio sucede quando  $I_2/I_1 \geq 0.25$  (esse limite encontra-se também ilustrado nas Figs. 4.11(e), (f) e (g)). Verifica-se que no início da aquisição a razão  $I_2/I_1$  toma valores superiores a 0.25 e o sinal de bloqueio é emitido, Fig. 4.11(h). Isto deve-se à distorção inicial das correntes, provocada pelo filtro, remoção da componente DC e ainda ao erro cometido na análise de *Fourier* quando ainda não se completou um ciclo de aquisição.

O sinal de bloqueio inibe a ativação da proteção. O sinal de disparo da proteção é obtido conjugando os sinais de deteção de defeito e o sinal de bloqueio, conforme definido na Tabela 4-3.

A interface gráfica apresenta no separador “Sinais de controlo” todos os sinais relativos ao algoritmo do relé de proteção, Fig. 4.13.

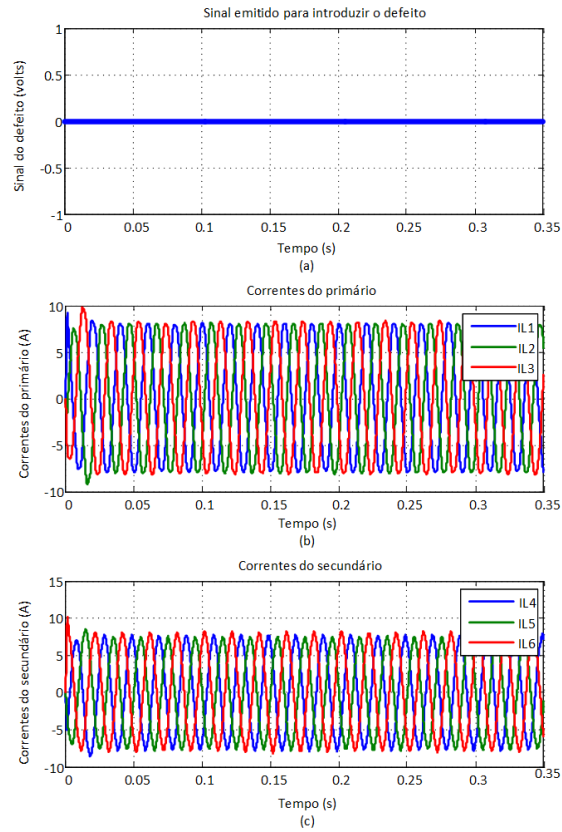


Figura 4.9 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário.

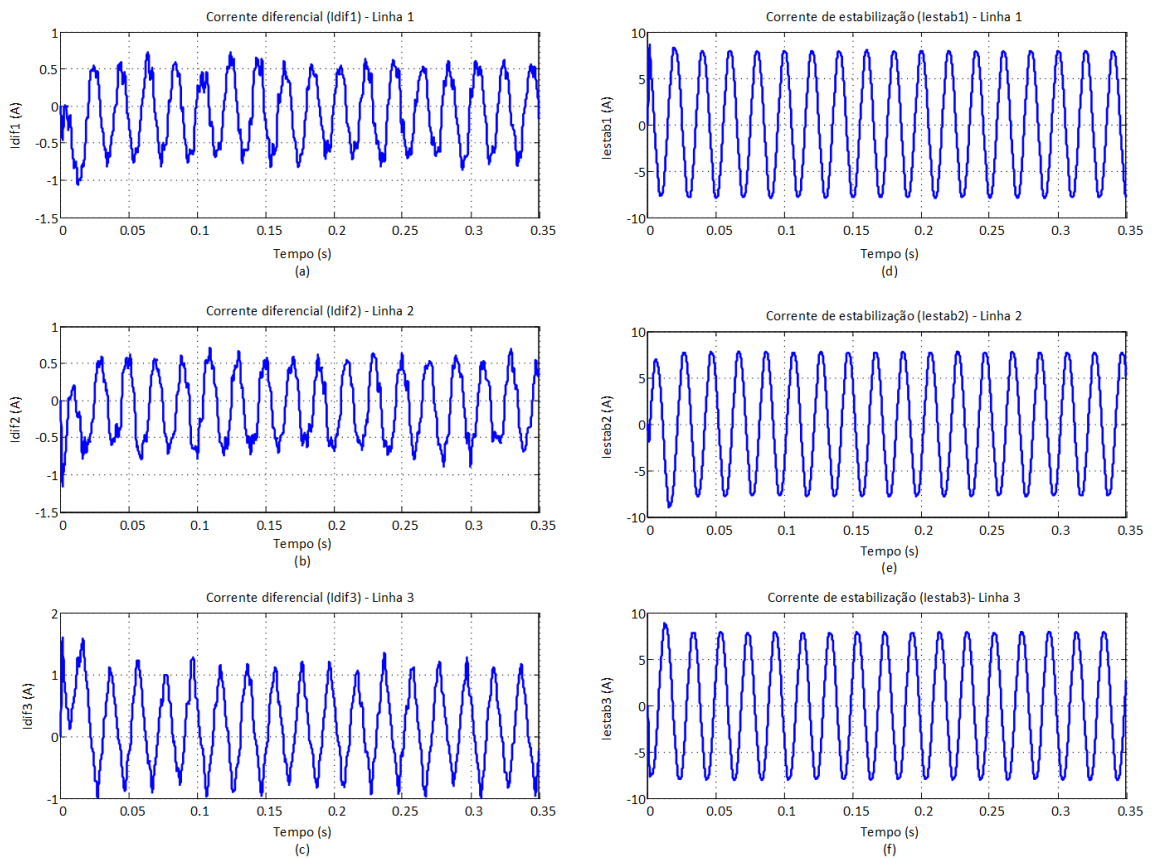


Figura 4.10 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

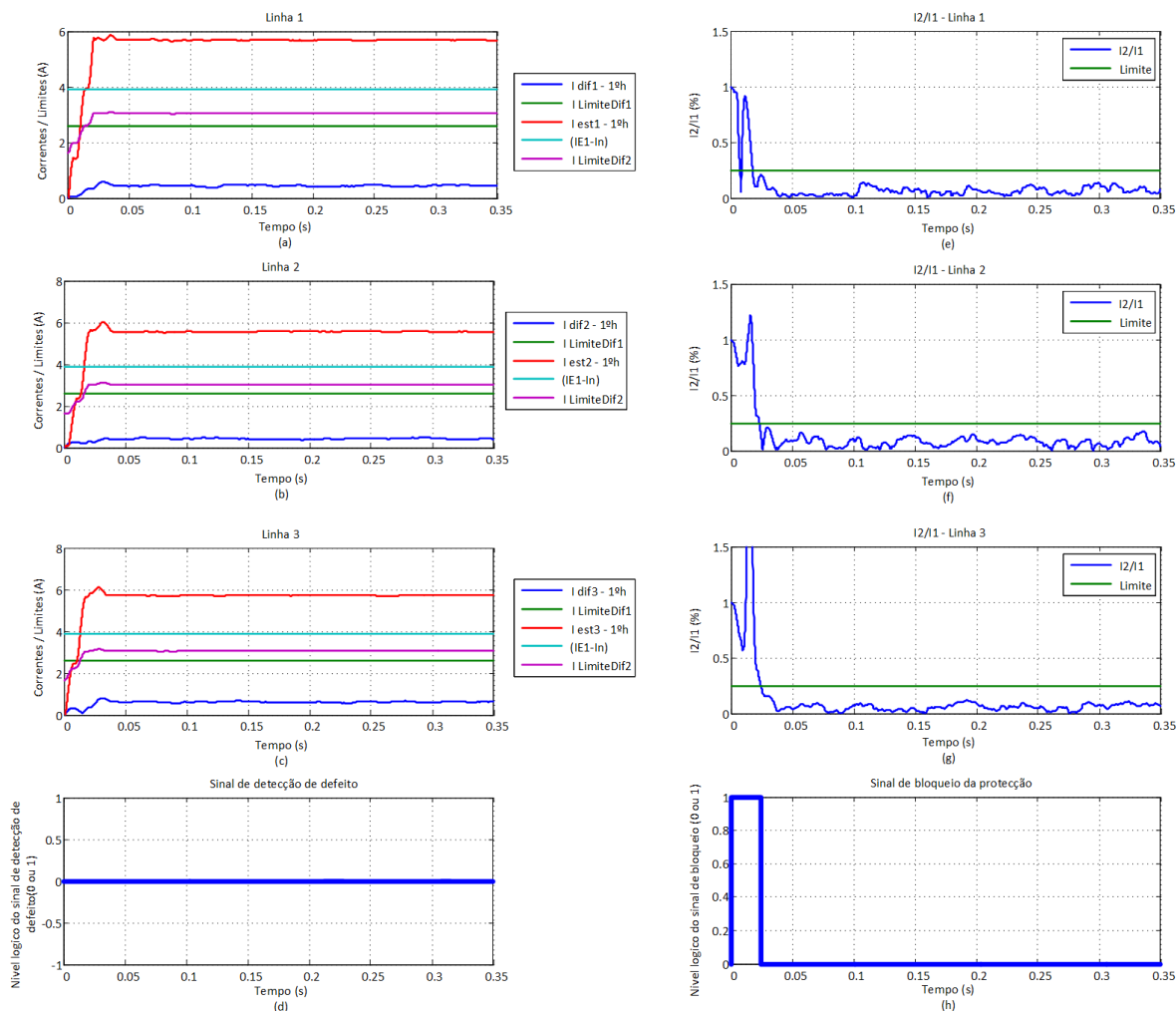


Figura 4.11 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

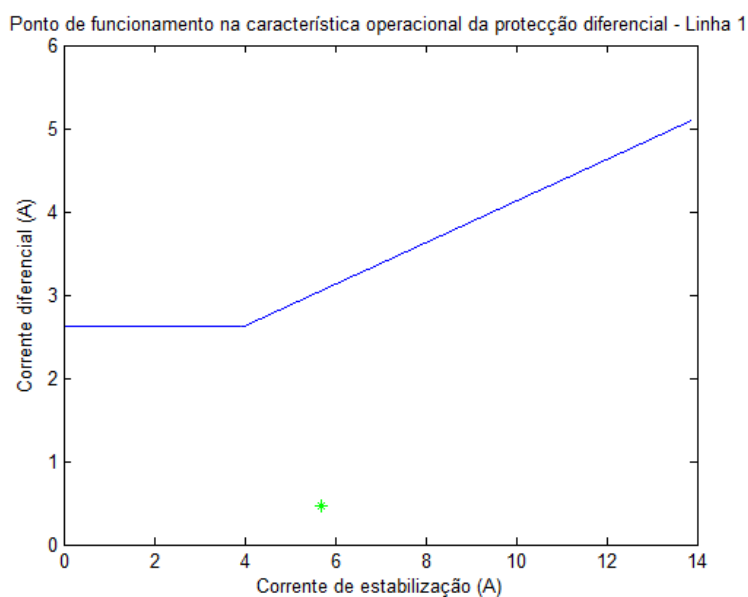


Figura 4.12 – Ponto de funcionamento na característica operacional da protecção diferencial - Linha 1.

Tabela 4-3 – Combinação do sinal de detecção de defeito e de bloqueio de forma a obter o sinal de disparo.

Sinal de detecção de defeito	Sinal de bloqueio	Sinal de disparo
0	0	0
1	1	0
1	0	1

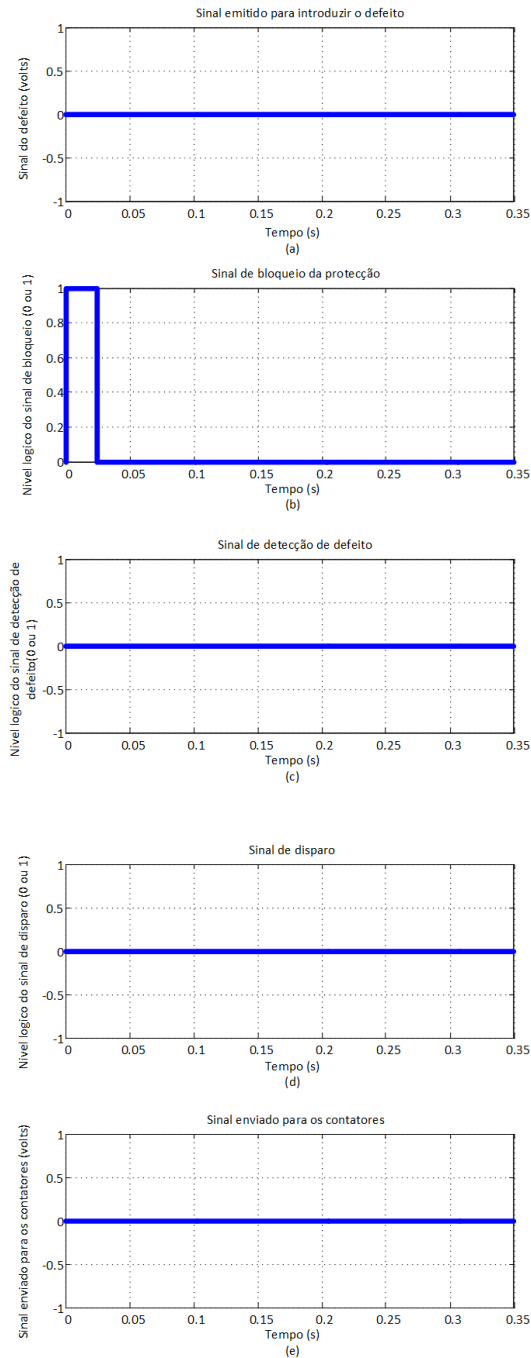


Figura 4.13 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

### 4.2.2 Ensaio 2: Introdução de defeito A-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$

Neste ensaio ocorre um defeito fase-neutro (A-n) no lado primário do transformador no instante 0.2 s. Nesse instante é emitido um sinal de 5 V na saída 1 da placa NI, Fig. 4.14(a), que vai provocar o fecho do interruptor (relé eletromecânico) e introduzir o defeito no circuito de potência. Devido ao atraso na atuação do relé eletromecânico o defeito não ocorre exatamente aos 0.2 s, mas sim ligeiramente mais tarde, em  $t = 0.21$  s.

Utiliza-se uma resistência de defeito de  $24 \Omega$ . A introdução do defeito provoca o aumento da corrente na fase afetada, Fig. 4.14(b), pois a corrente de defeito vai somar-se à corrente de carga do transformador. Neste caso as duas correntes estão praticamente em fase, pelo que o valor de pico da corrente da linha afetada pode ser calculado de forma aproximada efetuando a soma algébrica das duas correntes:

$$\hat{i}_{L1} = \sqrt{2} \cdot \frac{132}{24} + \sqrt{2} \cdot \frac{132}{24} \approx 16 \text{ A} \quad (4-1)$$

Da análise da Fig. 4.14(b) conclui-se que os resultados laboratoriais confirmam estes cálculos aproximados. As correntes no lado secundário não são afetadas de forma significativa com a introdução do defeito, Fig. 4.14(c).

Cerca dos 260 ms o defeito é detetado pela proteção e a alimentação do transformador é interrompida.

A evolução das correntes diferenciais é apresentada na Figs. 4.15(a), (b) e (c). O defeito A-n só deveria afetar a corrente diferencial na linha 1. No entanto, devido à remoção da componente homopolar as três correntes diferenciais aumentam de amplitude após a introdução do curto-circuito, aumento este mais importante na corrente da linha 1.

As correntes de estabilização são apresentadas nas Figs. 4.15(d), (e) e (f). Devido à ocorrência do defeito a corrente de estabilização da linha 1 aumenta.

A evolução do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e das correntes de estabilização é ilustrada nas Figs. 4.16(a), (b) e (c). O aumento da corrente diferencial na linha 1 é suficiente para ativar a proteção e o sinal de deteção de defeito é emitido, Fig. 4.16(d). A localização dos pontos de funcionamento na característica

operacional da proteção, antes e depois do defeito, é ilustrada na Fig. 4.17. Neste caso a ativação da proteção ocorre na zona 2.

Nas Figs. 4.16(e), (f) e (g), ilustra os sinais referentes ao bloqueio harmónico. À semelhança do ensaio anterior verifica-se que no início da aquisição existem erros que introduzem perturbações nos sinais e não devem portanto ser considerados.

O aumento da corrente diferencial imediatamente após ocorrer o defeito origina um breve fenómeno transitório, que por sua vez distorce a onda e provoca um aumento da amplitude do 2.º harmónico. Durante alguns milissegundos o bloqueio harmónico vai ser ativado, Fig. 4.16(h).

Após esse intervalo de tempo o bloqueio fica inativo e o sinal para abrir os contactores é emitido, Fig. 4.18.

Após a abertura dos contactores as correntes anulam-se. Nestas condições o ruído dos sinais, que continuam a ser adquiridos, faz ativar novamente o sinal de bloqueio. No entanto, isto não afeta já a emissão do sinal para os contactores que permanecem abertos.

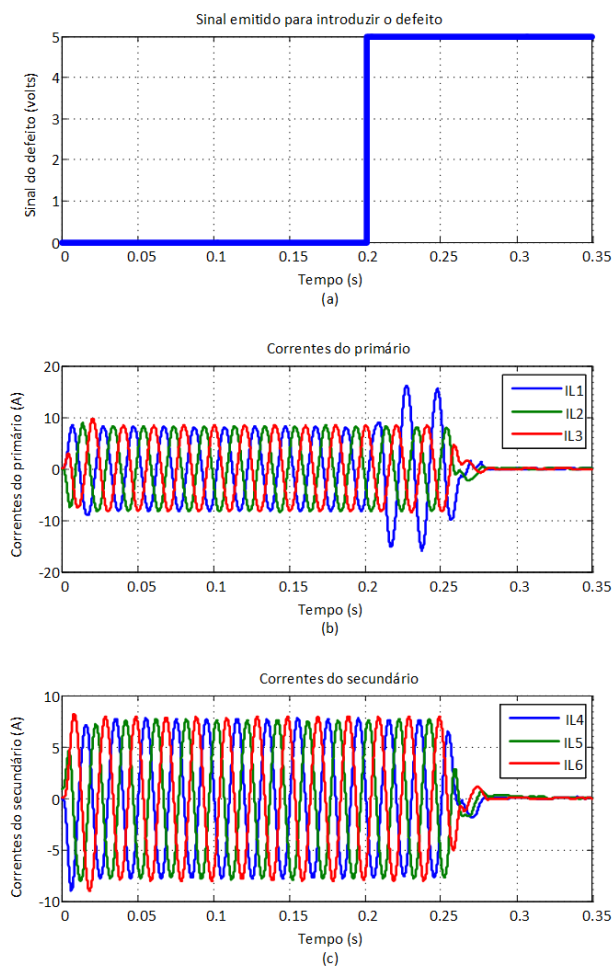


Figura 4.14 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário.

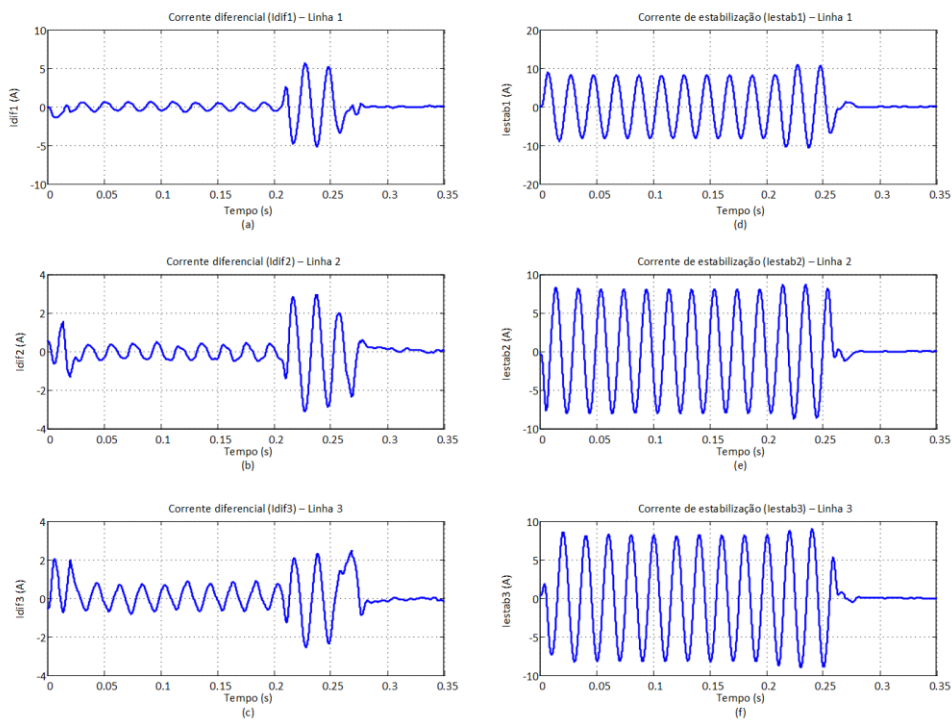


Figura 4.15 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

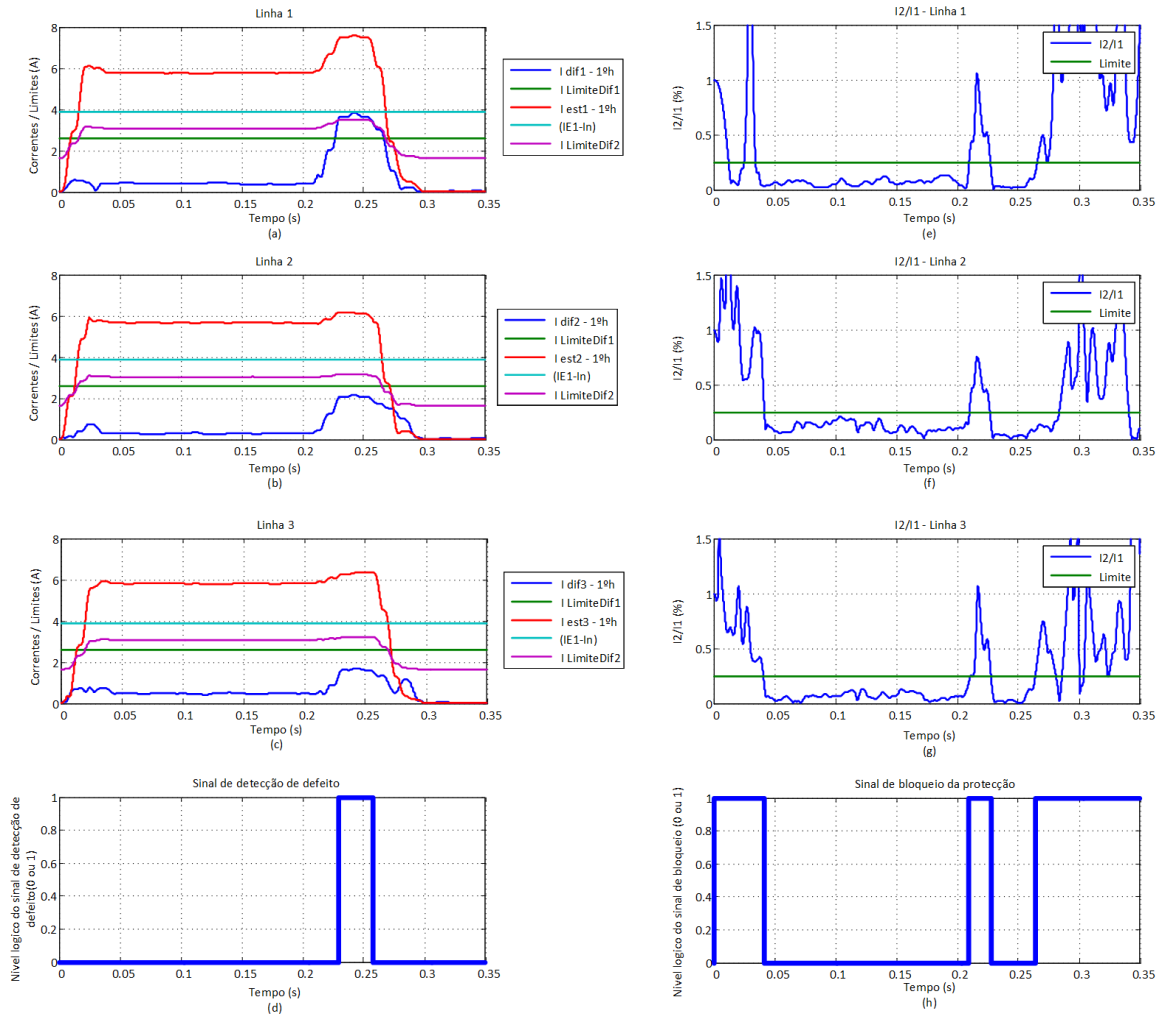


Figura 4.16 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

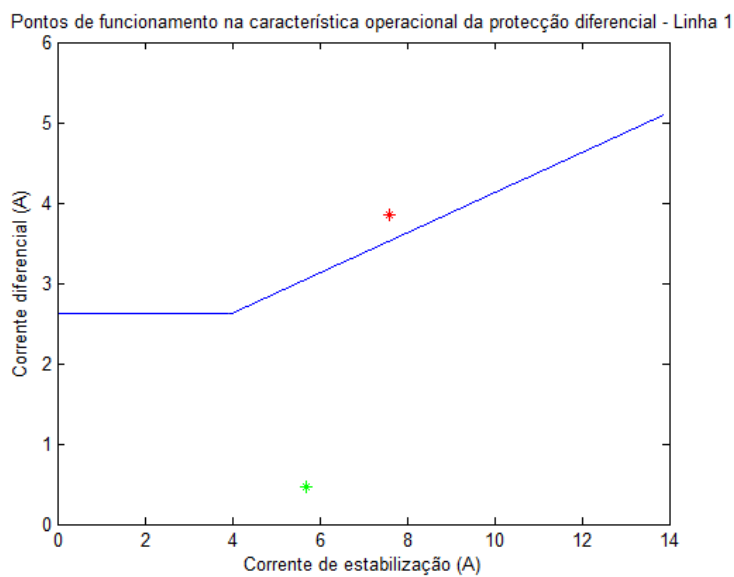


Figura 4.17 – Pontos de funcionamento na característica operacional da protecção diferencial (verde: antes do defeito, vermelho: depois do defeito) – Linha1.

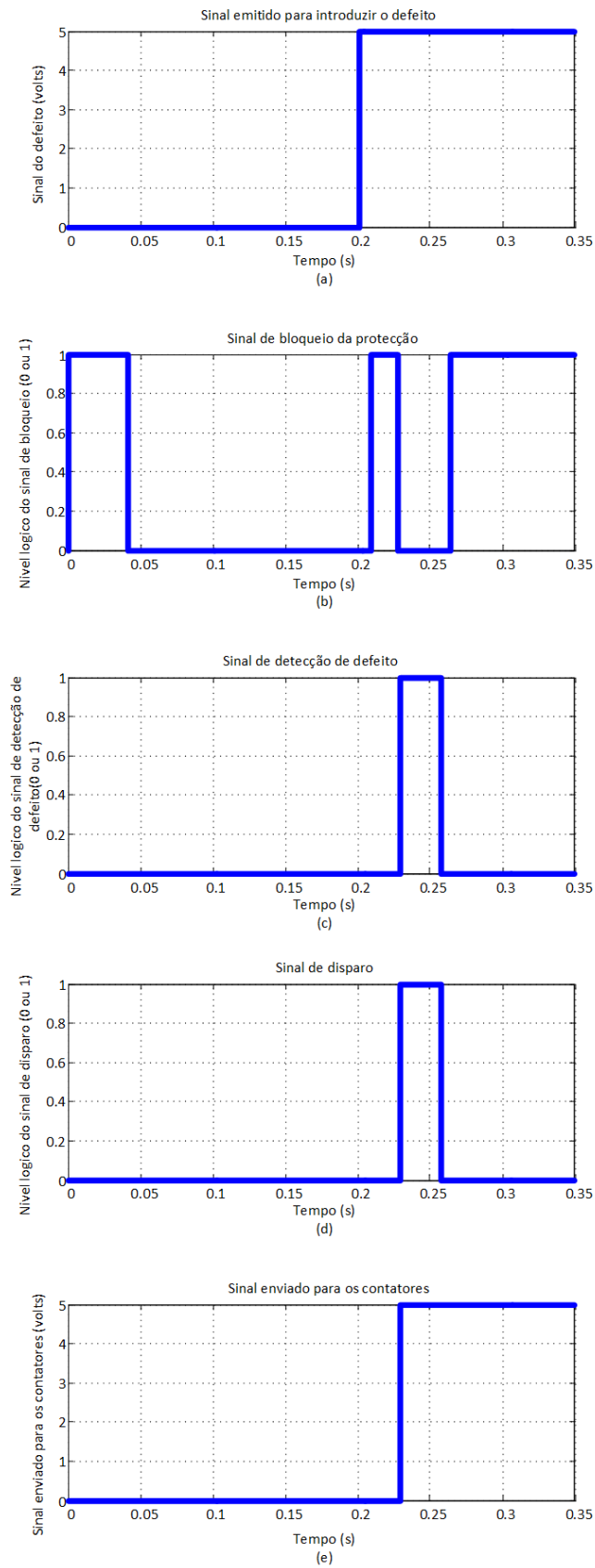


Figura 4.18 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

### 4.2.3 Ensaio 3: Introdução de defeito A-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$

Este ensaio é muito idêntico ao anterior, tendo sido apenas alterado o valor da resistência de defeito para  $48 \Omega$ , Tabela 4-2.

O aumento da resistência de defeito provoca uma menor corrente de curto-circuito, que se revela neste caso insuficiente para o relé detetar a anomalia.

A evolução das grandezas relevantes é apresentada nas Figs. 4.19 a 4.23. Na Fig. 4.22 verifica-se que apos a ocorrência do defeito o ponto de funcionamento permanece na zona de não ativação.

Com a presente técnica diferencial proporcional não é possível detetar defeitos de severidade reduzida, sendo assim importante desenvolver novos algoritmos de proteção que permitam identificar as avarias ainda numa fase incipiente, por forma a isolar o transformador da rede o mais rapidamente possível e assim minimizar os danos e garantir a segurança das pessoas e bens nas proximidades da instalação.

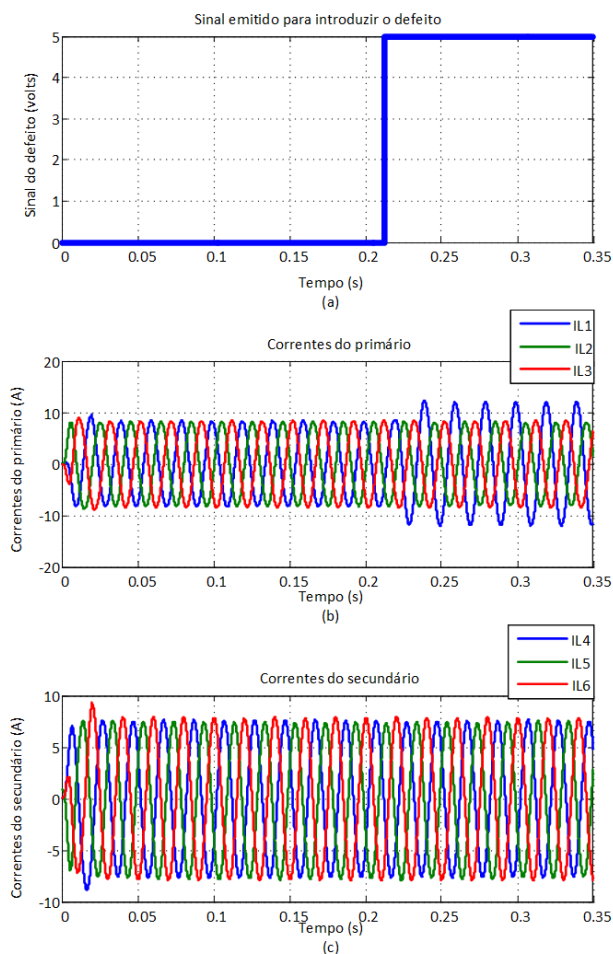


Figura 4.19 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário.

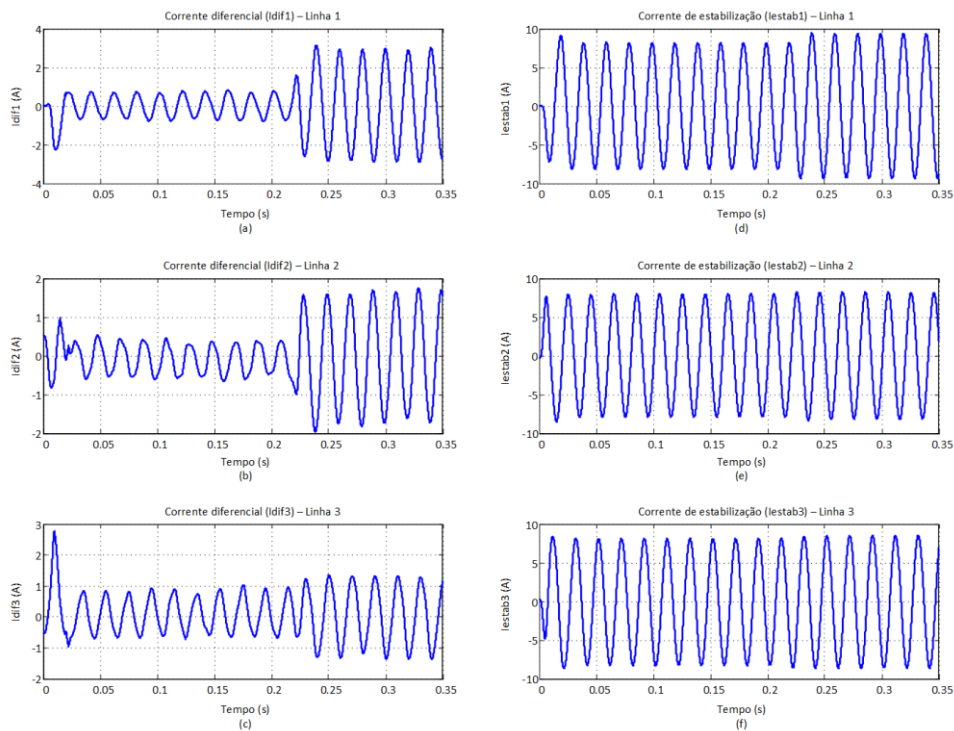


Figura 4.20 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

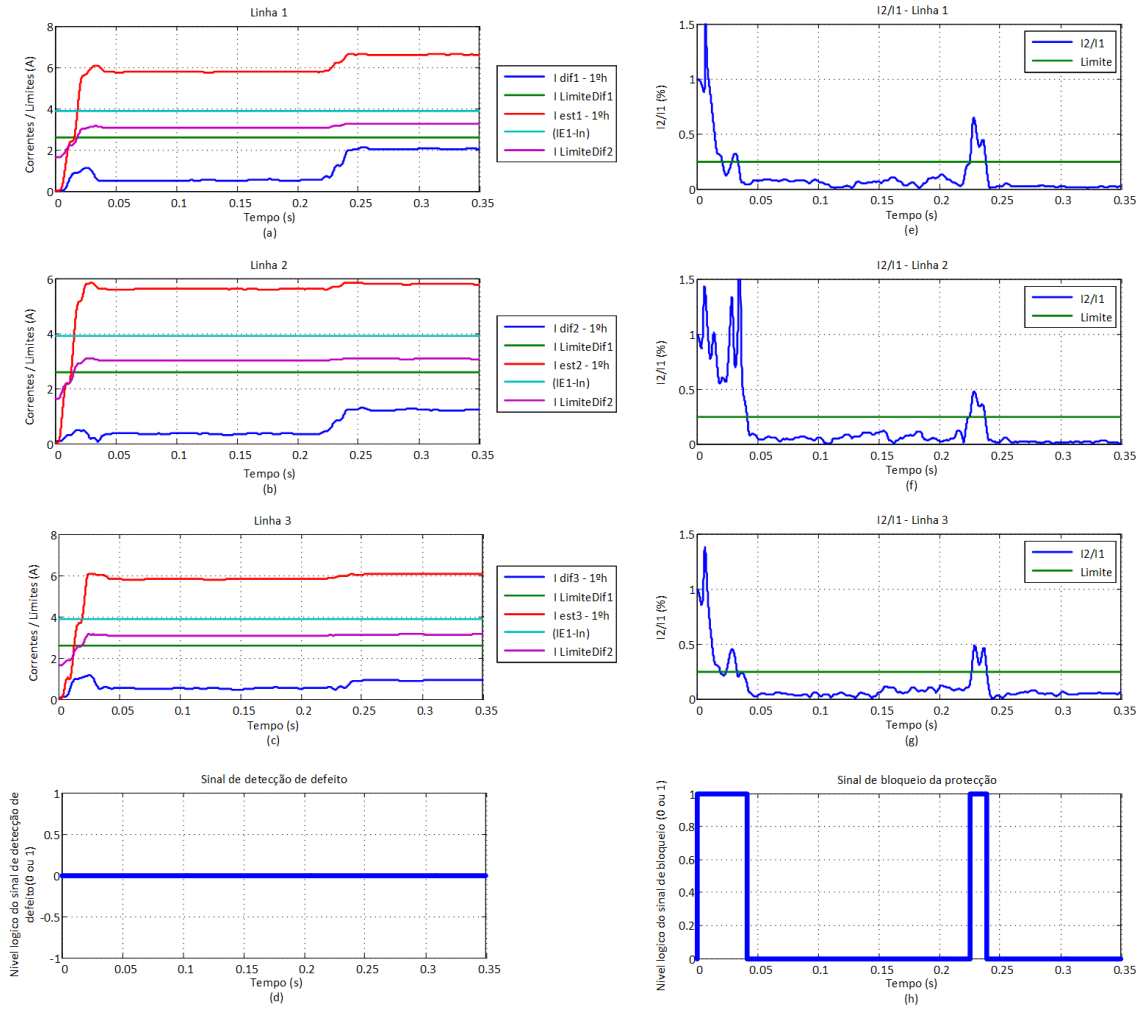


Figura 4.21 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.<sup>o</sup> harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

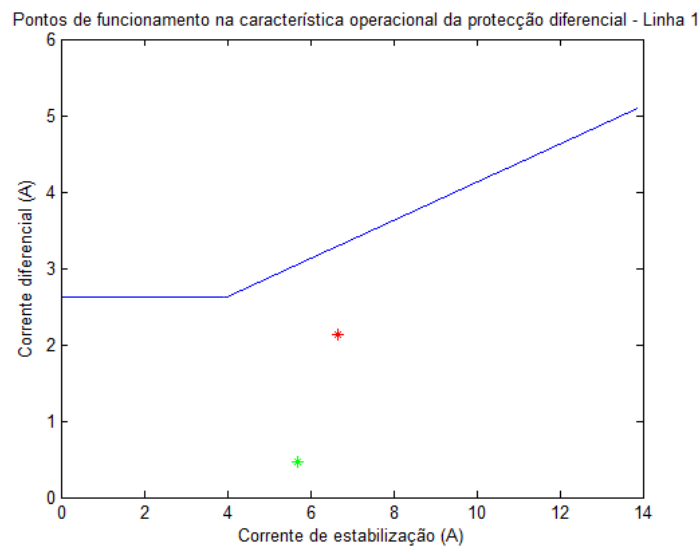


Figura 4.22 – Pontos de funcionamento na característica operacional da protecção diferencial (verde: antes do defeito, vermelho: depois do defeito) – Linha 1.

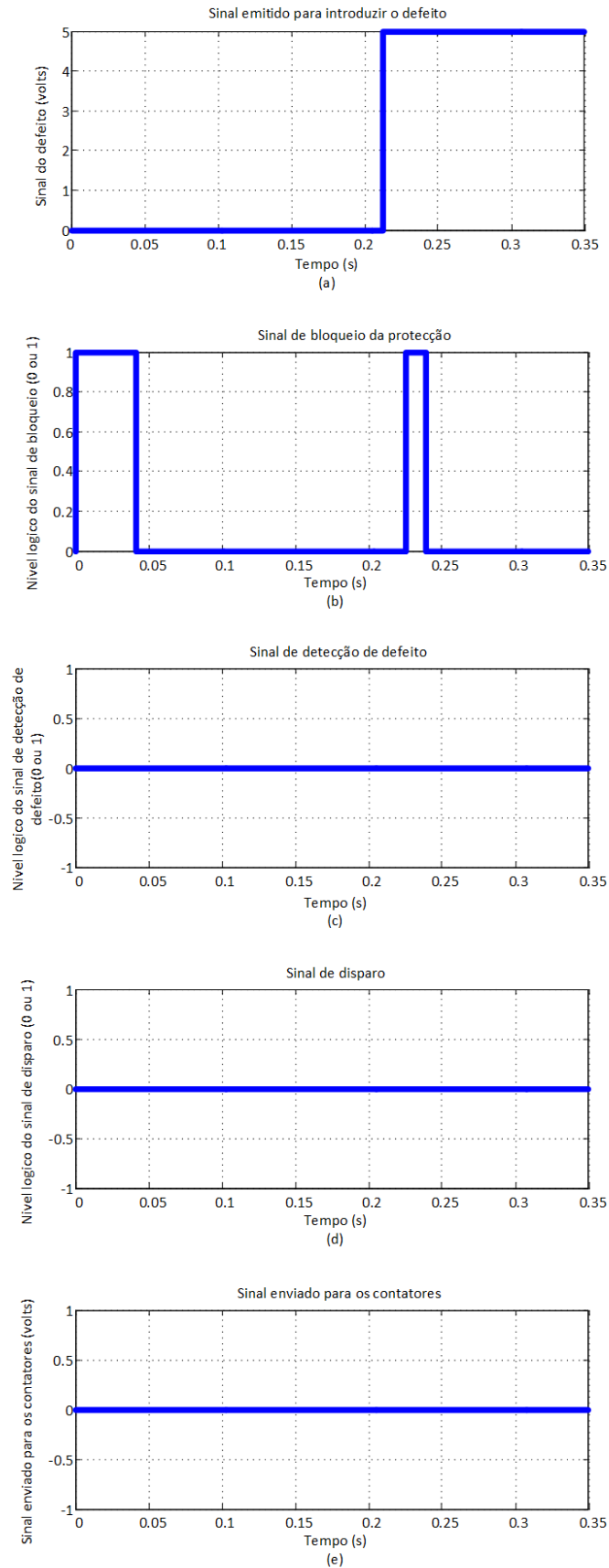


Figura 4.23 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

#### 4.2.4 Ensaio 4: Introdução de defeito A-B, $R_{Falha} = 64 \Omega$

Neste ensaio introduz-se um defeito entre duas linhas no lado primário do transformador,  $R_{Falha} = 64 \Omega$ , Tabela 4-2. Este tipo de defeito provoca o aumento da corrente das linhas A e B do lado primário, Fig. 4.24. O defeito é detetado pelo relé e o sinal para remover o transformador de serviço é enviado para os contadores cerca dos 0.23 s, Fig. 4.28(d), instante a partir do qual existe um transitório associado à extinção da corrente nos contadores. As correspondentes formas de onda das correntes diferenciais e de estabilização são ilustradas na Fig. 4.25.

A evolução do conteúdo harmónico relevante é ilustrada nas Figs. 4.26(a), (b) e (c). Na Fig. 4.27 ilustra-se o ponto de funcionamento, antes e depois da ocorrência do defeito, esboçado na característica operacional da proteção diferencial. Verifica-se que o ponto de funcionamento após o defeito ter ocorrido se situa na zona de ativação do relé.

A evolução temporal da relação  $I_2/I_1$  é ilustrada nas Figs. 4.26(e), (f) e (g) para as três correntes diferenciais. Verifica-se que o valor limite é ultrapassado antes da ocorrência do defeito. A principal razão para esta situação deve-se à presença de ruído nos sinais provenientes dos sensores de corrente (a remoção da componente contínua também contribui para esta situação). No entanto, após o defeito ocorrer este fenómeno deixa de ser relevante e a proteção é corretamente ativada, Fig. 4.28.

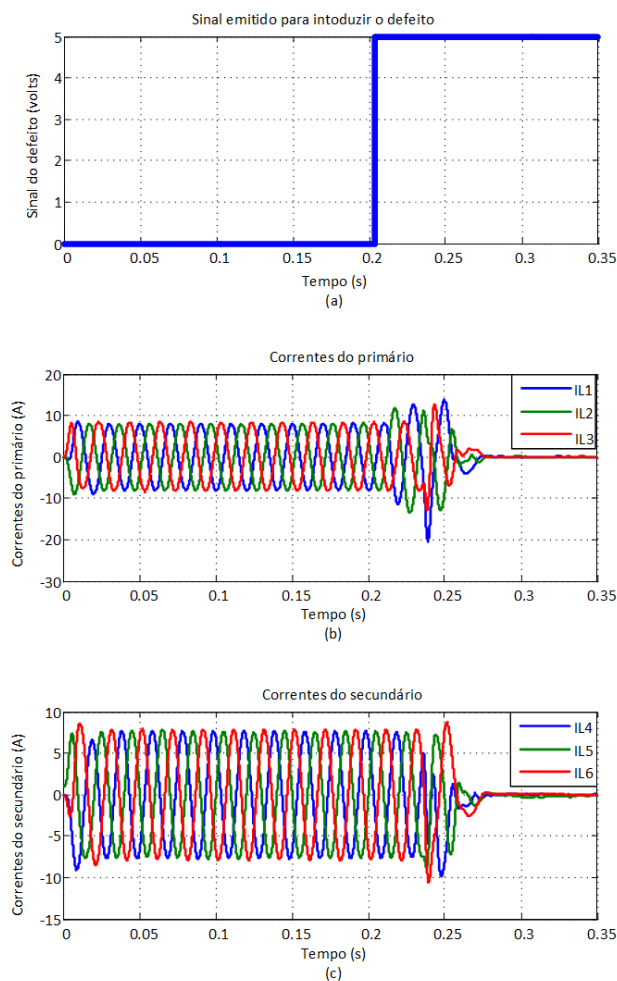


Figura 4.24 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário.

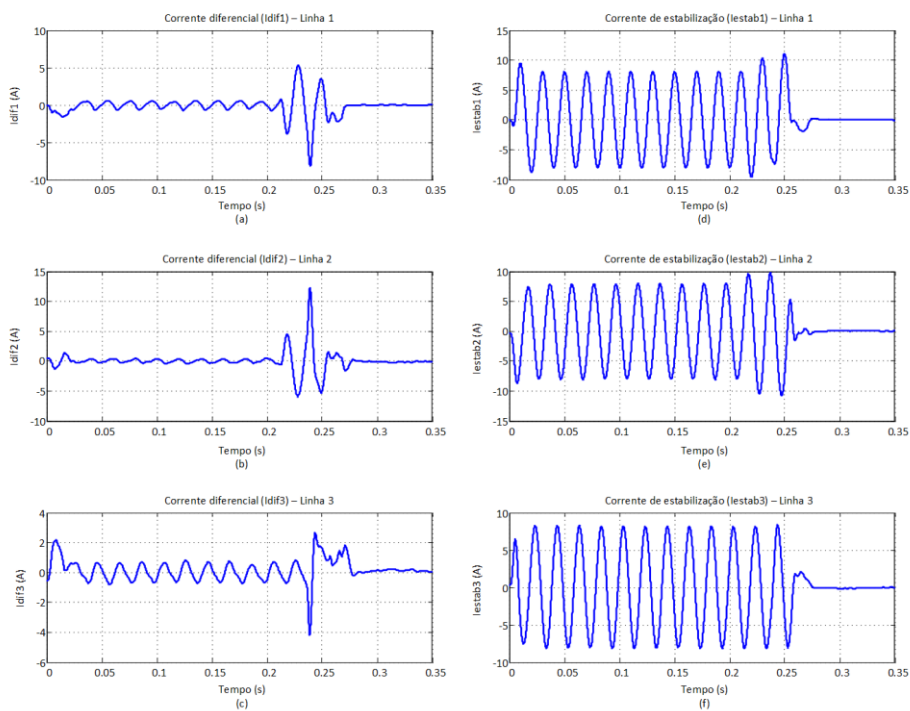


Figura 4.25 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

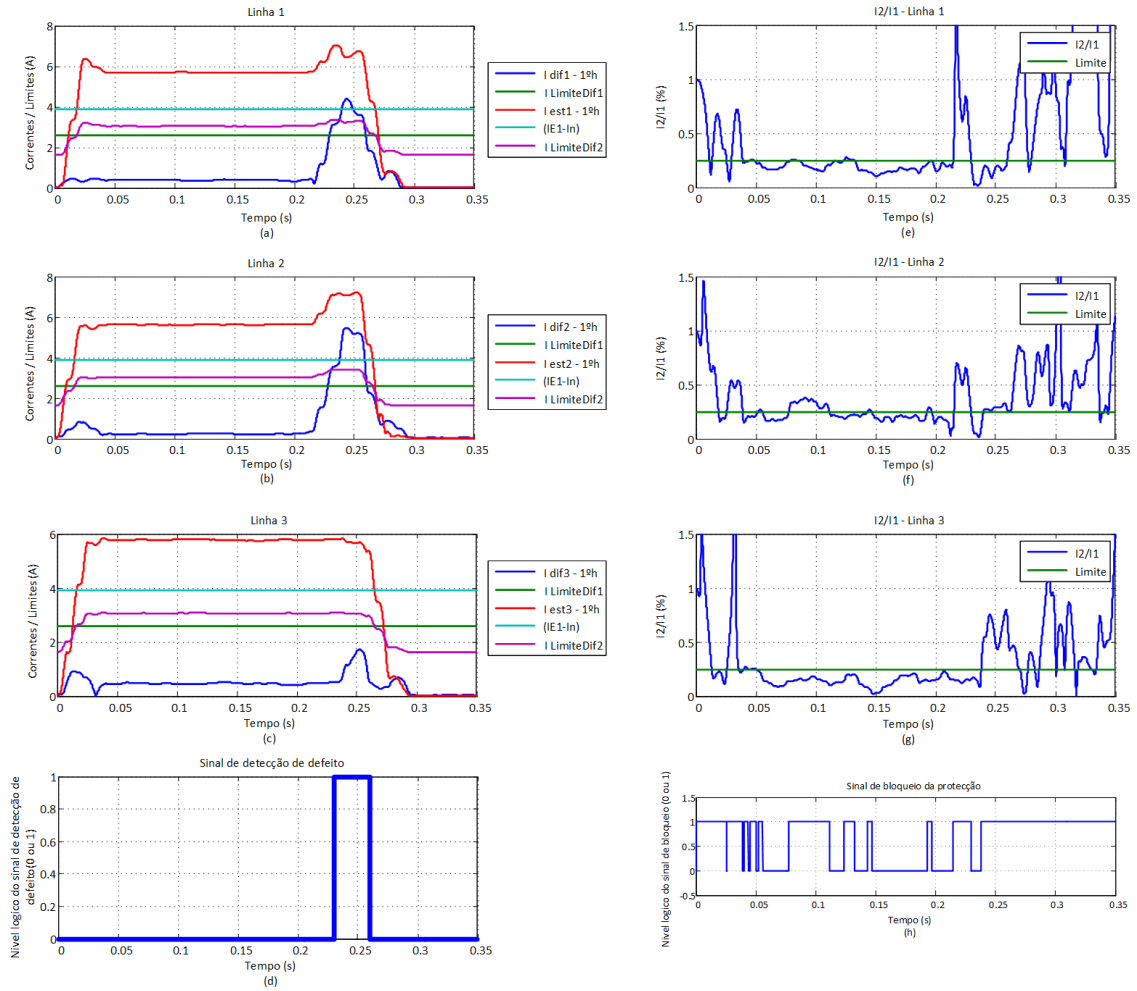


Figura 4.26 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito, (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

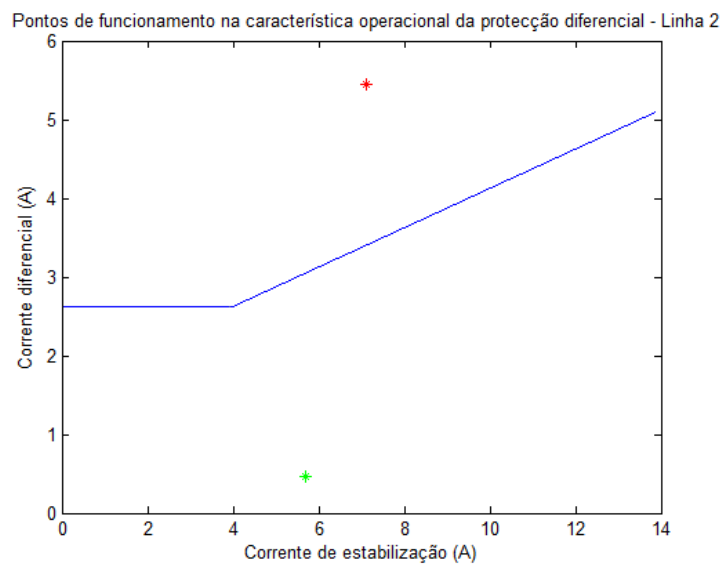


Figura 4.27 – Pontos de funcionamento na característica operacional da protecção diferencial (verde: antes do defeito, vermelho: depois do defeito) – Linha 2.

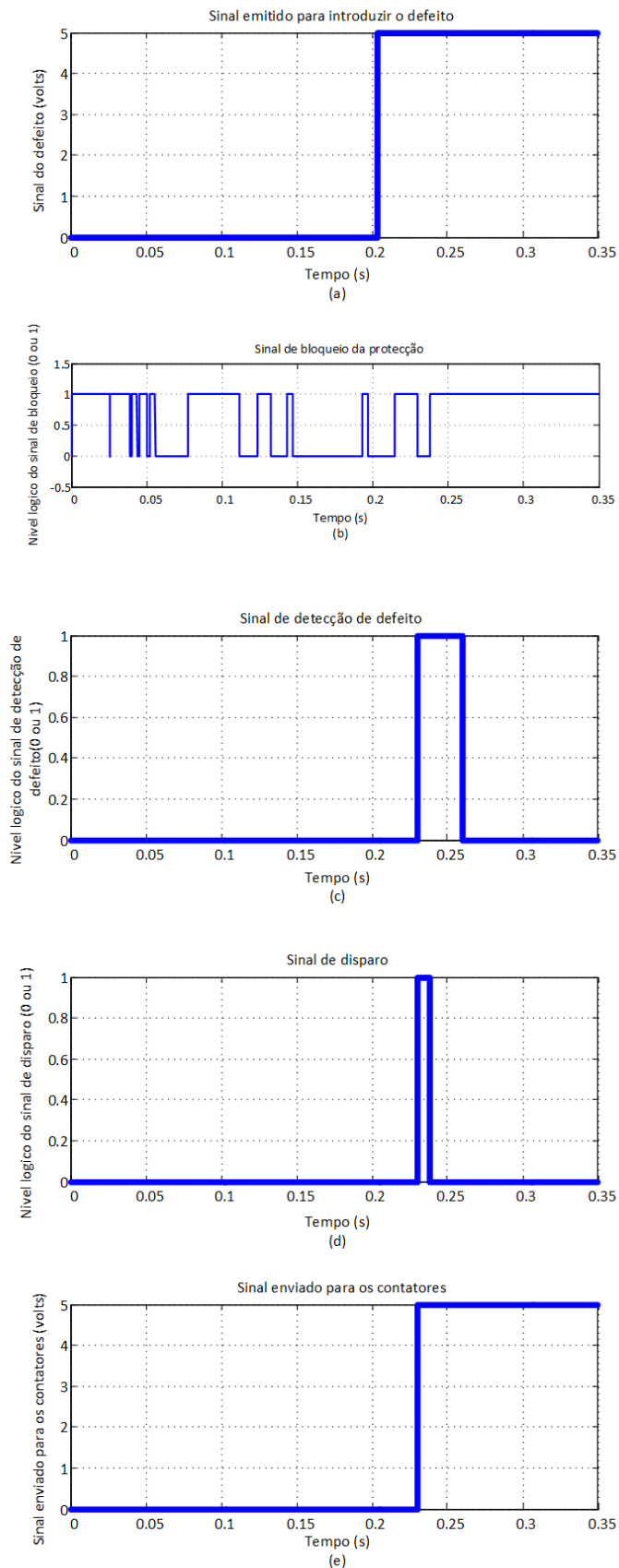


Figura 4.28 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

### 4.2.5 Ensaio 5: Introdução de defeito A-B, $R_{Falha} = 96 \Omega$

Neste ensaio é idêntico ao ensaio 4, apenas tendo sido alterada a resistência de defeito, agora de  $96 \Omega$ .

A menor corrente de defeito não permite que o relé detete a anomalia e remova o transformador de serviço. Os resultados são apresentados nas Figs. 4.29 a 4.33.

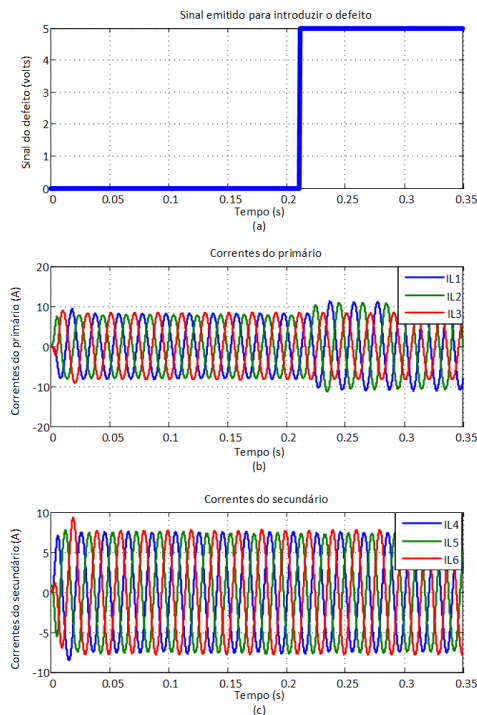


Figura 4.29 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário.

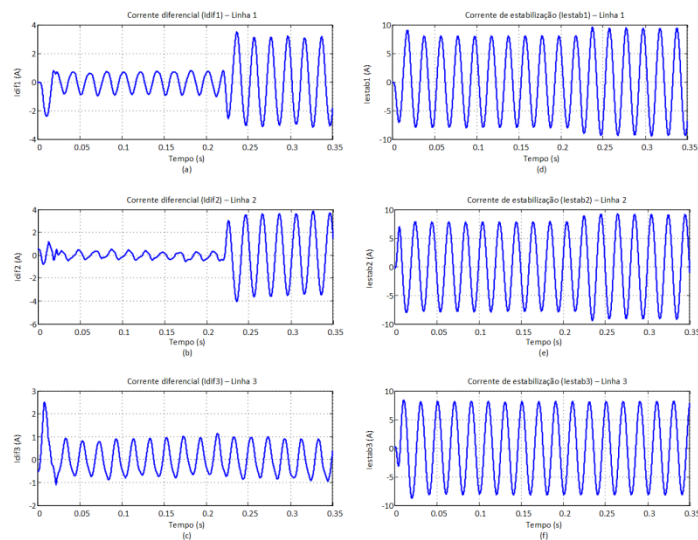


Figura 4.30 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

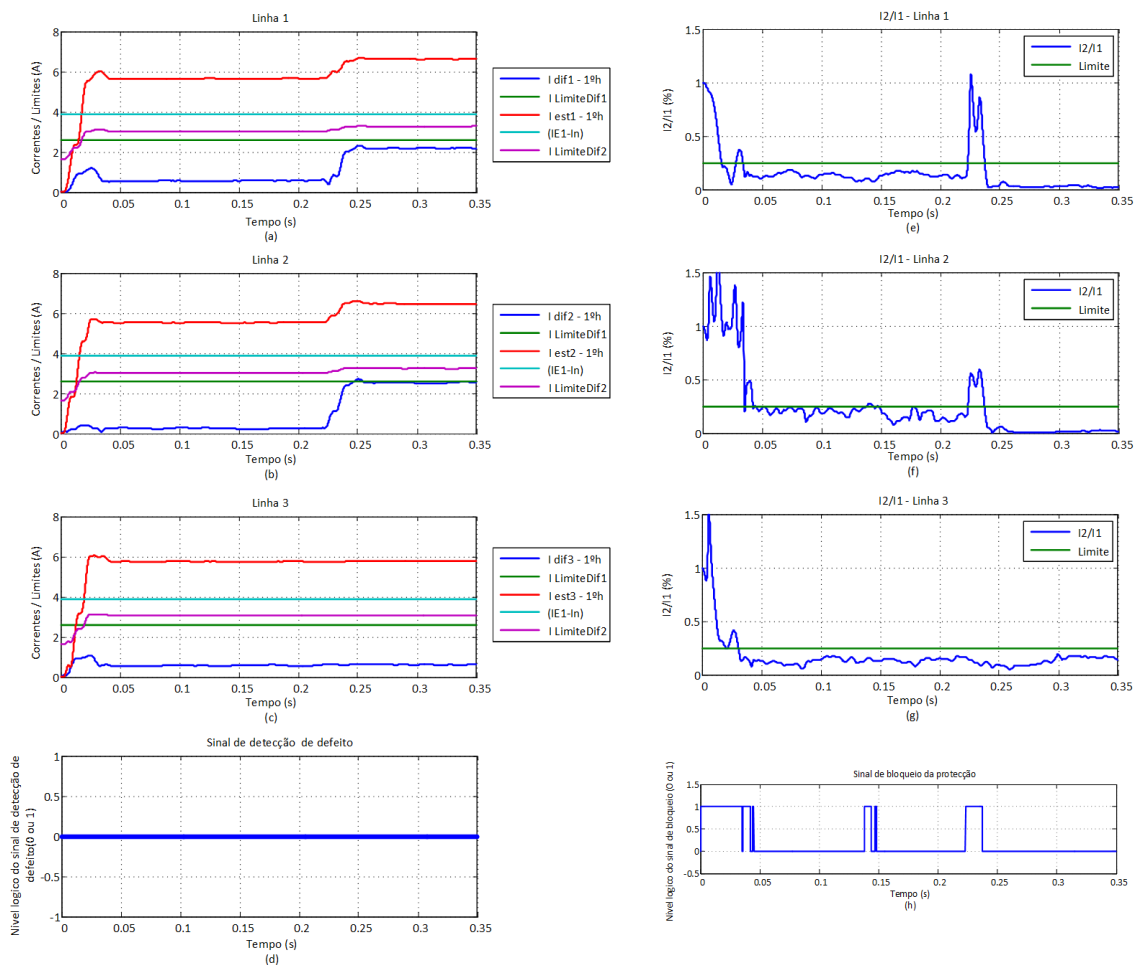


Figura 4.31 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.<sup>o</sup> harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

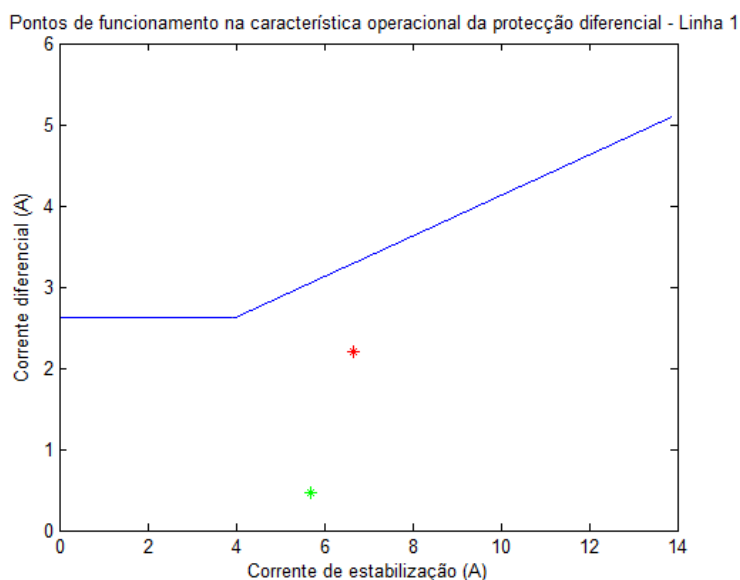


Figura 4.32 – Pontos de funcionamento na característica operacional da protecção diferencial (verde: antes do defeito, vermelho: depois do defeito) – Linha 1.

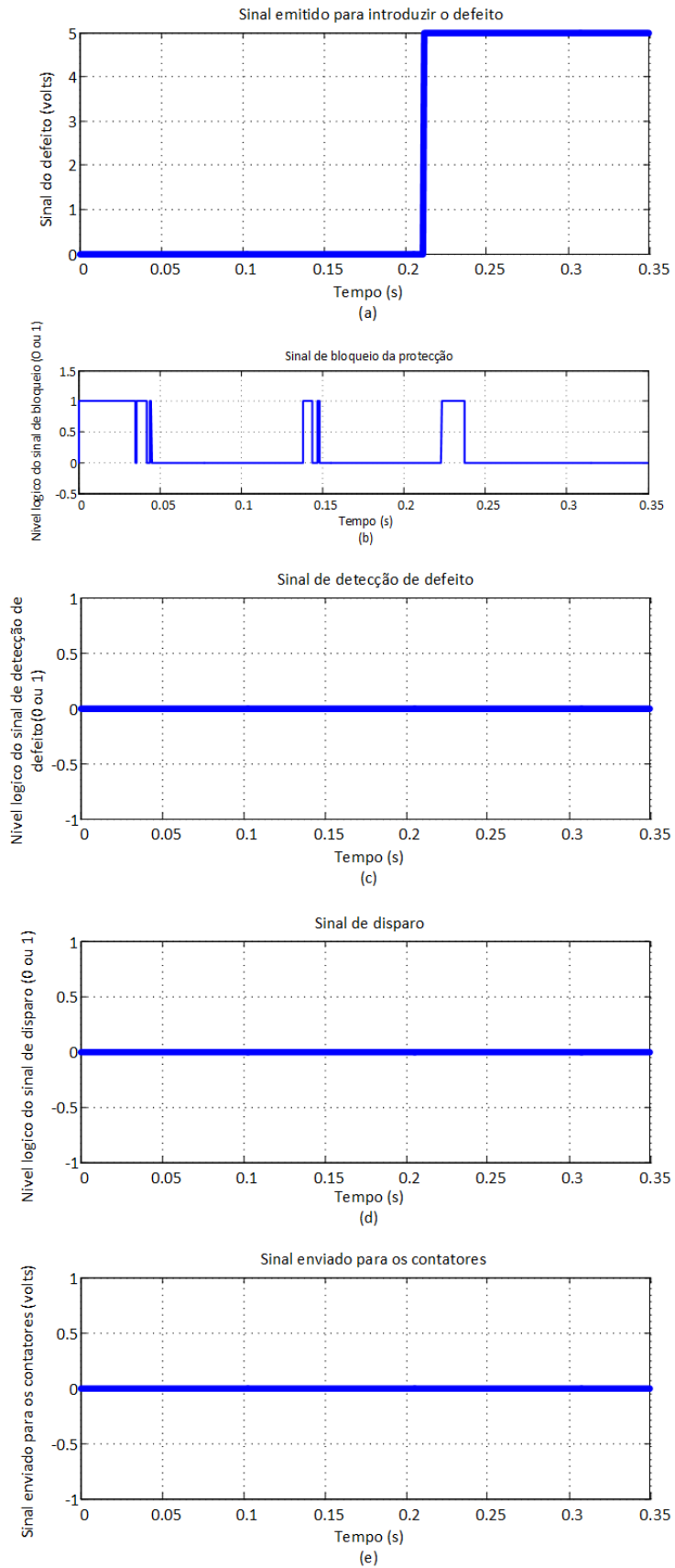


Figura 4.33 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

### 4.2.6 Ensaio 6: Ligação do transformador à rede – Sem defeito

Pretende-se com este ensaio verificar se as sobrecorrentes transitórias de excitação que ocorrem quando o transformador é ligado à rede provocam o disparo intempestivo do relé.

O ensaio é realizado nas seguintes condições:

- Transformador em vazio;
- Núcleo magnético previamente desmagnetizado: as sobrecorrentes transitórias de excitação são severamente afetadas pela indução remanescente presente no núcleo no instante em que o transformador é ligado. Esta indução remanescente depende, principalmente, das condições em que o transformador foi anteriormente desligado [6]. Para possibilitar uma comparação entre os diversos ensaios optou-se por impor inicialmente uma magnetização nula no núcleo. Esta situação é conseguida alimentando o transformador com uma tensão AC acima do valor nominal (de forma a saturar o núcleo) e diminuindo-a depois progressivamente até zero.
- Optou-se por efetuar a ligação do transformador quando o valor instantâneo da tensão de uma das fases (tensão de referencia) inicia o semiciclo positivo, Fig. 4.34(a). Neste ensaio foram utilizados contadores para efetuar a função de interruptores. Estes contadores não comutam instantaneamente, introduzindo um atraso significativo entre o sinal enviado pela aplicação *Simulink* e o verdadeiro instante em que a tensão é aplicada ao transformador. Tentou-se compensar este atraso antecipando a emissão do sinal: na Fig. 4.34(a) visualiza-se que a tensão é aplicada aos 0.06 s mas o sinal emitido pela placa foi enviado aos 0.03 s Fig. 4.34(b). A regulação do instante de aplicação da tensão é difícil de ajustar quando se utilizam contadores. Este problema pode ser ultrapassado se forem utilizados semicondutores de potência para efetuar a ligação do transformador à rede.

Na Fig. 4.34(c) apresenta-se a evolução temporal das correntes no lado primário do transformador, possuindo a forma de onda característica das sobrecorrentes transitórias de excitação.

Na Fig. 4.34(d) apresenta-se a evolução temporal das correntes no secundário do transformador. Idealmente estas deviam ser nulas, pois o transformador encontra-se em vazio. No entanto, o ruído e o erro dos sensores de corrente dão origem aos sinais apresentados na Fig. 4.34(d).

As correntes diferenciais são idênticas às correntes no lado primário, pois os sinais referentes às correntes no secundário são nulos, Figs. 4.34(e), (f) e (g).

A evolução temporal do conteúdo harmónico relevante das correntes diferenciais é apresentada nas Figs. 4.35(a), (b) e (c).

A amplitude da corrente diferencial é suficientemente elevada para ser emitido o sinal de deteção do defeito, Fig. 4.35(d). O ponto de funcionamento correspondente ao início do transitório é esboçado na característica operacional da proteção diferencial, Fig. 4.36.

Caso a proteção não fosse inibida de atuar iria ocorrer um disparo intempestivo. Os sinais relativos ao bloqueio harmónico são apresentados nas Figs. 4.35(e), (f) e (g). O sinal de bloqueio é emitido desde o início do transitório (note-se que o sinal de bloqueio já está ativo antes de efetuar a ligação do transformador, pois nessa condição as correntes são nulas e o ruído nos sinais provoca o bloqueio da proteção), Fig. 4.35(h).

Verificou-se que o sinal de disparo da proteção não é ativado, Fig. 4.37, e o transformador continua em serviço.

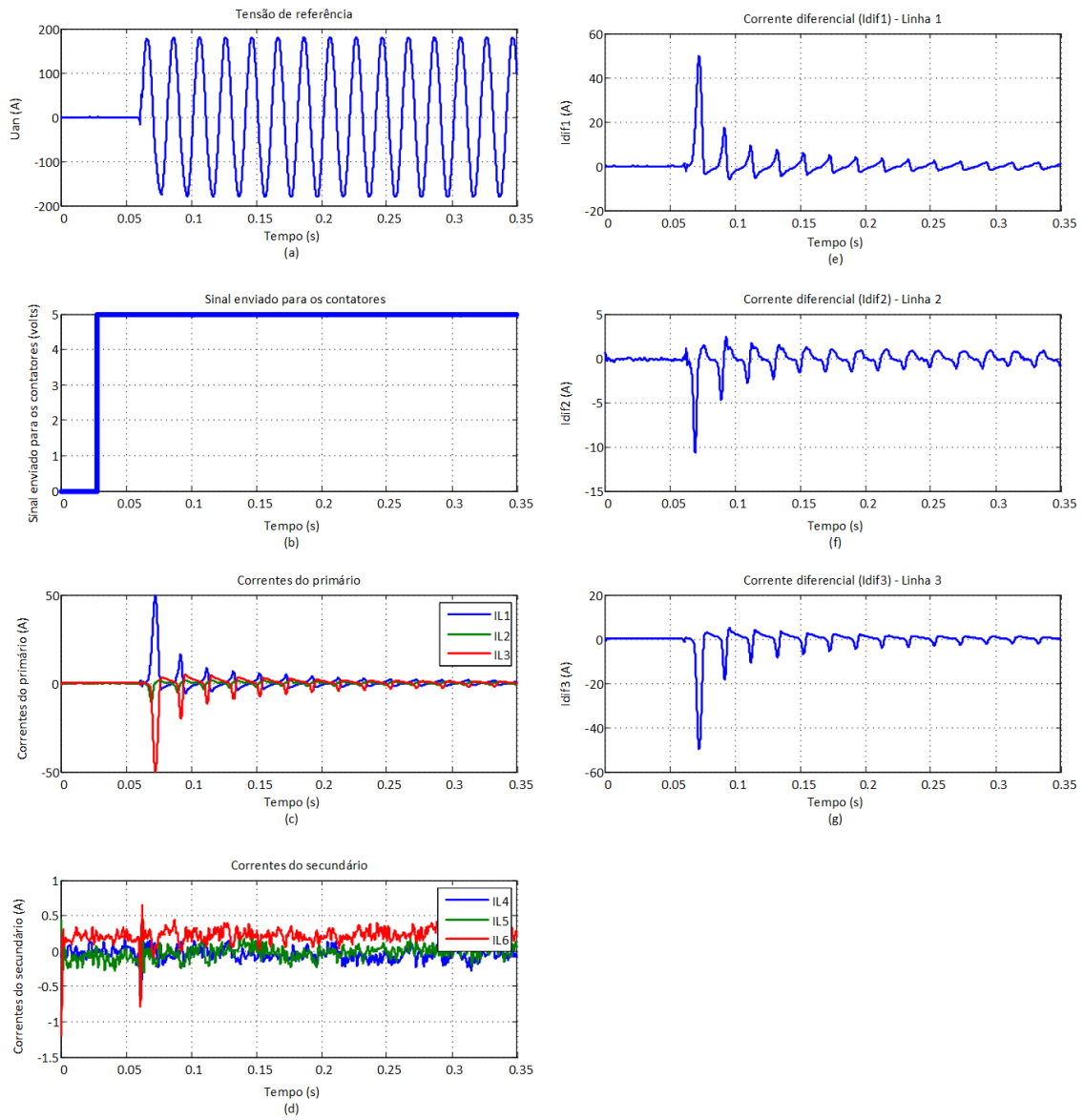


Figura 4.34 – (a): Tensão de referência; (b): Sinal enviado para os contadores; (c): Correntes no primário; (d): Correntes no secundário; (e), (f) e (g): Correntes diferenciais.

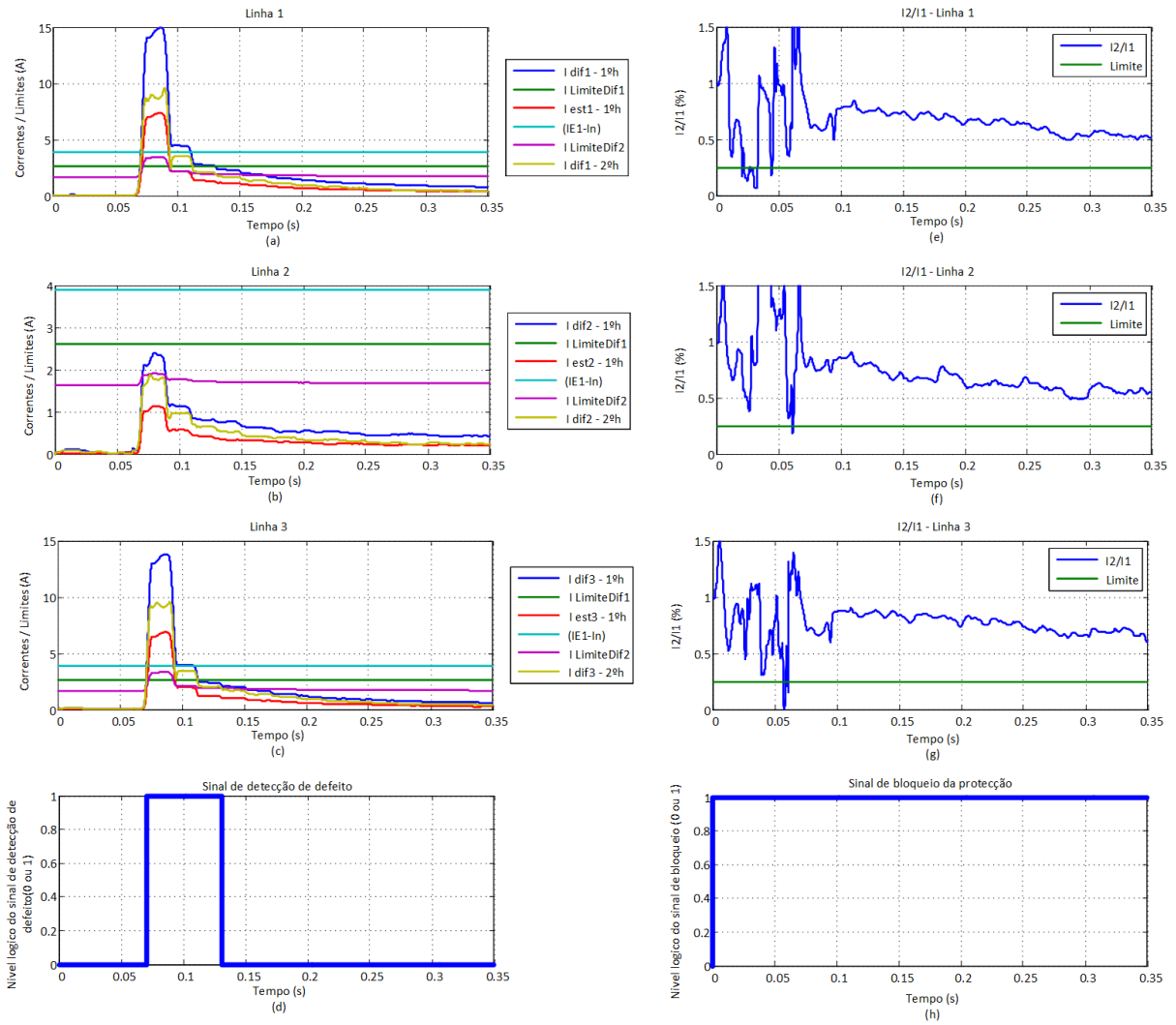


Figura 4.35 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1<sup>º</sup> e 2<sup>º</sup> harmónico das correntes diferenciais, do 1.º harmónico da corrente de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

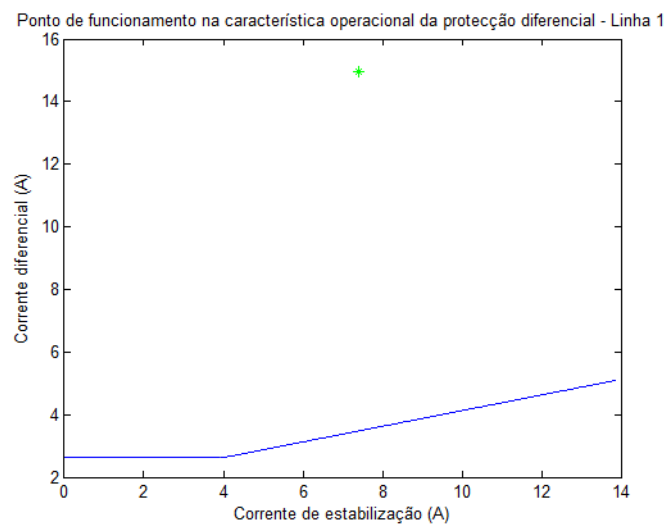


Figura 4.36 – Ponto de funcionamento do arranque na característica operacional da protecção diferencial – Linha 1.

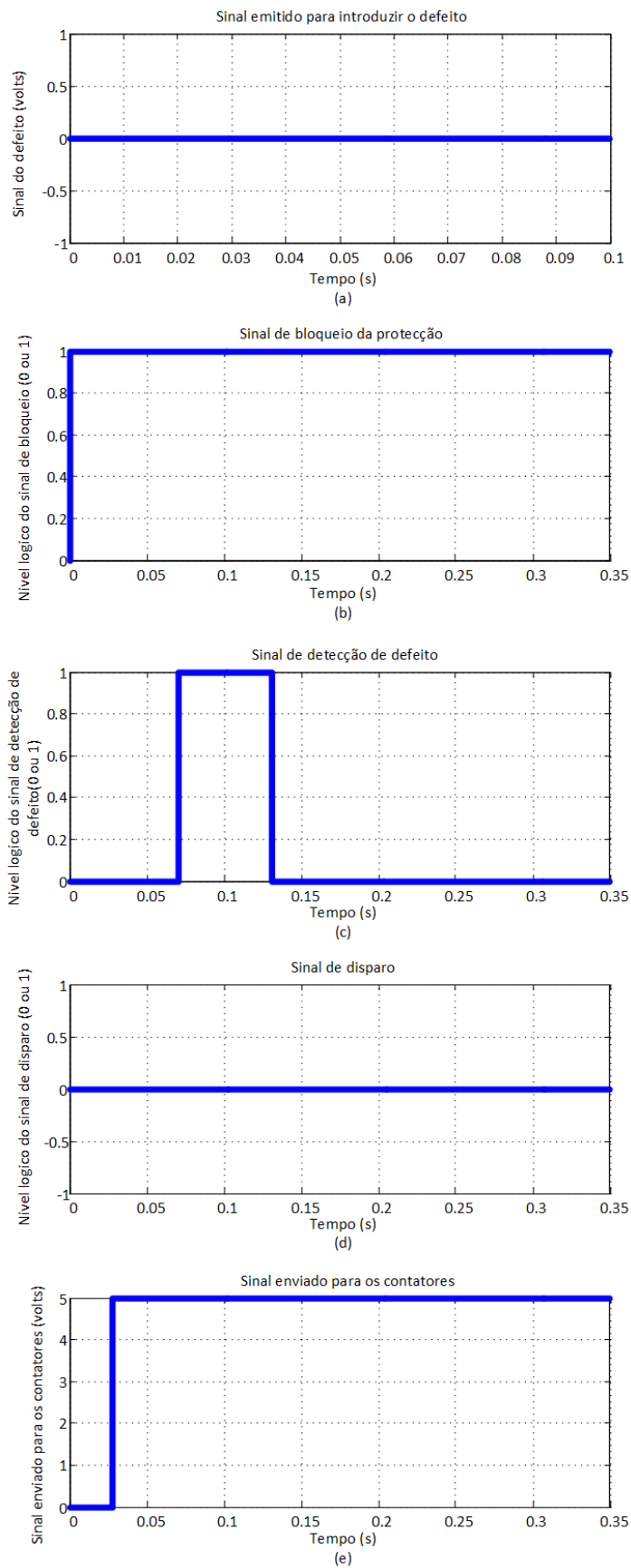


Figura 4.37 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

### 4.2.7 Ensaio 7: Ligação do transformador à rede – Com defeito A-n,

$$R_{Falha} = 24 \Omega$$

Neste ensaio procedeu-se à ligação à rede do transformador, em condições idênticas ao ensaio 6, mas com a introdução de um defeito fase-neutro na fase A do primário (condições do ensaio apresentadas na Tabela 4-2). A Fig. 4.38 ilustra a evolução temporal dos sinais relevantes.

A tensão é aplicada ao lado primário do transformador aos 52 ms, Fig. 4.38(a), apesar do sinal de comando enviado aos contadores ter sido ativado aos 30 ms, Fig. 4.38(b) (devido ao atraso na comutação).

O defeito ocorre aos 220 ms, alguns milissegundos depois de ter sido emitido o respetivo sinal de comando, Fig. 4.38(c).

Até à ocorrência do defeito as sobrecorrentes de ligação têm um comportamento idêntico às do ensaio 6, Figs. 4.38(d) e (e). Após a ocorrência do defeito a corrente na fase afetada possui um comportamento praticamente sinusoidal, Fig. 4.38(d).

O conteúdo harmónico das correntes diferenciais é apresentado nas Figs. 4.39(a), (b) e (c). O sinal de deteção de defeito é ativado imediatamente após a ligação do transformador (o que poderia originar um disparo intempestivo, caso o bloqueio harmónico não funcionasse) e, posteriormente, quando o defeito ocorre (ativação correta neste caso), Fig. 3.39(d).

Os pontos de funcionamento dessas duas condições são representados na característica operacional da proteção da Fig. 4.40.

As Figs. 4.39(e), (f) e (g) apresentam os sinais referentes ao bloqueio harmónico. O conteúdo harmónico das sobrecorrentes transitórias de excitação provoca a inibição do relé, Fig. 4.39(h), apesar do defeito estar já presente. O sinal de disparo só é emitido quando a razão  $I_2/I_1$  toma valores inferiores ao valor pré-definido, após as sobrecorrentes transitórias de excitação se terem atenuado. Neste caso o disparo só é ativado aos 370 ms apesar do defeito ter ocorrido cerca dos 220 ms, Fig. 4.41.

Após o disparo da proteção é enviado um sinal para abrir os contadores do circuito de potência, Fig. 4.41(e), e remover a alimentação do transformador.

Em transformadores de maior potência o amortecimento das correntes de ligação pode demorar vários minutos, colocando-se assim em causa a integridade física do equipamento no caso de ocorrer uma avaria durante este transitório. Esta constitui uma das maiores limitações da proteção diferencial. A ferramenta desenvolvida pode ser utilizada para mais facilmente testar novos algoritmos de proteção que permitam solucionar estes problemas.

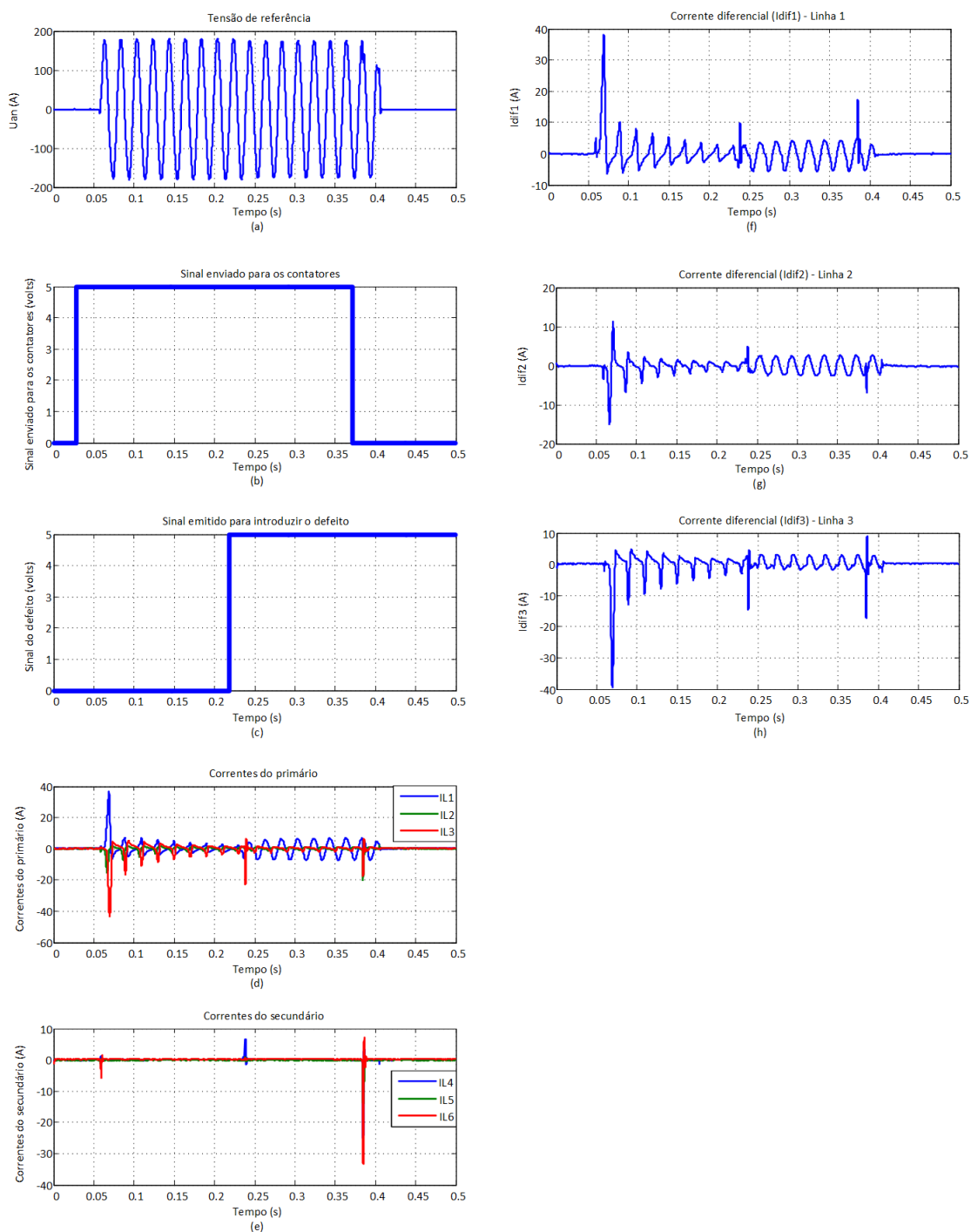


Figura 4.38 – (a): Tensão de referência; (b): Sinal enviado para os contadores; (c): Sinal emitido para introduzir o defeito; (d): Correntes no primário; (e): Correntes no secundário; (f), (g) e (h): Correntes diferenciais.

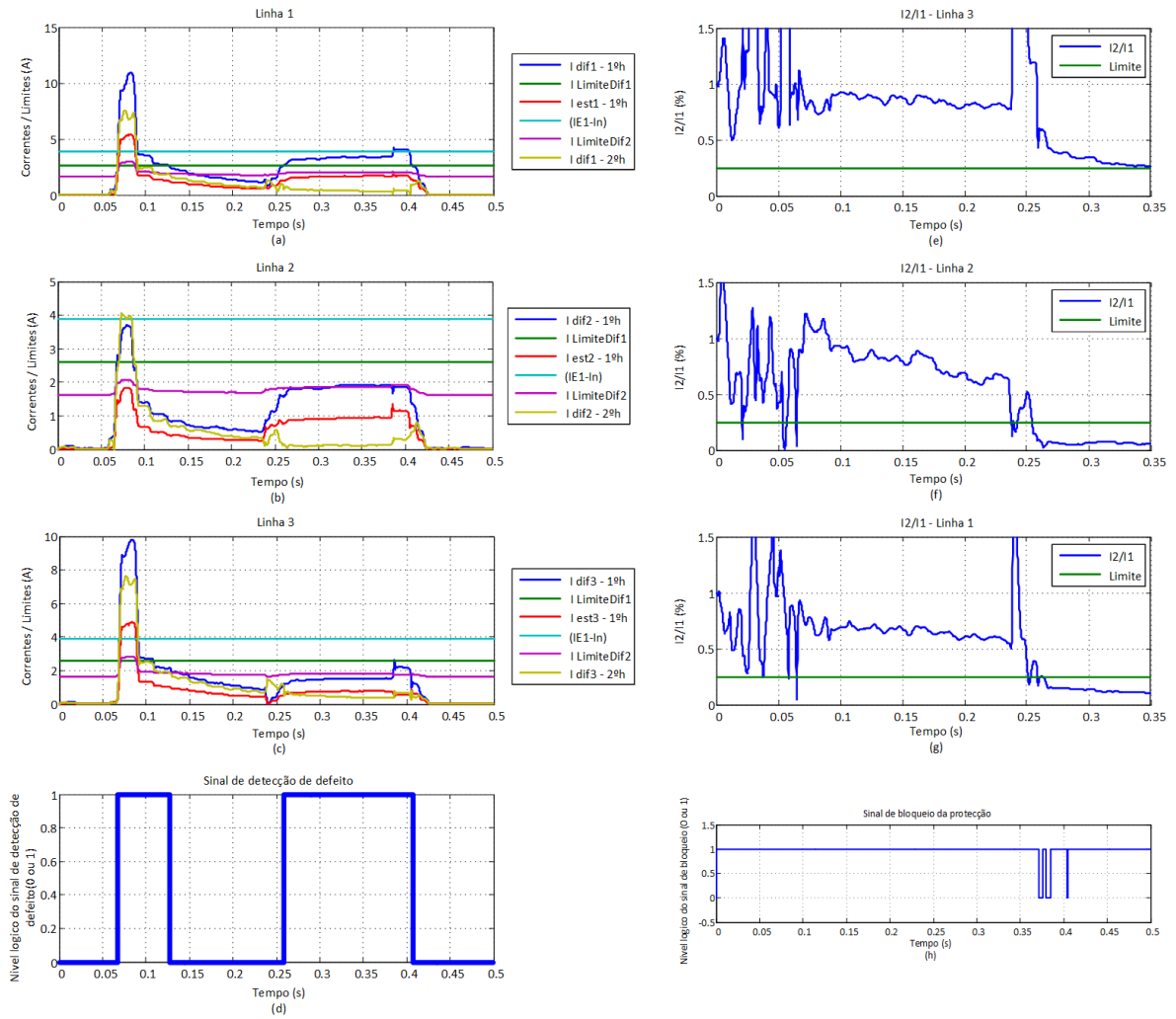


Figura 4.39 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1º e 2º harmónico das correntes diferenciais, do 1.º harmónico da corrente de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

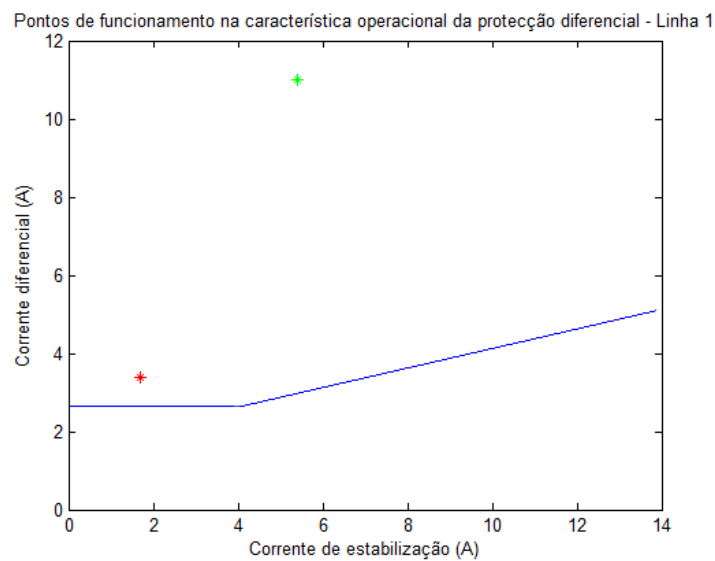


Figura 4.40 – Pontos de funcionamento na característica operacional da protecção diferencial (verde: arranque, vermelho: defeito) - Linha 1.

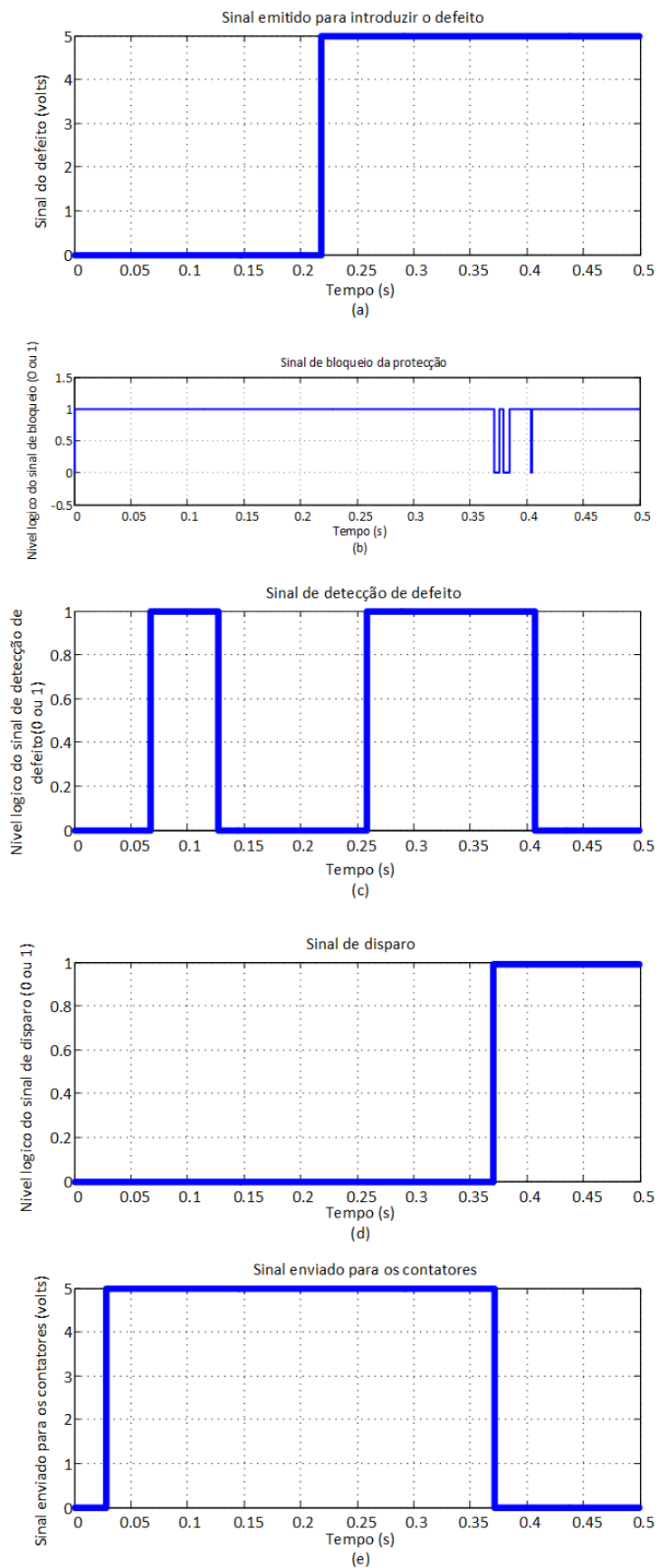


Figura 4.41 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

**4.2.8 Ensaio 8: Ligação do transformador à rede –Com defeito A-B,**

$$R_{Falha} = 64 \Omega$$

Neste ensaio foi introduzido um defeito interno A-B no lado primário durante o transitório da ligação à rede do transformador. A falha ocorre cerca dos 210 ms, Fig. 4.42(c). O sinal de detecção de defeito é ativado pelas correntes diferenciais das linhas 1 e 2, Figs. 4.43(a) a 4.43(d) e Fig. 4.44. No entanto, a razão  $I_2/I_1$  da corrente diferencial na linha 3 inibe a atuação até cerca dos 950 ms, Figs. 4.43 (e) a 4.43 (h) e Fig. 4.45.

Este resultado confirma as debilidades que a proteção diferencial convencional e o bloqueio harmónico apresentam, conforme já descrito no ensaio anterior.

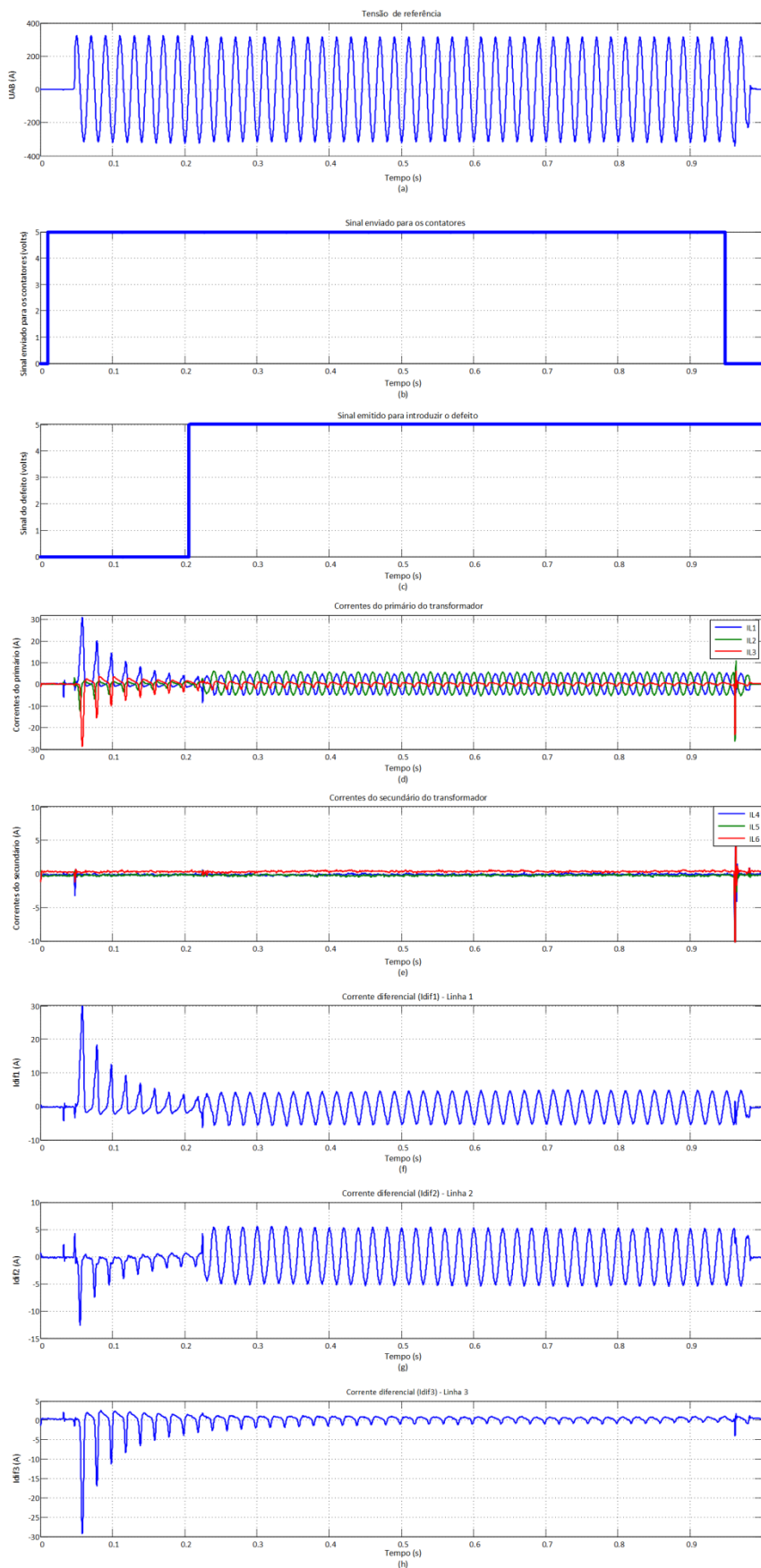


Figura 4.42 – (a): Tensão de referência; (b): Sinal enviado para os contadores; (c): Sinal emitido para introduzir o defeito; (d): Correntes no primário; (e): Correntes no secundário; (f), (g) e (h): Correntes diferenciais.

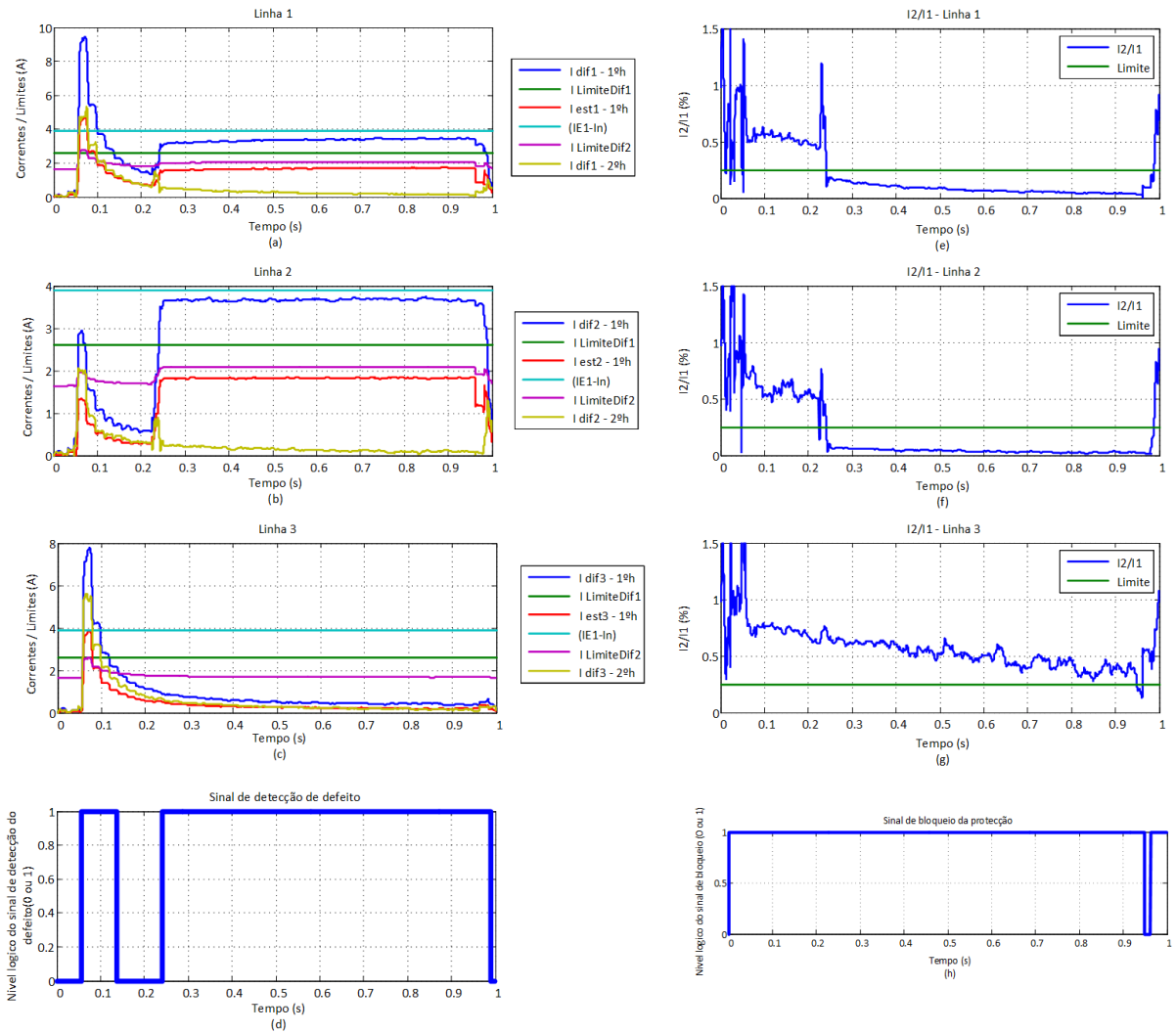


Figura 4.43 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1º e 2º harmónico das correntes diferenciais, do 1.º harmónico da corrente de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

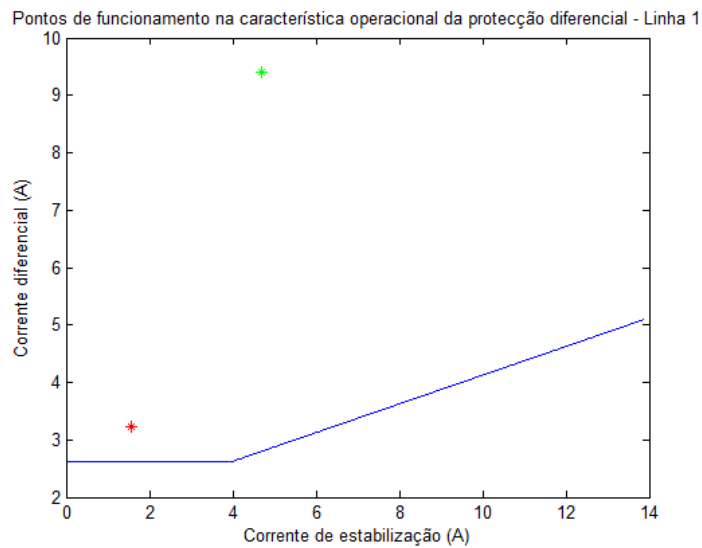


Figura 4.44 – Pontos de funcionamento na característica operacional da protecção diferencial (verde: arranque, vermelho: defeito) – Linha 1.

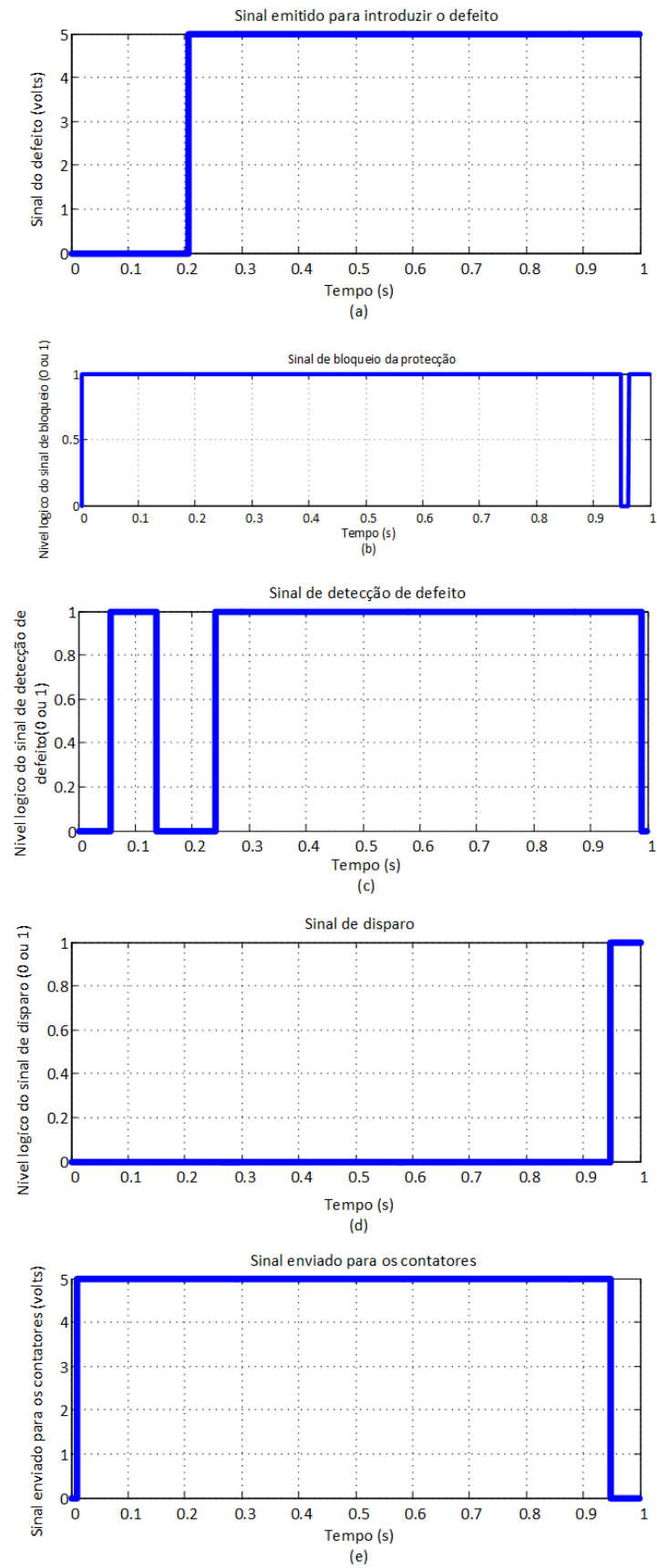


Figura 4.45 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

### 4.2.9 Ensaio 9: Introdução de defeito externo u-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$

Neste ensaio foi introduzido um defeito externo à zona de proteção diferencial (zona delimitada pelos TI). O relé diferencial não deve atuar nestes casos, devendo a proteção contra estes defeitos ser assegurada por outros dispositivos mais próximos da avaria, por forma a manter a seletividade do sistema de proteção. O defeito externo ocorre entre a linha  $u$  e o neutro no lado secundário do transformador, sendo introduzido cerca dos 220 ms, Fig. 4.46(a).

O relé diferencial atua corretamente não sendo ativado o sinal para comutar os contadores, Fig. 4.46(d).

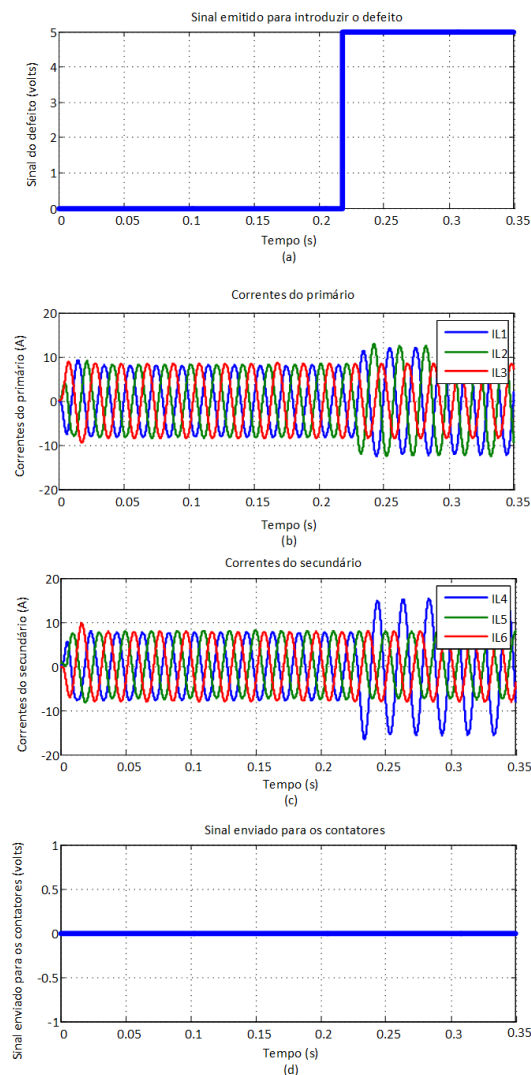


Figura 4.46 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Sinal enviado para os contadores.

## 4.2.10 Influência do filtro e dos transformadores de corrente nos ensaios

Antes de realizar os ensaios é conveniente testar os sinais adquiridos para verificar se o sistema de medida (TI e sensores de corrente) e o processo de filtragem provocam erros significativos (não intencionais).

Na Fig. 4.47(a) é apresentado o sinal da corrente de linha  $I_{L1}$ , obtida através dos TI e utilizando o filtro digital do *Simulink*.

Na Fig. 4.47(b) apresenta-se o mesmo sinal sem aplicação do filtro digital. Na Fig. 4.47(c) apresenta-se o sinal medido diretamente nas linhas de alimentação, sem recurso aos TI.

Nestes casos verifica-se que o filtro remove o ruído de alta frequência e os TI não provocam erros significativos.

A realização desta verificação é importante para garantir que os ensaios são efetuados nas condições desejadas.

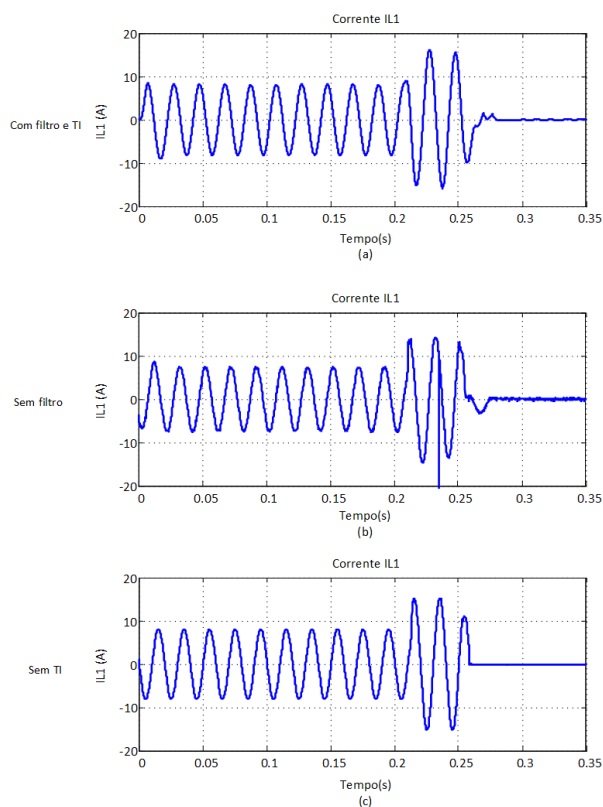


Figura 4.47 – (a): Corrente IL1 (obtida usando o filtro e os TI); (b): Corrente IL1 (obtida sem utilizar o filtro); (c): Corrente IL1 (obtida sem utilizar os TI).

## 5. Conclusões

---

O trabalho apresentado nesta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de um relé diferencial numérico que possibilite o desenvolvimento de novas técnicas de detecção de avarias e permita ensaiar de forma rápida e flexível as diferentes especificidades dos algoritmos de proteção.

O relé diferencial numérico foi desenvolvido em ambiente *Simulink*, sendo implementado o algoritmo de proteção convencional (proteção diferencial proporcional). A sua implementação foi efetuada de forma a possibilitar que futuros utilizadores desenvolvam novos algoritmos de proteção de forma simples e rápida.

A aplicação do relé diferencial numérico desenvolvido é constituída principalmente por nove partes:

- 1<sup>a</sup>. Aquisição dos sinais das correntes provenientes dos TI e das tensões provenientes do amplificador de isolamento, para tal é utilizada a placa PCI-6070E da *National Instruments*;
- 2<sup>a</sup>. Filtragem dos sinais adquiridos, de forma a remover algum do ruído de alta frequência que possa existir;
- 3<sup>a</sup>. Remoção da componente DC que possa existir nas correntes, introduzida pelos sensores de corrente;
- 4<sup>a</sup>. Remoção da componente homopolar das correntes, de forma a evitar disparos intempestivos provocados por defeitos externos;
- 5<sup>a</sup>. Cálculo das correntes diferenciais e de estabilização: as correntes diferenciais representam a diferença entre as correntes do primário e do secundário, referenciadas a uma base comum e efetuando a compensação desfasamento provocado pelo índice horário do transformador. As correntes de estabilização representam a média das correntes do primário e do secundário;
- 6<sup>a</sup>. Análise de *Fourier* das correntes diferenciais e de estabilização, de forma a calcular os harmónicos das 3 correntes diferenciais (1.º e 2.º harmónicos) e das 3 correntes de estabilização (1.º harmónico), utilizados no processo da proteção diferencial percentual;

- 7<sup>a</sup>. Aplicação do algoritmo da proteção diferencial proporcional, de forma a obter os sinais de deteção de defeito e de bloqueio da proteção, utilizados no controlo do sistema;
- 8<sup>a</sup>. Definição das condições para que seja enviado um sinal para o relé eletromecânico do protótipo laboratorial de forma a simular a introdução de um defeito no sistema;
- 9<sup>a</sup>. Articulação do sinal de deteção de defeito e de bloqueio de forma a obter o sinal de disparo da proteção. O sinal de disparo é depois utilizado para abrir os contactores das linhas de alimentação do transformador no caso de defeitos no interior da sua zona de proteção. São ainda definidas as condições para que seja enviado um sinal de forma a controlar o instante de fecho dos contactores nos ensaios onde se pretende analisar o fenómeno transitório de ligação à rede.

A implementação de novos algoritmos de proteção requer que se façam alterações à aplicação *Simulink* desenvolvida. Para o efeito é necessário substituir o subsistema “Proteção diferencial”, pelo novo algoritmo de proteção a ensaiar. Pode ainda ser necessário realizar algumas alterações no subsistema “Comando”, responsável pela obtenção do sinal enviado para os contactores.

Foi ainda desenvolvida uma aplicação *Simulink* que permite verificar se as correntes do transformador do primário e do secundário estão a ser obtidas corretamente (aplicação “Teste”). A utilização desta aplicação permite detetar mais facilmente erros de ligação. Esta aplicação permite ainda caracterizar a resposta dos sensores de corrente e calcular as componentes DC introduzidas nos respetivos sinais.

De forma a facilitar o controlo e visualização dos resultados obtidos das simulações do modelo *Simulink*, utilizou-se uma interface gráfica. Esta possibilita a análise gráfica dos resultados em várias janelas. Permite ainda que o utilizador execute tarefas interativas com a aplicação *Simulink*, (como iniciar e parar a execução, introduzir dados, etc). A interface gráfica evita que o utilizador tenha de conhecer os detalhes internos do código *Simulink/Matlab*, podendo executar tarefas de forma relativamente amigável.

Para controlar o instante da ocorrência da avaria e a abertura/fecho dos contactores, foram desenvolvidos e implementados dois protótipos laboratoriais.

Com vista a comprovar o correto funcionamento do sistema de teste e aquisição de dados, e da interface gráfica que o controla, foi realizado um vasto número de ensaios, onde foram testadas as diversas condições de funcionamento do transformador.

Os resultados obtidos encontram-se dentro do esperado, comprovando o correto funcionamento tanto do sistema de teste e aquisição de dados (relé diferencial numérico) como da interface gráfica.



## Referências

---

- [1] C. Cabral: “Sebenta Maquinas Eléctricas I”, 2013, DEE-ISE, UALG.
- [2] L. Oliveira: “Apontamentos das aulas de Comando e Protecção de Redes Eléctricas”, 2014, DEE-ISE, UALG.
- [3] S. H. Horowitz, A. G. Phadke: "*Power system relaying*", John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [4] ALSTOM, Network Protection and Application Guide, 2011 Edition.
- [5] L. Oliveira: “Desenvolvimento de Métodos de Detecção de Avarias e Algoritmos de Protecção para Aplicação em Sistemas de Monitorização Contínua de Transformadores Trifásicos”, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 2013.
- [6] B. Grčar, D. Dolinar: "Integrated digital power transformer protection", *IEE Proc. Generation, Transmission & Distribution*, vol. 141, No. 4, pp. 323- 328, July 1994.
- [7] M. A. Rahman, B. So, M. R. Zaman, M. A. Hoque: "Testing of algorithms for a stand-alone digital relay for power transformers", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, No. 2, pp. 374-385, Abril 1998.
- [8] L. Oliveira, A. Cardoso, "Leakage Inductances Calculation for Power Transformers Interturn Fault Studies," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.30, no.3, pp.1213,1220, June 2015
- [9] P. M. Anderson, Power System Protection. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998.
- [10] G. Ziegler: “Numerical Differential Protection”, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München, 2005.
- [11] A. Guzmán, S. Zocholl, G. Benmouyal, H. J. Altuve: "A current-based solution for transformer differential protection - Part I: problem statement", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, No. 4, pp. 485-491, October 2001.
- [12] J. S. Thorp, A. G. Phadke: "A microprocessor based three-phase transformer differential relay", *IEEE Trans. Power Apparatus Systems*, vol. PAS-101, No. 2, pp. 426–432, Feb. 1982.

- [13] R. Patterson, W. McCannon and G. Kobet.: 'A consideration of inrush restraint methods in transformer differential relays', Proc. 54th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conf., Atlanta, Georgia, USA, May 2000.
- [14] G.D. Rockefeller: "Fault protection with a digital computer", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 88, No. 4, pp. 438-464, April 1969.
- [15] Z. Gajić, I. Brnčić, B. Hillström, I. Ivankovic: "Sensitive turn-to-turn fault protection for power transformers", CIGRÉ Study Committee B5 Colloquium, Calgary, Canada, September 2005.
- [16] T. S. Sidhu, H. S. Gill, M. S. Sachdev: "A power transformer protection technique with stability during current transformer saturation and ratio-mismatch conditions", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, No. 3, pp. 798-804, July 1999.
- [17] G. Díaz, P. Arboleya, J. Gómez-Aleixandre, N. Abajo: "An algorithm using a shape-based approach in Park's plane for transformer differential relaying on the basis of time-dependent symmetrical components", Electric Power Systems Research, vol. 73, No. 3, pp. 295-303, March 2005.
- [18] L. Oliveira, A. Cardoso: "Application of Park's power components to the differential protection of three-phase transformers", Electric Power Systems Research, vol. 83, No. 1, pp. 203- 211, February, 2012.
- [19] L. Oliveira, A. Cardoso: "Extended Park's Vector Approach-based differential protection of three-phase power transformers", IET Electric Power Applications, vol. 6, No. 8, pp. 463-472, September 2012.
- [20] H. Monsef, S. Lotfifard: "Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformers", Electric Power Systems Research, vol. 77, No. 12, pp. 1637-1645, October 2007.
- [21] F. Zhalefar, M. Sanaye-Pasand: "A new fuzzy-logic-based extended blocking scheme for differential protection of power transformers", Electric Power Components and Systems, vol. 38, No. 6, pp. 675–694, 2010.
- [22] M. Tripathy, R. P. Maheshwari, H. K. Verma: "Power transformer differential protection based on optimal probabilistic neural network" IEEE Trans. Power Delivery, vol. 25, No. 1, pp. 102-112, January 2010
- [23] MathWorks: "Real- Time Windows Target", User's Guide, Version 2, disponível em: "<http://www.etf.unssa.rs.ba/~slubura/medode%20modeliranja%20i%20simulacije/rtwt.pdf>", acedido em Julho 2015.

- [24] National Instruments: “Ground Loops and Returns”, disponível em: [”http://www.ni.com/white-paper/3394/en/”](http://www.ni.com/white-paper/3394/en/), acessado em Julho 2015.
- [25] MathWorks: “Matlab GUI”, disponível em: <http://www.mathworks.com/discover/matlab-gui.html> acessado em Julho 2015.
- [26] MathWorks: “Simple tab panel by Panagiotis Moulos”, disponível em: [”http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15193-simple-tab-panel”](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15193-simple-tab-panel), acessado em Julho 2015.
- [27] National Instruments: “ Full-Featured E Series Multifunction DAQ 12 or 16-Bit, up to 1.25 MS/s, up to 64 Analog Inputs”, disponível em: [”http://www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc199-201\\_ETC\\_212-213.pdf”](http://www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc199-201_ETC_212-213.pdf), acessado em Julho 2015.



# Anexo I – Configuração da *RTWT*

---

É necessário utilizar o *Matlab 32 bits*, pois a versão de *64 bits* não contém a biblioteca da *Real- Time Windows Target*<sup>2</sup>.

Podem ser encontrados mais detalhes das configuração da *RTWT* em [23].

## 1) Configuração do modo de simulação

Escolhe-se o modo “*External*” da barra do menu do *Simulink*, Fig. AI.1



Figura AI.1 - Escolha do modo de simulação.

## 2) Configuração do painel *Solver*

Acede-se ao painel das configurações e seleciona-se em *Simulation* → *Configuration Parameters*.

Na aba *Solver*, define-se o tempo inicial e final de simulação: utilizou-se *Start time= 0* e *Stop time= infinito (inf)*; Neste caso a simulação é realizada até que seja pressionado o botão *Stop*.

Na lista *Type* do *Solve Options* escolhe-se a opção *fixed-step*. Neste trabalho foi utilizado um *fixed-step* de 0.0001 segundos, que corresponde a uma frequência de aquisição de 10 kHz, ou seja uma taxa de amostragem de 10000 amostras/segundo.

---

<sup>2</sup> Pode ser necessário instalar o *kernel* da *RTWT*, que tem como função estabelecer a comunicação entre o *hardware* e o código. Para o efeito digita-se ” *rtwintgt -install*” na linha de comandos do *Matlab*.

O painel *solver* terá uma configuração semelhante ao da Fig. AI.2.

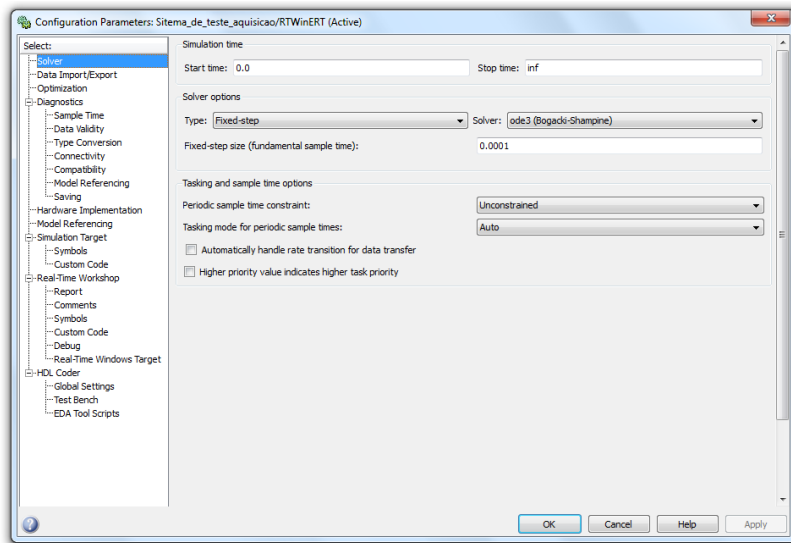


Figura AI.2 - Configuração do painel *Solver*.

### 3) Configuração do painel *Hardware*

Seleciona-se a aba *Hardware Implementation*. Na lista de *Device type* escolhe - se *32-bit x86 compatible*.

O painel *Hardware Implementation* terá uma configuração semelhante ao da Fig. AI.3.

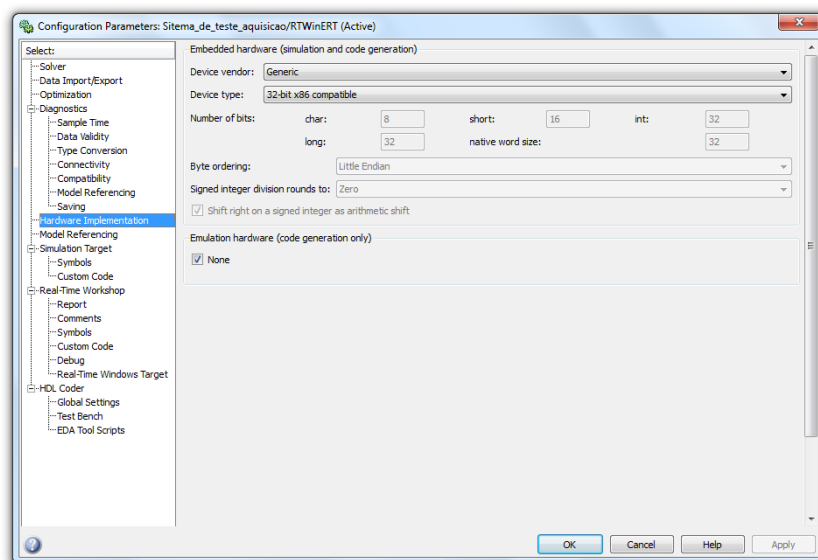


Figura AI.3 - Configuração do painel *Hardware*.

#### 4) Configuração do painel *Real-time Workshop*

Ainda no painel das configurações seleciona-se a aba *Real-Time Workshop* e escolhe-se a opção *rtwin.tlc* no *System target file*. O sistema *rtwin.tlc* permite realizar simulações em tempo real.

O painel *Real-Time Workshop* terá uma configuração semelhante ao da Fig. AI.4.

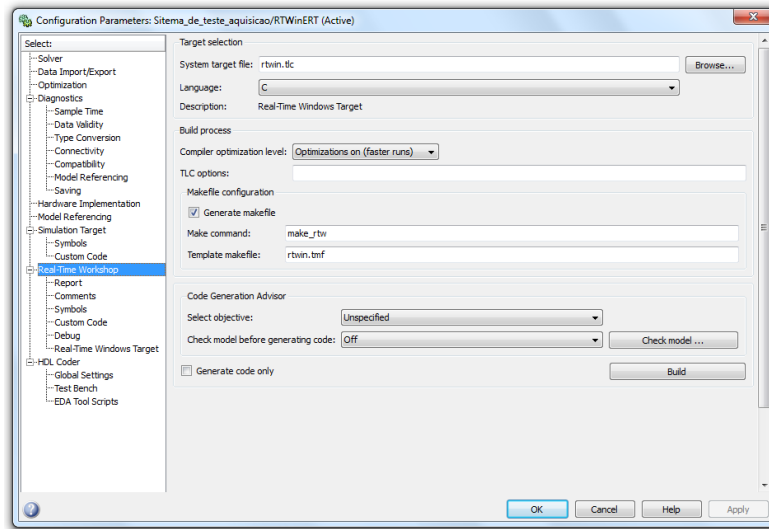


Figura AI.4 - Configuração do painel *Real-Time Workshop*.

#### 5) Configuração do painel *Real-Time Windows Target*

Na aba *Real-Time Windows Target* deve-se confirmar se a caixa de verificação *External mode* está selecionada. Caso não esteja deve ser ativada.

O painel *Real-Time Windows Target* terá uma configuração semelhante ao da Fig. AI.5.

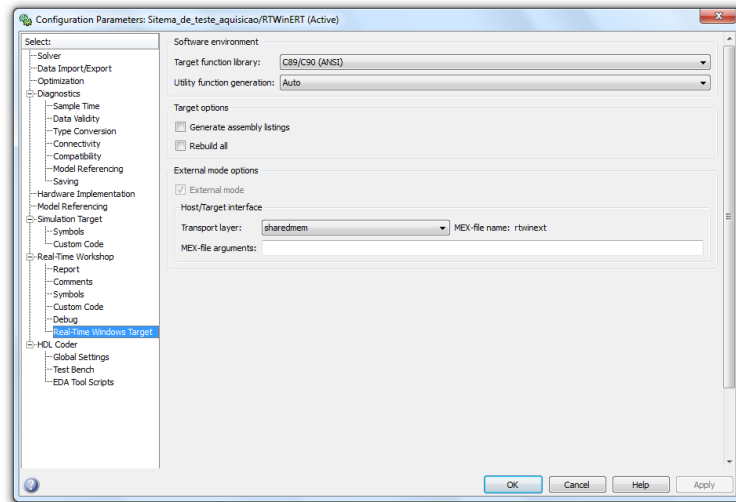


Figura AI.5 - Configuração do painel Real - Time Windows Target.

## 6) Configuração da função *External Mode Control Panel*

É utilizada a função *External Mode Control Panel* para gravar os dados das simulações no disco, num ficheiro do tipo *.mat*, permitindo utilizar as funções do *Matlab* para análise e visualização dos resultados.

No menu do *Simulink* selecciona-se *Tolls* → *External mode control panel*.

A função *External Mode Control Panel* tem uma configuração semelhante à da Fig. AI.6.

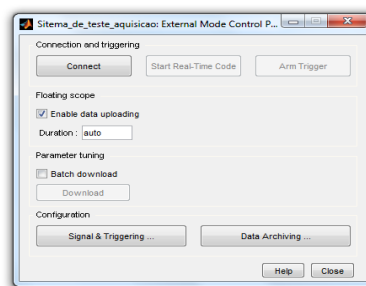


Figura AI.6 - Configuração da função *External Mode Control Panel*.

Selecciona-se *Data Archiving* e na janela seguinte ativa-se *Enable arching*. No campo *Directory* introduz-se a diretoria do disco na qual se pretende que os dados sejam gravados (c:\Nome da pasta).

No campo *File* insere-se o prefixo do nome do ficheiro a ser gravado. Se o prefixo for *data*, o *Matlab* cria ficheiros com os nomes *data\_0.mat*, *data\_1.mat*, etc.

Seleciona-se as caixas de verificação *Increment file after one-shot* e *Append file suffix to variable names*. Com esta ação as variáveis usadas nos gráficos vão ser guardadas com o mesmo sufixo que se utiliza no nome do ficheiro guardado (por exemplo a variável é *ScopeData* é gravada como *ScopeData\_0* no ficheiro *data\_0.mat*.)

O painel *External Data Archiving* terá uma configuração parecida ao da Fig. AI.7.

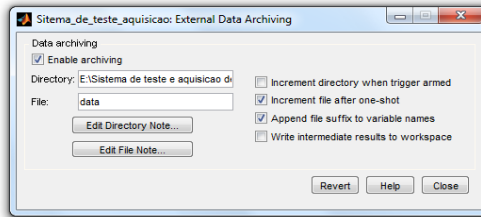


Figura AI.7 - Configuração do painel *External Data Archiving*.

No *External Mode Control Panel*, seleciona-se a *Signal & Triggering*. Na janela seguinte ativa-se a opção *Select all* e também a opção *Arm when connecting to target*. Na lista *Source* escolhe-se *Manual* e em *Mode* seleciona-se *Normal*.

Em *Duration* escolhe-se o número de amostras guardadas em cada ficheiro *data\_\*.mat*. Se para a frequência de amostragem de 10 kHz for inserido o valor de 10000 amostras cada ficheiro guardado terá 1 segundo de resultados da simulação (Tempo de simulação contido no ficheiro *data\_\*.mat*=*Duration*/Frequência de amostragem).

O painel *External Signal & Triggering* terá uma configuração semelhante ao da Fig. AI.8.

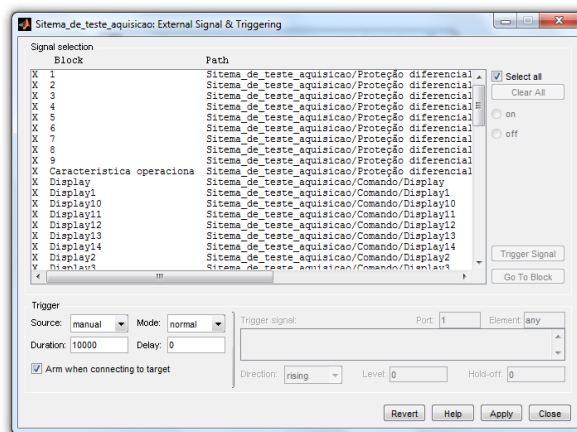


Figura AI.8 - Configuração do painel *External Signal & Triggering*.

## 7) Configuração dos *Scopes*

Para que a obtenção de dados seja correta através do *External Mode Control Panel* é preciso configurar os parâmetros dos *Scopes*. Para o efeito deve seleccionar-se a caixa de verificação *Save data to workspace* e desativar a *Limit data points to last*. O limite de pontos foi definido através da opção *Duration* do *data archiving*. No campo do *Format* escolhe-se *Structure with time*. No campo *Variable name* indica-se o nome da variável.

O *Scope* terá uma configuração semelhante ao da Fig. AI.9.

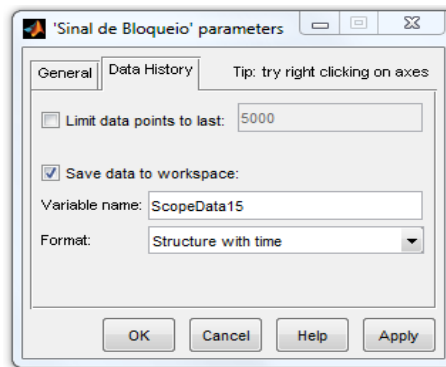


Figura AI.9 - Configuração dos *Scopes*.

# Anexos II – Código *Matlab* para desenvolvimento da Interface Gráfica

---

## AII.1 – Construção do *layout* da *Graphical User Interface*

O primeiro passo para criar uma nova *GUI* consiste em escrever *guide* na linha de comandos do *Matlab*. Aparece a janela do *GUIDE Quick Start* onde se deve seleccionar a opção *Blank GUI (Default)*, Fig. AII.1.

A área de trabalho da *GUI*, Fig. AII.2, é uma tela em branco que permite dispor botões, gráficos, caixas de texto, células para introdução de dados, etc.

Para utilizar os aplicativos na construção do *layout* da *GUI* basta arrastar a aplicação pretendida para a área de trabalho, AII.2 e AII.3.

Quando se efetua a gravação da interface gráfica são criados dois ficheiros: um onde está gravado o *layout* da interface gráfica e outro tipo *m-file*, usado para executar a *GUI*. Os dois ficheiros têm de ter o mesmo nome e de estar juntos na mesma pasta. Esta pasta deve ainda conter os ficheiros *Simulink* que se pretendem executar através da interface gráfica. As imagens utilizadas na *GUI* devem estar também na referida pasta, Fig. AII.4.

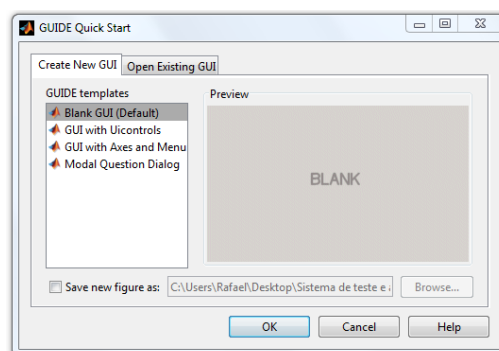


Figura AII.1 – Janela, *Guide Quick Start*.

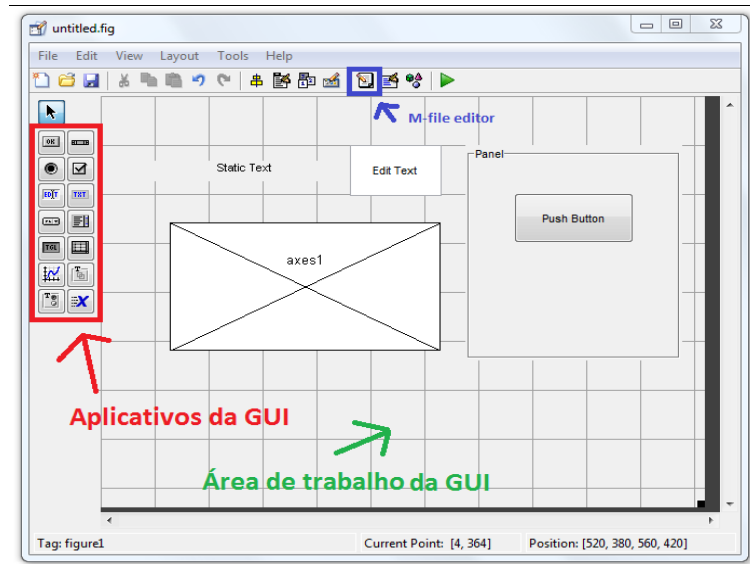


Figura AII.2 – Área de trabalho da *Guide*.

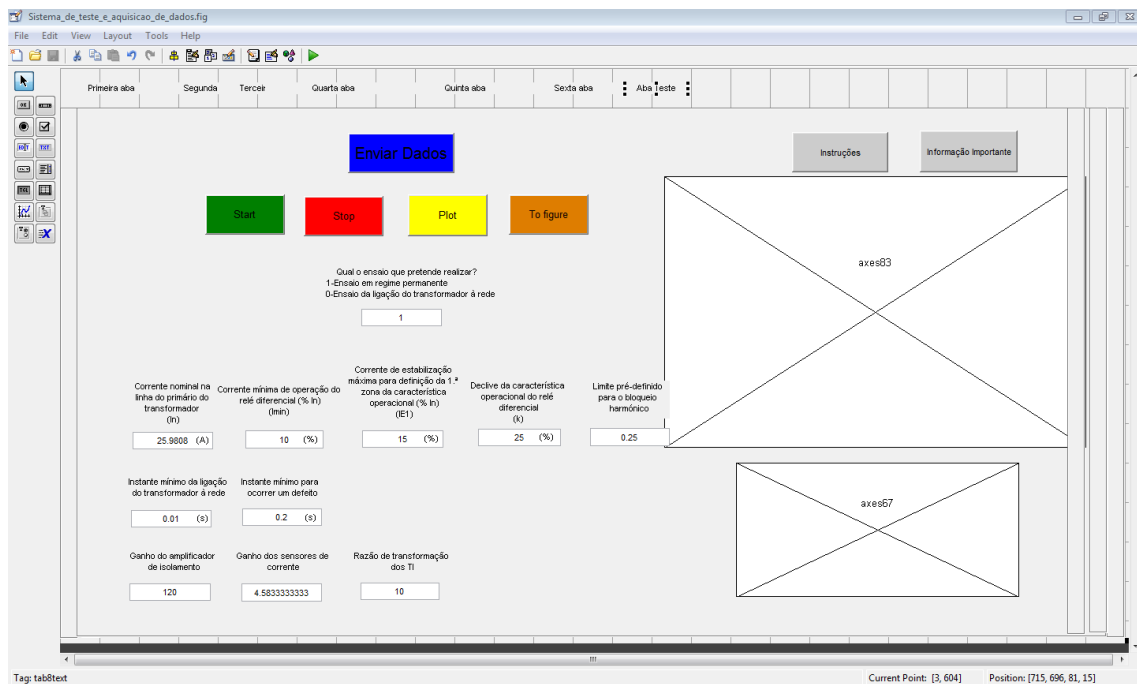


Figura AII.3 – Layout da GUI “Sistema\_de\_teste\_e\_aquisição\_de\_dados”, (primeiro separador).

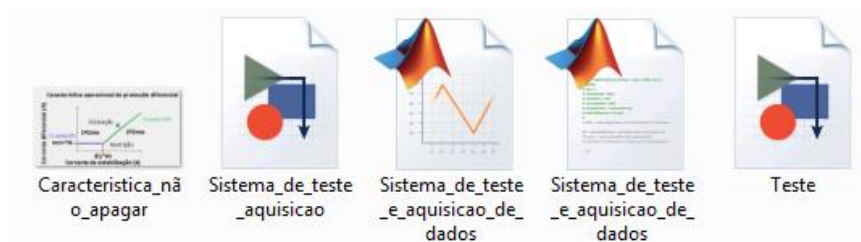


Figura AII.4 – Ficheiros que devem estar contidos na mesma pasta.

## AII.2 - Código *Matlab* da *Graphical User Interface*

A interface gráfica é executada através de uma *m-file* (código completo no final do Anexo II), Para aceder ao código da GUI utiliza-se o *M-file Editor* (Fig. AII.2).

### AII.2.1 – Exemplos de código

#### 1) Criar separadores

Para criar os separadores foi utilizado o seguinte código, podem ser encontrados mais detalhes em [26].

```
% --- Executes just before Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados
is made visible.
function
Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)

% Set the colors indicating a selected/unselected tab
handles.unselectedTabColor=get(handles.tab1text, 'BackgroundColor
');
handles.selectedTabColor=handles.unselectedTabColor-0.1;

% Set units to normalize for easier handling
set(handles.tab1text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab2text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab3text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab4text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab5text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab6text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab7text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab8text, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab1Panel, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab2Panel, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab3Panel, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab4Panel, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab5Panel, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab6Panel, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab7Panel, 'Units', 'normalized')
set(handles.tab8Panel, 'Units', 'normalized')

% Create tab labels (as many as you want according to following
code template)

% Tab 1
pos1=get(handles.tab1text, 'Position');
handles.a1=axes('Units', 'normalized', ...
               'Box', 'on', ...
               'XTick', [], ...
               'YTick', [], ...
               'Color', handles.selectedTabColor, ...
               'Position', [pos1(1) pos1(2) pos1(3)
pos1(4)+0.01], ...
```

```

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados('albd',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t1=text('String','Simulação / Dados',...
'Units','normalized',...
'Position',[(pos1(3)-
pos1(1))/2,pos1(2)/2+pos1(4)],...
'HorizontalAlignment','left',...
'VerticalAlignment','middle',...
'Margin',0.001,...
'FontSize',8,...
'BackgroundColor',handles.selectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados('t1bd',
gcbo,[],guidata(gcbo))');

% Manage panels (place them in the correct position and manage
visibilities)
panlpos=get(handles.tab1Panel,'Position');
set(handles.tab2Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab3Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab4Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab5Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab6Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab7Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab8Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab2Panel,'Visible','off')
set(handles.tab3Panel,'Visible','off')
set(handles.tab4Panel,'Visible','off')
set(handles.tab5Panel,'Visible','off')
set(handles.tab6Panel,'Visible','off')
set(handles.tab7Panel,'Visible','off')
set(handles.tab8Panel,'Visible','off')

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados wait for
user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dadosfig);

% --- Outputs from this function are returned to the command
line.
function varargout =
Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)

% Text object 1 callback (tab 1)
function t1bd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject,'BackgroundColor',handles.selectedTabColor)
set(handles.t2,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a1,'Color',handles.selectedTabColor)
set(handles.a2,'Color',handles.unselectedTabColor)

```

```

set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

```

## 2) Carregar uma imagem para a janela da *GUI*

Para carregar uma imagem para a janela da *GUI* utiliza-se o seguinte código

```

axes(handles.axes83)
imshow('caracteristica_não_apagar.png')

```

## 3) Botão enviar dados

Quando o botão “Enviar Dados” é premido, Fig. AII.5, executa-se o seguinte código (função “*EnviarDados\_Callback*”):

```

% --- Executes on button press in EnviarDados.
function EnviarDados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to EnviarDados (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

Os parâmetros introduzidos nas caixas de texto, Fig. AII.6, são enviados para o *Workspace* do *Matlab* e posteriormente utilizados no *Simulink*.

As caixas de introdução dos parâmetros possuem já valores pré-definidos, que podem ser modificados pelo utilizador, Fig. AII.7.

Por exemplo, para ler, gravar e enviar para o *Workspace* o valor da caixa de texto referente à “Corrente nominal na linha do primário do transformador”, Fig. AII.6, executa-se o seguinte código:

```

In = str2double( get(handles.edit1, 'string') );
save In
evalin('base', 'load(''In'')');

```

Após premir o botão “Enviar Dados” os dados ficam disponíveis no *Workspace*, Fig. AII.8. O processo repete-se para as outras caixas de introdução de parâmetros.



Figura AII.5 - Botão enviar dados.

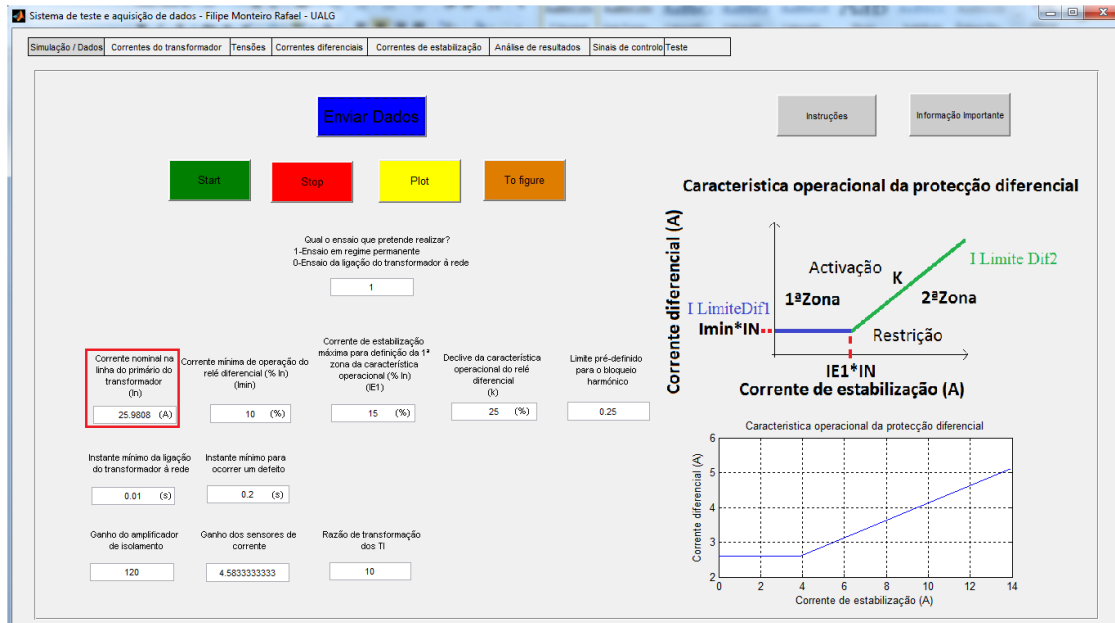


Figura AII.6 - Primeiro separador da GUI onde se encontra destacada a caixa de texto referente à “Corrente nominal na linha do primário do transformador”.

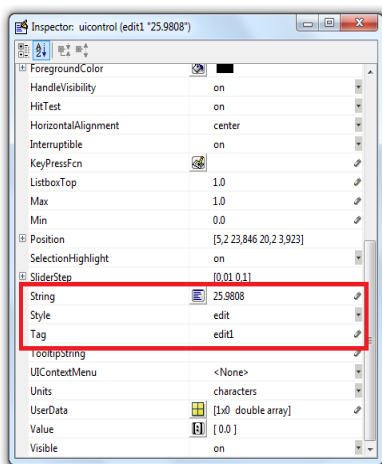


Figura AII.7 - Características da primeira caixa de texto variável (*In*), onde pode ser predefinido o valor.

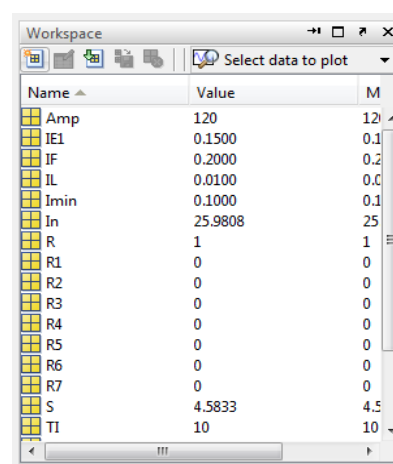


Figura AII.8 - Campo workspace do Matlab, para onde são carregados os dados introduzidos na GUI.

#### 4) Código para selecionar a remoção da componente DC dos sinais provenientes dos sensores de corrente

Existem nesta situação duas opções:

- i. Pretende-se realizar um ensaio em regime permanente e a componente DC introduzida pelos sensores de corrente pode ser removida de forma ativa (continuamente), nesta situação o utilizador define (R=1) na caixa de texto “Qual o ensaio que pretende realizar?”.
- ii. Pretende-se realizar um ensaio de ligação à rede do transformador, devendo a componente DC ser previamente calculada e depois removida aos sinais adquiridos (R=0).

Quando R=1 a componente DC é calculada no último período adquirido. Para o efeito utiliza-se uma janela deslizante que vai considerar a última amostra do sinal adquirido e excluir a última amostra do intervalo anterior. A componente DC é calculada assim de forma dinâmica Neste caso não é necessário caracterizar previamente os sensores, colocando-se a zero as variáveis correspondentes (R1, R2... R6, entradas no bloco da Fig. 3.8).

Quando R=0 é necessário caracterizar a componente DC introduzida por cada sensor através da realização de um ensaio prévio (aplicação Teste), cujos valores são guardados em R1, R2...R6 (entradas no bloco da Fig. 3.8).

O código utilizado é o seguinte:

```
if R==1;
R1 = 0;
save R1
evalin('base','load(''R1'')');

R2 = 0;
save R2
evalin('base','load(''R2'')');

R3 = 0;
save R3
evalin('base','load(''R3'')');

R4 = 0;
save R4
```

```

evalin('base','load(''R4'')');

R5 = 0;
save R5
evalin('base','load(''R5'')');

R6 = 0;
save R6
evalin('base','load(''R6'')');

R7 = 0;
save R7
evalin('base','load(''R7'')');
end

```

## 5) Característica operacional da proteção diferencial

Para traçar a característica operacional da proteção diferencial Fig. AII.9, de acordo com os dados introduzidos pelo utilizador, utiliza-se o seguinte código:

```

q=In*IE1+10; % A variável "y" define a primeira reta
(horizontal) da característica.
x = In*IE1:0.01:q; % A variável "x" define a segunda reta
da característica.
z = 0:0.01:In*IE1; % A variável "q" define o valor máximo da
escala da corrente de estabilização
y=In*Imin; % A variável "x" define o vetor entre os valore
mininos e máximos da corrente de estabilização para a 2º zona da
característica operacional.
v=k*x+In*Imin-k*In*IE1; % A variável "v" define o vetor entre os
valore mininos e máximos da corrente de estabilização para a 1º
zona da característica operacional.
axes(handles.axes67); % Define-se que o gráfico é traçado no
eixo 67 da interface gráfica, (Fig. AII.9(a) do anexo II do
relatório).
plot(x,v,z,y,'b','LineWidth',1.4) % Traça-se o gráfico da
característica com uma espessura de linha 1.4, (Fig. AII.9(b) do
anexo II do relatório).
grid on % Ativa-se a grelha do gráfico.
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes67,'XLabel'),'String','Corrente de
estabilização (A)') % Define-se o nome do eixo x.
set(get(handles.axes67,'YLabel'),'String','Corrente
diferencial (A)') % Define-se o nome do eixo y.
set(get(handles.axes67,'Title'),'String','Característica
operacional da protecção diferencial') % Define-se o título do
gráfico.

```

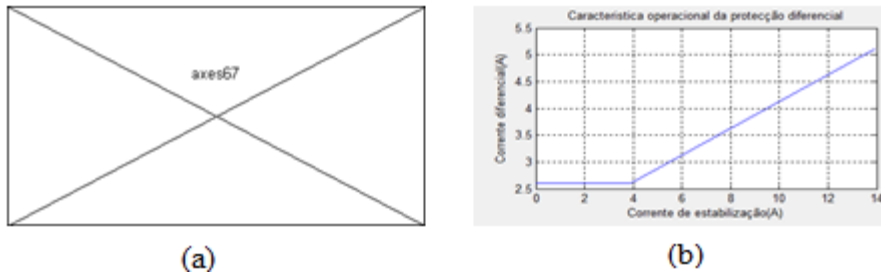


Figura AII.9 – (a) - Eixo onde é traçado o gráfico da característica operacional da proteção diferencial (axes67); (b) - Gráfico da característica operacional da proteção diferencial traçada na GUI.

### 6) Código do botão *Start*

A execução da aplicação requer que todos os ficheiros de dados de simulações anteriores sejam previamente removidos da diretoria do *Matlab*.

Assim, após perimir o botão “*Start*”, Fig. AII.10, executa-se a função “*Start\_Callback*” e esses ficheiros são removidos:

```
% --- Executes on button press in Start.
function Start_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Start (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

delete('data_*.mat');
delete('ScopeData*.mat');
```

De seguida é criada uma mensagem a indicar que a aplicação foi iniciada, Fig. AII.11.

```
msgbox('Aguarde até novas instruções, simulação iniciada');
```



Figura AII.10 - Botão *Start*.

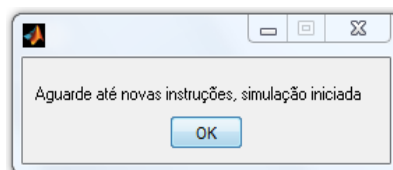


Figura AII.11 - Caixa de mensagem.

O modelo é carregado e executado em modo externo:

```
load_system('Sistema_de_teste_aquisicao.mdl');  
rtwbuild('Sistema_de_teste_aquisicao');
```

A simulação é iniciada com os seguintes comandos:

```
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'connect'); % O Matlab carrega  
o aplicativo em tempo real e estabelece uma ligação com o modelo  
Simulink.  
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'start'); % Inicia a  
simulação.
```

Antes de exibir a mensagem a informar que os dados já se encontram disponíveis para traçar os gráficos realiza-se uma pausa de 3 segundos para garantir que os dados já foram processados (se o tempo de simulação contido no ficheiro `data_*.mat` for alterado este tempo de pausa também o deve ser).

```
pause(3)  
msgbox('Dados já disponíveis para traçar os gráficos ', 'Estado  
da simulação');
```

## 7) Botão *Stop*

Quando o utilizador pretende terminar a simulação pressiona o botão “*Stop*”, Fig. AII.12. A função “*Stop\_Callback*” executa os seguintes comandos:

```
% --- Executes on button press in Stop.  
function Stop_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to Stop (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of  
MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'stop')
```

É criada uma mensagem, que informa que a simulação terminou:

```
msgbox('Simulação terminada', 'Estado da simulação')
```

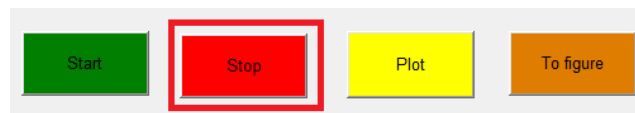


Figura AII.12 - Botão *Stop*.

## 8) Botão *Plot*

Quando é premido o botão “*Plot*”, Fig. AII.13 executa-se a função “*Plot\_Callback*”, da seguinte forma:

```
% --- Executes on button press in Plot.
function Plot_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Plot (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

Para apresentar os gráficos é necessário definir os limites do eixo dos tempos. Os valores mínimos e máximos para a escala dos tempos são sugeridos inicialmente em função do instante em que a avaria ocorre. O utilizador pode contudo alterar esses valores, conforme representado na Fig. AII.14. O código para a definição dos limites da escala dos tempos é o seguinte (assume-se que o defeito ocorreu entre 0 e 0.3 segundos):

```
IF = str2double( get(handles.edit5, 'string') );
save IF;
evalin('base','load(''IF'')');

if IF>=0 & IF<=0.3
prompt={'Tempo inicial (s)','Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0','0.35'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});
```



Figura AII.13 - Botão *Plot*.

Para traçar o gráfico utiliza-se o seguinte código:

```
dir *.mat;
load data_0;

axes(handles.axes1);
plot(ScopeData_0.time(inicio:fim),
ScopeData_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes1, 'XLabel'), 'String', 'Tempo (s)')
set(get(handles.axes1, 'YLabel'), 'String', 'IL1 (A)')
set(get(handles.axes1, 'Title'), 'String', 'Corrente IL1')
```

O mesmo procedimento é repetido para outros gráficos que se desejar traçar. No final é criada uma mensagem, que informa que foram traçados os gráficos:

```
msgbox('Gráficos traçados ', 'Estado da simulação')
```

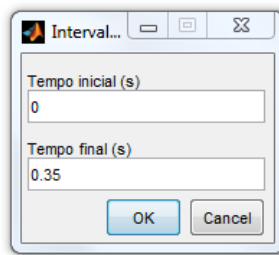


Figura AII.14 - Caixa de diálogo onde é apresentada uma sugestão de intervalo de tempo para se traçar os gráficos em função do instante da avaria.

## 9) Botão *To Figure*

O processo é muito semelhante ao utilizado para se traçar os gráficos, mas agora estes são convertidos em figuras e gravados em imagem do formato jpg. Assim quando premido o botão “*To Figure*”, Fig. AII.15 é executado o seguinte código (função “*Tofigure\_Callback*”):

```
% --- Executes on button press in Tofigure.
function Tofigure_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Tofigure (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
IF = str2double( get(handles.edit5, 'string') );
save IF
evalin('base', 'load(''IF'')');

if IF>=0 & IF<=0.3
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};
```

```

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;

def = {'0','0.35'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

```

Para converter o gráfico em figura utiliza-se o seguinte código:

```

dir *.mat;
load data_0;

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData_0.time(inicio:fim),
ScopeData_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Title 'Corrente Il1'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'IL1 (A)'
saveas(gcf,'IL1.jpg')

```



Figura AII.15 - Botão *To Figure*.

## 10) Código do botão Instruções

O código necessário para apresentar uma lista de instruções (obtida premindo o botão “Instruções”, Fig. AII.16) é o seguinte (função “*pushbutton23\_Callback*”):

```

% --- Executes on button press in pushbutton23.
function pushbutton23_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton23 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

msgbox('Lista de instruções:
1° Insira os dados. Pressione "Enviar Dados".
2° Execute a aplicação pressionando "Start". Siga as instruções
que surgem nas janelas.
3° Para terminar a execução da aplicação pressione "Stop".
Aguarde até aparecer a mensagem a confirmar que a simulação
terminou.
4° Pressione "Plot" para traçar os gráficos.
5° Pressione "To Figure" para converter os gráficos em figuras e
guardar no formato jpeg.');
```

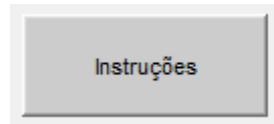


Figura AII.16 – Botão Instruções.

## 11) Código do botão Informação Importante

O código necessário para apresentar informações importantes para o utilizador é o seguinte (função “*pushbutton24\_Callback*”; botão “Informação Importante”, Fig. AII.17):

```

% --- Executes on button press in pushbutton24.
function pushbutton24_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton24 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
msgbox('Importante:
Se pretender realizar o ensaio da ligação do transformador à
rede, realize primeiro uma simulação em regime permanente na aba
"Teste", pois necessita de obter os valores da componente
contínua imposta pelos sensores de corrente para que esta seja
compensada no ensaio da ligação do transformador à rede.
Para um correto funcionamento, depois de realizar um ensaio
utilizando o modelo simulink principal, "Sistema de Teste e
aquisição de dados", se pretender realizar um ensaio utilizando
o modelo simulink "Teste" da aba "Teste", deve apagar antes as
pastas Sistema_de_teste_aquisicao_rtwin e slprj, (Pastas criadas
durante a execução do modelo "Sistema de Teste e aquisição de
dados", e que se encontram na mesma diretoria onde os dados das
simulações estão a ser gravados). Da mesma forma depois de
realizar um ensaio na aba Teste e antes de realizar um ensaio no
modelo principal, "Sistema de Teste e aquisição de dados", deve
apagar as pastas Teste_rtwin e slprj.
Para alterar a diretoria onde os ficheiros estão a ser guardados
aceda ao modelo simulink, na barra dos menus escolha a opção
Toll->External Mode Control Panel-> Data Archiving e no campo
Directory introduza a diretoria pretendida.
Por defeito está definido que o ficheiro data_0 que contem os
dados da simulação, representa 1 s da simulação (Duration=10000
e uma taxa de amostragem de 10000 amostras/segundo). Se
pretender alterar, aceda ao modelo simulink, na barra dos menus
escolha a opção Toll->External Mode Control -> Signal &
Trtigger. No campo Duration, se alterar para 100000 e mantendo a
```

taxa de amostragem de 10000 amostras/segundo o ficheiro `data_0` passa a conter 10s da simulação, (Tempo de simulação contido no ficheiro `data_0=Duration/Taxa de amostragem`.)

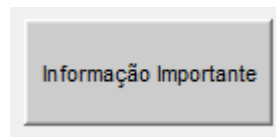


Figura AII.17 – Botão Informação Importante.

## 12) Botão *Start Teste*

Quando é premido o botão “*Start Teste*”, Fig. AII.18, executa-se a função “*StartTeste\_Callback*” da seguinte forma:

```
% --- Executes on button press in StartTeste.
function StartTeste_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to StartTeste (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

Esta aplicação opera de forma idêntica à anteriormente apresentada para o botão “*Start*”. Neste caso o modelo *Simulink* a executar designa-se por “*Teste.mdl*”:

```
delete('data_*.mat');
delete('ScopeData*.mat');

msgbox('Aguarde até novas instruções, teste iniciado');
load_system('Teste.mdl');
rtwbuild('Teste');
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'connect');
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'start');
```

Nesta aplicação os limites dos eixos dos tempos são pré-definidos com início=1 e fim=1000, correspondendo a 0.1 s de representação no eixo dos tempos.

O código necessário para traçar o gráfico das 6 correntes é o seguinte:

```
pause(3)

dir *.mat;
load data_0;

axes(handles.axes65);
plot(ScopeData_0.time(1:1000),
ScopeData_0.signals.values(1:1000), ScopeData1_0.time(1:1000),
ScopeData1_0.signals.values(1:1000), ScopeData2_0.time(1:1000),
ScopeData2_0.signals.values(1:1000));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes65, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
```

```

set(get(handles.axes65, 'YLabel'), 'String', 'Correntes do
primário (A)')
set(get(handles.axes65, 'Title'), 'String', 'Correntes do
Primário do Transformador)
legend('IL1', 'IL2', 'IL3', 'Location', 'NorthEast');

axes(handles.axes66);
plot(ScopeData3_0.time(1:1000),
ScopeData3_0.signals.values(1:1000), ScopeData4_0.time(1:1000),
ScopeData4_0.signals.values(1:1000), ScopeData5_0.time(1:1000),
ScopeData5_0.signals.values(1:1000));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes66, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes66, 'YLabel'), 'String', 'Correntes do
secunário (A)')
set(get(handles.axes66, 'Title'), 'String', 'Correntes do
Secundário do Transformador')
legend('IL4', 'IL5', 'IL6', 'Location', 'NorthEast');
    
```

No final é criada uma mensagem que informa que o teste foi realizado.

```
msgbox('Teste realizado ', 'Estado da simulação');
```

Os gráficos das correntes são apresentados no separador “Teste”, Fig. AII.19.



Figura AII.18 – Botão *Start Teste*.

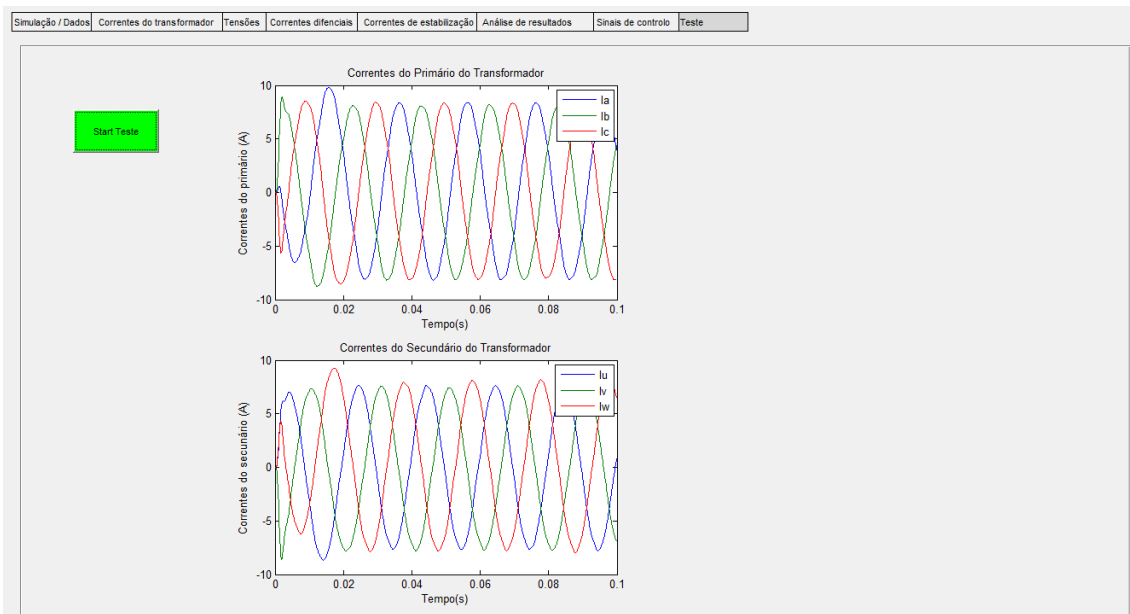


Figura AII.19 – Separador “Teste”, onde são exibidos os resultados obtidos através da simulação da aplicação *Simulink* “Teste”.

**AII.2.2 –Código completo da GUI**

```

function varargout =
Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(varargin)

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados
is made visible.
function
Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)

axes(handles.axes83)
imshow('caracteristica_não_apagar.png')

% Set the colors indicating a selected/unselected tab
handles.unselectedTabColor=get(handles.tab1text,'BackgroundColor
');
handles.selectedTabColor=handles.unselectedTabColor-0.1;

% Set units to normalize for easier handling
set(handles.tab1text,'Units','normalized')
set(handles.tab2text,'Units','normalized')
set(handles.tab3text,'Units','normalized')
set(handles.tab4text,'Units','normalized')
set(handles.tab5text,'Units','normalized')
set(handles.tab6text,'Units','normalized')
set(handles.tab7text,'Units','normalized')
set(handles.tab8text,'Units','normalized')
set(handles.tab1Panel,'Units','normalized')
set(handles.tab2Panel,'Units','normalized')
set(handles.tab3Panel,'Units','normalized')
set(handles.tab4Panel,'Units','normalized')
set(handles.tab5Panel,'Units','normalized')
set(handles.tab6Panel,'Units','normalized')
set(handles.tab7Panel,'Units','normalized')
set(handles.tab8Panel,'Units','normalized')

```

```

% Create tab labels (as many as you want according to following
code template)

% Tab 1
pos1=get(handles.tab1text,'Position');
handles.a1=axes('Units','normalized',...
    'Box','on',...
    'XTick',[],...
    'YTick',[],...
    'Color',handles.selectedTabColor,...
    'Position',[pos1(1) pos1(2) pos1(3)
pos1(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''albd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t1=text('String','Simulação / Dados',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[(pos1(3)-
pos1(1))/2,pos1(2)/2+pos1(4)],...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'VerticalAlignment','middle',...
    'Margin',0.001,...
    'FontSize',8,...
    'BackgroundColor',handles.selectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''t1bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');

% Tab 2
pos2=get(handles.tab2text,'Position');
pos2(1)=pos1(1)+pos1(3);
handles.a2=axes('Units','normalized',...
    'Box','on',...
    'XTick',[],...
    'YTick',[],...
    'Color',handles.unselectedTabColor,...
    'Position',[pos2(1) pos2(2) pos2(3)
pos2(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''a2bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t2=text('String','Correntes do transformador',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[pos2(3)/2,pos2(2)/2+pos2(4)],...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'VerticalAlignment','middle',...
    'Margin',0.001,...
    'FontSize',8,...
    'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''t2bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');

% Tab 3
pos3=get(handles.tab3text,'Position');
pos3(1)=pos2(1)+pos2(3);
handles.a3=axes('Units','normalized',...
    'Box','on',...
    'XTick',[],...
    'YTick',[],...
    'Color',handles.unselectedTabColor,...

```

```

        'Position',[pos3(1) pos3(2) pos3(3)
pos3(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''a3bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t3=text('String','Tensões',...
'Units','normalized',...
'Position',[pos3(3)/2,pos3(2)/2+pos3(4)],...
'HorizontalAlignment','left',...
'VerticalAlignment','middle',...
'Margin',0.001,...
'FontSize',8,...
'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''t3bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
% Tab 4
pos4=get(handles.tab4text,'Position');
pos4(1)=pos4(1)+pos4(3);
handles.a4=axes('Units','normalized',...
'Box','on',...
'XTick',[],...
'YTick',[],...
'Color',handles.unselectedTabColor,...
'Position',[pos4(1) pos4(2) pos4(3)
pos4(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''a4bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t4=text('String','Correntes diferenciais',...
'Units','normalized',...
'Position',[pos4(3)/2,pos4(2)/2+pos4(4)],...
'HorizontalAlignment','left',...
'VerticalAlignment','middle',...
'Margin',0.001,...
'FontSize',8,...
'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''t4bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');

% Tab 5
pos5=get(handles.tab5text,'Position');
pos5(1)=pos5(1)+pos5(3);
handles.a5=axes('Units','normalized',...
'Box','on',...
'XTick',[],...
'YTick',[],...
'Color',handles.unselectedTabColor,...
'Position',[pos5(1) pos5(2) pos5(3)
pos5(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''a5bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t5=text('String','Correntes de estabilização',...
'Units','normalized',...
'Position',[pos5(3)/2,pos5(2)/2+pos5(4)],...
'HorizontalAlignment','left',...
'VerticalAlignment','middle',...
'Margin',0.001,...
'FontSize',8,...

```

```

        'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados('t5bd',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
% Tab 6
pos6=get(handles.tab6text,'Position');
pos6(1)=pos6(1)+pos6(3);
handles.a6=axes('Units','normalized',...
    'Box','on',...
    'XTick',[],...
    'YTick',[],...
    'Color',handles.unselectedTabColor,...
    'Position',[pos6(1) pos6(2) pos6(3)
pos6(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados('a6bd',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t6=text('String','Análise de resultados',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[pos6(3)/2,pos6(2)/2+pos6(4)],...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'VerticalAlignment','middle',...
    'Margin',0.001,...
    'FontSize',8,...
    'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados('t6bd',
gcbo,[],guidata(gcbo))');

% Tab 7
pos7=get(handles.tab7text,'Position');
pos7(1)=pos7(1)+pos7(3);
handles.a7=axes('Units','normalized',...
    'Box','on',...
    'XTick',[],...
    'YTick',[],...
    'Color',handles.unselectedTabColor,...
    'Position',[pos7(1) pos7(2) pos7(3)
pos7(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados('a7bd',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t7=text('String','Sinais de controlo',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[pos7(3)/2,pos7(2)/2+pos7(4)],...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'VerticalAlignment','middle',...
    'Margin',0.001,...
    'FontSize',8,...
    'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados('t7bd',
gcbo,[],guidata(gcbo))');

% Tab 8
pos8=get(handles.tab8text,'Position');
pos8(1)=pos8(1)+pos8(3);
handles.a8=axes('Units','normalized',...
    'Box','on',...
    'XTick',[],...
    'YTick',[],...

```

```

        'Color',handles.unselectedTabColor,...
        'Position',[pos8(1) pos8(2) pos8(3)
pos8(4)+0.01],...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''a8bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');
handles.t8=text('String','Teste',...
    'Units','normalized',...
    'Position',[pos8(3)/2,pos8(2)/2+pos8(4)],...
    'HorizontalAlignment','left',...
    'VerticalAlignment','middle',...
    'Margin',0.001,...
    'FontSize',8,...
    'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor,...

'ButtonDownFcn','Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados(''t8bd'',
gcbo,[],guidata(gcbo))');

% Manage panels (place them in the correct position and manage
% visibilities)
panlpos=get(handles.tab1Panel,'Position');
set(handles.tab2Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab3Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab4Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab5Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab6Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab7Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab8Panel,'Position',panlpos)
set(handles.tab2Panel,'Visible','off')
set(handles.tab3Panel,'Visible','off')
set(handles.tab4Panel,'Visible','off')
set(handles.tab5Panel,'Visible','off')
set(handles.tab6Panel,'Visible','off')
set(handles.tab7Panel,'Visible','off')
set(handles.tab8Panel,'Visible','off')

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados wait for
user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dadosfig);

% --- Outputs from this function are returned to the command
line.
function varargout =
Sistema_de_teste_e_aquisicao_de_dados_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)

% Text object 1 callback (tab 1)
function t1bd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject,'BackgroundColor',handles.selectedTabColor)
set(handles.t2,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)

```

```

set(handles.a1, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

% Text object 2 callback (tab 2)
function t2bd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

% Text object 3 callback (tab 3)
function t3bd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)

```

```

set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

% Text object 4 callback (tab 4)
function t4bd(hObject, eventdata, handles)

set(hObject, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

% Text object 5 callback (tab 5)
function t5bd(hObject, eventdata, handles)

set(hObject, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')

```

```

set(handles.tab2Panel,'Visible','off')
set(handles.tab3Panel,'Visible','off')
set(handles.tab4Panel,'Visible','off')
set(handles.tab6Panel,'Visible','off')
set(handles.tab7Panel,'Visible','off')
set(handles.tab8Panel,'Visible','off')

% Text object 6 callback (tab 6)
function t6bd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject,'BackgroundColor',handles.selectedTabColor)
set(handles.t1,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6,'Color',handles.selectedTabColor)
set(handles.a1,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab6Panel,'Visible','on')
set(handles.tab1Panel,'Visible','off')
set(handles.tab2Panel,'Visible','off')
set(handles.tab3Panel,'Visible','off')
set(handles.tab4Panel,'Visible','off')
set(handles.tab5Panel,'Visible','off')
set(handles.tab7Panel,'Visible','off')
set(handles.tab8Panel,'Visible','off')

% Text object 7 callback (tab 7)
function t7bd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject,'BackgroundColor',handles.selectedTabColor)
set(handles.t1,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7,'Color',handles.selectedTabColor)
set(handles.a1,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab7Panel,'Visible','on')
set(handles.tab1Panel,'Visible','off')
set(handles.tab2Panel,'Visible','off')
set(handles.tab3Panel,'Visible','off')
set(handles.tab4Panel,'Visible','off')
set(handles.tab5Panel,'Visible','off')
set(handles.tab6Panel,'Visible','off')

```

```
set(handles.tab8Panel,'Visible','off')

% Text object 8 callback (tab 8)
function t8bd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject,'BackgroundColor',handles.selectedTabColor)
set(handles.t1,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8,'Color',handles.selectedTabColor)
set(handles.a1,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab8Panel,'Visible','on')
set(handles.tab1Panel,'Visible','off')
set(handles.tab2Panel,'Visible','off')
set(handles.tab3Panel,'Visible','off')
set(handles.tab4Panel,'Visible','off')
set(handles.tab5Panel,'Visible','off')
set(handles.tab6Panel,'Visible','off')
set(handles.tab7Panel,'Visible','off')

% Axes object 1 callback (tab 1)
function albd(hObject,eventdata,handles)

set(hObject,'Color',handles.selectedTabColor)
set(handles.a2,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8,'Color',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t1,'BackgroundColor',handles.selectedTabColor)
set(handles.t2,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8,'BackgroundColor',handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab1Panel,'Visible','on')
set(handles.tab2Panel,'Visible','off')
set(handles.tab3Panel,'Visible','off')
set(handles.tab4Panel,'Visible','off')
set(handles.tab5Panel,'Visible','off')
set(handles.tab6Panel,'Visible','off')
set(handles.tab7Panel,'Visible','off')
set(handles.tab8Panel,'Visible','off')

% Axes object 2 callback (tab 2)
function a2bd(hObject,eventdata,handles)
```

```

set(hObject, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

```

```

% Axes object 3 callback (tab 3)
function a3bd(hObject, eventdata, handles)

```

```

set(hObject, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

```

```

% Axes object 4 callback (tab 4)
function a4bd(hObject, eventdata, handles)

```

```

set(hObject, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)

```

```

set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

```

```

% Axes object 5 callback (tab 5)
function a5bd(hObject, eventdata, handles)

```

```

set(hObject, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')

```

```

% Axes object 6 callback (tab 6)
function a6bd(hObject, eventdata, handles)

```

```

set(hObject, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)

```

```
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')
```

```
% Axes object 7 callback (tab 7)
```

```
function a7bd(hObject, eventdata, handles)
```

```
set(hObject, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a8, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'off')
```

```
% Axes object 8 callback (tab 8)
```

```
function a8bd(hObject, eventdata, handles)
```

```
set(hObject, 'Color', handles.selectedTabColor)
set(handles.a1, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a2, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a3, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a4, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a5, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a6, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.a7, 'Color', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t8, 'BackgroundColor', handles.selectedTabColor)
set(handles.t1, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t2, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t3, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t4, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
```

```

set(handles.t5, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t6, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.t7, 'BackgroundColor', handles.unselectedTabColor)
set(handles.tab8Panel, 'Visible', 'on')
set(handles.tab1Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab2Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab3Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab4Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab5Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab6Panel, 'Visible', 'off')
set(handles.tab7Panel, 'Visible', 'off')

% --- Executes on button press in EnviarDados.
function EnviarDados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to EnviarDados (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

In = str2double( get(handles.edit1, 'string') );
save In
evalin('base', 'load(''In'')');

Imin1 = str2double( get(handles.edit2, 'string') );
Imin=Imin1/100;
save Imin
evalin('base', 'load(''Imin'')');

IE11 = str2double( get(handles.edit3, 'string') );
IE1=IE11/100;
save IE1
evalin('base', 'load(''IE1'')');

k1 = str2double( get(handles.edit4, 'string') );
k=k1/100;
save k
evalin('base', 'load(''k'')');

IF = str2double( get(handles.edit5, 'string') );
save IF
evalin('base', 'load(''IF'')');

kb = str2double( get(handles.edit7, 'string') );
save kb
evalin('base', 'load(''kb'')');

R = str2double( get(handles.edit8, 'string') );
save R
evalin('base', 'load(''R'')');

IL = str2double( get(handles.edit9, 'string') );
save IL
evalin('base', 'load(''IL'')');

S = str2double( get(handles.edit11, 'string') );
save S
evalin('base', 'load(''S'')');

TI = str2double( get(handles.edit12, 'string') );

```

```

save TI
evalin('base','load(''TI'')');

Amp = str2double( get(handles.edit13, 'string') );
save Amp
evalin('base','load(''Amp'')');

if R==1;
R1 = 0;
save R1
evalin('base','load(''R1'')');

R2 = 0;
save R2
evalin('base','load(''R2'')');

R3 = 0;
save R3
evalin('base','load(''R3'')');

R4 = 0;
save R4
evalin('base','load(''R4'')');

R5 = 0;
save R5
evalin('base','load(''R5'')');

R6 = 0;
save R6
evalin('base','load(''R6'')');

R7 = 0;
save R7
evalin('base','load(''R7'')');
end

%Caracteristica operacional da protecção diferencial

q=In*IE1+10;
x = In*IE1:0.01:q;
z= 0:0.01:In*IE1;
y=In*Imin;
v=k*x+In*Imin-k*In*IE1;
axes(handles.axes67);
plot(x,v,z,y,'b','LineWidth',1.4)
grid on
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes67, 'XLabel'), 'String', 'Corrente de
estabilização (A)')
set(get(handles.axes67, 'YLabel'), 'String', 'Corrente
diferencial (A)')
set(get(handles.axes67, 'Title'), 'String', 'Caracteristica
operacional da protecção diferencial')

% --- Executes on button press in Start.
function Start_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Start (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%External
%open_system('Sistema_de_teste_aquisicao.mdl');

delete('data_*.mat');
delete('ScopeData*.mat');
msgbox('Aguarde até novas instruções, simulação iniciada');
load_system('Sistema_de_teste_aquisicao.mdl');
rtwbuild('Sistema_de_teste_aquisicao');
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'connect');
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'start');
pause(3)
msgbox('Dados já disponíveis para traçar os gráficos ', 'Estado
da simulação');

% --- Executes on button press in pushbutton23.
function pushbutton23_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton23 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
msgbox('Lista de instruções:
1º Insira os dados. Pressione "Enviar Dados".
2º Execute a aplicação pressionando "Start". Siga as instruções
que surgem nas janelas.
3º Para terminar a execução da aplicação pressione "Stop".
Aguarde até aparecer a mensagem a confirmar que a simulação
terminou. 4º Pressione "Plot" para traçar os gráficos. 5º
Pressione "To Figure" para converter os gráficos em figuras e
guardar no formato jpeg.');
```

```

% --- Executes on button press in pushbutton24.
function pushbutton24_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton24 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
msgbox('Importante:
Se pretender realizar o ensaio da ligação do transformador a
rede, realize primeiro uma simulação em regime permanente na aba
"Teste", pois necessita de obter os valores da componente
contínua imposta pelos sensores de corrente para que esta seja
compensada no ensaio da ligação do transformador a rede.
Para um correcto funcionamento, depois de realizar um ensaio
utilizando o modelo simulink principal, "Sistema de Teste e
aquisição de dados", se pretender realizar um ensaio utilizando
o modelo simulink "Teste" da aba "Teste", deve apagar antes as
pastas Sistema_de_teste_aquisicao_rtw e slprj, (Pastas criadas
durante a execução do modelo "Sistema de Teste e aquisição de
dados", e que se encontram na mesma directoria onde os dados das
simulações estão a ser gravados). Da mesma forma depois de
realizar um ensaio na aba Teste e antes de realizar um ensaio no
modelo principal, "Sistema de Teste e aquisição de dados", deve
apagar as pastas Teste_rtw e slprj.
Para alterar a directoria onde os ficheiros estão a ser
guardados aceda ao modelo simulink, na barra dos menus escolha a
opção Toll->External Mode Control Panel-> Data Archiving e no
campo Directory introduza a directoria pretendida.
```

Por defeito está definido que o ficheiro `data_0` que contem os dados da simulação, representa 1s da simulação (`Duration=10000` e uma taxa de amostragem de 10000 amostras/segundo). Se pretender alterar, aceda ao modelo simulink, na barra dos menus escolha a opção `Toll->External Mode Control -> Signal & Trtigger`. No campo `Duration`, se alterar para 100000 e mantendo a taxa de amostragem de 10000 amostras/segundo o ficheiro `data_0` passa a conter 10s da simulação, (Tempo de simulação contido no ficheiro `data_0=Duration / Taxa de amostragem`.)

```
% --- Executes on button press in Stop.
function Stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Stop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'stop')
msgbox('Simulação terminada','Estado da simulação')

% --- Executes on button press in Plot.
function Plot_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Plot (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

IF = str2double( get(handles.edit5, 'string') );
save IF;
evalin('base','load(''IF'')');

if IF>=0 & IF<=0.3
prompt={'Tempo inicial (s)','Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0','0.35'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>0.3 & IF<=0.5
prompt={'Tempo inicial (s)','Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
```

```

lines= 1;
def = {'0.225', '0.575'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>0.5 & IF<=0.7
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0.425', '0.775'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>0.7 & IF<=0.9
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0.625', '0.975'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

```

```

elseif IF>0.9 & IF<=1
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0.7', '0.1'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>1
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0', '0'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);
iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

end

dir *.mat;
load data_0;

axes(handles.axes1);
plot(ScopeData_0.time(inicio:fim),
ScopeData_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes1, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes1, 'YLabel'), 'String', 'IL1 (A)')
set(get(handles.axes1, 'Title'), 'String', 'Corrente IL1')

axes(handles.axes2);

```

```

plot (ScopeData25_0.time (inicio:fim),
ScopeData25_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes2, 'XLabel'), 'String', 'Tempo (s)')
set (get (handles.axes2, 'YLabel'), 'String', 'IL2 (A)')
set (get (handles.axes2, 'Title'), 'String', 'Corrente IL2')

axes (handles.axes3);
plot (ScopeData26_0.time (inicio:fim),
ScopeData26_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes3, 'XLabel'), 'String', 'Tempo (s)')
set (get (handles.axes3, 'YLabel'), 'String', 'IL3 (A)')
set (get (handles.axes3, 'Title'), 'String', 'Corrente IL3')

axes (handles.axes4);
plot (ScopeData27_0.time (inicio:fim),
ScopeData27_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes4, 'XLabel'), 'String', 'Tempo (s)')
set (get (handles.axes4, 'YLabel'), 'String', 'IL4 (A)')
set (get (handles.axes4, 'Title'), 'String', 'Corrente IL4')

axes (handles.axes5);
plot (ScopeData29_0.time (inicio:fim),
ScopeData29_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes5, 'XLabel'), 'String', 'Tempo (s)')
set (get (handles.axes5, 'YLabel'), 'String', 'IL5 (A)')
set (get (handles.axes5, 'Title'), 'String', 'Corrente IL5')

axes (handles.axes6);
plot (ScopeData30_0.time (inicio:fim),
ScopeData30_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes6, 'XLabel'), 'String', 'Tempo (s)')
set (get (handles.axes6, 'YLabel'), 'String', 'IL6 (A)')
set (get (handles.axes6, 'Title'), 'String', 'Corrente IL6')

axes (handles.axes84);
plot (ScopeData_0.time (inicio:fim),
ScopeData_0.signals.values (inicio:fim), ScopeData25_0.time (inicio
:fim),
ScopeData25_0.signals.values (inicio:fim), ScopeData26_0.time (inic
io:fim), ScopeData26_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes84, 'XLabel'), 'String', 'Tempo (s)')
set (get (handles.axes84, 'YLabel'), 'String', 'Correntes do
primário (A)')
set (get (handles.axes84, 'Title'), 'String', 'Correntes do
primário do transformador')
legend ('IL1', 'IL2', 'IL3', 'Location', 'NorthEast');

axes (handles.axes85);

```

```

plot(ScopeData27_0.time(inicio:fim),
ScopeData27_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData29_0.time(inicio:fim),
ScopeData29_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData30_0.time(inicio:fim),
ScopeData30_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes85, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes85, 'YLabel'), 'String', 'Correntes do secundário (A)')
set(get(handles.axes85, 'Title'), 'String', 'Correntes do secundário do transformador')
legend('IL4', 'IL5', 'IL6', 'Location', 'NorthEast');

axes(handles.axes7);
plot(ScopeData32_0.time(inicio:fim),
ScopeData32_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes7, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes7, 'YLabel'), 'String', 'Tensão (Volts)')
set(get(handles.axes7, 'Title'), 'String', 'Ua')

axes(handles.axes10);
plot(ScopeData99_0.time(inicio:fim),
ScopeData99_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes10, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes10, 'YLabel'), 'String', 'Idif 1 (A)')
set(get(handles.axes10, 'Title'), 'String', 'Corrente diferencial (Idif 1) - Linha 1')

axes(handles.axes11);
plot(ScopeData1_0.time(inicio:fim),
ScopeData1_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes11, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes11, 'YLabel'), 'String', 'Idif 2 (A)')
set(get(handles.axes11, 'Title'), 'String', 'Corrente diferencial (Idif 2) - Linha 2')

axes(handles.axes12);
plot(ScopeData2_0.time(inicio:fim),
ScopeData2_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes12, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes12, 'YLabel'), 'String', 'Idif 3 (A)')
set(get(handles.axes12, 'Title'), 'String', 'Corrente diferencial (Idif 3) - Linha 3')

kb = str2double( get(handles.edit7, 'string') );
save kb
evalin('base', 'load(''kb'')');

syms fimx;
fimx=fim/10000;

```

```

axes(handles.axes13);
plot(ScopeData20_0.time(inicio:fim),
ScopeData20_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes13, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes13, 'YLabel'), 'String', 'Idif1 Eficaz 1ºh
(A)')
set(get(handles.axes13, 'Title'), 'String', 'Primeiro harmonico
da corrente de diferencial da linha 1 (Idif1 Eficaz 1ºh)')

axes(handles.axes14);
plot(ScopeData34_0.time(inicio:fim),
ScopeData34_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes14, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes14, 'YLabel'), 'String', 'Idif2 Eficaz 1ºh
(A)')
set(get(handles.axes14, 'Title'), 'String', 'Primeiro harmonico
da corrente de diferencial da linha 2 (Idif2 Eficaz 1ºh)')

axes(handles.axes15);
plot(ScopeData35_0.time(inicio:fim),
ScopeData35_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes15, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes15, 'YLabel'), 'String', 'Idif3 Eficaz 1ºh
(A)')
set(get(handles.axes15, 'Title'), 'String', 'Primeiro harmonico
da corrente de diferencial da linha 3 (Idif3 Eficaz 1ºh)')

axes(handles.axes30);
plot(ScopeData42_0.time(inicio:fim),
ScopeData42_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes30, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes30, 'YLabel'), 'String', 'Idif1 Eficaz 2ºh
(A)')
set(get(handles.axes30, 'Title'), 'String', 'Segundo harmonico
da corrente de diferencial da linha 1 (Idif1 Eficaz 2ºh)')

axes(handles.axes31);
plot(ScopeData44_0.time(inicio:fim),
ScopeData44_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes31, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes31, 'YLabel'), 'String', 'Idif2 Eficaz 2ºh
(A)')
set(get(handles.axes31, 'Title'), 'String', 'Segundo harmonico
da corrente de diferencial da linha 2 (Idif2 Eficaz 2ºh)')

axes(handles.axes32);
plot(ScopeData45_0.time(inicio:fim),
ScopeData45_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)

```

```

set(get(handles.axes32, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes32, 'YLabel'), 'String', 'Idif3 Eficaz 2ºh
(A)')
set(get(handles.axes32, 'Title'), 'String', 'Segundo harmonico
da corrente de diferencial da linha 3 (Idif3 Eficaz 2ºh)')

axes(handles.axes13);
plot(ScopeData20_0.time(inicio:fim),
ScopeData20_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes13, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes13, 'YLabel'), 'String', 'Idif1 Eficaz 1ºh
(A)')
set(get(handles.axes13, 'Title'), 'String', 'Primeiro harmonico
da corrente de diferencial da linha 1 (Idif1 Eficaz 1ºh)')

In = str2double( get(handles.edit1, 'string') );
save In
evalin('base','load(''In'')');

Imin1 = str2double( get(handles.edit2, 'string') );
Imin=Imin1/100;
save Imin
evalin('base','load(''Imin'')');

axes(handles.axes76);
plot(ScopeData3_0.time(inicio:fim),
ScopeData3_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes76, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes76, 'YLabel'), 'String', 'Iestab1 (A)')
set(get(handles.axes76, 'Title'), 'String', 'Corrente de
estabilização (Iestab1) - Linha 1')

axes(handles.axes77);
plot(ScopeData4_0.time(inicio:fim),
ScopeData4_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes77, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes77, 'YLabel'), 'String', 'Iestab2 (A)')
set(get(handles.axes77, 'Title'), 'String', 'Corrente de
estabilização (Iestab2) - Linha 2')

axes(handles.axes78);
plot(ScopeData5_0.time(inicio:fim),
ScopeData5_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes78, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes78, 'YLabel'), 'String', 'Iestab3 (A)')
set(get(handles.axes78, 'Title'), 'String', 'Corrente de
estabilização (Iestab3) - Linha 3')

axes(handles.axes22);
plot(ScopeData36_0.time(inicio:fim),
ScopeData36_0.signals.values(inicio:fim));
h=gca;

```

```

axes (h)
set (get (handles.axes22, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set (get (handles.axes22, 'YLabel'), 'String', 'Iestab1 Eficaz 1°h
(A)')
set (get (handles.axes22, 'Title'), 'String', 'Primeiro harmonico
da corrente de estabilização da linha 1 (Iestab1 Eficaz 1°h)')

axes (handles.axes23);
plot (ScopeData37_0.time (inicio:fim),
ScopeData37_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes23, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set (get (handles.axes23, 'YLabel'), 'String', 'Iestab2 Eficaz 1°h
(A)')
set (get (handles.axes23, 'Title'), 'String', 'Primeiro harmonico
da corrente de estabilização da linha 2 (Iestab2 Eficaz 1°h)')

axes (handles.axes24);
plot (ScopeData38_0.time (inicio:fim),
ScopeData38_0.signals.values (inicio:fim));
h=gca;
axes (h)
set (get (handles.axes24, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set (get (handles.axes24, 'YLabel'), 'String', 'Iestab3 Eficaz 1°h
(A)')
set (get (handles.axes24, 'Title'), 'String', 'Primeiro harmonico
da corrente de estabilização da linha 3 (Iestab3 Eficaz 1°h)')

axes (handles.axes86);
plot (ScopeData12_0.time (inicio:fim),
ScopeData12_0.signals.values (inicio:fim),[inicio1 fimx], [kb
kb]);
h=gca;
axes (h)
ylim ( [ 0 1.5 ] )
set (get (handles.axes86, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set (get (handles.axes86, 'YLabel'), 'String', 'I1/I2 (%)')
set (get (handles.axes86, 'Title'), 'String', 'I1/I2 - Linha 1')
legend('I1/I2', 'Limite', 'Location', 'NorthEast');

axes (handles.axes87);
plot (ScopeData13_0.time (inicio:fim),
ScopeData13_0.signals.values (inicio:fim),[inicio1 fimx], [kb
kb]);
h=gca;
axes (h)
ylim ( [ 0 1.5 ] )
set (get (handles.axes87, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set (get (handles.axes87, 'YLabel'), 'String', 'I1/I2 (%)')
set (get (handles.axes87, 'Title'), 'String', 'I1/I2 - Linha 2')
legend('I1/I2', 'Limite', 'Location', 'NorthEast');

axes (handles.axes88);
plot (ScopeData14_0.time (inicio:fim),
ScopeData14_0.signals.values (inicio:fim),[inicio1 fimx], [kb
kb]);
h=gca;
axes (h)
ylim ( [ 0 1.5 ] )

```

```

set(get(handles.axes88, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes88, 'YLabel'), 'String', 'I1/I2 (%)')
set(get(handles.axes88, 'Title'), 'String', 'I1/I2 - Linha 3')
legend('I1/I2', 'Limite', 'Location', 'NorthEast');

IE11 = str2double( get(handles.edit3, 'string') );
IE1=IE11/100;
save IE1
evalin('base', 'load(''IE1'')');
syms fimx IEx Iminx;
fimx=fim/10000;
IEx=IE1*In;
Iminx=Imin*In;

axes(handles.axes16);
plot(ScopeData20_0.time(inicio:fim),
ScopeData20_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [Iminx
Iminx],ScopeData36_0.time(inicio:fim),
ScopeData36_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [IEx
IEx],ScopeData18_0.time(inicio:fim),
ScopeData18_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData42_0.time(inicio:fim),
ScopeData42_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes16, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes16, 'YLabel'), 'String', 'Correntes/ Limites
(A)')
legend('I dif1 - 1°h', 'I LimiteDif1', 'I est1 - 1°h', '(IE1-
In)', 'I LimiteDif2', 'I dif1 - 2°h', 'Location', 'NorthEast');

axes(handles.axes17);
plot(ScopeData34_0.time(inicio:fim),
ScopeData34_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [Iminx
Iminx],ScopeData37_0.time(inicio:fim),
ScopeData37_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [IEx
IEx],ScopeData19_0.time(inicio:fim),
ScopeData19_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData44_0.time(inicio:fim),
ScopeData44_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes17, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes17, 'YLabel'), 'String', 'Correntes/ Limites
(A)')
legend('I dif2 - 1°h', 'I LimiteDif1', 'I est2 - 1°h', '(IE1-
In)', 'I LimiteDif2', 'I dif2 - 2°h', 'Location', 'NorthEast');

axes(handles.axes18);
plot(ScopeData35_0.time(inicio:fim),
ScopeData35_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [Iminx
Iminx],ScopeData38_0.time(inicio:fim),
ScopeData38_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [IEx
IEx],ScopeData33_0.time(inicio:fim),
ScopeData33_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData45_0.time(inicio:fim),
ScopeData45_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes18, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')

```

```

set(get(handles.axes18, 'YLabel'), 'String', 'Correntes/ Limites
(A)');
legend('I dif3 - 1°h', 'I LimiteDif1', 'I est3 - 1°h', '(IEI-
In)', 'I LimiteDif2', 'I dif3 - 2°h', 'Location', 'NorthEast');

axes(handles.axes25);
plot(ScopeData24_0.time(inicio:fim),
ScopeData24_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes25, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes25, 'YLabel'), 'String', 'Sinal da falha
(Volts)')
set(get(handles.axes25, 'Title'), 'String', 'Sinal emitido para
introduzir o defeito')

axes(handles.axes26);
plot(ScopeData15_0.time(inicio:fim),
ScopeData15_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes26, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes26, 'YLabel'), 'String', 'N. L. (0 ou 1)')
set(get(handles.axes26, 'Title'), 'String', 'Sinal de bloqueio
da proteção')

axes(handles.axes27);
plot(ScopeData16_0.time(inicio:fim),
ScopeData16_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes27, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes27, 'YLabel'), 'String', 'N. L. (0 ou 1)')
set(get(handles.axes27, 'Title'), 'String', 'Sinal de detecção
de defeito')

axes(handles.axes28);
plot(ScopeData22_0.time(inicio:fim),
ScopeData22_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes28, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes28, 'YLabel'), 'String', 'N. L. (0 ou 1)')
set(get(handles.axes28, 'Title'), 'String', 'Sinal de disparo')

axes(handles.axes29);
plot(ScopeData23_0.time(inicio:fim),
ScopeData23_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes29, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes29, 'YLabel'), 'String', 'S. E. P. O. C.
(Volts)')
set(get(handles.axes29, 'Title'), 'String', 'Sinal enviado para
os contadores')

msgbox('Gráficos traçados ', 'Estado da simulação')

% --- Executes on button press in Tofigure.
function Tofigure_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to Tofigure (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
IF = str2double( get(handles.edit5, 'string') );
save IF
evalin('base','load(''IF'')');

if IF>=0 & IF<=0.3
prompt={'Tempo inicial (s)','Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;

def = {'0','0.35'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>0.3 & IF<=0.5
prompt={'Tempo inicial (s)','Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0.225','0.575'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>0.5 & IF<=0.7
prompt={'Tempo inicial (s)','Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';

```

```

%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0.425', '0.775'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>0.7 & IF<=0.9
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0.625', '0.975'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

elseif IF>0.9 & IF<=1
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0.7', '0.1'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});

```

```
elseif IF>1
prompt={'Tempo inicial (s)', 'Tempo final (s)'};

% Create all your text fields with the questions specified by
the variable prompt.
title='Intervalo de tempo do gráfico';
%answer=inputdlg(prompt);
lines= 1;
def = {'0', '0'};

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);
iniciol= str2num(answer{1});
syms inicio;
if iniciol==0
    inicio=iniciol+1;
else
    inicio=10000*iniciol;
end

fim = 10000*str2num(answer{2});
end

dir *.mat;
load data_0;

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData_0.time(inicio:fim),
ScopeData_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Corrente IL1'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'IL1 (A)'
saveas(gcf, 'IL1.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData25_0.time(inicio:fim),
ScopeData25_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Corrente IL2'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'IL2 (A)'
saveas(gcf, 'IL2.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData26_0.time(inicio:fim),
ScopeData26_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Corrente IL3'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'IL3 (A)'
saveas(gcf, 'IL3.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData_0.time(inicio:fim),
ScopeData_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData25_0.time(inicio:
```

```
:fim),
ScopeData25_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData26_0.time(inicio:fim),
ScopeData26_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Correntes do primário do transformador'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Correntes do primário (A)'
legend('IL1','IL2','IL3','Location','NorthEast');
saveas(gcf,'Correntes_do_primário.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData27_0.time(inicio:fim),
ScopeData27_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'IL4'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'IL4 (A)'
saveas(gcf,'IL4.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData29_0.time(inicio:fim),
ScopeData29_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'IL5'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'IL5 (A)'
saveas(gcf,'IL5.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData30_0.time(inicio:fim),
ScopeData30_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'IL6'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'IL6 (A)'
saveas(gcf,'IL6.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData27_0.time(inicio:fim),
ScopeData27_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData29_0.time(inicio:fim),
ScopeData29_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData30_0.time(inicio:fim),
ScopeData30_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Correntes do secundário do transformador'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Correntes do secundário (A)'
legend('IL4','IL5','IL6','Location','NorthEast');
saveas(gcf,'Correntes_do_secundário.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData32_0.time(inicio:fim),
ScopeData32_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
```

```
grid on
Title 'Tensão'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'U (A)'
saveas(gcf, 'U.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData99_0.time(inicio:fim),
ScopeData99_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
grid on
Title 'Corrente diferencial (Idif1) - Linha 1'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Idif1 (A)'
saveas(gcf, 'Idif1.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData1_0.time(inicio:fim),
ScopeData1_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
grid on
Title 'Corrente diferencial (Idif2) - Linha 2'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Idif2 (A)'
saveas(gcf, 'Idif2.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData2_0.time(inicio:fim),
ScopeData2_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
grid on
Title 'Corrente diferencial (Idif3) - Linha 3'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Idif3 (A)'
saveas(gcf, 'Idif3.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData20_0.time(inicio:fim),
ScopeData20_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
grid on
Title 'Primeiro harmonico da corrente de diferencial da linha 1
(Idif1 Eficaz 1°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Idif1 Eficaz 1°h (A)'
saveas(gcf, 'Idif1_h_1_Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData34_0.time(inicio:fim),
ScopeData34_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 2);
grid on
Title 'Primeiro harmonico da corrente de diferencial da linha 2
(Idif2 Eficaz 1°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Idif2 Eficaz 1°h (A)'
saveas(gcf, 'Idif2_h_1_Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
```

```

plot(ScopeData35_0.time(inicio:fim),
ScopeData35_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Primeiro harmonico da corrente de diferencial da linha 3
(Idif3 Eficaz 1°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Idif3 Eficaz 1°h (A)'
saveas(gcf, 'Idif3_h_1_Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData42_0.time(inicio:fim),
ScopeData42_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Segundo harmonico da corrente de diferencial da linha 1
(Idif1 Eficaz 2°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Idif1 Eficaz 2°h (A)'
saveas(gcf, 'Idif1_h_2_Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData44_0.time(inicio:fim),
ScopeData44_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Segundo harmonico da corrente de diferencial da linha 2
(Idif2 Eficaz 2°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Idif2 Eficaz 2°h (A)'
saveas(gcf, 'Idif2_h_2_Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData45_0.time(inicio:fim),
ScopeData45_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Segundo harmonico da corrente de diferencial da linha 3
(Idif3 Eficaz 2°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Idif3 Eficaz 2°h (A)'
saveas(gcf, 'Idif3_h_2_Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData3_0.time(inicio:fim),
ScopeData3_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Corrente de estabilização (Iestabl) - Linha 1'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Iestabl (A)'
saveas(gcf, 'Iestabl.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData4_0.time(inicio:fim),
ScopeData4_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth',2);
grid on
Title 'Corrente de estabilização (Iestab2) - Linha 2'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Iestab2 (A)'

```

```
saveas(gcf, 'Iestab2.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData5_0.time(inicio:fim),
ScopeData5_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Title 'Corrente de estabilização (Iestab3)- Linha 3'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Iestab3 (A)'
saveas(gcf, 'Iestab3.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData36_0.time(inicio:fim),
ScopeData36_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Title 'Primeiro harmonico da corrente de estabilização da linha
1 (Iestab1 Eficaz 1°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Iestab1 Eficaz 1°h (A)'
saveas(gcf, 'Iestb1_h_1Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData37_0.time(inicio:fim),
ScopeData37_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Title 'Primeiro harmonico da corrente de estabilização da linha
2 (Iestab2 Eficaz 1°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Iestab2 Eficaz 1°h (A)'
saveas(gcf, 'Iestb2_h_1_Eficaz.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData38_0.time(inicio:fim),
ScopeData38_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Title 'Primeiro harmonico da corrente de estabilização da linha
3 (Iestab3 Eficaz 1°h)'
Xlabel 'Tempo(s)'
Ylabel 'Iestab3 Eficaz 1°h (A)'
saveas(gcf, 'Iestb3_h_1_Eficaz.jpg')

In = str2double( get(handles.edit1, 'string') );
save In
evalin('base','load(''In'')');

Imin1 = str2double( get(handles.edit2, 'string') );
Imin=Imin1/100;
save Imin
evalin('base','load(''Imin'')');

IE11 = str2double( get(handles.edit3, 'string') );
IE1=IE11/100;
save IE1
evalin('base','load(''IE1'')');
syms fimx IEx Iminx;
fimx=fim/10000;
```

```

IEx=IE1*In;
Iminx=Imin*In;

k1 = str2double( get(handles.edit4, 'string') );
k=k1/100;
save k
evalin('base','load(''k'')');

kb = str2double( get(handles.edit7, 'string') );
save kb
evalin('base','load(''kb'')');

syms fimx;
fimx=fim/10000;

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData12_0.time(inicio:fim),
ScopeData12_0.signals.values(inicio:fim),[iniciol fimx], [kb
kb], 'LineWidth',2);
grid on
Title 'I2/I1 - Linha 1'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'I2/I1 (%)'
ylim ( [ 0 1.5 ] )
legend('I2/I1', 'Limite', 'Location', 'NorthEast');
saveas(gcf, 'I1_I2_L1.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData13_0.time(inicio:fim),
ScopeData13_0.signals.values(inicio:fim),[iniciol fimx], [kb
kb], 'LineWidth',2);
grid on
Title 'I2/I1 - Linha 2'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'I2/I1 (%)'
ylim ( [ 0 1.5 ] )
legend('I2/I1', 'Limite', 'Location', 'NorthEast');
saveas(gcf, 'I1_I2_L2.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData14_0.time(inicio:fim),
ScopeData14_0.signals.values(inicio:fim),[iniciol fimx], [kb
kb], 'LineWidth',2);
grid on
Title 'I2/I1 - Linha 3'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'I2/I1 (%)'
ylim ( [ 0 1.5 ] )
legend('I2/I1', 'Limite', 'Location', 'NorthEast');
saveas(gcf, 'I1_I2_L3.jpg')

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData20_0.time(inicio:fim),
ScopeData20_0.signals.values(inicio:fim),[iniciol fimx], [Iminx
Iminx],ScopeData36_0.time(inicio:fim),
ScopeData36_0.signals.values(inicio:fim),[iniciol fimx], [IEx

```

```

IEx],ScopeData18_0.time(inicio:fim),
ScopeData18_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData42_0.time(inicio:fim),
ScopeData42_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Correntes / Limites (A)'
legend('I dif1 - 1°h','I LimiteDif1','I est1 - 1°h','(IE1-In)',
'I LimiteDif2','I dif1 - 2°h','Location','NorthEast');
saveas(gcf,'Harmonicoss_limtes_da_caracteristica_linha_1.jpg')

```

```

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData34_0.time(inicio:fim),
ScopeData34_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [Iminx
Iminx],ScopeData37_0.time(inicio:fim),
ScopeData37_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [IEx
IEx],ScopeData19_0.time(inicio:fim),
ScopeData19_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData44_0.time(inicio:fim),
ScopeData44_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Correntes / Limites (A)'
legend('I dif2 - 1°h','I LimiteDif1','I est2 - 1°h','(IE1-In)',
'I LimiteDif2','I dif2 - 2°h','Location','NorthEast');
saveas(gcf,'Harmonicoss_limtes_da_caracteristica_linha_2.jpg')

```

```

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData35_0.time(inicio:fim),
ScopeData35_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [Iminx
Iminx],ScopeData38_0.time(inicio:fim),
ScopeData38_0.signals.values(inicio:fim),[inicio1 fimx], [IEx
IEx],ScopeData33_0.time(inicio:fim),
ScopeData33_0.signals.values(inicio:fim),ScopeData45_0.time(inicio:fim),
ScopeData45_0.signals.values(inicio:fim),'LineWidth',2);
grid on
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Correntes / Limites (A)'
legend('I dif3 - 1°h','I LimiteDif1','I est3 - 1°h','(IE1-In)',
'I LimiteDif2','I dif3 - 2°h','Location','NorthEast');
saveas(gcf,'Harmonicoss_limtes_da_caracteristica_linha_3.jpg')

```

```

q=In*IE1+10;
x = In*IE1:0.01:q;
z= 0:0.01:In*IE1;
y=In*Imin;
v=k*x+In*Imin-k*In*IE1;

```

```

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'Position',[0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(x,v,z,y,'b')
grid on
Xlabel 'Corrente de estabilização (A)'
Ylabel 'Corrente diferencial (A)'
Title 'Característica operacional da protecção diferencial'

```

```

saveas(gcf, 'Caracteristica_operacional_da_proteção_diferencial.
jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData24_0.time(inicio:fim),
ScopeData24_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 4);
grid on
Title 'Sinal emitido para introduzir o defeito'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Sinal do defeito (volts)'
saveas(gcf, 'Sinal_do_defeito.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData15_0.time(inicio:fim),
ScopeData15_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 4);
grid on
Title 'Sinal de bloqueio da proteção'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Nivel logico do sinal de bloqueio (0 ou 1)'
saveas(gcf, 'Sinal_de_Bloqueio.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData16_0.time(inicio:fim),
ScopeData16_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 4);
grid on
Title 'Sinal de detecção de defeito'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Nivel logico do sinal de detecção de defeito(0 ou 1)'
saveas(gcf, 'Sinal_de_detecção_de_defeito.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData22_0.time(inicio:fim),
ScopeData22_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 4);
grid on
Title 'Sinal de disparo'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Nivel logico do sinal de disparo (0 ou 1)'
saveas(gcf, 'Sinal_de_disparo.jpg')

figure1 = figure('PaperSize', [20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent', figure1, 'Position', [0.13 0.11 0.775 0.4]);
plot(ScopeData23_0.time(inicio:fim),
ScopeData23_0.signals.values(inicio:fim), 'LineWidth', 4);
grid on
Title 'Sinal enviado para os contatores'
Xlabel 'Tempo (s)'
Ylabel 'Sinal enviado para os contatores (volts)'
saveas(gcf, 'Sinal_para_os_contatores.jpg')
msgbox('Os gráficos foram convertidos em Figuras e gravados em
imagens do tipo .jpeg', 'Estado da simulação');

%%%% Separador Teste %%%%

% --- Executes on button press in StartTeste.
function StartTeste_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to StartTeste (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

delete('data_*.mat');
delete('ScopeData*.mat');

msgbox('Aguarde até novas instruções, teste iniciado');
load_system('Teste.mdl');
rtwbuild('Teste');
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'connect');
set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'start');

pause(3)

dir *.mat;
load data_0;

axes(handles.axes65);
plot(ScopeData_0.time(1:1000),
ScopeData_0.signals.values(1:1000),ScopeData1_0.time(1:1000),
ScopeData1_0.signals.values(1:1000),ScopeData2_0.time(1:1000),
ScopeData2_0.signals.values(1:1000));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes65, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes65, 'YLabel'), 'String', 'Correntes do
primário (A)')
set(get(handles.axes65, 'Title'), 'String', 'Correntes do
Primário do Transformador')
legend('IL1', 'IL2', 'IL3', 'Location', 'NorthEast');

axes(handles.axes66);
plot(ScopeData3_0.time(1:1000),
ScopeData3_0.signals.values(1:1000),ScopeData4_0.time(1:1000),
ScopeData4_0.signals.values(1:1000),ScopeData5_0.time(1:1000),
ScopeData5_0.signals.values(1:1000));
h=gca;
axes(h)
set(get(handles.axes66, 'XLabel'), 'String', 'Tempo(s)')
set(get(handles.axes66, 'YLabel'), 'String', 'Correntes do
secunário (A)')
set(get(handles.axes66, 'Title'), 'String', 'Correntes do
Secundário do Transformador')
legend('IL4', 'IL5', 'IL6', 'Location', 'NorthEast');

msgbox('Teste realizado ', 'Estado da simulação');

%%%% Funções referentes as caixas de texto %%%%

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit1 as text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit9 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as
text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit12 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit13 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```





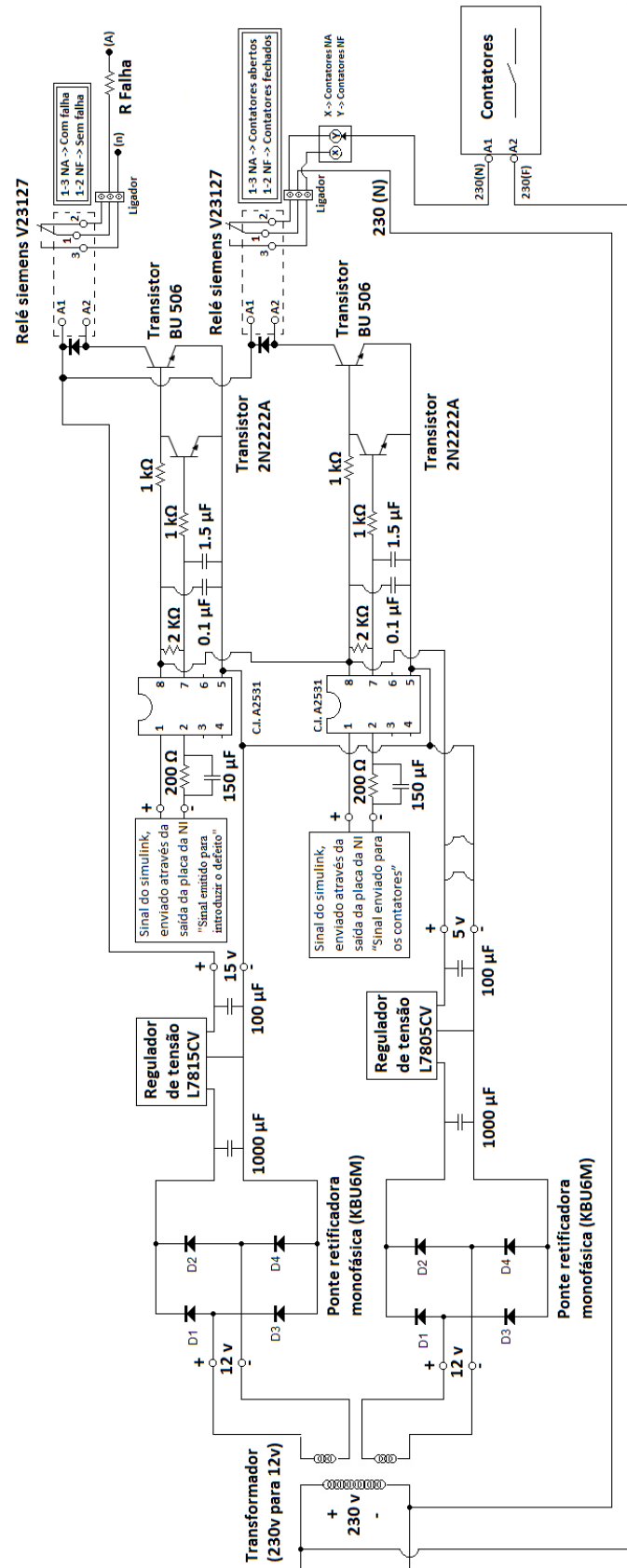


Figura AIII.2 – Esquema detalhado dos protótipos laboratoriais desenvolvidos para controlar o instante em que o defeito é introduzido no sistema e a abertura/fecho dos contadores.

## Anexo IV - Ensaios

### Ensaio 10: Introdução de defeito B-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$

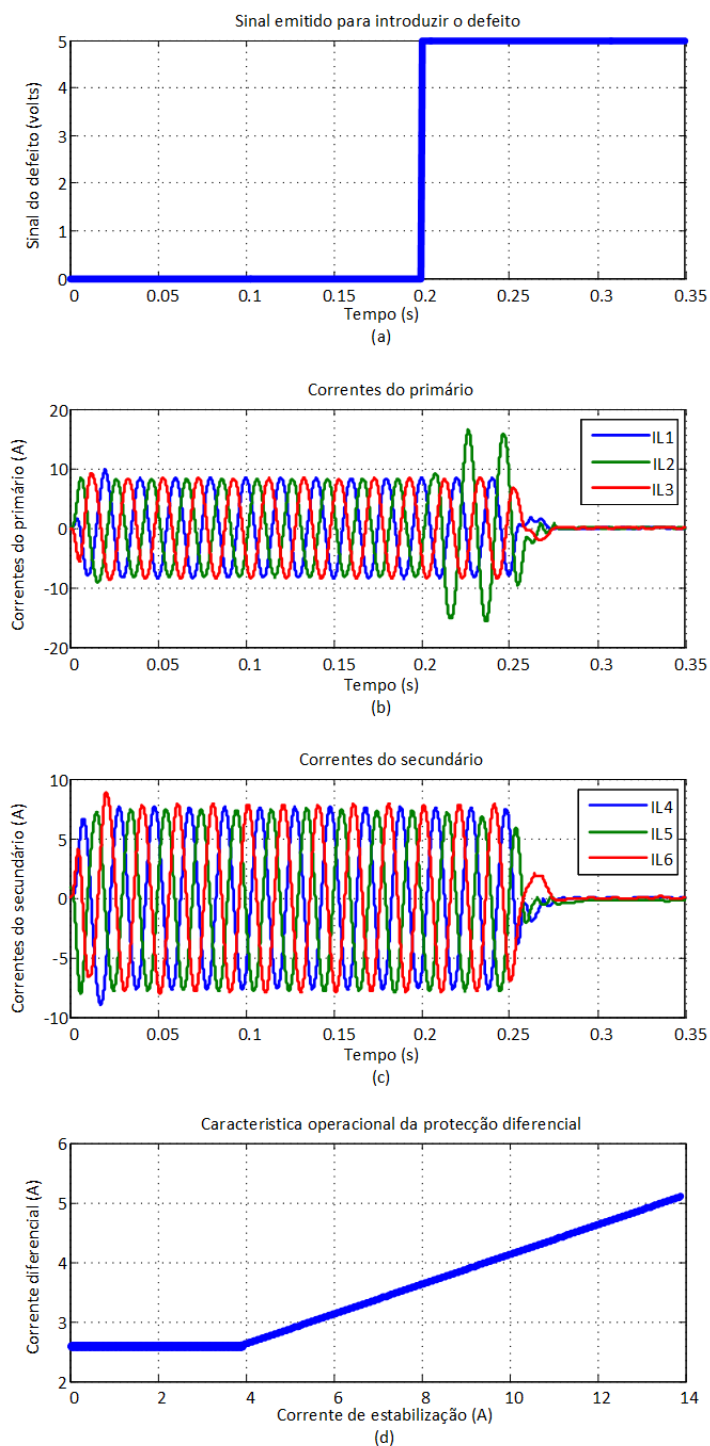


Figura AIV.1 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da proteção diferencial.

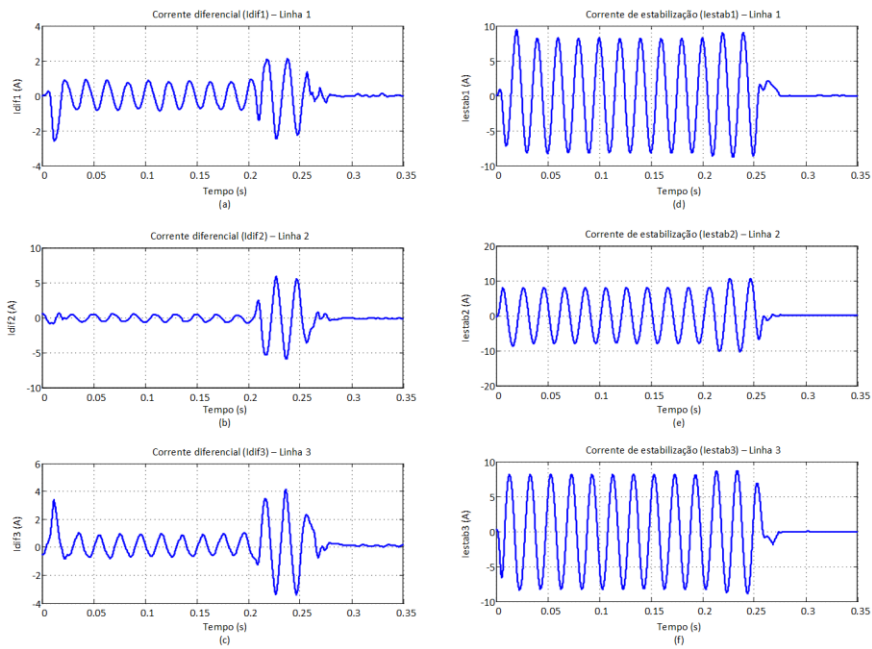


Figura AIV.2 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

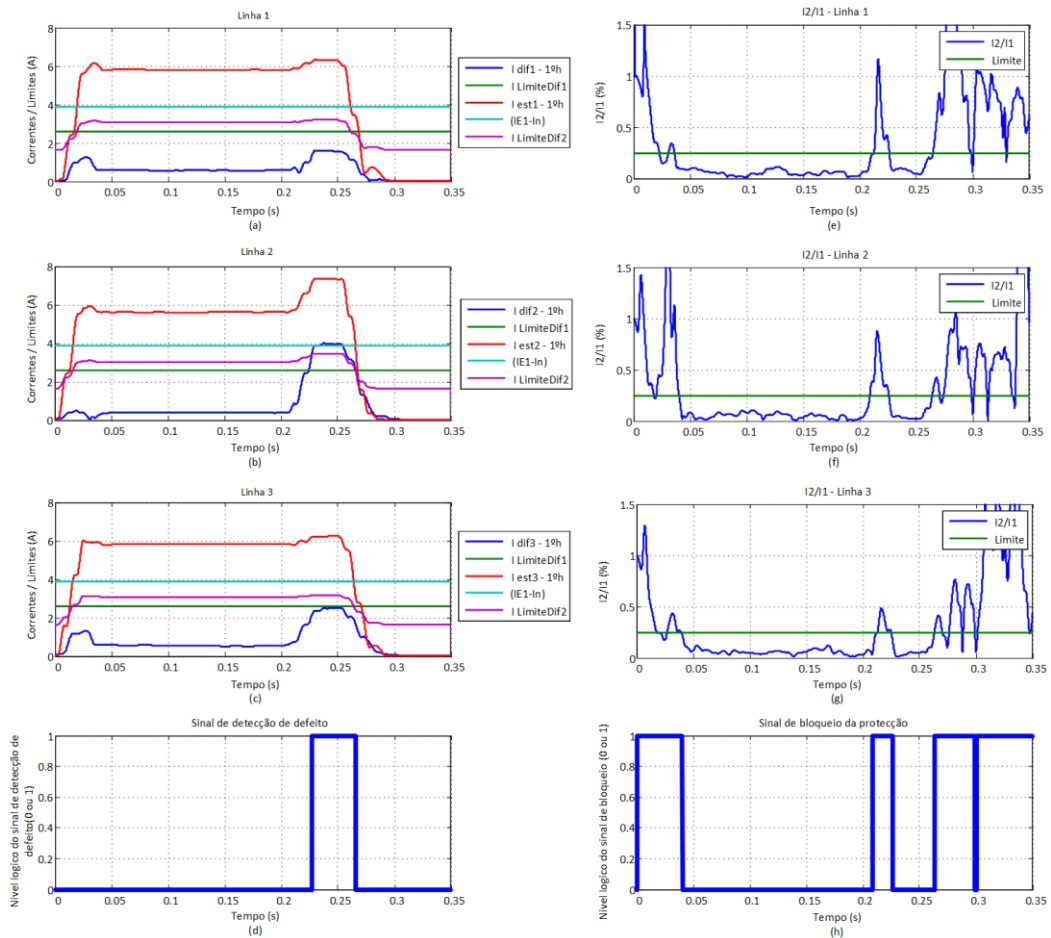


Figura AIV.3 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

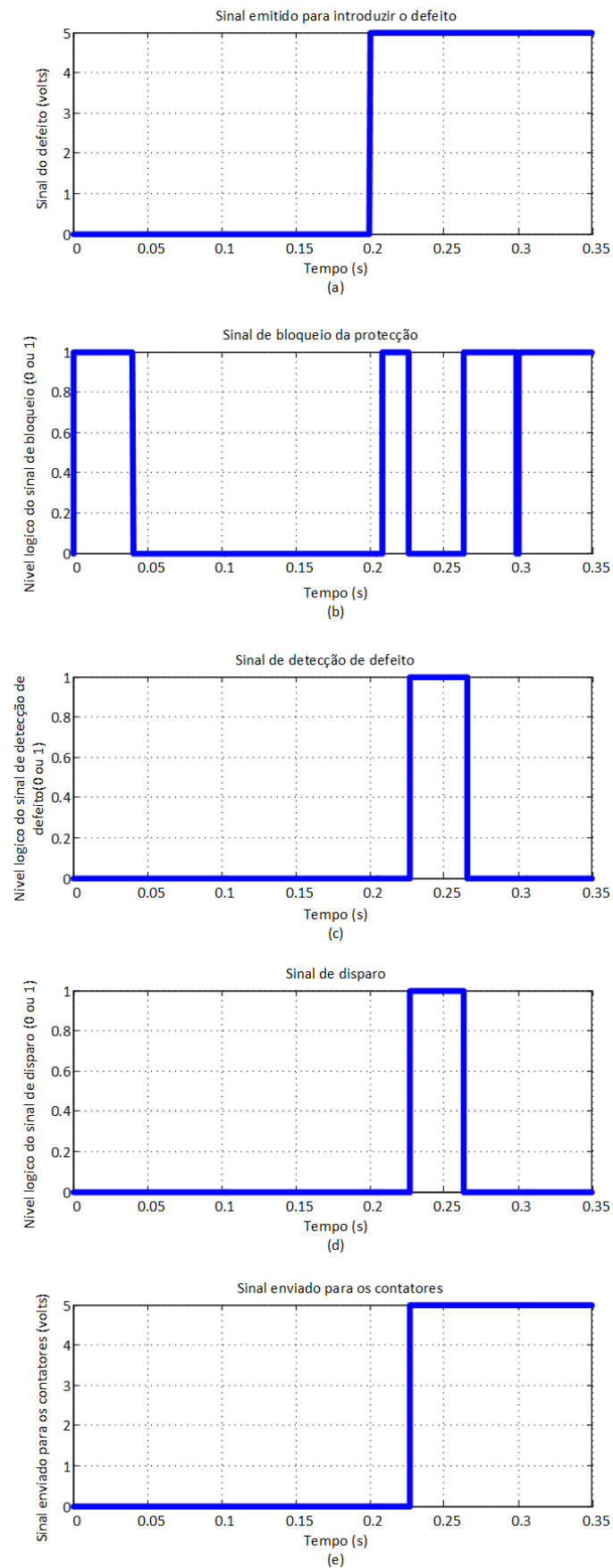


Figura AIV.4 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores

### Ensaio 11: Introdução de defeito C-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$

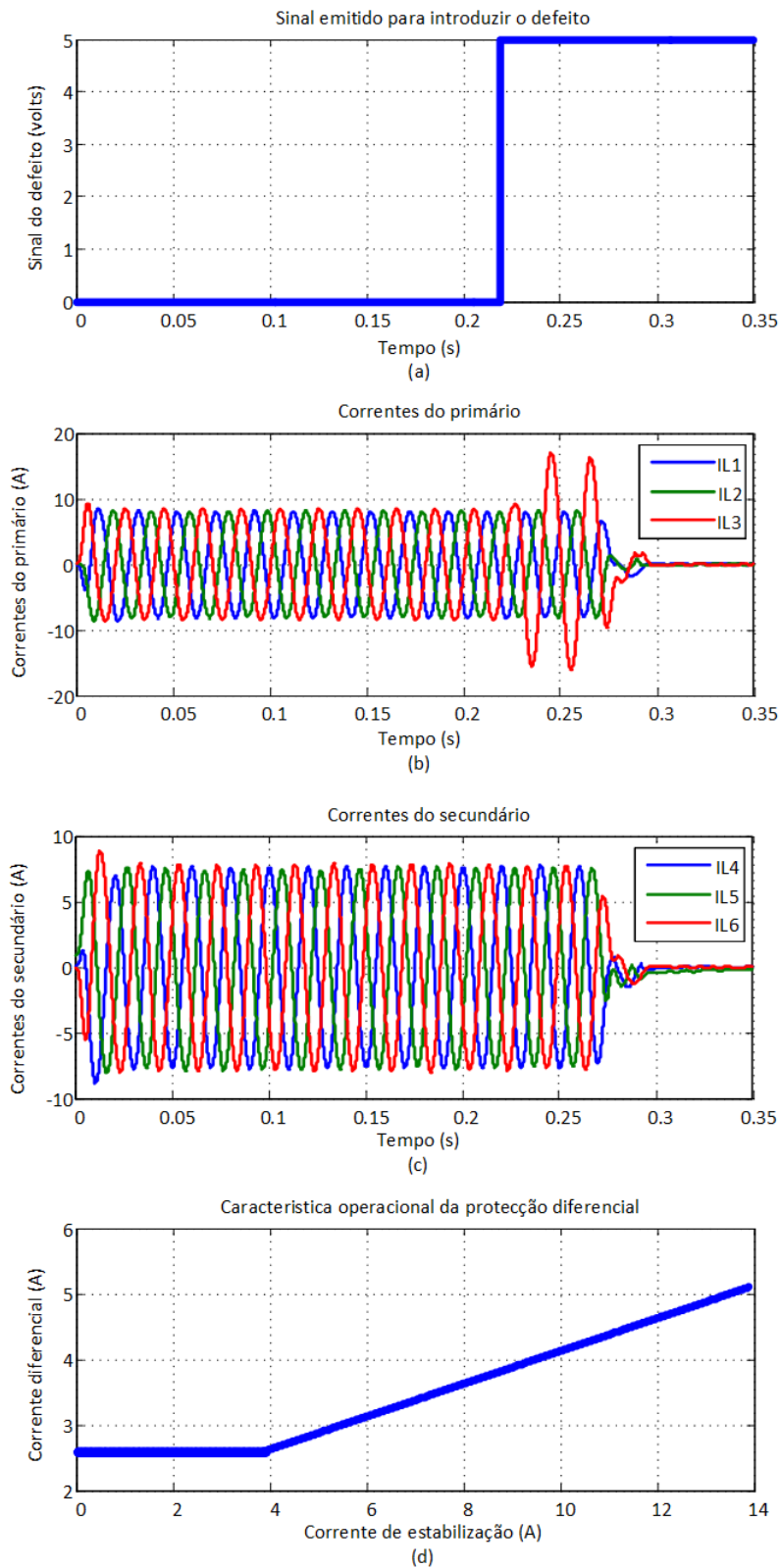


Figura AIV.5 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

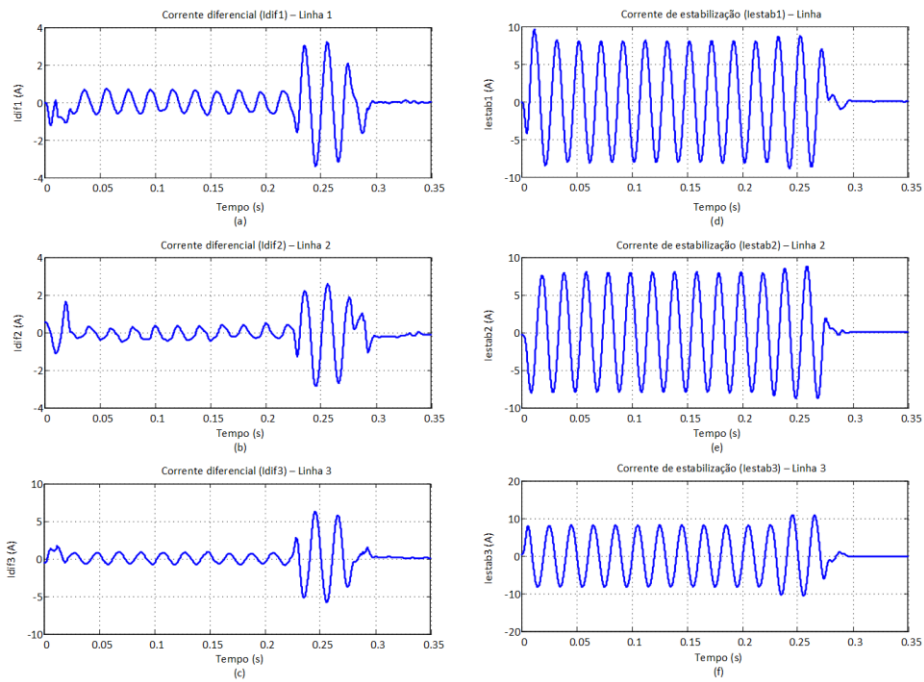


Figura AIV.6 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

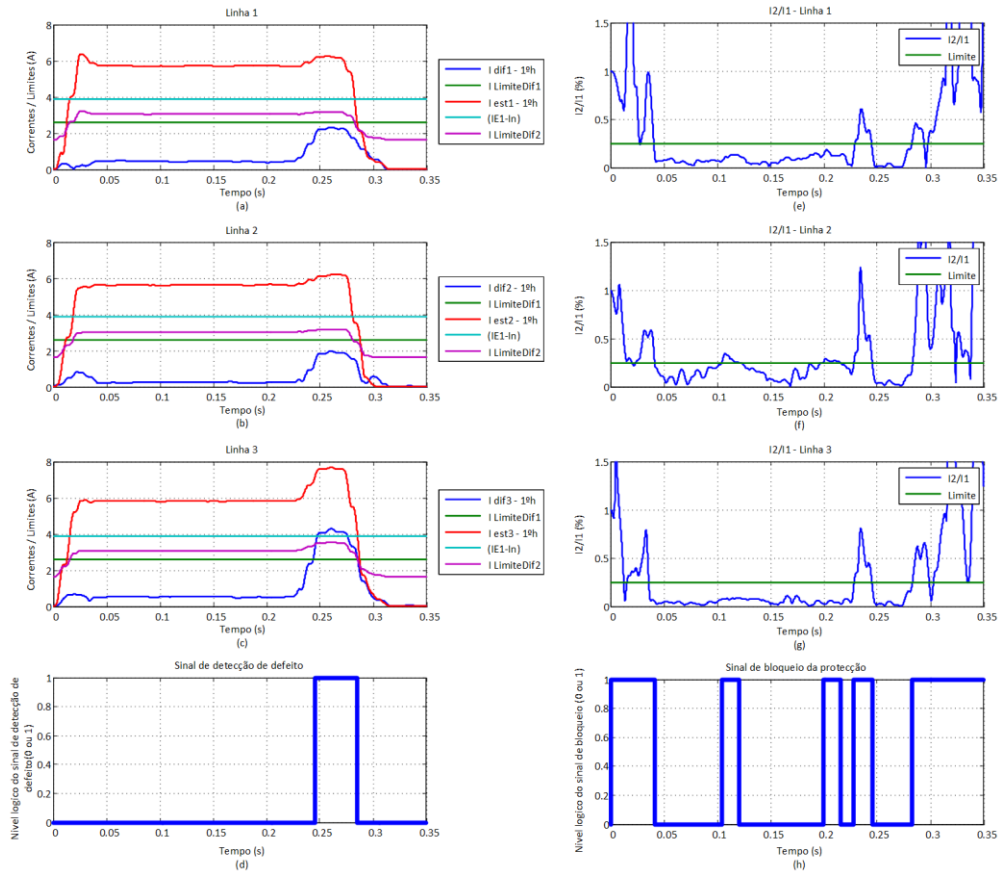


Figura AIV.7 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

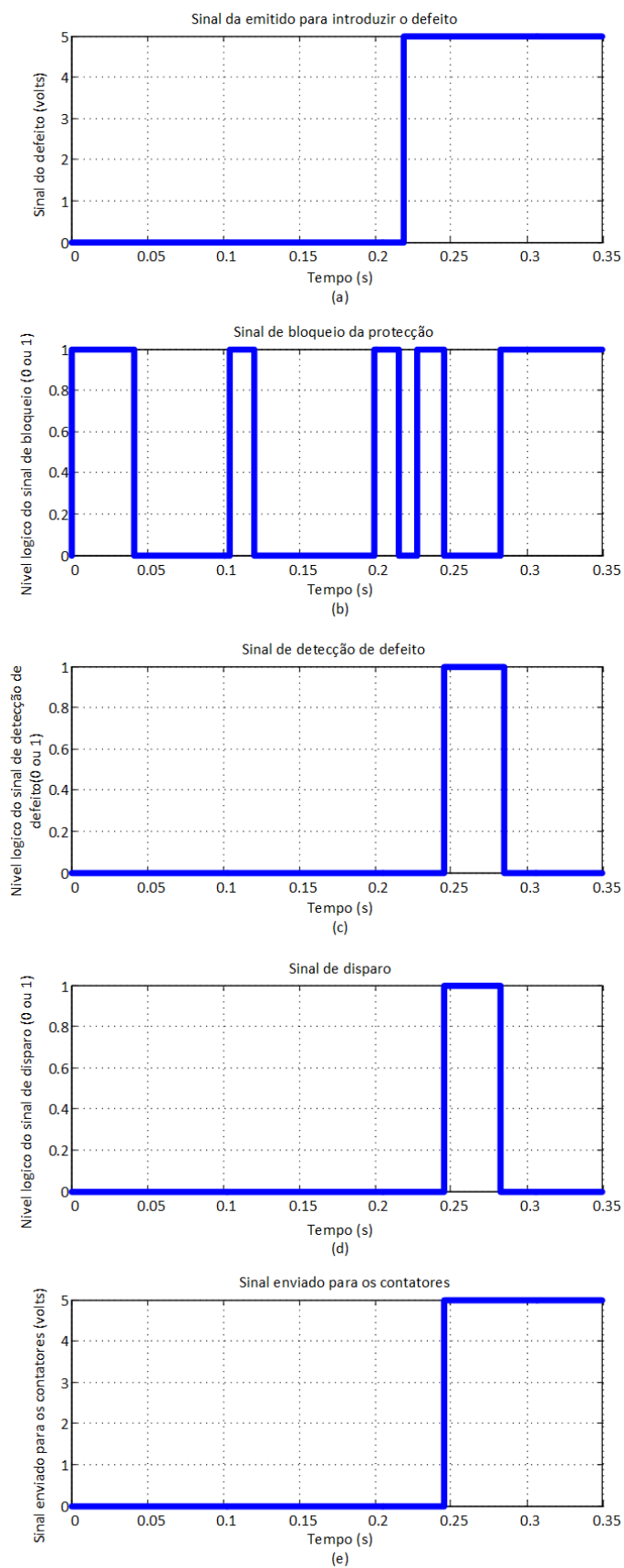


Figura AIV.8 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

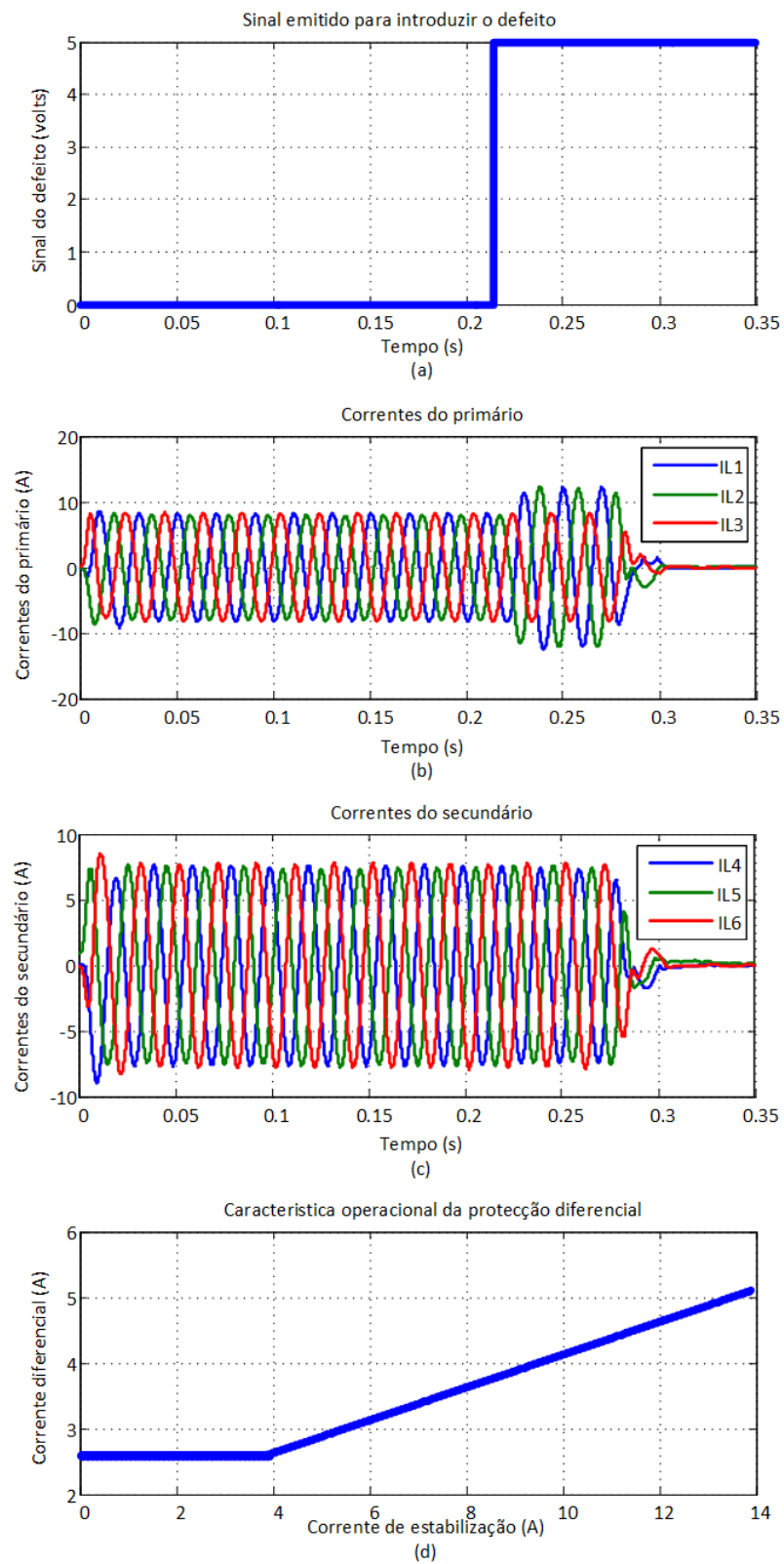
**Ensaio 12: Introdução de defeito u-n,  $R_{Falha} = 24 \Omega$** 

Figura AIV.9 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

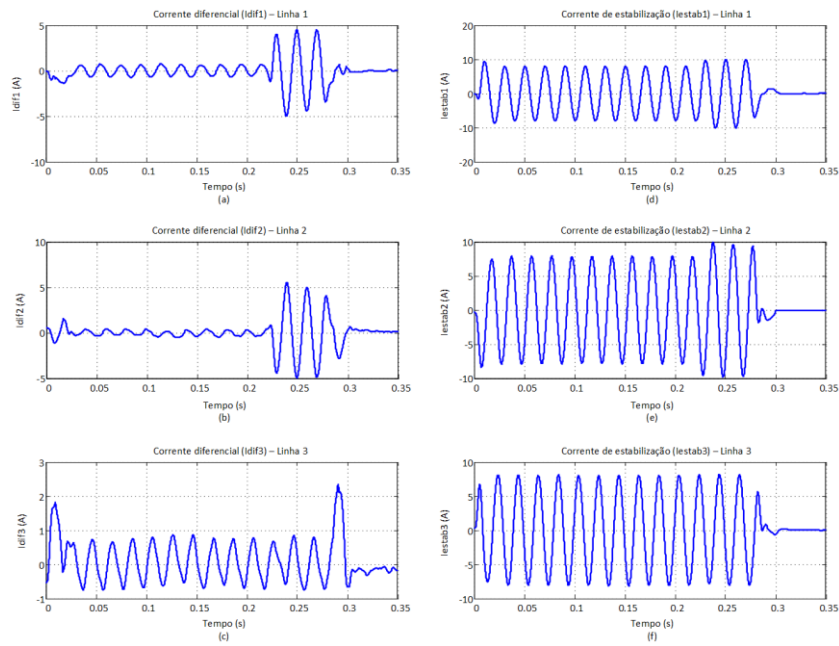


Figura AIV.10 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

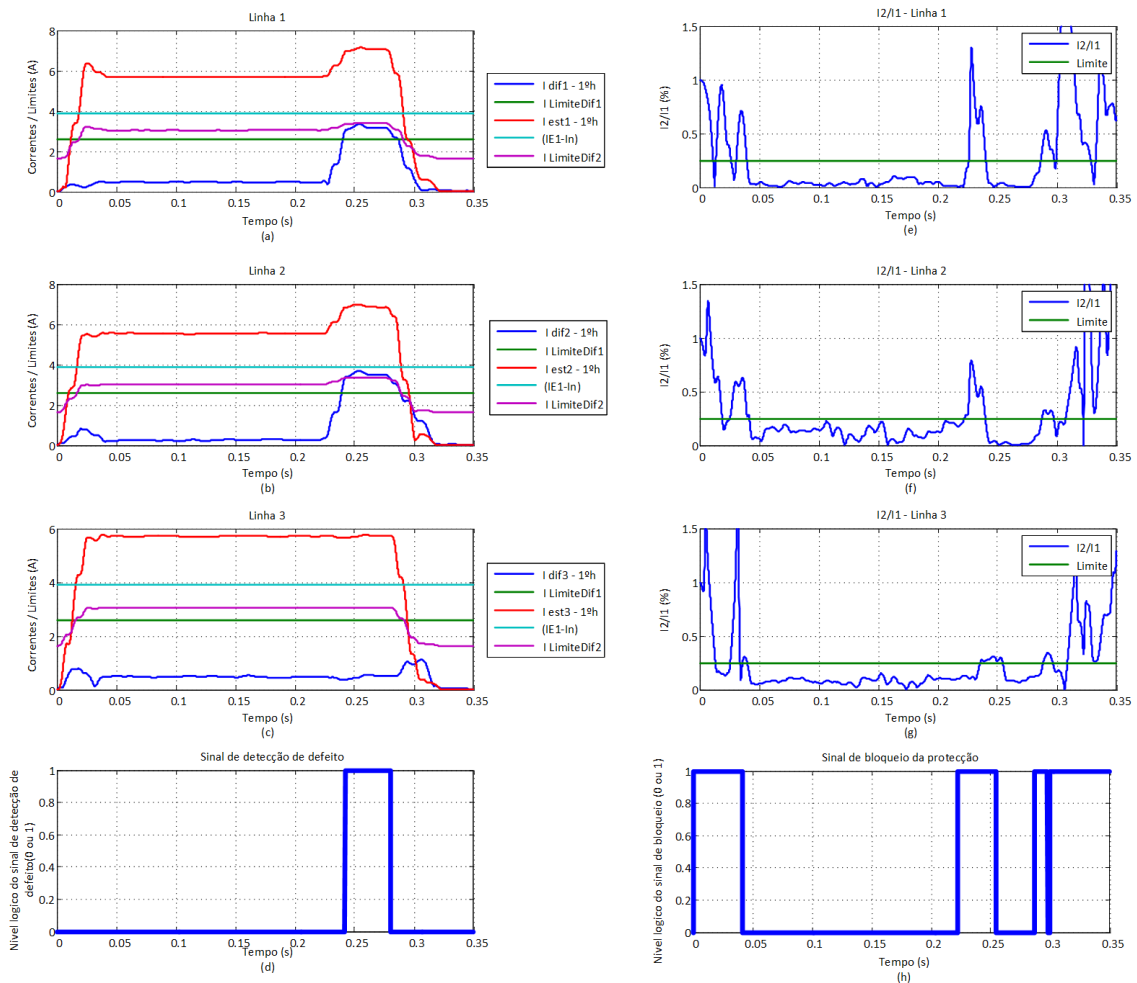


Figura AIV.11 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

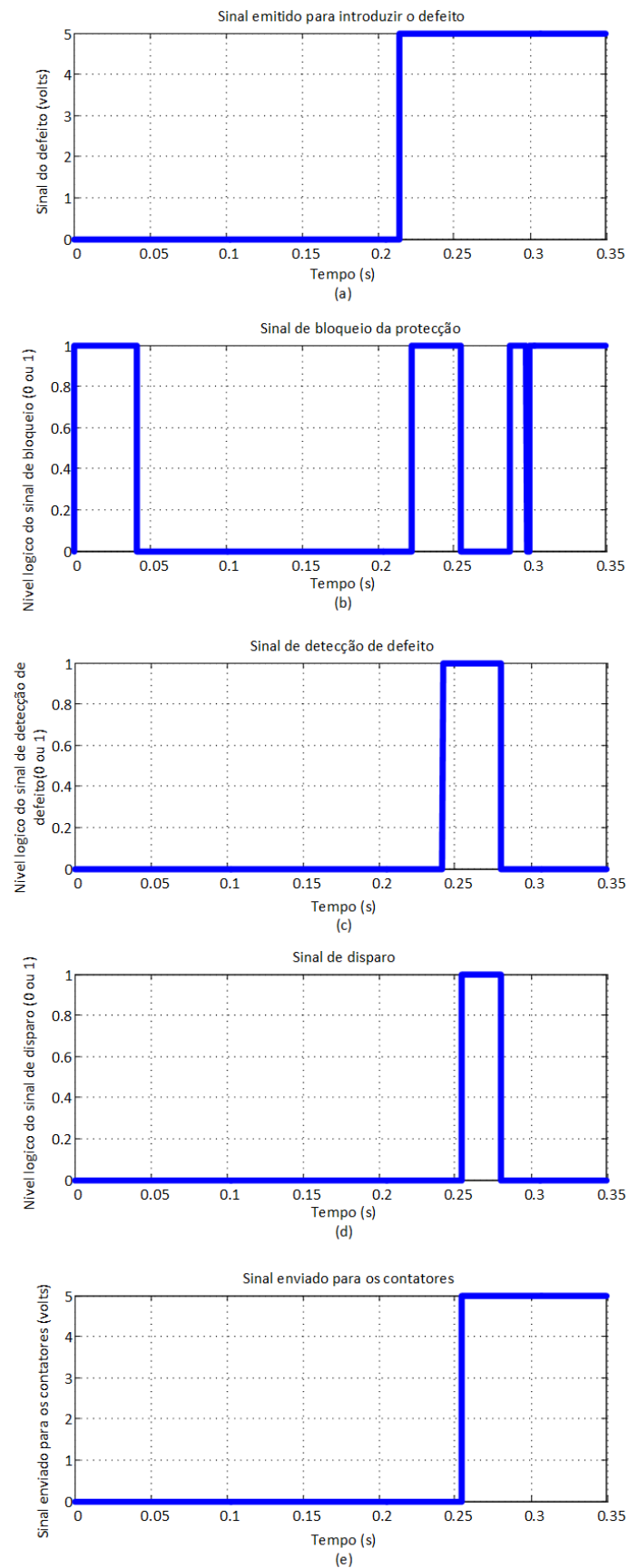


Figura AIV.12 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

### Ensaio 13: Introdução de defeito v-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$

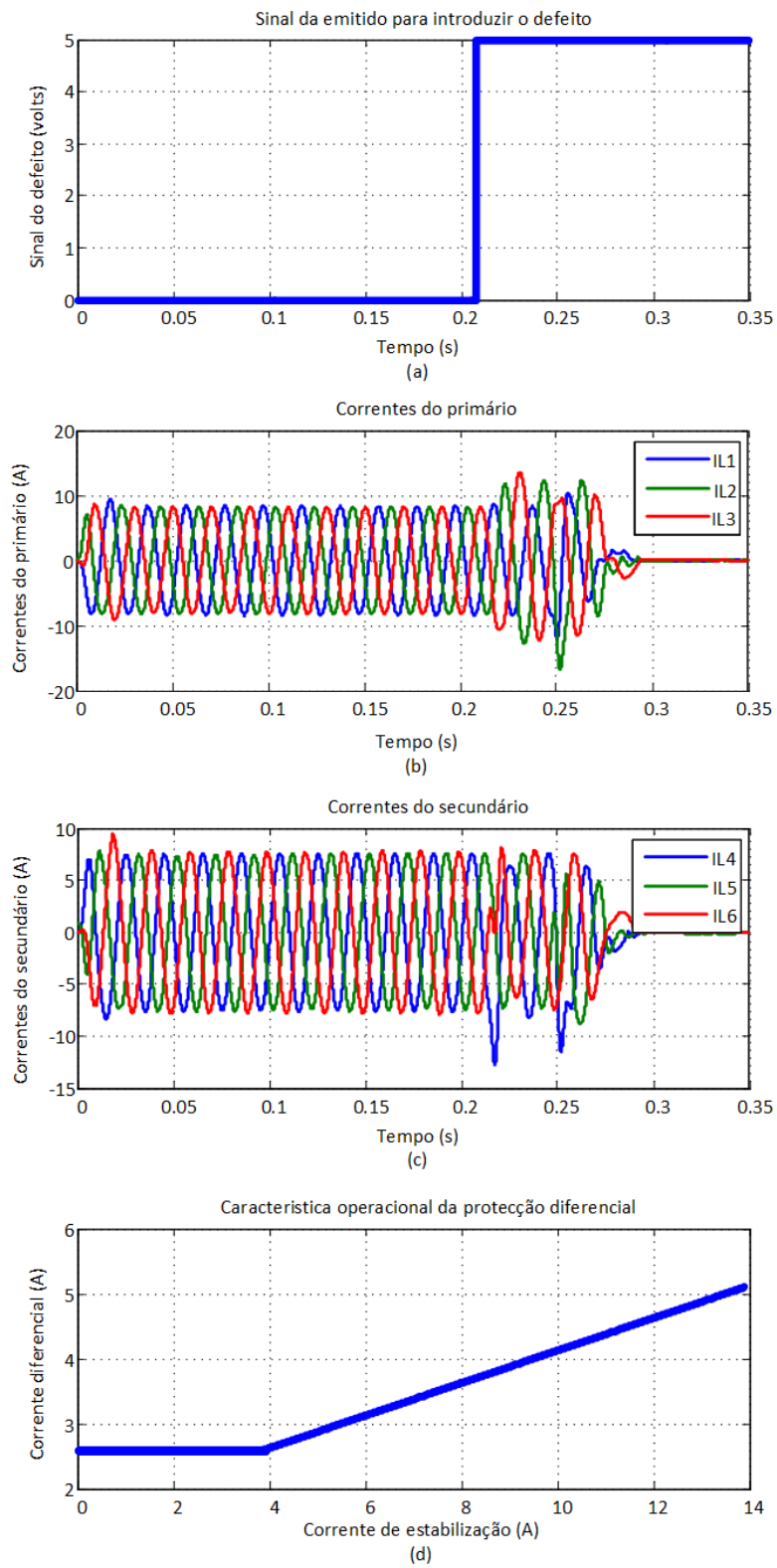


Figura AIV.13 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

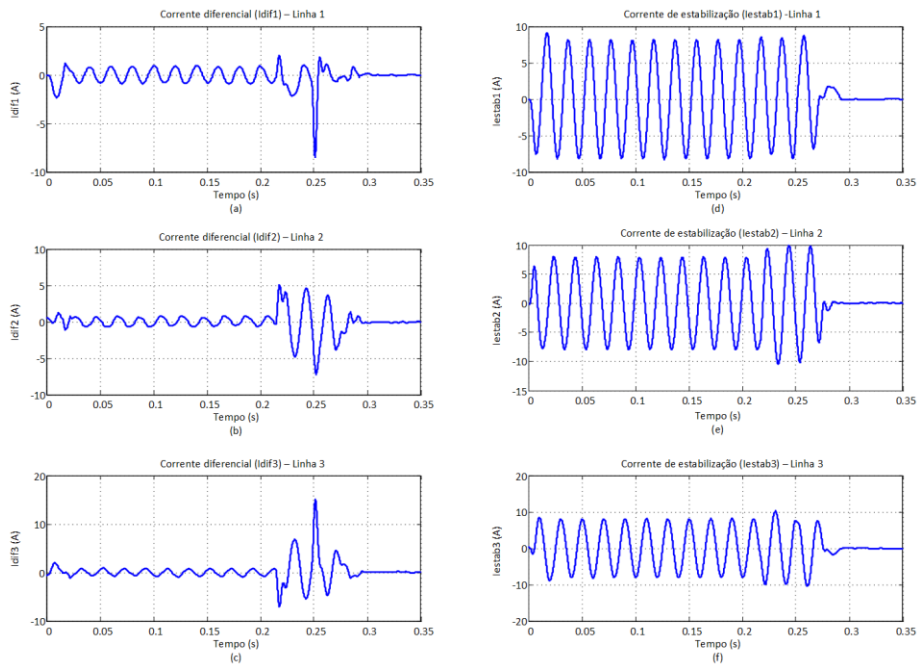


Figura AIV.14 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

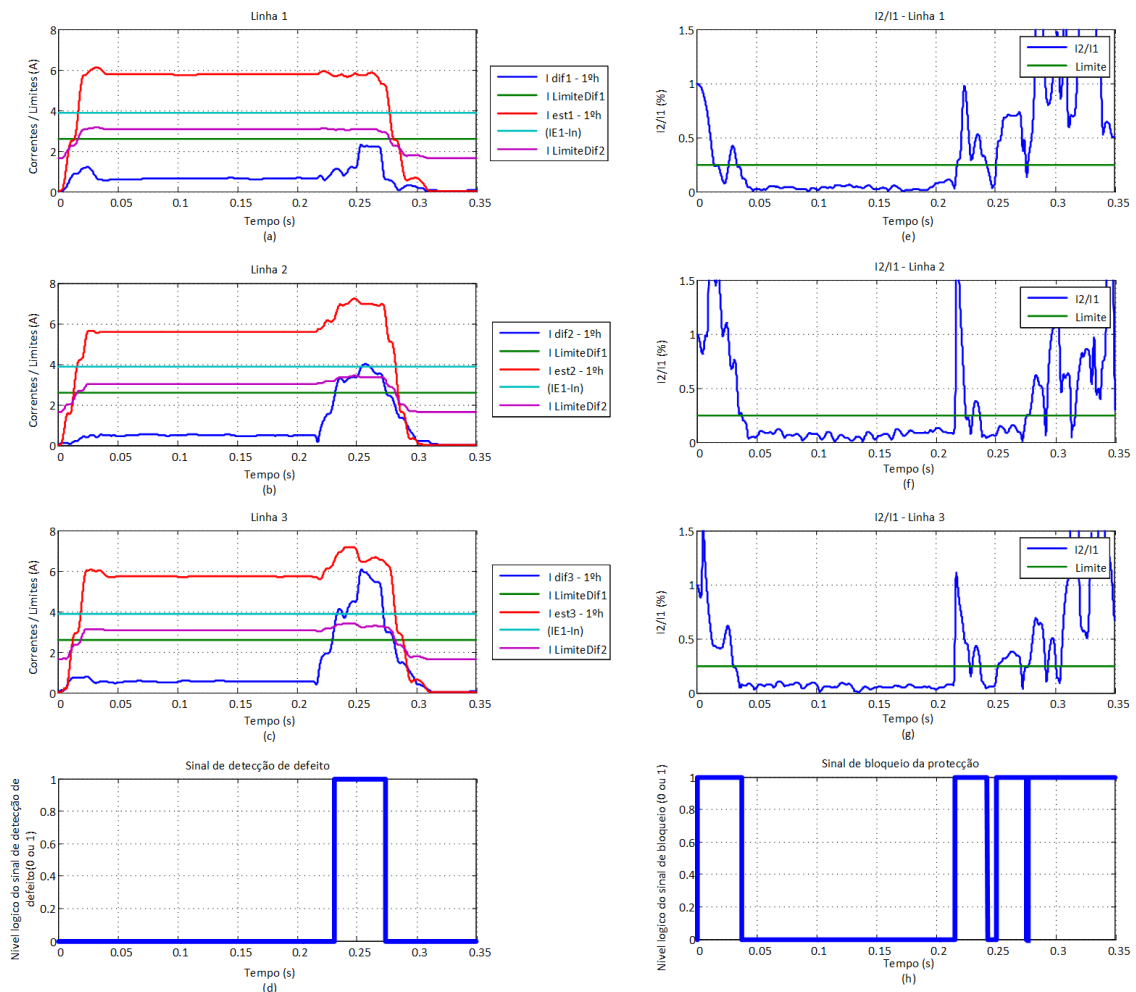


Figura AIV.15 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

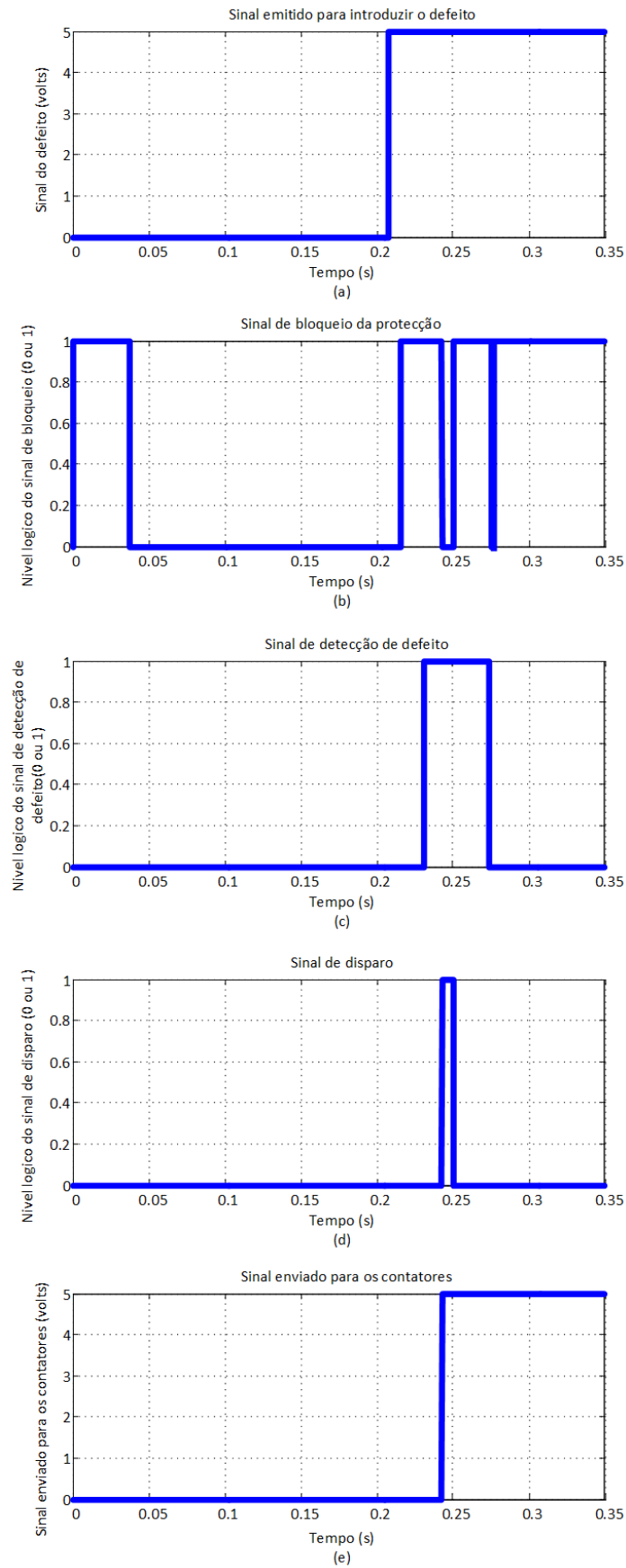


Figura AIV.16 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

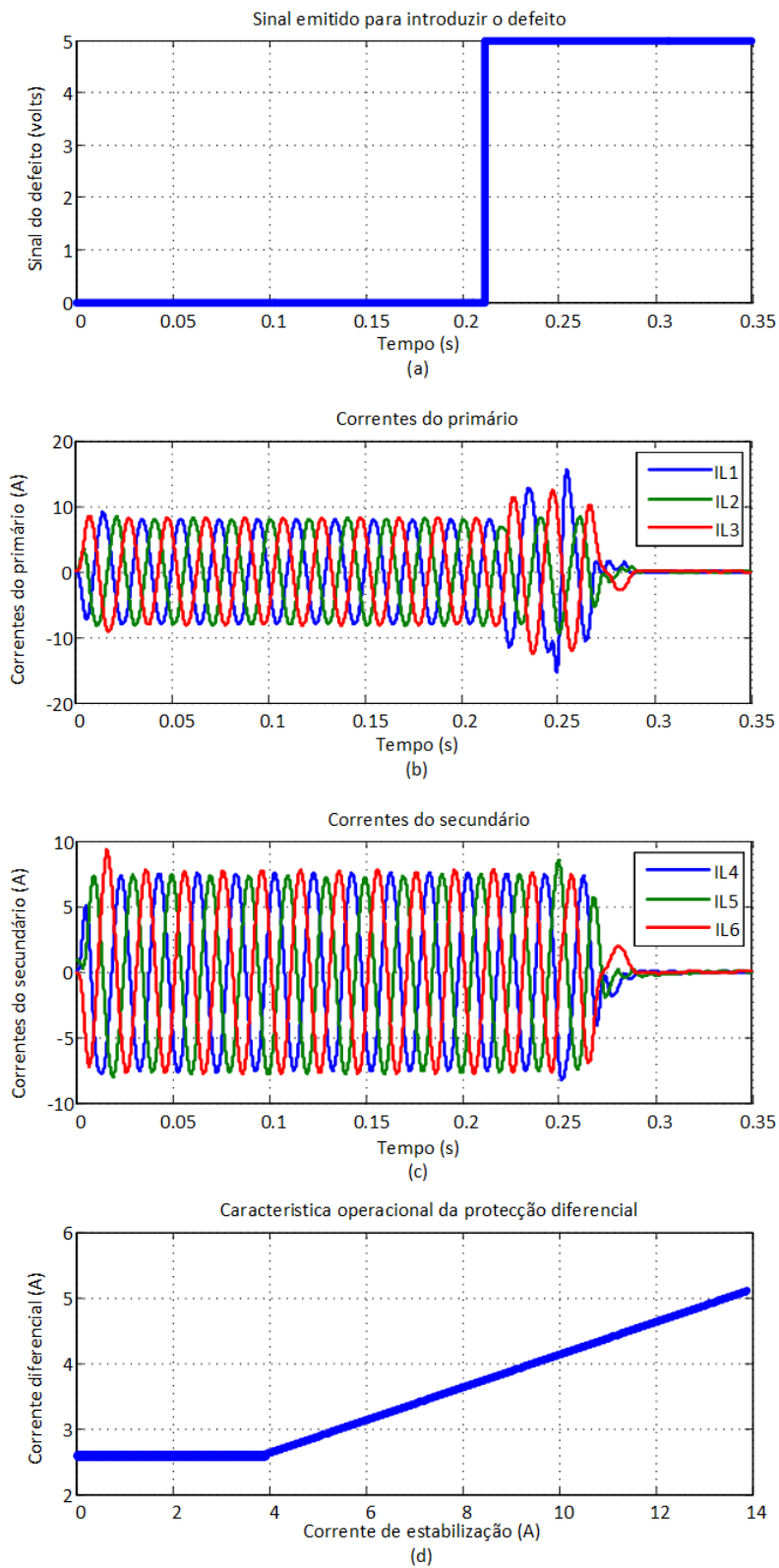
**Ensaio 14: Introdução de defeito w-n,  $R_{Falha} = 24 \Omega$** 

Figura AIV.17 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

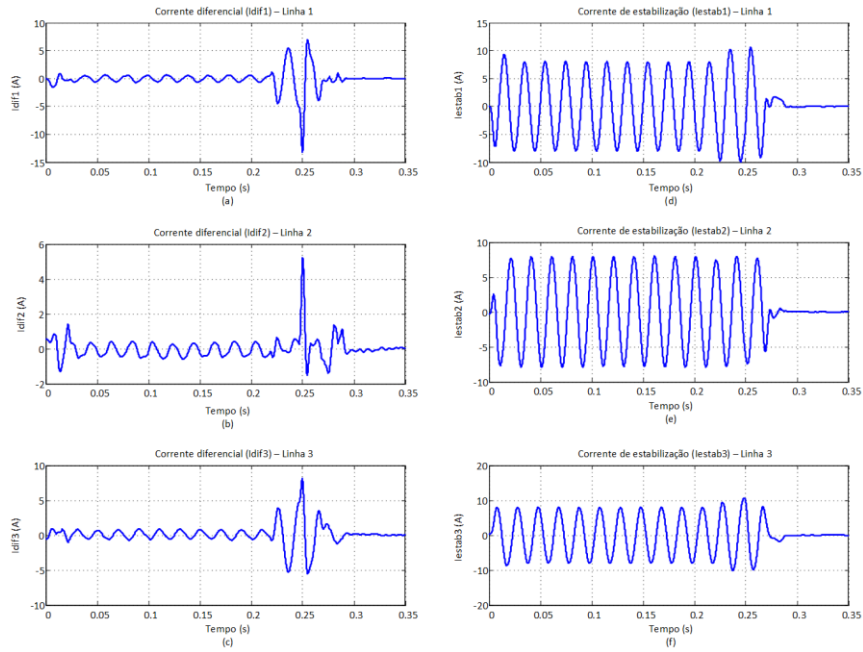


Figura AIV.18 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

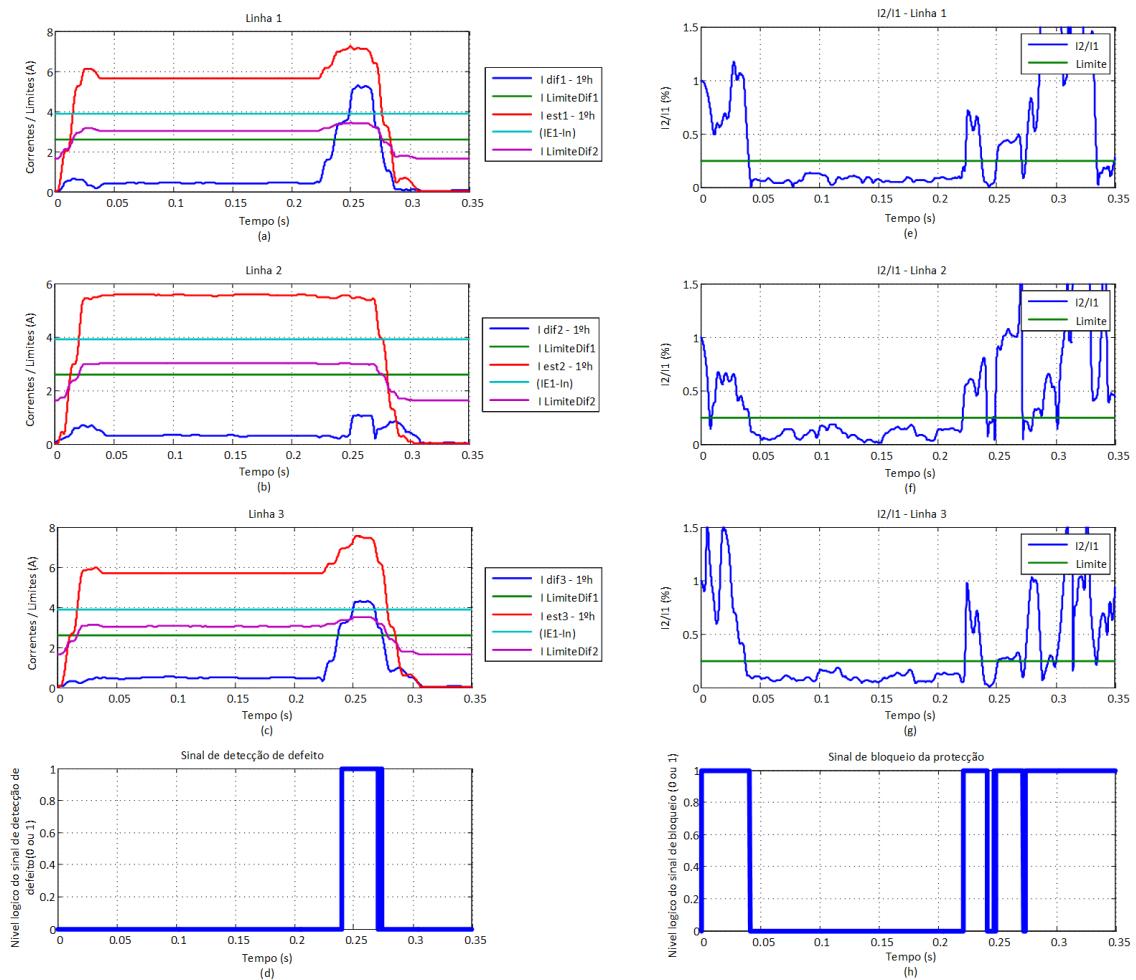


Figura AIV.19 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

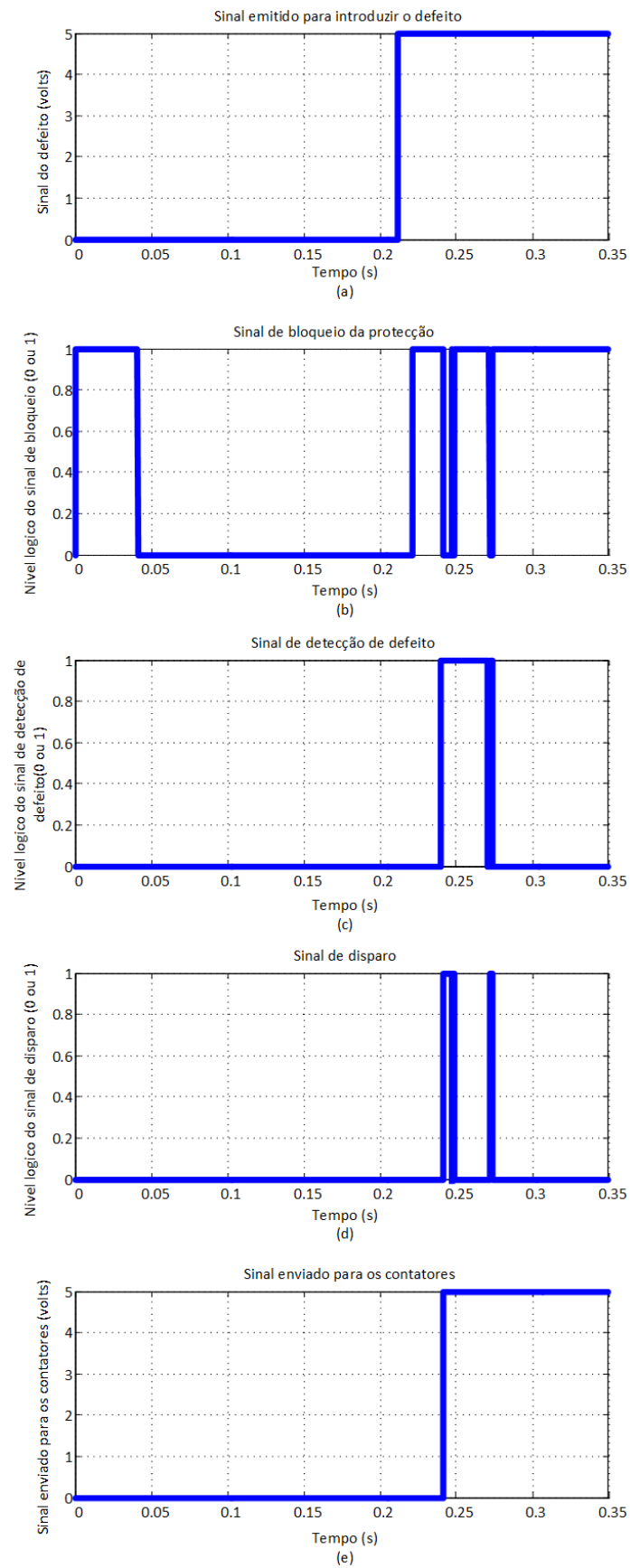


Figura AIV.20 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

### Ensaio 15: Introdução de defeito B-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$

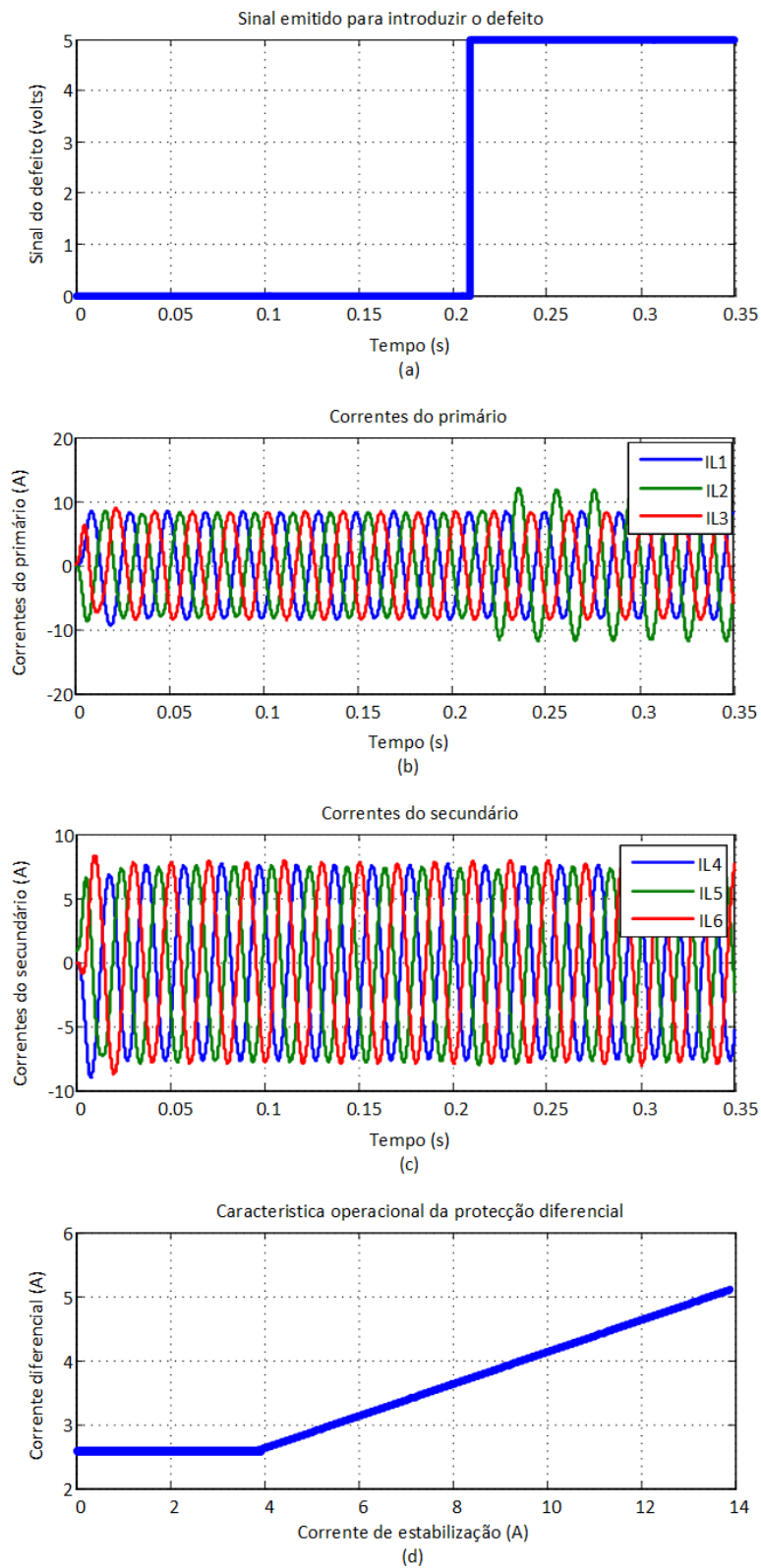


Figura AIV.21 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

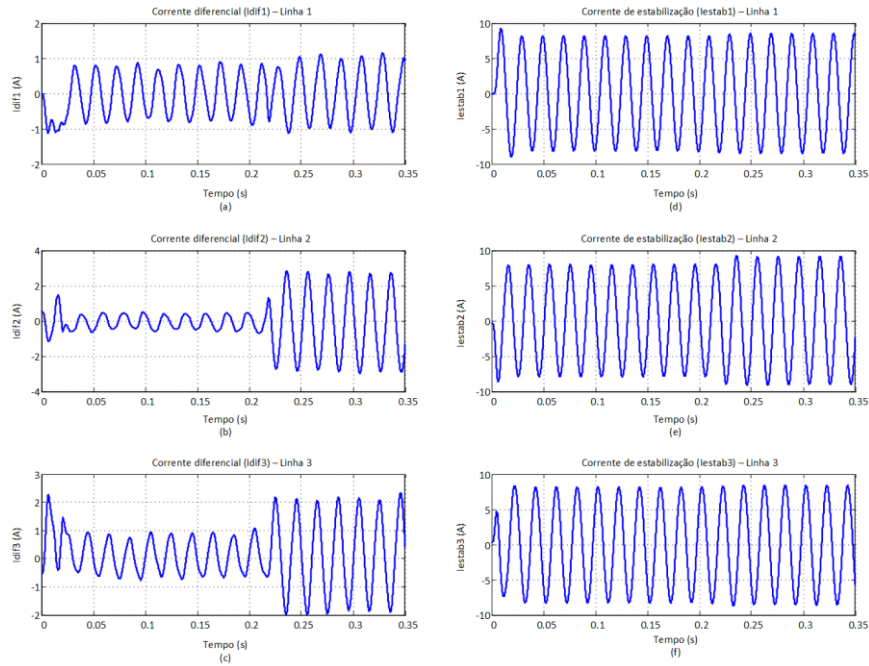


Figura AIV.22 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

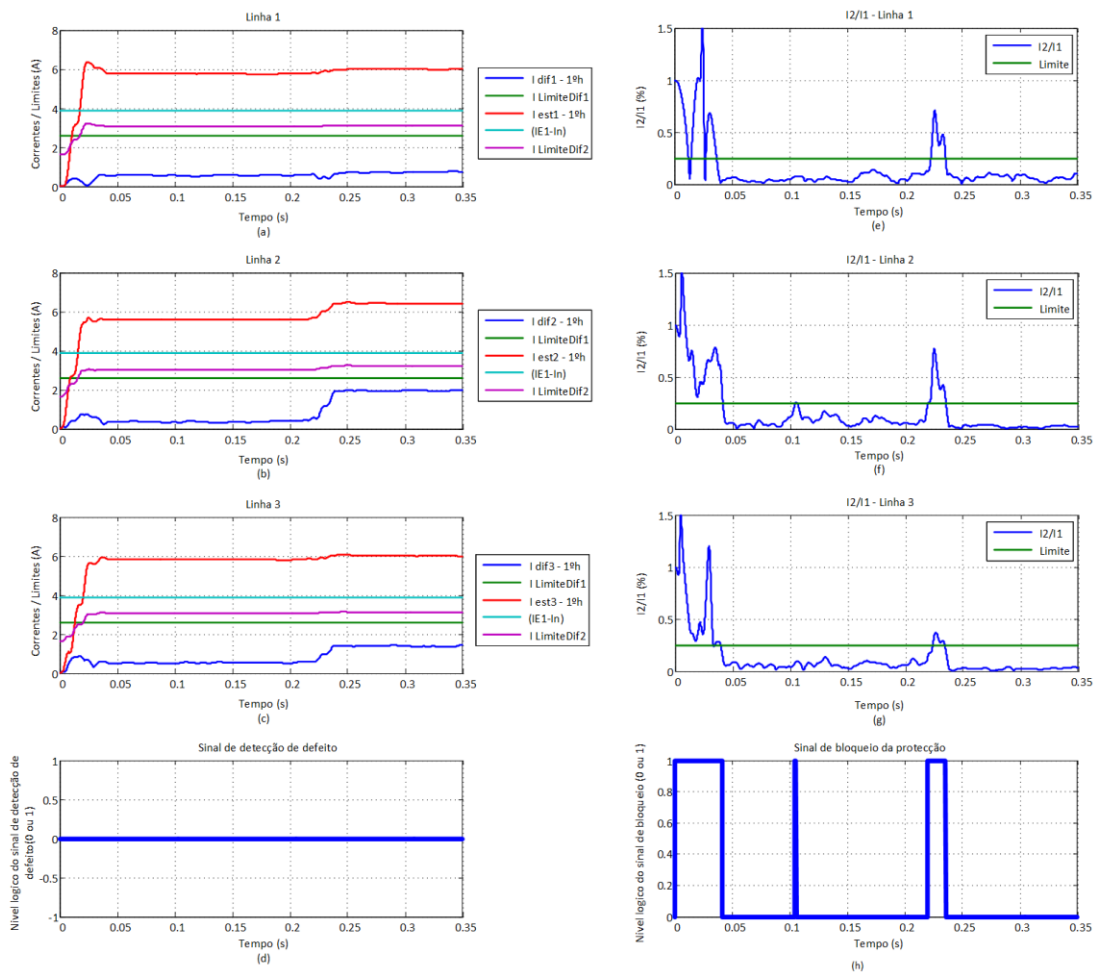


Figura AIV.23 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

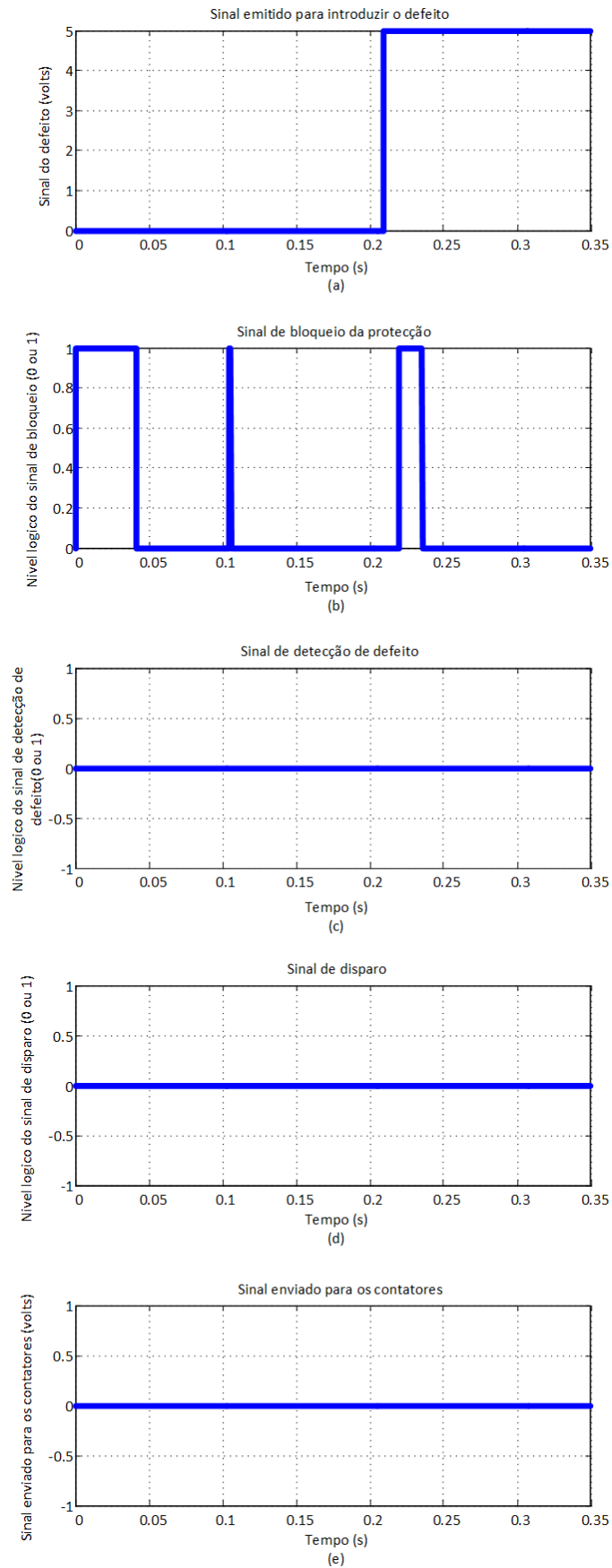


Figura AIV.24 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

## Ensaio 16: Introdução de defeito C-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$

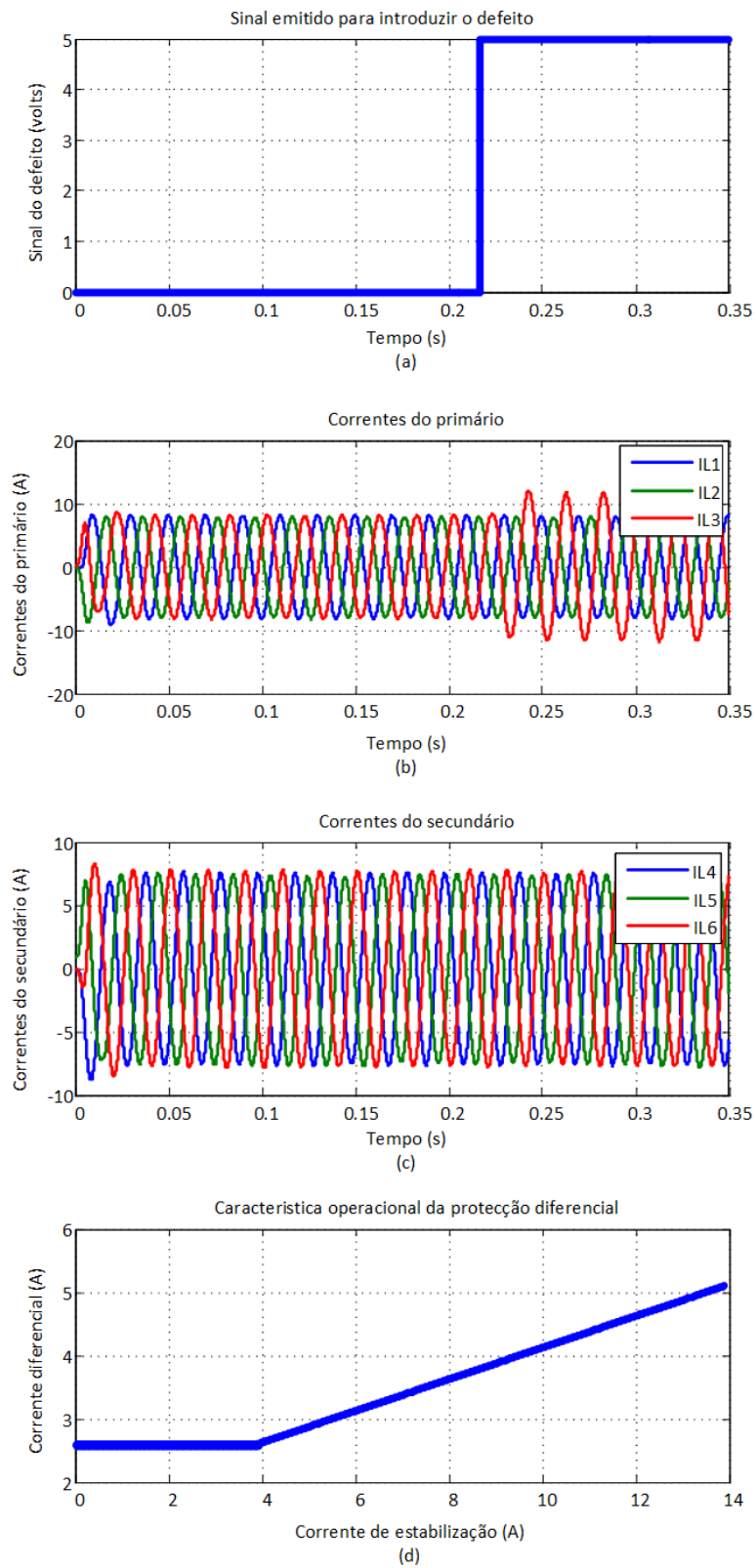


Figura AIV.25 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

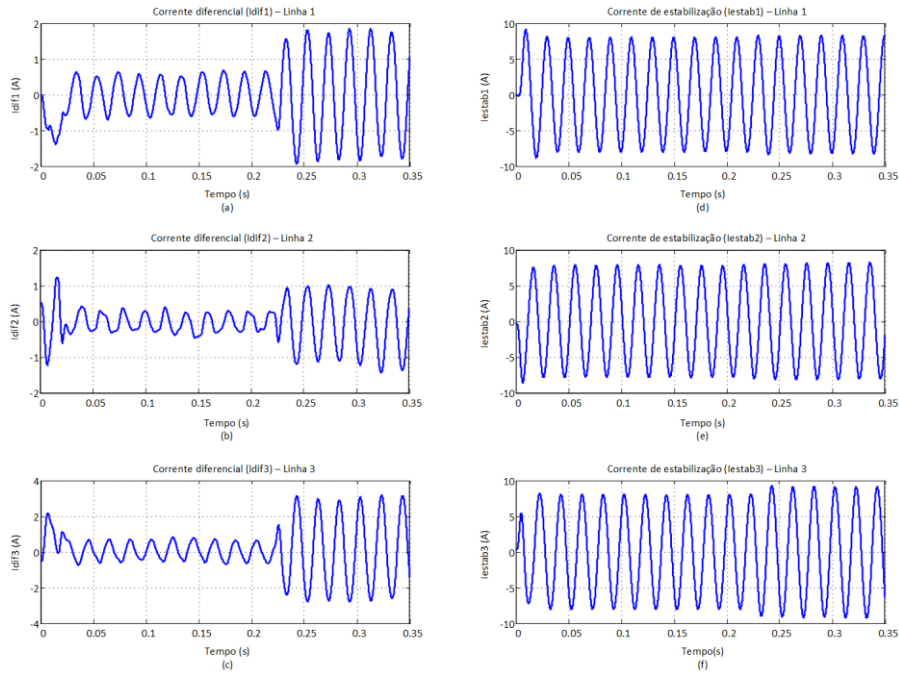


Figura AIV.26 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

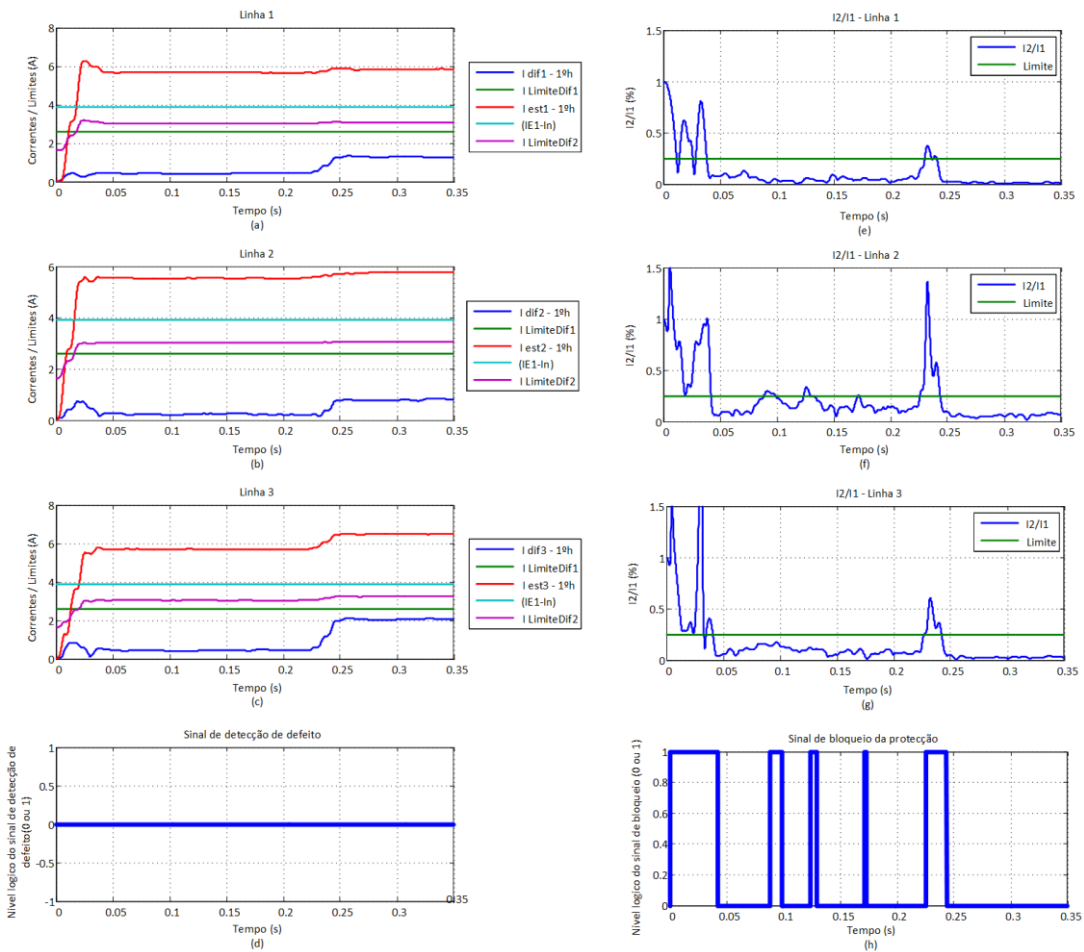


Figura AIV.27 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

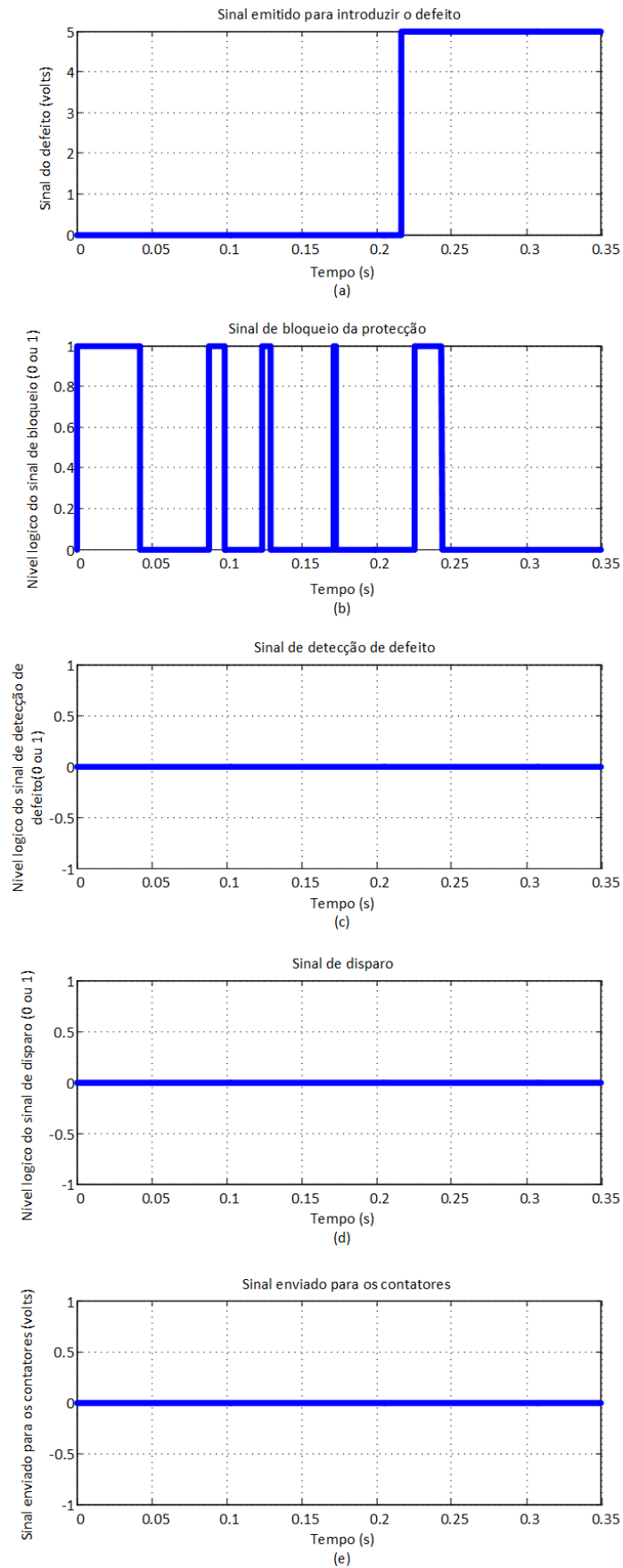


Figura AIV.28 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

### Ensaio 17: Introdução de defeito u-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$

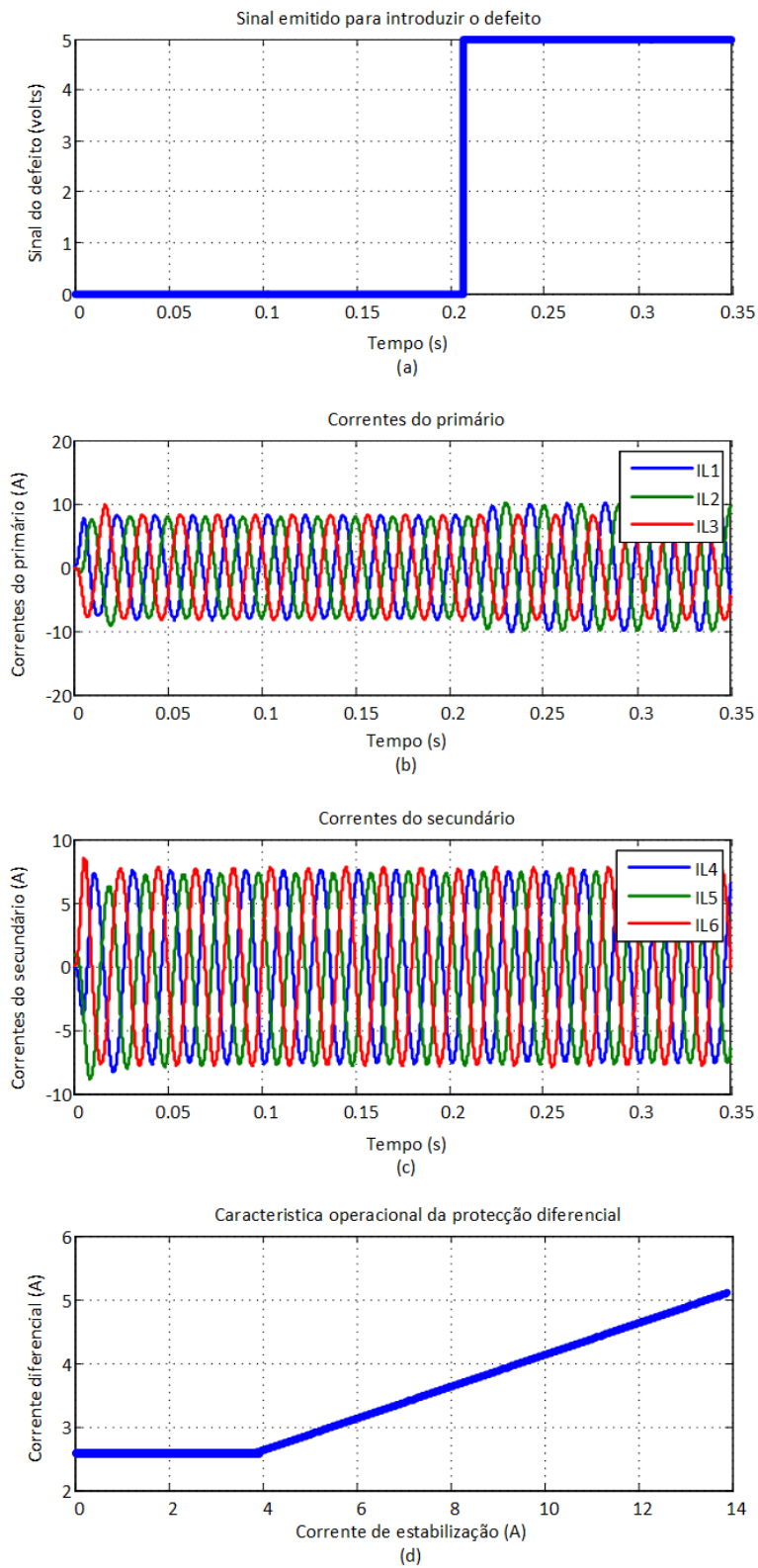


Figura AIV.29 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

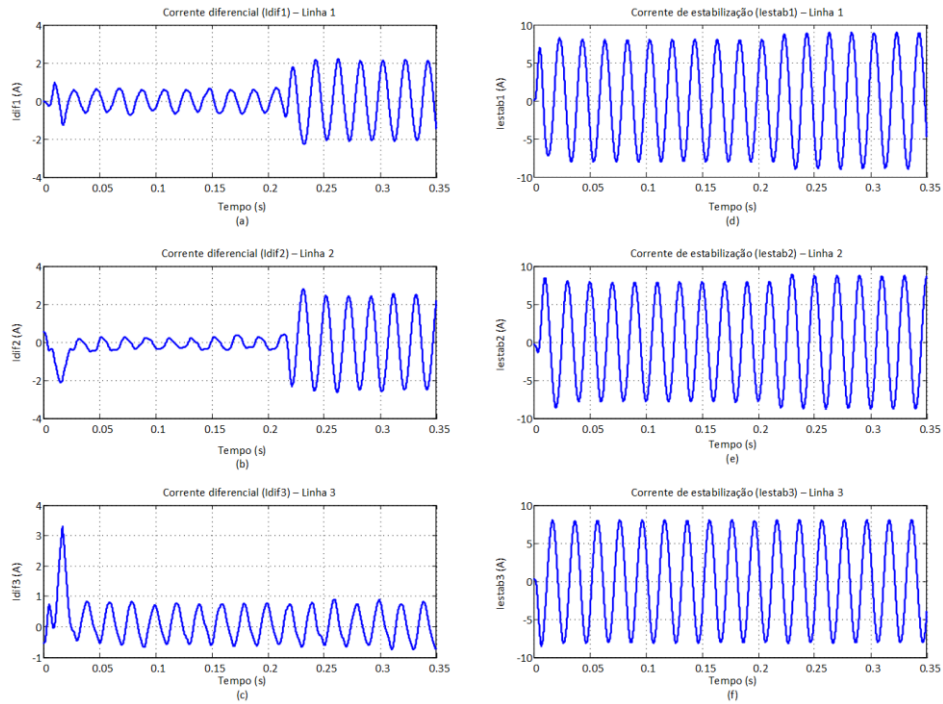


Figura AIV.30 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

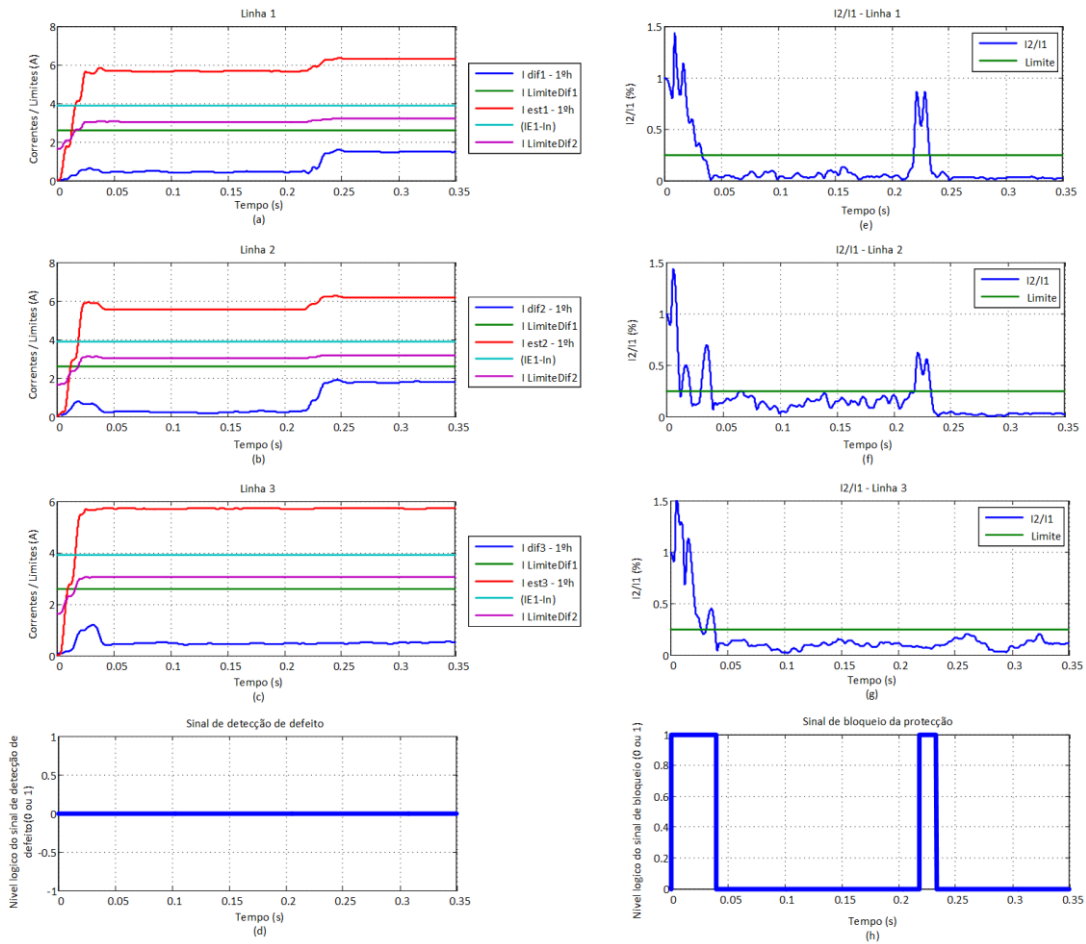


Figura AIV.31 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

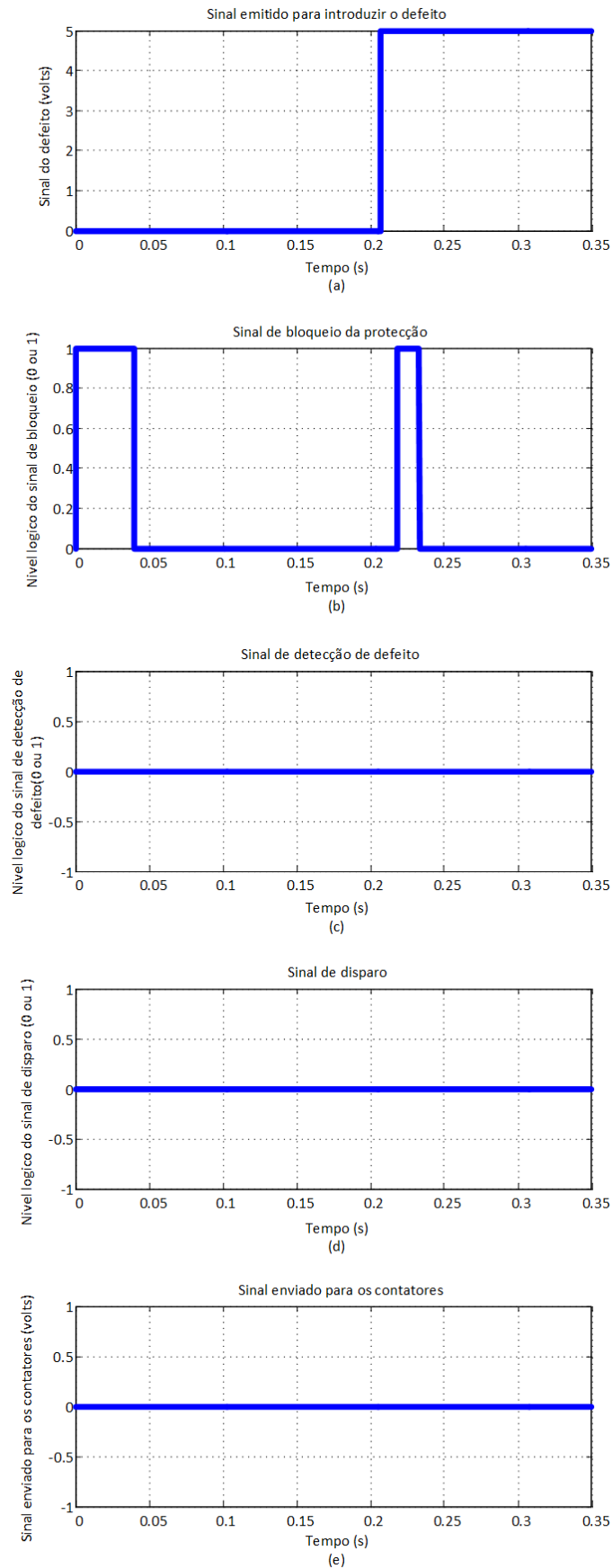


Figura AIV.32 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

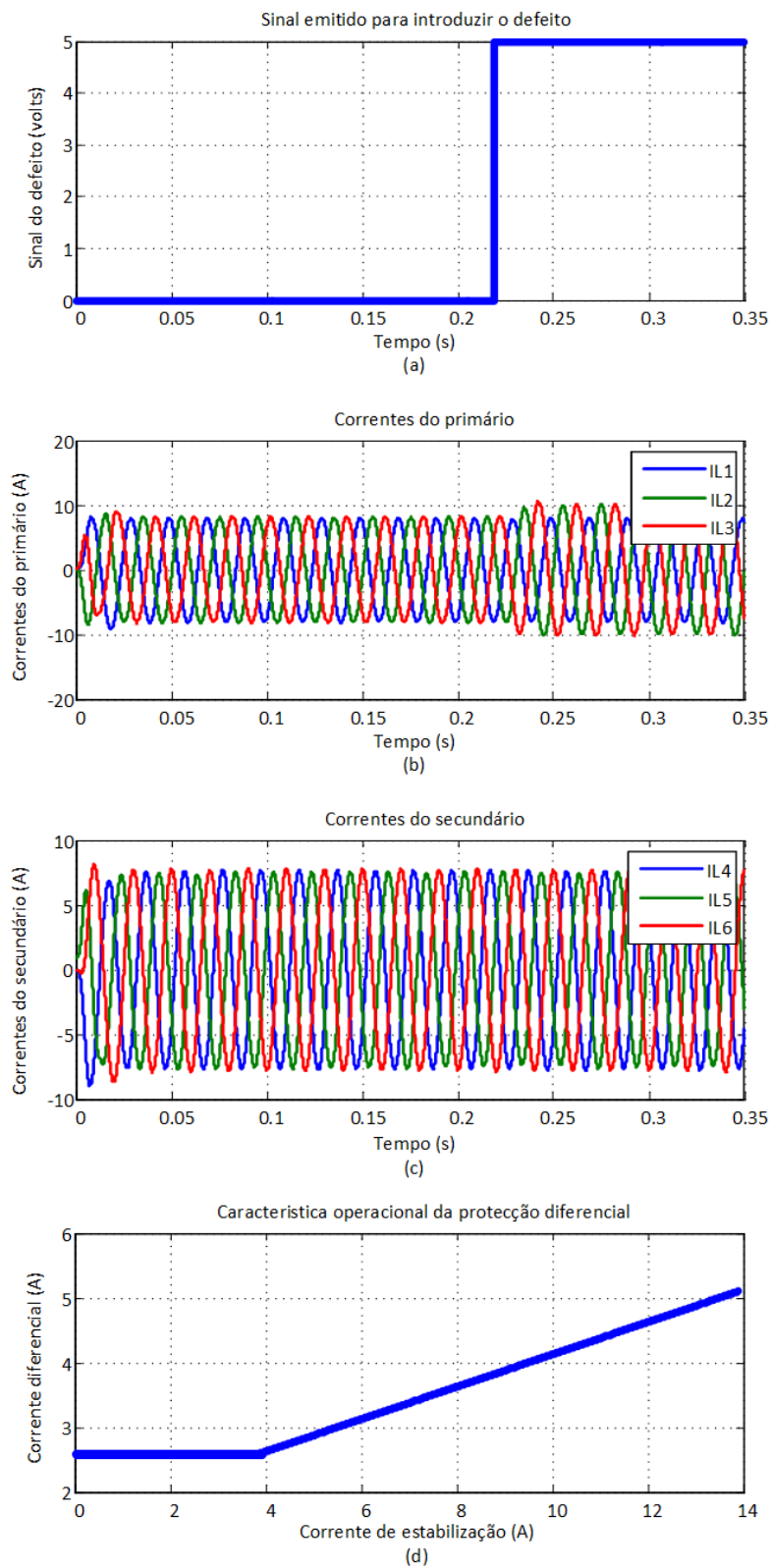
**Ensaio 18: Introdução de defeito v-n,  $R_{Falha} = 48 \Omega$** 

Figura AIV.33 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

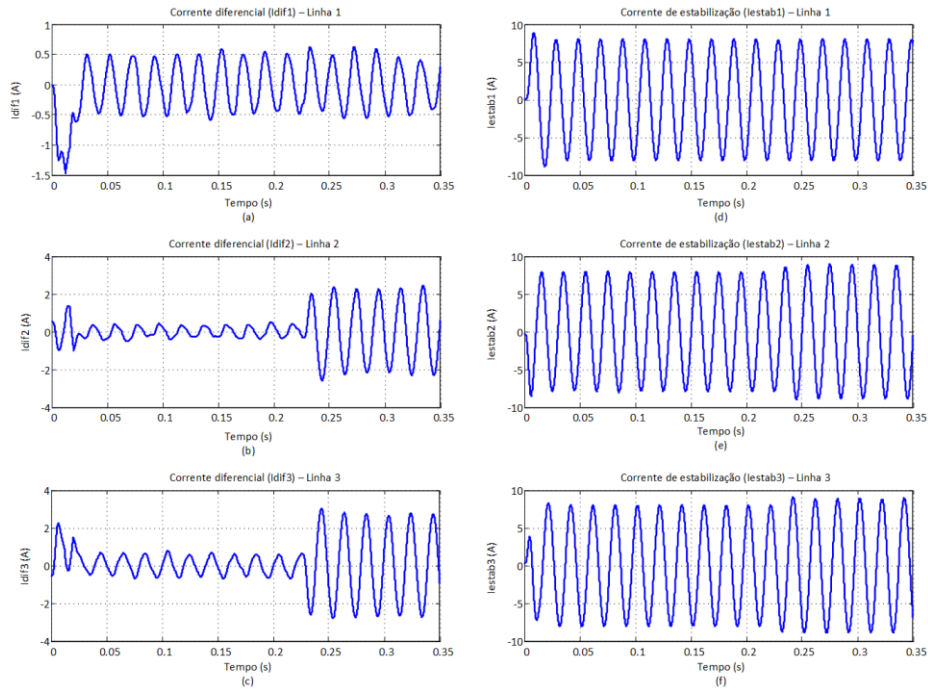


Figura AIV.34 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

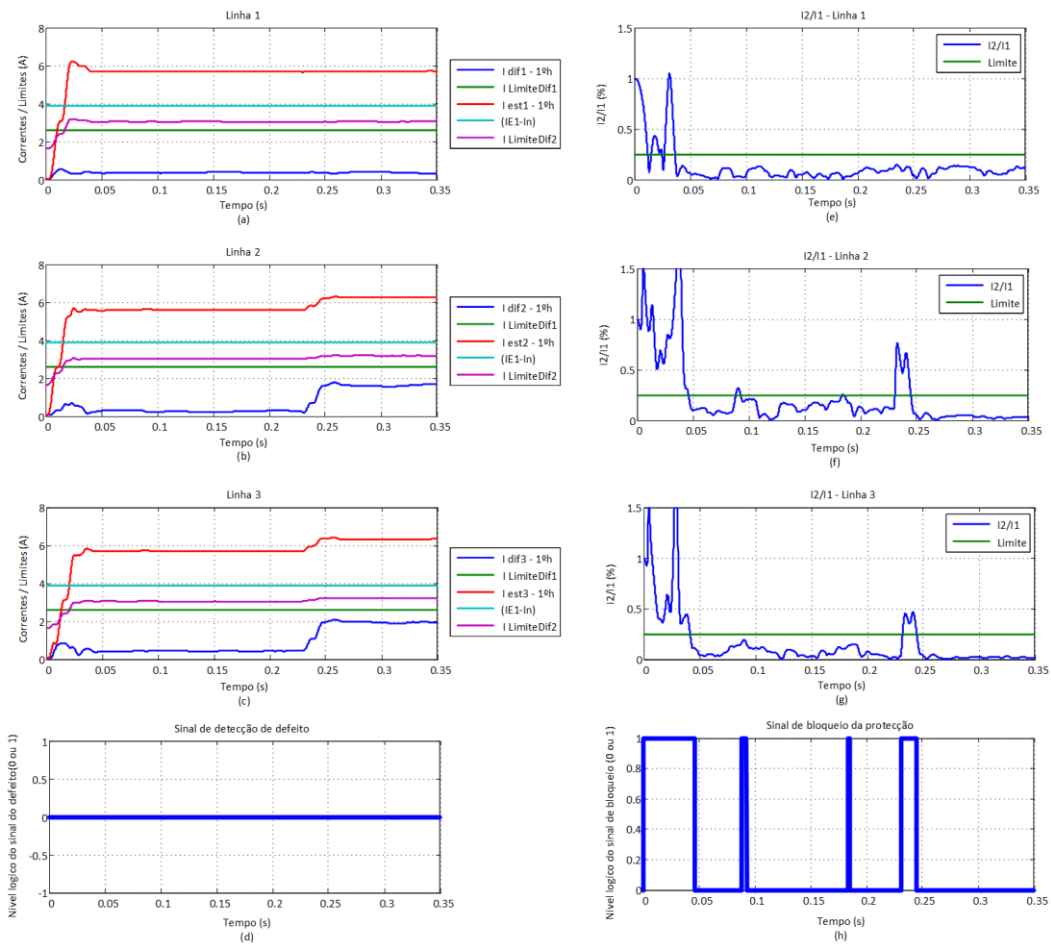


Figura AIV.35 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

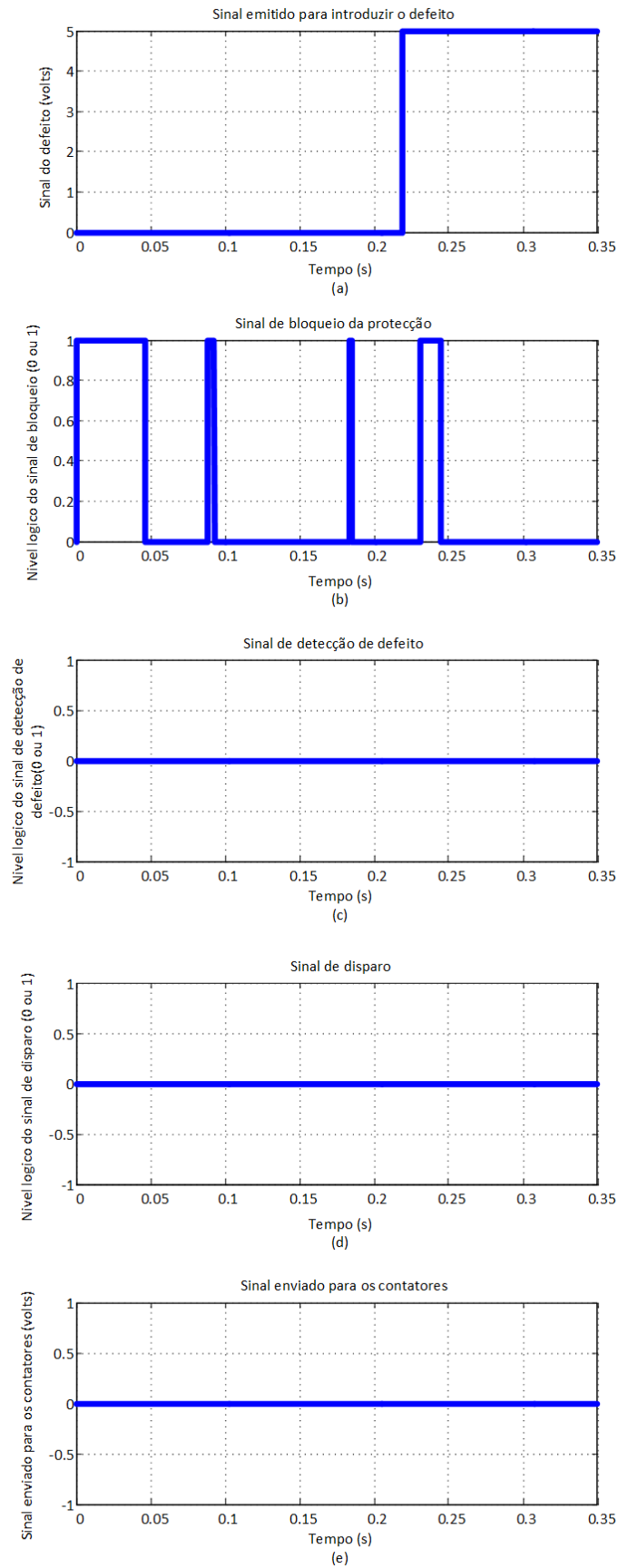


Figura AIV.36 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

## Ensaio 19: Introdução de defeito w-n, $R_{Falha} = 48 \Omega$

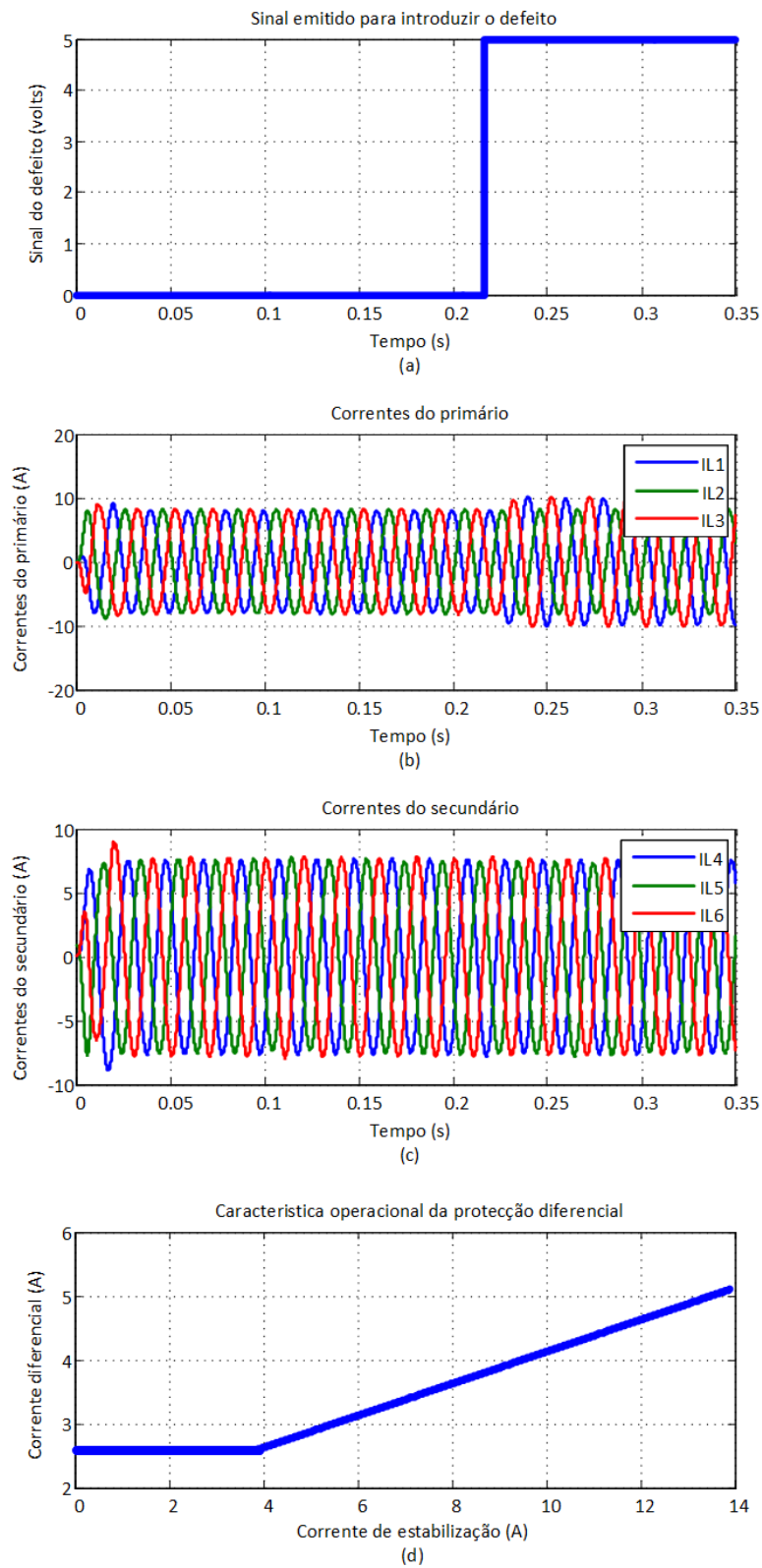


Figura AIV.37 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

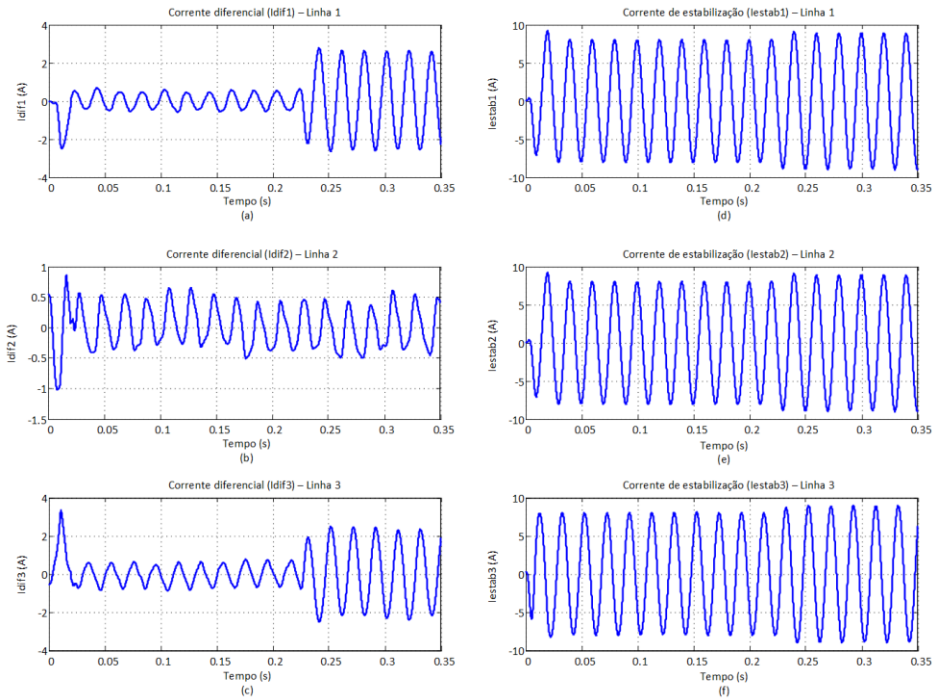


Figura AIV.38 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

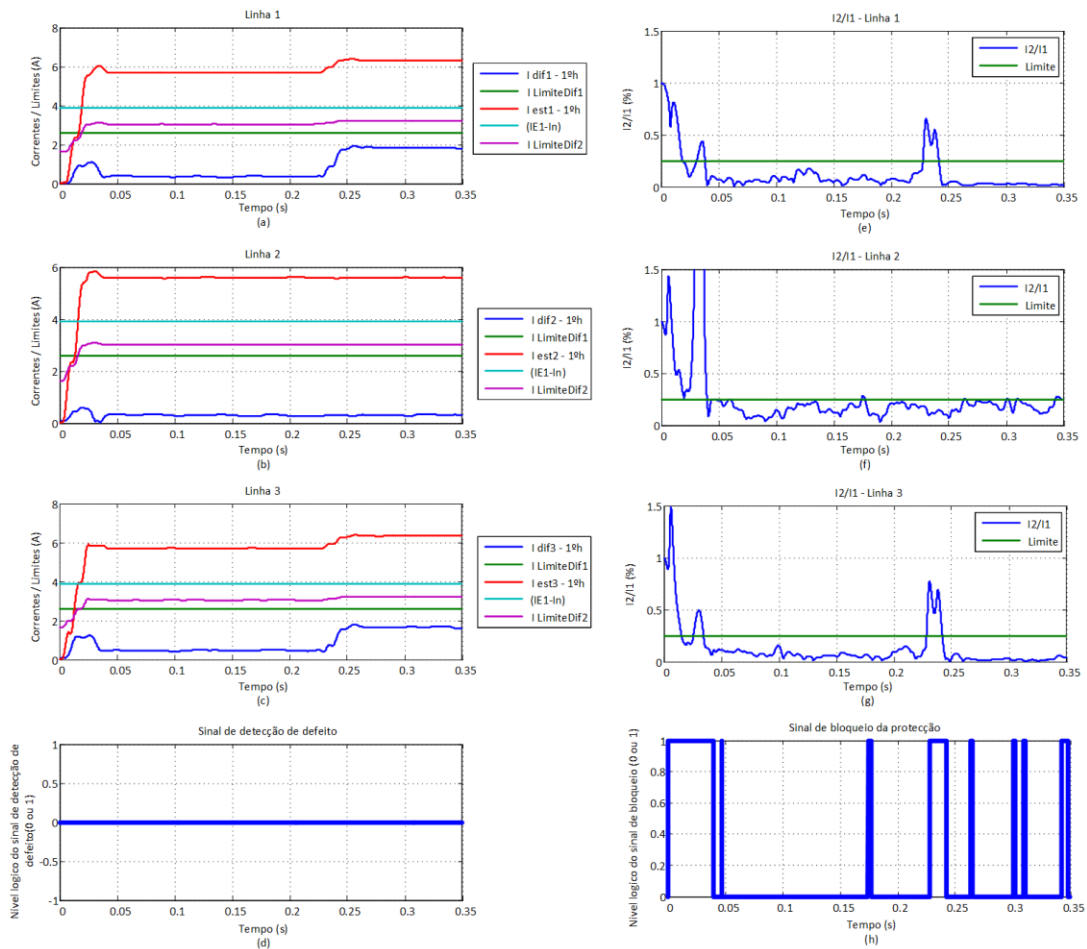


Figura AIV.39 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

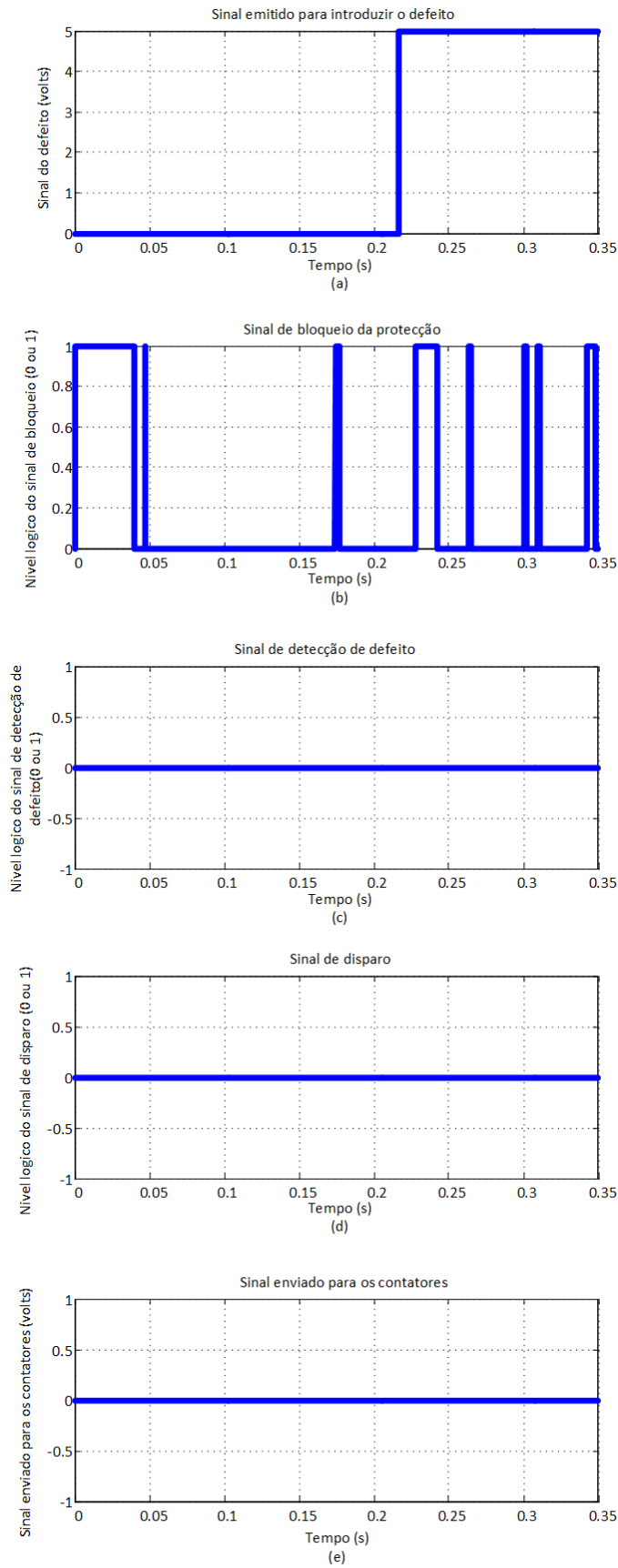


Figura AIV.40 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

## Ensaio 20: Introdução de defeito B-C, $R_{Falha} = 64 \Omega$

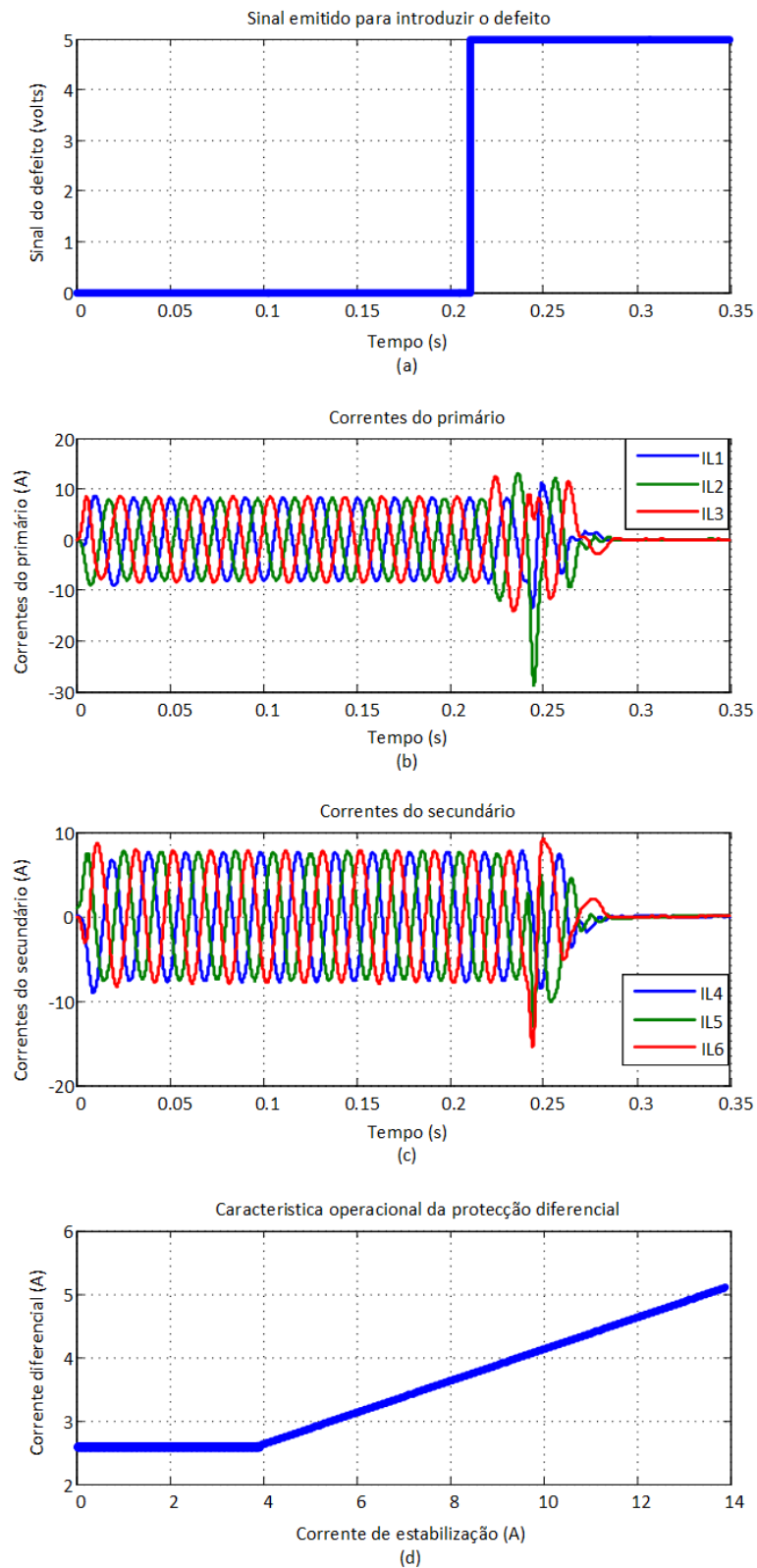


Figura AIV.41 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

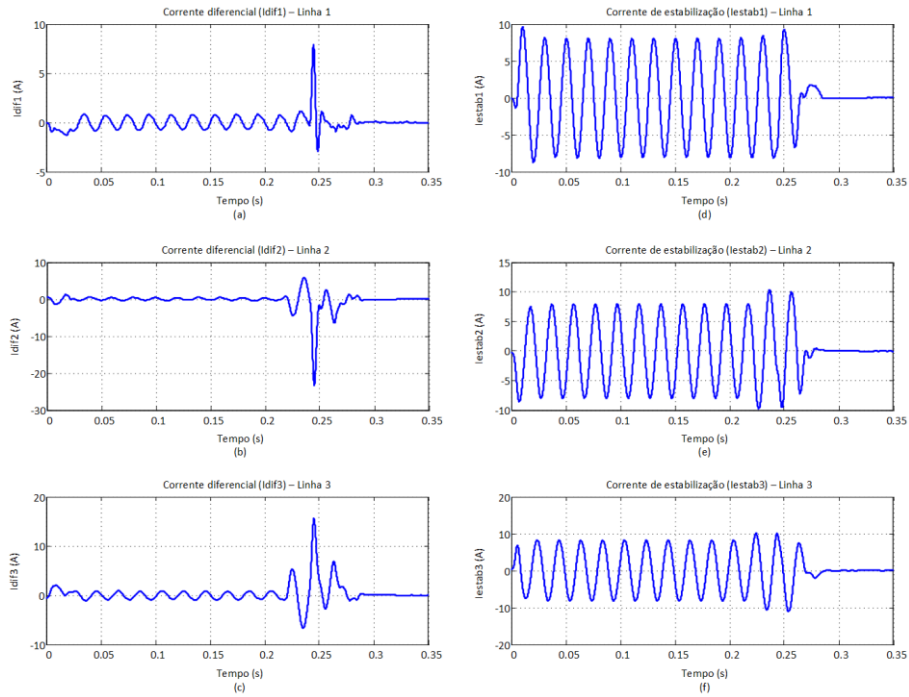


Figura AIV.42 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

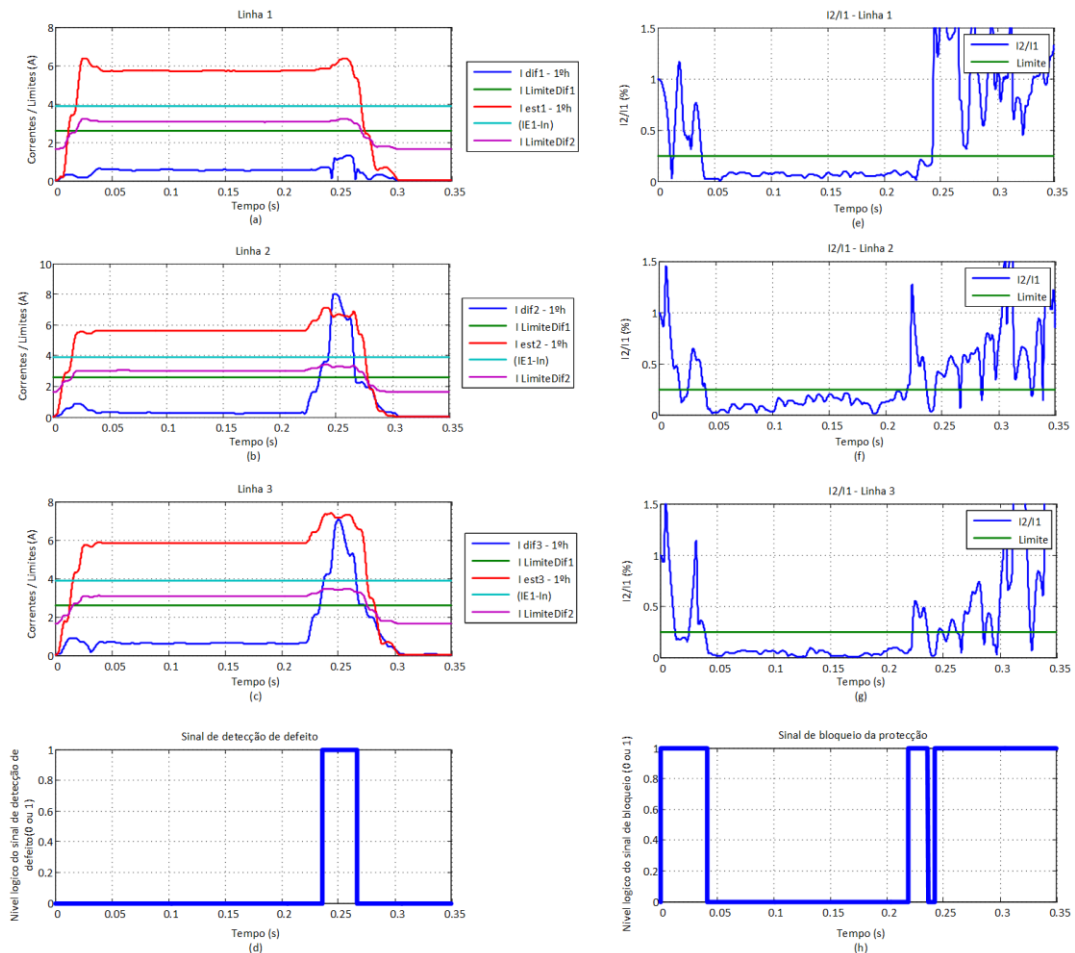


Figura AIV.43 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

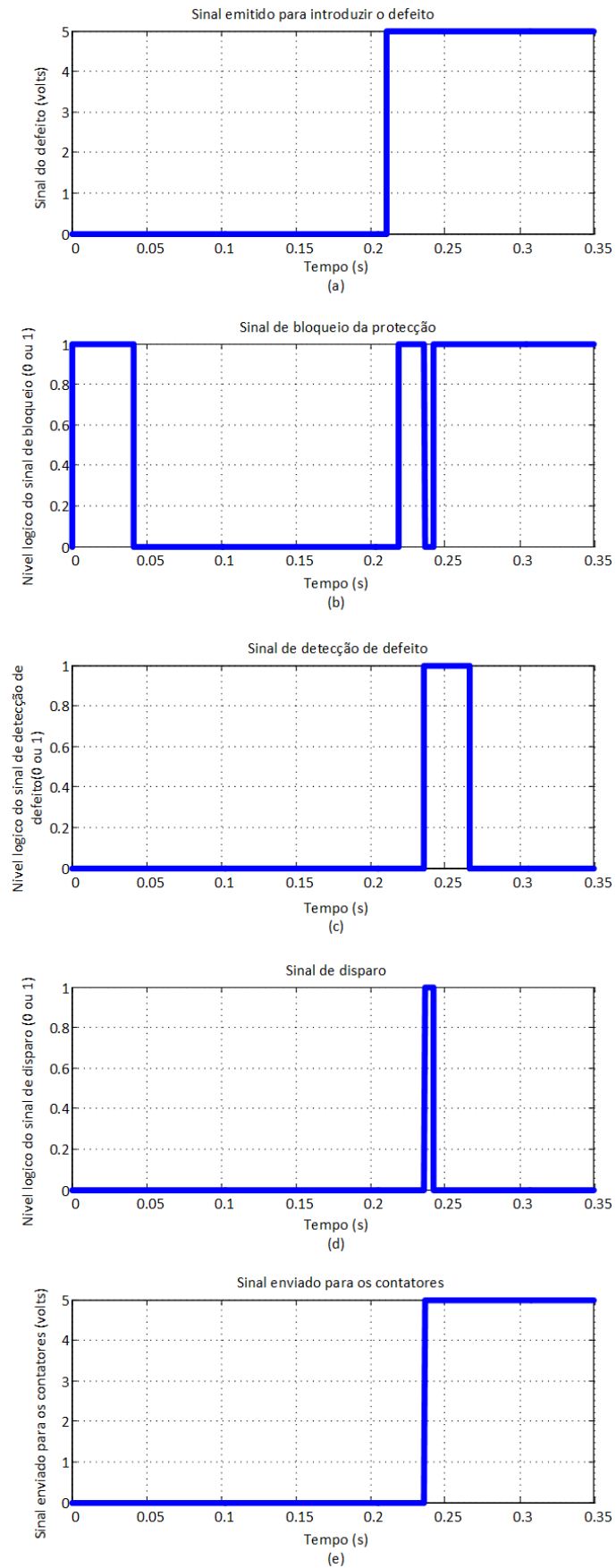


Figura AIV.44 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

## Ensaio 21: Introdução de defeito C-A, $R_{Falha} = 64 \Omega$

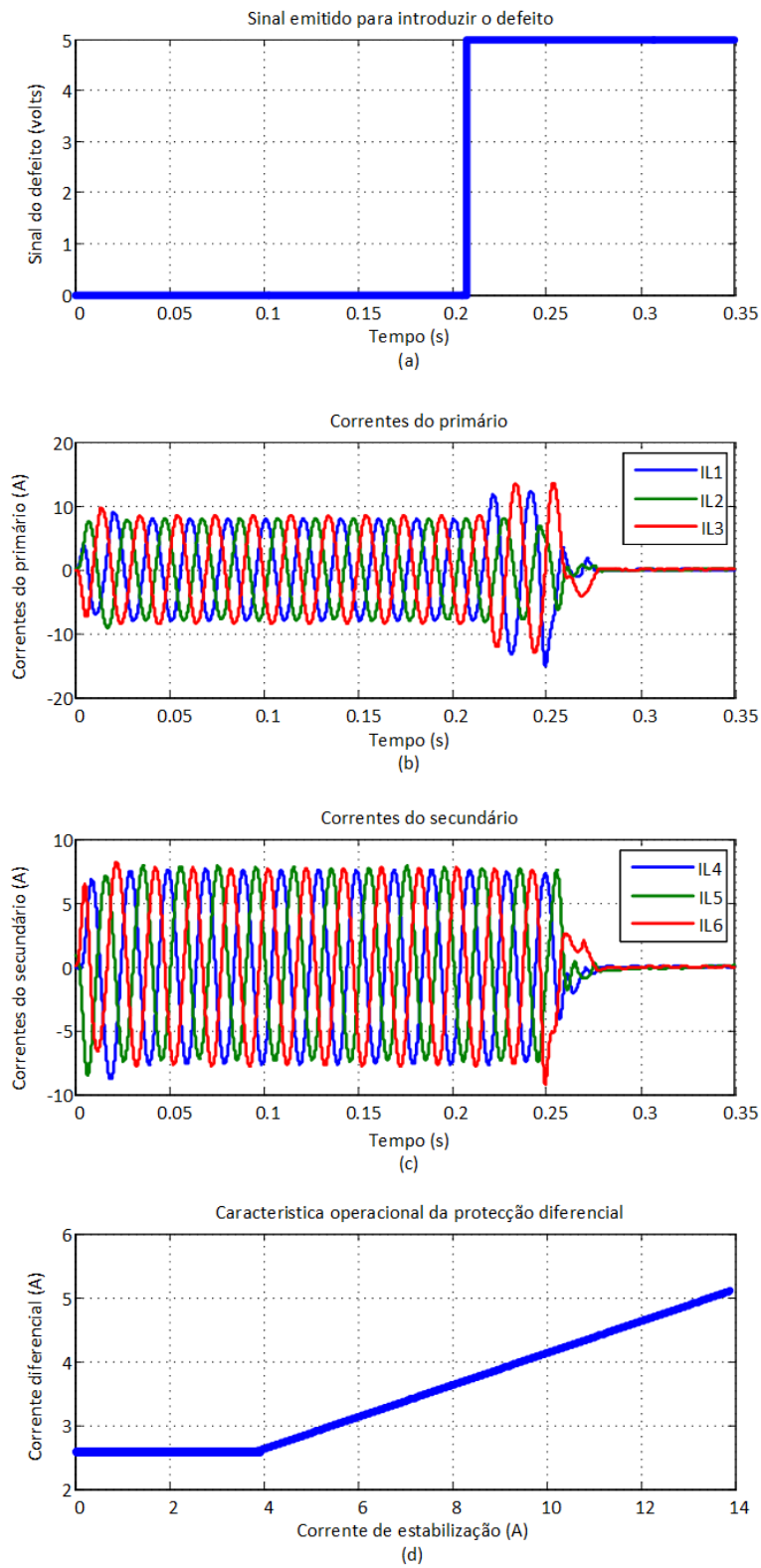


Figura AIV.45 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

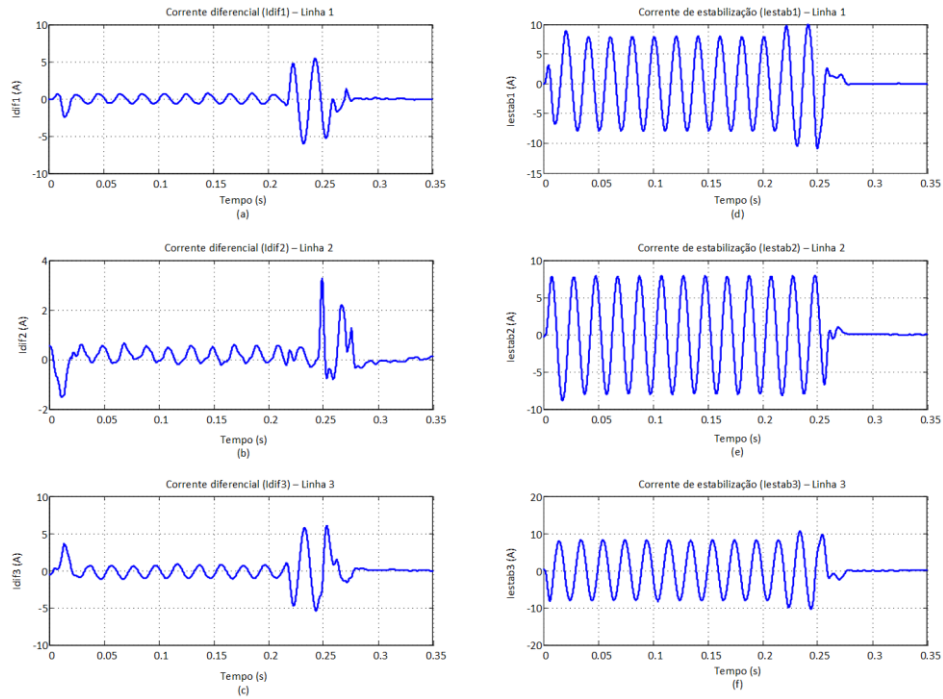


Figura AIV.46 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

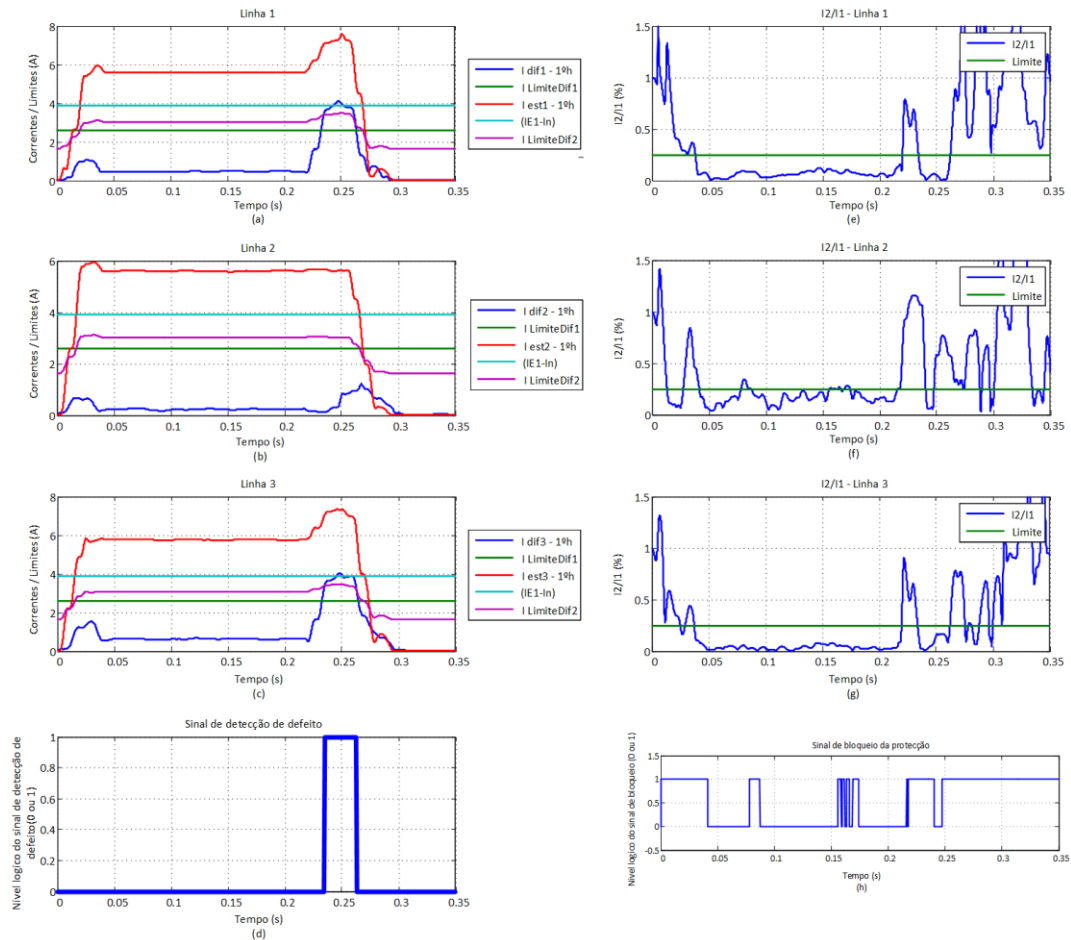


Figura AIV.47 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da proteção.

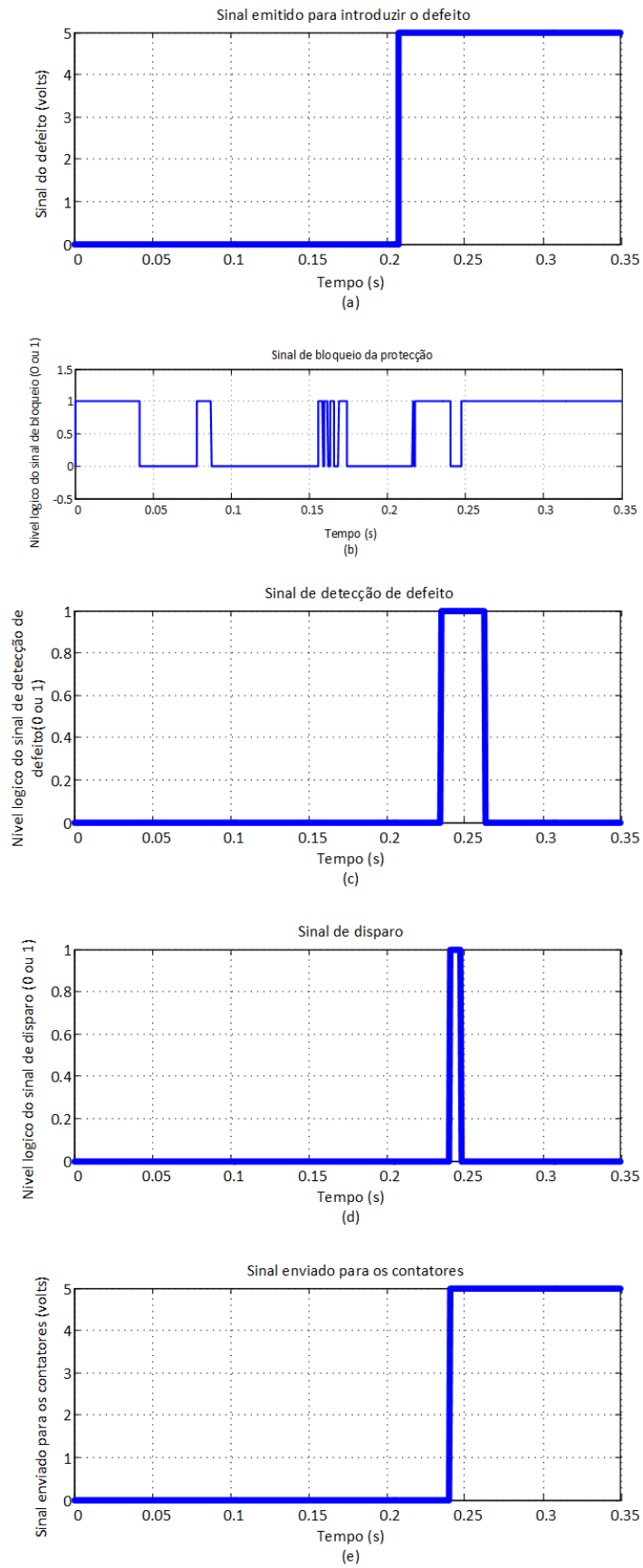


Figura AIV.48 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

## Ensaio 22: Introdução de defeito u-v, $R_{Falha} = 64 \Omega$

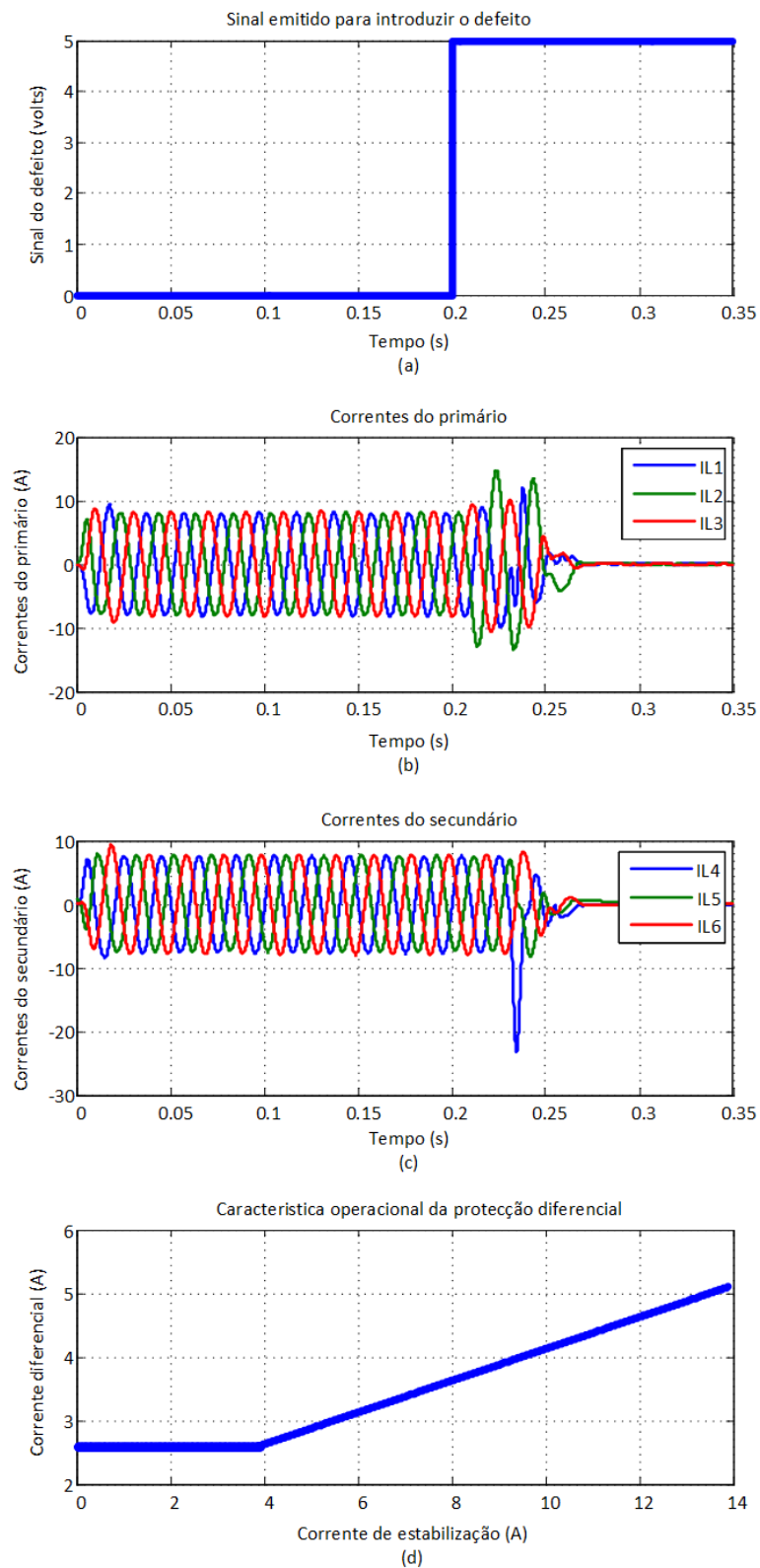


Figura AIV.49 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

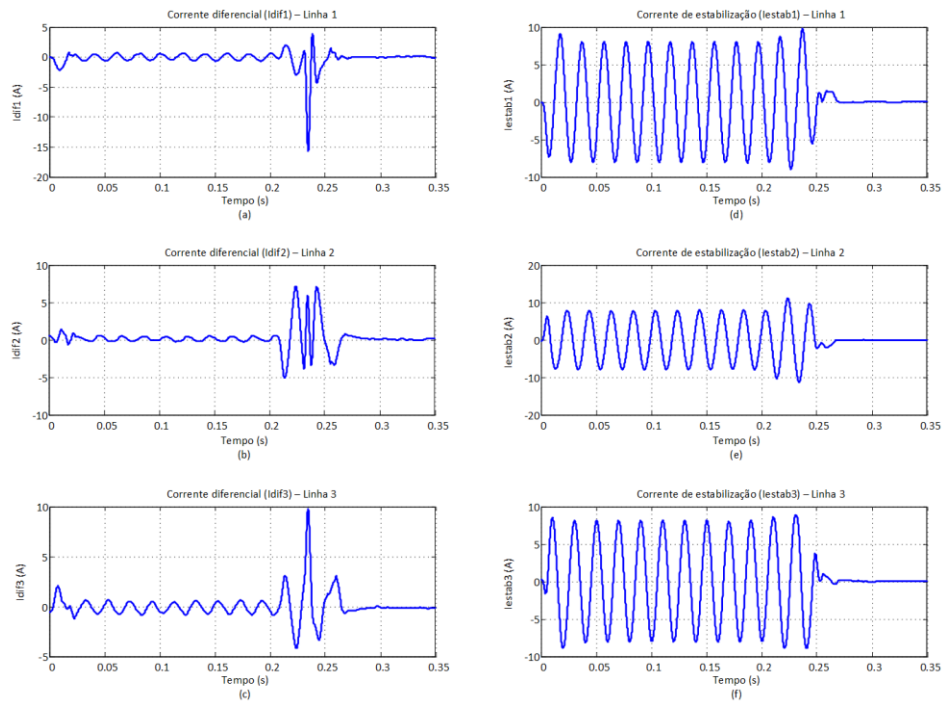


Figura AIV.50 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

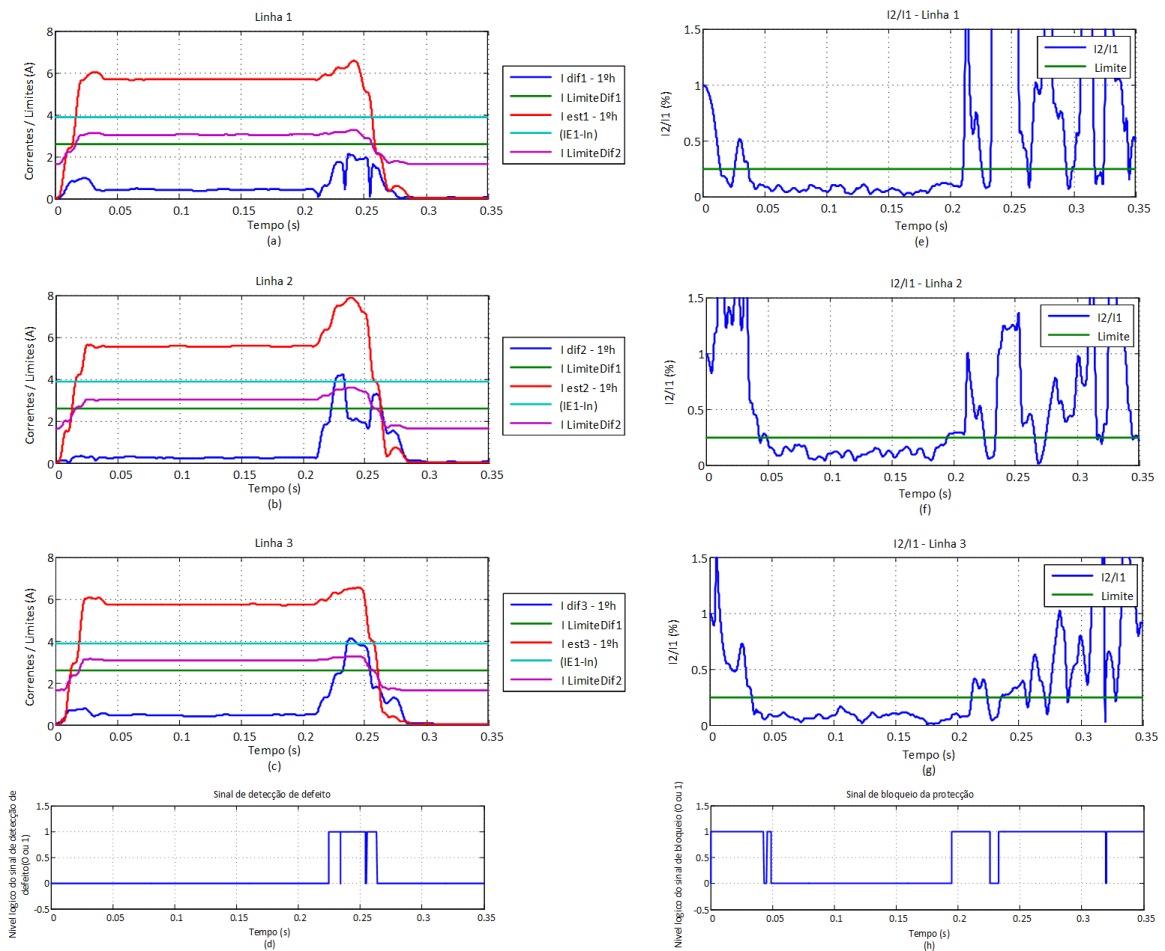


Figura AIV.51 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

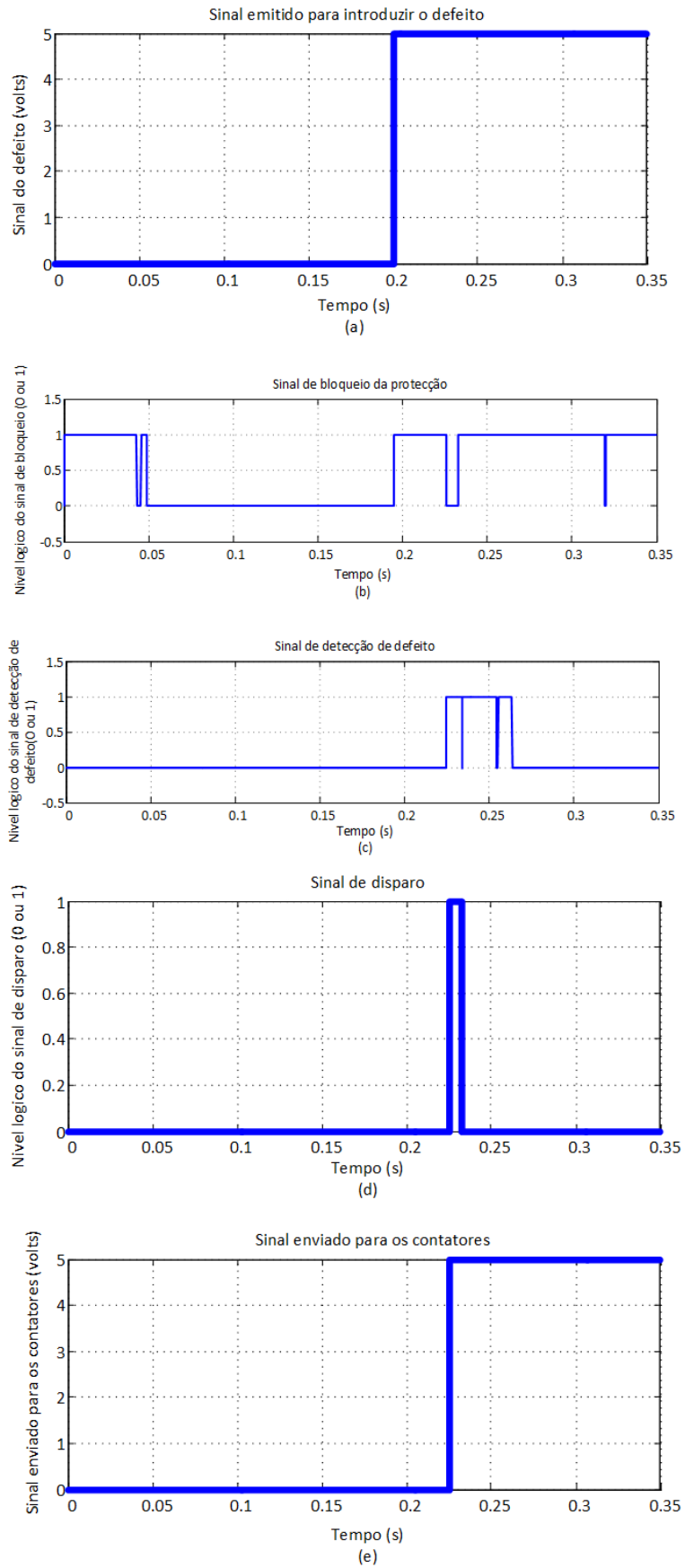


Figura AIV.52 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

### Ensaio 23: Introdução de defeito v-w, $R_{Falha} = 64 \Omega$

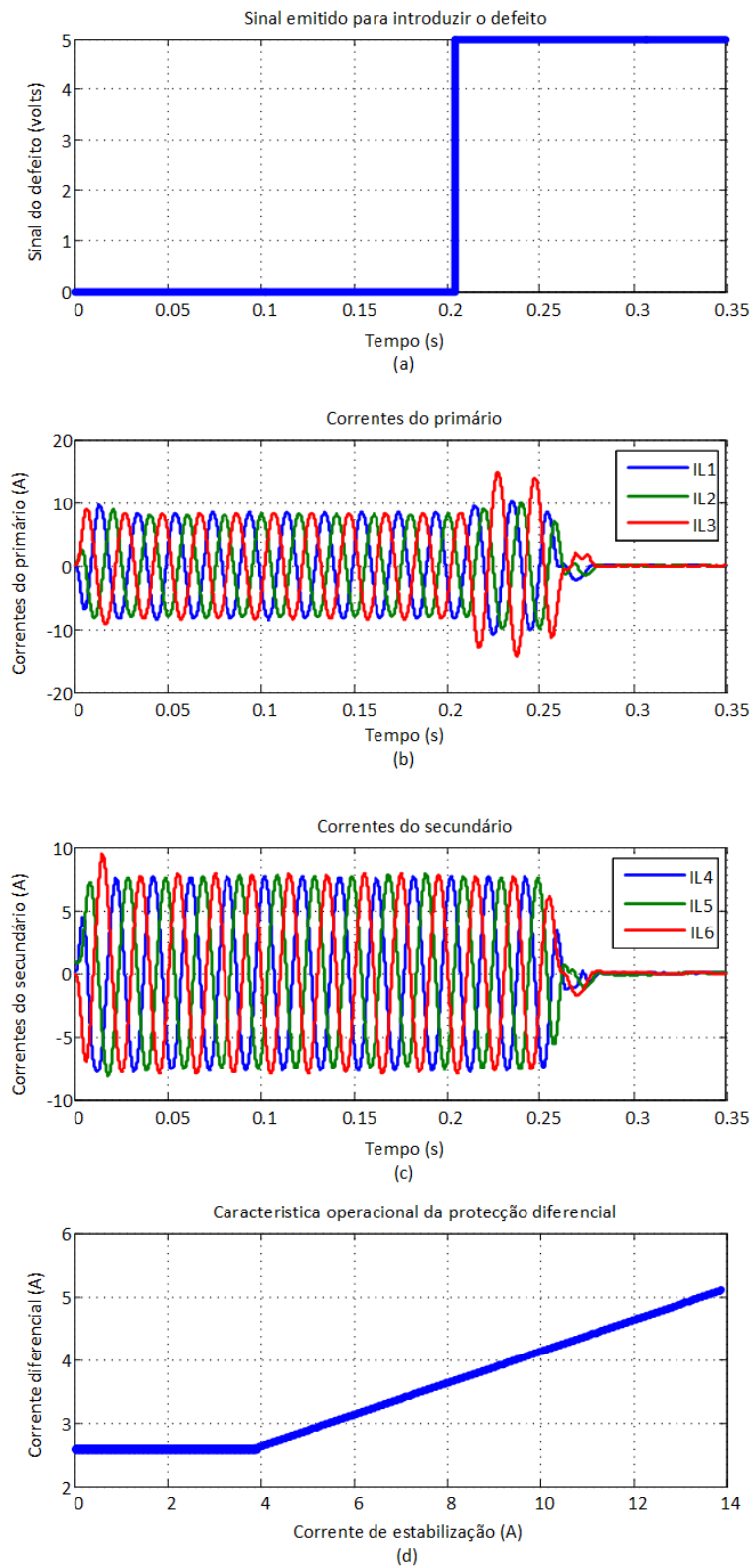


Figura AIV.53 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

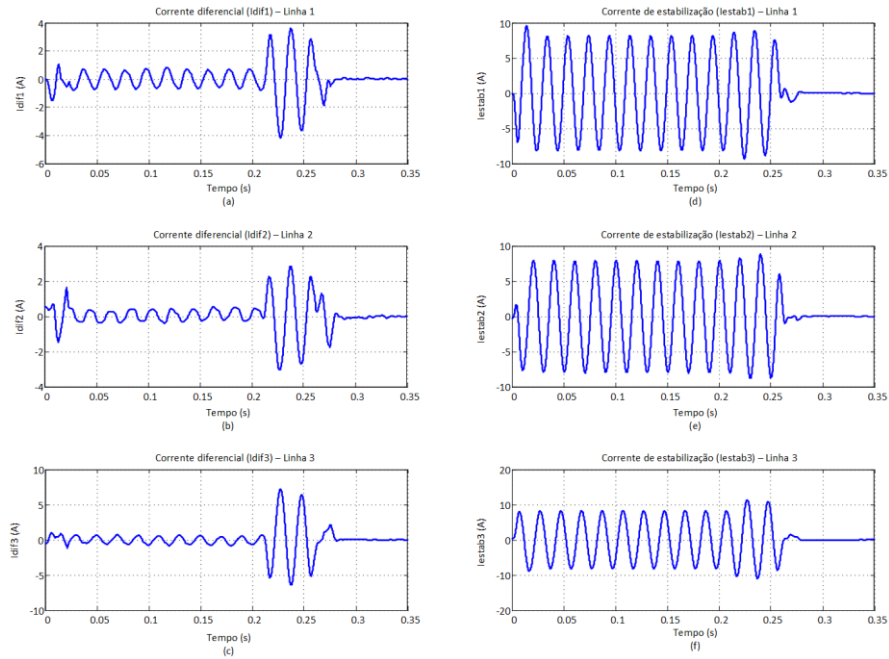


Figura AIV.54 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

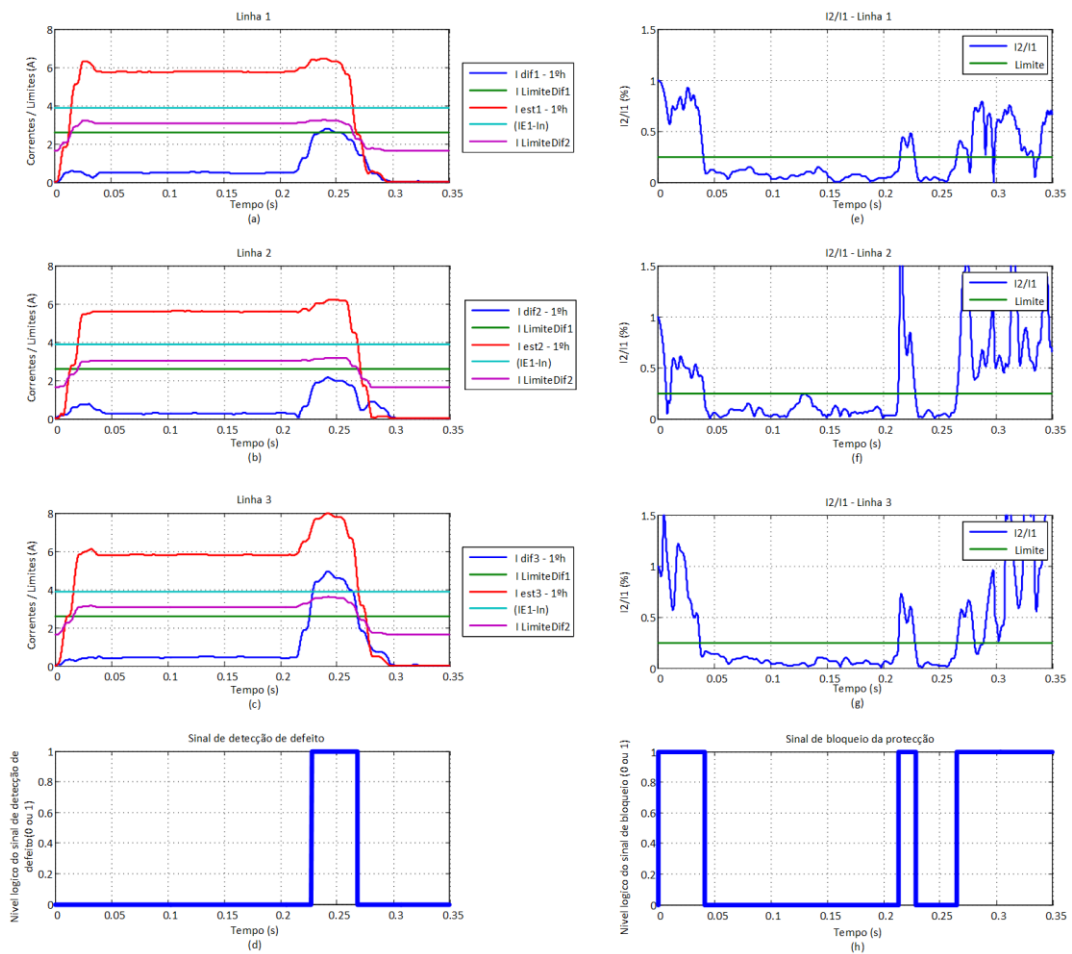


Figura AIV.55 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

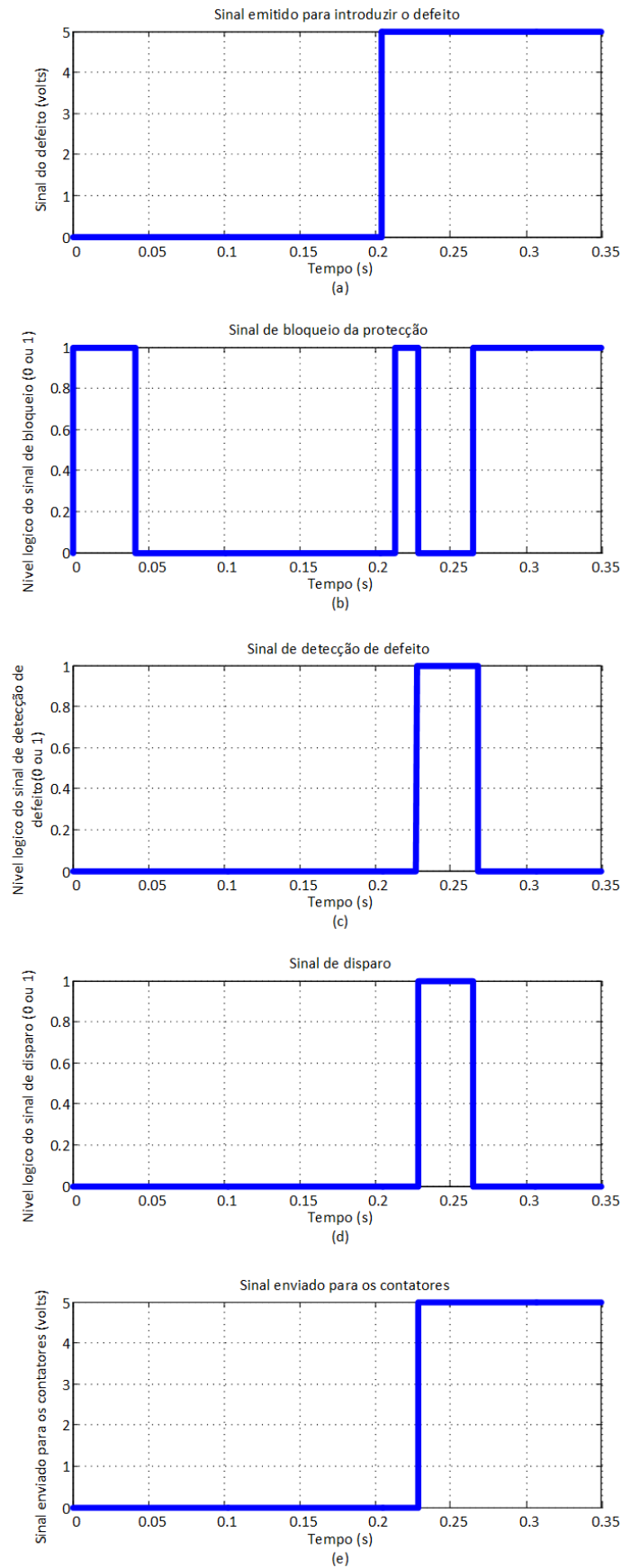


Figura AIV.56 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

## Ensaio 24: Introdução de defeito w-u, $R_{Falha} = 64 \Omega$

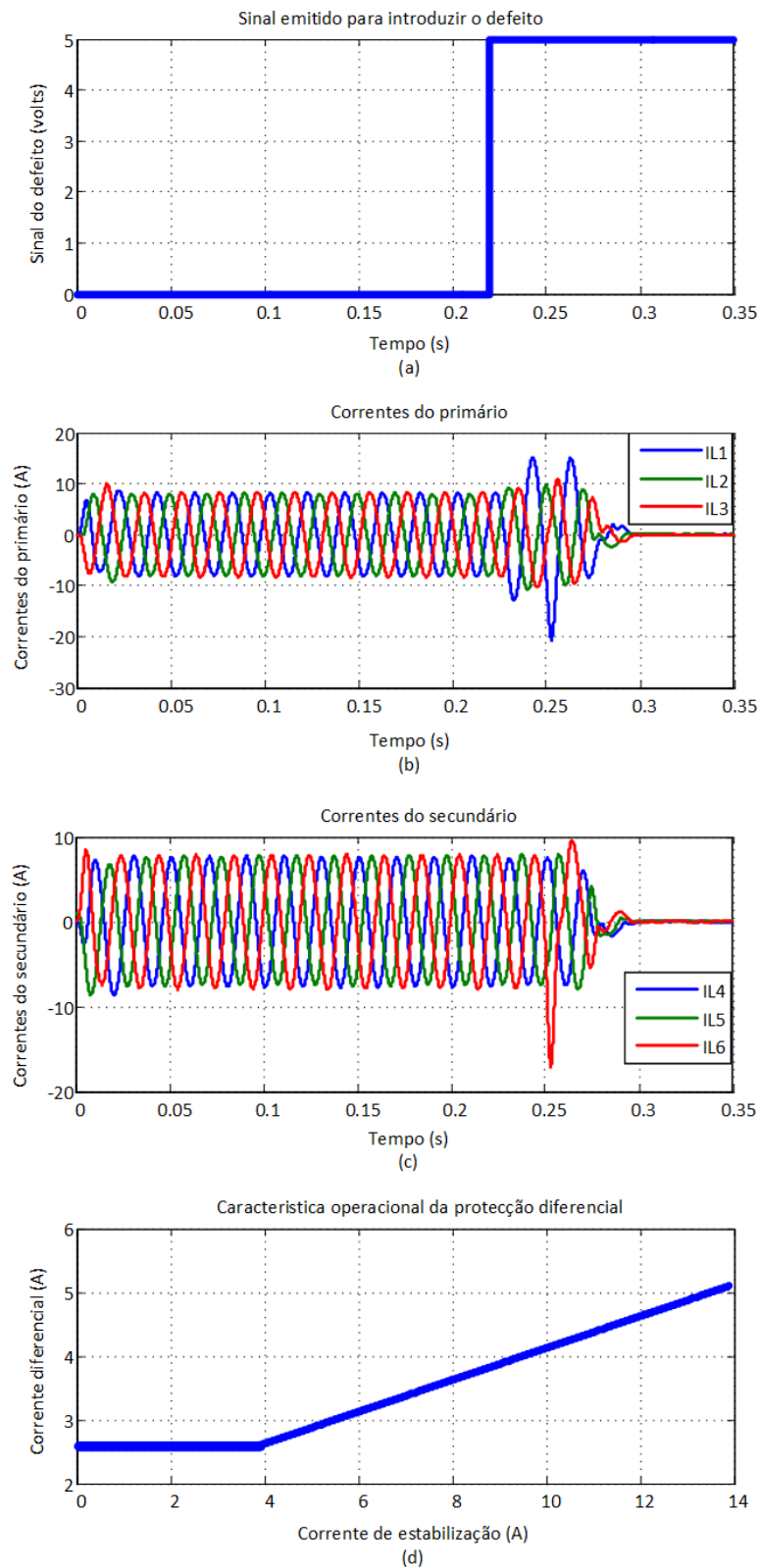


Figura AIV.57 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

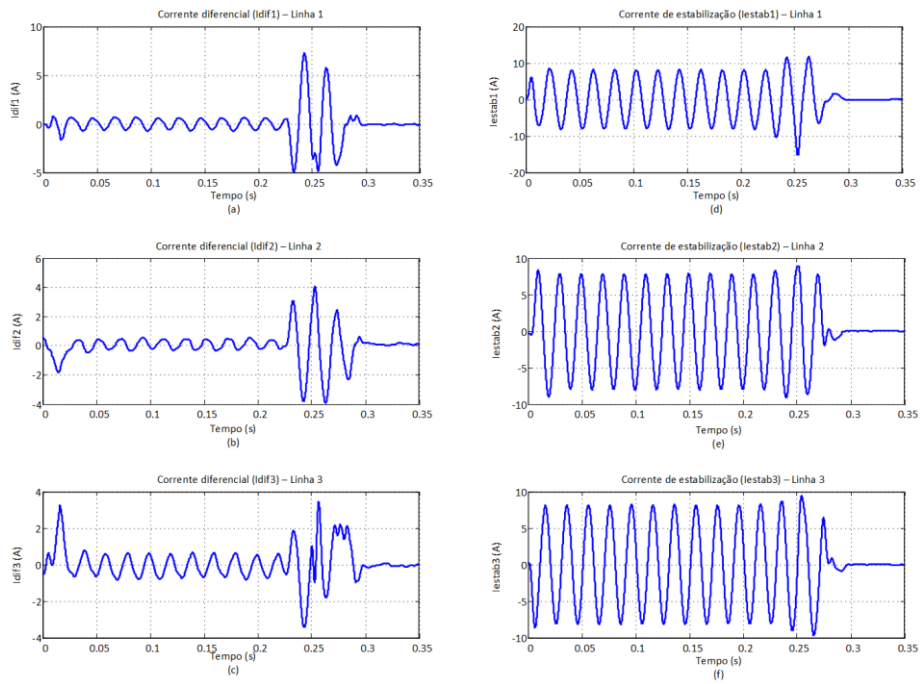


Figura AIV.58 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

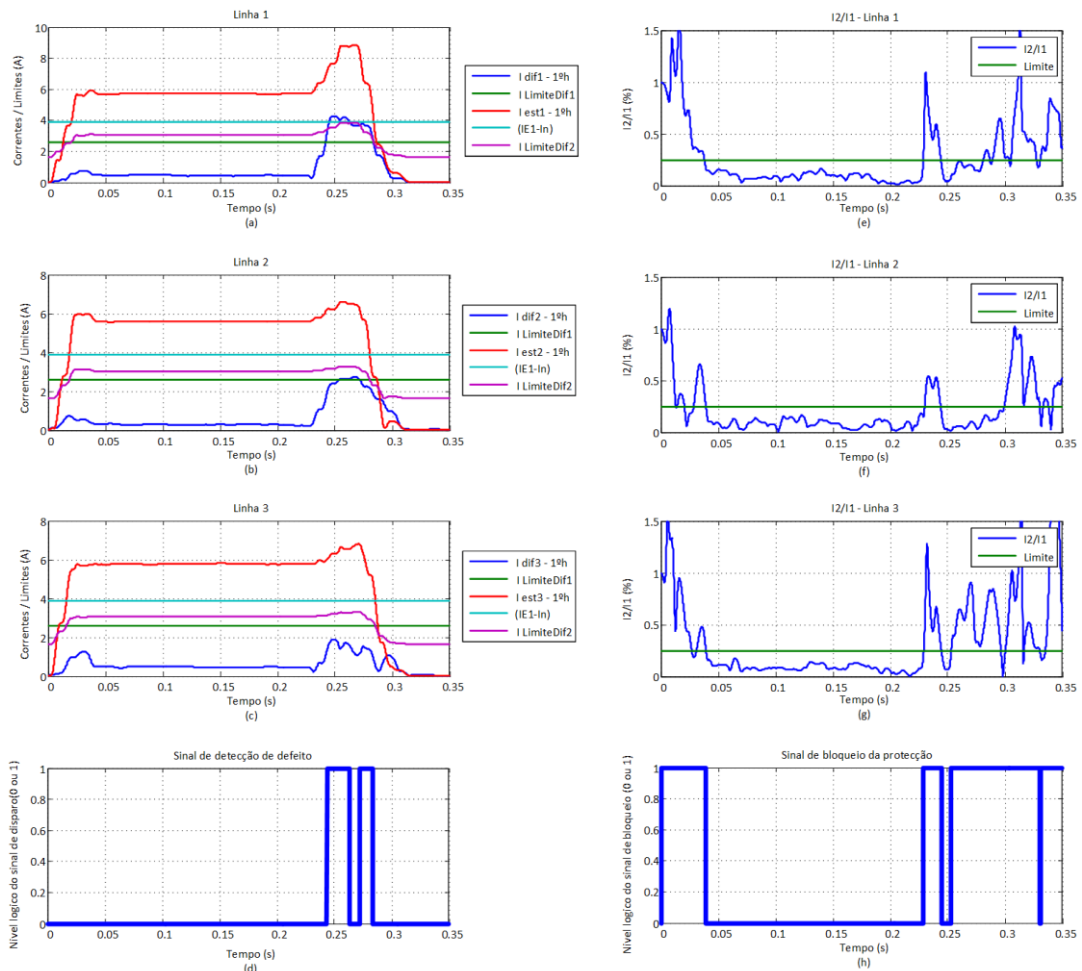


Figura AIV.59 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

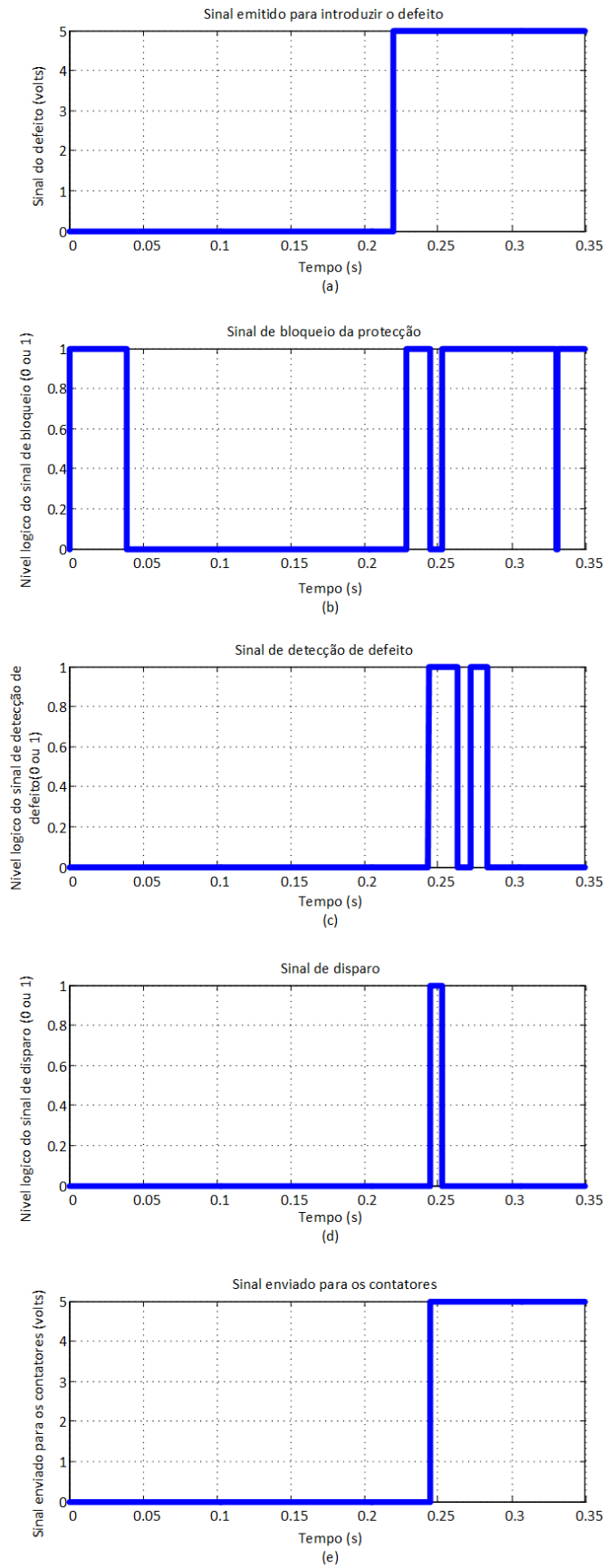


Figura AIV.60 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

## Ensaio 25: Introdução de defeito B-C, $R_{Falha} = 96 \Omega$

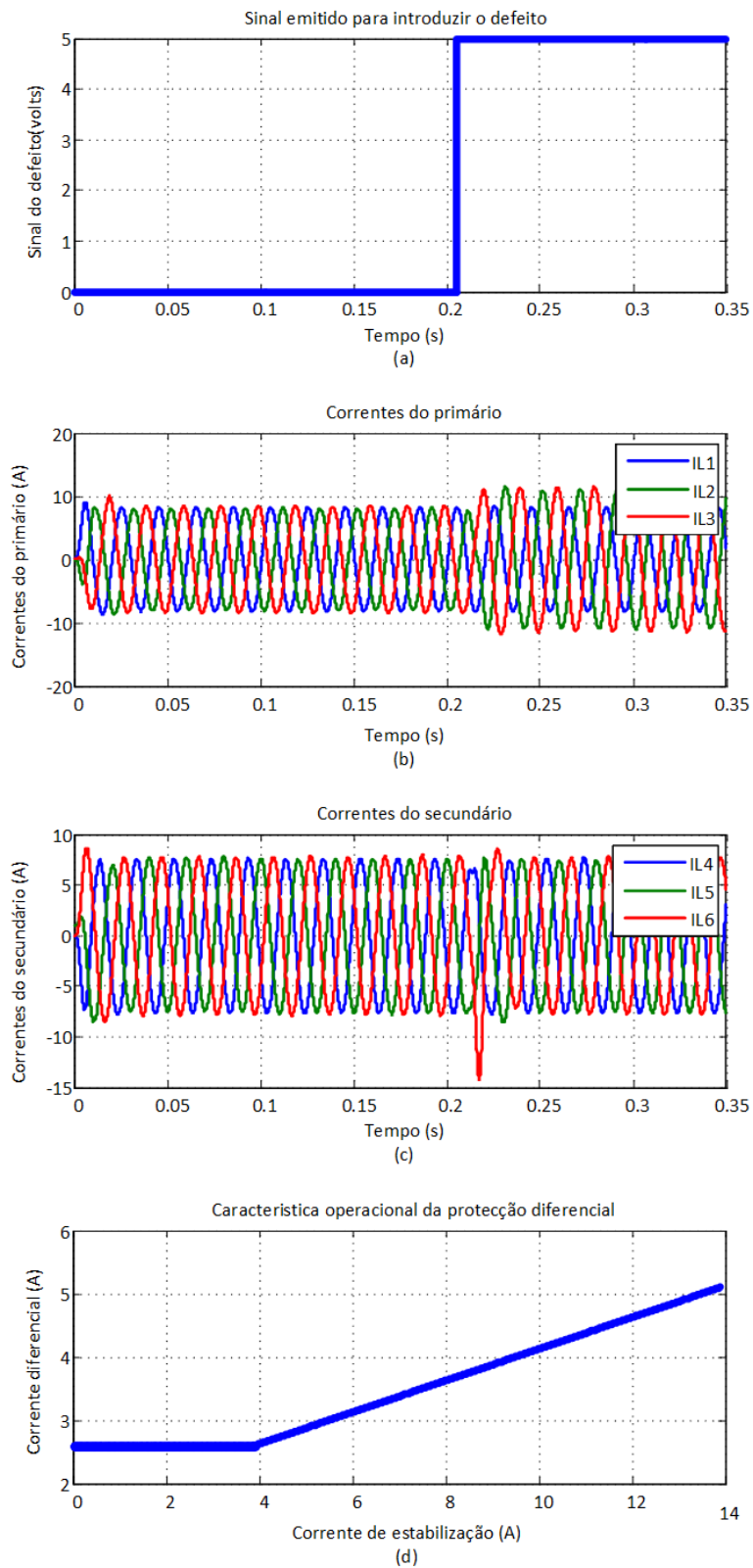


Figura AIV.61 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

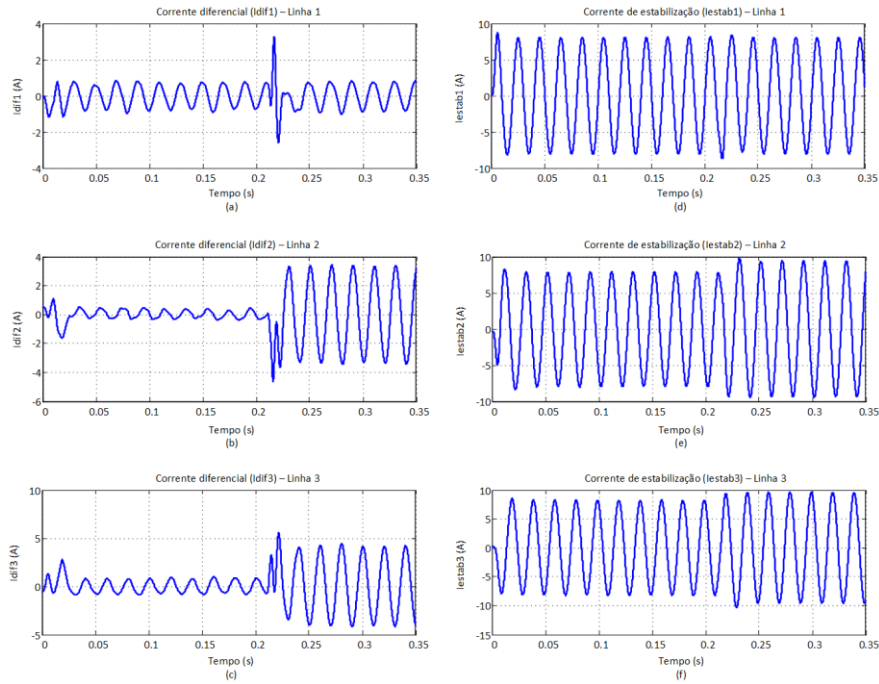


Figura AIV.62 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

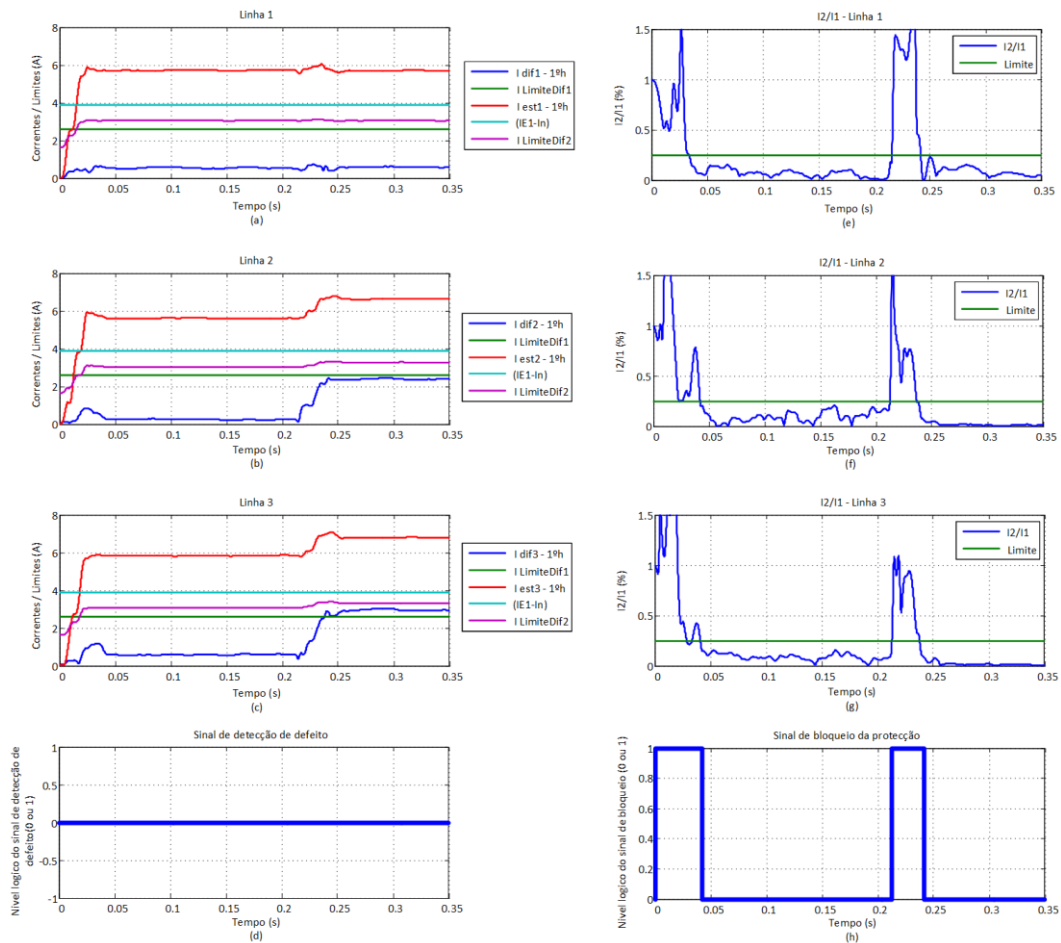


Figura AIV.63 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

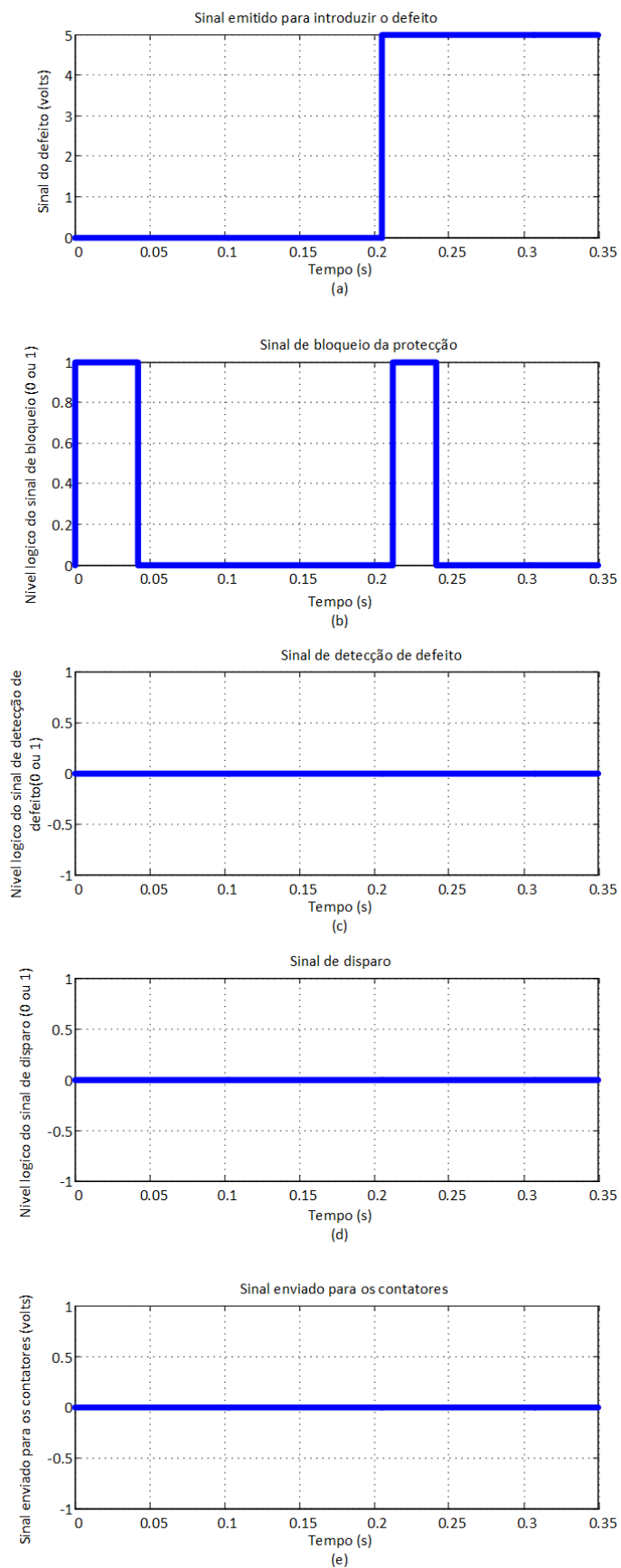


Figura AIV.64 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.

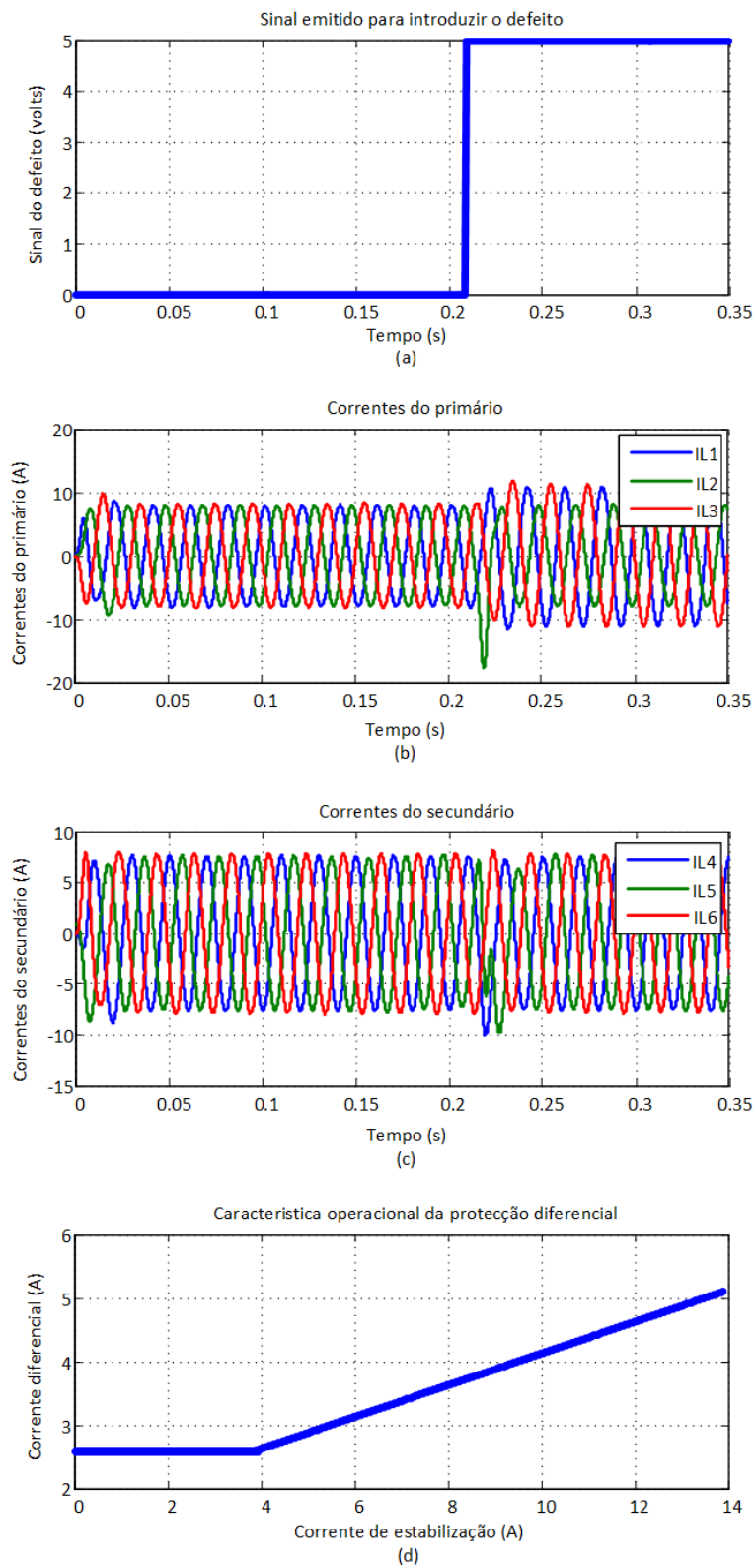
**Ensaio 26: Introdução de defeito C-A,  $R_{Falha} = 96 \Omega$** 

Figura AIV.65 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da proteção diferencial.

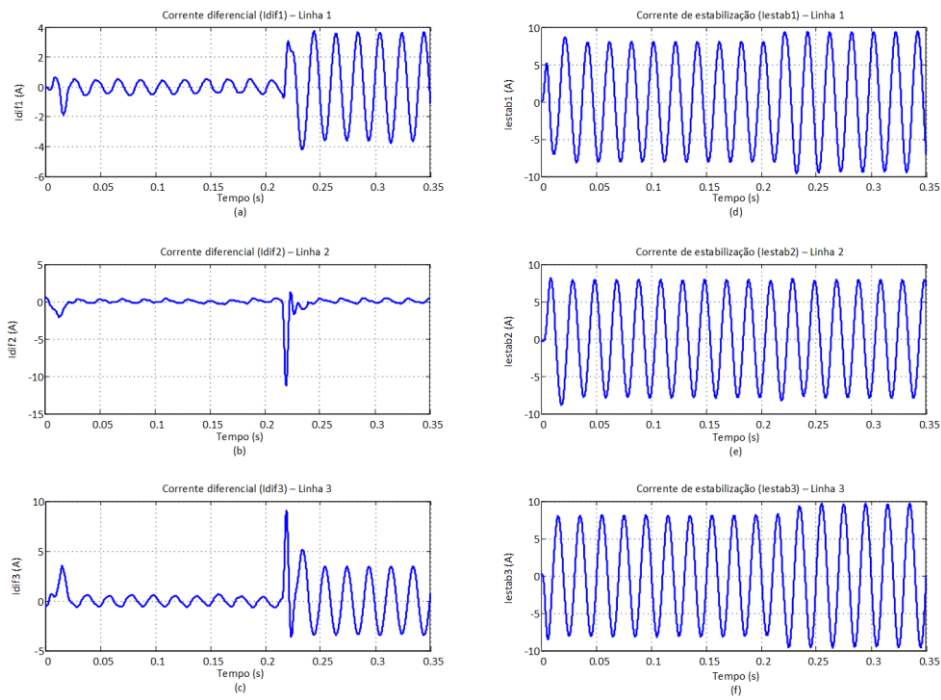


Figura AIV.66 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

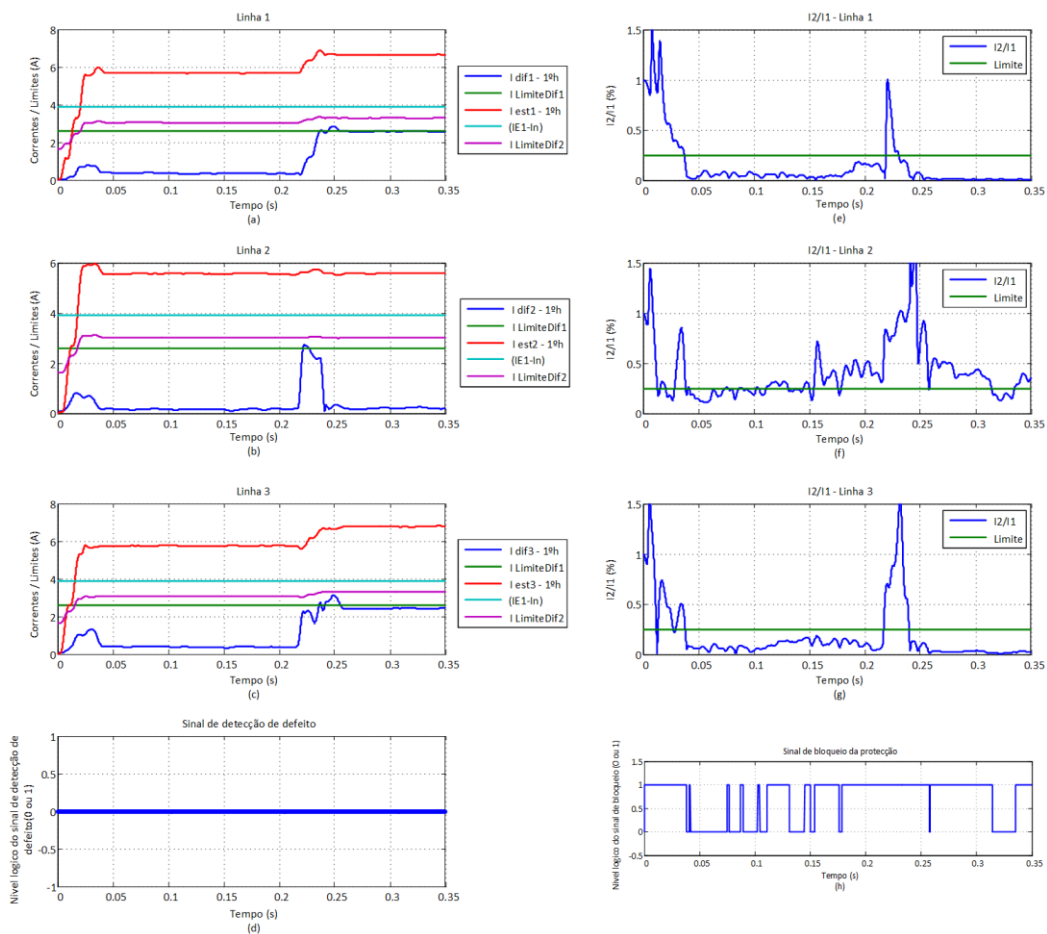


Figura AIV.67 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

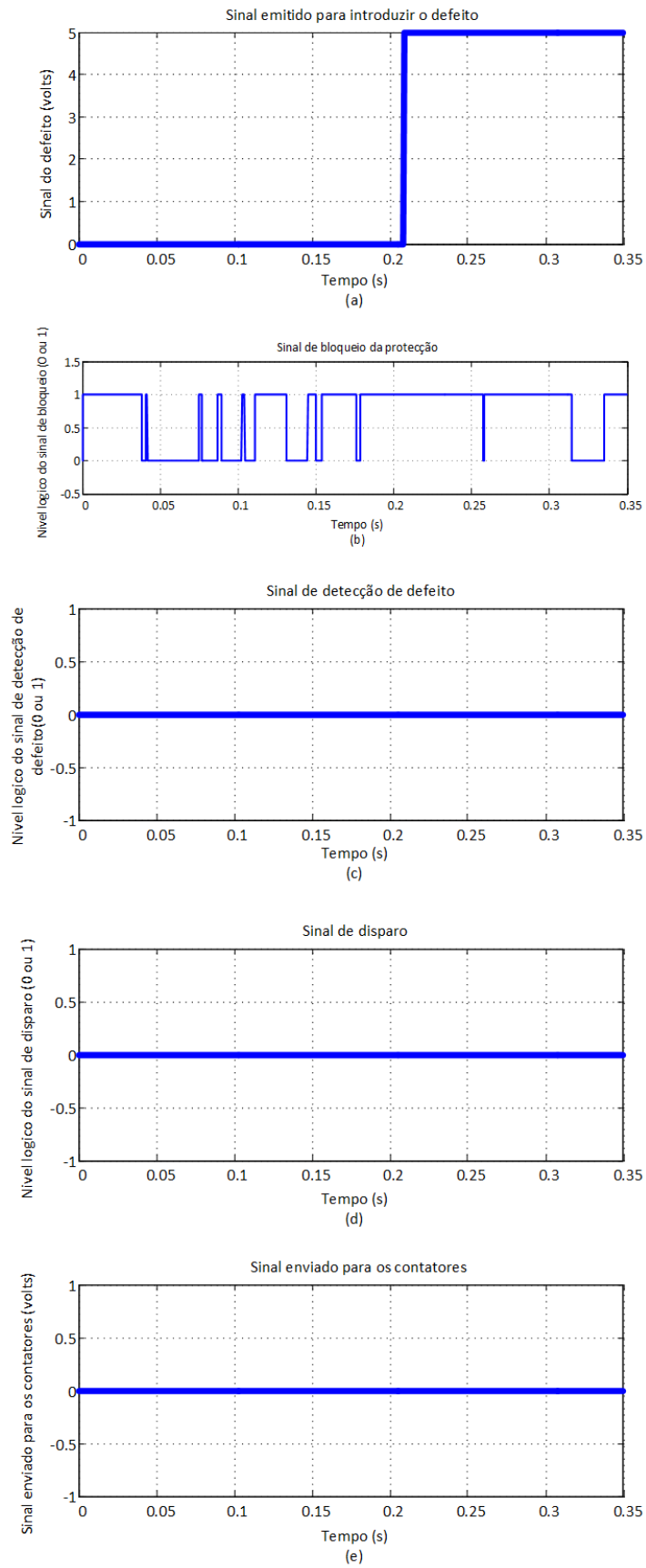


Figura AIV.68 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da protecção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

## Ensaio 27: Introdução de defeito u-v, $R_{Falha} = 96 \Omega$

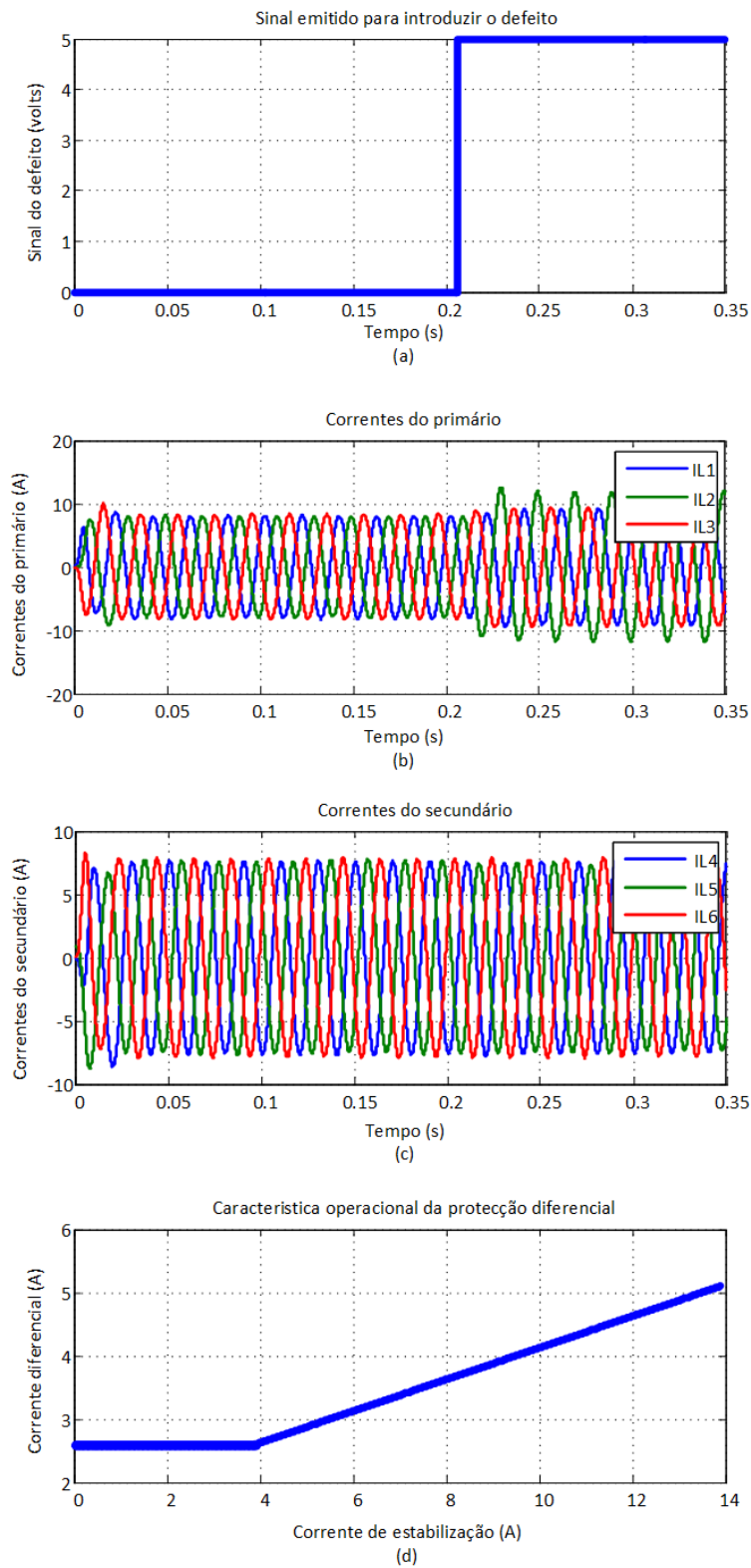


Figura AIV.69 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

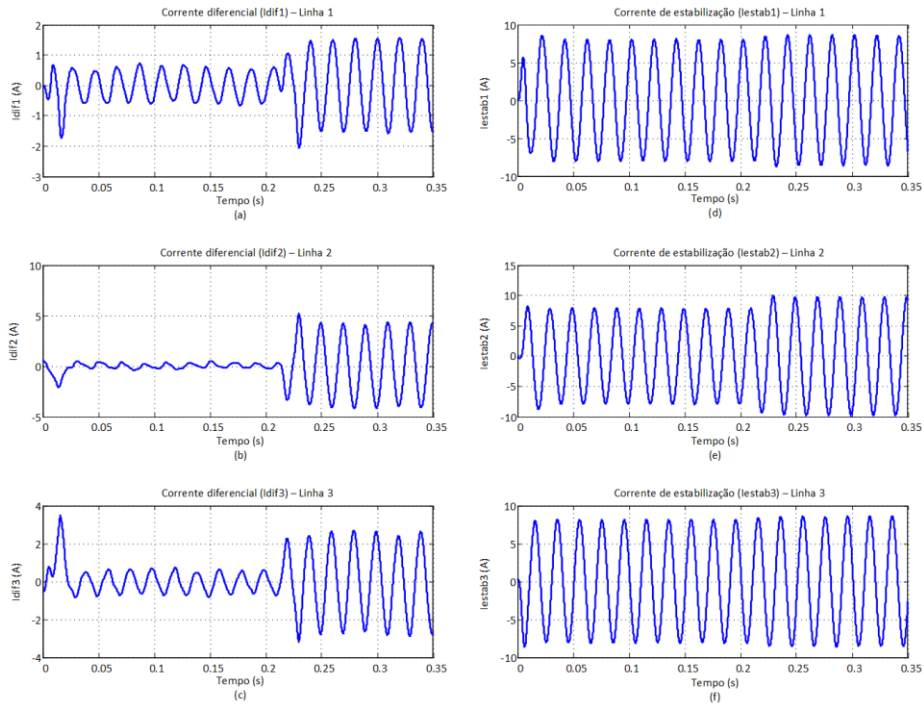


Figura AIV.70 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

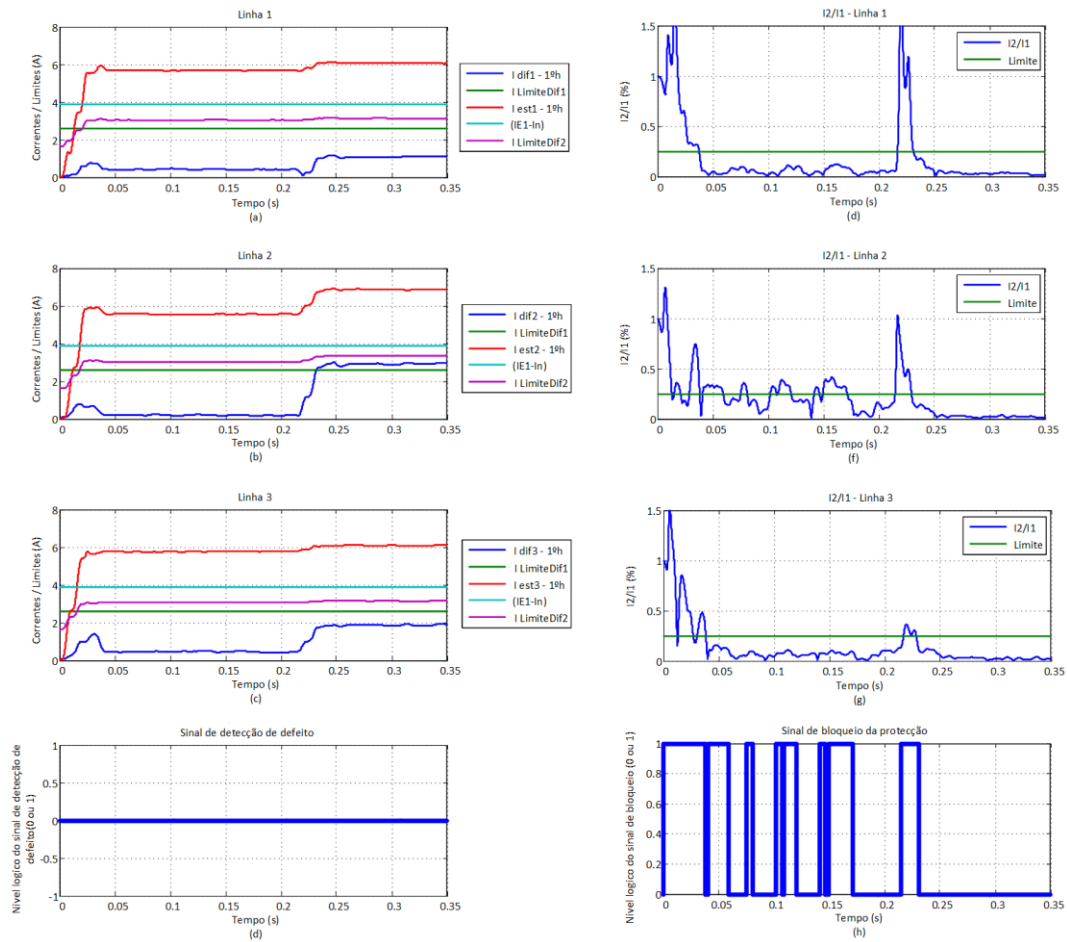


Figura AIV.71 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

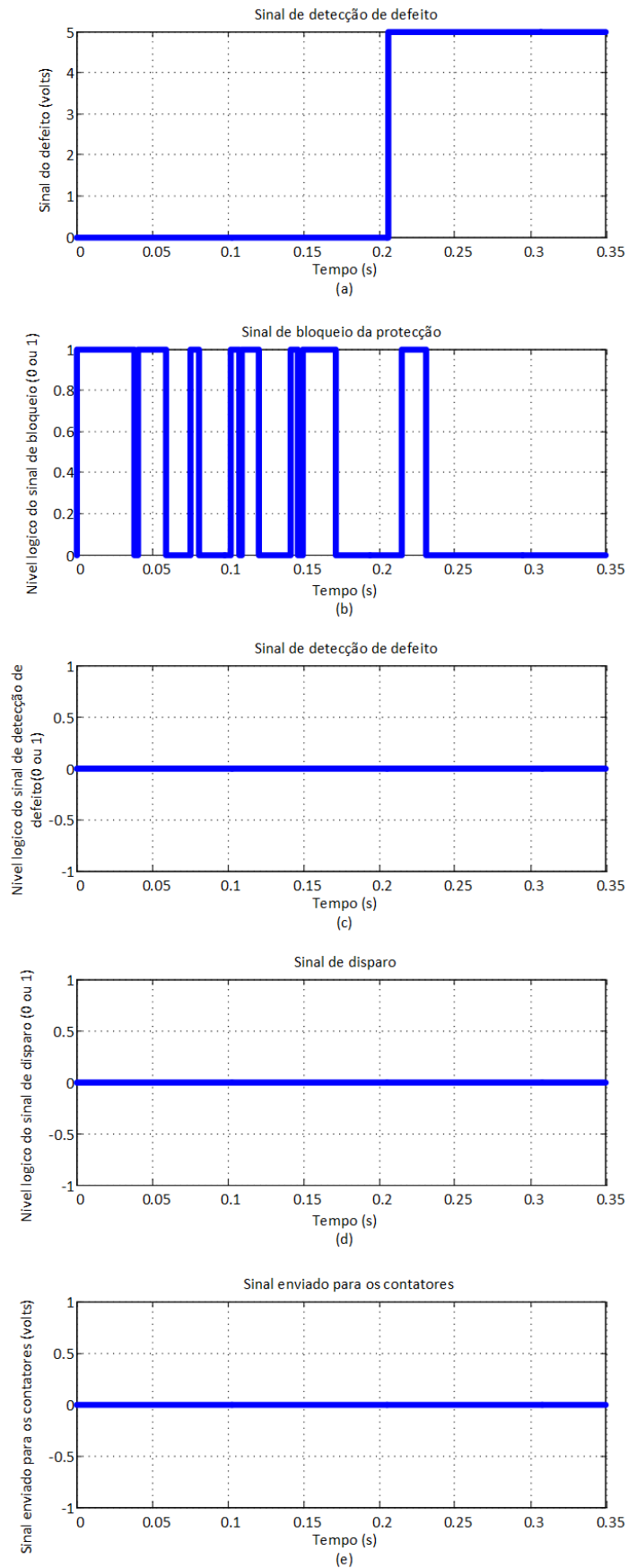


Figura AIV.72 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

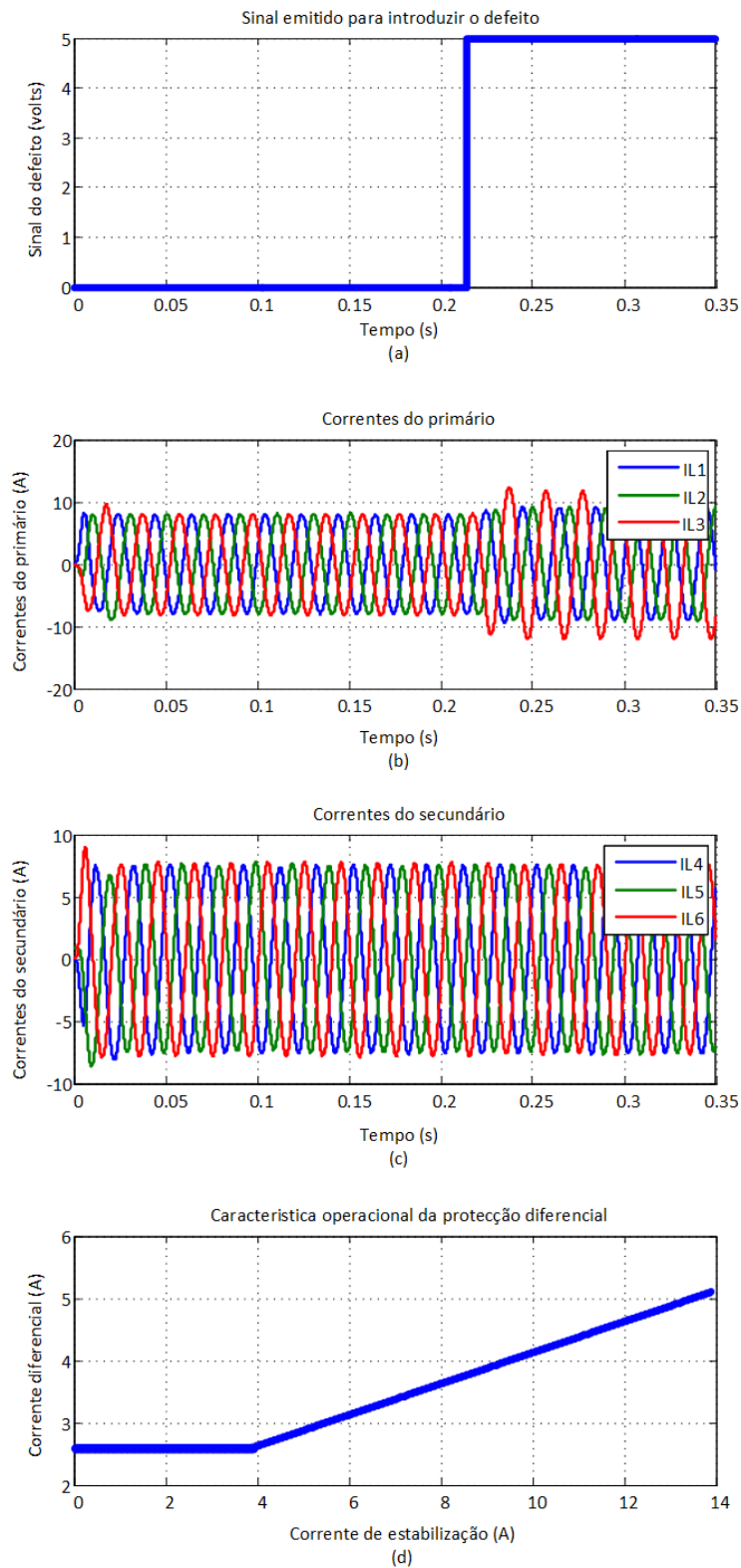
**Ensaio 28: Introdução de defeito v-w,  $R_{Falha} = 96 \Omega$** 

Figura AIV.73 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

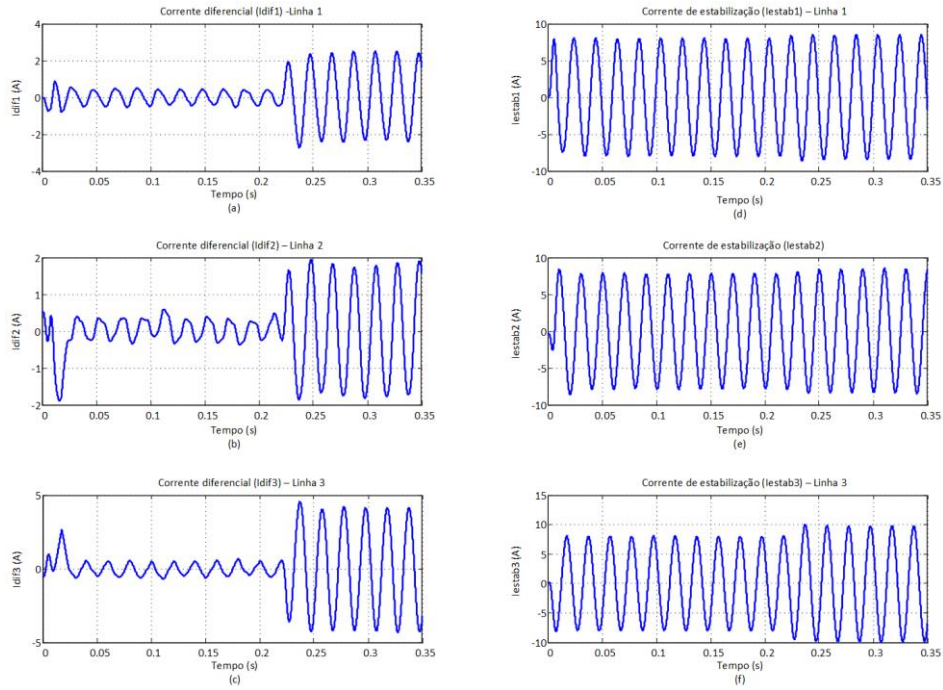


Figura AIV.74 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

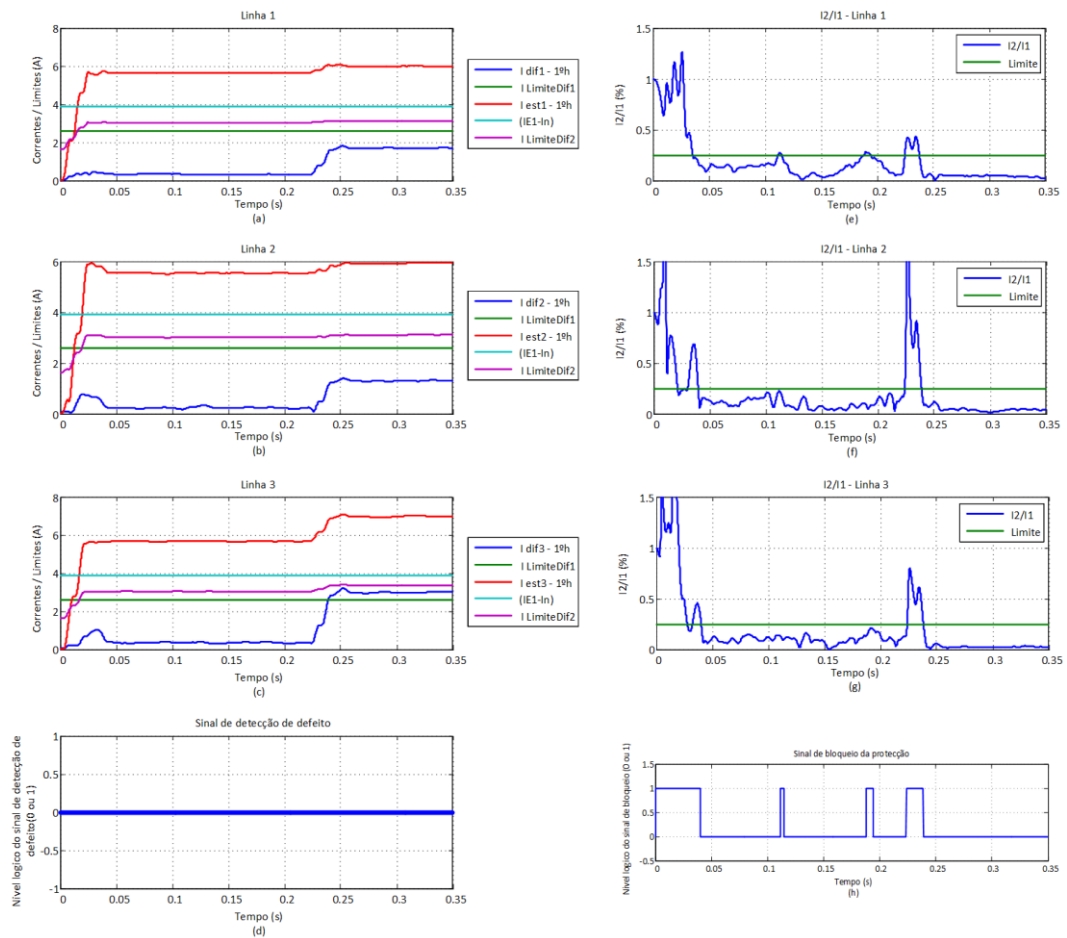


Figura AIV.75 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

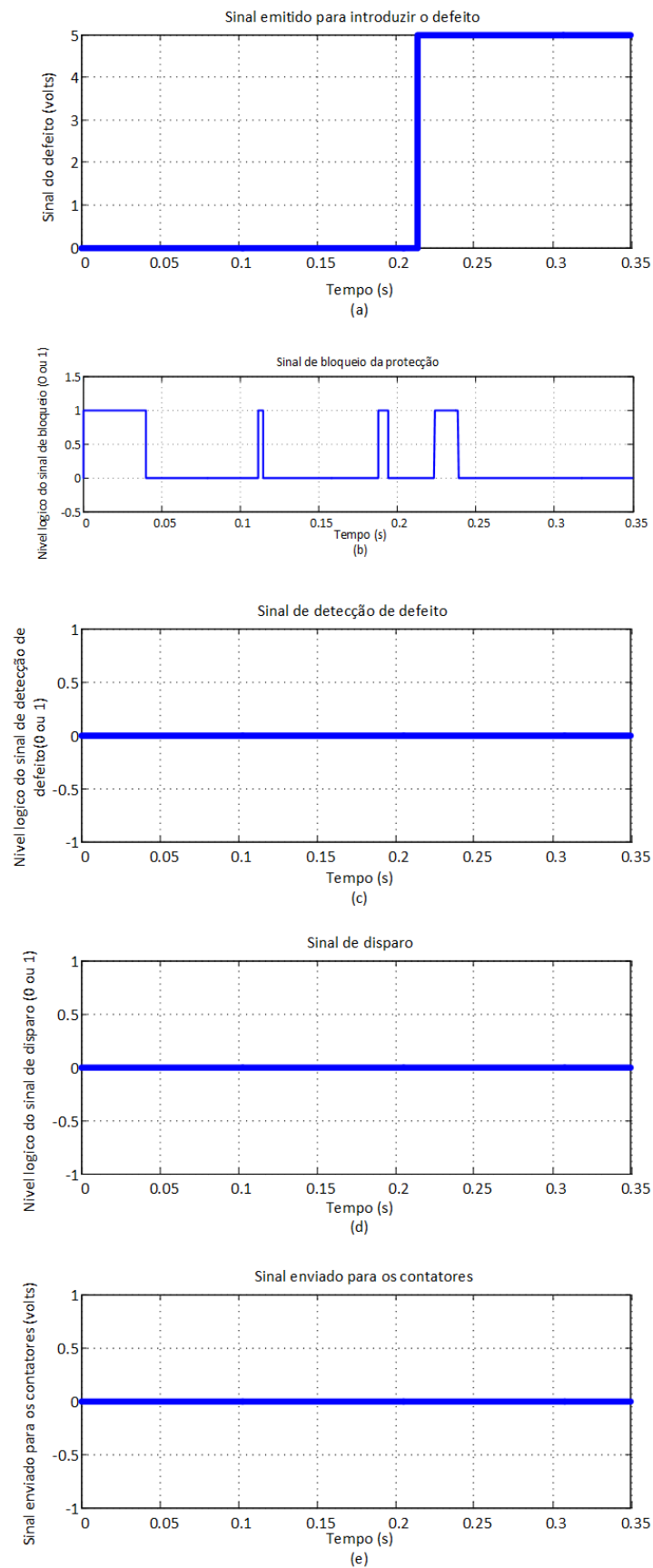


Figura AIV.76 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

## Ensaio 29: Introdução de defeito w-u, $R_{Falha} = 96 \Omega$

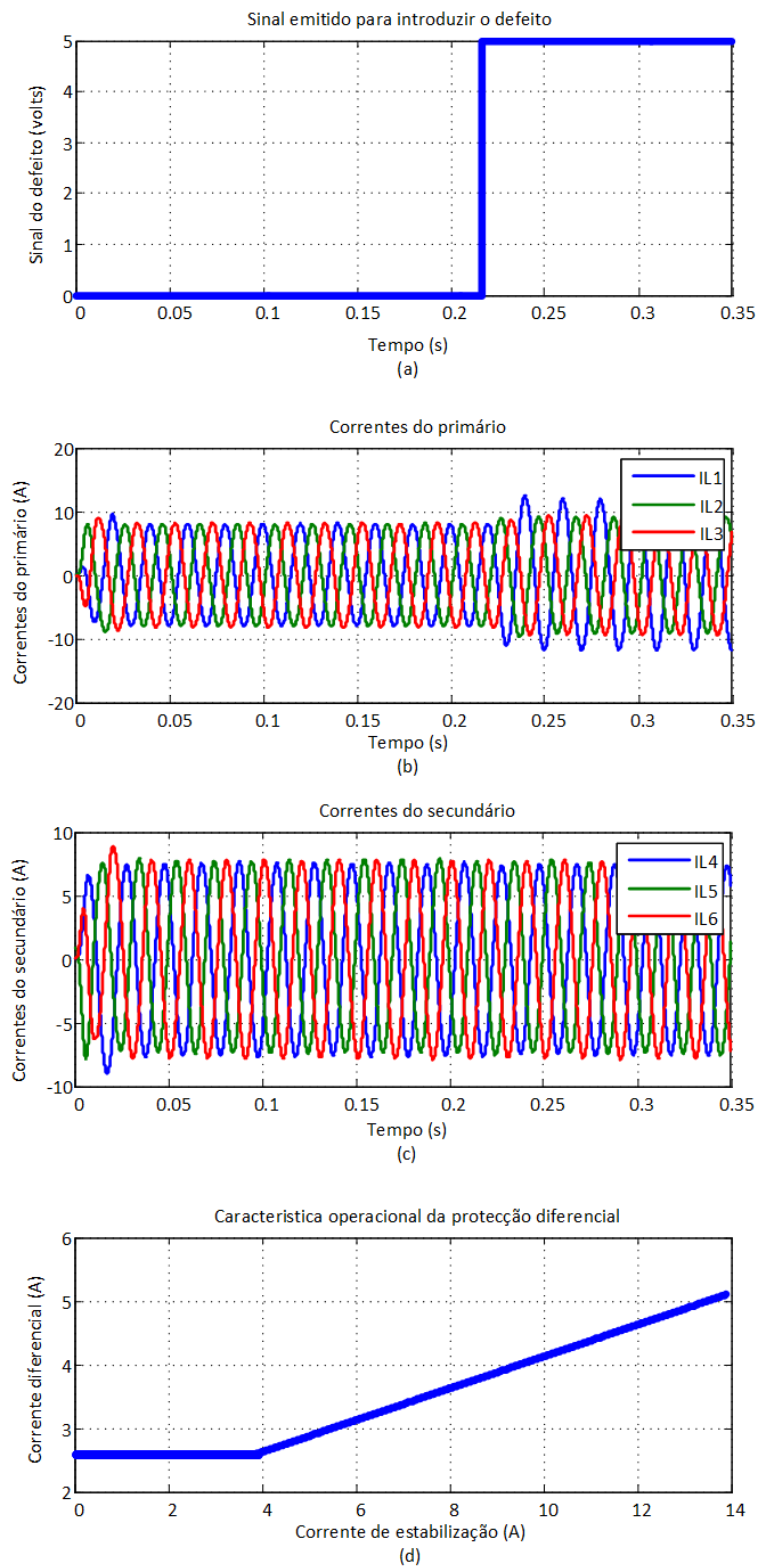


Figura AIV.77 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

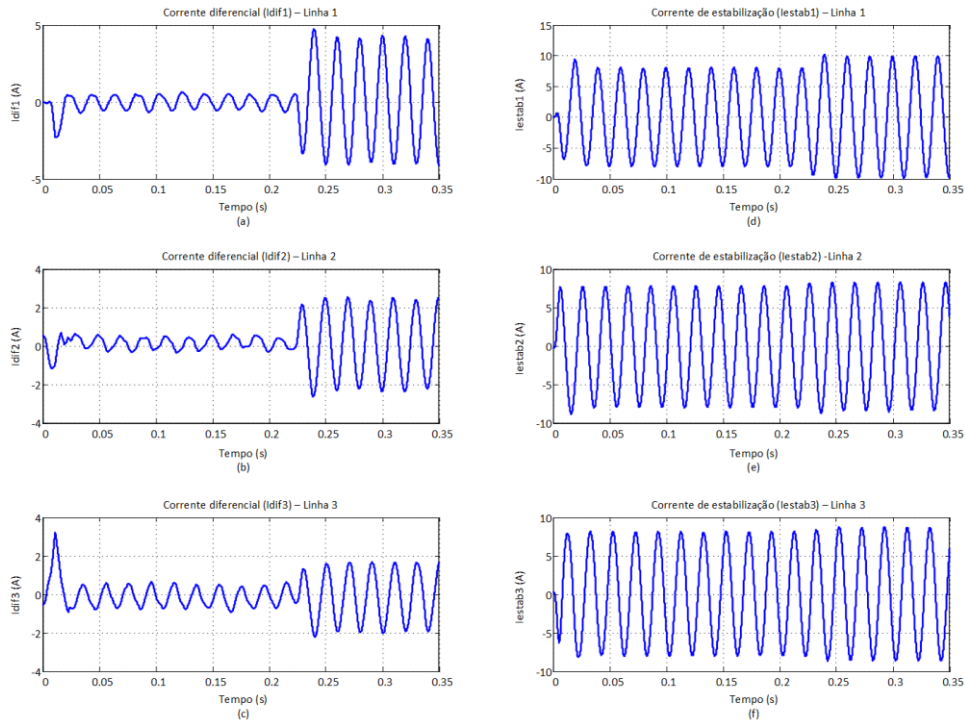


Figura AIV.78 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

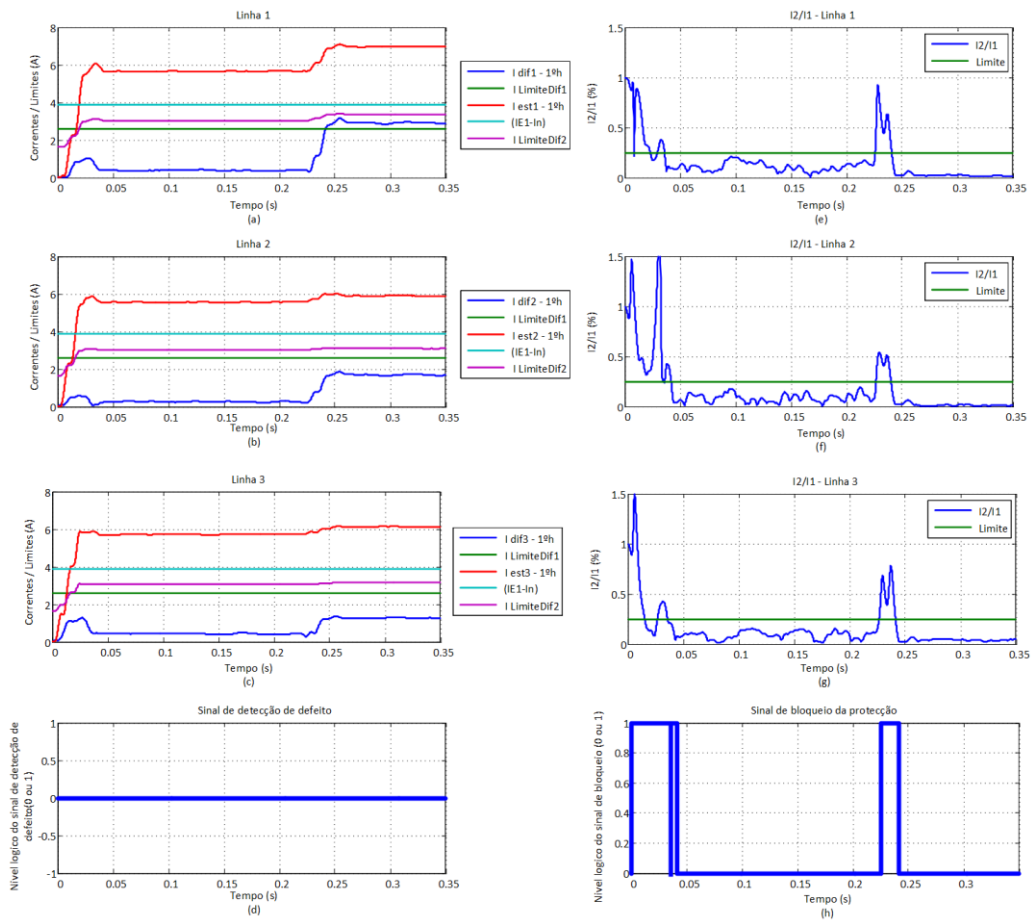


Figura AIV.79 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de detecção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

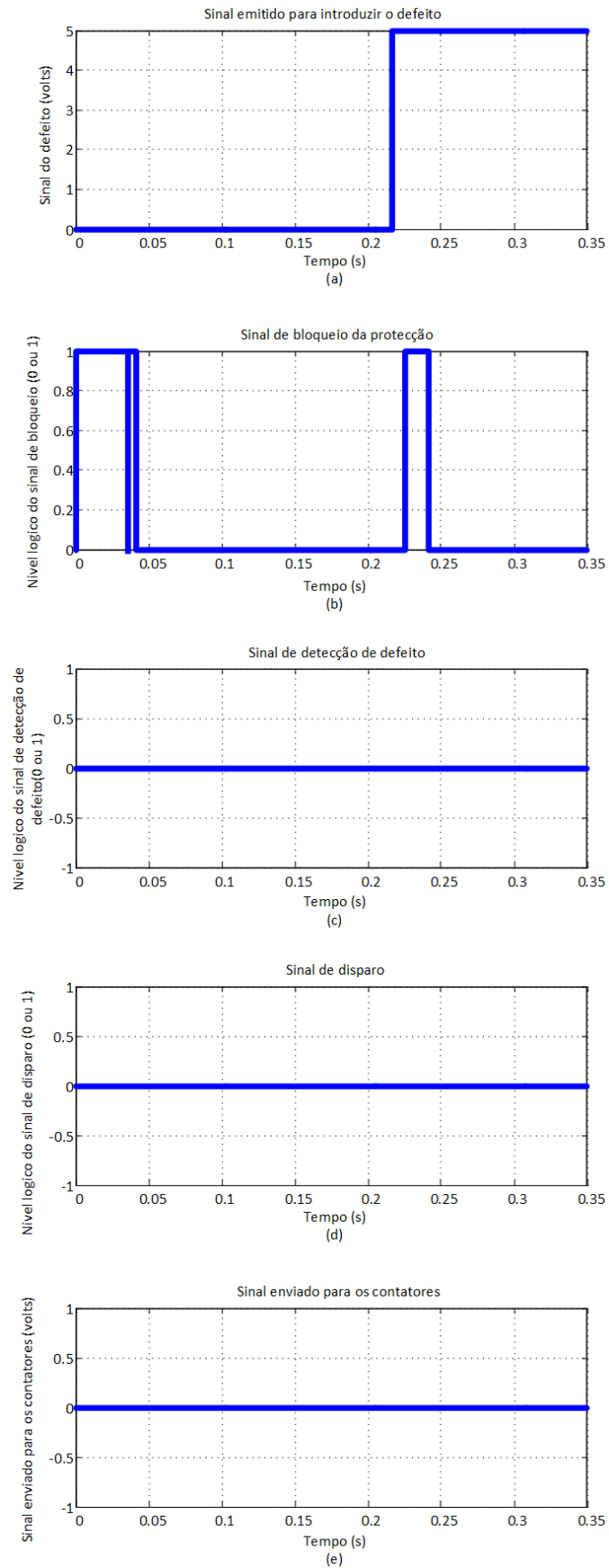


Figura AIV.80 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contadores.

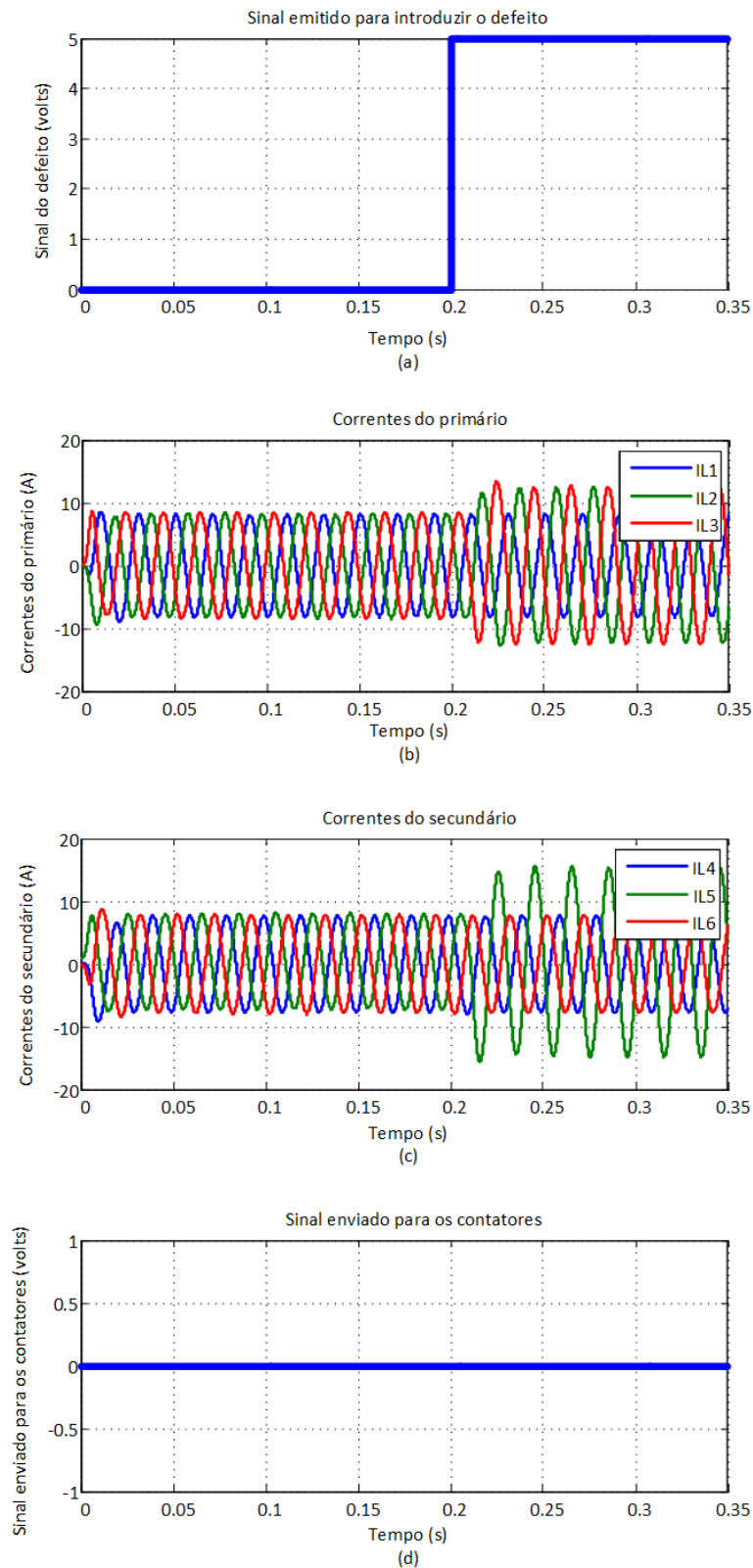
**Ensaio 30: Introdução de defeito externo v-n,  $R_{Falha} = 24 \Omega$** 

Figura AIV.81 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Sinal enviado para os contatores.

### Ensaio 31: Introdução de defeito externo w-n, $R_{Falha} = 24 \Omega$

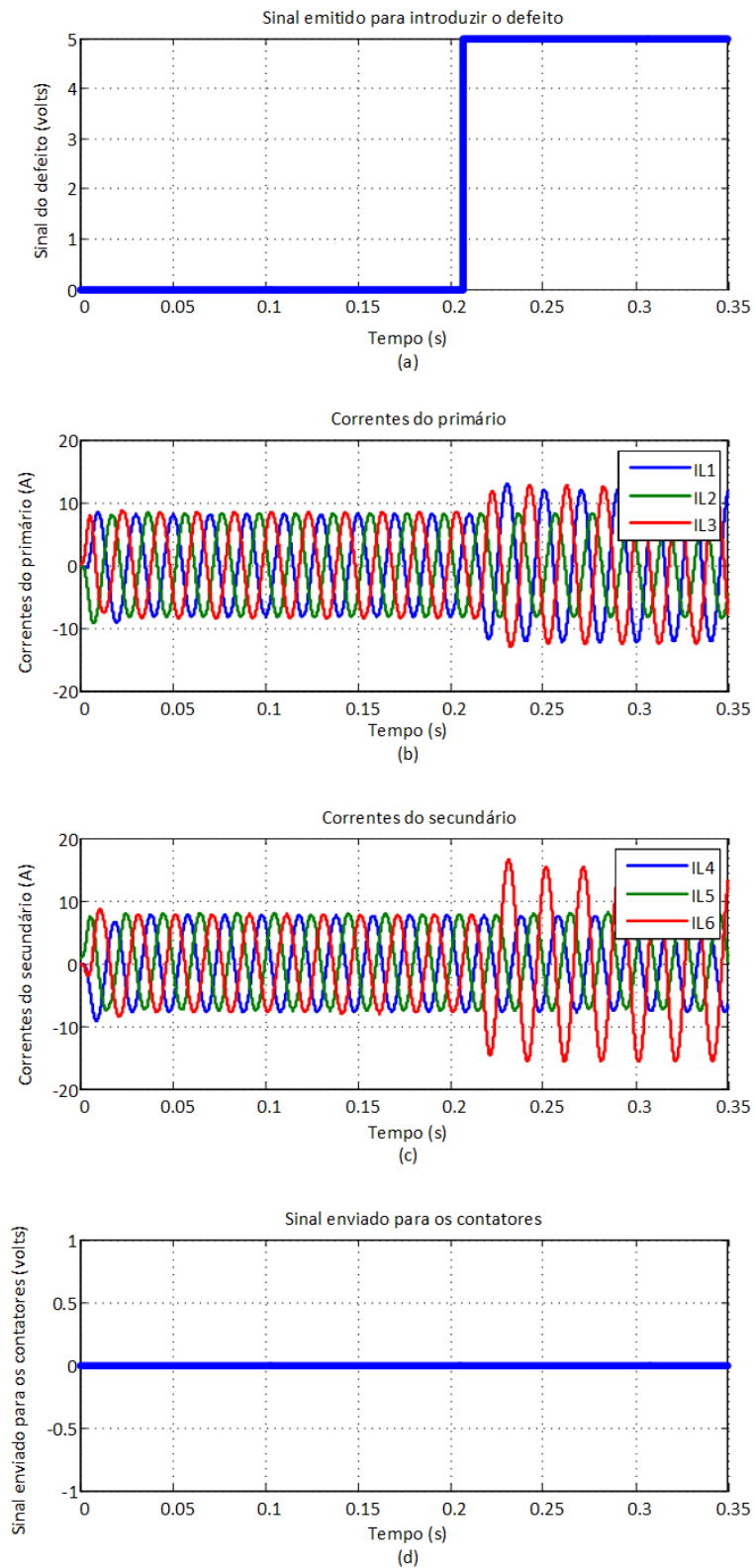


Figura AIV.82 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Sinal enviado para os contadores.

**Ensaio 32: Introdução de defeito A-n,  $R_{Falha} = 64 \Omega$ , (Nova característica operacional da protecção diferencial).**

Neste ponto são apresentados os resultados de um ensaio em regime permanente, com uma falha A-n de 64 ohms, onde é utilizada uma nova característica operacional da protecção diferencial. A corrente mínima de operação do relé diferencial passa a corresponder a 5% da corrente nominal do transformador e a corrente de estabilização máxima para a definição da 1.ª zona da característica operacional passa a corresponder a 20% da corrente nominal do transformador. Para a característica operacional da protecção diferencial utilizada nos ensaios anterior o defeito simulado neste ensaio 32 não provocava a atuação da protecção, mas com esta nova característica o defeito já provoca a atuação da protecção.

A redução do valor da corrente mínima de operação do relé diferencial aumenta a sensibilidade da protecção, mas se for reduzido demais pode provocar disparos intempestivos do relé, ou seja deve ser mantido um equilíbrio entre a dependabilidade, (capacidade de resposta da protecção quando solicitada) e a segurança, (não ocorrência de disparos intempestivos). Um aumento da dependabilidade leva a uma diminuição da segurança e vice-versa, se o equilíbrio for mantido tem-se uma protecção fiável.

A característica operacional da protecção diferencial utilizada neste ensaio 32, foi também submetida a vários ensaios, onde foram testadas as diversas condições de funcionamento.

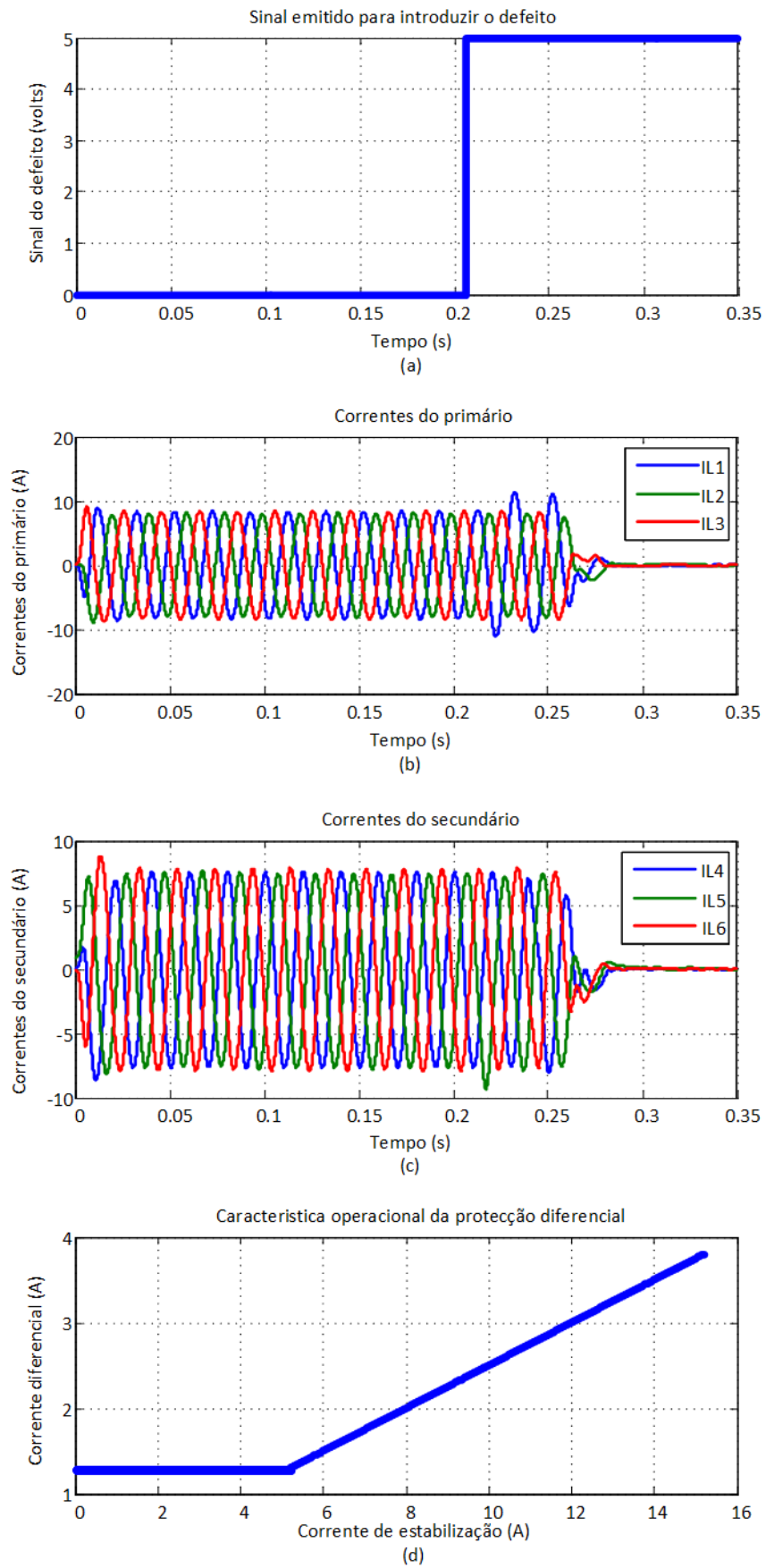


Figura AIV.83 – (a): Sinal emitido para introduzir o defeito; (b): Correntes do primário; (c): Correntes do secundário; (d): Característica operacional da protecção diferencial.

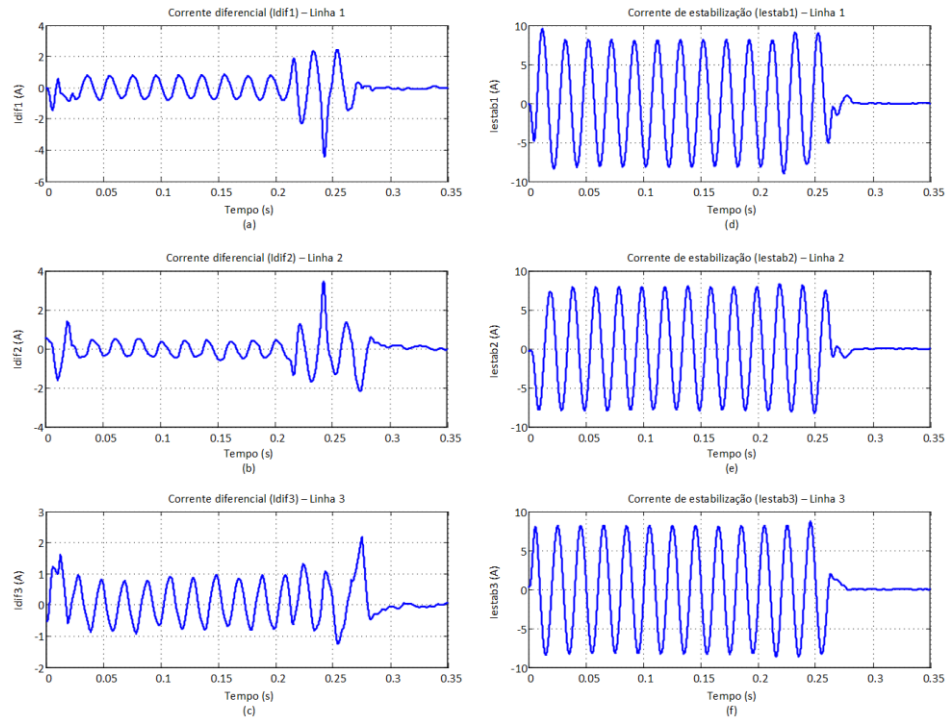


Figura AIV.84 – (a), (b), (c): Correntes diferenciais; (d), (e), (f): Correntes de estabilização.

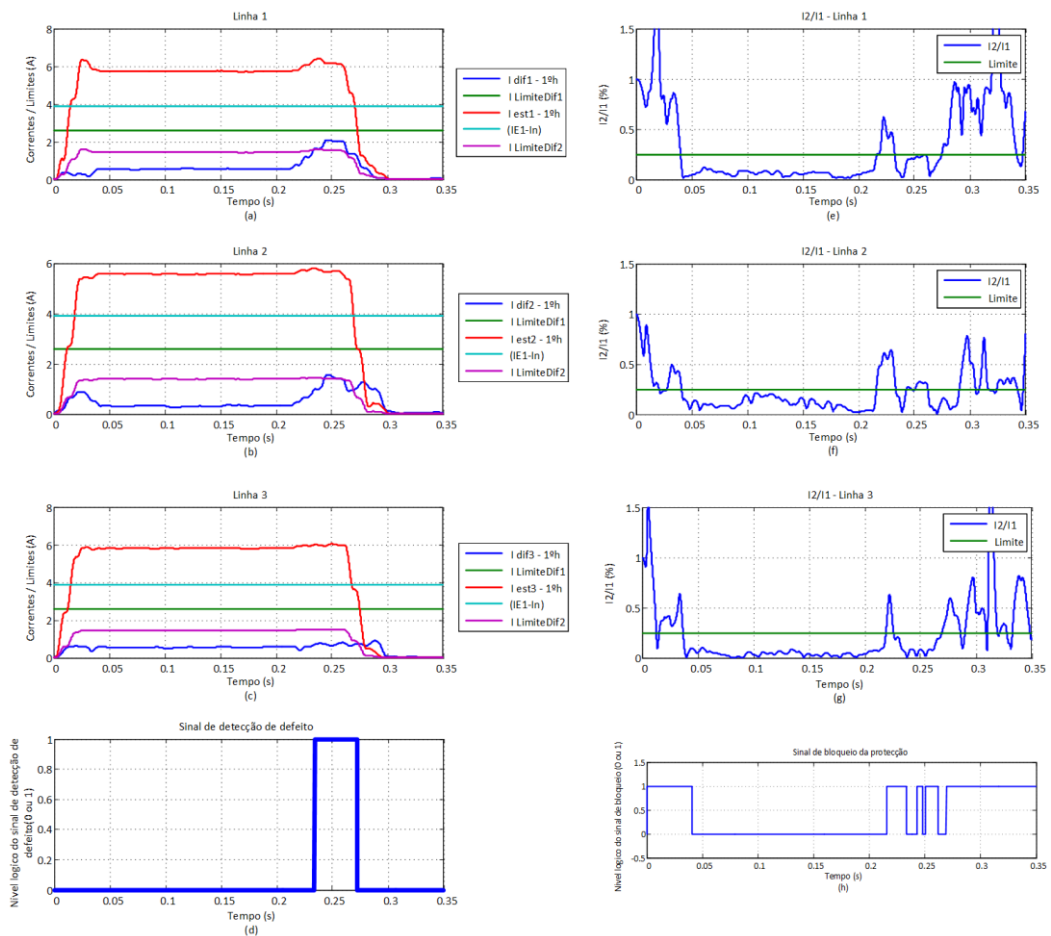


Figura AIV.85 – (a), (b), (c): Evolução temporal do valor eficaz do 1.º harmónico das correntes diferenciais e de estabilização e dos limites da característica operacional; (d): Sinal de deteção de defeito; (e), (f), (g): Razão entre o segundo e o primeiro harmónico das correntes diferenciais; (h): Sinal de bloqueio da protecção.

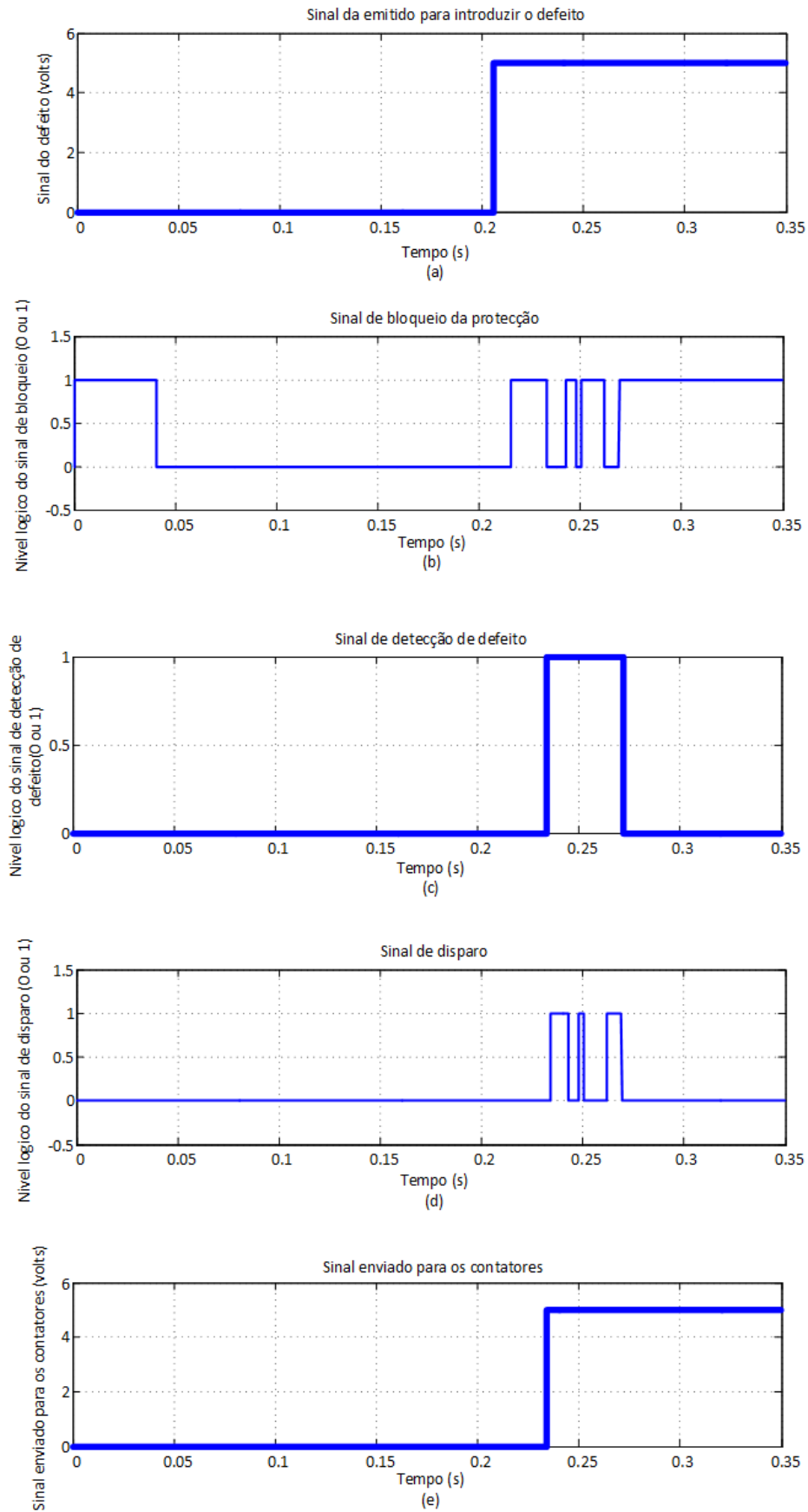


Figura AIV.86 – (a): Sinal emitido para introdução do defeito; (b): Sinal de bloqueio da proteção; (c): Sinal de detecção de defeito; (d): Sinal de disparo; (e): Sinal enviado para os contactores.