



Fábio Emanuel Pais Januário

Detecção de avarias eléctricas em habitações de invisuais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: João Francisco Alves Martins, Professor Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Luís Bica Oliveira, Professor Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos de Palma Goes
Arguente: Prof. Doutor João Pedro Abreu de Oliveira

Deteção de avarias eléctricas em habitações de invisuais

Copyright © Fábio Emanuel Pais Januário, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Doutor João Martins e ao meu co-orientador Doutor Luís Bica Oliveira, por todo o apoio e partilha de conhecimentos ao longo da realização desta dissertação. Agradeço igualmente a constante disponibilidade e compreensão que foram cruciais para o sucesso deste trabalho.

A todos os docentes e não docentes do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, o meu obrigado pela disponibilidade e transmissão de conhecimentos ao longo de todo o curso.

Agradeço aos meus colegas de curso e amigos pelos momentos de convívio, amizade e descontração proporcionados durante este tempo.

Finalmente, agradeço à minha família, nomeadamente aos meus avós, que contribuíram de forma incalculável com a educação e princípios que me tornaram uma pessoa capaz de alcançar esta etapa.

Sumário

Os dispositivos electrónicos têm vindo a evoluir ao longo do tempo de forma a tornar a vida mais cómoda e permitir a sua utilização por parte de todos. Para cumprir estes objectivos é necessário adaptar e implementar sistemas que permitam a pessoas com limitações usufruírem dos respectivos dispositivos.

O trabalho realizado nesta dissertação pretende efectuar a detecção e identificação de defeitos eléctricos gerados por curto-circuitos e sobrecargas em habitações de invisuais. A existência de um curto-circuito ou uma sobrecarga, num equipamento eléctrico, tem como consequência a actuação da protecção do circuito ao qual pertence a tomada onde o equipamento se encontra ligado. No entanto, cada circuito pode contemplar até um máximo de oito tomadas. Para um invisual torna-se muito difícil saber, não só qual o circuito afectado, mas também a tomada com problemas. O sistema desenvolvido será responsável por avisar o utilizador acerca do tipo de avaria e equipamento no qual ocorreu a falha recorrendo a um processador de voz.

Palavras-chave:

Curto-circuito, sobrecarga, defeitos eléctricos, invisuais.

Abstract

The electronic devices have evolved over time in order to make life more comfortable and allow its use by all. To meet these objectives is necessary to adapt and implement systems that allow people with limited enjoy these devices.

The work presented in this thesis aims to perform the detection and identification of defects generated by electrical short circuits and overloads in homes with blind people. The existence of a short circuit or an overload on electrical device causes the acting of the respective protective circuit. However, each circuit may accommodate up to eight electrical devices. For a blind person is very difficult to know which the affected circuit and the jack with problems. The system developed is responsible for notifying the user about the type of fault and the equipment using a voice processor.

Keywords:

Short circuit, overload, electrical faults, blind.

Índice de Matérias

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento, Motivação e Objectivos	1
1.2	Estrutura da Dissertação.....	2
1.3	Principais contribuições da Dissertação.....	3
2	Defeitos e dispositivos de protecção	5
3	Visão geral do sistema e seus componentes	13
3.1	Transdutor de corrente	14
3.1.1	Verificação da curva característica do transdutor	16
3.2	Aquisição e processamento de dados	19
3.2.1	Conversor analógico-digital (ADC)	20
3.3	Envio e recepção de informação	21
3.3.1	Topologia de rede utilizada	23
3.4	Painel de controlo.....	24
3.5	Alimentação do sistema	25
3.5.1	Baterias.....	27
3.5.2	Supercondensadores	27
3.5.2.1	Dimensionamento dos supercondensadores.....	28
4	Implementação do sistema	31
4.1	Protótipo do sistema	31
4.1.1	Alimentação do protótipo.....	32
4.1.2	Processamento da informação e tomada de decisão.....	33
4.1.2.1	Calibração do transdutor de corrente	34
4.1.2.2	Ciclo de monitorização	35
4.1.2.3	Tempos críticos de processamento.....	39
4.1.2.3.1	Dimensão dos vectores.....	41
4.1.2.3.2	Tempo de descarga dos supercondensadores	42
4.2	Painel de controlo.....	42

4.2.1	Menu principal	45
4.2.2	Adicionar dispositivo	46
4.2.3	Ocorrência de defeito	47
4.3	Software Matlab	47
5	Testes efectuados ao sistema	51
5.1	Detecção de curto-circuitos	52
5.2	Detecção de sobrecargas	55
5.3	Comportamento do sistema na ausência de defeitos.	57
5.3.1	Equipamentos com características resistivas.....	57
5.3.2	Equipamentos com fontes de alimentação comutáveis	59
5.3.3	Equipamentos com componentes indutivos	61
5.4	Detecção incorrecta de defeitos eléctricos	64
5.4.1	Correcção de falsas detecções de defeitos.....	66
6	Conclusões e trabalho futuro.....	69
7	Bibliografia.....	71

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquema simplificado de uma rede eléctrica	5
Figura 2.2 - Representação gráfica e decomposição da corrente de curto-circuito.....	6
Figura 2.3 - Representação gráfica do caso simétrico de um curto-circuito.....	7
Figura 2.4 - Representação gráfica do caso assimétrico de um curto-circuito	7
Figura 2.5 - Curva I^2t característica de um condutor para diferentes temperaturas θ	9
Figura 2.6 - Composição interna de um disjuntor da Schneider Electric.....	10
Figura 2.7 - Curva característica tempo-corrente de um disjuntor termomagnético.....	11
Figura 2.8 - Condições a verificar numa canalização protegida por um disjuntor.....	12
Figura 2.9 - Curvas de disparo dos disjuntores C60 da Merlin Gerin.....	12
Figura 3.1 - Diagrama de blocos do sistema implementado	13
Figura 3.2 – a) Transdutor CAS 25-NP da LEM b) Curva característica	15
Figura 3.3 - Verificação prática da curva característica do transdutor.....	17
Figura 3.4 - Curva característica do transdutor obtida experimentalmente	18
Figura 3.5 - Tensão observada no osciloscópio	18
Figura 3.6 – Placa de desenvolvimento <i>Arduino Duemilanove</i>	19
Figura 3.7 - Resolução do sistema – placa <i>Arduino</i> + transdutor	20
Figura 3.8- a) <i>XBee</i> b) <i>XBee Shield</i> c) <i>XBee, XBee Shield e Arduino</i>	22
Figura 3.9 - Topologia em estrela.....	23
Figura 3.10 – Funções disponibilizadas pelo painel de controlo	24
Figura 3.11 - Conversor AC-DC LD10-20B09	26
Figura 3.12 - Curva característica de descarga de um supercondensador.....	28
Figura 3.13 - Esquema de alimentação do sistema	29
Figura 3.14 - Curva de descarga dos supercondensadores obtida experimentalmente	29
Figura 4.1 – Protótipo de uma tomada com monitorização.	31
Figura 4.2 - Esquema de ligações entre o <i>Arduíno</i> e os componentes excluindo o <i>XBee</i> . 32	
Figura 4.3 - Esquema de montagem do conversor AC/DC.....	32
Figura 4.4 – Fluxograma das funções implementadas na placa <i>Arduino</i>	34
Figura 4.5 - Calibração do transdutor de corrente.....	35
Figura 4.6 - Sinais que acompanham os máximos e os mínimos relativos da corrente	36
Figura 4.7 - Sinais utilizados no sistema implementado.....	37
Figura 4.8 – Delimitação das zonas de defeito	38
Figura 4.9 - Construção das <i>frames</i> para envio de informação.....	39
Figura 4.10 - Tempo de processamento do ciclo de controlo	40
Figura 4.11 – Hardware que implementa o painel de controlo	42
Figura 4.12 - Fluxograma das funções implementadas no painel de controlo.....	44

Figura 4.13 - Menu principal do painel de controlo	45
Figura 4.14 – Adicionar tomada	46
Figura 4.15 - Ocorrência de defeito	47
Figura 4.16 – Protótipo de uma tomada adaptada para o <i>software MatLab</i>	48
Figura 4.17 - Gráfico retornado pelo <i>software MatLab</i>	49
Figura 5.1 - Montagem efectuada para verificar o funcionamento do sistema	51
Figura 5.2 - Curva característica do tipo C dos dispositivos da ABB.....	51
Figura 5.3 - Curto-circuito fase-neutro 1	52
Figura 5.4 - Curto-circuito fase-neutro 2	53
Figura 5.5 - Curto-circuito provocado pela corrente de arranque de um microondas.....	53
Figura 5.6 – Fogão eléctrico + forno eléctrico	55
Figura 5.7 – Fogão eléctrico + forno eléctrico + torradeira	56
Figura 5.8 – Fogão eléctrico + torradeira.....	56
Figura 5.9 - Forno eléctrico de 1200W	58
Figura 5.10 – Fritadeira de 840W	58
Figura 5.11 – Torradeira 700W.....	58
Figura 5.12 – Telemóvel 15W	60
Figura 5.13 – Televisão 50W	60
Figura 5.14 - Decodificador digital 31W	60
Figura 5.15 - Frigorífico	61
Figura 5.16 – Batedeira 150W	61
Figura 5.17 - Máquina loiça lavagem 2200W.....	62
Figura 5.18 - Máquina loiça aquecimento 2200W.....	62
Figura 5.19 - Máquina de roupa.....	63
Figura 5.20 - Varinha mágica 150W.....	63
Figura 5.21 - Transformador de portátil de 90W	64
Figura 5.22 - Aspirador de 1800W a funciona abaixo da potência máxima.....	65
Figura 5.23 - Aspirador de 1800W na potência máxima	65
Figura 5.24 - Sobrecarga.....	66
Figura 5.25 – Transitório de corrente de um transformador de portátil.....	67

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Zonas de tolerância nos disparos térmicos e magnéticos das protecções	11
Tabela 3.1 - Principais características do transdutor CAS 25-NP.....	16
Tabela 3.2 – Registo dos valores experimentais da curva característica do transdutor	17
Tabela 3.3 - Principais características da placa <i>Arduino Duemilanove</i>	19
Tabela 3.4 - Comparação entre as principais tecnologias sem fios.....	21
Tabela 3.5 - Tipos de dispositivos no protocolo <i>ZigBee</i>	22
Tabela 3.6 - Principais <i>frames</i> disponibilizadas pelo módulo <i>XBee</i>	24
Tabela 3.7 - Consumos teóricos máximos dados pelos fabricantes	25
Tabela 3.8 - Consumos obtidos por medição	25
Tabela 3.9 - Características do conversor AC-DC.....	26
Tabela 3.10 - Características dos supercondensadores da Panasonic	28
Tabela 4.1 - Margens de disparo das protecções.....	37
Tabela 4.2 – Exemplos das margens de disparo utilizadas	38
Tabela 4.3 - Tempos de comunicação entre o <i>Arduino</i> e o <i>XBee</i>	40
Tabela 4.4 - Descrição das características dos dispositivos presentes no menu	46
Tabela 4.5 - Estrutura das mensagens apresentadas ao utilizador.....	47
Tabela 5.1 – Correntes envolvidas nos curto-circuitos e tempos de disparo.	52
Tabela 5.2 - Correntes envolvidas nas sobrecargas e tempos de disparo.....	55
Tabela 5.3 - Correntes envolvidas nos equipamentos resistivos.....	57
Tabela 5.4 - Correntes envolvidas nos equipamentos com fontes comutáveis.	59
Tabela 5.5 - Correntes envolvidas nos equipamentos indutivos	61
Tabela 5.6 - Correntes envolvidas numa máquina de lavar loiça	62
Tabela 5.7 - Correntes envolvidas em equipamentos com controlo de velocidade	63
Tabela 5.8 - Correntes envolvidas na detecção incorrecta de defeitos.....	64

Lista de Acrónimos

AC	Corrente alternada
DC	Corrente contínua
A	Amper
A_{ef}	Amper Eficaz
V	Volt
W	Watt
F	Farad
Hz	Hertz
ms	milissegundos
s	segundos
min	minutos
ADC	Conversor analógico-digital
ESR	<i>Equivalent Series Resistor</i>
NA	Nada a assinalar

Lista de Símbolos

I_B	Corrente de serviço
I_Z	Corrente admissível
I_n	Corrente estipulada
I_{nt}	Corrente convencional de não funcionamento
I_2	Corrente convencional de funcionamento
I_{pc}	Poder de corte
I	Corrente (valor eficaz)
I_{max}	Corrente máxima
i	Corrente instantânea
i_{ac}	Componente alternada sinusoidal da corrente instantânea de curto-circuito
i_{dc}	Componente aperiódica da corrente instantânea de curto-circuito
i_p	Máximo de corrente de curto-circuito (primeiro pico da corrente de falha)

I_{ccmin}	Corrente de curto-circuito (valor eficaz) no ponto mais afastado do circuito
I_{ccmax}	Corrente de curto-circuito (valor eficaz) máxima
E	Força electromotriz (valor eficaz)
e	Força electromotriz instantânea
U_{max}	Máximo da onda de tensão sinusoidal
V_w	Tensão de funcionamento normal
V_{min}	Tensão mínima de funcionamento
Z_{sc}	Impedância a montante da falha
Z_s	Impedância de carga
R	Resistência
C	Capacidade
L	Indutância
X	Reactância
ω	Frequência angular
t	Tempo
t_p	Tempo de corte do aparelho de protecção
α	Ângulo entre o início da falha e o zero de tensão
φ	Desfasagem entre a corrente e a tensão
S	Secção dos condutores
K	Constante cujo valor depende da constituição do condutor e do seu isolamento.

1 Introdução

1.1 Enquadramento, Motivação e Objectivos

Existe actualmente no mercado diversos tipos de dispositivos que permitem verificar o consumo eléctrico de uma habitação, desde ao nível do quadro eléctrico, até aos níveis de consumo individuais em tomadas e circuitos [1]. Estes dispositivos centram-se na monitorização e informação acerca dos gastos energéticos dos equipamentos, desconhecendo o estado de usabilidade e impossibilitando a identificação de falhas nos próprios equipamentos e circuitos.

A preocupação com o aconselhamento energético e a capacidade de integração de acessibilidade por parte de todos tem vindo a tornar-se um ponto a alcançar, sendo assim necessário adaptar estes sistemas a pessoas com limitações que não permitam usufruir destes dispositivos. Esta dissertação pretende passar a barreira do simples medidor energético e integrar outras funcionalidades, tendo como objectivo desenvolver um dispositivo capaz de detectar e identificar defeitos eléctricos nos equipamentos presentes em habitações de invisuais.

Após a ocorrência de um curto-circuito ou de uma sobrecarga prolongada num equipamento eléctrico tem-se como consequência a actuação da protecção do circuito onde ocorreu o respectivo defeito. As protecções utilizadas em habitações estão distribuídas de forma a protegerem no máximo oito tomadas simultaneamente, tornando-se difícil para qualquer pessoa identificar imediatamente o equipamento defeituosos entre os diversos que se encontram a ser alimentados pelo circuito. No caso de um invisual é ainda mais complicado verificar o causador do disparo da protecção.

O sistema desenvolvido será responsável por detectar, identificar e posteriormente informar a ocorrência de defeitos, recorrendo a um processador de voz. Pretende-se ainda obter a informação do tipo de avaria e do dispositivo onde ocorreu o defeito.

1.2 Estrutura da Dissertação.

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, estando cada um deles focado numa parte do trabalho desenvolvido.

No capítulo 1, onde se insere este texto, dá-se a conhecer as razões da escolha deste tema e o que motivou a avançar com o trabalho. Tenta-se dar a conhecer as motivações e o papel que esta dissertação pretende ter na sociedade e na forma como esta utiliza a tecnologia.

No capítulo 2 aborda-se os conceitos fundamentais para a compreensão de todo o trabalho desenvolvido, verificando-se as correntes envolvidas numa instalação eléctrica, bem como o seu comportamento em caso de defeitos. Aborda-se também os dispositivos de protecção explicando o seu funcionamento e as regras que implementam de forma a proteger os equipamentos.

No capítulo 3 dá-se a conhecer o sistema implementado e os componentes que o constituem, mencionando as razões da sua escolha. Verifica-se o correcto funcionamento dos vários componentes e são explicadas as suas características.

No capítulo 4 explica-se a montagem efectuada e todo o *software* implementado de forma a cumprir todas as especificações. Apresentam-se figuras do protótipo construído e a forma como foram interligados os diversos componentes.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos pela utilização do sistema implementado, verificando o seu funcionamento em diversas situações (curto-circuito, sobrecarga e funcionamento normal).

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões retiradas da realização do trabalho, acompanhadas de sugestões para melhorar o funcionamento do sistema.

1.3 Principais contribuições da Dissertação.

A realização deste trabalho permite estender a constante preocupação em torno da eficiência energética e dos consumos domésticos para a detecção e identificação de defeitos eléctricos associados à ocorrência de curto-circuitos e sobrecargas em habitações.

Após a ocorrência de um curto-circuito ou de uma sobrecarga e do respectivo disparo da protecção algumas pessoas continuam sem conseguir identificar o equipamento que originou o defeito. Cada circuito pode ter um máximo de oito tomadas, podendo ainda o defeito surgir associado ao próprio circuito (ex: cabos eléctricos em mau estado) e não a nenhum equipamento concretamente. Assim sendo, torna-se útil a implementação de um sistema que permita identificar e informar automaticamente este tipo de problemas.

Tendo ainda presente a ideia que todas as pessoas têm direito a usufruir deste sistema, torna-se importante contar com as suas limitações. Neste caso tem-se em conta os invisuais, fornecendo-se uma interface com processador de voz de forma a este tipo de pessoas poderem usufruir igualmente da informação prestada pelo sistema.

Este tipo de sistemas contribuem para a posterior tentativa de integração de vários sistemas, podendo ter em um único dispositivo a capacidade de detecção de defeitos, verificação de consumos energéticos e aconselhamento energético, nunca esquecendo a tentativa de abranger o maior número de utilizadores.

2 Defeitos e dispositivos de protecção

Os dispositivos de protecção são construídos de forma a proteger os circuitos na ocorrência de defeitos originados por sobrecargas e/ou curto-circuitos. Uma sobrecarga ocorre quando a corrente eléctrica excede a corrente nominal do circuito (826-11-14). Um curto-circuito ocorre quando acidentalmente ou intencionalmente se estabelece um caminho condutor entre duas ou mais partes condutoras forçando a diferença de potencial eléctrico entre elas a ser igual ou próximos de zero (826-14-10).

Para entender melhor estes conceitos apresenta-se uma breve descrição das correntes envolvidas numa instalação eléctrica [2].

- Corrente de serviço (I_B): corresponde à corrente destinada a ser transportada por um circuito em funcionamento normal (826-05-04).
- Corrente admissível (I_Z): valor máximo de corrente que pode percorrer, em permanência, um condutor em dadas condições sem que a sua temperatura em regime permanente, ultrapasse um valor especificado (826-05-05).
- Sobreintensidade: corrente de valor superior ao da corrente admissível (826-05-06).
- Corrente de sobrecarga: sobreintensidade que se produz num circuito na ausência de um defeito eléctrico (826-05-07).
- Corrente de curto-circuito: sobreintensidade resultante de um defeito de impedância desprezável entre condutores activos que apresentem, em serviço normal, uma diferença de potencial (826-05-08).

No caso de um curto-circuito, a corrente caracteriza-se como um defeito de impedância desprezável. De forma simplificada, uma rede eléctrica (Figura 2.1) é constituída por uma fonte de corrente alternada (e), um interruptor, uma impedância que representa todas as impedâncias a montante (Z_{sc}) e uma carga (Z_s).

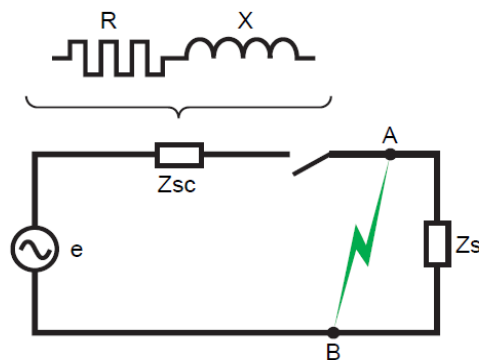


Figura 2.1 - Esquema simplificado de uma rede eléctrica
(adaptada de [3])

Quando ocorre um curto-circuito entre A e B (Figura 2.1), a impedância entre esses dois pontos é desprezável, vindo a corrente para valores elevados uma vez que se encontra limitada apenas por Z_{sc} . O transitório desta corrente vai depender da reactância X ($X=\omega L$), da resistência R e da relação entre a impedância do gerador e a impedância existente entre o gerador e o ponto onde ocorre o curto-circuito [3] [4].

No caso desta dissertação os defeitos ocorridos são afastados do gerador, ou seja, a impedância entre o gerador e o ponto onde ocorre o defeito é maior do que a impedância do gerador, podendo-se ignorar esta última.

A tensão fornecida ao circuito é caracterizada pela sua expressão geral:

$$e = E \sin(\omega t + \alpha) \quad \text{Equação 2.1}$$

Analisando o circuito (Figura 2.1) e recorrendo à Lei de Ohm pode-se escrever:

$$E \sin(\omega t + \alpha) = L \frac{di}{dt} + Ri \quad \text{Equação 2.2}$$

A solução desta equação diferencial, considerando corrente nula no instante inicial (despreza-se a corrente de serviço por ser bastante inferior à de curto circuito), é dada por:

$$i = I \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{Equação 2.3}$$

Sendo I a corrente de curto-circuito limitada apenas pela impedância Z_{sc} dada por:

$$I = \frac{E}{|Z_{sc}|} \quad \text{Equação 2.4}$$

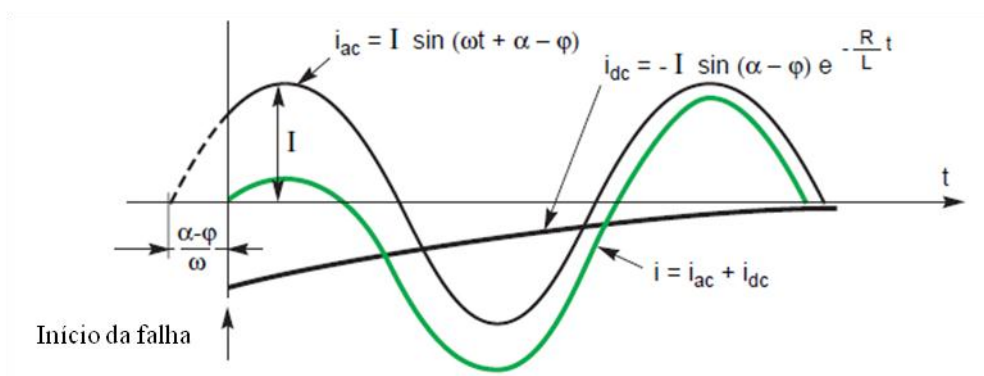


Figura 2.2 - Representação gráfica e decomposição da corrente de curto-circuito (adaptada de [3])

O momento em que o defeito ocorre é caracterizado pela soma de duas componentes (Equação 2.3), uma alternada com um desfasamento φ em relação à tensão e outra aperiódica que decai para zero à medida que o tempo (t) tende para infinito. A Figura 2.2 representa a composição gráfica da soma algébrica destas duas componentes.

Pode-se verificar a existência de dois casos extremos:

1. $\alpha = \varphi = \frac{\pi}{2}$

Neste caso a corrente diz-se simétrica visto variar de forma simétrica em relação ao eixo dos tempos e apresenta a mesma amplitude desde o início da falha até ao regime final, sendo esta amplitude dada pela Equação 2.4. Este caso está representado na Figura 2.3.

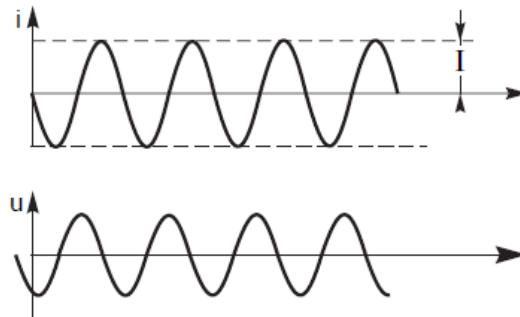


Figura 2.3 - Representação gráfica do caso simétrico de um curto-circuito (adaptada de [3])

2. $\alpha = 0$

Neste caso a corrente diz-se assimétrica e o seu valor de pico (i_p) depende de φ , ou seja, depende da relação entre a resistência e a indutância presentes em Z_{sc} . Este caso está representado na Figura 2.4 e é caracterizado pela Equação 2.5.

$$i = I \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(-\varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad \text{Equação 2.5}$$

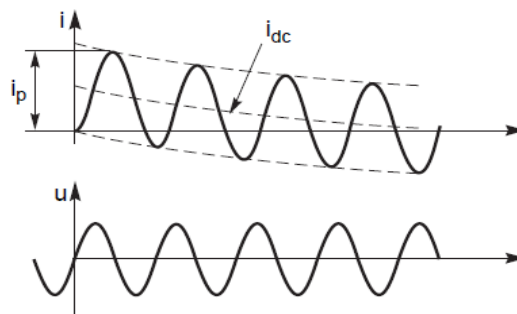


Figura 2.4 - Representação gráfica do caso assimétrico de um curto-circuito (adaptada de [3])

Perante estes fenómenos é necessário munir as instalações eléctricas de protecções adequadas que impeçam a ocorrência de danos na instalação aquando da ocorrência de sobrecargas e curto-circuitos. Estas protecções devem ser asseguradas por dispositivos de corte automático que cumpram a norma EN 60898 e apresentem como principais características [2]:

- Corrente estipulada (I_n): valor da corrente a partir do qual são determinadas as condições de funcionamento do dispositivo de protecção.
- Corrente convencional de não funcionamento (I_{nt}): valor especificado da corrente que pode ser suportada por um dispositivo de protecção num tempo especificado (denominado tempo convencional) sem provocar o seu funcionamento.
- Corrente convencional de funcionamento (I_2): valor especificado da corrente que provoca o funcionamento do dispositivo de protecção antes do final de um tempo especificado, denominado tempo convencional.
- Poder de corte (I_{pc}): valor da corrente que o dispositivo de protecção é capaz de cortar a uma dada tensão especificada e em condições prescritas de emprego e de funcionamento.

Na protecção contra sobrecargas devem ser previstos dispositivos de protecção que interrompam as correntes de sobrecarga dos condutores dos circuitos antes que estas possam provocar aquecimentos prejudiciais ao isolamento, às ligações, às extremidades ou aos elementos colocados nas proximidades das canalizações. Estes dispositivos devem satisfazer, simultaneamente, as seguintes condições [2]

- $I_B \leq I_n \leq I_z$
- $I_2 \leq 1.45 I_z$

Na protecção contra os curtos-circuitos devem ser previstos dispositivos de protecção que interrompam as correntes de curto-circuito que se produzam, em qualquer ponto do circuito antes que estas se possam tornar perigosas em virtude dos efeitos térmicos e mecânicos que se produzem nos condutores e nas ligações. O limite destes efeitos térmicos é dado pela Equação 2.6 e observado na Figura 2.5.

$$\int i^2 dt \leq k^2 S^2 \quad \text{Equação 2.6}$$

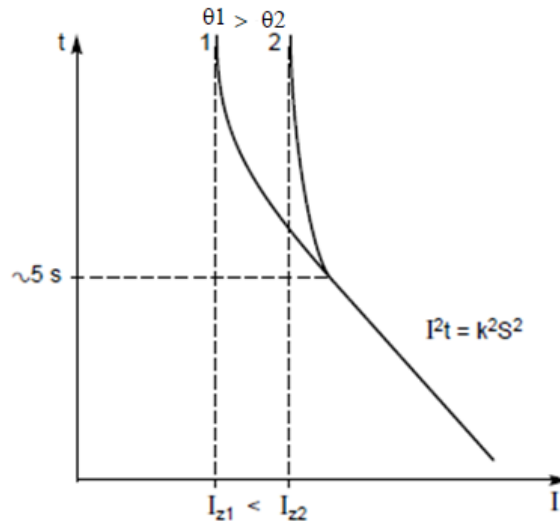


Figura 2.5 - Curva I^2t característica de um condutor para diferentes temperaturas θ (adaptada de [3])

Para os curtos-circuitos de duração não superior a 5 s, o tempo necessário para que uma corrente de curto-circuito eleve a temperatura dos condutores da temperatura máxima admissível em serviço normal até ao valor limite pode ser calculado, numa primeira aproximação, através da seguinte expressão [2]

$$\sqrt{t} \leq K \frac{S}{I_{ccmin}} \quad \text{Equação 2.7}$$

Nesta dissertação interessa o estudo de dispositivos que garantam, simultaneamente, a protecção contra sobrecargas e curto-circuitos. Estes dispositivos devem satisfazer as regras indicadas anteriormente e interromper qualquer sobreintensidade de valor não inferior ao da corrente de curto-circuito presumida no ponto onde forem instalados. Utilizando um dispositivo de protecção contra sobrecargas, a canalização encontra-se também protegida contra curto-circuitos se verificarem-se, simultaneamente, as seguintes condições:

- O poder de corte do aparelho deve ser, no mínimo, igual à máxima corrente de curto-circuito prevista para o local.

$$I_{pc} \geq I_{ccmax} \quad \text{Equação 2.8}$$

- O tempo de corte do aparelho de protecção contra sobrecargas deverá ser compatível com o comportamento térmico da canalização.

$$t_p \leq \frac{(I^2t)}{I_{ccmin}^2} \xrightarrow{\text{Equação 2.7}} t \leq \frac{K^2 S^2}{I_{ccmin}^2} \quad \text{Equação 2.9}$$

Perante estas especificações utilizam-se normalmente os seguintes dispositivos de protecção:

- Disjuntores (com disparadores de sobrecarga e de máximo de corrente);
- Disjuntores associados a fusíveis;
- Fusíveis do tipo gG¹.

Na gama de disjuntores utilizados em instalações domésticas, onde o projecto desenvolvido se pretende incorporar, são utilizados disjuntores que cumpram a norma EN 60898. Estes permitem o rearmamento do dispositivo, tornando o circuito novamente operacional sem a necessidade de substituir componentes como no caso dos fusíveis. Este tipo de disjuntores permite gamas de corrente estipulada de 6A a 125A.

Um disjuntor é um aparelho mecânico de conexão capaz de estabelecer, de suportar e de interromper correntes nas condições normais do circuito. Este aparelho é ainda capaz de estabelecer, suportar num tempo especificado, e interromper correntes em condições anormais especificadas para o circuito, tais como as correntes de curto-circuito (441-14-20) [2].

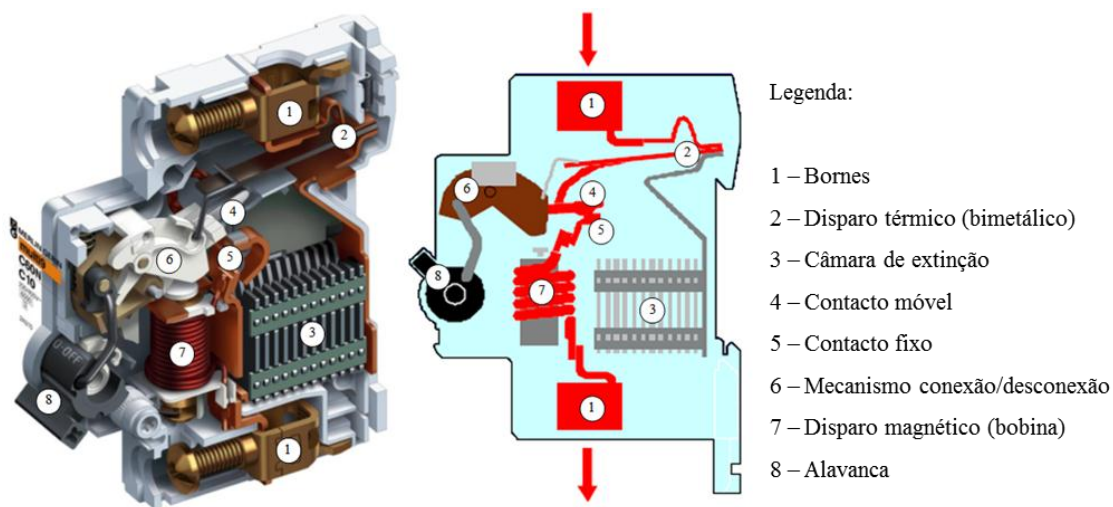


Figura 2.6 - Composição interna de um disjuntor da Schneider Electric (adaptado de [5])

Na Figura 2.6 está representado um disjuntor termomagnético unipolar. Este disjuntor encontra-se equipado com um disparo térmico, que actua em caso de sobrecargas e um disparo magnético para proteger a instalação contra correntes de curto-circuito. As duas zonas de disparo podem ser observadas na Figura 2.7.

¹ “g” – Actuação para sobrecarga e curto-circuito; “G” – Protecção de cabos e uso geral

Perante a existência de uma sobrecarga, a subida do valor de corrente irá proporcionar o aquecimento do material bimetálico que devido às suas características irá curvar cortando a corrente do circuito e direccionando-a para a câmara de extinção.

No caso de ocorrência de um curto-circuito a corrente apresenta um rápido incremento no seu valor, contudo o material bimetálico demora tempo a deformar sendo por isso necessário outro mecanismo de corte. O disparo magnético consiste em fazer passar a corrente por uma bobina que cria um campo magnético responsável por atrair a armadura de forma a provocar, através de acoplamentos mecânicos, a abertura dos contactos do disjuntor.

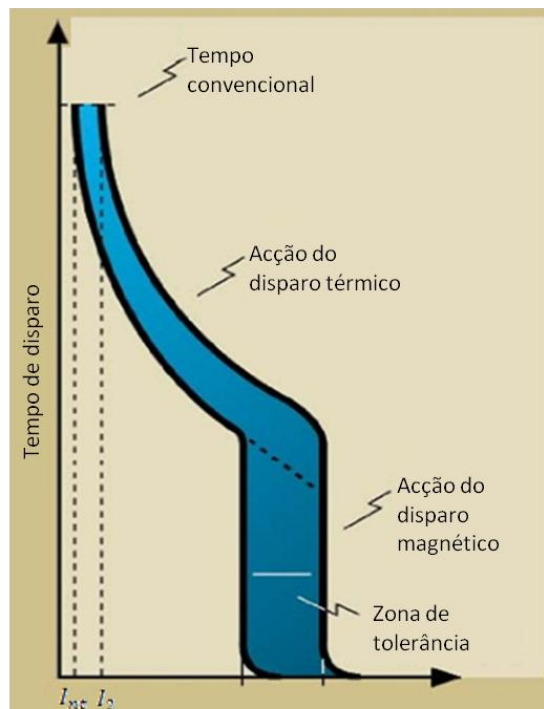


Figura 2.7 - Curva característica tempo-corrente de um disjuntor termomagnético

A norma EN 60898 define, para o disparo magnético dos disjuntores, zonas de tolerância B, C e D que podem ser usadas consoante a finalidade do dispositivo de protecção. Os limites de acção dos disparos térmicos e magnéticos podem ser observados na Tabela 2.1. A norma define ainda como tempo convencional uma hora, e como tempo de disparo em condições de curto-circuito 10 milissegundos.

Tabela 2.1 - Zonas de tolerância nos disparos térmicos e magnéticos das protecções

Tipo de curva	Finalidade	Acção do disparo térmico		Acção do disparo magnético	
		Limite mínimo	Limite máximo	Limite mínimo	Limite máximo
B	Cargas resistivas			$3 I_n$	$5 I_n$
C	Cargas mistas	Entre $1.13I_n$ e $1.45I_n$	Acção do disparo magnético	$5 I_n$	$10 I_n$
D	Cargas indutivas			$10 I_n$	$20 I_n$

Na Figura 2.8 encontram-se representadas as condições a verificar para proteger uma canalização eléctrica com um disjuntor. Observa-se que a curva característica do disjuntor garante que a corrente que circula no cabo durante um determinado intervalo de tempo nunca é suficiente para danificar os condutores, permitindo o fornecimentos da corrente de serviço em condições normais de funcionamento.

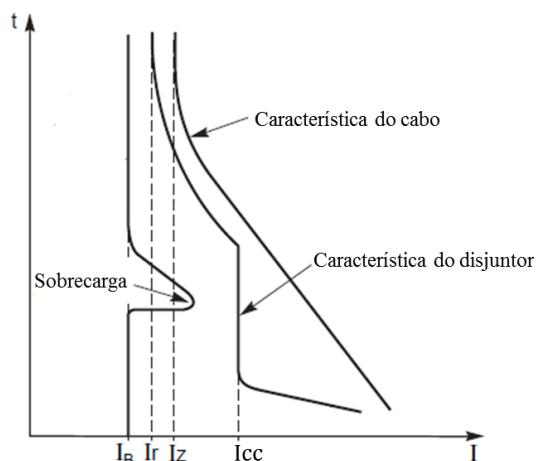


Figura 2.8 - Condições a verificar numa canalização protegida por um disjuntor (adaptada de [3])

A gama de disjuntores domésticos (C60) da marca Schneider Electric é fabricada com as três curvas características presentes na Figura 2.9. No eixo vertical encontra-se o tempo em segundos e na horizontal a relação entre a corrente na canalização e a corrente estipulada. Verifica-se que o disparo magnético ocorre no máximo entre 10ms e 20ms após a existência de correntes elevadas, enquanto o disparo térmico ocorre na ordem dos segundos e minutos. As correntes que accionam o disparo magnético encontram-se entre três a catorze vezes a corrente estipulada dependendo da curva.

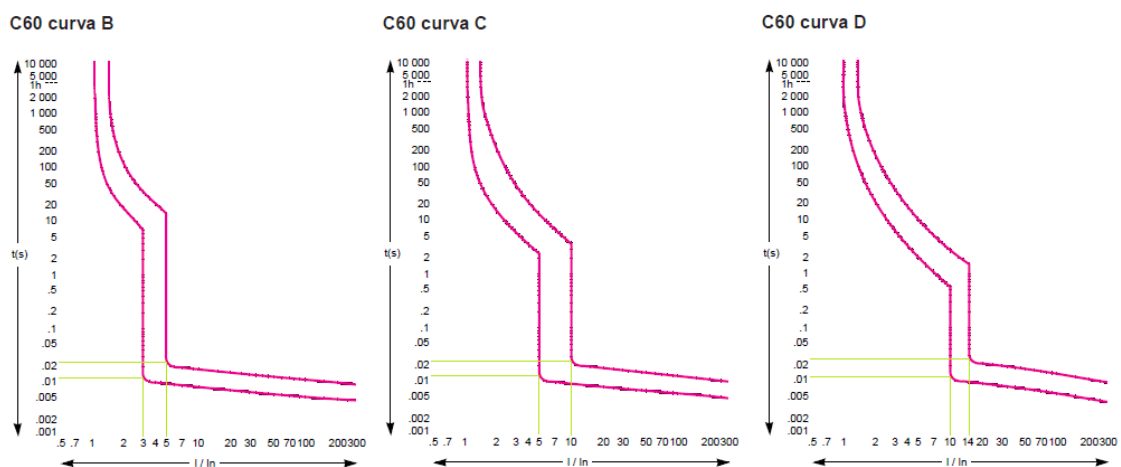


Figura 2.9 - Curvas de disparo dos disjuntores C60 da Merlin Gerin

3 Visão geral do sistema e seus componentes

O sistema implementado pretende monitorizar individualmente as tomadas de uma habitação, permitindo identificar o equipamento no qual ocorreu o defeito que levou ao disparo da protecção do referido circuito. Um circuito eléctrico de tomadas pode conter até um máximo de oito tomadas, podendo ser o disparo da protecção desse circuito originado por qualquer um dos equipamentos ligados às respectivas tomadas, bem como a um defeito ao nível dos cabos eléctricos do circuito. Este sistema irá permitir identificar qual o equipamento responsável pelo disparo da protecção e qual o tipo de defeito que originou esse mesmo disparo.

Para atingir o objectivo descrito acima implementou-se o sistema representado na Figura 3.1. O sistema é constituído por um módulo central denominado painel de controlo que contem os dados de todos os equipamentos e circuitos que se encontram a ser monitorizados fornecendo uma interface de comunicação entre o utilizador e o resto do sistema. A monitorização encontra-se assegurada por módulos distribuídos pelas tomadas onde os equipamentos se encontram ligados, comunicando todos esses módulos com o painel de controlo. Este sistema pretende-se adaptável e de fácil utilização em instalações eléctricas já existentes. Deste modo evita-se a monitorização ao nível do quadro eléctrico, utilizando apenas monitorização local nos equipamentos recorrendo a dispositivos do tipo “plug” nas tomadas onde os equipamentos se encontram conectados.

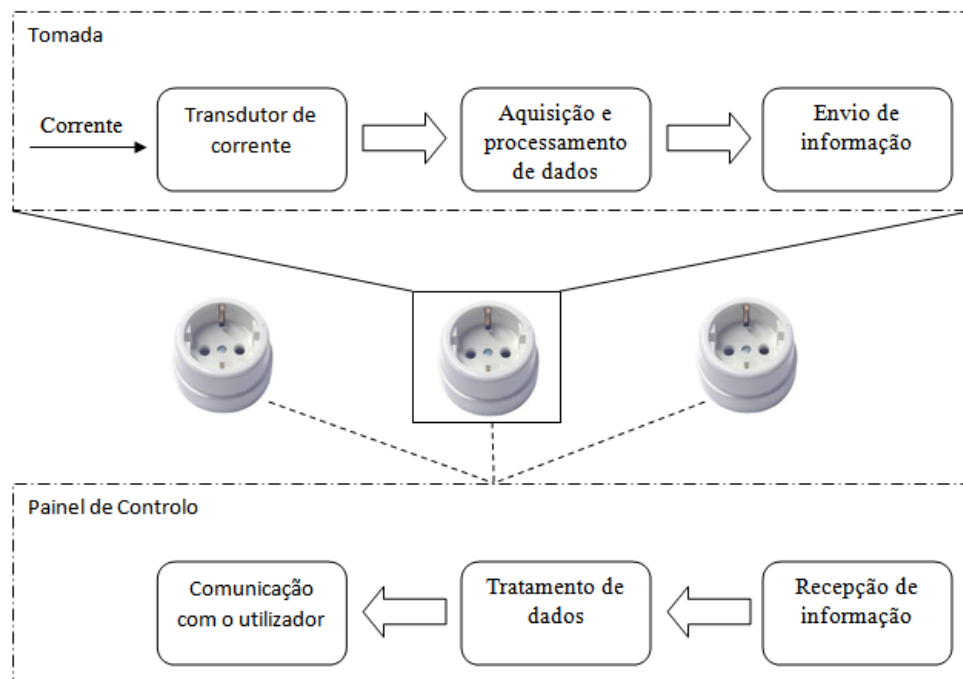


Figura 3.1 - Diagrama de blocos do sistema implementado

Cada equipamento onde se pretende verificar possíveis ocorrências de defeitos terá que ter obrigatoriamente um módulo associado que é responsável por verificar localmente o consumo do equipamento e enviar, em caso de detecção de defeito, a respectiva informação para o painel de controlo. O painel de controlo é responsável por fornecer a informação recepcionada ao utilizador, mencionando o tipo de defeito e o equipamento onde ocorreu.

Na implementação deste sistema existem factores críticos que é necessário ter em conta para o seu correcto funcionamento. O facto de se estar a monitorizar correntes que se esperam elevadas, no caso da ocorrência de curto-circuitos, obriga a ter atenção na escolha do dispositivo que será responsável por essa monitorização. Sabendo também que um curto-circuito leva ao disparo das protecções num tempo máximo de 10ms, torna-se crucial obter e processar o sinal de corrente num tempo inferior, de forma a conseguir obter o melhor possível o valor máximo de corrente pedida ao circuito. Note-se que 10ms corresponde a meio ciclo da rede, logo encontra-se apenas um extremo de corrente. No capítulo referente à implementação do sistema volta-se a falar dos tempos críticos de processamento (ver subcapítulo 4.1.2.3), mencionando a taxa de amostragem utilizada e o tempo de processamento do sinal obtido. Finalmente é necessário ter em conta como será enviada a informação da tomada para o painel de controlo, uma vez que o circuito eléctrico encontra-se interrompido devido à actuação da protecção.

Apesar de não estar representado na Figura 3.1 não se pode esquecer a alimentação de toda a electrónica na parte da tomada, bem como a continuidade desta após o disparo da protecção e respectivo corte da alimentação. Este assunto será abordado mais à frente neste capítulo (ver subcapítulo 3.5).

Procede-se de seguida à explicação de cada bloco da Figura 3.1, justificando a sua inserção no sistema e o *hardware* que o implementa.

3.1 Transdutor de corrente

Tendo como objectivo processar e verificar os níveis de corrente que estão a ser consumidos em cada equipamento é necessário utilizar um transdutor de corrente. Este transdutor permite ter uma gama de tensões proporcionais à corrente consumida de forma a poder processar essa informação num microcontrolador.

A escolha do transdutor de corrente foi efectuada tendo em conta as seguintes especificações:

- i. Rápida resposta à variação de corrente, como visto o tempo máximo de disparo de um disjuntor em condições de curto-circuito situa-se pelos 10ms.
- ii. Elevada gama de correntes admissíveis, de forma a ser possível diferenciar sobrecargas de curtos-circuitos.
- iii. Bom isolamento para suportar no máximo durante cerca de 10ms as correntes de curto-circuito sem se danificar.
- iv. Tensão de saída entre 0 e 5V para ser compatível com o microcontrolador utilizado (ver subcapítulo 3.2).

De forma a simplificar o algoritmo de detecção de defeitos eléctricos torna-se útil utilizar transdutores de corrente que têm como tensão de saída um valor proporcional ao valor eficaz de corrente, sendo apenas necessário verificar se este valor se encontra dentro dos admissíveis para o circuito em questão. Contudo, esse tipo de transdutores apresenta tempos de resposta entre 150ms e 300ms (transdutores da LEM), muito superior aos tempos críticos, podendo ser utilizados apenas na detecção de sobrecargas. Assim sendo, utiliza-se neste sistema transdutores de corrente que possuem uma saída proporcional à corrente instantânea, tendo estes, tempos de resposta muito inferiores.

O dispositivo utilizado para este efeito foi o transdutor CAS 25-NP da LEM[®] presente na Figura 3.2, tendo como principais características as presentes na Tabela 3.1 [6].

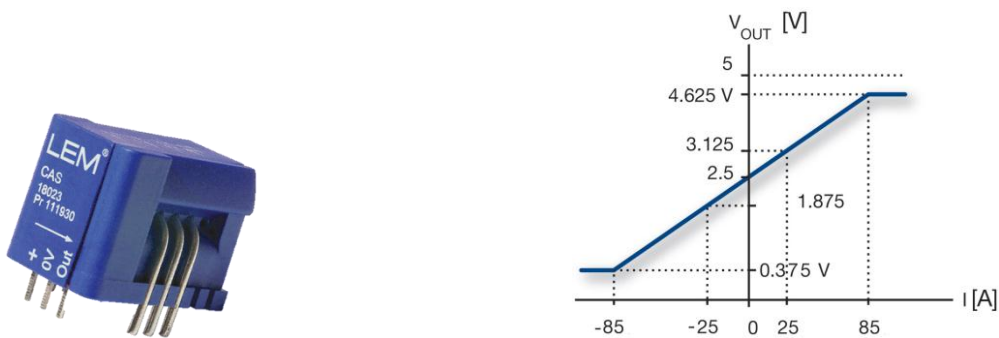


Figura 3.2 – a) Transdutor CAS 25-NP da LEM **b) Curva característica**
(adaptado de [6])

A escolha deste transdutor foi efectuada de forma a cumprir as especificações já mencionadas acima. O isolamento galvânico proporciona uma maior protecção do transdutor face à ocorrência de curtos-circuitos. Como se observa na Figura 3.2 b) a saída é linear e proporcional à corrente apresentando limites entre 0V e 5V como pretendido. A gama de corrente é elevada, sabendo-se contudo que as correntes de curto-circuito poderão ser superiores

a 85A. Neste caso pode-se considerar 85A um curto-circuito visto a nível doméstico os disjuntores apresentarem normalmente como corrente estipulada 16A ou 20A. Note-se que ao optar por uma corrente nominal superior seria mais difícil medir consumos reduzidos, uma vez que a tensão de saída mantem-se sempre entre 0V e 5V. Finalmente, este transdutor apresenta um tempo de resposta no máximo de 0.3 μ s, valor bastante satisfatório comparado com o tempo de disparo de um disjuntor.

Tabela 3.1 - Principais características do transdutor CAS 25-NP

Corrente admissível	Mínimo	-85 A
	Nominal	25 A
	Máximo	85 A
Tensão de alimentação	Mínimo	4.75 V
	Recomendado	5 V
	Máximo	5.25 V
Tensão de saída	Mínimo	0.375 V
	Corrente Nula	2.5 V
	Máximo	4.625 V
Tempo de resposta	< 0.3 μ s	
Sensibilidade	25 mV/A	
Temperatura	Mínimo	-40°C
	Máximo	85°C
Precisão em relação à corrente nominal	a 25°C	0.8%
	a 85°C	2.5%

De forma a verificar algumas características deste transdutor foi efectuada a montagem que se segue e as respectivas medições.

3.1.1 Verificação da curva característica do transdutor

Para proceder à verificação da curva característica dada na Figura 3.2 b) procedeu-se à montagem do circuito presente na Figura 3.3, obtendo-se os resultados presentes na Tabela 3.2 e representados graficamente na Figura 3.4.

De forma a ter acesso a correntes sinusoidais com diversas amplitudes recorreu-se ao ensaio de um transformador em curto-circuito. Assim sendo, o secundário do transformador foi curto-circuitado, fazendo a corrente passar pelo transdutor de corrente. Com esta montagem, um pequeno incremento de tensão no lado do primário provoca um rápido aumento do valor de corrente no lado do secundário.

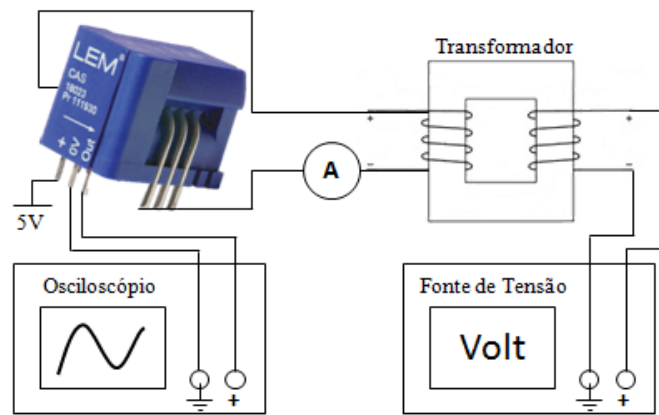


Figura 3.3 - Verificação prática da curva característica do transdutor

A tensão aplicada ao primário do transformador foi controlada por uma fonte de tensão variável (autotransformador), obtendo-se no secundário as correntes eficazes registadas pelo amperímetro (I em Tabela 3.2). A tensão de saída do transdutor de corrente, que se apresenta como imagem da corrente instantânea foi observada num osciloscópio registando-se o seu valor máximo (U_{max} em Tabela 3.2). A Tabela 3.2 apresenta os valores registados para diferentes correntes no transdutor.

Tabela 3.2 – Registo dos valores experimentais da curva característica do transdutor

I	$I_{max} = \sqrt{2} \times I$	U_{max}
2	2,828	2,704
3	4,243	2,736
4	6,053	2,78
5	7,227	2,808
6	8,485	2,836
7	9,899	2,888
8	11,314	2,924
9	12,728	2,952
10	14,142	2,988
12	16,971	3,064
14	19,799	3,128
16	22,627	3,208
18	25,456	3,3
20	28,284	3,36
25	35,355	3,54
30	42,426	3,76
40	56,569	4

Na Figura 3.4 visualiza-se a representação gráfica dos valores presentes na Tabela 3.2 e a curva que melhor se adapta (calculada por regressão linear) a esses valores, obtendo-se como expressão da curva característica do transdutor:

$$U_{max} = 0.0252 \times I_{max} + 2.6355 \quad \text{Equação 3.1}$$

Esta expressão apresenta um declive semelhante à dada teoricamente (Equação 3.2), mas uma tensão de saída para corrente nula um pouco superior.

$$U_{max} = 0.025 \times I_{max} + 2.5 \quad \text{Equação 3.2}$$

Esta diferença pode ser justificada pelo facto da tensão de *offset* (2.5V) ser gerada internamente no sensor, não sendo tão precisa como no caso de outros modelos onde essa tensão é fornecida externamente.

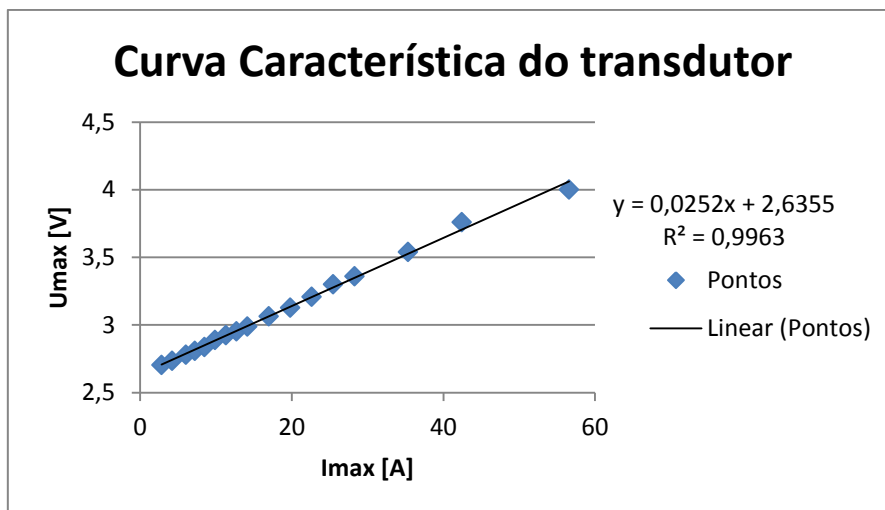


Figura 3.4 - Curva característica do transdutor obtida experimentalmente

Na Figura 3.5 observa-se a saída do transdutor de corrente para uma carga constituída por um termoventilador de 1500W, verificando-se a frequência da rede (50Hz) e identificando-se facilmente os máximos e os mínimos do sinal.

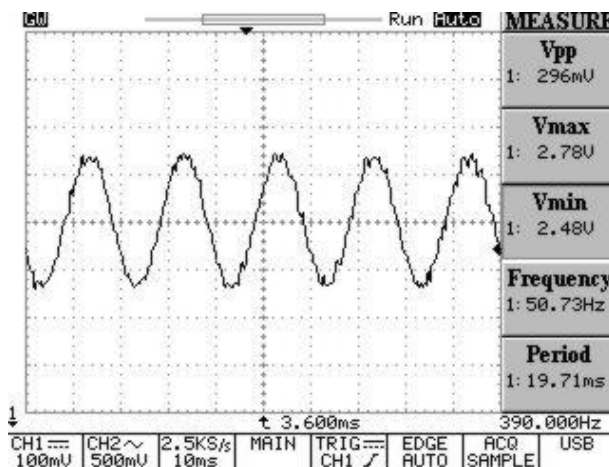


Figura 3.5 - Tensão observada no osciloscópio

3.2 Aquisição e processamento de dados

Para proceder à aquisição do sinal analógico de tensão proveniente do transdutor, seu processamento e posterior envio de informação, optou-se por utilizar uma placa de desenvolvimento que contivesse todos os módulos necessários para concretizar estas funções. Com este intuito, utilizou-se a placa de desenvolvimento *Arduino Duemilanove* presente na Figura 3.6. Esta placa de desenvolvimento também facilita o envio de informação sem fios para o painel de controlo, como se verifica mais adiante neste documento.

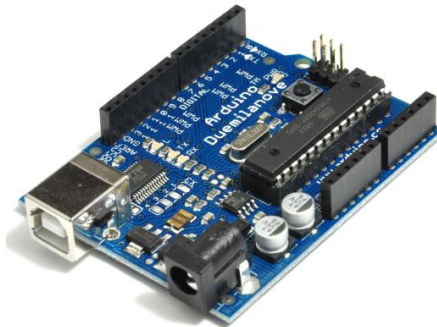


Figura 3.6 – Placa de desenvolvimento *Arduino Duemilanove*

Esta placa é ideal para o desenvolvimento de protótipos uma vez que permite uma rápida programação e facilita a ligação dos diversos componentes externos. Apresenta-se na Tabela 3.3 as principais características desta placa de desenvolvimento.

Tabela 3.3 - Principais características da placa *Arduino Duemilanove*

Alimentação	USB	5 V
	Fonte externa	Máximo 12 V Mínimo 7 V
Microcontrolador	ATMega368 [®] com 32KB de memória flash	
Frequência de trabalho (clock)	Oscilador externo a cristal presente na placa 16MHz	
6 entradas analógicas	Conversor analógico digital de 10 bits com tensões entre 0V e 5V	
14 entradas/saídas digitais	Máxima corrente DC 40mA	
	Comunicação série (UART)	
	Saídas analógicas por PWM	
	Comunicação SPI Interrupções externas	
FTDI FT232RL	Comunicação série pela porta USB	

É importante ter em conta o tempo da conversão analógica digital e posteriormente o tempo de processamento (ver subcapítulo 4.1.2.3) de forma a garantir que se consegue identificar o melhor possível os máximos e mínimos de corrente.

3.2.1 Conversor analógico-digital (ADC)

O conversor analógico-digital disponibilizado pela placa *Arduino* (incluído no microcontrolador) aceita como tensões de entrada valores entre 0V e 5V e possui 10 bits de resolução, ou seja, 1024 níveis. Com estas características obtém-se uma resolução entre leituras de aproximadamente 4.88mV e recordando a Tabela 3.1 sabe-se que o transdutor de corrente tem uma sensibilidade de 25mV/A. Combinando estas informações, pode-se facilmente verificar que o sistema apresenta uma sensibilidade global 195mA (Figura 3.7). Deste modo, consumos de corrente inferiores a 195mA não serão detectados por este sistema devido às restrições impostas pelo *hardware*.

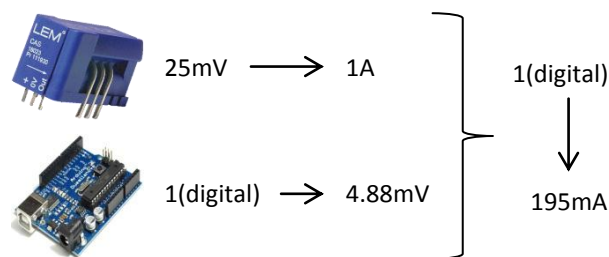


Figura 3.7 - Resolução do sistema – placa *Arduino* + transdutor

Combinando a equação característica do transdutor de corrente (Equação 3.2) com a digitalização efectuada pelo ADC obtém-se as seguintes expressões:

$$Valor\ digital = Inteiro(512 + 5.12 \times I(A)) \quad \text{Equação 3.3}$$

$$I(A) = \frac{Valor\ digital - 512}{5.12} \quad \text{Equação 3.4}$$

Caso os valores de tensão que se pretende introduzir no ADC sejam sempre inferiores a 5V é possível alterar a tensão de referência do ADC através de uma entrada disponibilizada na placa de desenvolvimento, obtendo-se uma resolução diferente entre leituras.

Derivado da construção e configuração interna da placa *Arduino* o tempo da conversão analógica-digital é de 100µs, ou seja, tem a possibilidade de amostrar a um ritmo de 10KHz. Este tempo é bastante inferior aos tempos críticos de disparo das protecções já falados no início deste capítulo sendo por isso esta placa de desenvolvimento adequada para a digitalização do sinal. O ADC presente no microcontrolador funciona pelo método de aproximações sucessivas e possui um *Sample and Hold* para assegurar um nível constante durante o tempo de conversão.

3.3 Envio e recepção de informação

Estando o sistema implementado ligado à rede eléctrica de uma habitação, torna-se útil utilizar a instalação eléctrica já existente e enviar a informação necessária através desta. Contudo, tendo em conta o facto de a informação ser transmitida após o disparo de uma protecção de um circuito, ou seja, o circuito em que o equipamento onde ocorreu a falha se encontra conectado fica desligado do resto da instalação, torna-se impossível a comunicação.

De forma a resolver este problema, e tendo em conta a necessidade de tornar simples a instalação deste sistema, optou-se por utilizar uma tecnologia sem-fios. Na Tabela 3.4 encontram-se presentes as principais tecnologias de comunicação sem fios [7].

Do ponto de vista aplicacional, o protocolo *Bluetooth* pode ser encontrado nas comunicações entre o PC e os seus periféricos, como o rato ou teclado, bem como nos auriculares sem fios utilizados na comunicação móvel. O protocolo *UWB* é utilizado para comunicações que necessitem de grande largura de banda, tais como envio e recepção de multimédia. O protocolo *ZigBee* é preferencialmente utilizado para monitorização e controlo de redes. O protocolo *Wi-Fi* é geralmente utilizado para ligações PC-PC ou PC-Router, substituindo assim os cabos de rede.

Tabela 3.4 - Comparação entre as principais tecnologias sem fios (adaptado de [7])

Protocolo	<i>Bluetooth</i>	<i>ZigBee</i>	<i>Wi-Fi</i>	<i>UWB</i>	
Standard IEEE	802.15.1	802.15.4	802.11a/b/g	802.15.4	
Frequência	2.4 GHz	868/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz	3.1-10.6 GHz	
Velocidade de transmissão	1 Mb/s	250 Kb/s	54 Mb/s	110 Mb/s	
Alcance	10 m	10 – 100 m	100 m	10 m	
Potência de envio	0 – 10 dBm	-25 – 0 dBm	15 – 20 dBm	-41.3 dBm/MHz	
Número de nós	8	65535	2007	8	
Consumo	Potência TX (mW)	102.6	74.1	722.7	750.09
	Potência RX (mW)	84.6	81	709.5	750.09

No caso da implementação deste sistema optou-se pela utilização do protocolo *ZigBee* devido às seguintes características:

- Reduzido consumo.
- Possibilidade de suportar uma elevada densidade de nós por rede.
- Admite diferentes topologias de rede.
- Implementação simplificada, conduzindo a interfaces de baixo custo.

- Apenas dois estados de operação (activo e *standby*).
- Fácil comunicação com microcontroladores.
- Possibilidade de utilização de dois tipos de dispositivos físicos: FFD (*Full Function Device*) e RFD (*Reduce Function Device*), correspondendo a três tipos de dispositivos lógicos: *Coordinator*, *Router* e *Endpoint*. (Tabela 3.5)

Tabela 3.5 - Tipos de dispositivos no protocolo *ZigBee*

Dispositivo	Tipo de dispositivo físico associado (IEEE)	Função
<i>Coordinator</i>	FFD	Forma a rede e atribui endereços. Existe apenas um por rede
<i>Router</i>	FFD	Permite que mais nós se juntem à rede, ao aumentar o seu alcance físico. Pode também efectuar funções de controlo ou monitorização. A sua existência é opcional.
<i>Endpoint</i>	RFD ou FFD	Efectua acção de controlo ou monitorização através de dispositivos que lhe estejam associados (sensor, controlador, actuador...).

O *hardware* utilizado para implementar o protocolo *ZigBee* foi o *XBee* (Figura 3.8 a)), módulo fabricado pela empresa *Maxstream*. Estes módulos caracterizam-se pela ausência de configuração externa, sendo possível realizar as operações pretendidas através de comandos AT. Assim, destinam-se a interactuar com microcontroladores, através de uma interface série, encarregando-se da transmissão/recepção dos dados pretendidos, estando o protocolo implementado no microcontrolador do próprio módulo.

O *XBee* apresenta dimensões reduzidas e existe em 2 versões (*XBee / XBee Pro*), as quais diferem na potência de transmissão. Ao *XBee* está associada uma potência de 1mW e um alcance de 100m ou 30m (*outdoor / indoor*), enquanto ao *XBee Pro* uma potência de 60mW, o que lhe permite alcançar um raio de transmissão até 1,6km ou 100m (*outdoor / indoor*).

No caso da implementação deste sistema optou-se por utilizar a versão *XBee*, deixando a versão *XBee Pro* para aplicações que necessitem de maiores distâncias, uma vez que se pretende enviar informação no interior de uma habitação.

A escolha deste módulo também se baseou na simplicidade de comunicação com a placa de desenvolvimento *Arduino* através de um *shield* disponibilizado para o efeito (Figura 3.8)



Figura 3.8- a) *XBee*



b) *XBee Shield*



c) *XBee, XBee Shield e Arduino*

3.3.1 Topologia de rede utilizada

Os módulos *XBee* permitem criar uma rede entre os diversos módulos, podendo-se juntar automaticamente um novo módulo a uma rede já existente. O microcontrolador interno de cada módulo responsabiliza-se por toda a sincronização e processamento de informação em relação à criação e manutenção da rede. Cada módulo tem uma série de parâmetros internos que define o seu modo de funcionamento, destacando-se a existência de um ID único para cada módulo.²

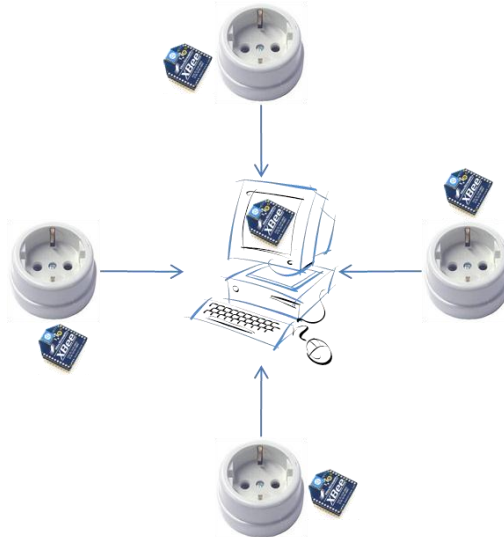


Figura 3.9 - Topologia em estrela

No caso do sistema implementado pretende-se uma topologia em estrela (Figura 3.9). No centro (painel de controlo) encontra-se o *coordinator* responsável pela criação da rede, sendo obrigatória a sua existência. Este módulo irá coordenar toda a rede, sendo possível verificar quando um novo dispositivo se junta à rede. Em cada tomada encontra-se um *endpoint* responsável por enviar informação para o *coordinator*. Quando se inicia um novo *endpoint* este irá procurar o *coordinator* de forma a juntar-se a uma rede já existente, passando a adquirir as definições passadas pelo *coordinator*. Desta forma, cria-se facilmente uma rede que permite a comunicação entre as tomadas e o painel de controlo

Neste sistema utiliza-se a comunicação API (*Application Programming Interface*) baseada em *frames*. Este modo permite saber sempre de onde provem a informação recebida e ter informação da actividade da rede (ex. existência de um novo módulo). As principais *frames* disponibilizadas e utilizadas neste sistema estão presentes na Tabela 3.6.

² Mais informação em: <http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-2.5-Manual.pdf>

Tabela 3.6 - Principais frames disponibilizadas pelo módulo XBee

API frame	Descrição
Estado do módulo	Informação retornada pelo módulo após as seguintes acções: <ul style="list-style-type: none">• Reset do módulo• Associação do módulo a um <i>coordinator</i>• Início de um <i>coordinator</i>
Comandos AT	Envio de comandos AT de forma a alterar as definições do módulo
Resposta Comandos AT	Resposta do módulo após o envio de um comando AT.
Transmissão de dados	Envio de informação para outro módulo da rede.
Estado de transmissão	Informação retornada pelo módulo informando o estado da transmissão
Recepção de dados	Recepção de informação, tendo-se a informação de quem a transmitiu
Identificação do módulo	Informação recebida no <i>coordinator</i> identificando o módulo que se acabou de juntar à rede.

3.4 Painel de controlo

Tanto o tratamento dos dados enviados, como a comunicação com o utilizador, serão implementados em computador, sendo este o responsável por monitorizar todos os dispositivos que façam parte do sistema. Todo o *software* desenvolvido recorre à linguagem *C#*. Na Figura 3.10 apresentam-se as principais interacções entre o utilizador e o *software* desenvolvido.

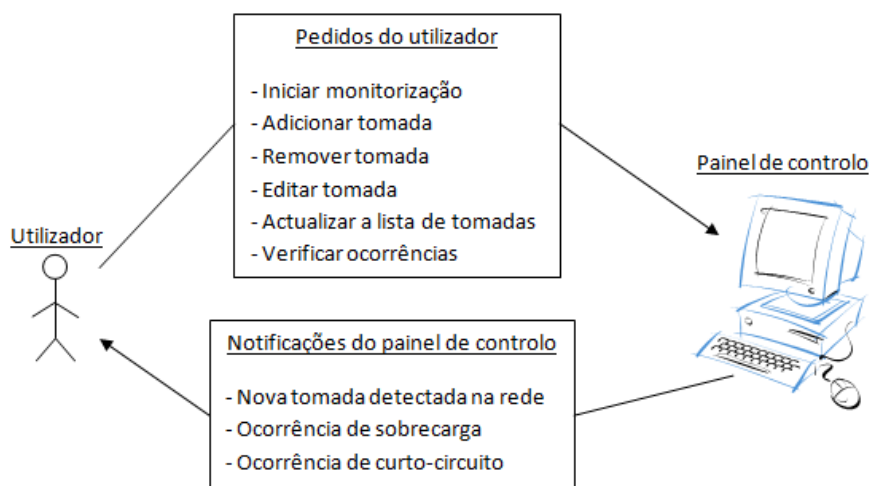


Figura 3.10 – Funções disponibilizadas pelo painel de controlo

3.5 Alimentação do sistema

De forma a dimensionar um circuito de alimentação para todos os dispositivos incluídos no sistema é necessário primeiramente verificar os consumos de cada elemento. No caso deste sistema, importa saber os consumos do transdutor de corrente, do módulo *XBee* e da placa de desenvolvimento *Arduino*. Em relação à tensão de alimentação, e uma vez que todos os dispositivos se encontram ligados à placa *Arduino*, basta garantir uma tensão entre 7V e 12V, sendo depois a placa de desenvolvimento responsável por converter essa tensão para 5V (sensor de corrente e microcontrolador) e 3.3V (*XBee*), recorrendo aos reguladores de tensão internos que possui.

Na Tabela 3.7 estão representados os consumos teóricos dados pelos fabricantes do transdutor da LEM e do *XBee*. Em relação à placa *Arduino* a corrente pedida depende das funcionalidades que estão a ser utilizadas e dos dispositivos que se encontram conectados à placa de desenvolvimento. Desta forma, o consumo da placa *Arduino* foi obtido de forma experimental recorrendo a um multímetro e desligando a alimentação do *XBee* e do transdutor. De forma a verificar todos os consumos também foram medidas experimentalmente as correntes consumidas com a inclusão do *XBee* e do sensor de corrente (Tabela 3.8). Note-se que a tensão de alimentação utilizada nestes testes foi de 11.4V e que a corrente medida no transdutor é nula.

Tabela 3.7 - Consumos teóricos máximos dados pelos fabricantes

	Tensão de alimentação (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
Transdutor CAS-25NP	5V	Min (medindo corrente nula)	75
		Max (medindo corrente máxima)	320
Módulo XBee	3.3V	Recepção	132
		Envio	132

Tabela 3.8 - Consumos obtidos por medição

	Tensão de alimentação (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
<i>Arduino</i>	11.4V	27	307.8
<i>Arduino + XBee</i>	11.4V	70	798
<i>Arduino + XBee + transdutor</i>	11.4V	84	957.6

Verifica-se pela Tabela 3.8 que é necessário uma fonte que forneça no mínimo 84mA de corrente, lembrando que este valor deve aumentar com o aumento da corrente que passa no transdutor. Contudo o dispositivo não estará sempre a consumir esta corrente uma vez que o módulo *XBee* apenas irá enviar informação perante a ocorrência de uma falha.

Com este intuito e tendo em mente a possível expansão do sistema foi utilizado o conversor AC-DC LD10-20B09 da MORNSUN (Figura 3.11) com as características presentes na Tabela 3.9.



Figura 3.11 - Conversor AC-DC LD10-20B09

Tabela 3.9 - Características do conversor AC-DC

Tensão de entrada	85~264 VAC
	120~370 VDC
Potência na saída	10 W
Tensão na saída	12 V
Corrente na saída	900 mA

Relembre-se que é necessário manter a alimentação dos dispositivos após o disparo das protecções e respectivo corte de corrente no sistema. Neste caso, é necessário garantir o fornecimento de energia durante o tempo necessário ao envio da informação para o painel de controlo, podendo esta cessar de seguida até se activar o dispositivo de protecção novamente. De forma a cumprir estas condições pretende-se garantir o fornecimento de cerca de 100mA e manter uma tensão entre 7V e 12V durante cerca de 1s (ver subcapítulo 4.1.2.3.2).

Perante estas especificações surgem duas opções, utilizar baterias (pilhas) ou supercondensadores com uma capacidade que permita cumprir as especificações.

3.5.1 Baterias

As baterias são compostas por células que convertem energia química acumulada em energia eléctrica. As baterias podem ser descartáveis (primárias), e apenas utilizadas uma vez, ou recarregáveis (secundárias), podendo ser reutilizadas várias vezes.

As baterias são dispositivos que não conseguem produzir grandes quantidades de potência em curtos espaços de tempo, no entanto podem fornecer grandes quantidades de energia, em intervalos de tempo elevados.

No caso da alimentação do sistema em causa é necessário utilizar uma pilha com tensão compreendida entre 7V e 12V que forneça pelo menos 100mA de corrente. No caso desta pilha ser recarregável tem que ser dimensionado um circuito que permita o seu carregamento durante o normal funcionamento da instalação eléctrica.

Sendo a alimentação do sistema de curta duração e estando associado às baterias problemas ambientais relativos à sua composição química prefere-se a utilização de supercondensadores para este efeito.

3.5.2 Supercondensadores

Um supercondensador, de forma simples, comporta-se como um condensador normal mas com uma capacidade muito maior. Estes dispositivos são caracterizados por rápidas cargas e descargas, podendo fornecer grandes quantidades de potência em curto espaço de tempo. Os supercondensadores diferem dos condensadores convencionais por possuírem maior densidade de energia que depois de carregados estão disponíveis a fornecer.

Um supercondensador pode ser definido como duas placas não reactivas emersas num material electrolítico e com uma diferença de potencial aos seus terminais. A placa com potencial positivo atrai cargas negativas do electrolítico, e por outro lado, a placa com potencial negativo atrai cargas positivas, gerando assim um campo eléctrico no seu interior. Um separador dieléctrico evita que as cargas se movam entre as duas placas, permitindo assim que a energia seja armazenada. Como os supercondensadores movem cargas eléctricas entre materiais num estado sólido, podem ser recarregáveis milhares de vezes, de modo mais rápido, e sem prejuízo do material, ao contrário das baterias que usam compostos químicos.

O processo de descarga dos supercondensadores e respectivo fornecimento de energia à carga apresenta duas componentes (Figura 3.12) [8]:

- A componente capacitiva que representa a variação de tensão aos terminais do supercondensador devido á variação de energia no seu interior.
- A componente resistiva que representa as variações de tensão devido à resistência interna (ESR) do supercondensador.

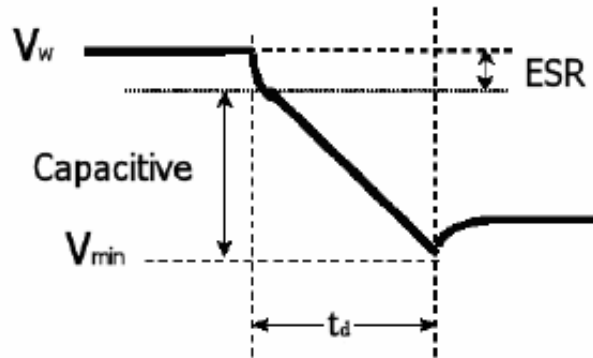


Figura 3.12 - Curva característica de descarga de um supercondensador (adaptada de [8])

As tensões V_w e V_{min} representam o intervalo de tensão aos terminais do supercondensador durante o qual um determinado dispositivo pode funcionar. Sendo a primeira a tensão máxima e a segunda a tensão mínima. O intervalo de tempo (t_d) representa o tempo total de descarga. A descarga de um supercondensador é caracterizada pela Equação 3.5 verificando-se as duas componentes de descarga, sendo a primeira a capacitiva e a segunda a resistiva.

$$\Delta V = i \frac{\Delta t}{C} + Ri \quad \text{Equação 3.5}$$

3.5.2.1 Dimensionamento dos supercondensadores

Para dimensionar a capacidade dos supercondensadores teve-se em conta supercondensadores da Panasonic com as características presentes na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Características dos supercondensadores da Panasonic

Capacidade	Resistência interna (a 1kHz)	Tensão
0.33 F	$\leq 75 \Omega$	5.5 VDC
0.47 F	$\leq 30 \Omega$	
1.0 F	$\leq 30 \Omega$	
1.5 F	$\leq 30 \Omega$	

Pretendendo uma tensão entre 7V e 12V na entrada da placa de desenvolvimento *Arduino* e sabendo que cada supercondensador suporta apenas 5.5V, utilizou-se dois em série. A Figura 3.13 mostra a montagem efectuada para permitir a alimentação do sistema após o corte de corrente. O diodo impede a fuga de corrente dos supercondensadores para o conversor quando a alimentação da rede eléctrica é cortada.

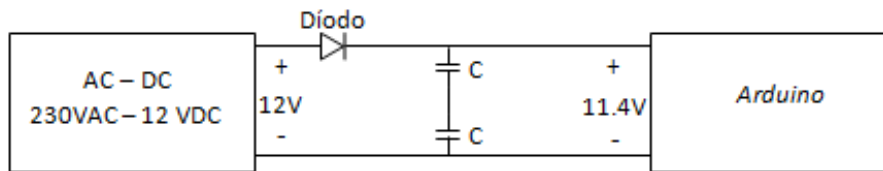


Figura 3.13 - Esquema de alimentação do sistema

Sendo a resistência interna dos supercondensadores utilizados incerta, optou-se por efectuar a montagem acima com supercondensadores de 1F e verificar no osciloscópio a respectiva curva de descarga (Figura 3.14).

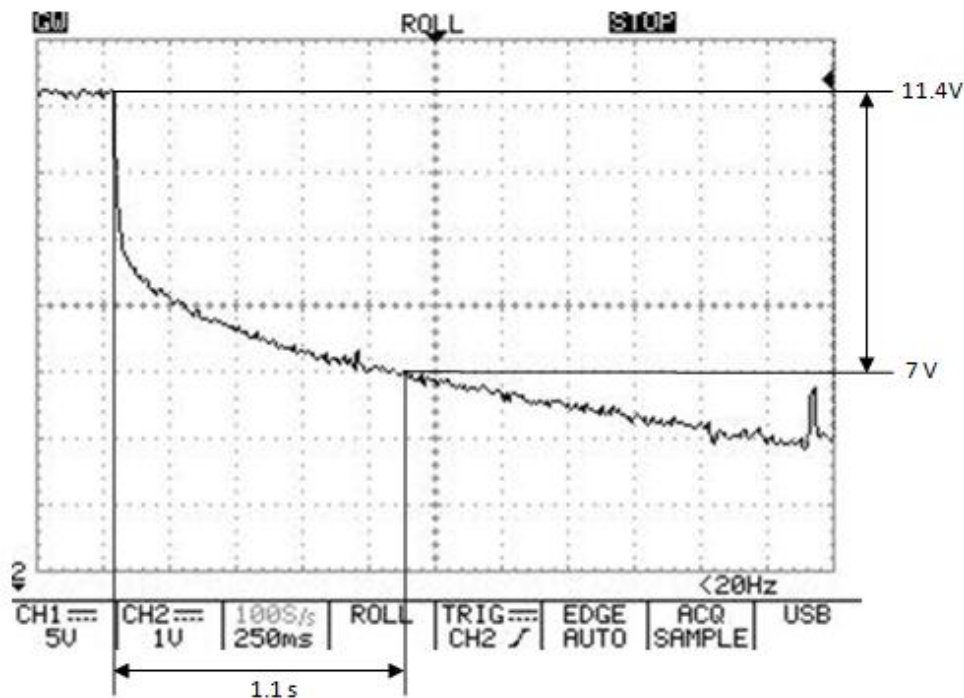


Figura 3.14 - Curva de descarga dos supercondensadores obtida experimentalmente

No caso deste sistema e tendo em conta os supercondensadores utilizados podem-se verificar os seguintes dados.

- $V_w = 11.4V$. Tensão de carga dos condensadores.
- $V_{\min} = 7V$. Tensão mínima aconselhada para a placa *Arduino* funcionar correctamente.
- $i = 85mA$. Corrente consumida pelo sistema enviando informação.
- $t = 1.1s$. Tempo que demora a descarga do supercondensador ate atingir o valor mínimo admissível (7V).
- $C = 0.5F$. Capacidade equivalente dos dois supercondensadores em série.
- A resistência em série dos supercondensadores é desconhecida mas pode-se calcular com base na Figura 3.14 e na Equação 3.5.

$$\Delta V = i \frac{\Delta t}{C} + Ri \Rightarrow 11.4 - 7 = 0.085 \times \frac{1.1}{0.5} + R \times 0.085 \Leftrightarrow R = 50\Omega \quad \text{Equação 3.6}$$

Verifica-se pela Figura 3.14 que os supercondensadores garantem a alimentação do sistema pelo menos 1.1 segundos após o corte de energia, tempo suficiente para processar a informação e enviá-la para o painel de controlo (ver subcapítulo 4.1.2.3.2). A utilização de capacidades grandes deve-se ao facto de se utilizar dois condensadores em série. Esta configuração leva à queda da capacidade equivalente dos supercondensadores e ao aumento da resistência interna equivalente.

Não existe preocupação com a alimentação do painel de controlo devido ao facto deste estar implementado num computador equipado com bateria para esse efeito.

4 Implementação do sistema

Tendo em conta a escolha e a análise dos componentes efectuada no capítulo anterior, torna-se importante testar a sua integração e o respectivo funcionamento do sistema. Desta forma, construiu-se o protótipo presente na Figura 4.1 descrevendo-se de seguida a montagem dos vários componentes, bem como da interface gráfica que implementa o painel de controlo.

No final deste capítulo será explicado um *software* desenvolvido em *Matlab* que possibilita a visualização dos sinais utilizados no processamento efectuado no sistema. Esta informação permite verificar os tempos de disparo nos testes efectuados e o comportamento da corrente no disparo de uma protecção.

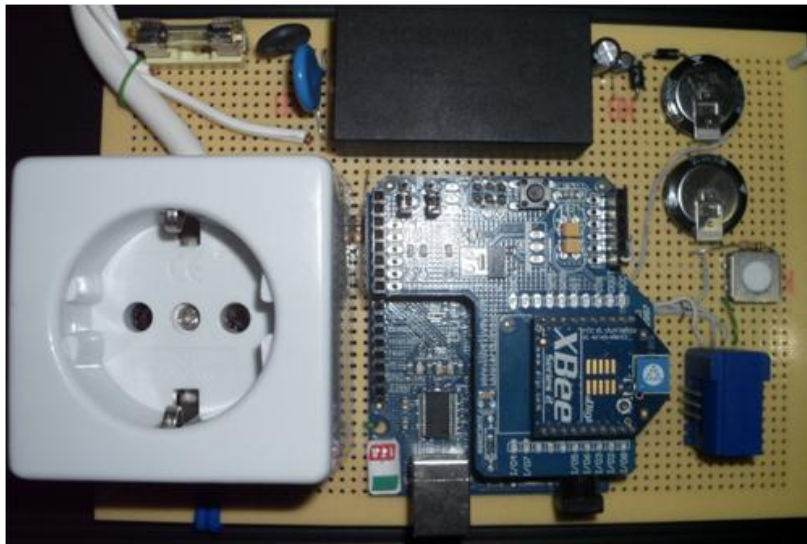


Figura 4.1 – Protótipo de uma tomada com monitorização.

4.1 Protótipo do sistema

Na Figura 4.2 estão representadas as ligações efectuadas entre a placa de desenvolvimento *Arduino* e os restantes componentes do sistema. Note-se que neste diagrama não se encontra contemplada a ligação com o *XBee* uma vez que esta é efectuada recorrendo ao *shield* já descrito no subcapítulo 3.3.

A tensão da rede (230V AC) é direccionada para a tomada onde será ligada a carga, passando a corrente pelo transdutor de corrente de forma a ser monitorizada pelo controlador. Por outro lado, esta tensão também é fornecida ao conversor AC-DC de forma a alimentar toda a electrónica do sistema.

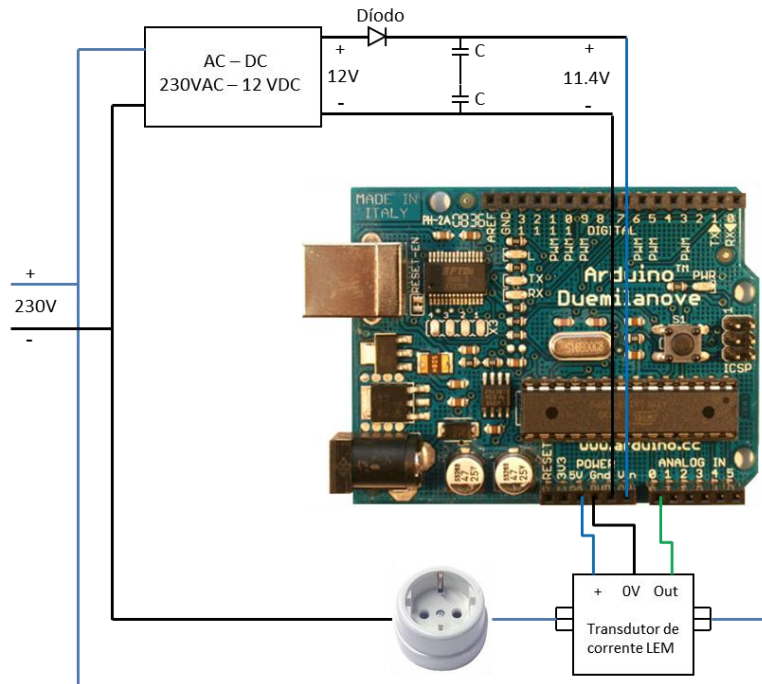


Figura 4.2 - Esquema de ligações entre o *Arduino* e os componentes excluindo o *XBee*

4.1.1 Alimentação do protótipo

De forma a proteger o conversor AC-DC utilizado e linearizar ao máximo a tensão de saída, foi efectuada a montagem presente na Figura 4.3 com os componentes e valores aconselhados pelo fabricante.

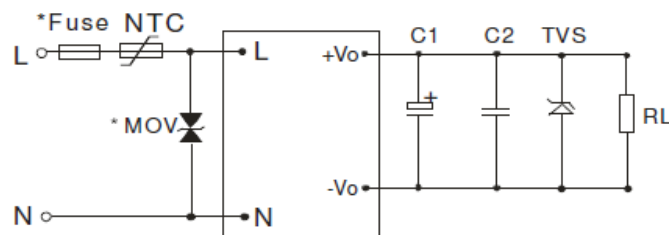


Figura 4.3 - Esquema de montagem do conversor AC/DC

Esta montagem apresenta na entrada um fusível (*Fuse*) de 2A, uma resistência variável com a temperatura (*NTC*) e um varistor de 470V (*MOV*). O fusível juntamente com *NTC* protege o conversor contra excesso de corrente enquanto o varistor protege contra excesso de tensão, uma vez que a sua resistência diminui com o aumento de tensão aos seus terminais. Na saída tem-se condensadores que funcionam como filtros. O primeiro (*C1*) é electrolítico e de $120\mu\text{F}/25\text{V}$ e o segundo (*C2*) é cerâmico, de valor $0.1\mu\text{F}/50\text{V}$ e é utilizado para filtrar o ruído de alta frequência. Finalmente, é colocado um diodo Zener (*TVS*) com tensão inversa de 12V para proteger contra transientes de tensão.

Como já foi referido este conversor é responsável pela alimentação do sistema (ver subcapítulo 3.5) e pelo carregamento de dois supercondensadores de forma a garantir a alimentação do sistema após o disparo das protecções (ver subcapítulo 3.5.2).

4.1.2 Processamento da informação e tomada de decisão

No caso do sistema implementado, optou-se por efectuar o processamento do sinal de corrente localmente, ou seja, utiliza-se a placa de desenvolvimento *Arduino* de forma a verificar a corrente consumida e comunica-se com o painel de controlo apenas em caso de detecção de algum defeito.

Caso se optasse por digitalizar o valor de corrente e envia-la para o painel de controlo, sendo todo o processamento feito no computador, estar-se-ia a aumentar o consumo do sistema uma vez que os módulos sem fios teriam que estar sempre a enviar informação. Optou-se pela abordagem local de forma a diminuir a complexidade da comunicação sem fios e prevenir a perda de informação relativa ao valor de corrente instantânea. Sendo neste caso os tempos de processamento e comunicação críticos, devido ao rápido disparo das protecções, torna-se importante ter o processamento localmente.

Como já foi referido no capítulo anterior, o processamento consiste na aquisição da tensão fornecida pelo transdutor de corrente (proporcional à corrente instantânea consumida) e posterior verificação dos seus máximos e mínimos de forma a concluir acerca da existência de defeitos eléctricos. A Figura 4.4 apresenta um esquema com os principais passos que o código implementado efectua.

Inicialmente garante-se que o sistema associa-se ao painel de controlo de forma a iniciar a comunicação entre os dois, recebendo de seguida do painel de controlo a informação da corrente estipulada da protecção á qual se encontra ligado. Esta informação é fornecida pelo utilizador no acto de registo do dispositivo no painel de controlo como será explicado mais adiante neste capítulo (ver subcapítulo 4.2). Esta informação torna-se importante devido ao facto de actualmente, numa habitação, ser comum a existência de disjuntores com correntes estipuladas diferentes, tipicamente 10A, 16A e 20A.

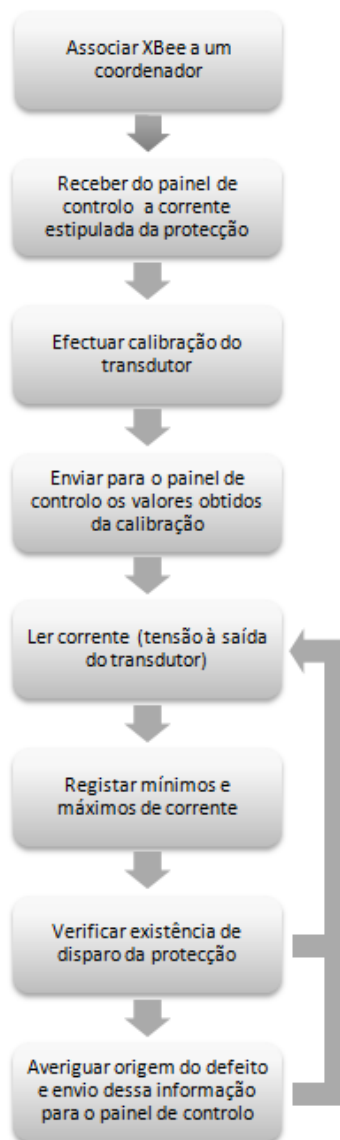


Figura 4.4 – Fluxograma das funções implementadas na placa *Arduino*

4.1.2.1 Calibração do transdutor de corrente

De forma a obter os correctos valores de corrente torna-se necessário efectuar a calibração do transdutor de corrente. Como observado no subcapítulo 3.1.1 a tensão fornecida pelo transdutor na ausência de corrente não é fixa em 2.5V (correspondente a 0A) como pretendido, sofrendo algumas oscilações. Para se proceder à calibração é importante que na primeira utilização do dispositivo, e durante o processo de registo no painel de controlo, não seja conectada qualquer carga na respectiva tomada. Durante 10 segundos verifica-se os níveis de tensão retornados pelo transdutor de corrente, obtendo-se um intervalo de valores em que se considera estar na ausência de corrente. Ao ponto médio desse intervalo é atribuído o valor de zero Amper, tendo as medições posteriormente efectuadas esse valor como referência.

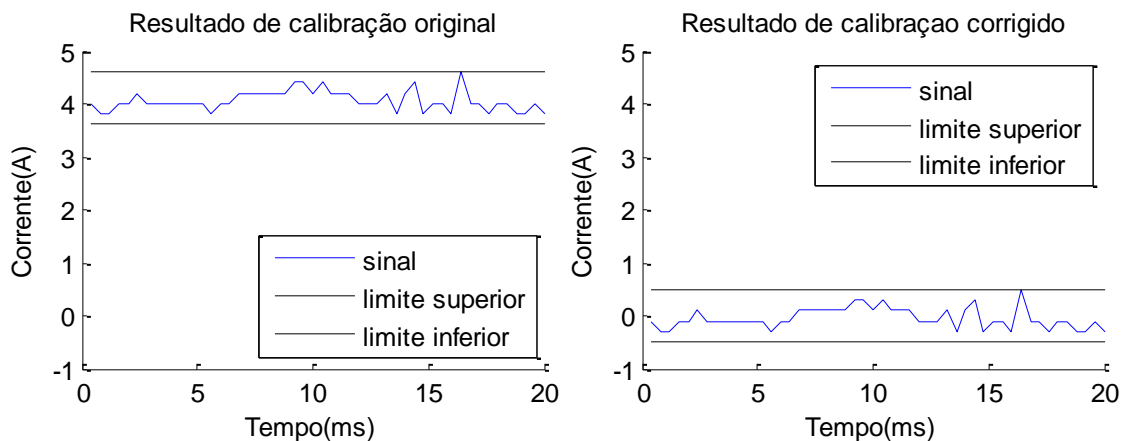


Figura 4.5 - Calibração do transdutor de corrente

No caso do exemplo presente na Figura 4.5 no final do processo de calibração verifica-se que o transdutor na ausência de corrente apresenta como saída uma tensão correspondente a cerca de 4A. Tendo esta informação, retira-se a todas as amostras recolhidas esse valor de 4 A de forma a obter valores correctos durante o processamento dos dados.

4.1.2.2 Ciclo de monitorização

Após o início da comunicação com o painel de controlo e respectiva calibração do transdutor inicia-se um ciclo de controlo que tem como função ler a corrente instantânea, verificar os seus mínimos e máximos, e caso ocorra um disparo da protecção que tenha sido originado pelo respectivo equipamento enviar a informação referente ao defeito para o painel de controlo.

A leitura da tensão fornecida pelo transdutor de corrente (proporcional à corrente instantânea) é efectuada pelo conversor analógico digital disponibilizado na placa de desenvolvimento *Arduino* e já explicado no subcapítulo 3.2.1, sendo o valor obtido guardado num vector.

De forma a registar os máximos e os mínimos da corrente são calculados digitalmente dois sinais, um que acompanha os máximos relativos e outro que acompanha os mínimos relativos do sinal registado (Figura 4.6).

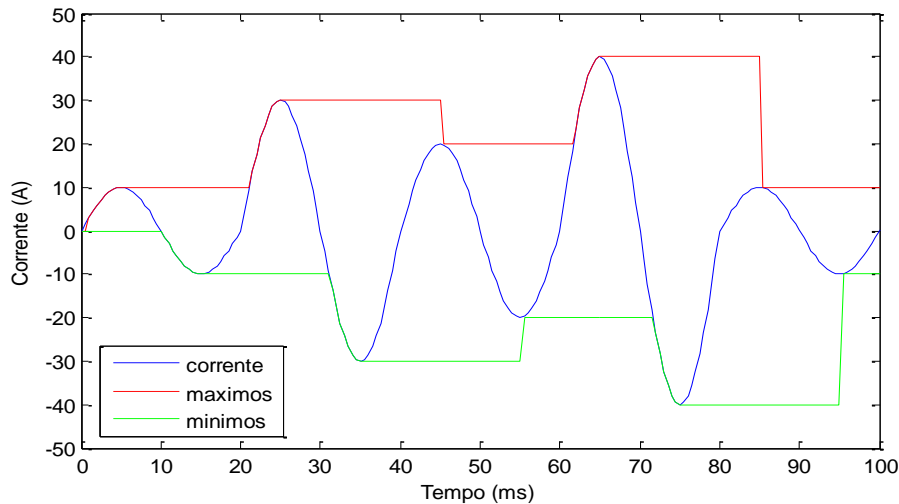


Figura 4.6 - Sinais que acompanham os máximos e os mínimos relativos da corrente

A placa de desenvolvimento *Arduino*, tal como qualquer microcontrolador, tem memória finita, não sendo possível guardas estes sinais (corrente, máximos e mínimos) desde o início do sistema até a ocorrência de algum defeito. Assim sendo, optou-se pela utilização de um vector cíclico, ou seja, um vector com uma dimensão estática onde os novos valores vão ocupando o lugar dos mais antigos.

Para não aumentar a complexidade e custo do sistema com sensores de tensão ou outra forma que permita verificar a existência de tensão no circuito, optou-se por utilizar a informação da corrente consumida no sistema para deduzir o corte de energia no circuito. O disparo de uma protecção caracteriza-se pelo corte de energia no circuito, e conseqüentemente o corte da corrente que se encontra a ser fornecida à carga. Tendo em conta essa informação, optou-se por considerar o disparo da protecção como sendo uma queda do valor de corrente para um valor nulo (Figura 4.7). Note-se que assim sendo, confunde-se disparo da protecção com o fim de consumo de corrente por parte da carga. Contudo, neste último caso, a corrente que se encontra a ser consumida está dentro dos limites admissíveis não sendo por isso enviada qualquer informação para o painel de controlo. Assim sendo, quando se observa um conjunto de amostras correspondentes a corrente nula (número de amostras discutido no subcapítulo 4.1.2.3) procede-se à averiguação da existência de defeito no equipamento.

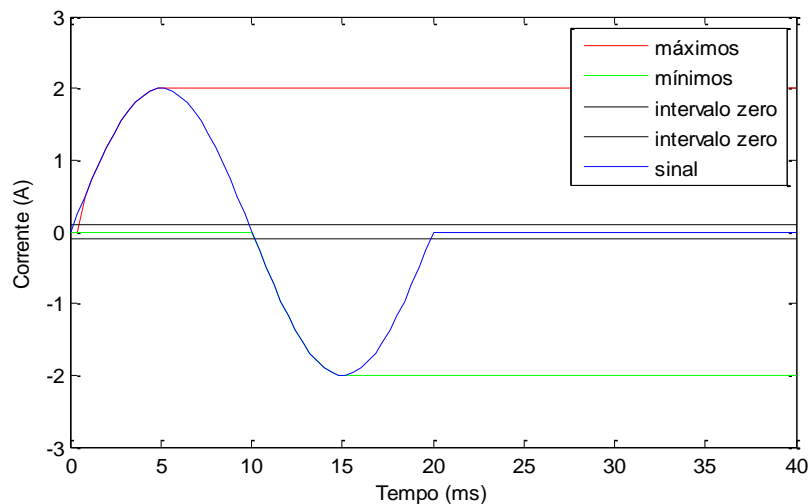


Figura 4.7 - Sinais utilizados no sistema implementado

Verificando-se o fim de consumo de corrente, é necessário observar as ondas que correspondem aos máximos e mínimos relativos de forma a concluir se estas apresentam valores discrepantes dos admitidos para o funcionamento normal do equipamento. Para efectuar esta comparação foram criadas margens de forma a obter-se zonas de defeito: uma zona de sobrecarga e uma zona de curto-circuito (Figura 4.8).

Segundo as curvas características de disparo das protecções já mencionadas no capítulo 2 pode-se verificar as margens presentes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Margens de disparo das protecções

Tipo de curva	Acção do disparo térmico		Acção do disparo magnético	
	Limite mínimo	Limite máximo	Limite mínimo	Limite máximo
B			$3 I_n$	$5 I_n$
C	entre $1.13I_n$ e $1.45I_n$	Acção do disparo magnético	$5 I_n$	$10 I_n$
D			$10 I_n$	$20 I_n$

Observando a Tabela 4.1 verifica-se que os valores de corrente de curto-circuito para as quais os dispositivos são sensíveis podem ser bastante elevadas, contudo o tempo a que a canalização está sujeita a estes valores é no máximo cerca de 10ms. Desta forma, e adoptando uma solução que permita utilizar uma vasta gama de disjuntores com diferentes tipos de curva de disparo, foram definidas as margens presentes na Figura 4.8.

É considerada a ocorrência de um curto-circuito quando se verifica correntes superiores a quatro vezes a corrente nominal da protecção associada ao circuito. A escolha do valor prende-se com o facto de se situar a meio da curva de disparo mais rápida para os dispositivos de protecção considerados. Visto não ser praticável observar todos os dispositivos pré instalados na

habitação e programar essa informação, optou-se por considerar este valor. Em relação às sobrecargas considera-se que ocorrem na presença de correntes compreendidas entre a corrente estipulada da protecção e o início da zona de curto-circuito.

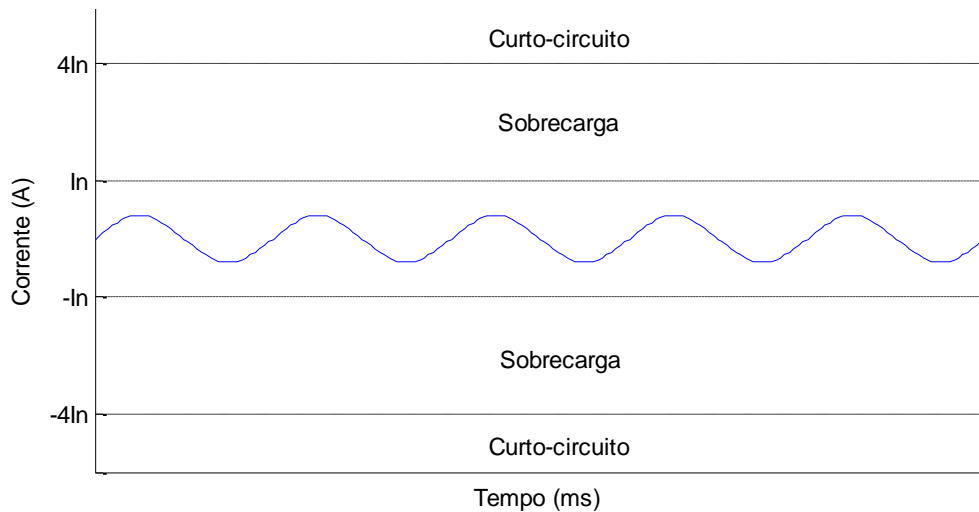


Figura 4.8 – Delimitação das zonas de defeito

Na Tabela 4.2 encontram-se as margens consideradas para os três tipos de disjuntores mais utilizados em habitações. Note-se que considerando correntes sinusoidais e tendo em conta que a corrente estipulada das protecções é dada em corrente eficaz os limites apresentados na tabela são dados pela multiplicação da corrente pelo factor raiz de dois. Assim sendo, estes limites apresentam os máximos das ondas de corrente que permitem posteriormente verificar em que zona de defeito se encontra o equipamento. Sabendo que a corrente máxima admitida pelo transdutor de corrente são 85A os limites que por cálculo se apresentem superiores a este valor são reduzidos para 85A. Esta aproximação não altera o correcto funcionamento do sistema uma vez que na presença de correntes superiores a 85A ocorre a saturação do transdutor de corrente e nestes casos assume-se estar na presença de um curto-circuito.

Tabela 4.2 – Exemplos das margens de disparo utilizadas

Corrente estipulada da protecção	Sobrecarga $I_n - 4I_n$	Curto-Circuito $\geq 4I_n$
10A	14.14A – 56.57A	$\geq 56.57A$
16A	22.63A – <85A	$\geq 85A$
20A	28.29A – <85A	$\geq 85A$

Após a identificação do defeito que originou o disparo da protecção é enviada a informação da corrente registada e do tipo de defeito para o painel de controlo. Esta informação é enviada pelo módulo *XBee* cumprindo as condições de construção das *frames* que permite a correcta comunicação (Figura 4.9).

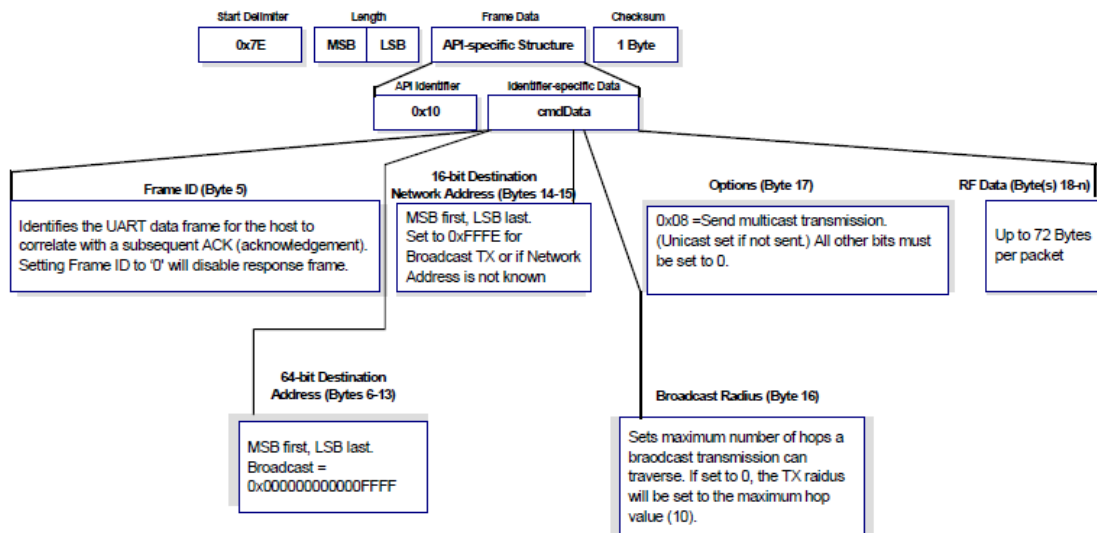


Figura 4.9 - Construção das *frames* para envio de informação (adaptado de [9])

4.1.2.3 Tempos críticos de processamento

Um ponto importante na implementação deste sistema é o tempo de aquisição e processamento do sinal obtido do transdutor de corrente. Este tempo é crítico quando comparado com a rapidez do disparo das protecções e como facilmente se pode perder informação pertinente. No caso deste sistema é importante conseguir identificar correctamente os máximos e os mínimos de corrente sendo necessário amostrar o sinal a uma frequência que o permita.

O sinal de corrente, sendo fornecido pela rede de distribuição eléctrica, apresenta uma frequência de 50Hz. Pelo teorema de Nyquist, de forma a ser possível a reconstrução do sinal, a frequência de amostragem tem que ser superior a 100Hz, ou seja, superior ao dobro da maior frequência do sinal. Contudo, neste caso pretende-se utilizar uma frequência de amostragem bastante mais elevada de forma a identificar o melhor possível os máximos e os mínimos do sinal sem a necessidade de utilizar algoritmos elaborados que tornam o processamento mais moroso.

Numa primeira abordagem utilizou-se ao máximo os recursos disponibilizados pela placa de desenvolvimento *Arduino*, correndo o código à frequência de 16MHz e utilizando a velocidade máxima de conversão analógica-digital de 10KHz. Utilizando estas características, foram registados os tempos entre a leitura do sinal e a verificação da ocorrência do disparo da protecção, ou seja, o tempo que demora a processar todo o ciclo de controlo implementado no microcontrolador (Figura 4.10). Estas medições foram efectuadas utilizando uma função disponibilizada pela linguagem de programação da placa *Arduino* que permite obter o tempo decorrido desde o início do código até um certo ponto indicado pelo programador.

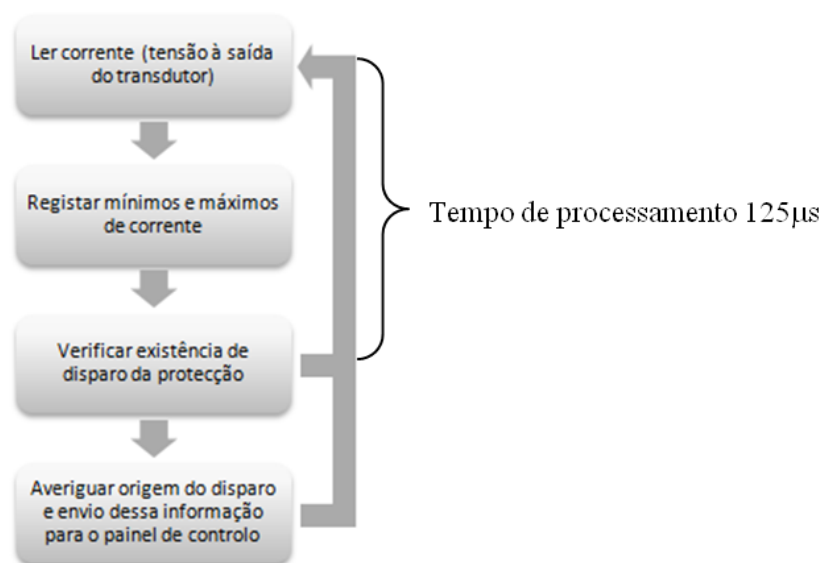


Figura 4.10 - Tempo de processamento do ciclo de controlo

Como se verifica na Figura 4.10, nas condições descritas, adquire-se amostras de corrente espaçadas de $125\mu\text{s}$, obtendo-se uma frequência de amostragem de 8KHz . Com esta frequência de amostragem, e sabendo que o período do sinal de corrente tem 20ms , pode-se verificar facilmente que se tem 160 amostras por ciclo.

No caso de se optar por enviar constantemente o sinal de corrente para o painel de controlo de forma a poder guardar essa informação, não tendo o problema de memória registado na placa *Arduino*, seria necessário ter em conta o tempo de envio da informação entre a placa de desenvolvimento *Arduino* e o módulo *XBee*. Este envio é efectuado por protocolo série e é utilizado um *baudrate* de 9600. Tendo em conta que existem 1024 níveis para o sinal de corrente são necessários pelo menos 2 bytes de informação, tendo-se que adicionar mais 18 bytes relativos à construção das *frames* utilizadas na comunicação efectuada entre os módulos *XBee*. No total está-se na presença de 20 bytes observando-se na Tabela 4.3 os respectivos tempos de envio consoante o *baudrate* utilizado.

Tabela 4.3 - Tempos de comunicação entre o *Arduino* e o *XBee*

<i>BaudRate</i>	Tempo de envio de 1byte	Tempos de envio de 20bytes	Tempo de processamento	Tempo total entre leituras	Frequência de amostragem do sinal de corrente
9600	1ms	20ms	0.125ms	20.125ms	49.7Hz
115200	0.087ms	1.74ms	0.125ms	1.865ms	536,2Hz

Verifica-se pela Tabela 4.3 que utilizando um *baudrate* de 9600 apresenta-se um tempo total entre leituras de 20ms, tempo muito superior aos 10ms críticos correspondentes ao disparo da protecção. Uma forma de melhorar este tempo é alterar o *baudrate* para 115200, o máximo permitido pela placa *Arduino*. Neste caso consegue-se obter uma frequência de amostragem superior, contudo muito inferior aos 8KHz utilizados não existindo o constante envio de informação. Além disso, o consumo do sistema seria mais elevado optando-se por esta topologia, pois o módulo *XBee* estaria em constante funcionamento enviando sucessivamente informação proveniente do transdutor de corrente.

4.1.2.3.1 Dimensão dos vectores

De forma a dimensionar os vectores que permitem guardar os últimos valores de corrente adquiridos, máximos, mínimos é necessário ter em consideração as seguintes características:

- Utilizar pelo menos um ciclo para verificar corrente nula, ou seja, garantir que durante 20ms a corrente encontra-se dentro da gama correspondente a corrente nula. Este facto é importante porque existem cargas que consomem poucos miliamperes, saindo o seu valor da gama considerada corrente nula apenas perto do máximo e/ou do mínimo da onda de corrente.
- Guardar pelo menos dois ciclos do sinal, ou seja, os vectores devem ter capacidade para 40ms. Sendo um dos ciclos nulo em caso de disparo da protecção, o outro terá informação acerca do que antecedeu esse disparo.
- Ter em atenção o máximo de memória disponível no microcontrolador.

Perante estas condições optou-se por utilizar vectores com 100 posições e uma frequência de amostragem de 2.5KHz. Com estes valores consegue-se obter nas 100 posições uma amostragem correspondente a 40ms do sinal, ou seja, dois ciclos de corrente.

Optou-se por guardar dois ciclos de corrente com o objectivo de utilizar o último ciclo para verificar o disparo da protecção (corrente nula durante esse tempo) e o primeiro para averiguar a origem desse disparo (verificando os máximos e mínimos). Sabendo que em casos extremos, ou seja ocorrendo um curto-circuito, as protecções demoram no máximo cerca de meio ciclo de corrente a disparar é suficiente a dimensão dos vectores considerada.

4.1.2.3.2 Tempo de descarga dos supercondensadores

No caso de se verificar o disparo de uma protecção é necessário enviar a informação relativa ao defeito que o originou para o painel de controlo como já explicado. Desde o momento do corte de energia até ao momento de envio da informação ocorrem algumas instruções no microcontrolador, sendo necessário garantir a alimentação do sistema durante esse período. Neste caso, as instruções são:

- Obter 50 amostras de corrente nula, ou seja, um ciclo em que a corrente seja nula. Esta instrução tem um tempo de 20ms.
- Correr o algoritmo que compara os valores de mínimos e máximos de forma a verificar se se trata de uma sobrecarga ou de um curto-circuito (defeito). Esta instrução tem um tempo inferior a 1ms.
- Enviar a informação para o módulo *XBee* de forma a ser enviada via sem fios. Esta instrução como já verificado apresenta um tempo que ronda os 20ms.

No total estas instruções apresentam um tempo inferior a 41ms, sendo garantido pelos supercondensadores utilizados 1.1s (ver subcapítulo 3.5.2.1). Deste modo o tempo de descarga dos supercondensadores utilizados é suficiente para o sistema em causa.

4.2 Painel de controlo

O painel de controlo, como já referido no subcapítulo 3.4, tem como função fornecer uma interface gráfica de comunicação entre o utilizador e o sistema. Permite ainda, manter uma base de dados dos dispositivos ligados à rede, sabendo quais os equipamentos que se encontram a ser monitorizados. É constituído por um computador com bateria para garantir o contínuo funcionamento mesmo após o disparo das protecções e por um módulo *XBee* conectado a uma placa de desenvolvimento que permite efectuar a comunicação entre o computador e os diversos dispositivos que se encontram a ser monitorizados (Figura 4.11).

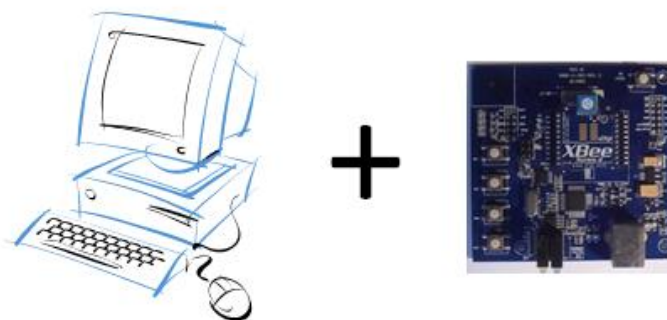


Figura 4.11 – Hardware que implementa o painel de controlo

A implementação do *software* que permite a interacção entre o sistema desenvolvido e o utilizador recorre à linguagem C# tendo em conta as funções já mencionadas na Figura 3.10. A aplicação desenvolvida apresenta uma interface gráfica de fácil utilização associada a mensagens de voz que permitem a utilização por parte de invisuais. Tratando-se de um protótipo esta aplicação possibilita ao utilizador um controlo total sobre todo o sistema, possibilitando a visualização de todas as informações referentes aos dispositivos monitorizados, bem como dos eventos gerados pela configuração dos módulos distribuídos pela rede.

O *software* desenvolvido foi implementado tendo em conta o conjunto de instruções presentes na Figura 4.12. Nos próximos subcapítulos procede-se à descrição da forma como o painel de controlo interage com o utilizador e possibilita o conjunto de instruções mencionadas.

Inicialmente torna-se necessário iniciar o módulo *XBee* como coordenador para ser possível gerir a rede formada a partir deste e aplicar a topologia de rede já descrita no subcapítulo 3.3.1. Após o início do *software* o coordenador irá procurar os dispositivos já existentes na rede de forma a poder adicioná-los à lista de dispositivos.

O *software* encontra-se implementado de forma a receber eventos de dois tipos:

1) Do utilizador:

- Iniciar / terminar o *software*.
- Ver as informações acerca de determinado dispositivo que esteja na lista de dispositivos, nomeadamente o seu número de série que é único de cada módulo, o número que o identifica na rede, a corrente nominal da protecção onde se encontra ligado e os valores de calibração obtidos.
- Remover um dispositivo da lista de dispositivos, deixando de receber eventos em relação ao mesmo.
- Actualizar a lista de dispositivos obrigando o coordenador a verificar se existem novos dispositivos na rede que não se encontrem contemplados na lista de dispositivos.

2) Do módulo *XBee*:

- Informar que um novo dispositivo se juntou à rede, pedindo ao utilizador para fornecer as informações necessárias.
- Recepção de informação relativa aos valores de calibração de forma a guardá-los junto dos dados do respectivo dispositivo.
- Recepção de informação relativa à ocorrência de um defeito, utilizando um processador de voz e uma janela de aviso para mostrar o tipo de defeito (curto-circuito ou sobrecarga), o dispositivo onde ocorreu e o valor de corrente registado.

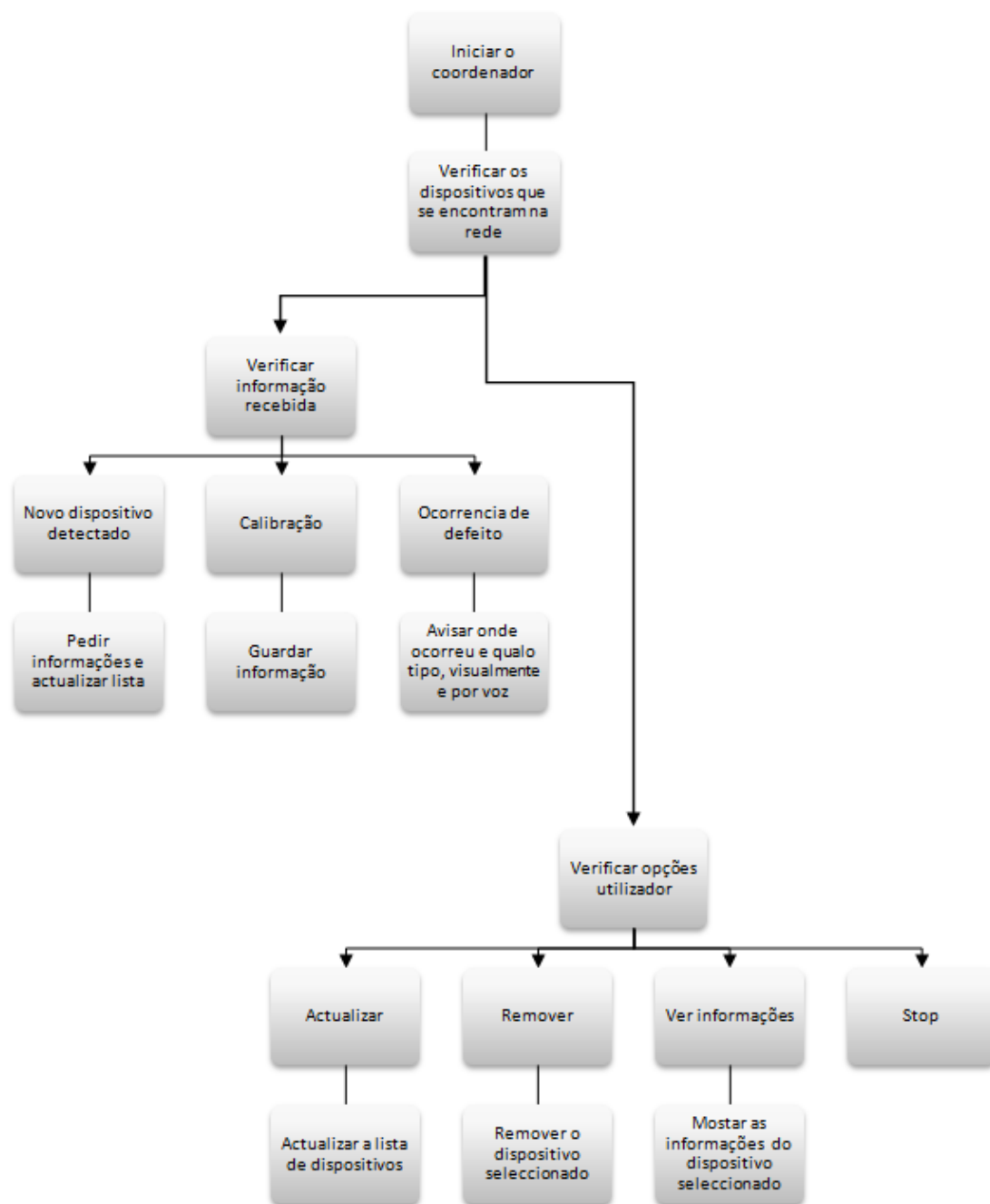


Figura 4.12 - Fluxograma das funções implementadas no painel de controlo

4.2.1 Menu principal

O menu principal (Figura 4.13) possibilita a interação do utilizador com os diversos dispositivos que se encontram na rede. Este menu encontra-se dividido em três áreas que possibilitam uma rápida visualização do estado da rede e dos comandos disponíveis.

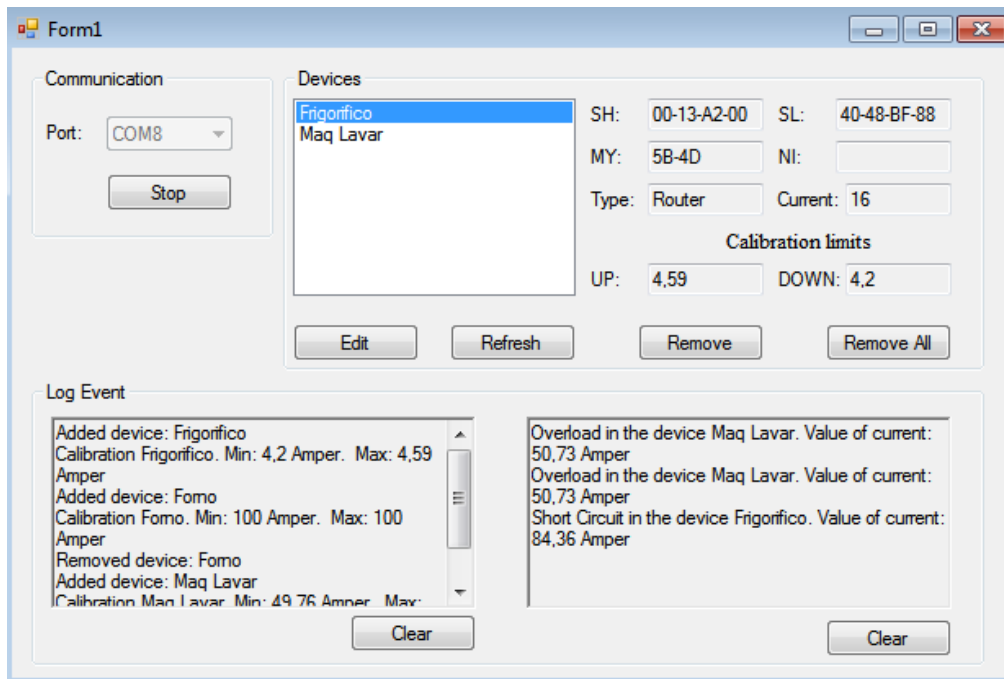


Figura 4.13 - Menu principal do painel de controlo

A área de comunicação (Communication) permite iniciar a comunicação com o módulo XBee seleccionando a porta à qual este se encontra ligado. Depois de estabelecida a correcta comunicação com o módulo XBee é disponibilizado o acesso ao resto das funcionalidades do menu.

A área de dispositivos (Devices) reúne toda a informação referente aos dispositivos que se encontram a ser monitorizados, apresentando uma lista com os nomes atribuídos pelo utilizador. Seleccionando um dispositivo apresenta-se no lado direito as principais informações referentes a esse dispositivo (Tabela 4.4). Os botões Remove e Remove All permitem remover respectivamente o dispositivo seleccionado ou todos os dispositivos que se encontram na lista. O botão Refresh permite verificar se existem novos dispositivos na rede que ainda não tenham sido adicionados à lista. Finalmente o botão Edit permite alterar o nome do dispositivo seleccionado.

Tabela 4.4 - Descrição das características dos dispositivos presentes no menu

SH e SL	Número de série do módulo <i>XBee</i>
MY	Número atribuído pelo coordenador que identifica o módulo na rede.
NI	Identificador do módulo. Pode-se atribuir um nome ao módulo <i>XBee</i> colocando-o neste campo.
Type	Tipo do módulo <i>XBee</i> (<i>coordinator</i> ou <i>router</i>)
Current	Corrente estipulada do dispositivo de protecção que protege o circuito.
Calibration limits	Limites lidos pelo dispositivo no processo de calibração.

A área de eventos (*Log Event*) permite consultar os eventos ocorridos durante a execução do programa. Do lado esquerdo apresenta-se a informação referente aos dispositivos inseridos e removidos da lista, bem como os valores de calibração recebidos dos mesmos. Do lado direito observa-se a informação acerca dos defeitos detectados com informação relativa ao dispositivo, tipo de defeito e valor de corrente registado.

4.2.2 Adicionar dispositivo

Quando é detectado pelo *software* um novo dispositivo que ainda não se encontre na lista de dispositivos referida anteriormente é mostrada ao utilizador a janela presente na Figura 4.14, acompanhada por uma mensagem de voz (“*New device found*”). Nesta janela é pedido ao utilizador que insira o nome que pretende atribuir ao dispositivo e a corrente estipulada da respectiva protecção. São disponibilizados 20 segundos para o utilizador inserir as informações, caso contrário é atribuído um nome padrão (ex. Device 1) e uma corrente estipulada de 16A.

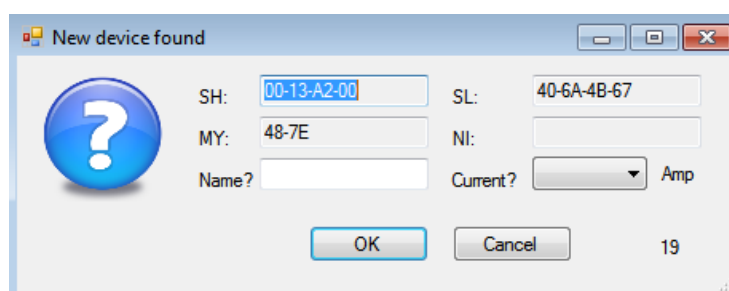


Figura 4.14 – Adicionar tomada

Após o utilizador fornecer toda a informação acerca do dispositivo e a respectiva confirmação por parte do *software* procede-se à inserção deste novo dispositivo na lista de dispositivos.

No caso de se pretender editar o nome de um dispositivo que já se encontre na lista, recorrendo ao botão *Edit*, é apresentada novamente a janela presente na Figura 4.14 mas permitindo editar apenas o campo “*Name?*”.

4.2.3 Ocorrência de defeito

Quando é detectado um defeito num dos dispositivos que se encontram a ser monitorizados são enviadas as informações necessárias para o painel de controlo apresentando-se no ecrã uma mensagem de texto acompanhada por uma mensagem de voz que fornece a mesma informação (Figura 4.15 e Tabela 4.5). Esta mensagem permanece activa e repete-se durante 15 segundos. Após este tempo volta-se ao menu principal ficando o registo do defeito na área *Log Event*.

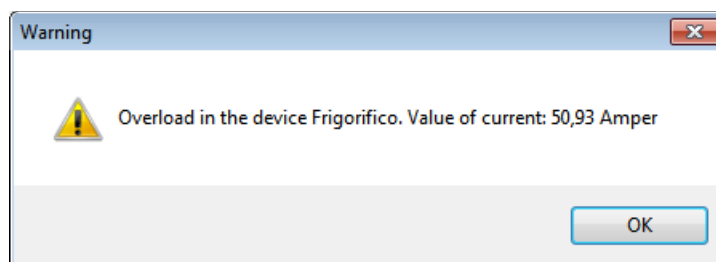


Figura 4.15 - Ocorrência de defeito

Tabela 4.5 - Estrutura das mensagens apresentadas ao utilizador

Tipo de defeito (<i>overload</i> ou <i>short-circuit</i>)	<i>in the device</i>	Nome do dispositivo.	<i>Value of current:</i>	Valor da corrente registada	<i>Amper</i>
---	----------------------	-------------------------	------------------------------	-----------------------------------	--------------

4.3 Software Matlab

Tratando-se do desenvolvimento de um protótipo torna-se fundamental poder observar e adquirir os sinais envolvidos no processamento e tomada de decisão do sistema. Estes sinais permitem verificar possíveis *bugs* no funcionamento do sistema e observar fenómenos transitórios que podem não estar contemplados no processamento efectuado.

Como referido no subcapítulo 4.1.2.3 é impraticável enviar os valores de correntes obtidos em tempo real. Assim sendo, o *software* desenvolvido será responsável por apresentar graficamente apenas os últimos valores de correntes adquiridos, bem como os máximos e mínimos registados. Para adaptar o sistema a este novo *software* de testes foi necessário fazer algumas alterações ao sistema implementado (Figura 4.16).

De forma a remover o problema da gestão de energia após o disparo das protecções e da codificação e decodificação das *frames* utilizadas pelos módulos *XBee* para efectuar a comunicação optou-se por utilizar um cabo USB para transmitir os dados entre o sistema e o computador. Desta forma a alimentação do sistema é assegurada pelo computador e a

informação é transmitida por protocolo série directamente para o computador. Note-se que este *software* foi desenvolvido apenas para testar o sistema na sua fase de desenvolvimento, não sendo assim necessário complicar a estrutura de comunicação e alimentação, pois este não será utilizado numa versão final do sistema.

O código da placa de desenvolvimento *Arduino* foi alterado de forma a excluir as inicializações do módulo de comunicação *XBee* e passar a enviar para o computador os valores de correntes, máximos e mínimos guardados sempre que seja detectado um defeito.

Adicionou-se um botão ao sistema de forma a possibilitar o envio de dados para o computador mesmo sem a ocorrência de qualquer defeito. Este botão implementa um sinal digital na placa de desenvolvimento *Arduino* que possibilita a suspensão do ciclo de controlo e procede ao envio dos valores de corrente que se encontram guardados. Esta funcionalidade permite verificar se em condições normais de funcionamento (sem a ocorrência de defeitos) o sistema encontra-se a operar correctamente.

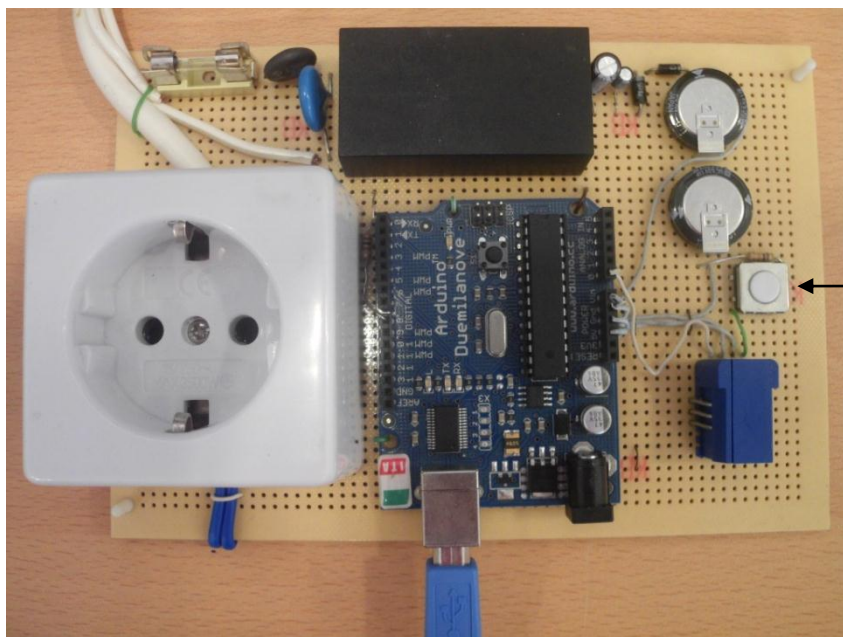


Figura 4.16 – Protótipo de uma tomada adaptada para o *software MatLab*

O *software* desenvolvido para receber os dados provenientes do sistema e apresenta-los graficamente recorre à plataforma *MatLab* pela simplicidade que esta proporciona na comunicação recorrendo ao protocolo série e pela facilidade em adquirir informação numérica e apresenta-la graficamente.

O gráfico apresentado (Figura 4.17) contém a azul o sinal de corrente registado no sistema, a preto as margens definidas como corrente nula na fase de calibração, a verde o sinal que acompanha os máximos relativos e a vermelho o sinal que acompanha os mínimos relativos.

Estes são os sinais que o sistema usa para verificar a ocorrência de defeitos e é com a sua visualização que se retiram conclusões acerca do correcto funcionamento do mesmo.

O *software* também fornece, através da linha de comandos do *MatLab*, informação acerca do tipo de defeito detectado e dos valores de calibração retornados pelo sistema de forma a verifica se os dados apresentados graficamente coincidem.

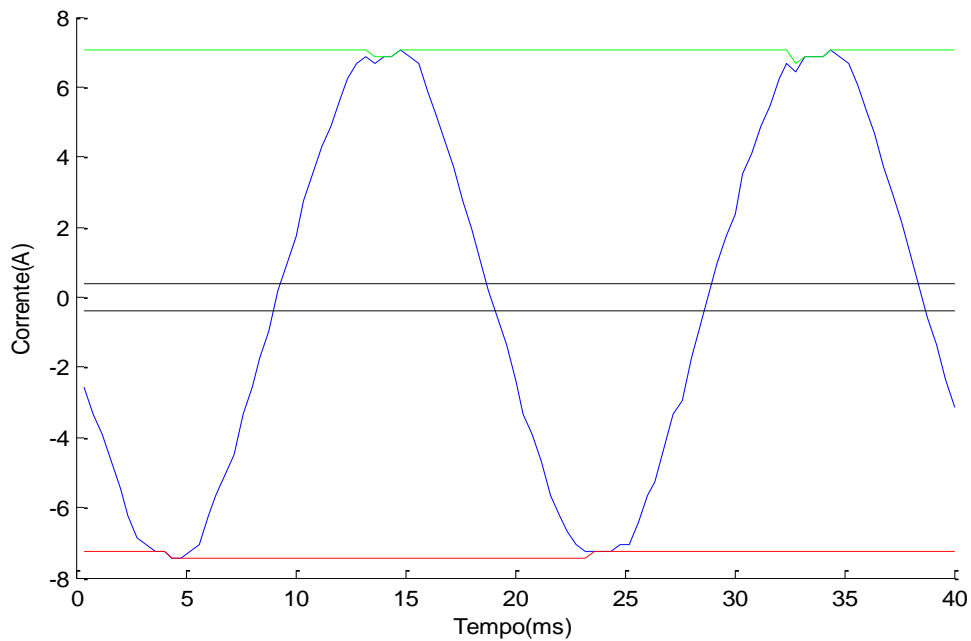


Figura 4.17 - Gráfico retornado pelo *software MatLab*

5 Testes efectuados ao sistema

A montagem representada na Figura 5.1 permite averiguar o funcionamento do sistema implementado, verificando o seu desempenho na monitorização de cargas presentes em habitações. Como dispositivo de protecção encontra-se incorporado um disjuntor da ABB com corrente estipulada de 10A e curva de disparo do tipo C (ver Tabela 2.1 e Figura 5.2), sendo as zonas de defeito utilizadas as presentes na Tabela 4.2. A corrente eficaz consumida pelos dispositivos é registada com o auxílio de uma pinça amperimétrica de forma a ser possível cruzar essa informação com a onda de corrente fornecida pelo sistema implementado.

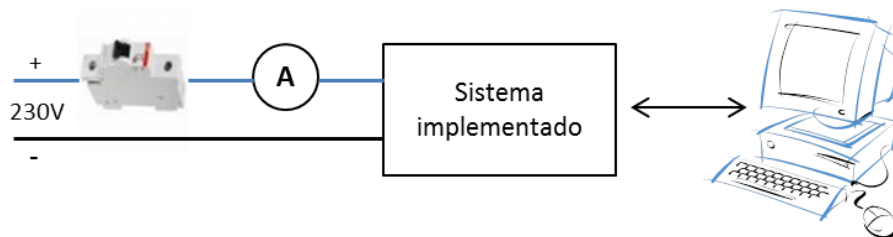
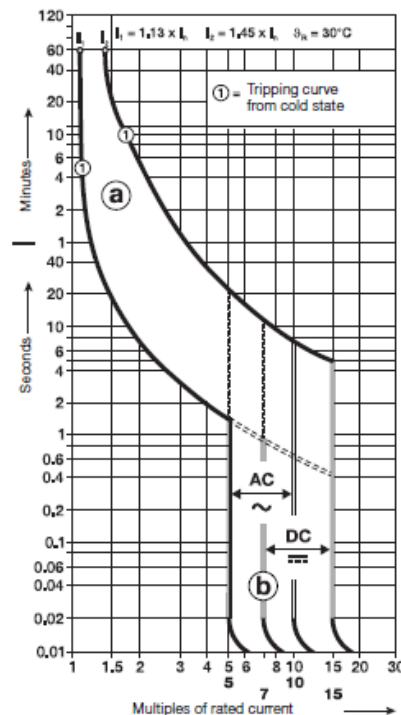


Figura 5.1 - Montagem efectuada para verificar o funcionamento do sistema

Desta forma, o sistema é sujeito a condições de defeito (curto-circuitos e sobrecargas) e a condições normais de funcionamento de forma a verificar o funcionamento do mesmo, sendo os resultados obtidos apresentados de seguida. Nos resultados apresentados são tidos em conta os limites de corrente registados, tempo de disparo da protecção, defeito detectado pelo sistema e corrente eficaz medida pela pinça amperimétrica.



**Figura 5.2 - Curva característica do tipo C dos dispositivos da ABB
 (adaptado de [10])**

5.1 Detecção de curto-circuitos

Para verificar a resposta do sistema na presença de correntes de curto-circuito provocou-se dois curto-circuitos entre a fase e o neutro da tomada monitorizada pelo sistema implementado (Figura 5.3 e Figura 5.4); e um curto-circuito recorrendo a uma carga indutiva (micro-ondas) que possui uma corrente de arranque bastante elevada que proporciona o disparo da protecção utilizada (Figura 5.5).

Tabela 5.1 – Correntes envolvidas nos curto-circuitos e tempos de disparo.

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.3	$\pm 0.29\text{A}$	-101.8A	0.29A	NA	6.8ms
Figura 5.4	$\pm 0.29\text{A}$	-0.29A	98.24A	NA	4.4ms
Figura 5.5	$\pm 0.39\text{A}$	-73.51A	0.39A	NA	10.8ms

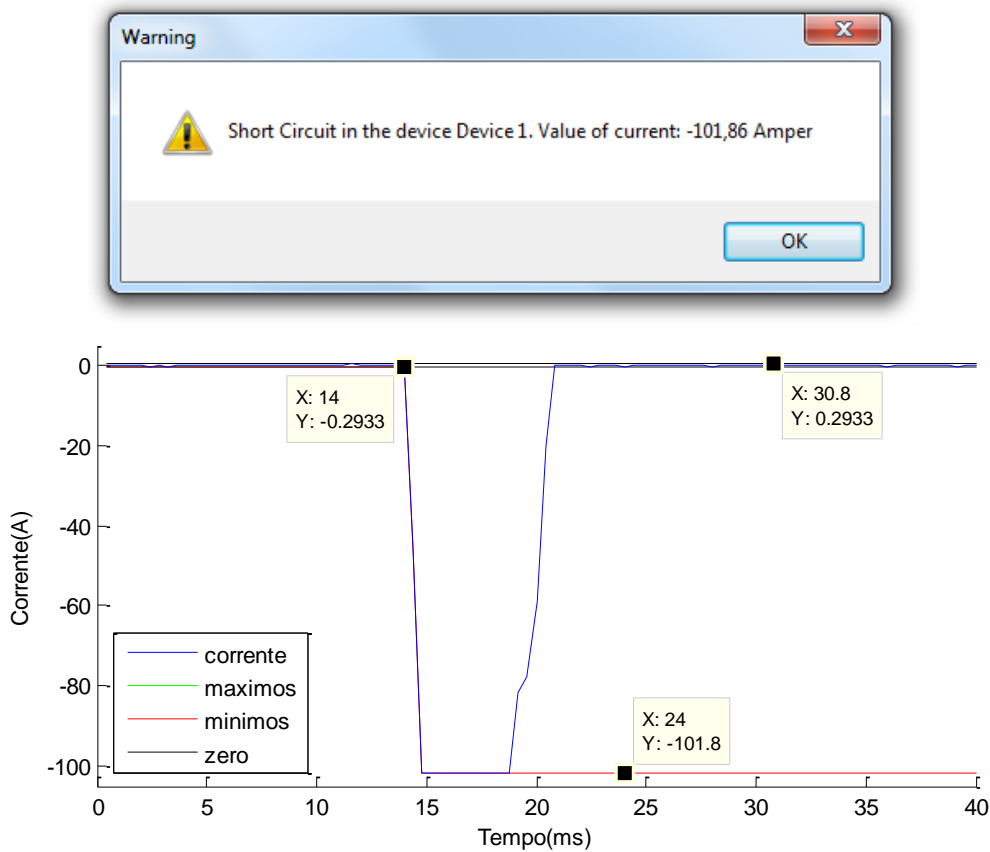


Figura 5.3 - Curto-circuito fase-neutro 1

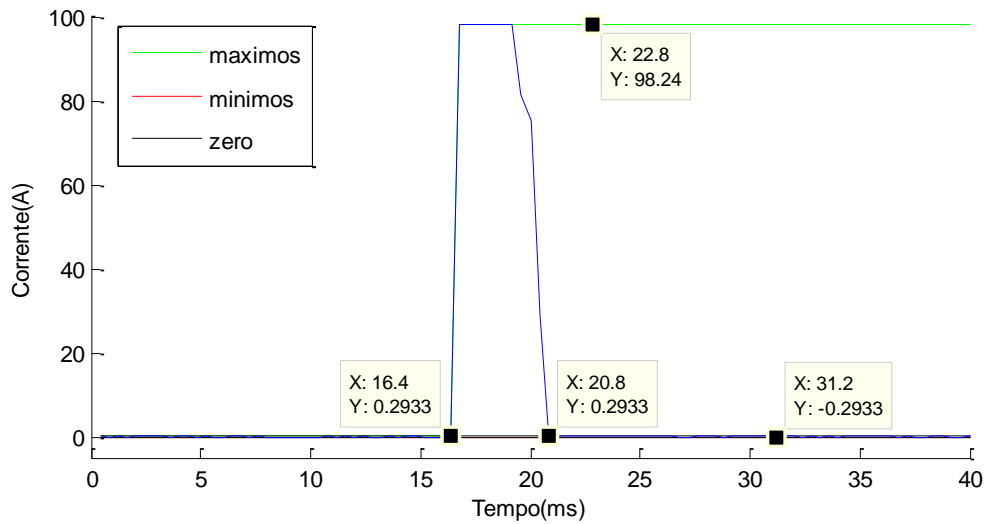
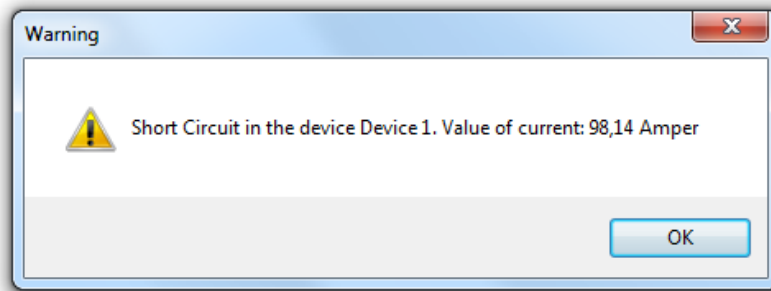


Figura 5.4 - Curto-circuito fase-neutro 2

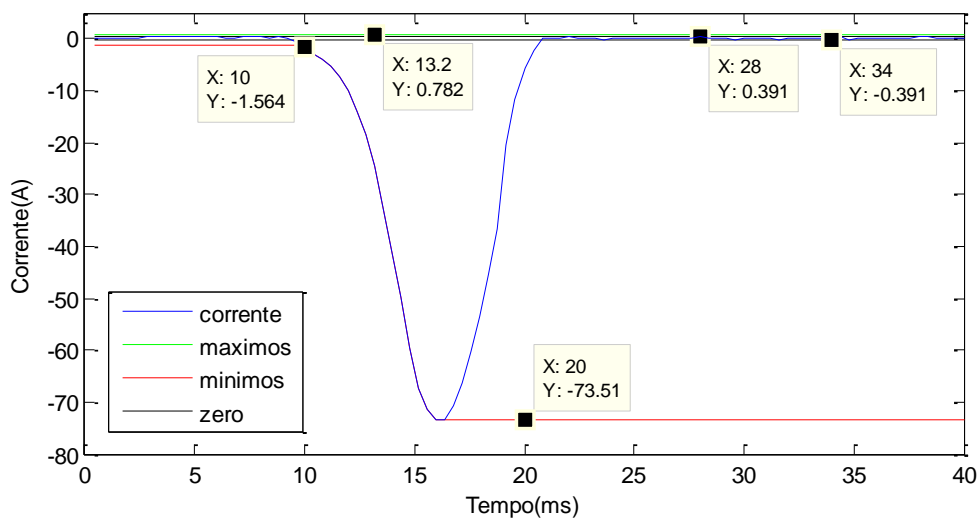
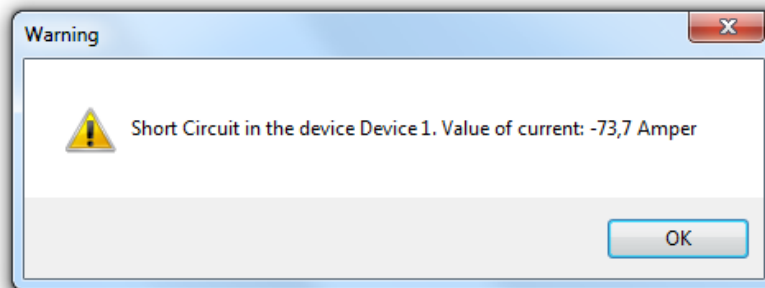


Figura 5.5 - Curto-circuito provocado pela corrente de arranque de um microondas

Na Tabela 5.1 encontram-se as principais características dos testes efectuados, seguindo-se os gráficos obtidos pelo *software* implementado em *MatLab*. Verifica-se pelos gráficos que nos curto-circuitos fase-neutro existe saturação do transdutor de corrente, estando envolvidas correntes superiores a 85A. Neste caso é impossível identificar qual a corrente máxima presente no sistema, contudo o tempo a que este se encontra sujeito a estas correntes é bastante reduzido (menos de 10ms).

O tempo de disparo da protecção é um factor importante a ter em conta de forma a verificar a rapidez do sistema na detecção e identificação na ocorrência de curto-circuitos. De forma a seguir a mesma metodologia em toda a análise dos resultados é considerado como tempo de disparo o tempo compreendido entre o instante em que se inicia o consumo de corrente, e o instante em que cessa o mesmo fornecimento (devido ao disparo da protecção). Como era esperado, nos curto-circuitos fase-neutro, por envolverem correntes mais elevadas, existe um tempo de disparo inferior ao curto-circuito originado pelo arranque do microondas.

No capítulo 3.1 observa-se a característica do transdutor de corrente utilizado, verificando-se que a gama de utilização deste transdutor situa-se entre os -85A e 85A, correspondendo a uma tensão aos seus terminais de 0.375V e 4.625V respectivamente. Em caso de saturação, a tensão aos terminais do transdutor apresenta-se igual à tensão de alimentação, ou seja, 0V ou 5V consoante se trate de uma saturação relativa a correntes negativas ou positivas respectivamente. Assim sendo, e recorrendo à Equação 3.2 pode-se dizer que os verdadeiros limites do transdutor são -100A e 100A. Na prática, e como se observa na Figura 5.3 e Figura 5.4, os limites são ligeiramente diferentes, facto justificável tendo em conta o processo de calibração (ver 4.1.2.1) onde se verifica que para corrente nula o transdutor não retorna exactamente 2.5V aos seus terminais como esperado.

5.2 Detecção de sobrecargas

De forma a verificar o correcto funcionamento do sistema na detecção e identificação de sobrecargas sujeitou-se o sistema a associações de cargas (fogão eléctrico 2400W + forno eléctrico 2200W + torradeira 700W) que permitissem o pedido excessivo de corrente, cronometrando o tempo que o dispositivo de protecção demora a actuar. Os valores registados encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Correntes envolvidas nas sobrecargas e tempos de disparo.

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrent e eficaz	$\sqrt{2} \times$ corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.6	$\pm 0.39A$	-30.11A	31.09A	21A	29.70A	3:59 min
Figura 5.7	$\pm 0.29A$	-32.16A	32.16A	23A	32.53A	2:20 min
Figura 5.8	$\pm 0.39A$	-21.41A	23.17A	16A	22.63A	21:23 min

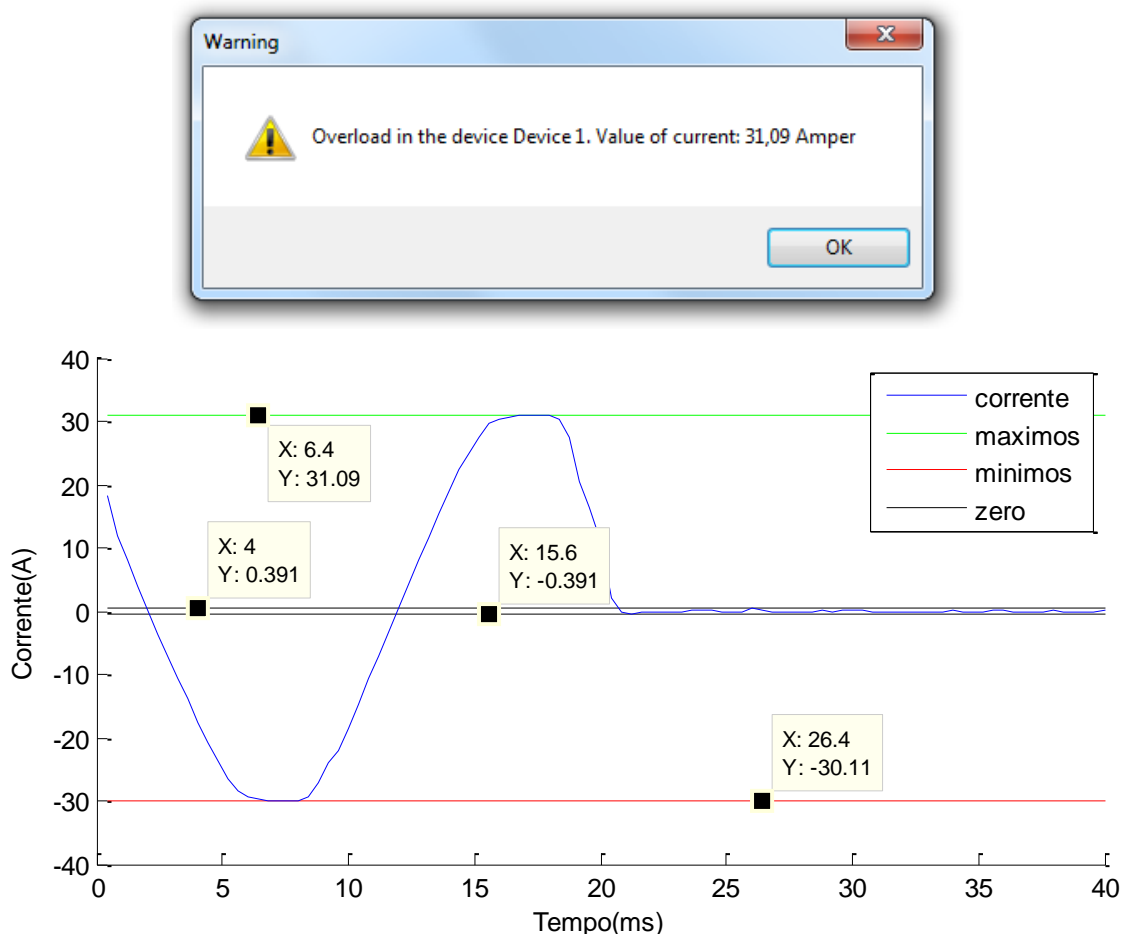


Figura 5.6 – Fogão eléctrico + forno eléctrico

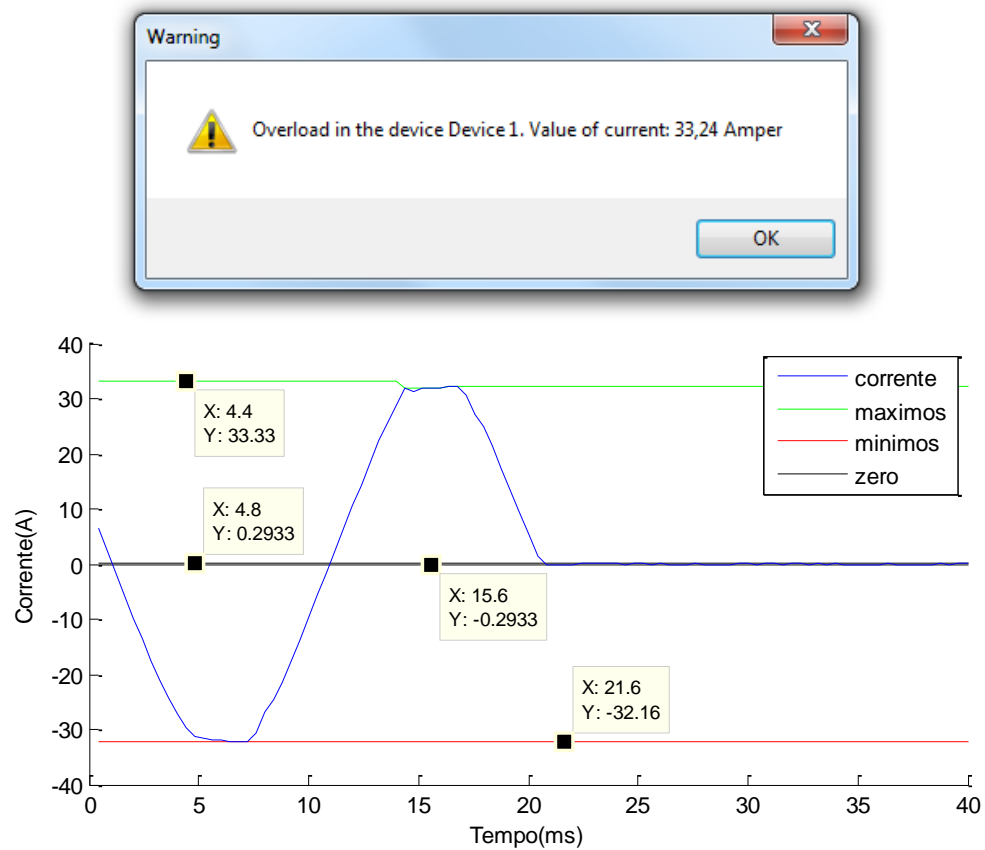


Figura 5.7 – Fogão eléctrico + forno eléctrico + torradeira

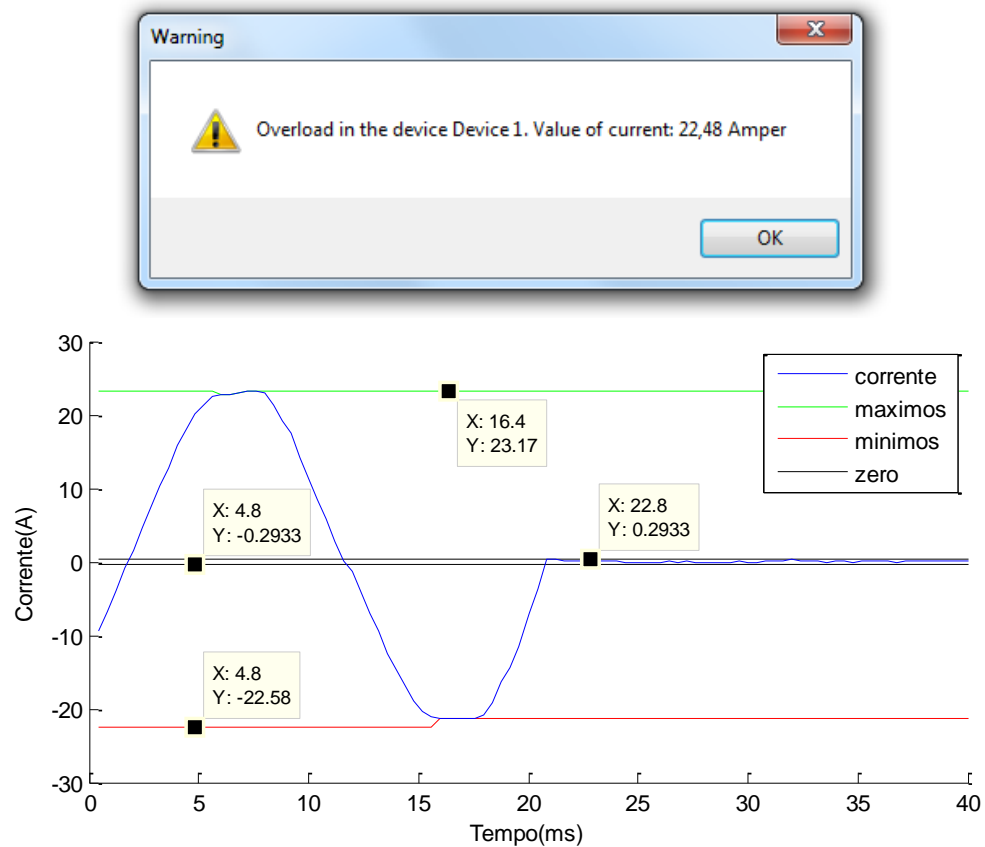


Figura 5.8 – Fogão eléctrico + torradeira

Observando a Tabela 5.2 e as respectivas figuras com os gráficos indicando os valores de corrente registados pode-se concluir acerca do correcto funcionamento do sistema na detecção e identificação de sobrecargas. As correntes registadas pelo sistema encontram-se de acordo com as registadas pela pinça amperimétrica (corrente eficaz), apesar de pequenas diferenças que podem ser justificadas pelos arredondamentos efectuados nas conversões analógicas-digitais. Em relação aos tempos de disparo, como era esperado, aumentam com a diminuição da corrente consumida, apresentando-se contudo superiores aos esperados pela análise da curva característica do dispositivo de protecção (Figura 5.2). Sendo a actuação do dispositivo de protecção efectuada pela deformação de um material bimetálico que depende da temperatura é aceitável a discrepância dos tempos registados. Note-se que a curva característica presente na Figura 5.2 foi obtida à temperatura de 30°C e nos testes efectuados não foi tida essa variável em conta.

5.3 Comportamento do sistema na ausência de defeitos.

O sistema desenvolvido teve em conta o consumo de correntes sinusoidais, verificando os seus máximos e mínimos de forma a poder concluir acerca dos possíveis defeitos nos dispositivos monitorizados. Para verificar a correcta monitorização e observar as formas de onda da corrente consumida por diversos equipamentos, utilizou-se o botão incorporado no sistema que permite enviar para o computador os dados processados mesmo sem a ocorrência de defeitos (ver Figura 4.16).

5.3.1 Equipamentos com características resistivas

Em habitações é usual existirem diversos tipos de equipamentos maioritariamente resistivos. Na Tabela 5.3 e respectivas figuras encontram-se os consumos e formas de onda de corrente de alguns desses equipamentos.

Tabela 5.3 - Correntes envolvidas nos equipamentos resistivos.

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrente eficaz	$\sqrt{2} \times$ corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.9	±0.39A	-7.23A	7.04A	5.10A	7.21A	NA
Figura 5.10	±0.39A	-5.08A	5.08A	3.65A	5.16A	NA
Figura 5.11	±0.39A	-4.30A	4.30A	2.89A	4.09A	NA

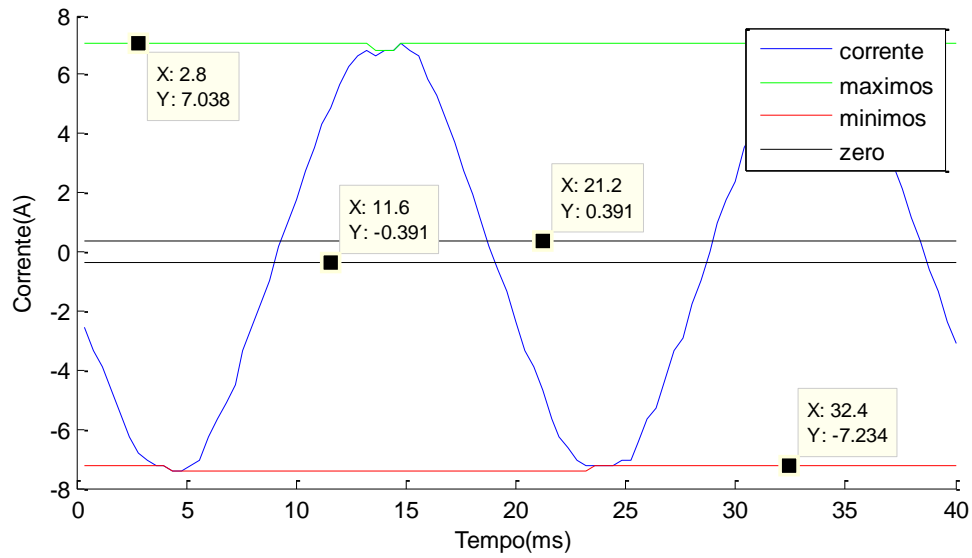


Figura 5.9 - Forno eléctrico de 1200W

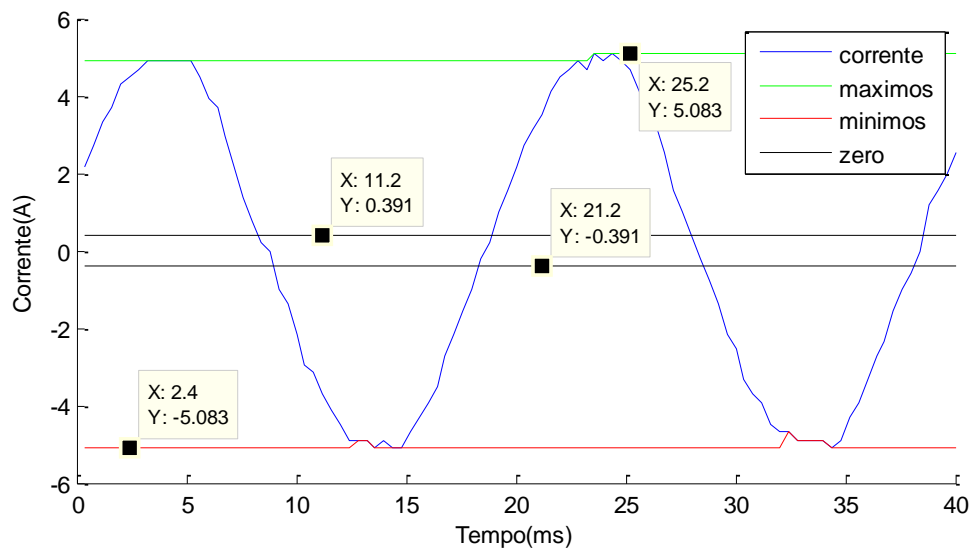


Figura 5.10 – Fritadeira de 840W

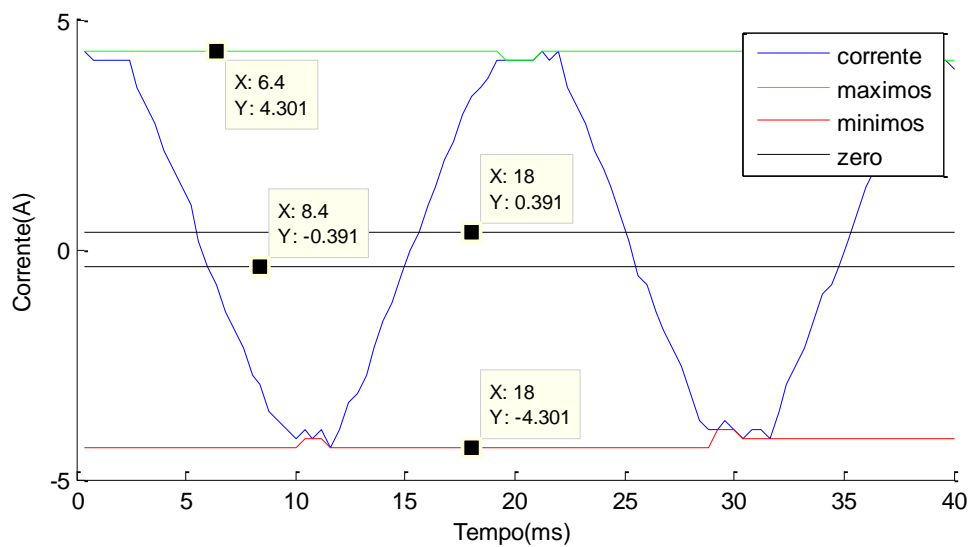


Figura 5.11 – Torradeira 700W

No caso destes dispositivos, todos destinados ao aquecimento de alimentos, verifica-se que a corrente apresenta a forma sinusoidal e frequência (50Hz) esperadas, sendo os valores obtidos pelo sistema bastante próximos dos registados pela pinça amperimétrica. Não se observa qualquer factor que coloque em causa a implementação efectuada.

5.3.2 Equipamentos com fontes de alimentação comutáveis

Existe uma grande diversidade de equipamentos electrónicos alimentados por fontes de alimentação comutáveis nas habitações, nomeadamente, televisões, sistemas Wi-Fi, descodificadores digitais, carregadores de telemóveis, etc. Na Tabela 5.4 e respectivas figuras encontram-se os consumos e formas de onda de corrente de alguns desses equipamentos.

Tabela 5.4 - Correntes envolvidas nos equipamentos com fontes comutáveis.

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrente eficaz	$\sqrt{2} \times$ corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.12	$\pm 0.39A$	NA	NA	0.02A	0.03A	NA
Figura 5.13	$\pm 0.39A$	-0.78A	0.98A	0.22A	0.31A	NA
Figura 5.14	$\pm 0.39A$	-0.98A	0.78A	0.14A	0.20A	NA

Este tipo de equipamentos contém conversores AC-DC que garantem o fornecimento de corrente contínua para a alimentação de toda a electrónica. Estes conversores quando electrónicos funcionam por comutações e sucessivas passagens e interrupções de corrente verificando-se distorções na forma de onda da corrente consumida como se pode observar na Figura 5.13 e Figura 5.14. Tendo estes equipamentos electrónicos reduzidos consumos não se coloca o problema de poderem originar a actuação do sistema, contudo verifica-se que os máximos e mínimos de corrente apresentam valores absolutos mais elevados que a corrente eficaz registada pela pinça amperimétrica. Estes valores são justificados pelo cálculo da corrente eficaz, pois apesar de apresentarem mínimos e máximos elevados, existem períodos em que não existe o consumo de corrente. É necessário ter este aspecto em conta no caso deste tipo de equipamentos consumirem correntes mais elevadas e apresentarem máximos e mínimos que para o sistema sejam encarados como defeitos.

O reduzido consumo de alguns destes equipamentos (Figura 5.12) não é detectado pelo sistema implementado devido a este não ter resolução suficiente, facto que não implica o funcionamento incorrecto do mesmo.

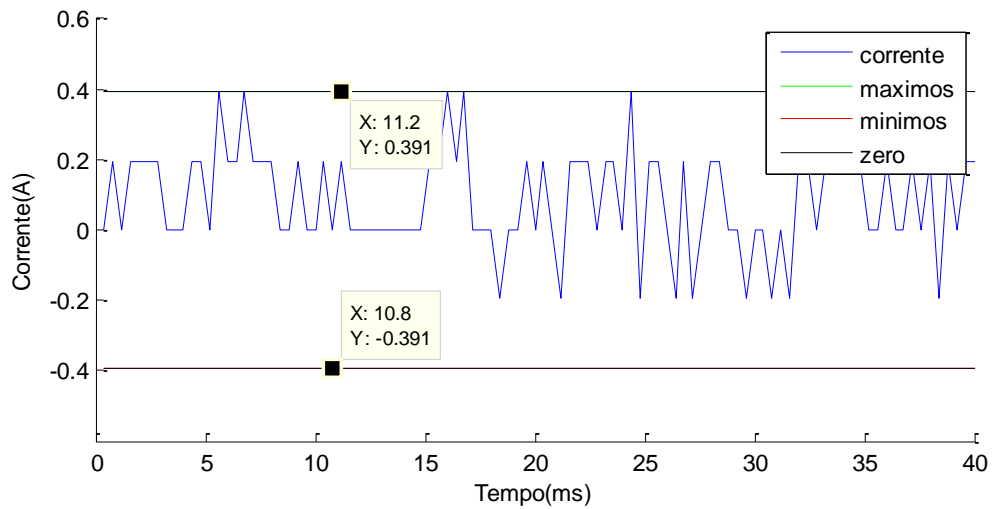


Figura 5.12 – Telemóvel 15W

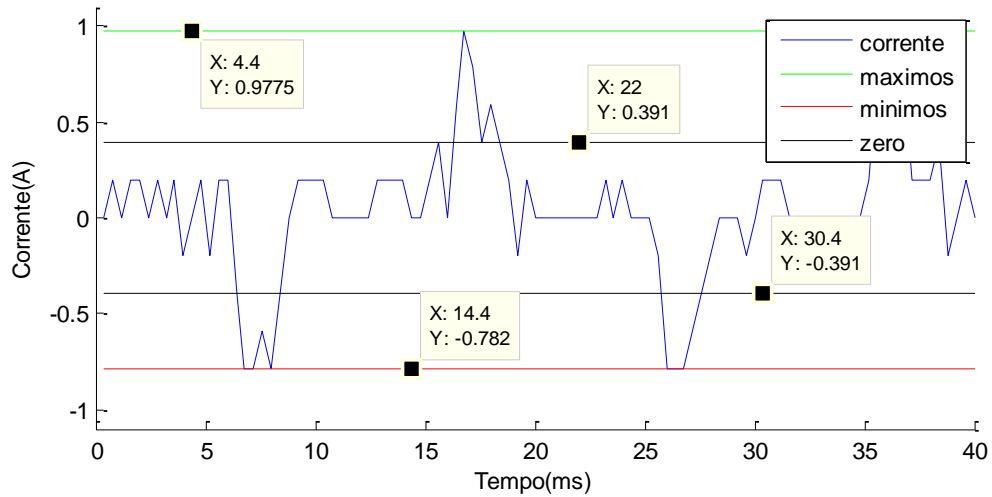


Figura 5.13 – Televisão 50W

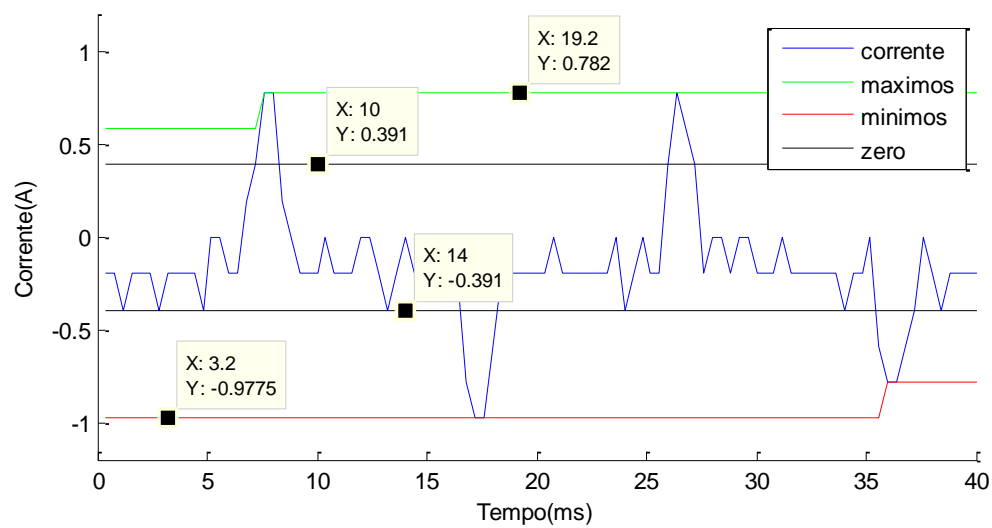


Figura 5.14 - Decodificador digital 31W

5.3.3 Equipamentos com componentes indutivos

Os motores, cargas com características indutivas, encontram-se um pouco por todos os electrodomésticos utilizados numa habitação. Na Tabela 5.5, Tabela 5.6, Tabela 5.7 e respectivas figuras encontram-se alguns desses equipamentos.

Tabela 5.5 - Correntes envolvidas nos equipamentos indutivos

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrente eficaz	$\sqrt{2} \times$ corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.15	$\pm 0.39A$	-1.17A	0.78A	0.6A	0.85A	NA
Figura 5.16	$\pm 0.39A$	-0.59A	0.59A	0.5A	0.7A	NA

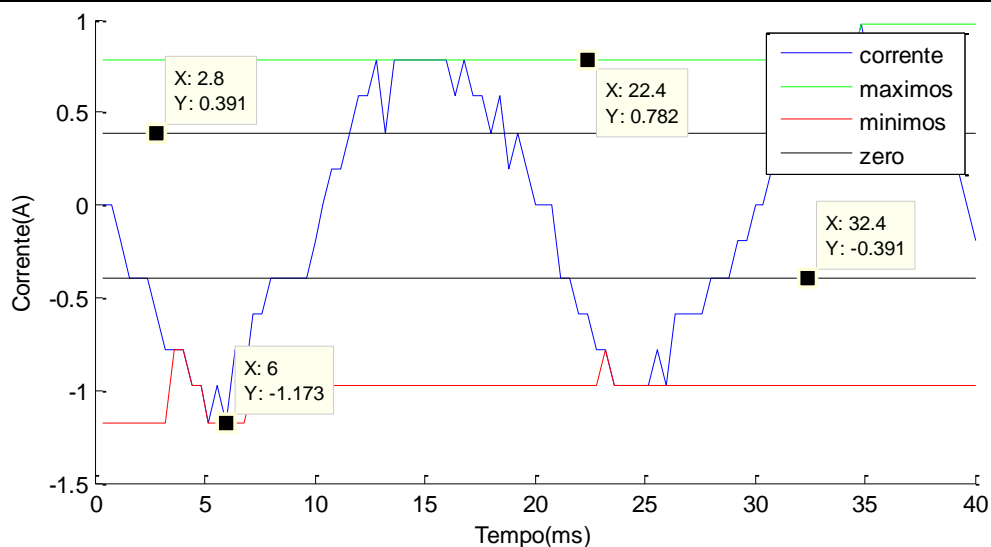


Figura 5.15 - Frigorífico

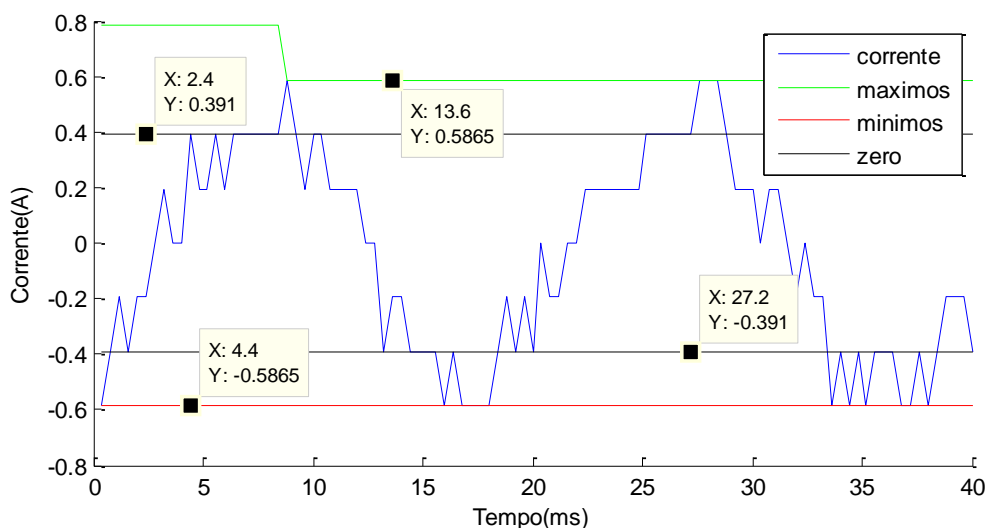


Figura 5.16 – Batedeira 150W

Tanto o frigorífico como a batedeira são equipamentos indutivos com baixo consumo energético. Nestes equipamentos observam-se as formas de onda esperadas, não sendo detectado pelo sistema qualquer defeito.

Tabela 5.6 - Correntes envolvidas numa máquina de lavar loiça

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrente eficaz	$\sqrt{2} \times$ corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.17	$\pm 0.39A$	-0.98A	1.37A	0.5A	0.76A	NA
Figura 5.18	$\pm 0.39A$	-12.32A	12.32A	8.56A	12.11A	NA

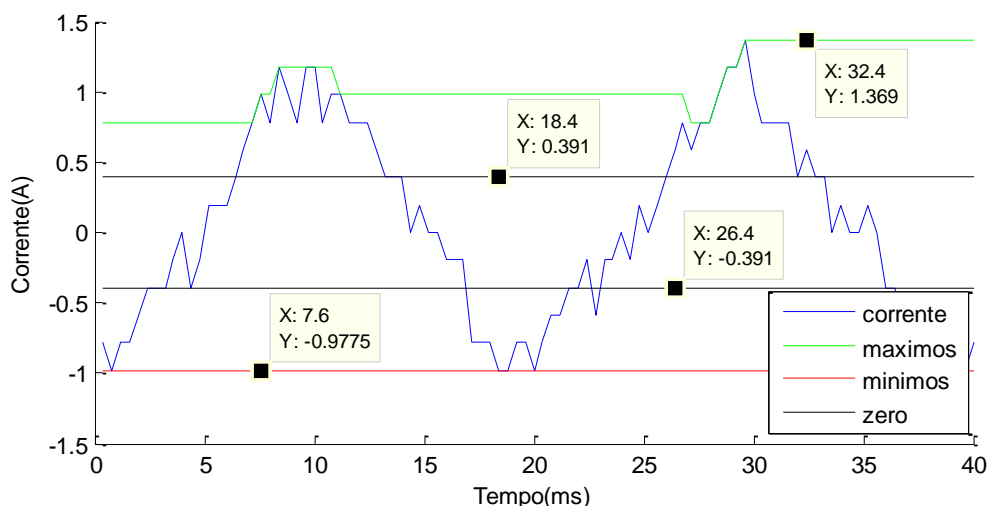


Figura 5.17 - Máquina loiça lavagem 2200W

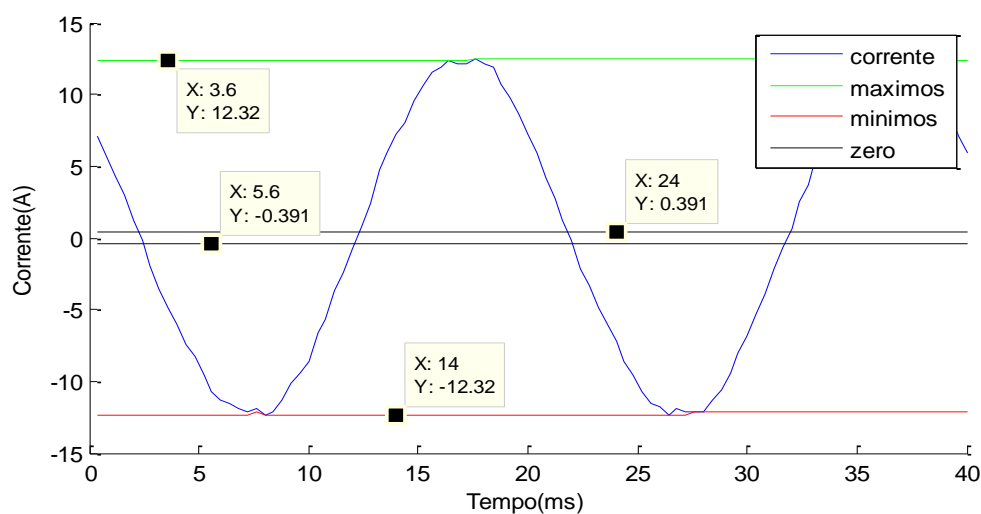


Figura 5.18 - Máquina loiça aquecimento 2200W

A Figura 5.17 e Figura 5.18 mostram uma máquina de lavar loiça em duas fases distintas. Na primeira observa-se a característica indutiva da máquina durante o enxaguamento e bombagem de água. Na segunda verifica-se a sobreposição da característica resistiva durante o aquecimento de água. Note-se que o sistema apresenta formas de onda melhoradas com o aumento da corrente consumida, facto esperado devido à corrente nominal do transdutor utilizado ser de 25A, dificultando o registo de correntes reduzidas.

Tabela 5.7 - Correntes envolvidas em equipamentos com controlo de velocidade

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrente eficaz	$\sqrt{2} \times$ corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.19	$\pm 0.39A$	-3.13A	3.13A	1.33A	1.88A	NA
Figura 5.20	$\pm 0.39A$	0.98A	0.78A	0.55A	0.77A	NA

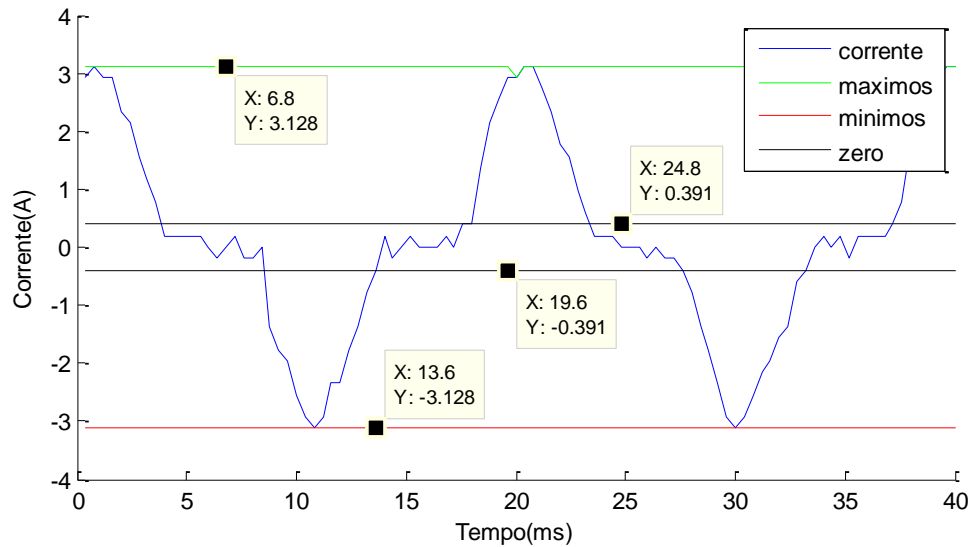


Figura 5.19 - Máquina de roupa

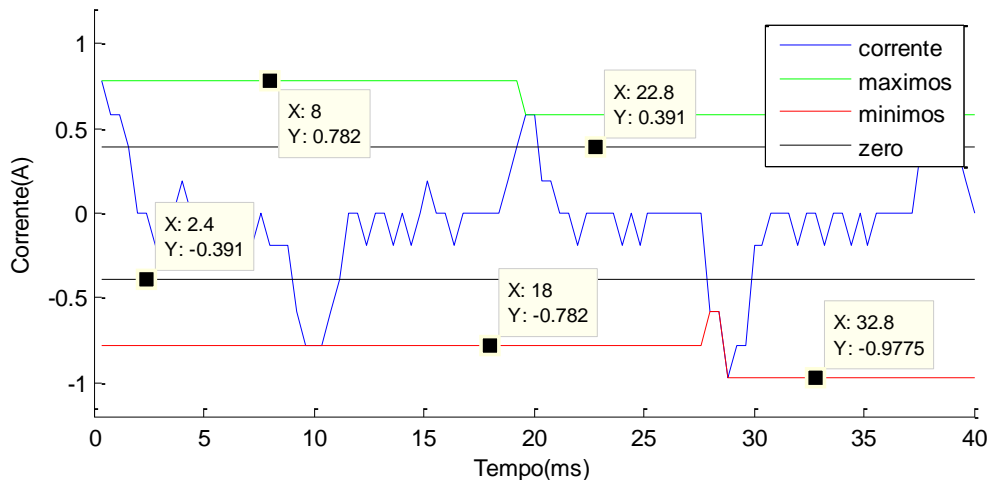


Figura 5.20 - Varinha mágica 150W

Actualmente muitos electrodomésticos vêm equipados com controladores digitais que permitem o controlo dos níveis de corrente consumida de forma a permitir diferentes regimes de funcionamento. Nestes casos observa-se a presença de uma forma de onda de corrente distorcida (Figura 5.19 e Figura 5.20) característica destes controladores. Mais uma vez, neste tipo de dispositivos, os máximos e mínimos de corrente não reflectem a verdadeira corrente eficaz consumida pelo equipamento, podendo em casos de consumos maiores accionar o sistema incorrectamente.

5.4 Detecção incorrecta de defeitos eléctricos

Apesar de todo o dimensionamento efectuado na preparação deste sistema ocorreu situações em que o sistema detectou defeitos na ausência de disparo da protecção. Não sendo conhecido previamente o comportamento de todos os equipamentos e o seu respectivo consumo de corrente é normal a ocorrência destes falsos defeitos. Apresenta-se na Tabela 5.8 e respectivas figuras os defeitos registados pelo sistema mesmo na ausência do disparo da protecção. Tendo os testes efectuados tido como base os equipamentos eléctricos de uma determinada habitação não se pode garantir que não existam outros casos em que se possam verificar mais detecções incorrectas semelhantes às que se apresentam.

Tabela 5.8 - Correntes envolvidas na detecção incorrecta de defeitos

Figura	Intervalo corrente nula	Mínimo de corrente	Máximo de corrente	Corrente eficaz	$\sqrt{2} \times$ corrente eficaz	Tempo de disparo
Figura 5.21	$\pm 0.49A$	-3.62A	95.7A	0.4A	0.57A	NA
Figura 5.22	$\pm 0.39A$	-15.44A	5.67A	3.1A	4.38A	NA
Figura 5.24	$\pm 0.29A$	-19.26A	20.04A	14.5A	20.50A	NA

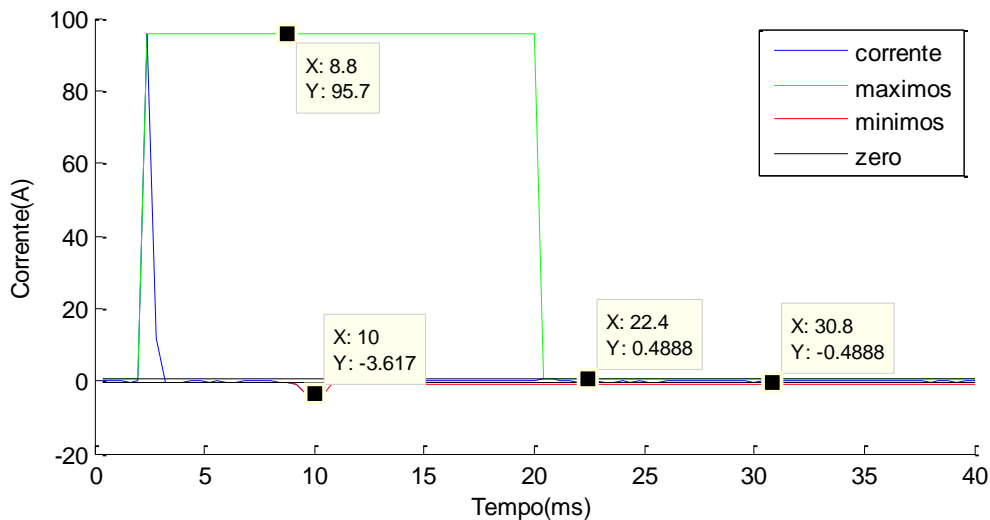


Figura 5.21 - Transformador de portátil de 90W

Tratando-se o transformador de um portátil de uma carga fortemente indutiva, na sua ligação à rede eléctrica ocorre um transitório que contém um pico elevado de corrente seguindo-se um reduzido consumo de energia não detectado pelo sistema implementado. Deste modo, após verificar um elevado pico de corrente e posteriormente contabilizar um ciclo de amostras dentro da gama correspondente a corrente nula, o sistema assume a ocorrência de um defeito no transformador, contudo não foi suficiente para disparar a protecção. Neste caso o sistema lança o alerta da ocorrência de um curto-circuito no transformador, apesar de na realidade a instalação eléctrica estar a funcionar correctamente e não ter ocorrido qualquer disparo de protecção.

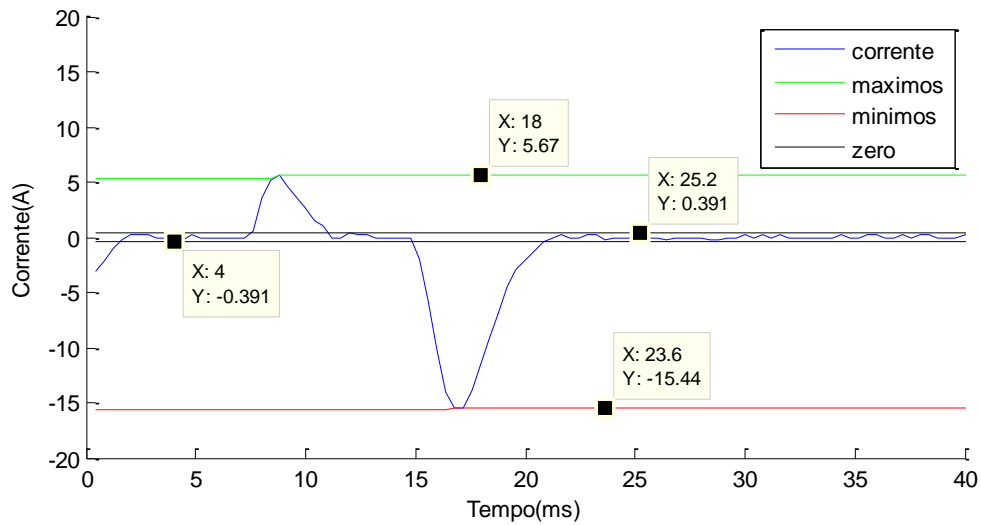


Figura 5.22 - Aspirador de 1800W a funciona abaixo da potência máxima

No caso do aspirador, devido à electrónica usada para controlar a potência do mesmo, quando se utiliza abaixo da potência máxima verifica-se o consumo de corrente presente na Figura 5.22. Neste caso, após o desligar do aspirador, o sistema verifica o fim de consumo de corrente, e como na parte negativa da onda existe um valor de corrente correspondente a sobrecarga o sistema informa o utilizar da ocorrência de uma sobrecarga. Na realidade, e como se observa na Tabela 5.8 a corrente eficaz consumida são 3.1A não existindo qualquer sobrecarga nem disparo da protecção do respectivo circuito. Na Figura 5.23 observa-se o mesmo aspirador a funcionar à potência máxima na qual o efeito da electrónica de controlo de potência é diminuto, não sendo detectado qualquer defeito por parte do sistema implementado.

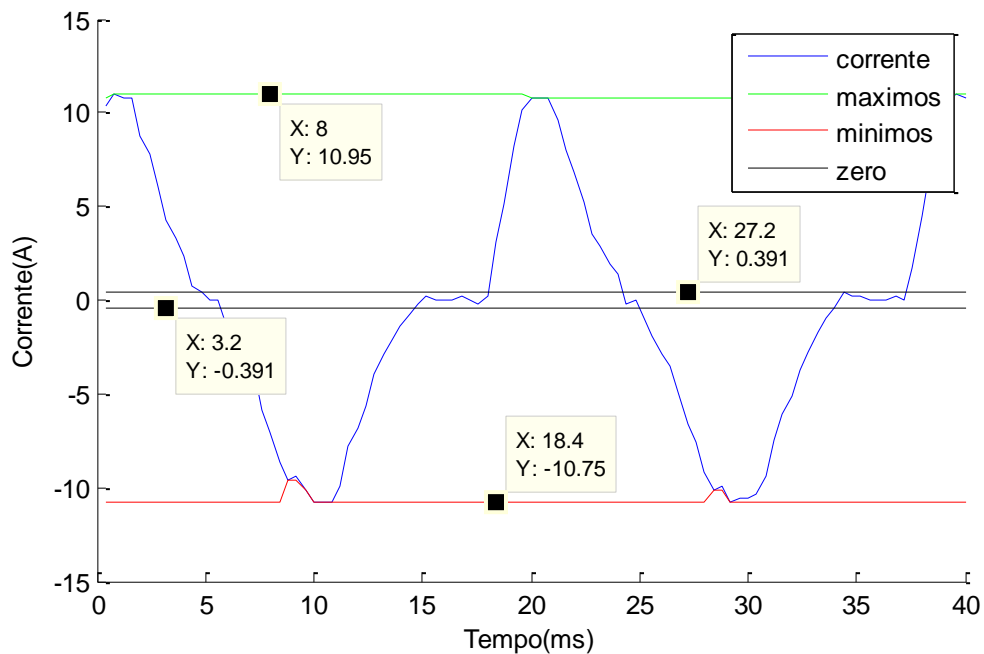


Figura 5.23 - Aspirador de 1800W na potência máxima

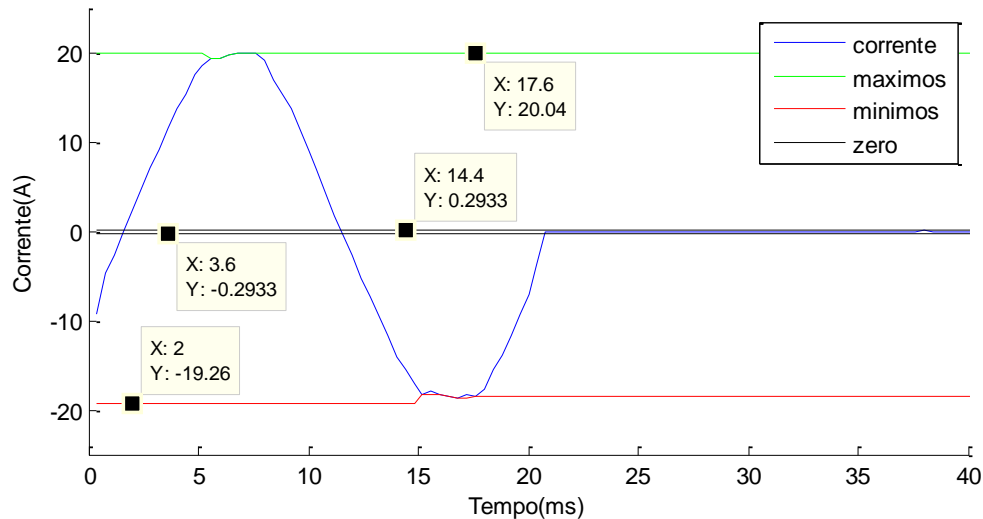


Figura 5.24 - Sobrecarga

Finalmente a Figura 5.24 representa um caso menos usual mas existente de detecção de falsos defeitos por parte do sistema. Nesta situação existe na realidade uma sobrecarga, contudo procedeu-se ao desligamento do equipamento que a provocava antes do disparo da respectiva protecção. Como se verificou no subcapítulo 5.2 o disparo do dispositivo de protecção no caso de sobrecargas não é instantâneo e demora alguns minutos podendo ocorrer estas situações. Neste caso o sistema identificou um defeito real, mas não existindo o disparo da respectiva protecção não se torna útil esta informação, podendo até confundir o utilizador

5.4.1 Correção de falsas detecções de defeitos

No caso do transformador de portátil (Figura 5.21) verificou-se que o transitório de corrente que ocorre após ligar o equipamento à rede eléctrica apresenta um pico de corrente seguido de um consumo reduzido durante aproximadamente 40ms. Após este transitório o consumo estabiliza e observa-se que a corrente aumenta saindo da gama considerada corrente nula (Figura 5.25).

Desta forma existe a possibilidade de aumentar o número de amostras que são necessárias para verificar o fim de consumo de corrente com a finalidade de detectar o consumo efectuado pelo equipamento após o transitório. Optou-se por passar a considerar dois ciclos de corrente em vez de apenas um, deixando de ocorrer a falsa detecção de defeito.

Esta alteração provoca um aumento do tempo de funcionamento do sistema na ausência de energia em 20ms. Contudo como verificado no subcapítulo 4.1.2.3.2 eram necessários 41ms na implementação anterior, sendo agora necessários 61ms, valor inferior aos 1.1s assegurados pelos supercondensadores utilizados.

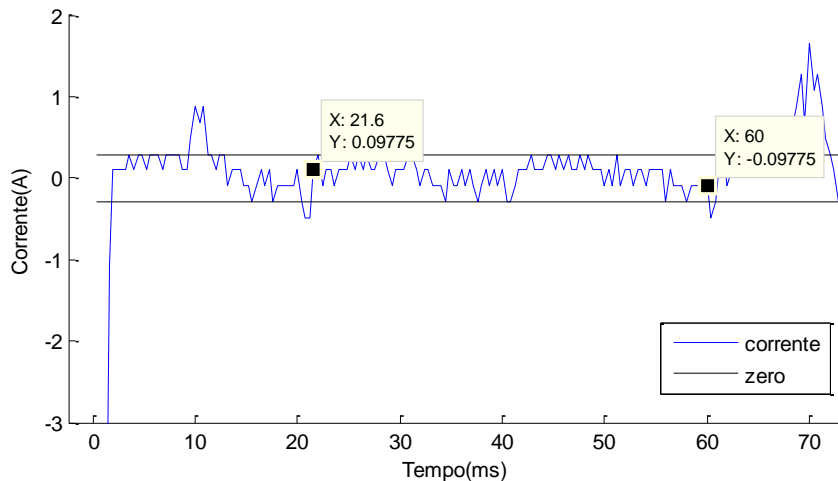


Figura 5.25 – Transitério de corrente de um transformador de portátil

Apesar de resolvida a falsa detecção de defeito originada pela ligação do transformador de portátil não se garante que outras cargas com características semelhantes apresentem os mesmos transitérios, sendo neste caso necessário adaptar o sistema a cada caso.

No caso do aspirador e outros equipamentos que tenham electrónica incorporada de forma a controlar o seu funcionamento torna-se bastante difícil averiguar a situação em que se encontram. Poder-se-ia verificar os limites máximos e mínimos de corrente admitindo que existia sobrecarga apenas se ambos estivessem fora das margens definidas resolvendo assim o caso do aspirador. Contudo esta bordagem não é possível devido ao facto dos controladores implementados, por avaria e/ou problemas de controlo, poderem consumir apenas num flanco da onda existindo a possibilidade de existência de sobrecargas.

Estando o funcionamento dos dispositivos de protecção associados ao valor eficaz de corrente que é pedida ao circuito optou-se por utilizar esta informação de forma a poder concluir acerca da existência de defeito. Deste modo, após o sistema verificar o fim de consumo de corrente por parte da carga calcula-se o valor da corrente eficaz do ciclo de corrente que antecedeu o disparo (Equação 5.1). Associando esta informação à identificação por margens já utilizada é possível eliminar este tipo de falsos defeitos.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2} \quad \text{Equação 5.1}$$

Em relação à Figura 5.24 não se pode dizer que seja propriamente uma falha uma vez que se está na presença de uma sobrecarga real, contudo o tempo de duração da mesma não foi suficiente para disparar a protecção. Neste caso a única forma de inibir o aviso dado pelo sistema será pela detecção de tensão no circuito em detrimento da verificação do fim do consumo de corrente.

6 Conclusões e trabalho futuro

Apesar de alguns resultados obtidos durante as experiências efectuadas com o sistema não estarem de acordo com os desejados, pode-se concluir que esta dissertação contém resultados positivos acerca da detecção e identificação de defeitos eléctricos nos equipamentos de uma habitação.

Em primeiro lugar, dados os resultados e todo o dimensionamento efectuado, é possível concluir acerca da utilidade e possibilidade de utilização deste tipo de sistemas em habitações permitindo a detecção e identificação de defeitos eléctricos. Mesmo para pessoas sem qualquer limitação um sistema destes torna-se bastante útil e de fácil instalação uma vez que em instalações eléctricas já existentes pode-se adaptar pequenos dispositivos a cada tomada que se pretende monitorizar, sendo a criação da rede de comunicação automática e transparente para o utilizador.

De forma a tornar o sistema mais robusto, com dimensões mais apropriadas e custo reduzido apresenta-se como próximo passo a criação de um PCB com todo o circuito, substituindo a placa de desenvolvimento *Arduino* por um microcontrolador compatível com as características necessárias e menores dimensões. É necessário também abordar a questão do consumo energético do sistema neste novo dimensionamento, tendo como objectivo possibilitar a monitorização de diversos equipamentos em simultâneo com reduzidos custos. Com este novo circuito existe a possibilidade da criação de pequenos dispositivos do tipo “*plug*”, que se podem adaptar às tomadas já existentes nas habitações e/ou a inserção em novas tomadas possibilitando o uso de todo o sistema de forma automática.

Pedindo ao utilizador que informe qual a protecção que está associada a cada tomada monitorizada pode-se também detectar defeitos nos próprios cabos e circuitos. Sabendo os equipamentos que estão no circuito que sofreu o disparo e os consumos de cada um nessa altura, pode-se concluir acerca do defeito que originou o disparo da protecção. Esta abordagem foi parcialmente implementada mas para verificar o seu correcto funcionamento é necessária a existência de mais do que um protótipo.

Para resolver os problemas associados aos falsos defeitos detectados, e apesar de se ter evitado a sua utilização de forma a reduzir os custos, poder-se-á utilizar um sensor de tensão que permita verificar a existência ou não de tensão no circuito. Esta informação permitirá saber com exactidão os momentos de disparo das protecções.

Por último, e estando monitorizando a corrente e tensão de equipamentos, torna-se inevitável adicionar ao sistema propriedades que permitam verificar os consumos energéticos destes equipamentos ao longo do tempo. Este acréscimo de funções não é trivial e necessita de estudo prévio uma vez que os tempos de processamento como verificado são fundamentais para o correcto funcionamento do sistema, podendo por exemplo ocorrer um curto-circuito na altura em que se procede ao envio dos consumos para o painel de controlo, perdendo essa informação.

Apesar do longo trabalho que se encontra por aperfeiçoar para tornar este sistema um produto rentável e com elevado nível de confiabilidade esta dissertação permitiu iniciar esse projecto e verificar o comportamento das instalações na presença de disparos das protecções.

A utilização dos supercondensadores mostrou-se de simples implementação e bastante superior à normal utilização de pilhas, permitindo a redução de espaço e impacto ambiental do sistema. O crescimento da utilização deste tipo de acumuladores de energia despertou o interesse e verificou-se uma óptima solução para o problema em questão.

Finalmente não se pode esquecer o impacto social desta dissertação que pretende alertar para o facto de pessoas com deficiência, neste caso concreto visual, terem igualmente direito a usufruir da tecnologia e da forma que esta permite melhorar a qualidade de vida das pessoas.

7 Bibliografia

- [1] J. G. Josué, “Projecto e Construção de um Sistema de Monitorização de Energia Eléctrica para uma Habitação,” Lisboa, FCT-UNL, 2010, pp. 5-20.
- [2] MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DA INOVAÇÃO, “Regras técnicas das instalações eléctricas,” Diário da República, 1.ª série — N.º 175, 2006.
- [3] B. Metz-Noblat, F. Dumas e C. Poulain, “Calculation of short-circuit currents,” em *Cahier technique no. 158*, Collection Technique Schneider-Electric, 2005.
- [4] IEEE Std 141-1993, “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”.
- [5] Schneider Electric, “Especificação de Disjuntores Segundo a ABNT,” [Online]. Available: http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/disjuntores_x_normas_abnt.pdf. [Acedido em Setembro 2011].
- [6] LEM International SA, “Product Technical Information brochure: CAS - CASR - CKSR technical brochure,” Setembro 2009. [Online]. Available: <http://www.lem.com/docs/marketing/LEM%20Leaflet%20CAS%20CASR%20CKSR.pdf>. [Acedido em Junho 2011].
- [7] J.-S. Lee, Y.-W. Su e C.-C. Shen, “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi,” *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 46-51, 2007.
- [8] Maxwell technologies, “Technical Note - Doc. # 10073627 | Ver 3,” [Online]. Available: www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/10073627.3_how_to_determine_the_appropriate_size.pdf. [Acedido em Julho 2011].
- [9] Digi International Inc., “XBee ZNet 2.5/ XBee-PRO ZNet 2.5 OEM RF Modules,” 2008.
- [10] ABB, Power and productivity for a better world™, [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/963daaa78df7fb63c1257a2100483f5a/\\$file/2CSC400002D0210.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/963daaa78df7fb63c1257a2100483f5a/$file/2CSC400002D0210.pdf). [Acedido em Novembro 2011].

- [11] C. E. McCoy, "Short circuit current fundamentals: characteristics/ magnitudes/ definitions for high voltage circuit breaker duties," *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE*, vol. 3, pp. 1985-1992, 1995.
- [12] T. Kato, H. S. Cho, D. Lee, T. Toyomura e T. Yamazaki, "Appliance Recognition from Electric Current Signals for Information-Energy Integrated Network in Home Environments," *Ambient assistive health and wellness management in the heart of the city*, vol. 5597/2009, pp. 150-157, 2009.
- [13] Y. Suhara, T. Nakabe, G. Mine e H. Nishi, "Distributed Demand Side Management System for Home Energy Management," *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2430-2435, 2010.
- [14] Schneider Electric, "Os Efeitos dos Curtos-Circuitos," [Online]. Available: http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2_efeitos.pdf.