



Rui Miguel Amaral Lopes

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Monitorização não Intrusiva de Cargas

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

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins,
FCT/UNL
Co-orientador: Prof. Doutor Celson Pantoja Lima,
UFOPA

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Palma Goes
Arguente: Prof. Doutor Paulo José da Costa Branco
Vogal: Engenheiro Pedro Ferreira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

2012

COPYRIGHT

Monitorização não Intrusiva de Cargas

Rui Miguel Amaral Lopes - Todos os direitos reservados.

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.

Aos meus Pais, Irmãos, e Namorada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, e ao meu co-orientador, Professor Doutor Celson Lima, por toda a ajuda, disponibilidade, motivação, ensinamentos, enfim, pela orientação facultada. Mais do que meus Professores, passaram a ser para mim uma referência, a eles um muito obrigado.

Agradeço à câmara municipal de Lagos pela bolsa de estudos que me foi financiada durante estes cinco anos de curso. Esta constituiu uma grande ajuda financeira.

Aos meus colegas de curso por toda a ajuda, troca de experiências e companheirismo, em especial, ao Pedro Magalhães, Vasco Gomes, José Vieira, Duarte Arrobe, Pedro Arsénio, Pedro Leitão, Telmo Ferraria, Hugo Viana, Marisa Amaral, Filipa Lourenço, Mauro Dias, entre outros. Um muito obrigado ao meu colega de casa e amigo Alexandre Costa, por todo o seu apoio e aconselhamento. Deixo também o meu agradecimento ao Senhor Guerreiro por todo o suporte técnico proporcionado ao longo deste último ano.

Um muito obrigado aos meus grandes amigos Espichenses, Luzences e Lacobrigences, onde, entre muitos outros, se encontram o Pedro Rosa, Samuel Reis, Alexandre Costa, Cláudio Rosário, Gerson Silva, David Diogo, Tiago Filipe, Diogo Reis, Luciana Teixeira, Fábio Reis, João Borlinha, Marcelo Nazário, Carlos Rosa, ...

Aos meus queridos pais pela educação, pelo carinho e pela orientação que sempre me ofereceram. Agradeço-lhes também por todos os esforços efetuados para que eu tivesse direito à minha formação académica, foram incansáveis nessa tarefa. Gostaria também de deixar uma palavra de carinho aos meus pequenos irmãos, a Carolina e o Salvador. Agradeço também à Mila e ao Agostinho pelo seu grande contributo na minha educação e pela palavra amiga sempre disponível.

Um agradecimento da maior importância, à Ana Sofia, a minha namorada, por toda a ajuda oferecida ao longo deste trabalho, pela enorme paciência, pelos conselhos, pelos ensinamentos, e acima de tudo, pela sua amizade e amor.

RESUMO

As previsões indicam que no período temporal decorrido entre 2004 e 2030 a procura energética global aumentará 53 por cento. Aliada a esta crescente procura, a progressiva diminuição dos recursos energéticos disponíveis provoca, nos vários sectores energéticos mundiais, sérios desafios relacionados com a satisfação da referida procura a preços acessíveis. O melhoramento da eficiência energética revela-se parte integrante da solução para este problema, uma vez que permite reduzir a quantidade de energia necessária para o cumprimento de um determinado nível de conforto, apresentando em simultâneo os menores custos associados.

No caso da eficiência energética em edifícios (e.g., habitações ou serviços), o seu melhoramento pode ser alcançado através da mudança de alguns comportamentos dos seus utilizadores. O fornecimento de informação detalhada e em tempo real sobre o consumo de energia eléctrica nos edifícios induz, nos utilizadores dos mesmos, a adoção de determinados comportamentos que resultam no referido melhoramento.

Assim, com o intuito de melhorar a eficiência energética em edifícios, a presente dissertação concentra-se no desenvolvimento de um sistema de monitorização não intrusiva de cargas, capaz de colocar à disposição do utilizador informações detalhadas sobre os consumos energéticos de cada um dos dispositivos eléctricos (e.g., ferro de engomar, televisão ou iluminação) presentes num determinado edifício. Estas informações dizem respeito aos horários de funcionamento de cada um dos dispositivos eléctricos, bem como aos consumos energéticos, custos monetários e emissões de CO₂ associados. Mediante este sistema de monitorização não intrusiva de cargas, o utilizador é também informado, em tempo real, sobre os dispositivos que se encontram em funcionamento.

O reconhecimento dos dispositivos responsáveis pelas variações energéticas ocorridas no edifício baseia-se na utilização da transformada S. Nas experiências realizadas, o sistema computacional desenvolvido reconheceu corretamente a entrada e saída de funcionamento dos vários dispositivos eléctricos utilizados em 96,43 por cento das ocorrências, num universo de 56 amostras.

Termos Chave: Procura Energética, Eficiência Energética, Monitorização não Intrusiva de Cargas, Transformada S.

ABSTRACT

Forecasts indicate that in the period from 2004 until 2030 the global energy demand will increase by 53 percent. Allied to this growing demand, the gradual decrease of available energy resources causes, in the various energy sectors worldwide, serious challenges related to the satisfaction of the aforementioned demand at affordable prices. The improvement of energy efficiency proves to be an integral part of the solution to this problem, since it allows reducing the amount of energy needed to accomplish a certain level of comfort, presenting simultaneously the smallest associated costs.

In the case of energy efficiency in buildings (e.g., households and services), its improvement can be achieved by changing some users behaviors. Providing real time detailed information about the electric energy consumption in buildings induces, in their occupants, the adoption of certain behaviors that result in the referred enhancement.

Thus, in order to improve energy efficiency in buildings, this work focuses in the development of a non-intrusive load monitoring system, capable of making available to the user detailed information about the energetic consumption of each electrical device present in a particular building. This information regards the electric devices operation schedule and the energetic consumptions, monetary costs and CO₂ emissions associated with it. The user is also informed, in real time, about the operating devices.

The recognition of the devices responsible for the buildings energy consumption variations is based on the use of the S transform. In the experiments conducted, the developed computer system correctly recognized the entry and exit of operation of the various electrical devices in 96.43 percent of the cases, from a universe of 56 samples.

Keywords: Energy Demand, Energy Efficiency, Non-intrusive Load Monitoring, S Transform.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do Documento	3
Capítulo 2 – Monitorização não Intrusiva de Cargas	5
2.1 Métodos Assentes em Sistemas de Aquisição de Dados de Baixa Frequência.....	6
2.1.1 Características Macroscópicas: Variações na Potência Ativa e na Potência Reativa... 6	
2.1.2 Características Macroscópicas: Variações na Potência Ativa e na Potência Reativa e Transitórios da Potência Ativa.....	10
2.1.3 Características Macroscópicas: Variações na Potência Ativa	11
2.2 Métodos Assentes em Sistemas de Aquisição de Dados de Alta Frequência	13
2.2.1 Característica Microscópica: Harmónicas da Corrente Referente ao Transitório	13
2.2.2 Característica Microscópica: Harmónicas da Corrente Referente ao Estado Estacionário.....	14
2.2.3 Característica Microscópica: Transformada de Fourier do Ruído Existente no Sinal de Tensão	16
2.2.4 Característica Microscópica: Propriedades Geométricas das Curvas V-I.....	18
2.2.5 Característica Microscópica: Forma de Onda do Sinal de Corrente	19
2.2.6 Assinaturas Eléctricas Compostas por Várias Características Microscópicas	20
Capítulo 3 – Análise em Tempo-Frequência	23
3.1 Transformada de Fourier por Janelas	25
3.2 Transformada Wavelet.....	28

3.3 Transformada S	29
3.3.1 Obtenção da Transformada S a partir da STFT.....	30
3.3.2 Obtenção da Transformada S a partir da Transformada Wavelet	31
Capítulo 4 – A Solução Proposta	33
4.1 Configuração Experimental	33
4.2 Modelo Conceptual.....	34
4.2.1 Modelo Funcional.....	34
4.2.2 Modelo Arquitetural	37
4.2.2.1 Interface.....	37
4.2.2.2 Controlo	38
4.2.2.3 Entidade.....	38
4.2.2.4 Modelo de Dados – Visão Lógica	38
4.3 Implementação	40
4.3.1 Tecnologias Adotadas	40
4.3.2 Detalhamento do Modelo Arquitetural	40
4.3.2.1 Estrutura da Camada Interface.....	41
4.3.2.2 Estrutura da Camada Controlo	42
4.3.3 Modelo de Dados – Visão Física.....	44
4.3.4 Modelo Comportamental.....	46
4.3.4.1 Módulo Aprendizagem	46
4.3.4.2 Módulo Monitorização	50
4.3.4.3 Módulo Cálculo de Estatísticas.....	53
Capítulo 5 – Validação e Resultados Experimentais	55
5.1 Modo de Aprendizagem.....	55

5.2 Modo de Monitorização.....	63
Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros	69
6.1 Síntese Geral	69
6.2 Contribuição da Investigação	70
6.3 Trabalhos Futuros.....	71
Bibliografia	73
Anexo I	77
Anexo II	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução da procura por fontes de energia primária e de Negajoules [5]	2
Figura 2.1 - Algoritmo do NALM.....	8
Figura 2.2 - Diagrama bidimensional de assinaturas (Plano ΔP - ΔQ), adaptado de [9]	9
Figura 2.3 - Forma de onda da corrente consumida por um motor de indução e respectivas envolventes espectrais a_1 e b_1 , adaptado de [16].....	14
Figura 2.4 - Amplitudes das partes reais e imaginárias das harmónicas referentes à corrente consumida por um monitor de um computador, adaptado de [17]	15
Figura 2.5 - Ruído existente no sinal de tensão. a) Espectro de amplitude do ruído de fundo. b) Espectro de amplitude do ruído quando um determinado dispositivo é ligado. c) Funções gaussianas resultantes. Adaptado de [18].....	17
Figura 2.6 - Curvas V-I. a) Inexistência de desfasamento. b) Desfasamento de 30°. c) Desfasamento de 60°, adaptado de [19].....	18
Figura 2.7 - Forma de onda do sinal de corrente. a) Torradeira e secador a funcionar no modo frio. b) Secador a funcionar no modo quente. Adaptado de [20].....	20
Figura 3.1 - Resultados obtidos com a transformada de Fourier. (a) Andamento temporal de $g_1(t)$. (b) Andamento temporal de $g_2(t)$. (c) Espectro de amplitude de $g_1(t)$. (d) Espectro de amplitude de $g_2(t)$	24
Figura 3.2 - Andamento temporal de um sinal com três diferentes componentes harmónicas	26
Figura 3.3 - Resultados obtidos com a transformada de Fourier por janelas. a) STFT calculada recorrendo a uma janela de Hamming com 32 pontos. b) STFT calculada recorrendo a uma janela de Hamming com 128 pontos.....	27
Figura 3.4 - Parte real da Wavelet de Morlet.....	28
Figura 3.5 - Comparação entre a transformada S e a STFT. (a) Andamento temporal do sinal em análise, $h[0:255] = \cos\left(2\pi\left(10 + \frac{t}{7}\right) \cdot \frac{t}{256}\right) + \cos\left(2\pi\left(\frac{256}{2.8} - \frac{t}{6}\right) \cdot \frac{t}{256}\right)$	

$$\frac{t}{256}), \quad h[114:122] = h[114:122] + \cos(2\pi t \cdot 0.42), \quad h[134:142] =$$

$$h[134:142] + \cos(2\pi t \cdot 0.42). \quad (b) \text{ Amplitude da transformada } S \quad (c)$$

Amplitude da STFT. Adaptado de [31].....	31
Figura 4.1 - Configuração experimental.....	33
Figura 4.2 - Diagrama de Casos de Uso.....	36
Figura 4.3 - Arquitetura do MDE.....	37
Figura 4.4 - Diagrama de Entidades e Relações do MDE – visão lógica.....	39
Figura 4.5 - Cabeçalho do procedimento que constitui o módulo IPAD.....	42
Figura 4.6 - Cabeçalhos dos procedimentos que constituem o módulo Aprendizagem.....	42
Figura 4.7 - Cabeçalhos dos procedimentos que constituem o módulo Monitorização.....	44
Figura 4.8 - Cabeçalho do procedimento que constitui o módulo Cálculo de Estatísticas.....	44
Figura 4.9 - Diagrama de Entidades e Relações do MDE – visão física.....	45
Figura 4.10 - Diagrama de atividade referente ao processo de aprendizagem.....	47
Figura 4.11 - Diagrama de atividade referente ao processo de reconhecimento de cargas.....	51
Figura 5.1 - Resultados experimentais referentes à torradeira. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.....	56
Figura 5.2 - Resultados experimentais referentes à televisão. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.....	57
Figura 5.3 - Resultados experimentais referentes à batedeira. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.....	58
Figura 5.4 - Resultados experimentais referentes ao micro-ondas. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.....	59
Figura 5.5 - Interface gráfica do MDE no início do processo de aprendizagem.....	60
Figura 5.6 - Interface gráfica do MDE mostrando as informações detalhadas do comportamento eléctrico de um dispositivo.....	61

Figura 5.7 - Andamento temporal da potência ativa consumida pela Máquina de Lavar	
Roupa.....	62
Figura 5.8 - Andamento temporal da potência ativa consumida ao longo do processo de	
Reconhecimento.....	63
Figura 5.9 - Interface gráfica do MDE mostrando os horários de funcionamento de um	
dispositivo elétrico e as estatísticas calculadas.....	65
Figura 5.10 - Interface gráfica do MDE mostrando as informações associadas aos eventos	
ocorridos e as estatísticas calculadas.....	66
Figura 5.11 - Andamento temporal da potência ativa consumida no decorrer na	
experiência realizada.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 - Erros calculados a partir de (4.5) para cada assinatura elétrica em cada evento ocorrido	64
Tabela 5.2 - Dispositivos elétricos utilizados na experiência realizada e número de eventos correta e incorretamente atribuídos.....	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampère
BD	Base de Dados
DER	Diagrama de Entidades e Relações
EDP	Energias de Portugal
GD	Gestão de Dados
Hz	Hertz
IPAD	Interface com a Placa de Aquisição de Dados
ISM	Interface com o Smart Meter
IU	Interface com o Utilizador
Wh	Watt-hora
MDE	Monitor de Dispositivos Elétricos
NALM	<i>Nonintrusive Appliance Load Monitoring</i>
PAD	Placa de Aquisição de Dados
RS-485	<i>Recommended Standard 485</i>
SM	Smart Meter
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>
TF	Transformadas de Fourier
TS	Transformada S
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
V	Volt
W	Watt

Capítulo 1 – Introdução

A título introdutório, o presente capítulo inicia-se com o enquadramento dos trabalhos a desenvolver expondo-se, também, a motivação para os mesmos. Seguidamente apresentam-se os objetivos que guiam o desenvolvimento do sistema de Monitorização não Intrusiva de Cargas e, por último, a estrutura do documento.

1.1 Enquadramento e Motivação

A energia é um elemento essencial à atual civilização, cujo consumo aumenta continuamente devido a diversos fatores (e.g., crescimento da população mundial) [1]. O impulso que o acesso às várias formas de energia, a um preço acessível, provoca no desenvolvimento económico e social de qualquer sociedade é inquestionável. No entanto, os sectores da energia de todo o mundo enfrentam atualmente sérios desafios, cuja resolução assenta num desenvolvimento energético sustentável. Um desenvolvimento deste tipo tem como base o aumento da segurança energética e o combate às mudanças climáticas provocadas pela emissão de gases de efeito estufa [2].

O facto de as previsões apontarem para um aumento de 53 % na procura de energia no período temporal delimitado por 2004 e 2030 [3], evidencia a necessidade de se aumentar a quantidade de energia disponível. O melhoramento da eficiência energética é indiscutivelmente a melhor, e menos prejudicial para o ambiente, forma de aumentar a energia disponível, contribuindo para um desenvolvimento energético sustentável [4].

O melhoramento da eficiência energética diz respeito a todas as mudanças que resultem na diminuição da energia utilizada para produzir uma unidade de atividade económica ou para satisfazer os requisitos energéticos associados a um determinado nível de conforto [2]. A partir da Figura 1.1 é possível concluir que o melhoramento da eficiência energética, dada em *Negajoules* (i.e., energia não consumida devido ao aumento da eficiência energética), apresenta-se como a fonte de energia mais importante para a União Europeia. O cálculo da quantidade de *Negajoules* apresentada assume que a intensidade energética permaneceu constante, aos níveis de 1971, durante o intervalo temporal em análise [5].

Embora tenha existido um contínuo aumento da eficiência energética desde 1971, evidenciado pela diminuição da intensidade energética, existem ainda várias medidas que podem ser

tomadas com o intuito de reforçar esta melhoria. Concretamente, no caso da energia elétrica, a alteração de alguns comportamentos por parte dos utilizadores dos edifícios pode resultar numa melhoria significativa da eficiência energética.

No estudo levado a cabo em [6], foram obtidos resultados que revelam a existência de uma errada percepção por parte dos utilizadores dos edifícios sobre os comportamentos que originam uma melhoria da eficiência energética dos mesmos. Embora exista uma forte evidência de que ações de melhoria da eficiência energética se refletem numa maior poupança de energia comparativamente à simples não utilização dos aparelhos ineficientes, apenas 11,7% dos 505 participantes no estudo responderam acertadamente. Num estudo semelhante realizado em [7], os resultados indicam que existe uma falta de percepção por parte dos utilizadores dos edifícios sobre a energia que é consumida por um determinado dispositivo eléctrico.

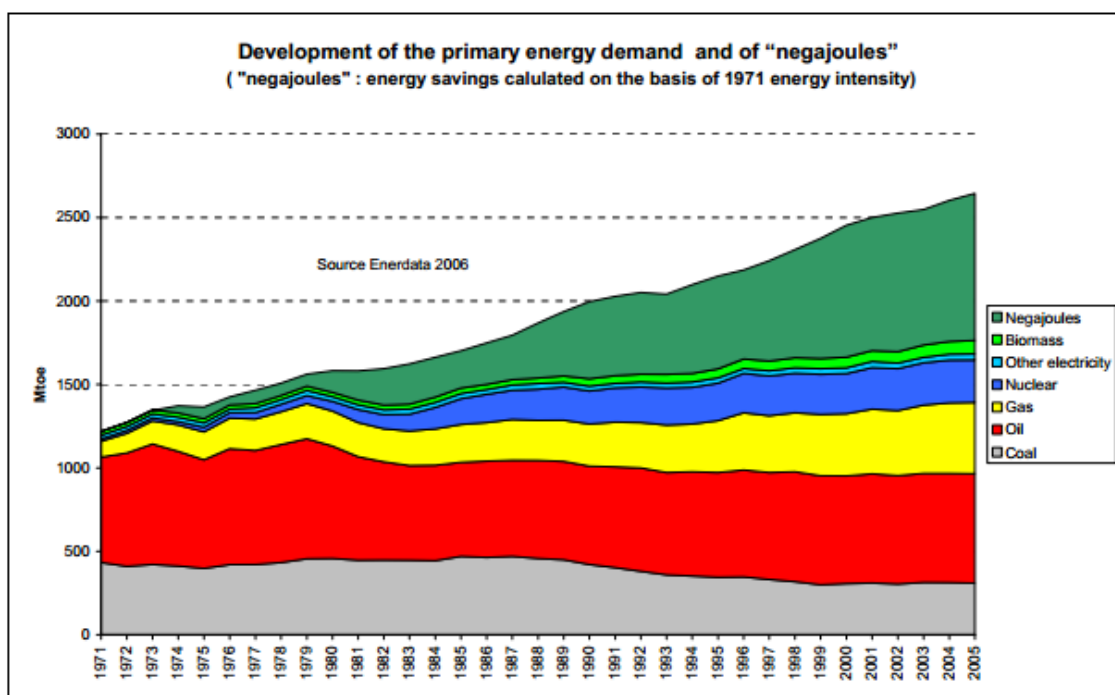


Figura 1.1 – Evolução da procura por fontes de energia primária e de Negajoules [5]

Desde 1997 até 2008, os edifícios primários (i.e., habitações e serviços) contabilizaram 56% do consumo eléctrico da EU27 [8]. Em vários estudos realizados [9], concluiu-se que o fornecimento de informações sobre o consumo eléctrico deste tipo de edifícios resulta numa modificação dos comportamentos dos seus utilizadores, permitindo poupar entre 10 a 15 % do consumo eléctrico total. Assim, o desenvolvimento de um sistema de monitorização de

dispositivos elétricos capaz de fornecer informações detalhadas sobre o consumo elétrico dos edifícios, bem como de cada um dos dispositivos elétricos que neles se encontram, apresenta-se como uma possível solução para a melhoria da eficiência energética em edifícios.

1.2 Objetivos

Com o intuito de melhorar a eficiência energética em edifícios, a presente dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitorização de dispositivos elétricos. O sistema computacional desenvolvido, com o nome Monitor de Dispositivos Elétricos (MDE), deverá colocar à disposição do utilizador informações detalhadas sobre os horários de funcionamento dos vários dispositivos elétricos presentes num determinado edifício, bem como sobre a energia elétrica consumida durante estes períodos temporais e os custos monetários e as emissões de CO₂ associados. O sistema em questão deverá ainda fornecer várias estatísticas sobre o consumo energético dos vários dispositivos presentes no edifício.

Para produzir os resultados supracitados, o MDE aprende o comportamento elétrico de cada um dos dispositivos que se encontram no edifício e utiliza o que é aprendido para reconhecer, em tempo real, os dispositivos responsáveis pelas variações ocorridas no consumo energético do respetivo edifício. Para tal, o MDE utiliza os sinais de corrente e tensão obtidos no ponto de entrada de energia elétrica no edifício, bem como outros tipos de informações fornecidas por um *Smart Meter* (SM).

1.3 Estrutura do Documento

Além deste capítulo introdutório, o presente documento compreende ainda os seguintes cinco capítulos:

- **Capítulo 2 – Monitorização não Intrusiva de Cargas**

Este capítulo apresenta o estado da arte da monitorização não intrusiva de cargas, explicando os principais métodos existentes e identificando as suas principais vantagens e desvantagens.

- **Capítulo 3 – Análise em Tempo – Frequência**

O terceiro capítulo fornece os principais fundamentos teóricos em análise espectral, identifica as limitações inerentes a este tipo de análise, apresentando-se uma solução já existente para as mesmas e fornece os fundamentos em análise Tempo – Frequência

necessários à compreensão das restantes partes do presente documento.

- **Capítulo 4 – A Solução Proposta**

O capítulo em questão apresenta uma solução para o problema exposto anteriormente, que consiste no desenvolvimento de um sistema de monitorização de dispositivos elétricos que cumpra todos os objetivos estipulados.

- **Capítulo 5 – Validação e Resultados Experimentais**

Este capítulo apresenta vários exemplos de utilização do MDE, através dos quais se procede à avaliação do seu desempenho, utilizando-se resultados obtidos experimentalmente num edifício habitacional.

- **Capítulo 6 – Conclusão e Trabalhos Futuros**

O último capítulo sintetiza o trabalho apresentado, comparando os resultados obtidos com os objetivos anteriormente estabelecidos, menciona as contribuições oferecidas pela investigação efetuada e pelo sistema desenvolvido, e identifica os possíveis trabalhos futuros que resultariam no melhoramento do sistema em questão.

Capítulo 2 – Monitorização não Intrusiva de Cargas

A monitorização do comportamento dos dispositivos elétricos presentes num edifício pode ser efetuada mediante uma abordagem intrusiva ou não intrusiva. O seguimento de uma abordagem intrusiva requer a instalação de equipamento destinado à recolha de dados para cada um dos dispositivos elétricos a monitorizar. Por sua vez, no que se refere ao seguimento de uma abordagem não intrusiva, este requer, apenas, a instalação de um único equipamento de recolha de dados que fornece informações sobre o consumo total da habitação. Este equipamento de recolha de dados é, habitualmente, instalado no quadro elétrico do edifício.

Assim, a monitorização intrusiva dos dispositivos exige gastos superiores em equipamentos, bem como uma instalação mais complexa dos mesmos, em comparação com a abordagem não intrusiva. Pode dizer-se que a monitorização intrusiva de cargas assenta nas potencialidades oferecidas pelo *hardware* instalado, enquanto o seguimento de uma abordagem não intrusiva tem como base o desenvolvimento de *software* capaz de implementar métodos que consigam monitorizar o comportamento dos dispositivos elétricos, utilizando para tal dados referentes ao consumo energético total da habitação.

O desenvolvimento do sistema de monitorização de cargas analisado neste texto assenta numa abordagem não intrusiva. Esta escolha levou em consideração as vantagens supracitadas, bem como o interesse pela desafiante tarefa de desenvolver um método capaz de atingir os objetivos impostos para o sistema em questão.

A monitorização do comportamento dos dispositivos elétricos implica que os instantes em que estes comutam de estado de funcionamento sejam detetados e que as respetivas variações no consumo energético do edifício lhes sejam atribuídas. A obtenção desta informação a partir dos dados referentes ao agregado dos dispositivos é possível graças à exclusividade do comportamento elétrico de cada dispositivo aquando do seu funcionamento. À semelhança da assinatura de um humano, diferente para cada indivíduo, este comportamento exclusivo a cada dispositivo pode ser considerado como uma assinatura elétrica. A assinatura de um dispositivo é construída a partir de uma ou mais características elétricas. Uma característica elétrica pode dizer respeito a uma grandeza física envolvida no funcionamento do dispositivo (e.g., potência ativa consumida), ou a um sinal obtido a partir da transformação matemática dos dados adquiridos (e.g., transformada de Fourier da forma de onda da corrente

consumida).

As características elétricas provenientes de dados adquiridos a uma frequência de amostragem superior a 1 Hz designam-se de características microscópicas. Por outro lado, as características obtidas a partir de dados amostrados a frequências de amostragem inferiores a 1 Hz designam-se de características macroscópicas.

Os métodos existentes para a monitorização das cargas existentes num edifício, tendo em conta o seguimento de uma abordagem não intrusiva, dividem-se em dois grupos. Esta divisão relaciona-se com a aquisição dos dados necessários, que pode realizar-se com tempos de amostragens superiores ou iguais a um segundo ou com frequências de amostragens superiores a 1 Hz. Os principais métodos pertencentes a cada um destes grupos serão analisados nos subcapítulos 2.1 e 2.2.

2.1 Métodos Assentes em Sistemas de Aquisição de Dados de Baixa Frequência

Os sistemas de aquisição de dados de baixa frequência utilizam equipamento de baixo custo. As informações fornecidas por estes sistemas são utilizadas na construção das assinaturas macroscópicas referentes aos dispositivos elétricos presentes no edifício. Este tipo de assinaturas, como o nome indica, é constituído apenas por características macroscópicas. A Energy Box da EDP é um exemplo destes sistemas. Nos próximos subcapítulos apresentam-se vários métodos de deteção não intrusiva de cargas que utilizam diferentes características macroscópicas.

2.1.1 Características Macroscópicas: Variações na Potência Ativa e na Potência Reativa

A temática da monitorização não intrusiva de cargas foi inicialmente abordada por George Hart na década de 1980 aquando da sua passagem, como investigador, pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). George Hart desenvolveu um sistema chamado *Nonintrusive Appliance Load Monitoring* (NALM) [9] capaz de monitorizar o comportamento dos vários dispositivos elétricos presentes numa habitação.

Em [9] foi proposto o agrupamento dos dispositivos presentes num edifício em quatro categorias distintas, categorias essas associadas a características de funcionamento dos dispositivos. Os dispositivos referentes à categoria número um caracterizam-se por estarem

continuamente ligados, apresentando um consumo energético constante (e.g., detetores de incêndio). Na categoria número dois encontram-se os dispositivos que apresentam um funcionamento do tipo *on/off* (e.g., torradeiras). Por sua vez, os dispositivos pertencentes à categoria número três possuem um funcionamento que pode ser descrito por uma máquina de estados finita, consumindo um determinado valor de potência ativa e reativa em cada estado (e.g., máquinas de lavar roupa). Finalmente, na categoria número quatro encontram-se os dispositivos cujo consumo energético varia continuamente ao longo do seu funcionamento de uma forma não periódica (e.g., ferramentas elétricas).

Neste sistema, o horário de funcionamento de cada dispositivo elétrico é determinado através da identificação dos instantes em que a potência ativa e a potência reativa comutam de um valor contante para outro também constante. Estes valores têm o nome de estados estacionários e as comutações entre dois diferentes estados têm o nome de evento. Neste caso, um evento é caracterizado pela magnitude e sinal da respectiva variação na potência ativa e na potência reativa. No caso de dispositivos pertencentes à segunda categoria, eventos com iguais magnitudes e sinais opostos permitem estabelecer os seus ciclos de funcionamento, bem como calcular a energia por eles consumida. Relativamente a dispositivos da terceira categoria, uma determinada sequência de eventos poderá indicar um ciclo de funcionamento dos mesmos.

O NALM pode ser configurado para operar em modo automático ou manual. A distinção entre as duas configurações assenta na forma como as assinaturas elétricas dos dispositivos são obtidas. O funcionamento do NALM em configuração automática permite obter as assinaturas elétricas dos dispositivos sem recorrer a qualquer intervenção humana. De forma distinta, o funcionamento do NALM em configuração manual necessita que os dispositivos sejam manualmente ligados e desligados, exclusivamente. Apesar da aquisição dos dados necessários ao funcionamento do NALM ocorrer apenas no ponto de entrada de energia elétrica na habitação em ambas as configurações, o funcionamento em configuração manual apresenta um maior nível de intrusão em comparação com a configuração automática, pois necessita da intervenção humana para a aquisição das assinaturas elétricas.

As várias etapas do algoritmo no qual o NALM se baseia encontram-se representadas na Figura 2.1. Primeiramente, os sinais de tensão e potência são adquiridos pelo sistema de aquisição de dados a um ritmo de uma amostra por segundo. O sinal de potência adquirido é normalizado

na segunda etapa utilizando a seguinte expressão:

$$P_{normalizada}(t) = \left[\frac{120}{V(t)} \right]^2 \times P(t) \quad (2.1)$$

Esta normalização tem como objetivo aumentar a robustez de NALM face a flutuações no fornecimento de energia elétrica ao edifício.

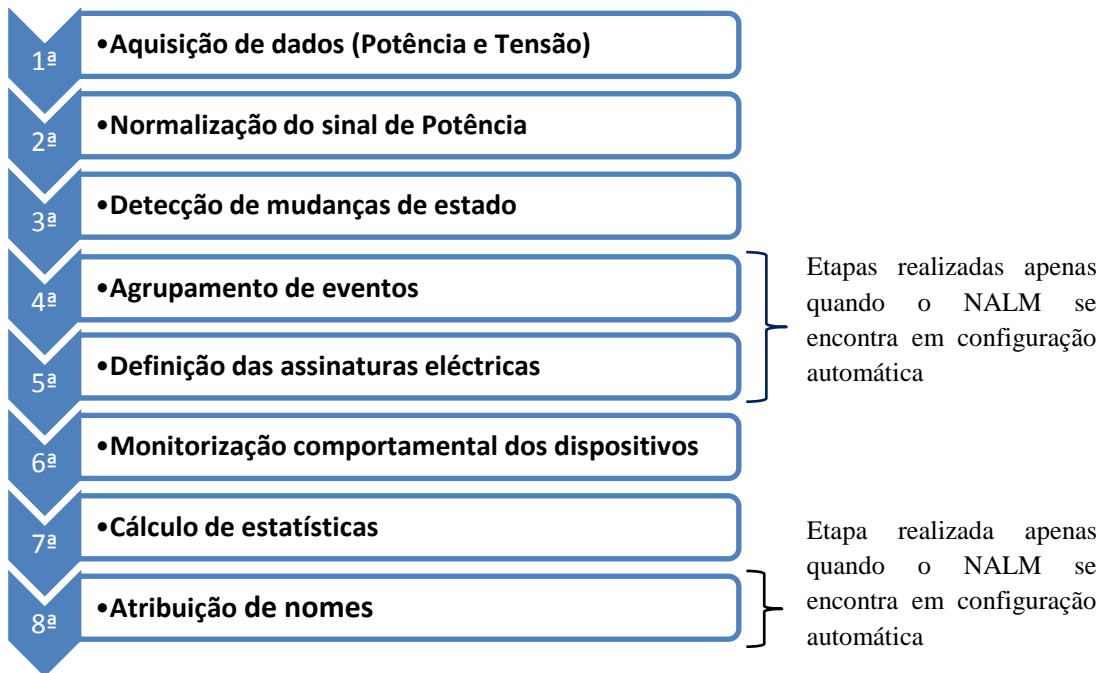


Figura 2.1 – Algoritmo do NALM.

Na terceira etapa, um algoritmo capaz de identificar as mudanças dos estados estacionários é utilizado, recebendo o sinal de potência anteriormente normalizado como entrada. A quarta e a quinta etapa têm como objetivo a definição das assinaturas dos dispositivos elétricos presentes na habitação, sendo apenas realizadas quando existe a necessidade de alterar ou criar a mesma para um determinado dispositivo. Concretamente, na quarta etapa, os eventos anteriormente identificados são agrupados num diagrama de assinaturas bidimensional onde um dos eixos se refere à potência ativa e o outro à potência reativa. Na Figura 2.2 apresenta-se um diagrama de assinaturas retirado de [9] para uma determinada série de eventos. Na quinta etapa, a assinatura de cada dispositivo da segunda categoria é definida através de dois grupos de eventos de igual magnitude e sinal oposto. Relativamente às assinaturas dos dispositivos da terceira categoria, estas são definidas por uma sequência de grupos de determinadas magnitudes e polaridades, cuja soma é nula.

Na sexta etapa, para cada evento detetado é determinada a assinatura à qual o mesmo mais

se adequa. Deste modo, os instantes em que cada dispositivo comuta de estado, bem como os respectivos incrementos na potência ativa e na potência reativa são determinados. Utilizando estas informações, na sétima etapa são calculadas várias estatísticas relacionadas com os consumos energéticos de cada dispositivo. Por último, no caso de funcionamento em configuração automática, o NALM procede à atribuição dos nomes dos dispositivos cuja comutação de estado foi detetada. Para tal o NALM recorre a informação anteriormente armazenada sobre o horário de funcionamento de vários dispositivos normalmente presentes numa habitação. De modo a determinar o nome dos dispositivos que provocaram os eventos detetados, o NALM associa o horário de funcionamento dos mesmos aos horários de funcionamento guardados. No entanto, nos testes efetuados apenas foi considerada a configuração manual.

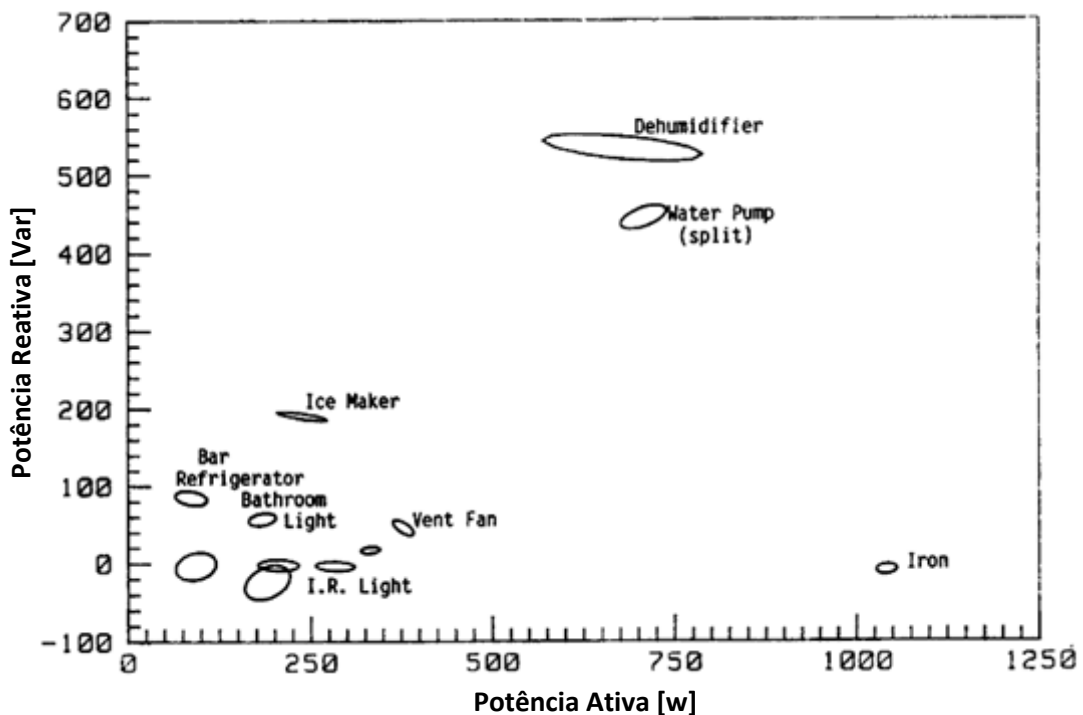


Figura 2.2 – Diagrama bidimensional de assinaturas (Plano ΔP - ΔQ), adaptado de [9].

Este sistema consegue detetar eficazmente as comutações de estado de dispositivos da segunda categoria. No entanto, nada se pode inferir sobre o desempenho do NALM no que diz respeito ao reconhecimento de dispositivos da terceira categoria, pois dispositivos deste tipo não foram contemplados nos testes efetuados em [9]. Relativamente aos dispositivos da primeira e da quarta categorias, estes não foram, de todo, considerados aquando do desenvolvimento deste sistema, o que limita a sua aplicabilidade.

O NALM apresenta ainda algumas limitações que podem influenciar o seu desempenho na detecção de dispositivos da segunda e terceira categorias. Nomeadamente, este sistema assume que todos os dispositivos apresentam diferentes consumos de potência ativa e de potência reativa, o que não se verifica em alguns casos. Esta limitação implica que o NALM possa atribuir a determinado dispositivo eventos provocados por outro dispositivo de igual potência.

No reconhecimento de dispositivos da segunda categoria, o NALM assume que a potência consumida por estes aquando da sua entrada em funcionamento é idêntica à consumida no momento em que estes são desligados. No entanto esta premissa pode ser prejudicial para a exatidão do NALM, no que diz respeito ao reconhecimento dos dispositivos responsáveis pelos eventos ocorridos, pois a potência consumida por alguns dispositivos elétricos pode sofrer variações na ordem dos 10% ao longo do seu funcionamento [10].

O facto de o NALM utilizar os valores estacionários da potência, tanto na fase da construção das assinaturas elétricas como no processo de reconhecimento das cargas responsáveis pelos eventos, representa uma limitação para este sistema. Esta limitação prende-se com a impossibilidade de estimar o tempo necessário para que a potência consumida por um determinado dispositivo convirja para um estado estacionário após a ocorrência de um evento. Por exemplo, nas experiências efetuadas em [11] verificou-se que dispositivos como ventiladores ou *chillers* podem levar vários minutos a atingir a sua velocidade de operação final, onde consomem um valor de potência constante. Assim, longos períodos de espera entre dois estados estacionários sucessivos podem originar a não detecção de dispositivos cujo funcionamento apresente rápidas sucessões de eventos. Por outro lado, períodos de espera relativamente curtos entre dois níveis constantes de potência podem originar a detecção de falsos eventos na 3ª etapa do algoritmo do NALM, provocados por dispositivos elétricos com uma lenta convergência para níveis constantes da potência consumida (e.g. ventiladores).

2.1.2 Características Macroscópicas: Variações na Potência Ativa e na Potência Reativa e Transitórios da Potência Ativa

Em [12], o grupo de investigadores do MIT expandiu o seu trabalho original com o objetivo de o aplicar a edifícios comerciais ou industriais. O tipo de equipamentos elétricos existente em edifícios deste tipo pode ser distinto do presente em edifícios habitacionais para os quais o sistema desenvolvido em [9] é aplicável.

As diferenças entre estas duas classes de edifícios prendem-se com os tipos de dispositivos

elétricos instalados e com as tecnologias de automação utilizadas. Relativamente às últimas, os edifícios comerciais ou indústrias são mais propensos a possuir sistemas de automação centralizados que enviam sinais de comando para os dispositivos elétricos existentes, de forma a controlá-los. Em [12] é proposto que os sistemas de detecção não intrusiva de cargas utilizem também estes sinais para detetar as comutações de estado dos dispositivos elétricos comandados pelo sistema de controlo, bem como para detetar falhas no funcionamento destes dispositivos.

No que respeita ao tipo de dispositivos elétricos instalados, os edifícios comerciais ou industriais são mais propensos a possuir dispositivos cujo consumo de energia elétrica varia suavemente ao longo do tempo (e.g. motores elétricos equipados com variadores de velocidade). Esta variação no consumo energético dos dispositivos, ao longo do seu funcionamento, dificulta a associação dos eventos gerados em cada comutação de estado. Para resolver este problema, o sistema desenvolvido em [12] utiliza também a forma do transitório da potência ativa, gerado a cada evento, (i.e. o andamento da potência ativa ao longo do tempo entre dois estados estacionários consecutivos) como uma característica macroscópica na construção das assinaturas elétricas dos dispositivos.

Os autores de [12] verificaram ainda que existem variações abruptas (i.e. impulsos) no consumo energético de alguns dispositivos que prejudicam o desempenho dos sistemas de detecção de carga (e.g., impulsos gerados por controladores de velocidade). Estes impulsos são vistos pelo sistema de detecção de cargas como eventos que não estão associados a qualquer dispositivo presente no edifício, fazendo com que exista um desperdício de recursos computacionais na sua análise. A solução encontrada em [12] para eliminar estes impulsos consiste na filtragem do sinal de potência, utilizando um filtro de mediana. O funcionamento de um filtro de mediana consiste na aplicação de uma janela deslizante ao vetor de entrada. Em cada instante, a saída do filtro diz respeito ao valor da mediana do sinal que se encontra dentro da janela.

2.1.3 Características Macroscópicas: Variações na Potência Ativa

O sistema de monitorização de cargas originalmente criado no MIT, bem como a sua extensão, utilizam dados referentes à potência ativa e à potência reativa. Os sistemas de aquisição de dados necessários para medir a potência reativa são dispendiosos, embora acarretando custos menos elevados que os originados por sistemas de aquisição de dados de alta frequência (i.e., frequência de amostragem superior a 1 Hz). Uma solução para baixar os custos de um sistema

de monitorização não intrusiva de cargas pode incidir na utilização apenas de dados referentes à potência ativa [13].

Em [14] é descrito um algoritmo capaz de extrair o diagrama de carga de cada dispositivo elétrico, cujo seguimento do seu comportamento é interessante, a partir do diagrama de cargas total do edifício. Este algoritmo é apenas aplicável na deteção de dispositivos elétricos cujo consumo energético é relativamente elevado (e.g. sistemas de ar-condicionado) usando, para tal, amostras referentes ao sinal de potência ativa adquiridas a um ritmo de uma amostra por cada quinze minutos. Para um determinado conjunto de dados, associados ao diagrama de cargas total da habitação, o algoritmo determina a ocorrência, instante e magnitude de todas as variações de elevada dimensão. De seguida, o algoritmo determina quais destas variações correspondem a determinado dispositivo elétrico e constrói o seu diagrama de carga.

A diferenciação entre variações de igual amplitude provocadas por diferentes dispositivos é feita recorrendo a informação comportamental sobre os utilizadores do edifício, tais como, o momento do dia em que a utilização do dispositivo em questão ocorreu, bem como o padrão e a duração da utilização. Estas informações podem conduzir a erros na diferenciação entre os respetivos dispositivos, pois existe um grau de incerteza dificilmente determinável associada à mesma. O facto de este algoritmo utilizar dados recolhidos a um ritmo de uma amostra por cada quinze minutos inibe, inevitavelmente, a sua aplicabilidade na monitorização de qualquer dispositivo cuja entrada e saída de funcionamento esteja espaçada temporalmente por menos de quinze minutos.

O método descrito em [15] também se baseia em dados referentes ao total da potência ativa consumida pelo edifício. Neste caso, os dados utilizados são recolhidos ao ritmo de uma amostra por cada dezasseis segundos. O método em questão utiliza algoritmos compostos por conjuntos de regras específicos para a deteção de cada dispositivo elétrico. Os algoritmos são empregues na análise do diagrama de cargas total da habitação com o objetivo de reconhecer e caracterizar o funcionamento dos dispositivos elétricos aos quais estão associados, utilizando para tal dados previamente adquiridos referentes à potência ativa consumida ao longo do tempo pelos dispositivos elétricos em questão.

Estes algoritmos são constituídos por três fases. Na primeira fase são detetados os eventos associados à entrada ou saída de funcionamento do dispositivo ao qual o algoritmo está associado, através da utilização da sua assinatura elétrica. Na fase seguinte o algoritmo extrai

o perfil de consumo do respectivo dispositivo (i.e., potência ativa consumida pelo dispositivo ao longo do tempo) a partir dos dados referentes ao consumo total do edifício. Por último, na terceira fase é calculada a energia elétrica consumida pelo dispositivo.

Relativamente ao desempenho deste método, foi estimada uma precisão de deteção na ordem dos 80%. No entanto, o extenso período de treino, de forma a capturar os comportamentos inerentes ao funcionamento de cada dispositivo, reduz a sua atratividade. Em [15] foi necessária uma semana de treino para capturar as informações necessárias de apenas dois dispositivos elétricos. Outra limitação assenta na existência de regras específicas para cada dispositivo.

2.2 Métodos Assentes em Sistemas de Aquisição de Dados de Alta Frequência

A maioria dos investigadores concorda que para se alcançar elevada precisão na deteção e monitorização dos dispositivos elétricos, as características microscópicas do sinal elétrico devem ser usadas em conjunto com as características macroscópicas do mesmo [13]. A extração das características microscópicas inerentes aos sinais elétricos implica a utilização de sistemas de aquisição de dados de alta frequência (i.e., aquisição de dados a uma frequência superior a 1 Hz).

Nos próximos subcapítulos apresentam-se vários métodos de monitorização não intrusiva de cargas que utilizam diferentes características microscópicas, bem como um método que utiliza características microscópicas e macroscópicas na construção das assinaturas elétricas.

2.2.1 Característica Microscópica: Harmónicas da Corrente Referente ao Transitório

O grupo de investigadores do MIT responsável por [11], desenvolveu em [16] um sistema de monitorização de cargas que utiliza como característica microscópica as envolventes espectrais da forma de onda da corrente referente ao regime transitório. As envolventes espectrais do sinal de corrente dizem respeito à média das suas componentes harmónicas ao longo de um determinado intervalo de tempo. Deste modo, as envolventes espectrais a_k e b_k do sinal de corrente $i(t)$, são dadas por (2.2) e (2.3), respetivamente, onde k diz respeito ao índice na harmónica em questão.

$$a_k(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \cos(k\omega\tau) d\tau \quad (2.2)$$

$$b_k(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \sin(k\omega\tau) d\tau \quad (2.3)$$

Na Figura 2.3 é possível visualizar as envolventes espectrais a_1 e b_1 da forma de onda da corrente exigida por um motor de indução aquando da sua entrada em funcionamento.

O reconhecimento dos dispositivos elétricos responsáveis pelos eventos detetados é realizado através da comparação das envolventes espectrais referentes ao sinal adquirido com as envolventes espectrais guardadas previamente na base de dados do sistema. Esta comparação é realizada através do método dos mínimos quadrados. O evento detetado é atribuído ao dispositivo elétrico cuja assinatura origina o menor valor de resíduo.

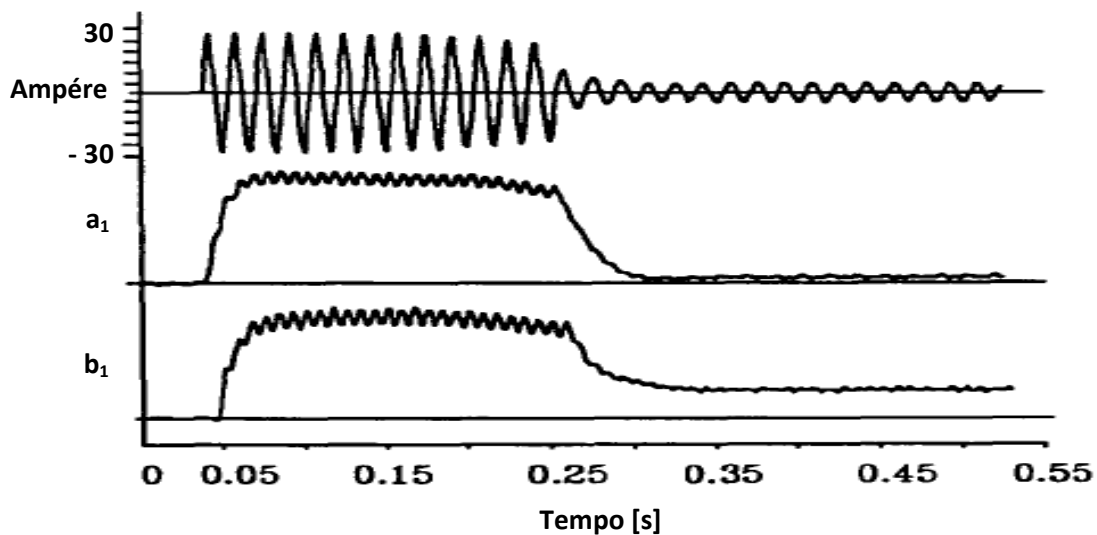


Figura 2.3 – Forma de onda da corrente consumida por um motor de indução e respetivas envolventes espectrais a_1 e b_1 , adaptado de [16].

O sistema em questão é capaz de monitorizar o comportamento de dispositivos pertencentes à segunda, terceira e quarta categorias. No entanto, a obtenção das assinaturas elétricas que são guardadas na base de dados do sistema é realizada à custa de uma apreciação humana das mesmas, o que teria de ser alterado para que este sistema pudesse ser utilizado por um utilizador comum. Em [16] não é fornecida informação sobre a precisão de reconhecimento do método subjacente ao sistema em questão, o que impossibilita a sua comparação com outros métodos.

2.2.2 Característica Microscópica: Harmónicas da Corrente Referente ao Estado Estacionário

A amplitude e fase das harmónicas presentes no sinal da corrente eléctrica consumida por alguns dispositivos varia desde o instante em que estes são ligados até ao momento em que o consumo de energia dos mesmos atinge o estado estacionário. A estabilização do consumo energético dos dispositivos implica que a amplitude e fase das harmónicas se apresente constante, podendo estas ser utilizadas como assinatura eléctrica dos dispositivos a que dizem respeito.

O sistema de deteção de cargas desenvolvido em [17] utiliza as harmónicas da corrente eléctrica consumida pelos dispositivos, aquando da sua operação em estado estacionário, como assinatura eléctrica. Estas assinaturas são utilizadas no treino de uma rede neuronal, na qual o sistema se baseia para reconhecer os dispositivos eléctricos responsáveis pelas variações no consumo energético do edifício. A rede neuronal em questão recebe 16 sinais de entrada. Estes sinais dizem respeito à amplitude das partes real e imaginária das 8 primeiras harmónicas ímpares de um sinal de corrente. Isto é, a entrada x_i é dada por (2.4) para $i = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$ e 15 e por (2.5) para $i = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$ e 16 . Em (2.4) e (2.5) I_n diz respeito à amplitude da n -ésima harmónica ímpar da corrente e ϕ_n à fase da n -ésima harmónica ímpar da corrente. Na Figura 2.4 encontram-se representados, a título de exemplo, os 16 sinais de entrada da rede neuronal para a corrente consumida por um monitor de um computador.

$$x_i = I_{\left(\frac{i+1}{2}\right)} \cos \phi_{\left(\frac{i+1}{2}\right)} \quad (2.4)$$

$$x_i = I_{\left(\frac{i}{2}\right)} \cos \phi_{\left(\frac{i}{2}\right)} \quad (2.5)$$

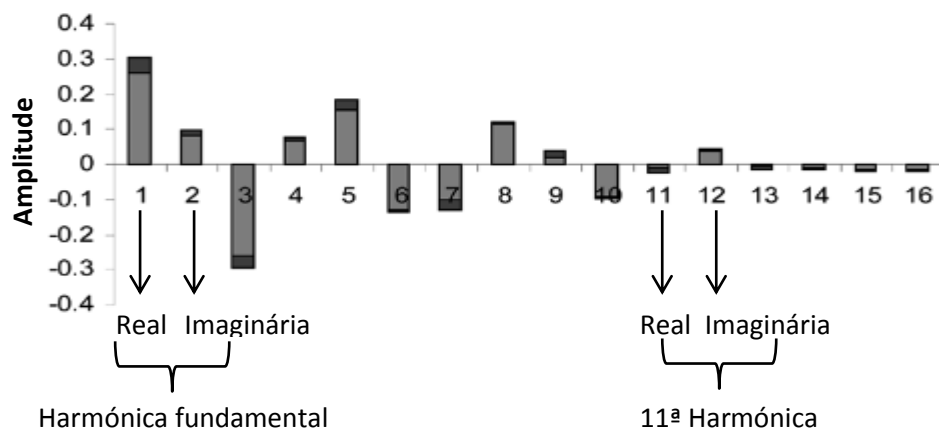


Figura 2.4 – Amplitudes das partes reais e imaginárias das harmónicas referentes à corrente consumida por um monitor de um computador, adaptado de [17].

A rede neuronal é treinada para cada uma das 2^N combinações possíveis de funcionamento dos N dispositivos que apresentam um funcionamento *on/off*. Isto é, para cada uma das 2^N combinações, a rede neuronal recebe como entrada as partes reais e imaginárias das 8 primeiras harmónicas ímpares da corrente consumida pelos N dispositivos presentes no edifício. Relativamente à saída da rede neuronal, esta é composta por N sinais binários que representam o estado de cada dispositivo elétrico para cada combinação.

O sistema desenvolvido em [17] apresentou uma precisão de reconhecimento de 80 a 90 % para os vários dispositivos presentes no edifício aquando dos testes efetuados. No entanto, o facto de a rede neuronal ter de ser treinada com as 2^N combinações de funcionamentos dos N dispositivos presentes no edifício torna este sistema dificilmente aplicável numa habitação, onde habitualmente existem 30 a 50 dispositivos elétricos [13]. Outra desvantagem reside no facto de este sistema apenas ser aplicável no reconhecimento de dispositivos pertencentes à segunda categoria.

2.2.3 Características Microscópicas: Transformada de Fourier do Ruído Existente no Sinal de Tensão

Em [18], S. Patel et al. desenvolveram um sistema de reconhecimento de cargas, com o nome de *ElectriSense*, baseado numa característica elétrica completamente diferente das apresentadas anteriormente. O *ElectriSense* utiliza a transformada de Fourier do ruído existente no sinal de tensão como característica microscópica. Assim, ao contrário do que acontece com os sistemas de deteção de cargas apresentados anteriormente, os dados podem ser adquiridos em qualquer tomada elétrica do edifício, pois o ruído existente no sinal de tensão está presente em toda a instalação.

O *ElectriSense* assenta no facto de a maioria dos dispositivos eletrónicos modernos servirem-se de fontes de alimentação comutadas, caracterizadas por impor ruído de alta frequência no sinal de tensão do respetivo edifício. A este ruído é aplicada a transformada de Fourier. Na Figura 2.5 a) apresenta-se o espectro de amplitude do ruído existente no sinal de tensão num determinado edifício com alguns dispositivos elétricos ligados. A ocorrência de um evento provoca alterações neste espectro. A partir da Figura 2.5 b) é possível visualizar os efeitos destas alterações no espectro do sinal de tensão. Estes dois sinais estão na base de todo o processo de deteção de cargas do *ElectriSense*.

No início do seu funcionamento, o *ElectriSense* regista o espectro de amplitude referente ao ruído base existente no sinal de tensão. Após esta inicialização do espectro de ruído base, o

o sistema continua a adquirir o sinal de ruído procedendo ao cálculo do seu espectro de amplitude. Após a deteção de um evento, o ElectriSense subtrai ao novo espectro de amplitude, onde o evento em questão foi detetado, o espectro base anteriormente determinado. O resultado desta operação diz respeito ao espectro de amplitude do sinal de ruído referente ao dispositivo eletrónico responsável pelo evento detetado, Figura 2.5 c). Seguidamente, ao espectro de ruído obtido é aplicada uma função gaussiana que se enquadre na envolvente do mesmo, sendo esta caracterizada por uma determinada amplitude, média e variância. Estes últimos três parâmetros, referentes à função gaussiana, são guardados e utilizados para reconhecer os dispositivos responsáveis pelos eventos detetados.

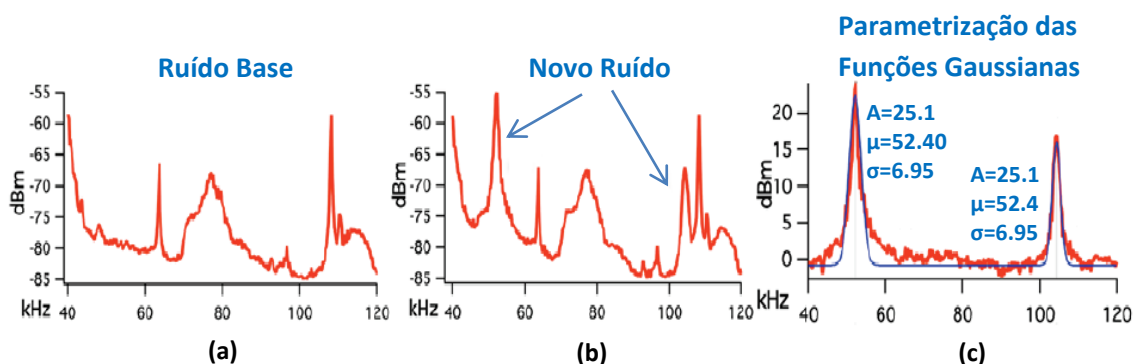


Figura 2.5 – Ruído existente no sinal de tensão. a) Espectro de amplitude do ruído de fundo. b) Espectro de amplitude do ruído quando um determinado dispositivo é ligado. c) Funções gaussianas resultantes. Adaptado de [18].

O ElectriSense é capaz de atingir valores de precisão de reconhecimento da ordem dos 93.8%. Relativamente à característica microscópica utilizada, os autores de [18] afirmam que as assinaturas resultantes permitem distinguir diferentes tipos de dispositivos elétricos, bem como dispositivos com funcionamentos semelhantes. Outro aspeto positivo do ElectriSense prende-se com a maior facilidade de instalação, pois este pode ser instalado em qualquer tomada elétrica do edifício.

Os autores de [18] afirmam que as assinaturas elétricas dos dispositivos presentes na habitação podem depender da localização dos mesmos no edifício. Esta dependência espacial poderá diminuir a capacidade de reconhecimento do sistema aquando da conexão dos dispositivos a tomadas elétricas diferentes daquela onde se encontravam no momento em que as suas assinaturas elétricas foram obtidas. O facto de nem todos os novos dispositivos eletrónicos possuírem fontes de alimentação comutadas também diminui a aplicabilidade

deste sistema de detecção de cargas. Outra limitação do ElectriSense diz respeito à contribuição de dispositivos elétricos instalados em edifícios vizinhos para o ruído existente na instalação onde o sistema está instalado. Este problema poderá ser agravado caso o sistema em questão esteja instalado num apartamento. Por último, o ElectriSense não é capaz de calcular os consumos energéticos de cada um dos dispositivos presentes na habitação, conseguindo apenas determinar os instantes dos eventos que estes causaram.

2.2.4 Característica Microscópica: Propriedades Geométricas das Curvas V-I

Em [19] foi elaborado um estudo sobre a utilidade das curvas V-I na construção de assinaturas microscópicas a serem utilizadas por sistemas de monitorização de cargas. As curvas V-I são construídas a partir dos sinais de tensão e corrente obtidos ao longo de um ciclo quando o consumo energético dos respetivos dispositivos elétricos se encontra num estado estacionário. Na Figura 2.6 encontram-se representadas três curvas deste tipo, diferenciando-se entre si pelo desfasamento existente entre o sinal de tensão e o sinal de corrente. Os autores de [19] definiram vários parâmetros para caracterizar as curvas V-I (e.g., o valor de pico representado na Figura 2.6 c).

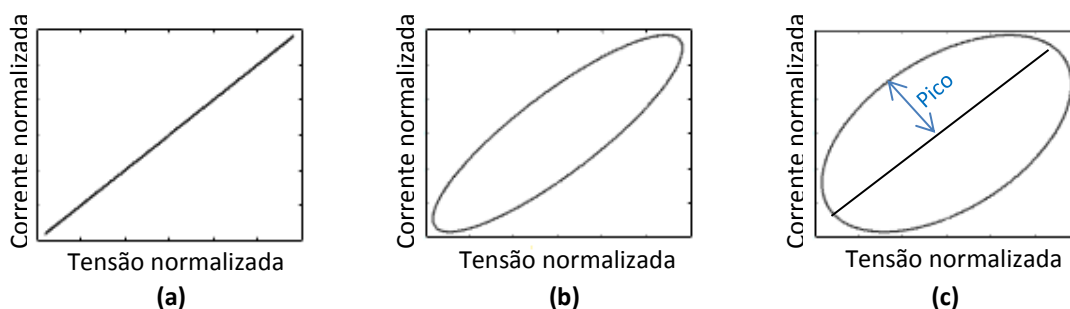


Figura 2.6 – Curvas V-I. a) Inexistência de desfasamento. b) Desfasamento de 30°. c) Desfasamento de 60°, adaptado de [19].

Apesar dos resultados obtidos em [19] indicarem que as curvas V-I podem ser utilizadas na construção de assinaturas elétricas, o grupo de investigadores responsável pela investigação não desenvolveu nenhum sistema de monitorização de cargas baseado nesta característica microscópica.

2.2.5 Característica Microscópica: Forma de Onda do Sinal de Corrente

Em [20] é proposto um método de monitorização de cargas que utiliza como característica microscópica a forma de onda da corrente. Tendo em conta que a corrente total medida no ponto de entrada de energia elétrica no edifício corresponde ao somatório da corrente

consumida por todos os dispositivos presentes no edifício, este método utiliza uma técnica de otimização, com o nome de *Integer Programming*, para obter a combinação dos dispositivos em funcionamento responsáveis pela corrente total observada. Para tal, são utilizadas as formas de onda da corrente consumida por cada dispositivo presente no edifício, previamente guardadas numa base de dados.

Apesar da precisão de reconhecimento apresentada em [20] variar entre 62,7% e 96,8%, este método apresenta várias limitações. A primeira prende-se com a incapacidade deste método para distinguir dispositivos que apresentam sinais de corrente semelhantes. A segunda diz respeito à sua incapacidade para reconhecer corretamente os dispositivos responsáveis por uma forma de onda quando diferentes combinações de funcionamento dos dispositivos presentes na base de dados originam formas de onda semelhantes. Na Figura 2.7 estão representadas duas formas de onda semelhantes referentes a duas combinações de dispositivos completamente diferentes. A Figura 2.7 a) diz respeito à forma de onda da corrente consumida por uma torradeira e por um secador a funcionar no modo frio. Na Figura 2.7 b) apresenta-se a forma de onda da corrente consumida pelo mesmo secador operando no modo quente.

Note-se que cada modo de funcionamento é tratado como um dispositivo elétrico individual. Por exemplo, um secador com 5 modos de funcionamento seria visto como 5 dispositivos elétricos diferentes. Nos casos concretos ilustrados na Figura 2.7, o método em questão não foi capaz de reconhecer corretamente os dispositivos que se encontravam em funcionamento. Por último, apenas dispositivos da segunda categoria podem ser reconhecidos por este método, reduzindo a sua aplicabilidade a instalações elétricas reais.

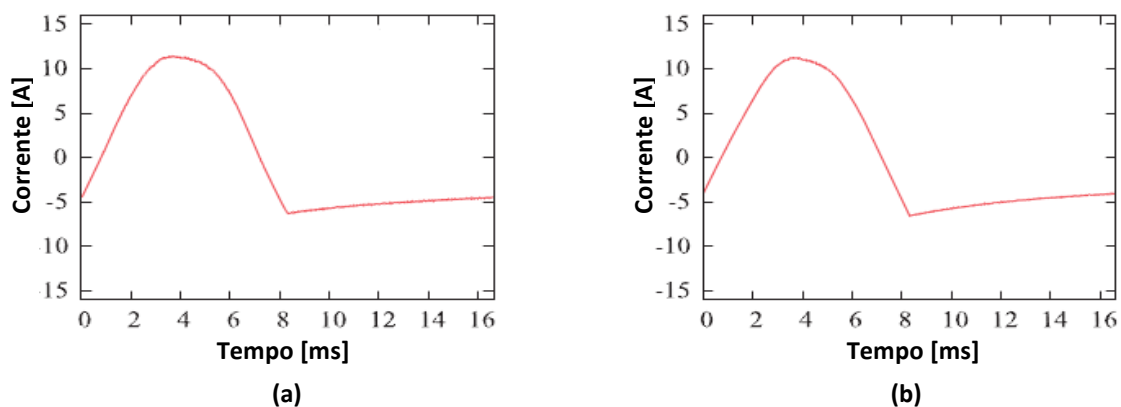


Figura 2.7 – Forma de onda do sinal de corrente. a) Torradeira e secador a funcionar no modo frio. b) Secador a funcionar no modo quente. Adaptado de [20].

2.2.6 Assinaturas Elétricas Compostas por Várias Características Microscópicas

O método desenvolvido em [21,22] utiliza simultaneamente sete características na construção das assinaturas elétricas dos dispositivos, seis de carácter microscópico e uma de carácter macroscópico. Relativamente às primeiras, as características utilizadas são as seguintes: forma de onda do sinal de corrente, harmónicas do sinal de corrente, forma de onda da admitância instantânea, forma de onda da potência instantânea, valores próprios obtidos a partir da forma de onda da corrente e forma de onda do transitório da potência ativa. As quatro últimas características representam uma novidade, podendo a sua utilização melhorar a precisão do processo de reconhecimento de cargas.

As primeiras cinco características microscópicas são obtidas a partir de sinais (i.e., corrente e/ou tensão) com a duração de um ciclo, estando o respetivo dispositivo eléctrico a consumir um valor constante de energia. A última característica microscópica (i.e., a forma de onda do transitório da potência ativa) é calculada de forma diferente. Cada ponto desta característica é obtido a partir dos sinais de tensão e corrente referentes a meio ciclo, quando a energia consumida pelo dispositivo eléctrico se encontra num estado transitório. Relativamente à característica macroscópica utilizada, esta diz respeito às variações da potência ativa e reativa associadas a um determinado evento.

A obtenção das referidas características é realizada sempre que surge um novo evento. Com o objetivo de obter a assinatura eléctrica do dispositivo responsável pelo evento detetado, as características que a compõem, à exceção da forma de onda do transitório da potência ativa, dizem respeito à diferença entre as mesmas antes e após o evento. Deste modo, admitindo que entre cada evento apenas um dispositivo eléctrico comuta de estado, as assinaturas eléctricas resultantes pertencem apenas a um dispositivo.

Este método utiliza uma base de dados na qual estão gravadas as assinaturas de todos os dispositivos eléctricos presentes no edifício. Assim, para cada evento detetado, este método compara a assinatura resultante do mesmo com as assinaturas presentes na base de dados, de forma a reconhecer qual o dispositivo responsável pela variação energética. Para resolver este problema, os autores de [21,22] propõem três diferentes tipos de algoritmos de otimização e dois tipos de rede neuronais. No entanto, nos testes efetuados, apenas um algoritmo de otimização e um tipo de rede neuronal foram utilizados.

Outra novidade introduzida por este método consiste na utilização simultânea dos resultados

obtidos pelo algoritmo de otimização e pela rede neuronal de forma a aumentar a sua precisão de reconhecimento, utilizando para isso o *Committee Decision Mechanism*. Em simulação este método obteve valores máximos de precisão de reconhecimento de 92,7 %. As referidas novidades podem melhorar a precisão de reconhecimento de cargas, no entanto é necessário comprovar os benefícios resultantes da sua utilização através de testes em instalações elétricas reais. A partir de [21,22] é possível inferir que o método em questão se destina exclusivamente ao reconhecimento de dispositivos da segunda categoria, reduzindo assim a sua aplicabilidade numa instalação real, onde existem dispositivos das quatro categorias.

Capítulo 3 – Análise em Tempo-Frequência

A Transformada de Fourier (TF) é uma operação matemática que permite representar no domínio da frequência um sinal temporal, $g(t)$. Esta operação é dada pela seguinte expressão [23]:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (3.1)$$

A partir da TF de um determinado sinal, obtida através de (3.1), é possível obter o seu equivalente temporal através de (3.2).

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3.2)$$

Para que se possa aplicar a TF a um sinal temporal, $g(t)$, é suficiente que o mesmo cumpra as condições de *Dirichlet*, presentes nos seguintes pontos [24]:

1. A função $g(t)$ tem valores únicos, um número finito de máximos e mínimos e um número finito de discontinuidades em qualquer intervalo finito de tempo
2. A função $g(t)$ é absolutamente integrável, isto é,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)| dt < \infty. \quad (3.3)$$

As condições de *Dirichlet* não são estritamente necessárias, mas suficientes para haver transformada de Fourier de um sinal. Estas condições incluem todos os sinais de energia finita, para os quais se tem

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt < \infty. \quad (3.4)$$

A Transformada de Fourier identifica as componentes harmónicas presentes num sinal, no entanto esta operação matemática não fornece informação suficiente para a determinação dos instantes em que tais componentes surgem. No caso de sinais não estacionários (i.e., sinais cujas propriedades variam ao longo do tempo), esta característica da TF pode apresentar-se como uma desvantagem. No próximo parágrafo encontra-se um exemplo onde se podem visualizar os seus efeitos.

Nas Figuras 3.1 a) e 3.1 b) encontram-se representados os andamentos temporais de duas sinusoides cujas frequências variam linearmente com o tempo, $g_1(t)$ e $g_2(t)$, respetivamente. A

frequência da senoide referente à Figura 3.1 a) varia de 0 a 10 Hz. Por sua vez, e em contraponto com a Figura 3.1 a), a senoide cujo andamento temporal se apresenta na Figura 3.1 b) exibe uma variação na sua frequência de 10 a 0 Hz. O espectro de amplitude do sinal referente à Figura 3.1 a) encontra-se representado na figura 3.1 c). Relativamente à senoide cuja frequência decresce com o tempo, o seu espectro de amplitude apresenta-se na figura 3.1 d). Analisando as figuras supracitadas é possível inferir que apesar dos sinais em estudo apresentarem andamentos temporais distintos, os seus espectros de amplitude são idênticos.

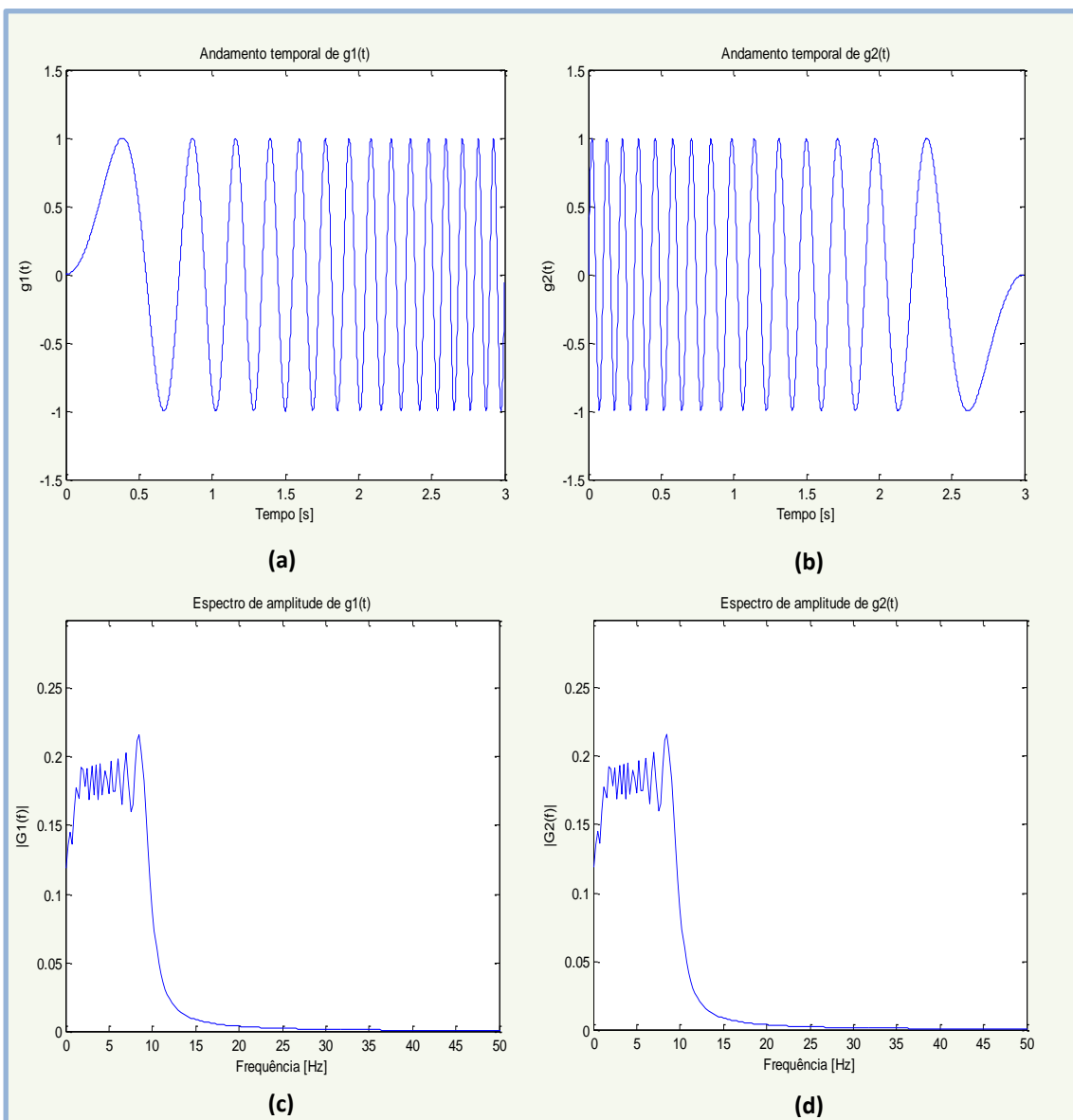


Figura 3.1 - Resultados obtidos com a transformada de Fourier. (a) Andamento temporal de $g_1(t)$. (b) Andamento temporal de $g_2(t)$. (c) Espectro de amplitude de $g_1(t)$. (d) Espectro de amplitude de $g_2(t)$.

A resolução dos problemas da TF relacionados com a falta de informação temporal assenta na análise em tempo-frequência dos sinais, pois este tipo de análise permite localizar temporalmente as várias componentes harmónicas presentes nos sinais. As representações tempo-frequência podem ser obtidas por diversos métodos, entre os quais se encontram a transformada de Fourier por janelas (STFT – *Short Time Fourier Transform*), a transformada *wavelet* e a transformada S.

3.1 – Transformada de Fourier por Janelas

A transformada de Fourier por janelas (STFT) [25] resolve as limitações da transformada de Fourier associadas à localização temporal das componentes harmónicas do sinal através da multiplicação deste por uma janela deslizante, calculando a transformada de Fourier do sinal resultante. Matematicamente, a transformada de Fourier por janelas de uma função $h(t)$ é dada pela seguinte expressão:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

onde $w(t)$ diz respeito à função janela arbitrariamente escolhida, cuja localização temporal é dada por τ . A janela deslizante presente em (3.5) permite localizar temporalmente o espectro resultante da sua multiplicação pela função $h(t)$, que tem o nome de espectro local.

A janela $w(t)$ exhibe largura constante para todos os instantes de tempo. Esta característica da janela deslizante implica que a resolução temporal e a nível da frequência sejam constantes. Uma boa resolução temporal permite identificar os instantes em que as várias componentes harmónicas do sinal surgem, e pode ser alcançada através de janelas deslizantes de reduzida largura. Por outro lado, janelas mais largas permitem distinguir as componentes harmónicas do sinal que se encontram próximas. Assim, um aumento da resolução temporal origina uma diminuição da resolução a nível da frequência e vice-versa. Esta característica está relacionada com o princípio da incerteza no campo do processamento de sinais, que foi primeiramente abordado por Gabor em [26].

Na Figura 3.2 apresenta-se um sinal, $h(t)$, com a duração de 0,5 segundos amostrado a uma frequência de 1024 Hz, que contém três diferentes componentes harmónicas. Nos primeiros 0,25 segundos o sinal exhibe uma frequência de 50 Hz passando, na sua segunda metade, a exhibir uma frequência de 150 Hz. Além destas duas componentes harmónicas, entre os 0,125 e os 0,2 segundos, é adicionada uma senoide com uma amplitude igual a 0,5 unidades e com uma frequência de 250 Hz. A STFT deste sinal encontra-se representada na Figura 3.3, onde se

utilizaram janelas deslizantes de *Hamming* com diferentes durações. Na STFT apresentada na Figura 3.3 a) utilizou-se uma janela com 32 pontos. Relativamente à janela utilizada na transformada presente na Figura 3.3 b), esta tem uma largura de 128 pontos. Analisando estas figuras, verifica-se que, como esperado, a janela de menor largura origina uma melhor resolução temporal, em comparação com a janela de maior largura. No entanto, existe uma melhor resolução a nível da frequência aquando da utilização de uma janela deslizante mais larga.

Posto isto, para se alcançar uma boa resolução em tempo e frequência, é necessário calcular duas STFT, utilizando janelas de diferentes larguras. A fixa resolução da STFT apresenta-se como uma desvantagem em relação à transformada Wavelet e à transformada S, que exibem uma resolução dependente da frequência.

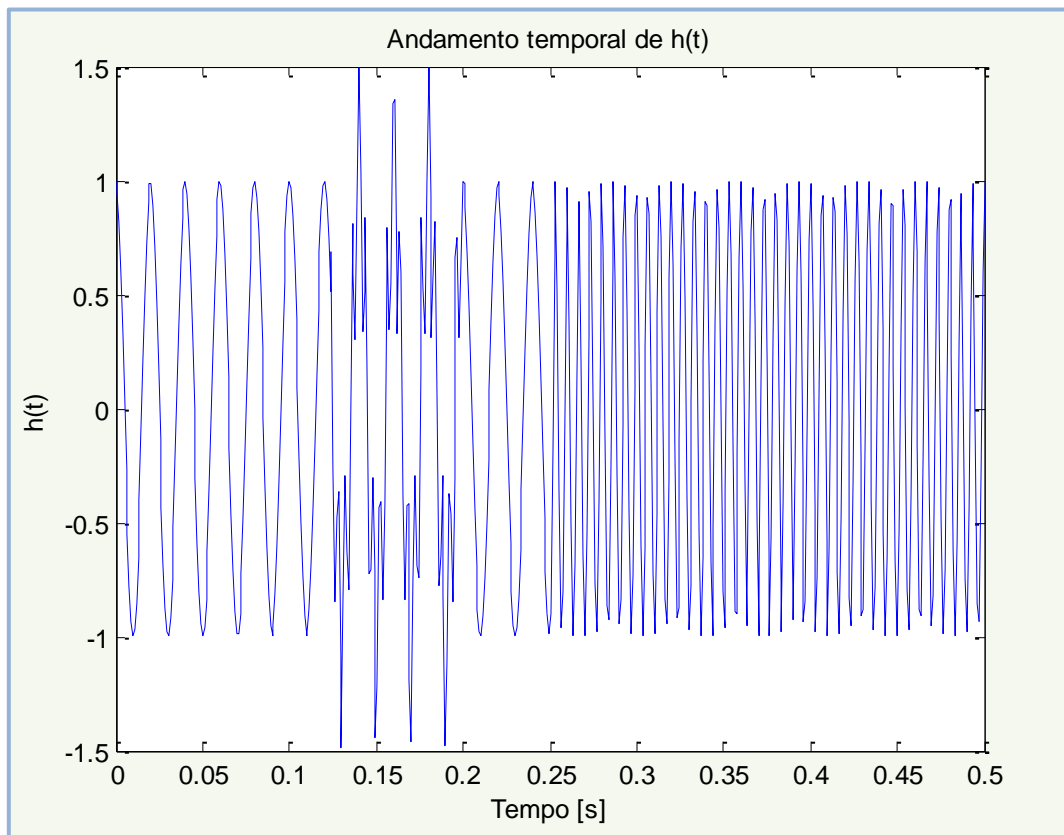
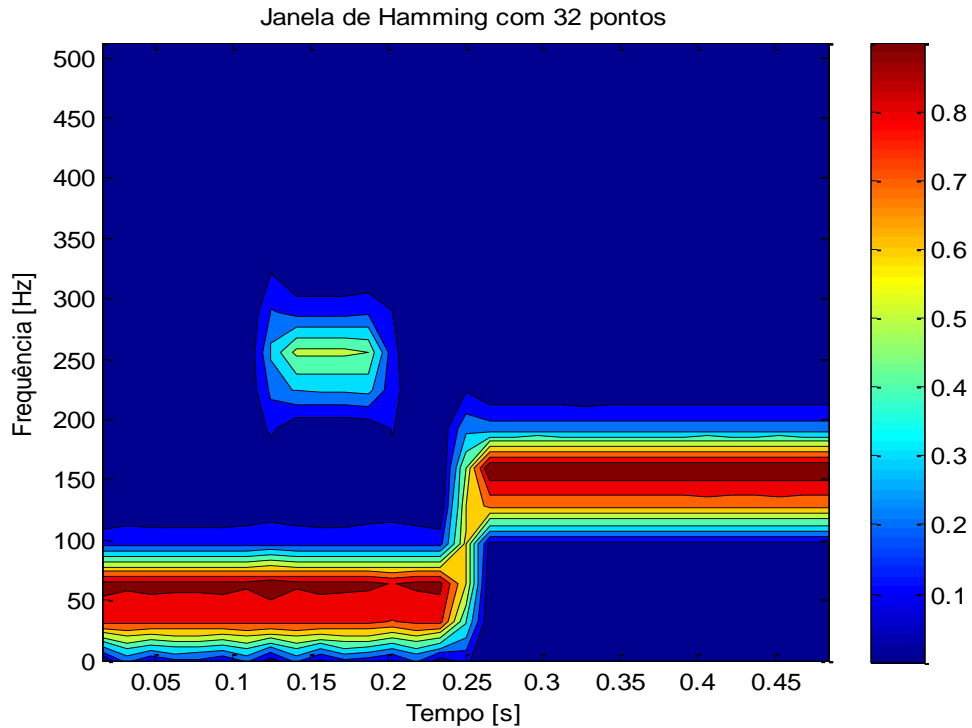
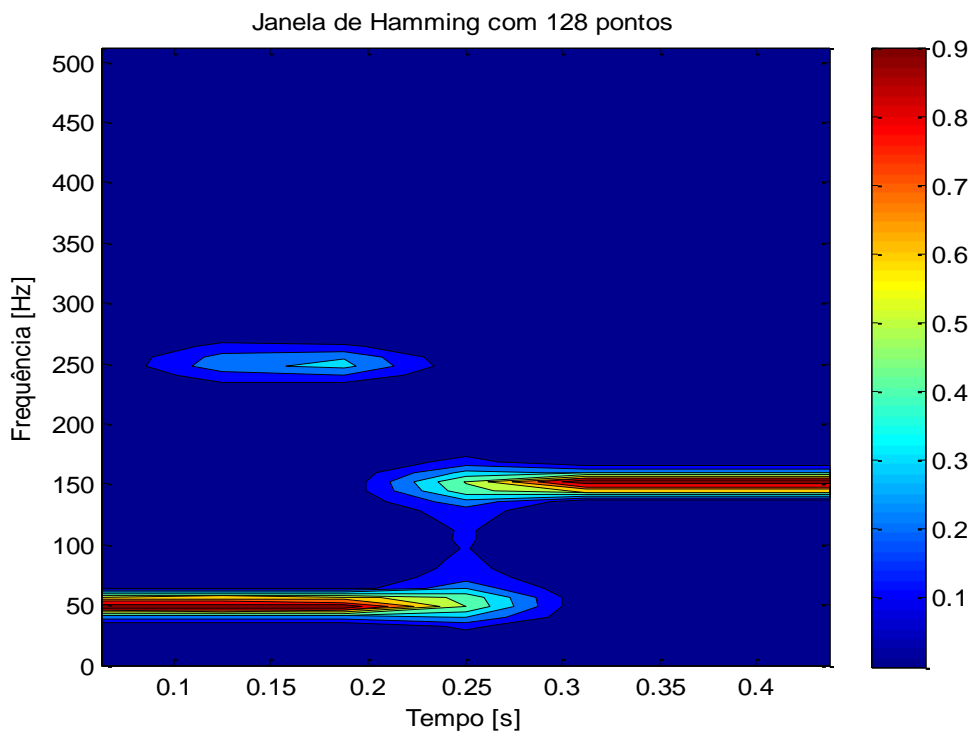


Figura 3.2 – Andamento temporal de um sinal com três diferentes componentes harmónicas.



(a)



(b)

Figura 3.3 – Resultados obtidos com a transformada de Fourier por janelas. a) STFT calculada recorrendo a uma janela de Hamming com 32 pontos. b) STFT calculada recorrendo a uma janela de Hamming com 128 pontos.

3.2 – Transformada Wavelet

A transformada de Wavelet foi introduzida por Goupillaud, Grossmann e Morlet em 1984 [27]. A ideia que fundamenta esta transformada caracteriza-se pela decomposição de qualquer sinal temporal, $h(t)$, numa série de compressões/dilatações e translações de uma Wavelet mãe, $w(t)$. A transformada contínua de Wavelet é dada pela seguinte expressão [28]:

$$F(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) w^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.6)$$

onde o asterisco representa o complexo conjugado. O resultado da transformada de Wavelet diz respeito a uma função bidimensional dos fatores de escala e dilatação, a e b , respetivamente.

A função $w(t)$ tem média nula e pode ser real ou complexa [29]. Na Figura 3.4 apresenta-se a parte real de uma das Wavelet mãe frequentemente encontrada na literatura, nomeadamente a Wavelet de Morlet. Esta função é dada pela seguinte expressão [30]:

$$\psi(t) = \left(\frac{\beta}{\sqrt{2\pi}} e^{-\beta^2 t^2 / 2} \right) \cos(\pi t). \quad (3.7)$$

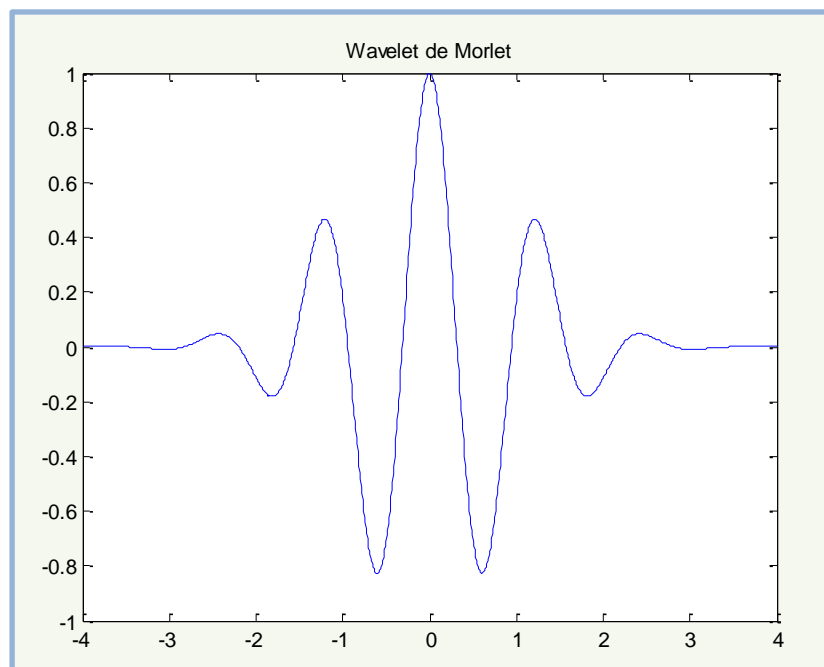


Figura 3.4 – Parte real da Wavelet de Morlet.

Em (3.7), o termo entre parêntesis representa uma janela Gaussiana associada à função densidade de probabilidade da distribuição normal $N(\mu, \sigma)$, com $\mu = 0$ e $\frac{1}{\sigma} = \beta$. As versões transladadas e comprimidas/dilatadas de $\psi(t)$ são dadas por (3.8).

$$\psi_{a,b}(t) = \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = e^{\left(-\frac{\beta^2(t-b)^2}{2a^2}\right)} \cos\left(\frac{\pi(t-b)}{a}\right) \quad (3.8)$$

A multiplicação de cada uma das versões transladas e comprimidas/dilatadas de $w(t)$ com o sinal $h(t)$ resulta nos coeficientes, $C(a, b)$, da transformada Wavelet. A magnitude destes coeficientes será tanto maior quanto maior for a semelhança entre a versão transladada e comprimidas/dilatadas de $w(t)$ e a função $h(t)$.

A função $w(t)$, presente em (3.6), pode ser vista como uma janela deslizante que contrai/expande ao longo de todo o sinal $h(t)$, em função do factor de escala. Quando o fator de escala, a , tem um valor baixo, a wavelet apresenta uma forma contraída da wavelet mãe. Nestas condições, se o sinal temporal em análise apresentar rápidas variações, estas serão traduzidas pelos coeficientes da transformada. Por outro lado, quando o fator de escala apresenta um valor elevado, a wavelet exibe uma forma dilatada da wavelet mãe. Neste caso, os coeficientes da transformada traduziram as variações mais lentas do sinal. O fator de escala encontra-se relacionado com a frequência da wavelet que parametriza, sendo inversamente proporcional a esta.

Deste modo, ao contrário da STFT, a transformada Wavelet utiliza uma janela deslizante capaz de se comprimir/expandir ao longo do sinal em análise, resultando numa representação tempo-frequência, cuja resolução depende da própria frequência.

3.3 – Transformada S

A transformada S (TS) produz uma representação tempo-frequência de um sinal temporal, tendo sido publicada em 1996 [31]. A transformada S contínua de uma função $h(t)$ é dada pela seguinte expressão:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} dt. \quad (3.9)$$

A função unidimensional, $S(\tau, f_0)$, obtida a partir de (3.9), tem o nome de Voz. Esta função mostra o andamento temporal da amplitude e fase do sinal para a frequência f_0 . Por outro lado, a função $S(\tau_0, f)$, também obtida a partir de (3.9), tem o nome de Espectro local e

mostra as componentes harmónicas do sinal no instante τ_0 [31].

3.3.1 – Obtenção da Transformada S a partir da STFT

O espectro resultante da multiplicação de um sinal temporal, $h(t)$, por uma janela deslizante $g(t)$ é dada por (3.10). Se a função $g(t)$ for uma janela deslizante de largura fixa que se multiplica, ponto por ponto, por todo o sinal $h(t)$, então (3.10) passa a referir-se à STFT de $h(t)$ (3.5).

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)g(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.10)$$

A transformada S de uma função $h(t)$ pode ser obtida a partir de (3.10), se $g(t)$ consistir numa função gaussiana normalizada (3.11).

$$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11)$$

Na transformada S, (3.11) é uma função dos fatores de translação e dilatação, τ e σ , respectivamente, resultando em (3.12). O facto de (3.12) exprimir a transformada S de um sinal como uma função de três variáveis dificulta a sua utilização como uma ferramenta para a análise de sinais. No entanto, na transformada S, a largura da janela é inversamente proporcional à frequência (3.13). Assim, (3.9) resulta da substituição de (3.13) em (3.12).

$$S(\tau, f, \sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2}{2\sigma^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.12)$$

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|} \quad (3.13)$$

A vantagem da transformada S sobre a STFT reside no facto de a sua resolução depender da frequência, apresentando boa resolução temporal a altas frequências e boa resolução em frequência a baixas frequências. Na Figura 3.5 encontra-se representado um sinal temporal e as respetivas transformadas S e STFT. O sinal temporal, apresentado na Figura 3.5 a), consiste na soma de duas sinusoides que variam a sua frequência ao longo do tempo com outras duas sinusoides de maior frequência que exibem curta duração temporal. Os resultados obtidos mostram que os quatro elementos deste sinal foram corretamente detetados pela transformada S, Figura 3.5 b). Relativamente à STFT, esta apenas detetou corretamente as duas sinusoides cujas frequências variam temporalmente, Figura 3.5 c). Com a janela utilizada, a STFT não apresenta uma resolução temporal suficientemente boa para distinguir as duas sinusoides de curta duração e alta frequência, detetando-as como uma só componente a uma

menor frequência que a do sinal original [31].

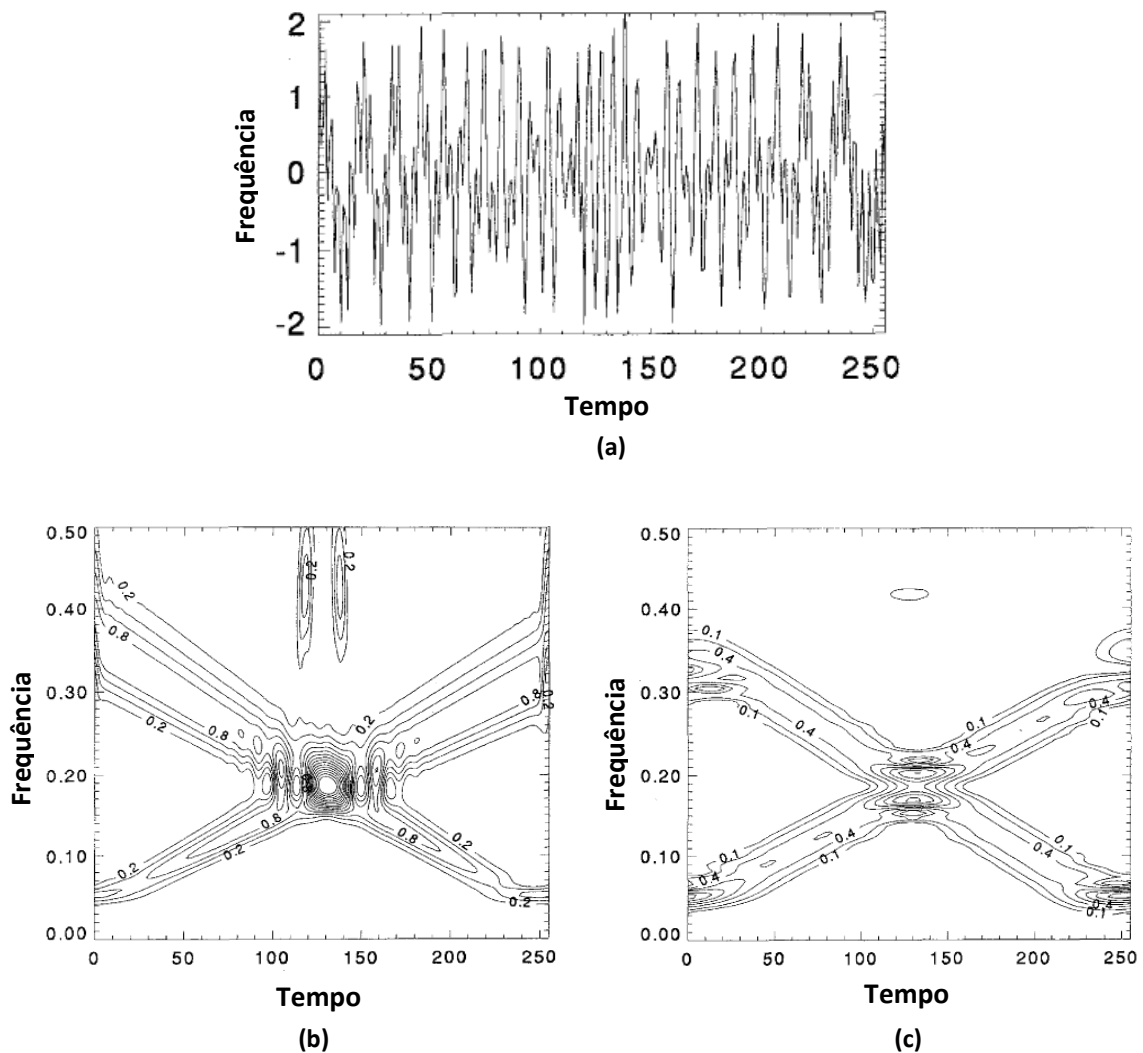


Figura 3.5 - Comparação entre a transformada S e a STFT. (a) Andamento temporal do sinal em

$$\text{análise, } h[0:255] = \cos\left(2\pi\left(10 + \frac{t}{7}\right) \cdot \frac{t}{256}\right) + \cos\left(2\pi\left(\frac{256}{2.8} - \frac{t}{6}\right) \cdot \frac{t}{256}\right),$$

$$h[114:122] = h[114:122] + \cos(2\pi t \cdot 0.42), \quad h[134:142] = h[134:142] + \cos(2\pi t \cdot 0.42).$$

(b) Amplitude da transformada S (c) Amplitude da STFT. Adaptado de [31].

3.3.2 – Obtenção da Transformada S a partir da Transformada Wavelet

A transformada S de uma função $h(t)$ pode ser definida como uma transformada wavelet com uma wavelet mãe específica, multiplicada pelo fator de fase (3.14) [31].

$$S(\tau, f) = e^{j2\pi f\tau} W(\tau, d) \quad (3.14)$$

A wavelet mãe presente em (3.14) é definida pela seguinte expressão:

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} \quad (3.15)$$

onde o fator de dilatação d diz respeito ao inverso da frequência. A wavelet descrita através de (3.15) não apresenta média nula, impossibilitando que (3.14) possa ser definida como uma transformada wavelet [31].

A partir de (3.14) é possível verificar que a transformada S é composta por dois termos. Estes permitem localizar o instante e a frequência a que se referem os coeficientes da transformada S . A localização temporal é realizada pela janela Gaussiana dada por (3.15), enquanto a seleção da frequência é efetuada através do termo $e^{j2\pi f\tau}$.

No cálculo da transformada S , apenas a janela Gaussiana é transladada, mantendo-se estacionário o termo $e^{j2\pi f\tau}$. Assim, ao não transladar o termo $e^{j2\pi f\tau}$, a transformada S exibe informação de fase referenciada ao instante $t = 0$, à semelhança do que acontece com a transformada de Fourier. O mesmo não acontece com a transformada wavelet, onde a fase tem como referência o centro de cada versão da wavelet mãe, que é transladado ao longo do intervalo temporal em análise [31]. Outra vantagem da transformada S sobre a transformada wavelet reside no facto de a primeira apresentar uma resposta em frequência invariante com a própria frequência, ao contrário do que acontece na transformada wavelet [32].

Capítulo 4 – A Solução Proposta

O presente capítulo apresenta uma solução para o problema exposto no capítulo 1. O cumprimento de todos os objectivos propostos implica o desenvolvimento do sistema MDE assente numa arquitectura composta por várias camadas, em que os módulos que as constituem interagem entre si. Para tal, neste capítulo apresenta-se o modelo conceptual no qual assenta o MDE, bem como todos os pormenores inerentes à sua implementação. De forma a melhorar a compreensão do modelo conceptual do sistema e a respectiva implementação, apresenta-se primeiramente a configuração experimental inerente ao funcionamento do MDE.

4.1 Configuração Experimental

A configuração experimental, representada na Figura 4.1, é composta pelos elementos presentes nos seguintes pontos:

- um sensor de corrente;
- um sensor de tensão;
- uma Placa de Aquisição de Dados (PAD);
- um *Smart Meter* (SM); e
- um computador portátil capaz de suportar o funcionamento do MDE.

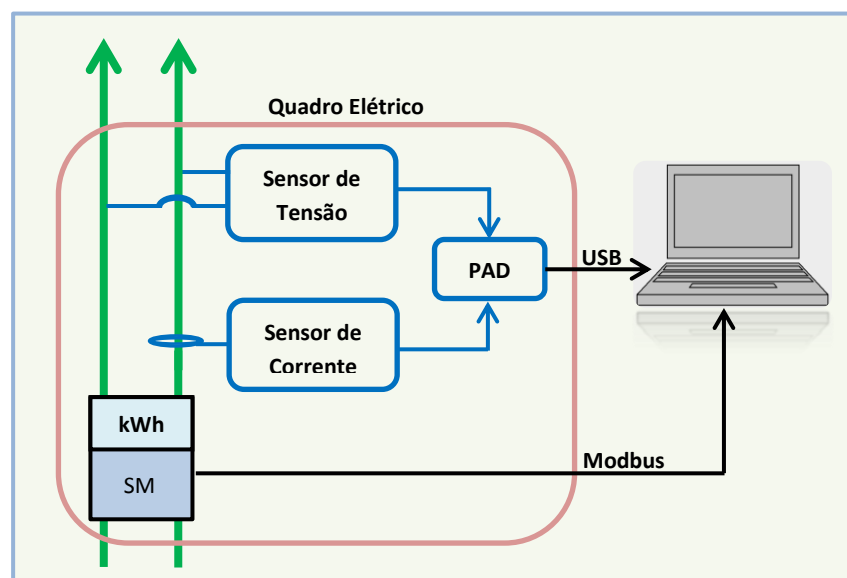


Figura 4.1 – Configuração experimental.

Os sensores de tensão e corrente encontram-se conectados directamente ao quadro principal do edifício medindo, respectivamente, os seus sinais de tensão e corrente globais. Estes geram na sua saída um sinal, compreendido entre os 0 e 5 V, proporcional aos respetivos sinais de entrada. Ambos os sensores estão conectados a uma placa de aquisição de dados com uma resolução de 14-bit, capaz de realizar amostragens a um ritmo máximo de 48000 amostras por segundo. A placa de aquisição de dados, por sua vez, envia os sinais adquiridos para o computador portátil (através de uma ligação USB) onde são tratados pelo MDE. Relativamente ao *Smart Meter*, neste caso específico a EnergyBox da EDP, este está ligado ao computador portátil através da interface física RS-485, realizando a troca de dados via protocolo Modbus [33].

4.2 Modelo Conceptual

O modelo conceptual apresenta a ideia que suporta o desenvolvimento do MDE. Este modelo é constituído pelo modelo funcional, o modelo arquitectural e o modelo de dados. O modelo funcional apresenta e descreve todas as funcionalidades colocadas ao dispor do utilizador. Relativamente ao modelo arquitectural, este expõe a arquitectura do sistema, explicando a função de cada uma das camadas que a compõem. Por último, o modelo de dados apresenta as várias entidades que o constituem, bem como as relações existentes entre as mesmas.

4.2.1 Modelo Funcional

O MDE oferece ao utilizador um conjunto de funcionalidades que lhe permitem aceder a informações detalhadas sobre o funcionamento dos vários dispositivos eléctricos presentes num edifício. Estas funcionalidades encontram-se representadas no Diagrama de Casos de Uso, pertencente aos diagramas da *Unified Modeling Language* (UML), presente na Figura 4.2. O MDE oferece dois modos de funcionamento, o modo de aprendizagem e o modo de monitorização. Estes dois modos de funcionamento trabalham de forma exclusiva e são geridos individualmente pelo utilizador.

A gestão da aprendizagem do sistema passa pela aquisição de informações referentes a novos comportamentos eléctricos, bem como pelo uso do conhecimento adquirido. Assim, o utilizador pode iniciar e terminar a aprendizagem do comportamento eléctrico de um novo dispositivo, sendo necessário para tal indicar o nome do dispositivo e o respectivo modo de funcionamento (e.g., máquina de lavar roupa a funcionar no modo económico, máquina de lavar roupa a funcionar no modo normal). Neste processo o utilizador deve ainda respeitar as instruções dadas pelo sistema, que indicam que apenas dispositivos eléctricos de iluminação

podem estar ligados no seu decorrer, implicando que eventos provocados por outros dispositivos não influenciam o processo de aprendizagem que se pretende iniciar. O utilizador pode também eliminar comportamentos elétricos já existentes, bastando para tal indicar o nome do respetivo dispositivo elétrico e o modo de funcionamento.

Além das referidas funcionalidades, a gestão da aprendizagem do sistema permite ainda que o utilizador obtenha informações sobre os comportamentos elétricos aprendidos. Estas informações dizem respeito ao consumo energético de cada dispositivo nos vários modos de funcionamento.

Relativamente à gestão da monitorização não intrusiva dos dispositivos elétricos, o utilizador tem à sua disposição funcionalidades que lhe permitem iniciar e terminar o processo de reconhecimento das cargas elétricas responsáveis pelos eventos ocorridos, sendo informado, em tempo real, sobre os dispositivos que se encontram em funcionamento. O utilizador pode também obter os horários em que um determinado dispositivo elétrico consumiu energia e o valor dos respetivos consumos e custos monetários, bem como informações sobre os vários eventos ocorridos num determinado período de tempo. As informações relacionadas com os eventos ocorridos dizem respeito à localização temporal dos mesmos, aos dispositivos elétricos responsáveis e às respetivas variações da potência ativa.

Ao gerir a monitorização, o utilizador pode ainda aceder a várias estatísticas calculadas num determinado intervalo temporal. As referidas estatísticas compreendem o consumo energético relativo de cada dispositivo elétrico no consumo total do edifício, a quantidade de energia elétrica consumida por cada dispositivo, bem como o custo monetário e as emissões de CO₂ associadas.

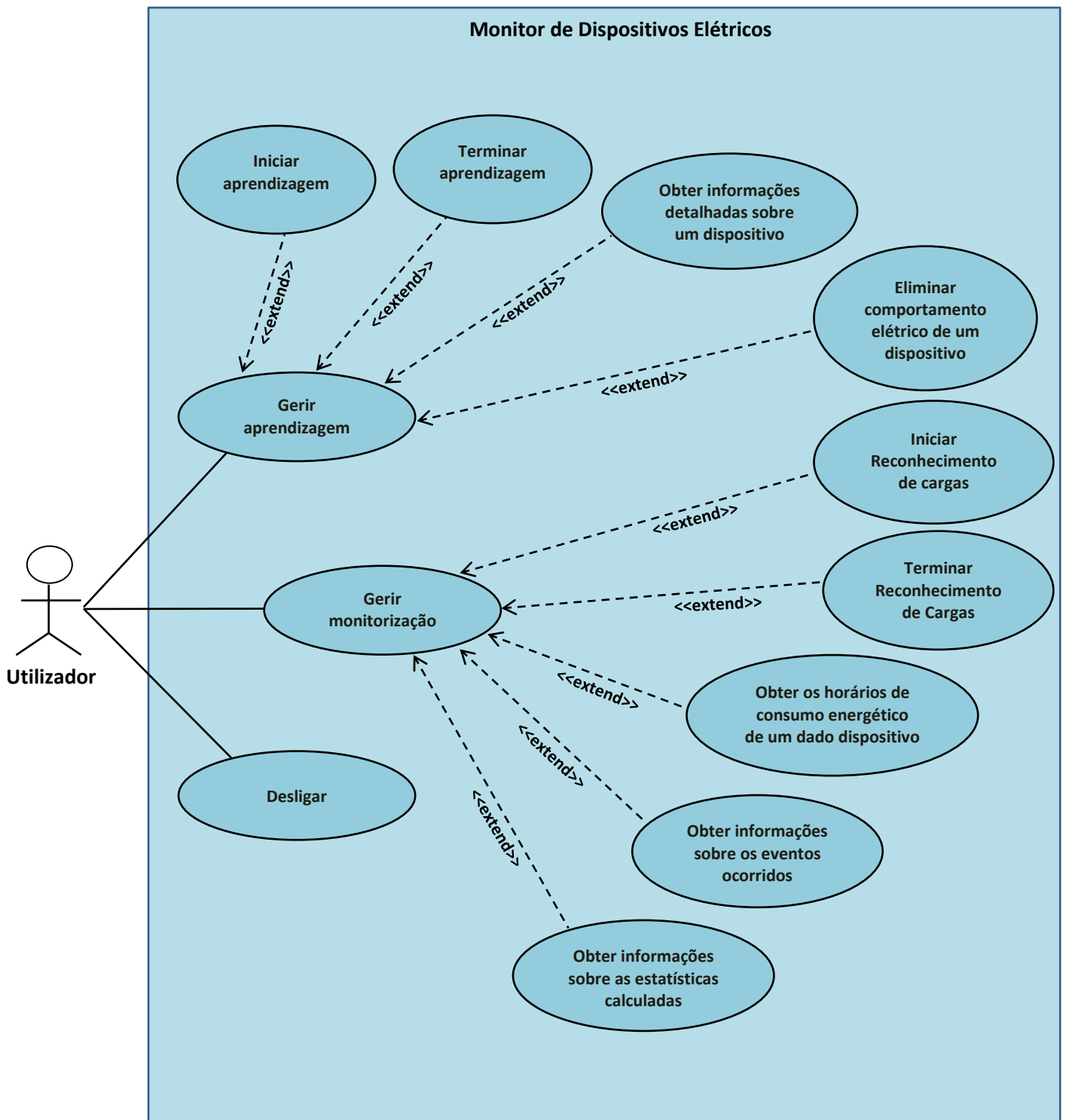


Figura 4.2 – Diagrama de Casos de Uso.

4.2.2 Modelo Arquitetural

A arquitetura do MDE, representada na Figura 4.3, é formada por três camadas. Cada uma destas camadas é composta por um ou mais módulos. O cumprimento dos objetivos estabelecidos para o MDE assenta na interoperabilidade entre os módulos das várias camadas.

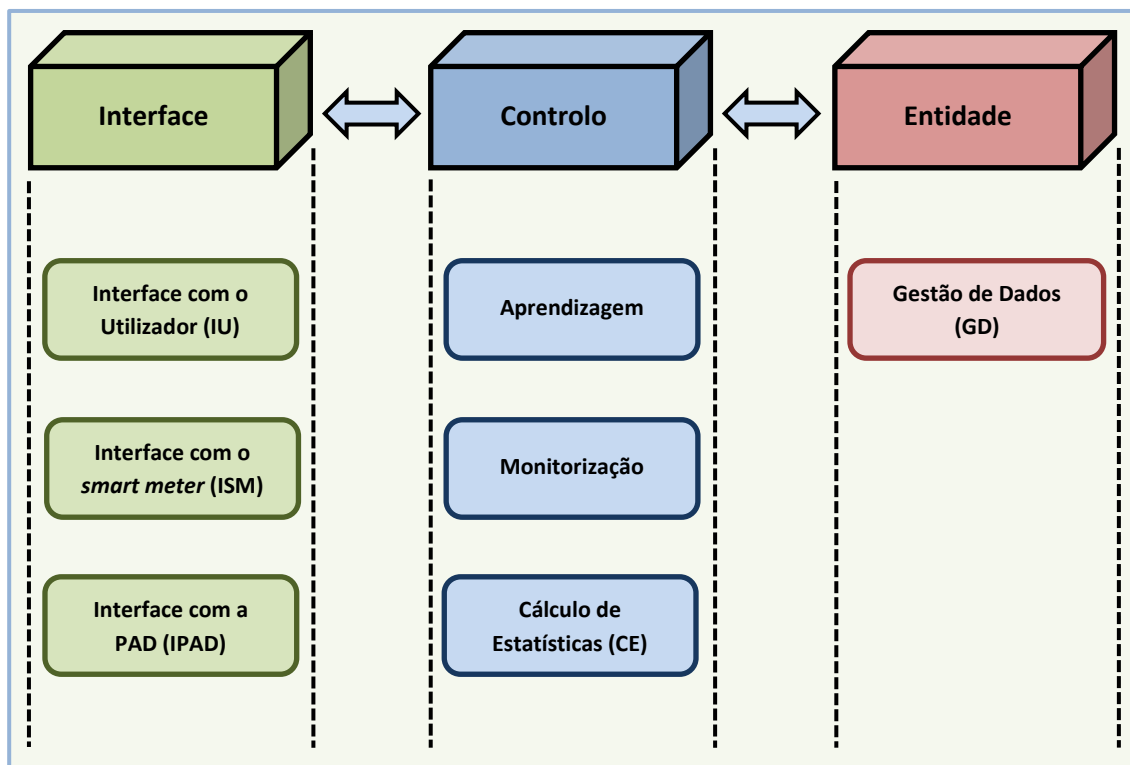


Figura 4.3 – Arquitetura do MDE.

4.2.2.1 Interface

A camada Interface tem como principal objetivo o estabelecimento de uma relação do MDE com o mundo exterior, assegurando a sua comunicação com o utilizador, bem como com o *smart meter* e a placa de aquisição de dados.

A comunicação do MDE com o utilizador é realizada através de uma interface gráfica. Esta interface gráfica permite que o utilizador introduza a informação necessária à satisfação das funcionalidades requisitadas e que os resultados inerentes ao processamento das mesmas lhe sejam colocados à disposição de uma forma intuitiva.

A comunicação do MDE com o *smart meter* é assegurada pelo módulo ISM, através do qual, o MDE acede a informações relacionadas com o tarifário da energia elétrica consumida no edifício. Relativamente à comunicação do MDE com a placa de aquisição de dados, esta é assegurada pelo módulo IPAD. Este módulo proporciona o acesso aos dados adquiridos pela

PAD (i.e., sinais de tensão e corrente), sendo possível escolher a frequência a que os sinais são amostrados e a duração da respetiva aquisição.

4.2.2.2 Controlo

A camada Controlo tem como principal objetivo o processamento dos pedidos realizados pelo utilizador, provenientes da camada Interface. Para tal, esta camada possui três módulos cuja utilização depende da funcionalidade requisitada. Os módulos Aprendizagem e Monitorização implementam os processos relacionados com a gestão da aprendizagem do MDE e com a gestão da monitorização dos dispositivos elétricos, respetivamente. O módulo Cálculo de Estatísticas, como o nome indica, é responsável por todas as estatísticas colocadas à disposição do utilizador.

No decorrer do processamento destes pedidos, os módulos da camada Controlo comunicam com os módulos da camada Interface para solicitar dados relacionados com o consumo elétrico do edifício, provenientes do *smart meter* e dos dois sensores (através da placa de aquisição de dados), ou para interagir com o utilizador, fornecendo-lhe informações relacionadas com as funcionalidades requisitadas.

4.2.2.3 Entidade

A camada Entidade é responsável pelo armazenamento e gestão dos dados processados, necessários ao cumprimento dos objetivos para os quais o MDE se propõe. Os dados são armazenados na base de dados (BD) do MDE, respeitando o modelo de dados que se apresenta no subcapítulo 4.2.3. Os três módulos da camada controlo interagem com o módulo Gestão de Dados da camada Entidade para armazenar, eliminar e consultar os dados existentes na referida base de dados.

4.2.3 Modelo de Dados – Visão Lógica

O modelo de dados, no qual assenta o armazenamento de dados do MDE, é composto por cinco entidades que se relacionam entre si de acordo com o Diagrama de Entidades e Relações (DER) presente na Figura 4.4.

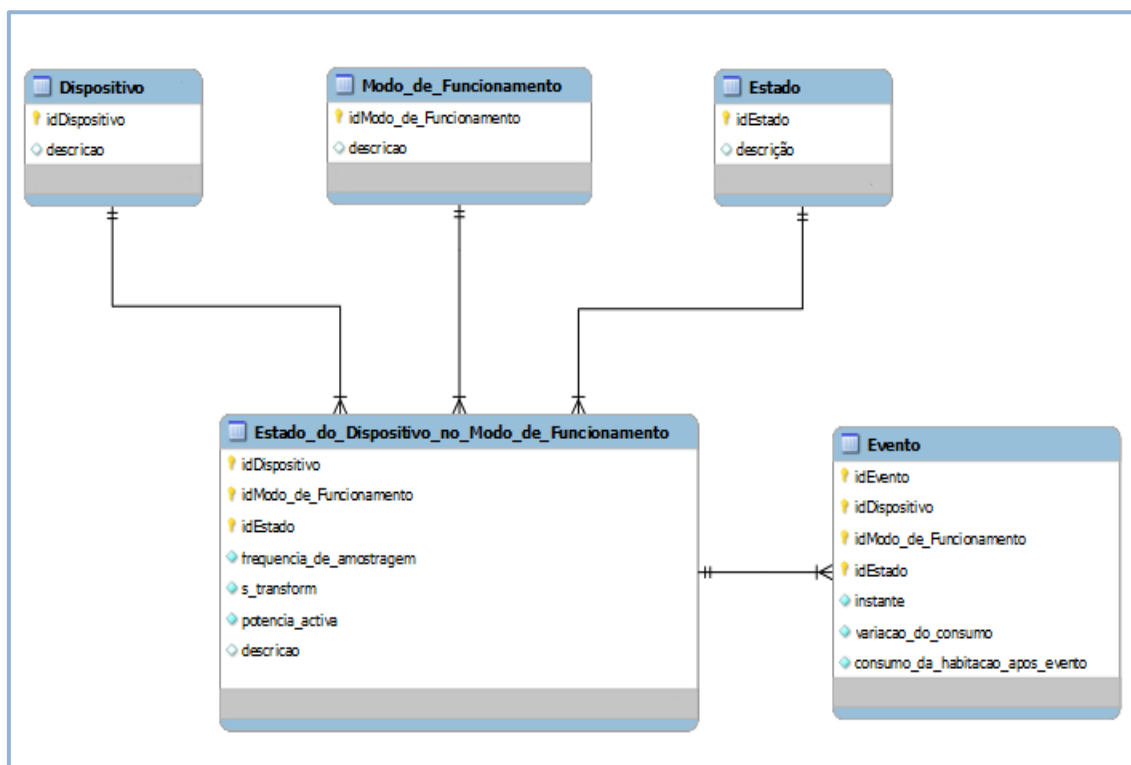


Figura 4.4 – Diagrama de Entidades e Relações do MDE – visão lógica.

O processo de aprendizagem envolve o armazenamento de dados relacionados com o comportamento elétrico dos dispositivos. O comportamento elétrico de um dispositivo é descrito pelas assinaturas elétricas inerentes à sua operação nos vários estados que compõem cada um dos seus modos de funcionamento. Assim, as entidades Dispositivo, Modo_de_Funcionamento, Estado e Estado_do_Dispositivo_no_Modo_de_funcionamento representam todos os dados relacionados com o comportamento elétrico dos dispositivos. A entidade Dispositivo representa os dados relacionados com os dispositivos eléctricos cujo comportamento é conhecido pelo MDE. Estes dispositivos podem possuir vários modos de funcionamento. Cada um destes modos pode conter vários estados, que são caracterizados pelo consumo de diferentes valores de potência ativa. Assim, os dados referentes à descrição dos modos de funcionamento e dos estados são representados pelas entidades Modo_de_Funcionamento e Estado, respetivamente.

As assinaturas elétricas do respetivo dispositivo aquando da sua operação em cada um dos estados pertencentes ao modo de funcionamento em que se encontra são representadas pela entidade Estado_do_Dispositivo_no_Modo_de_funcionamento. A identificação de cada um dos estados, bem como dos modos de funcionamento e do dispositivo em questão, são

também representados por esta entidade. A assinatura elétrica do dispositivo é composta pela amplitude da Transformada S da corrente consumida pelo mesmo, cujas principais características se apresentaram no capítulo 3. Além destes dados, esta entidade encarrega-se também pela representação dos dados referentes à frequência de amostragem a que os sinais de corrente e tensão são adquiridos e à potência ativa referente ao estado em questão.

A entidade Evento, como o nome indica, representa todos os dados relacionados com os eventos ocorridos. Estes dados dizem respeito aos instantes de ocorrência dos eventos, às variações provocadas no consumo energético do edifício, ao consumo energético do edifício após os eventos e às identificações do dispositivo, modo de funcionamento e estado em questão.

4.3 Implementação

Neste subcapítulo descreve-se toda a implementação do modelo conceptual anteriormente apresentado. A implementação deste modelo requereu a utilização de várias tecnologias, cujas utilidades também são explicadas nesta secção.

4.3.1 Tecnologias Adotadas

A implementação do MDE, cujo modelo conceptual se apresenta no subcapítulo 4.2, foi realizada no ambiente de desenvolvimento integrado Microsoft Visual Studio 2008. O desenvolvimento das várias camadas da arquitetura do MDE, presentes na Figura 4.3, foi efetuado através da linguagem de programação C#, que se apresenta como uma linguagem de alto nível, orientada a objetos, capaz de satisfazer todas as necessidades inerentes ao desenvolvimento das referidas camadas, combinando as características mais importantes das linguagens C e C++. A escolha do Microsoft Visual Studio 2008 incidiu sobre o facto de este ambiente de desenvolvimento suportar a linguagem C# e de fornecer várias ferramentas para a construção da interface gráfica com o utilizador.

A base de dados do sistema foi implementada em MySQL e projectada com o auxílio da ferramenta de desenvolvimento de bases de dados SQL, MySQL Workbench. A comunicação com a base de dados é assegurada pelo MySQL Connector/.NET. Relativamente aos diagramas UML apresentados, estes foram elaborados no Microsoft Studio 2010. Por último, os gráficos apresentados ao longo do presente documento foram obtidos a partir do software Matlab.

4.3.2 Detalhamento do Modelo Arquitetural

Os módulos que compõem as camadas Interface e Controlo do MDE encontram-se

implementados através de vários procedimentos pertencentes a uma única classe do tipo Form, com o nome Form_MDE. Uma classe deste tipo contém um nível de apresentação e um nível de tratamento de dados.

O nível de apresentação diz respeito à interface gráfica com o utilizador, constituindo assim o módulo IU da camada Interface. Por sua vez, o nível de tratamento de dados é responsável pelo tratamento dos eventos acionados pela seleção das várias funcionalidades colocadas à disposição do utilizador através da referida interface gráfica. Cada um dos eventos acionados invoca um procedimento da camada Controlo para a satisfação da funcionalidade escolhida. Nos subcapítulos 4.3.2.1 e 4.3.2.2 apresentam-se os procedimentos que implementam os módulos das camadas Interface e Controlo. Em anexo encontra-se o código fonte destes procedimentos.

Relativamente à camada Entidade, esta é constituída pelo módulo Gestão de Dados. Este módulo utiliza os serviços disponibilizados pelo MySQL Connector/NET para armazenar os dados na BD do MDE, bem como para consultá-los e eliminá-los.

4.3.2.1 Estrutura da Camada Interface

O módulo ISM permite o acesso do MDE a dados existentes no *smart meter* utilizado (i.e., EnergyBox da EDP). No decorrer dos trabalhos, uma vez que a EnergyBox teve de ser utilizada por vários alunos, em trabalhos distintos, criou-se um simulador para imitar o seu comportamento.

O módulo IPAD da camada Interface fornece os sinais de tensão e corrente necessários ao funcionamento dos módulos Aprendizagem e Monitorização da camada Controlo. Ao requisitarem os referidos sinais, os módulos da camada Controlo indicam a frequência a que estes devem ser amostrados, bem como a duração da referida aquisição. Este módulo da camada Interface é implementado através do procedimento cujo cabeçalho se encontra representado na Figura 4.5.

```
public void leitura_corrente_tensao(double[] corrente, double[] tensao, int freq_amost, int duracao)

double[] corrente – Vetor que contém o sinal de corrente amostrado [A]
double[] tensao – Vetor que contém o sinal de tensão amostrado [V]
int freq_amost – Frequência a que os sinais foram amostrados [Hz]
int duração – Duração da aquisição dos sinais [ms]
```

Figura 4.5 – Cabeçalho do procedimento que constitui o módulo IPAD.

4.3.2.2 Estrutura da Camada Controlo

O módulo Aprendizagem da camada Controlo é composto por três procedimentos, que permitem a aprendizagem de um novo comportamento elétrico, a obtenção de informações detalhadas sobre os comportamentos elétricos de um dispositivo e a eliminação de um comportamento. Na Figura 4.6 encontram-se representados os cabeçalhos dos referidos procedimentos.

```
public void aprendizagem(string dispositivo, string modo_de_funcionamento)

string dispositivo – Nome do dispositivo
string modo_de_funcionamento – Nome do modo de funcionamento
-----

public void informação_detalhada(string dispositivo)

string dispositivo – Nome do dispositivo
-----

public void elimina_comportamento(string dispositivo, string modo_de_funcionamento)

string dispositivo – Nome do dispositivo
```

Figura 4.6 – Cabeçalhos dos procedimentos que constituem o módulo Aprendizagem.

O procedimento responsável pelo processo de aprendizagem recebe do módulo IU da camada Interface o nome do dispositivo e respetivo modo de funcionamento cuja aprendizagem do comportamento elétrico se pretende realizar, bem como os comandos de início e término do processo de aprendizagem. No decorrer deste processo, são armazenados na BD do MDE os

dados inerentes ao comportamento elétrico do dispositivo, recorrendo-se para tal ao módulo Gestão de Dados da camada Entidade.

Relativamente ao procedimento que permite a obtenção de informações detalhadas sobre os comportamentos elétricos de um dispositivo, este recebe como parâmetro de entrada o nome do respetivo dispositivo através do módulo IU da camada Interface. Através do mesmo módulo da camada Interface, as informações detalhadas sobre os comportamentos elétricos dos dispositivos são disponibilizadas ao utilizador. A consulta destes dados, presentes na entidade Estado_do_Dispositivo_no_modos_de_funcionamento, é realizada através do módulo GD.

O procedimento utilizado pelo módulo Aprendizagem para a eliminação dos comportamentos elétricos associados a um dispositivo recebe o nome do mesmo através do módulo IU. Através do módulo GD, os dados associados aos comportamentos elétricos em questão são eliminados.

No que diz respeito ao módulo Monitorização, este encontra-se implementado através de três procedimentos, cujos cabeçalhos se encontram representados na Figura 4.7. O procedimento responsável pelo processo de reconhecimento, em tempo real, dos dispositivos associados aos eventos ocorridos no edifício, recebe através do módulo IU as diretivas de começo e respetiva paragem. Recorrendo também ao módulo IU, o procedimento em questão coloca à disposição do utilizador o nome dos dispositivos que se encontram em funcionamento. Durante o processo de reconhecimento são armazenados na entidade Evento os dados relacionados com as variações ocorridas no consumo energético do edifício.

As informações detalhadas sobre os horários de funcionamento de um determinado dispositivo elétrico, bem como sobre os seus consumos energéticos em cada um dos períodos de funcionamento, são obtidas através de um procedimento que recebe como parâmetro de entrada o nome do respetivo dispositivo. O procedimento em questão obtém, através do módulo GD, os dados necessários, presentes na entidade Evento, e coloca as referidas informações à disposição do utilizador através do módulo IU.

O procedimento responsável pelo fornecimento das informações referentes aos eventos ocorridos num determinado período de tempo recebe como parâmetros de entrada os instantes que limitam o referido espaço temporal. Este procedimento consulta os dados armazenados na entidade Evento que dizem respeito ao intervalo temporal em questão e

fornece as informações relacionadas com os mesmos através do módulo IU.

```
public void reconhecimento()
```

```
public void informação_dispositivo(string dispositivo)
```

string dispositivo – Nome do dispositivo

```
public void informação_eventos(string instante_inicial, string instante_final)
```

string instante_inicial – Instante inicial do período a que as informações se referem

string instante_final – Instante final do período a que as informações se referem

Figura 4.7 – Cabeçalhos dos procedimentos que constituem o módulo Monitorização.

Por último, o módulo Cálculo de Estatísticas encontra-se implementado através do procedimento ao qual pertence o cabeçalho representado na Figura 4.8. O procedimento em questão recebe como parâmetros de entrada os instantes que limitam o período temporal a que se referem as estatísticas e coloca à disposição do utilizador os resultados dos cálculos efetuados através do módulo IU. Para a elaboração destes cálculos, este procedimento acede aos dados existentes na entidade Evento.

```
public void calculo_estatisticas(string instante_inicial, string instante_final)
```

string instante_inicial – Instante inicial do período a que as estatísticas se referem

string instante_final – Instante final do período a que as estatísticas se referem

Figura 4.8 – Cabeçalho do procedimento que constitui o módulo Cálculo de Estatísticas.

4.3.3 Modelo de Dados – Visão Física

A implementação do modelo de dados do MDE requer a escolha dos tipos de dados que melhor se adequam aos atributos das várias entidades. Na Figura 4.9 apresenta-se o DER que descreve a relação entre as várias entidades que constituem o modelo de dados, onde se podem visualizar os tipos de dados de cada um dos atributos.

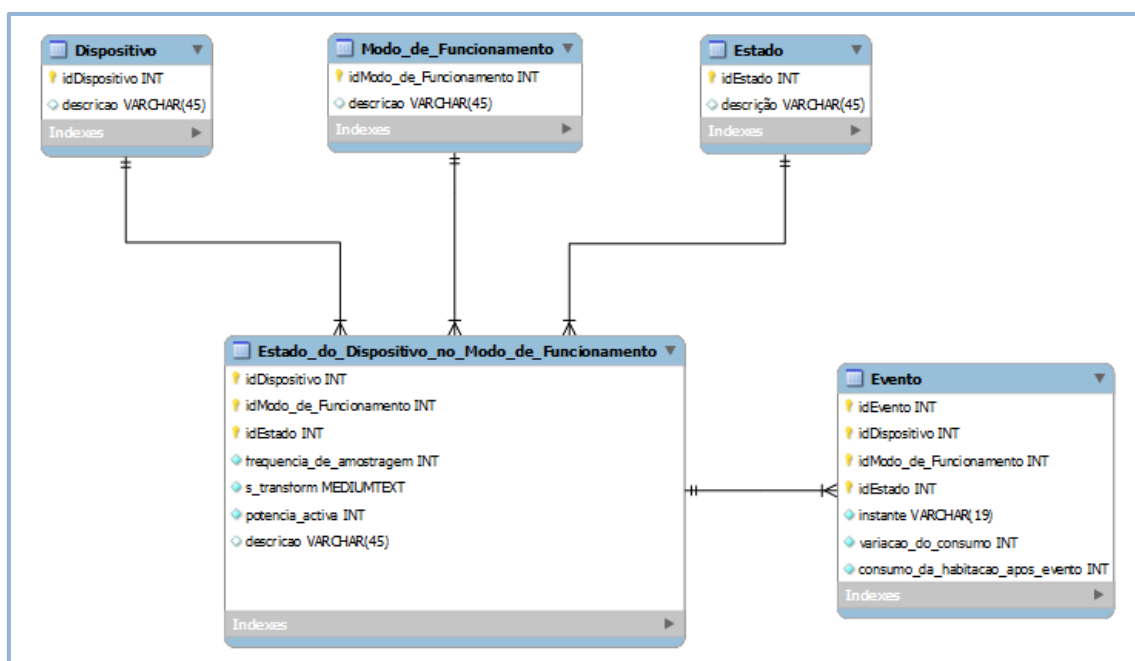


Figura 4.9 – Diagrama de Entidades e Relações do MDE – visão física.

O número de dispositivos eléctricos presentes num determinado edifício é inferior à capacidade máxima do tipo de dados INT, à semelhança do que acontece com o número de estados, modos de funcionamento e eventos. Assim, os atributos referentes às identificações das quatro entidades responsáveis pelo armazenamento destes dados são do tipo INT. A escolha do tipo de dados INT para o armazenamento de outros atributos (e.g., `variacao_do_consumo`) leva em consideração o facto de o valor esperado para os mesmos ser sempre inferior à capacidade máxima do referido tipo de dados.

Após o cálculo do módulo da transformada S do sinal referente à corrente consumida por um determinado dispositivo, a matriz resultante é convertida para um vector de caracteres que é armazenado no atributo `s_transform`. A dimensão da matriz resultante do cálculo da transformada S é dada por $N \times \left(\frac{N}{2} + 1\right)$, onde N é igual ao número de pontos do sinal de corrente utilizado. Assim, o tipo de dados MEDIUMTEXT apresenta-se como a melhor opção para o armazenamento do resultado da transformada S , comparativamente aos restantes tipos de dados, pois tem a menor capacidade de armazenamento compatível com a dimensão do referido resultado.

Os dados armazenados no atributo `instante` dizem respeito à data e hora de ocorrência de um

determinado evento (e.g., 27-08-2012 16:53:33). O armazenamento destes dados necessita de 19 caracteres.

4.3.4 Modelo Comportamental

Os três módulos da camada Controlo interagem entre si, bem como com os módulos das restantes camadas, assegurando o cumprimento dos objetivos do MDE. O módulo Aprendizagem permite que o MDE aprenda o comportamento elétrico dos dispositivos, gravando na BD do sistema todos os dados resultantes dos processos de aprendizagem. O módulo Monitorização, por sua vez, utiliza estes dados no seu processo de reconhecimento das cargas elétricas responsáveis pelos eventos ocorridos, não apresentando qualquer incerteza associada. Os dados relacionados com os eventos ocorridos são armazenados na base de dados do MDE e posteriormente utilizados pelo módulo Cálculo de Estatísticas, bem como pelo próprio módulo de Monitorização.

4.3.4.1 Módulo Aprendizagem

O processo de aprendizagem do MDE, implementado pelo respetivo procedimento apresentado no subcapítulo 4.3.2.2, é composto pela sequência de operações representada no diagrama de atividade presente na Figura 4.10.

Ao iniciar a aprendizagem do comportamento elétrico de um dispositivo o utilizador indica, através da interface gráfica do MDE, o nome do dispositivo em questão e o modo em que este está a funcionar. Se o MDE desconhecer qualquer comportamento elétrico do dispositivo, é armazenado na entidade Dispositivo o nome do mesmo em conjunto com uma chave exclusiva, que corresponde ao menor número ainda não utilizado noutras gravações nesta entidade. Caso contrário, o MDE utiliza os dados já armazenados na entidade Dispositivo provenientes de aprendizagens anteriormente realizadas, aquando da operação do dispositivo em questão noutros modos de funcionamento. De forma semelhante, o modo de funcionamento inserido pelo utilizador é armazenado na entidade Modo_de_Funcionamento caso não tenha sido realizada qualquer aprendizagem associada ao mesmo.

A aprendizagem do comportamento elétrico do dispositivo, aquando da sua operação no modo de funcionamento em questão é, então, iniciada. O MDE permanecerá neste processo de aprendizagem até o utilizador indicar o seu término. Assim, após o armazenamento inicial dos dados referentes ao dispositivo e ao modo de funcionamento, se for esse o caso, e a verificação de que o utilizador ainda não deu por terminado o processo de aprendizagem do MDE, a aquisição dos sinais de tensão e corrente é efetuada, através do módulo IPAD da camada Interface. A aquisição dos sinais tem uma duração de 40 ms (i.e., durante dois ciclos do sinal da rede) a uma frequência de amostragem igual a 12,5 kHz, sendo adquiridas desta forma 500 amostras para cada um dos sinais. A escolha desta frequência de amostragem levou em consideração o estudo efetuado em [13], onde foi concluído que para a aquisição de características microscópicas (e.g., forma de onda do sinal de corrente), a frequência de amostragem deve ser superior a 1,2 KHz. Este limite inferior para a frequência de amostragem encontra-se relacionado com uma regra empírica, que estabelece uma frequência de amostragem no mínimo 10 vezes superior à frequência de Nyquist para que não existam perdas de informação aquando da amostragem do sinal.

Através dos sinais adquiridos, é calculada a potência ativa consumida pelo edifício no instante da leitura dos sinais de corrente e tensão, através da seguinte expressão:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T u(n)i(n) \quad (4.1)$$

onde T diz respeito ao tamanho dos sinais de tensão e corrente (i.e., 500 amostras).

A partir da potência ativa consumida pelo edifício é verificada a existência de novos eventos, utilizando-se para tal a seguinte desigualdade:

$$|P_A - P_L| > P_0 \quad (4.2)$$

onde P_A diz respeito à potência ativa calculada através dos dados adquiridos na leitura em curso, P_L à potência ativa calculada através dos sinais de tensão e corrente amostrados na leitura exatamente anterior e P_0 ao valor de potência ativa a partir do qual se considera a existência de um evento. A escolha do valor de P_0 deve levar em consideração que um valor baixo para este limiar pode provocar a deteção de falsos eventos (e.g., evento provocados pela existência de ruído eletrónico), e que um valor elevado pode levar à não deteção das mudanças de estado dos dispositivos de menor consumo energético. No desenvolvimento do MDE, escolheu-se $P_0 = 100$ W, tal como em [9] e [21, 22].

As assinaturas elétricas utilizadas pelo MDE são constituídas pela amplitude da transformada S da forma de onda da corrente consumida pelos dispositivos aquando da sua operação no estado estacionário. Assim, para que o transitório não seja contemplado na construção das assinaturas elétricas, o MDE procede a um período de espera com a duração de 1 segundo, entre a deteção do evento e a aquisição da assinatura referente ao novo estado. O facto de a forma de onda da corrente consumida por alguns dispositivos elétricos (e.g., eletrodomésticos equipados com motores elétricos) aquando da sua operação no transitório variar entre utilizações, implica a implementação desta medida. Nos testes efetuados aos vários dispositivos elétricos disponíveis, verificou-se que a duração dos seus transitórios não ultrapassa a período de espera escolhido.

Relativamente ao armazenamento das assinaturas elétricas, o MDE armazena apenas as assinaturas dos estados cujos consumos de potência ativa, calculados após o período de espera, se diferenciem de todos os outros por valores superiores ou inferiores a P_0 . O MDE implementa esta medida para impedir o armazenamento das assinaturas elétricas de estados semelhantes, poupando assim os seus recursos computacionais. Se o estado inerente ao evento detetado provocar uma variação na potência ativa que cumpra o referido requisito, procede-se ao rearranjo do sinal de corrente, que consiste em reduzir o seu tamanho para 250 pontos (i.e., sinal de corrente referente a um ciclo do sinal da rede), colocando o ponto inicial deste sinal em sintonia com o ponto de passagem por zero do sinal de tensão quando a sua derivada é positiva. Este rearranjo é realizado para assegurar que os sinais envolvidos na obtenção da forma de onda da corrente consumida pelo dispositivo responsável pelo evento possuem uma correta relação de fase, tendo como referência o sinal de tensão.

No caso do evento registado provocar um aumento do consumo energético do edifício, a forma de onda da corrente consumida pelo dispositivo responsável é obtida a partir de (4.3), caso contrário esta é obtida através de (4.4), onde I_A diz respeito à corrente rearranjada da leitura atual e I_L à corrente rearranjada adquirida na leitura imediatamente anterior ao evento detetado.

$$I = I_A - I_L \quad (4.3)$$

$$I = I_L - I_A \quad (4.4)$$

A esta corrente, obtida através de (4.3) ou de (4.4), é aplicada a transformada S , obtendo-se uma matriz, $S(j,k)$, com N colunas e $M=N/2+1$ linhas, onde N corresponde ao número de

pontos do sinal de corrente obtido (i.e., neste caso, $N=250$). Tendo em conta que a matriz $S(j,k)$ diz respeito a uma representação tempo-frequência, o termo j refere-se ao tempo, enquanto que o termo k está relacionado com a frequência. De seguida é obtida uma matriz com as mesmas dimensões de $S(j,k)$, correspondente ao módulo da TS anteriormente calculada, que constitui a assinatura elétrica do estado resultante do evento detetado.

O armazenamento dos dados referentes a esta assinatura elétrica encerra a sequência de operações executadas em cada ciclo do processo de aprendizagem. Estes dados são armazenados na entidade `Estado_do_Dispositivo_no_Modo_de_Funcionamento`. Se a diferença entre a potência ativa calculada após o evento e a potência ativa registada no início do processo de aprendizagem for inferior a P_0 , o atributo Descrição da referida entidade armazena a informação de que o presente estado diz respeito ao término do consumo elétrico do dispositivo. O armazenamento desta informação tem como objetivo a posterior determinação dos horários de funcionamento dos dispositivos elétricos, sendo para tal necessário conhecer o instante em que o dispositivo deixou de consumir energia elétrica.

Os dados armazenados resultantes do processo de aprendizagem são posteriormente usados no processo de reconhecimento de cargas implementado pelo respetivo procedimento do módulo Monitorização. Estes dados são também utilizados pelo procedimento responsável pelo fornecimento de informações detalhadas sobre o comportamento elétrico do dispositivo, pertencente ao próprio módulo de aprendizagem.

4.3.4.2 Módulo Monitorização

O processo de reconhecimento das cargas responsáveis pelos eventos ocorridos, implementado pelo respetivo procedimento apresentado no subcapítulo 4.3.2.2, tem como objetivo a aquisição dos dados necessários à elaboração dos horários de funcionamento dos dispositivos elétricos presentes no edifício, bem como dos dados necessários aos cálculos dos consumos energéticos de cada dispositivo nestes horários. No diagrama de atividade representado na Figura 4.11 apresenta-se a sequência de operações inerentes a este processo.

O processo de reconhecimento dos dispositivos elétricos responsáveis pelos eventos ocorridos inicia-se com a realização de uma cópia, para a memória principal, de todos os dados existentes na entidade `Estado_do_Dispositivo_no_Modo_de_Funcionamento`. Esta operação é realizada com o intuito de diminuir os tempos de acesso aos dados, pois estes encontram-se armazenados na memória secundária, onde o acesso aos mesmos é mais demorado.

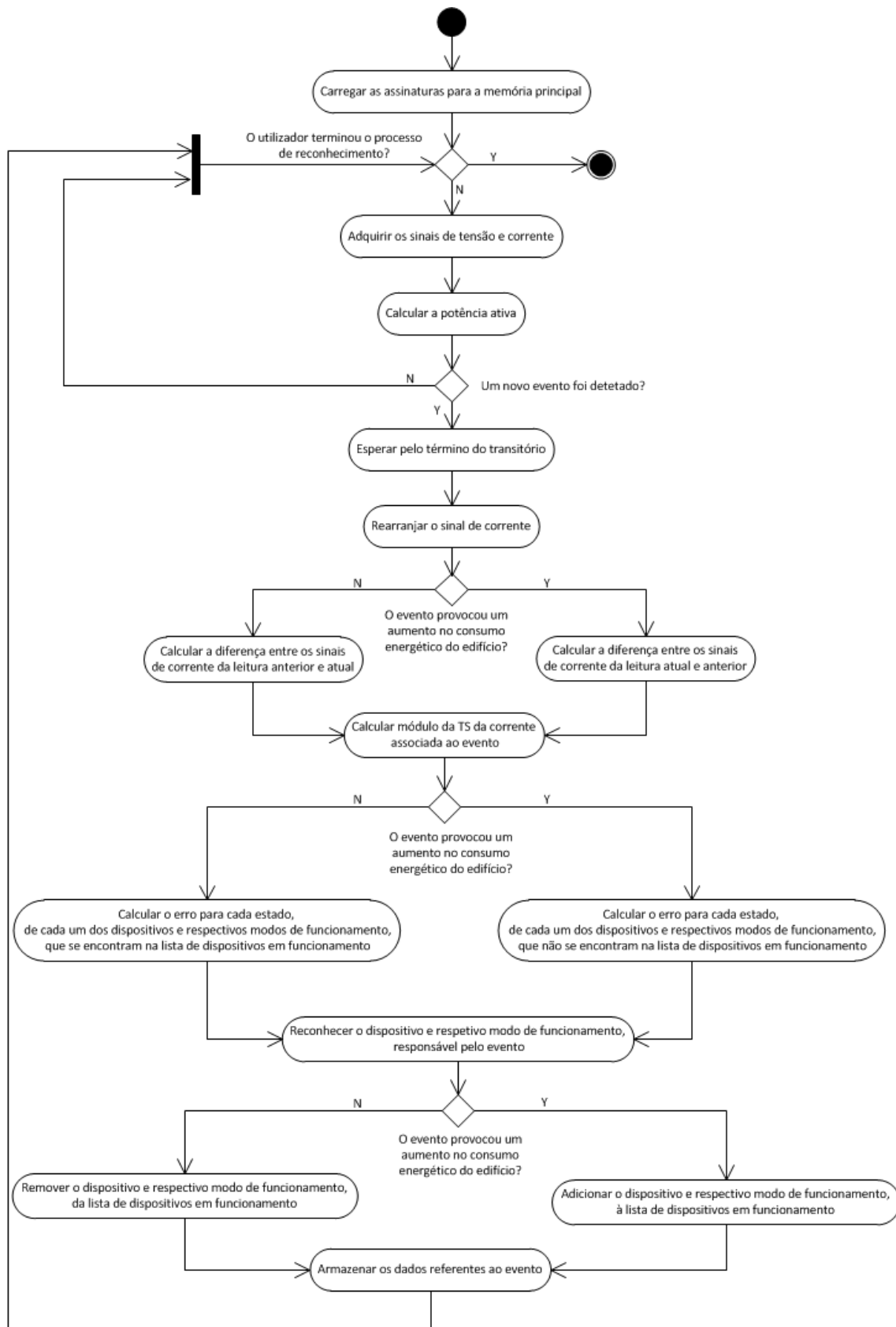


Figura 4.11 – Diagrama de atividade referente ao processo de reconhecimento de cargas.

O reconhecimento, em tempo real, dos dispositivos elétricos responsáveis pelos eventos ocorridos decorre até que o utilizador indique, através do módulo IU da camada Interface, que o mesmo deve terminar. Os sinais de tensão e corrente, utilizados neste processo, são adquiridos durante 40 ms, a uma frequência de amostragem igual a 12,5 kHz. Estes sinais são utilizados no cálculo da potência ativa, através de (4.1), inferindo-se a existência de novos eventos a partir de (4.2).

Caso se verifique a existência de um novo evento, o MDE executa o período de espera relacionado com o transitório do sinal de corrente, procedendo posteriormente à obtenção da forma de onda da corrente consumida pelo dispositivo responsável pela variação energética. Para tal, se o evento provocar uma variação positiva no consumo energético do edifício, esta é obtida através de (4.3), caso contrário a mesma é alcançada a partir de (4.4), procedendo-se aos respetivos rearranjos dos sinais de corrente envolvidos. A assinatura elétrica do dispositivo responsável pelo evento aquando da sua operação num determinado estado do respetivo modo de funcionamento é obtida a partir da TS da forma de onda da corrente alcançada através de (4.3) ou de (4.4), tal como acontece no processo de aprendizagem.

A comparação entre a assinatura elétrica obtida e as assinaturas elétricas presentes na base de dados do MDE permite reconhecer o dispositivo responsável pelo evento detetado. No entanto, repare-se que nos eventos que provocam um aumento do consumo energético do edifício interessa apenas contemplar nesta comparação os dispositivos que anteriormente se encontravam desligados. Por outro lado, nos eventos que provocam uma diminuição do consumo energético do edifício interessa apenas realizar a comparação em questão com os dispositivos que se encontram em funcionamento. Deste modo, o processo de reconhecimento de cargas possui uma lista com as identificações dos dispositivos que se encontram em funcionamento.

Ao dispositivo, e respetivo estado do modo de funcionamento, que apresente a assinatura elétrica que origina o menor erro para a assinatura do dispositivo responsável pelo evento detetado, é atribuído o evento ocorrido, sendo o erro, ε , calculado através da seguinte expressão:

$$\varepsilon(d, e, m) = \sum_{j=0}^M \sum_{K=0}^N [|S(k, j)| - |S_{DB}(k, j|d, e, m)|]^2 \quad (4.5)$$

onde $S(k, j)$ é a transformada S da corrente consumida pelo dispositivo responsável pelo evento detectado, e $S_{BD}(k, j|d, e, m)$ diz respeito à TS da corrente consumida pelo dispositivo d aquando da sua operação no estado e do modo de funcionamento m , que se encontra presente na BD do MDE. Após o reconhecimento do dispositivo, e respetivo estado do modo de funcionamento, procede-se à gravação dos dados referentes ao evento detetado. Estes dados são armazenados na entidade Evento, sendo posteriormente utilizados para informar o utilizador sobre os horários de funcionamento dos vários dispositivos, para calcular a energia elétrica consumida por cada um destes nos seus períodos de funcionamento, e para informar o utilizador sobre os horários de ocorrência dos vários eventos.

O intervalo temporal entre o instante do primeiro evento provocado por um determinado dispositivo e o instante do evento associado ao estado final do respetivo modo de funcionamento estabelece um período no qual o dispositivo consumiu energia elétrica. O conjunto dos vários períodos de consumo energético de um dispositivo estabelece o seu horário de funcionamento.

A energia elétrica gasta por um dispositivo, aquando da sua operação num determinado modo de funcionamento, em cada um dos referidos períodos é dada pela seguinte expressão:

$$W = \sum_{E=1}^N P_E \times T_E \quad (4.6)$$

onde P_E diz respeito à potência ativa associada ao estado E , T_E à duração do estado E e N ao número de estados existentes no modo de funcionamento. O somatório dos tempos T_E iguala a duração do respetivo período de funcionamento. O custo monetário associado a estes períodos de funcionamento depende do horário em que os dispositivos elétricos funcionam, pois admite-se a existência de uma tarifa tri-horária. Este tipo de tarifa é caracterizado por taxar a energia consumida em função dos seus horários de consumo. As informações relacionadas com a tarifa em vigor em cada instante são obtidas através do simulador da EnergyBox da EDP, recorrendo-se para tal ao módulo ISM da camada Interface.

4.3.4.3 Módulo Cálculo de Estatísticas

As estatísticas disponibilizadas ao utilizador são calculadas a partir dos dados presentes na entidade Evento, dizendo respeito a um determinado intervalo temporal, através do procedimento indicado no subcapítulo 4.3.2.2. A energia elétrica gasta por cada dispositivo no intervalo temporal solicitado pelo utilizador é calculada através de (4.6). A partir da energia consumida é determinado o custo monetário e as emissões de CO₂ associadas à mesma.

Os custos monetários associados à energia elétrica consumida são calculados de acordo com as tarifas em vigor nos períodos de consumo da mesma. Estas tarifas são obtidas através do simulador da EnergyBox da EDP, utilizando-se para tal o módulo ISM da camada Interface. Relativamente às emissões de CO₂ associadas à energia consumida, estas são calculadas de acordo com a emissão específica de CO₂ registada no mês de Janeiro de 2011, disponibilizadas pela EDP em [34].

Capítulo 5 – Validação e Resultados Experimentais

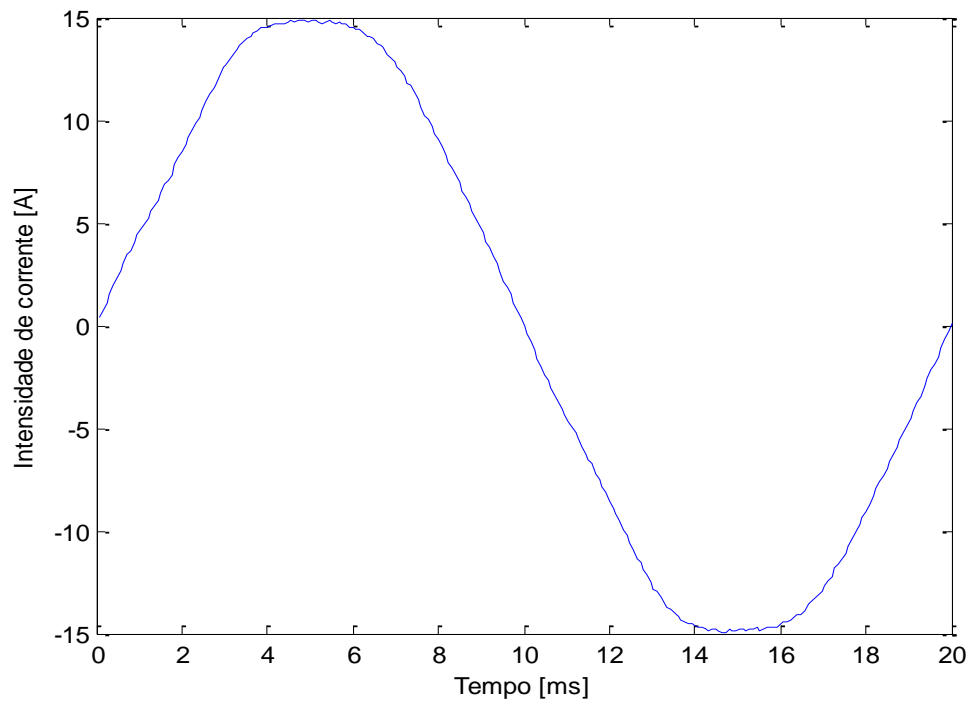
Neste capítulo procede-se à validação do MDE através de exemplos elucidativos do seu funcionamento nos modos de aprendizagem e monitorização. A avaliação do funcionamento de cada um destes modos é realizada através do estudo dos resultados experimentais obtidos no cenário experimental apresentado no subcapítulo 4.1.

Na avaliação efetuada ao MDE procede-se primeiramente à validação do Modo de Aprendizagem, uma vez que o sistema desconhece inicialmente qualquer comportamento elétrico. Para tal, através da execução das funcionalidades colocadas à disposição do utilizador, o MDE aprende o comportamento elétrico de um novo dispositivo. Seguidamente valida-se o Modo de Monitorização, onde os comportamentos elétricos aprendidos são utilizados pelo MDE para o reconhecimento, em tempo real, dos dispositivos responsáveis pelos eventos ocorridos.

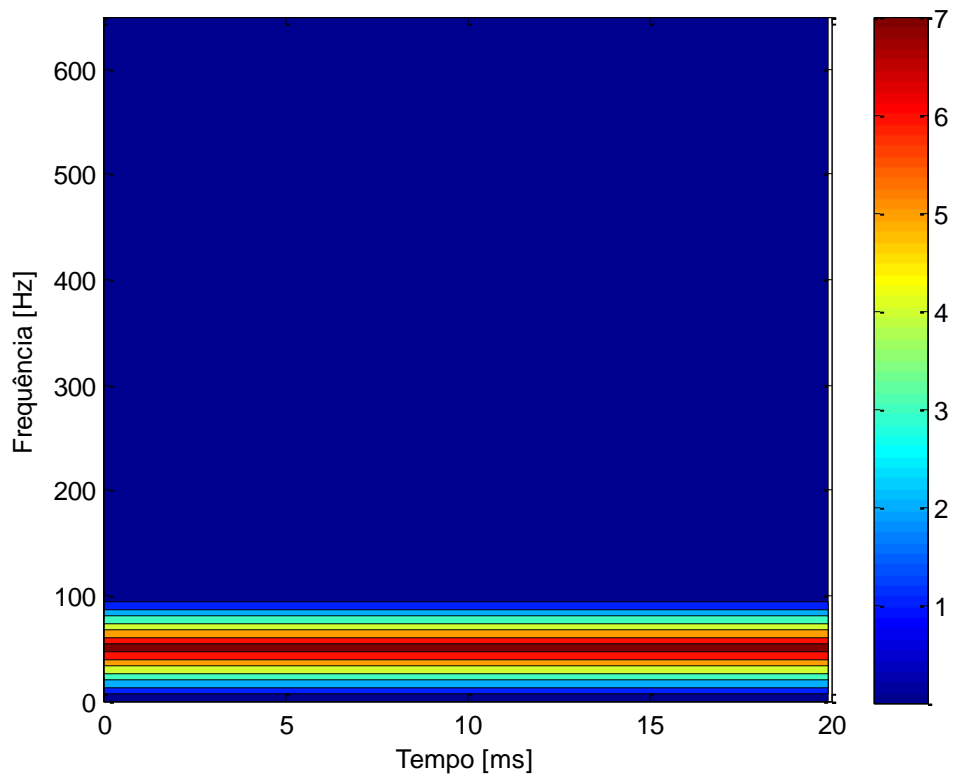
5.1 Modo de Aprendizagem

No decorrer do processo de aprendizagem o MDE adquire as assinaturas elétricas dos vários estados que compõem os modos de funcionamento de um determinado dispositivo. As Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam a forma de onda da corrente, referente ao estado estacionário, consumida por quatro diferentes eletrodomésticos do tipo 2 (i.e., dispositivos elétricos do tipo *on/off*) e as respetivas assinaturas elétricas, formadas pela amplitude da transformada S da corrente em questão.

As diferenças entre a amplitude da transformada S da corrente consumida por cada um dos quatro eletrodomésticos são evidentes. Em cada instante cada um destes dispositivos elétricos apresenta componentes harmónicas que os distinguem dos restantes. Estas componentes estão associadas ao funcionamento dos respetivos dispositivos. Apesar das características distintivas referidas, as quatro assinaturas elétricas apresentam a sua componente harmónica principal nos 50 Hz.

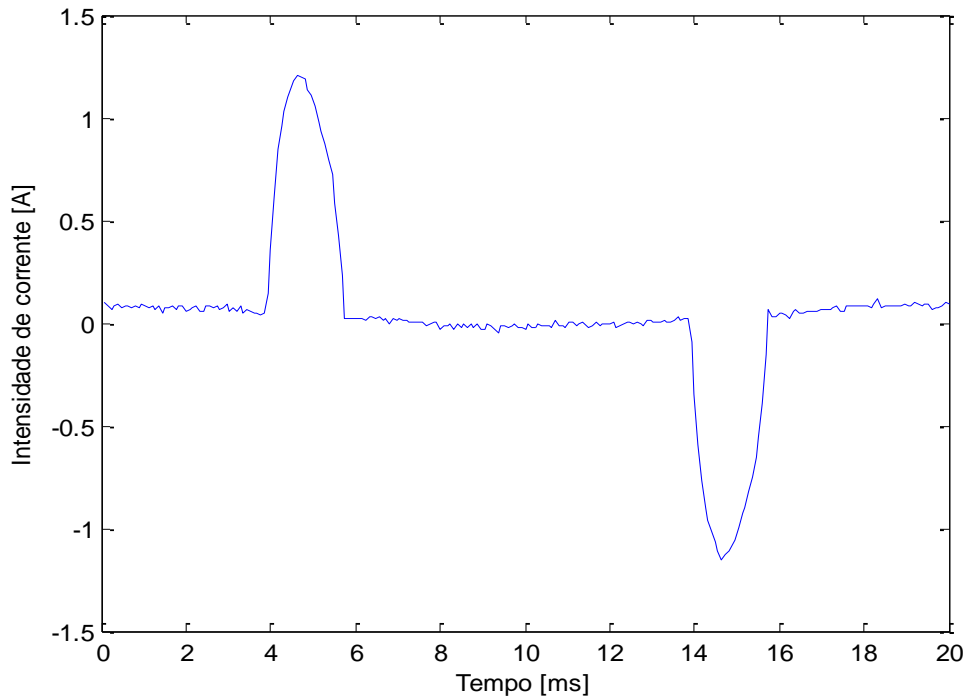


(a)

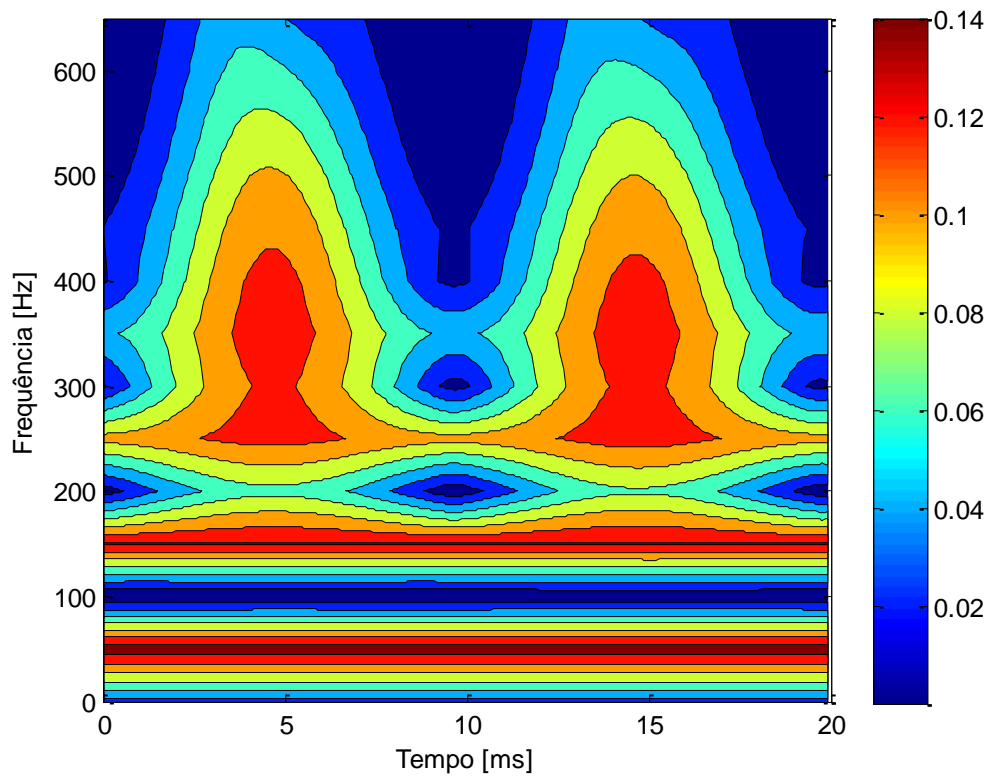


(b)

Figura 5.1 – Resultados experimentais referentes à torradeira. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.

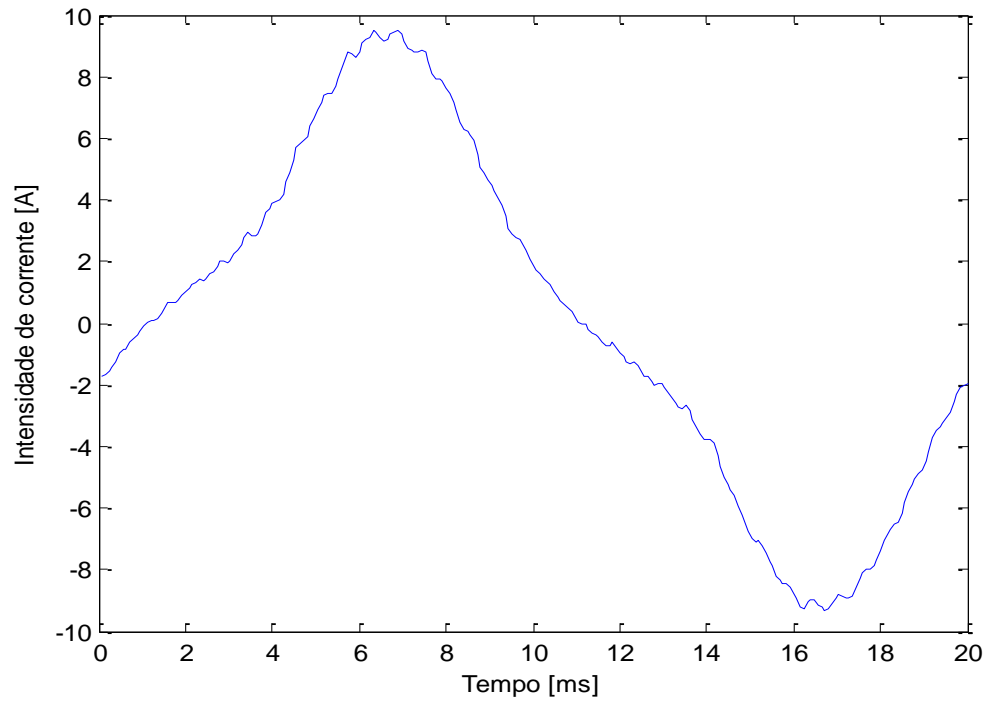


(a)

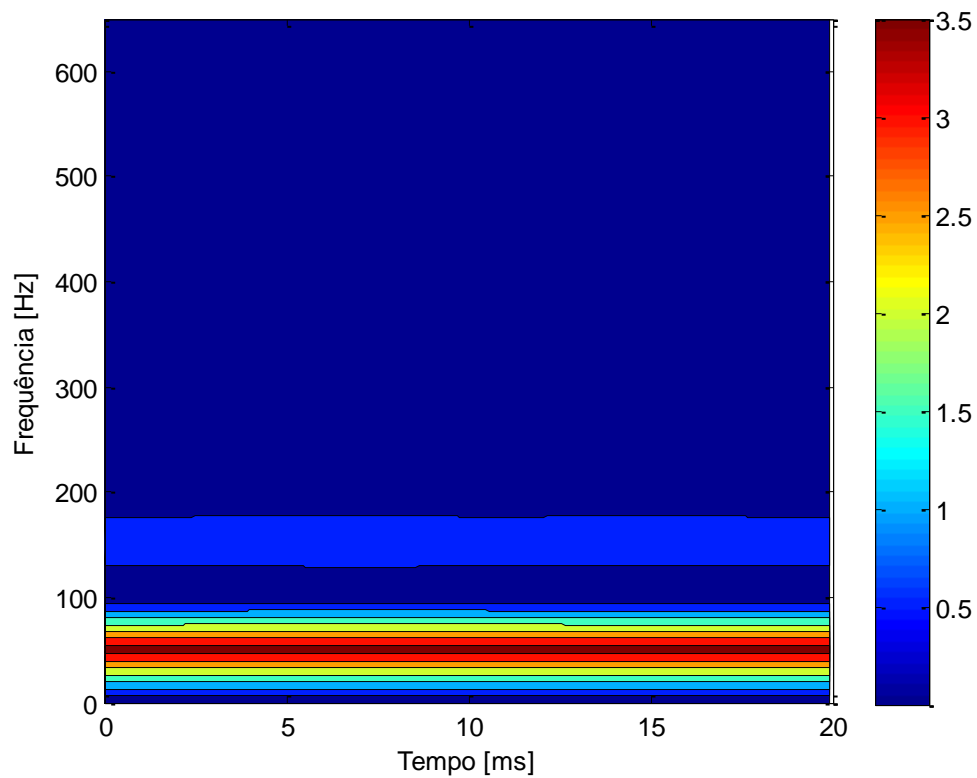


(b)

Figura 5.2 – Resultados experimentais referentes à televisão. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.

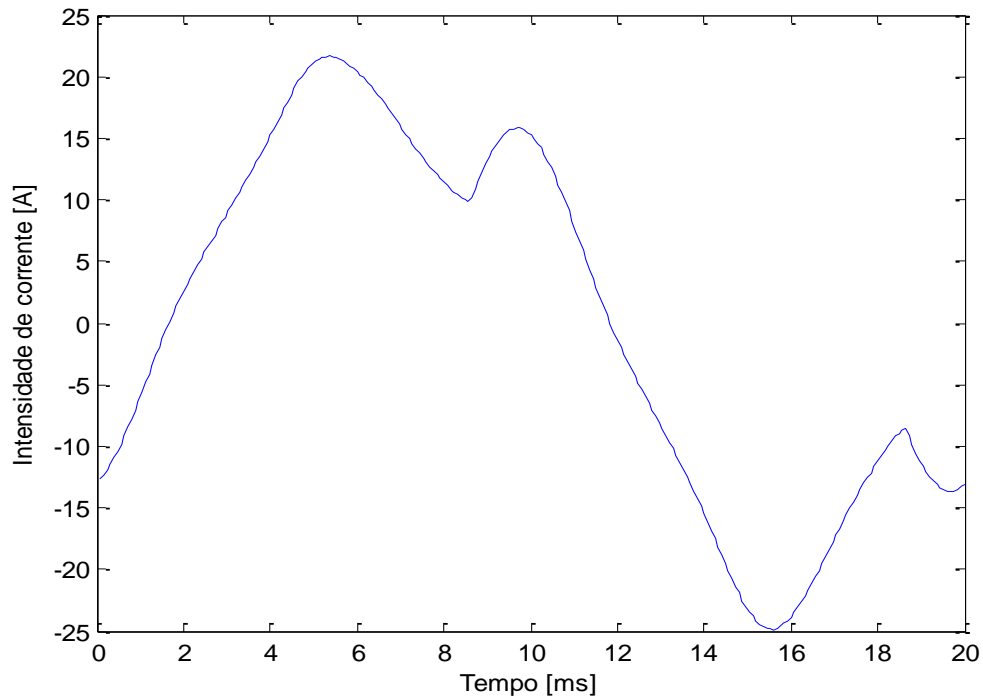


(a)

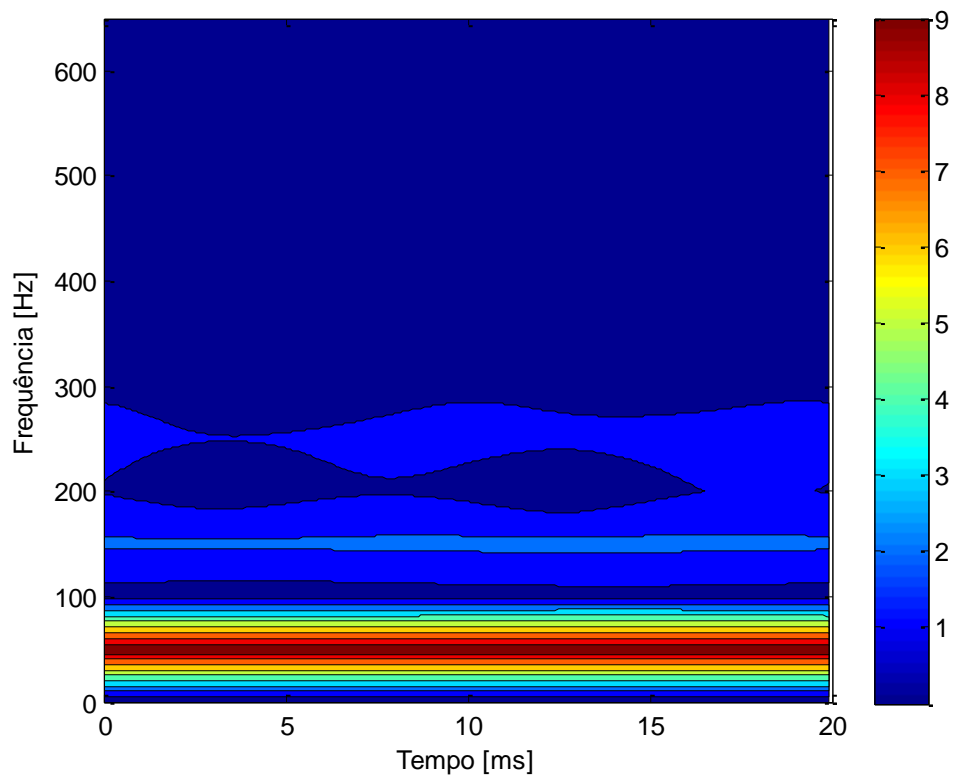


(b)

Figura 5.3 – Resultados experimentais referentes à batedeira. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.



(a)



(b)

Figura 5.4 – Resultados experimentais referentes ao micro-ondas. (a) Forma de onda da corrente consumida, (b) amplitude da transformada S.

A gestão da aprendizagem do MDE é realizada pelo utilizador através da interface gráfica representada na Figura 5.5. A situação retratada nesta figura diz respeito à iniciação do processo de aprendizagem do comportamento elétrico de uma máquina de lavar roupa que funciona no modo normal.

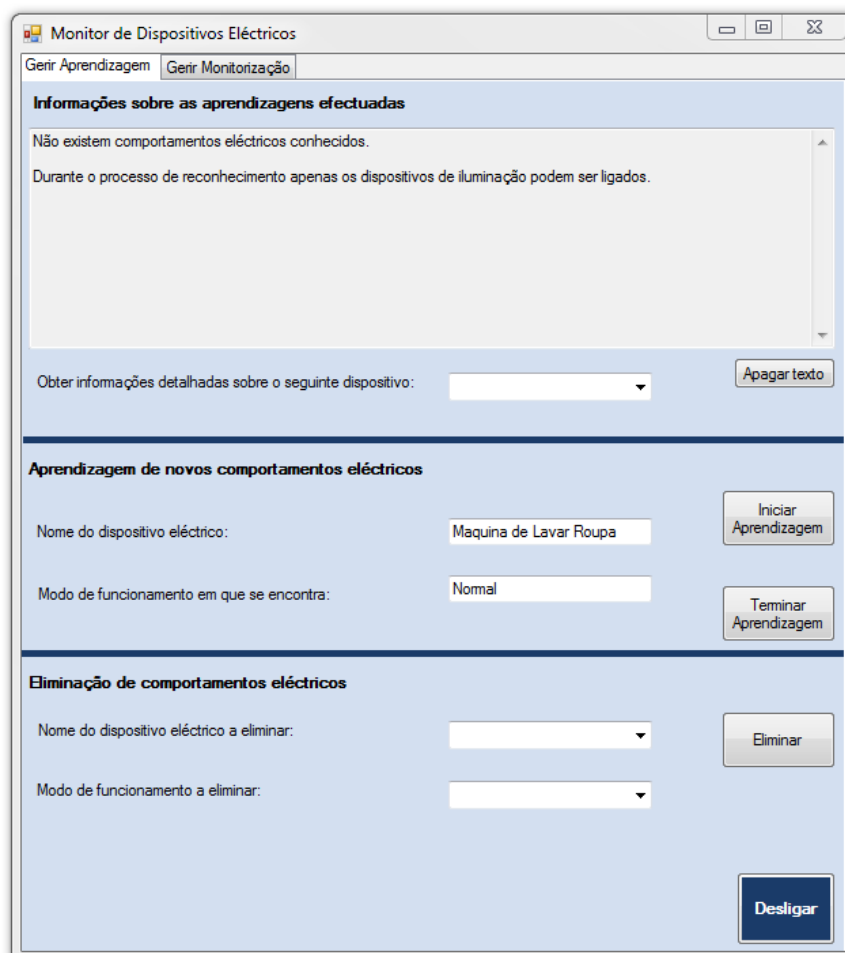


Figura 5.5 – Interface gráfica do MDE no início do processo de aprendizagem

O término do processo de aprendizagem é indicado pelo utilizador, devendo este assegurar que o dispositivo elétrico em questão terminou o seu funcionamento aquando da tomada de decisão. Depois de concluída a aprendizagem do comportamento elétrico do dispositivo, o MDE coloca à disposição do utilizador informações detalhadas sobre o mesmo. Concretamente, o utilizador é informado sobre o número de modos de funcionamento que o dispositivo selecionado possui, bem como o número de estados que o constitui e as respetivas variações provocadas na potência ativa. Na Figura 5.6 encontra-se representada a interface gráfica do MDE onde se podem visualizar as informações detalhadas sobre o comportamento

elétrico da máquina de lavar roupa.

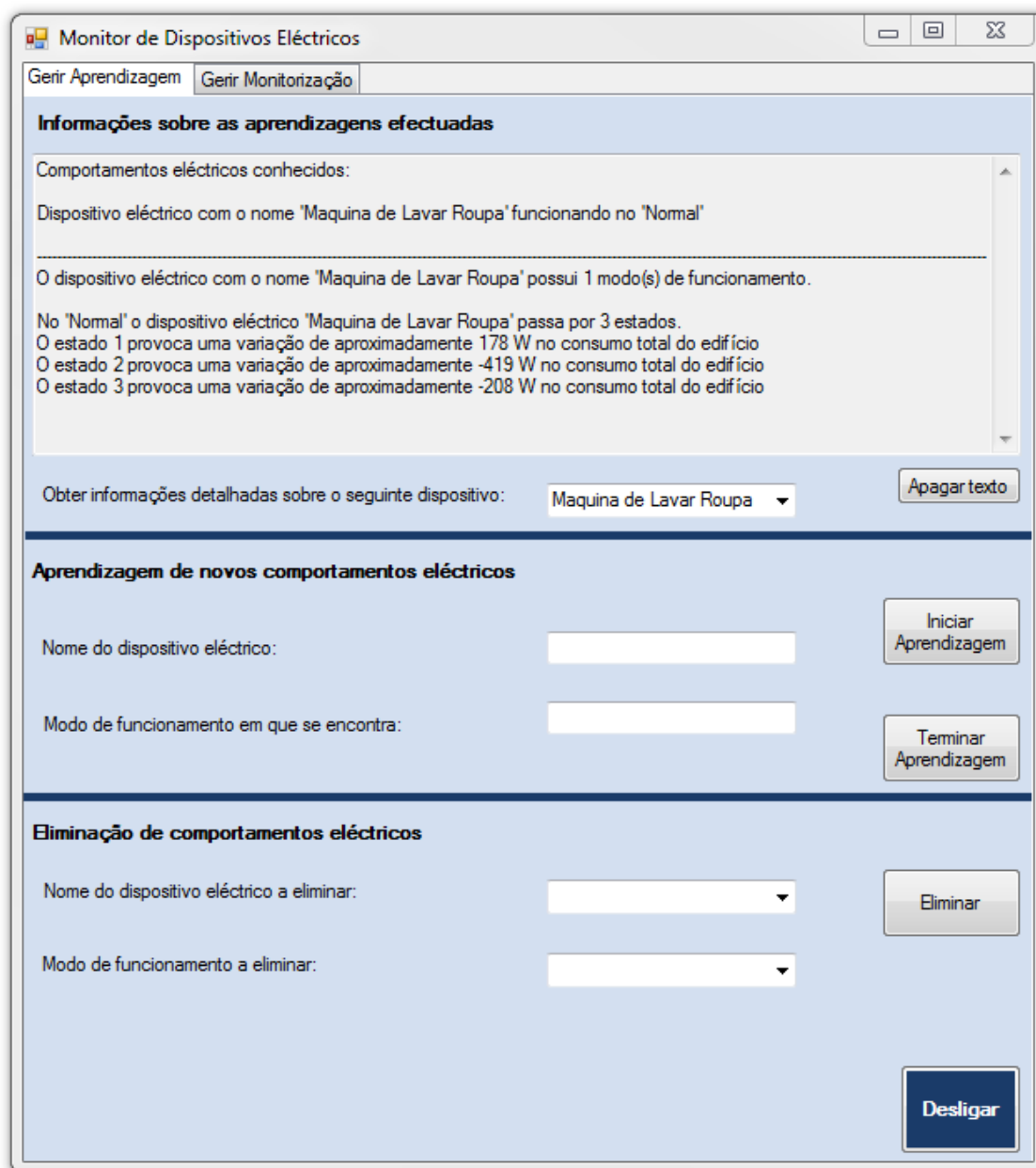


Figura 5.6 – Interface gráfica do MDE mostrando as informações detalhadas do comportamento eléctrico de um dispositivo.

A potência ativa consumida pela máquina de lavar roupa durante o processo de aprendizagem apresenta o andamento temporal retratado na Figura 5.7. Levando em consideração que um estado é caracterizado por um certo consumo de potência ativa, a partir da Figura 5.7 é possível concluir que ao longo do seu funcionamento o dispositivo eléctrico em questão repete a sua passagem por alguns dos estados. De forma a poupar os seus recursos computacionais, o

MDE apenas guarda as assinaturas elétricas dos estados que se distinguem de todos os outros por valores de potência ativa consumida superiores ou inferiores a P_0 (i.e., 100 W). A localização temporal dos eventos responsáveis pela primeira ocorrência de cada um dos estados, bem como as respectivas variações provocadas na potência ativa, encontram-se também representadas na Figura 5.7. A visualização desta figura permite concluir que o MDE apenas recolheu as assinaturas elétricas associadas à primeira ocorrência de cada estado, ignorando a ocorrência de todas as repetições. O facto de o MDE adquirir os dados utilizados na construção das assinaturas elétricas apenas 1 segundo após o evento detetado, implica que os picos existentes no consumo da potência ativa da Máquina de Lavar Roupa, cujas amplitude e duração variam ao longo do tempo, sejam ignorados aquando da construção das assinaturas elétricas.

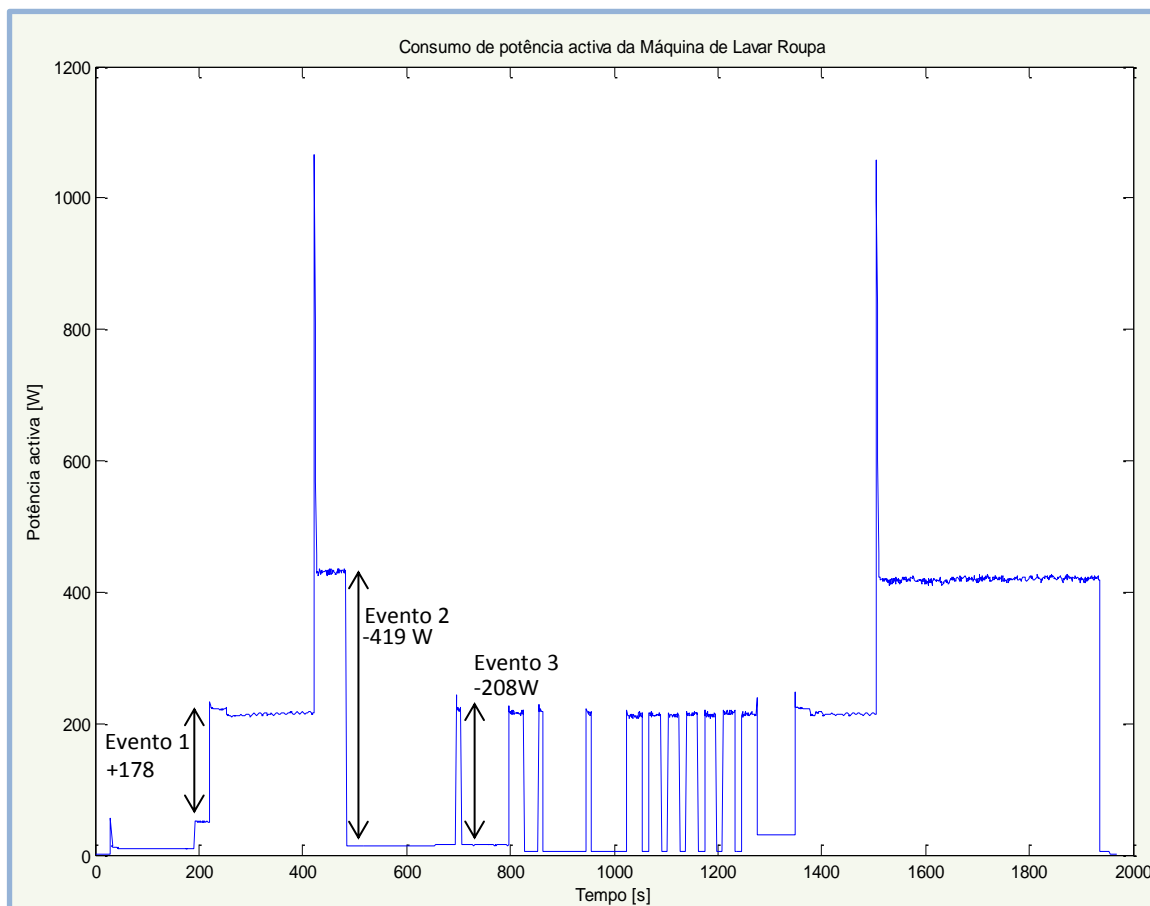


Figura 5.7 – Andamento temporal da potência ativa consumida pela Máquina de Lavar Roupa.

5.2 Modo de Monitorização

O funcionamento do Modo de Monitorização assenta no correto reconhecimento dos dispositivos elétricos responsáveis pelos eventos ocorridos. Este reconhecimento realiza-se à custa do cálculo do erro existente entre a assinatura de cada um dos estados de cada dispositivo e a assinatura inerente ao evento detetado. O referido erro é calculado a partir de (4.5). O dispositivo elétrico que contenha num dos seus modos de funcionamento a assinatura que originar o menor erro é responsabilizado pelo evento ocorrido.

Posto isto, após a aprendizagem do comportamento elétrico dos dispositivos cujas assinaturas se apresentam nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, procede-se à avaliação do seu processo de reconhecimento de cargas. Durante a experiência realizada, a potência ativa total consumida apresenta o andamento temporal exposto na Figura 5.8. Nesta figura encontram-se também presentes os nomes dos dispositivos elétricos que causaram quatro dos eventos ocorridos.

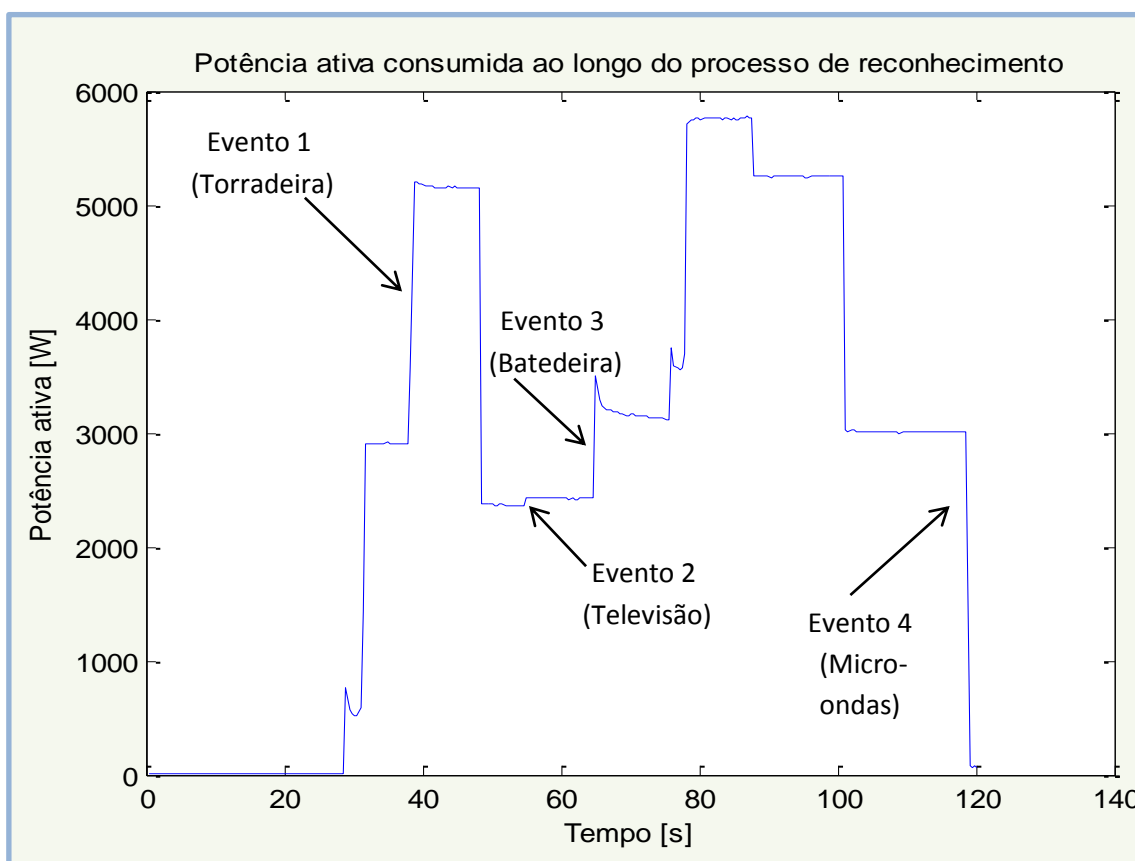


Figura 5.8 – Andamento temporal da potência ativa consumida ao longo do processo de reconhecimento.

Para cada um dos eventos identificados na Figura 5.8 (i.e., Evento 1, 2, 3, 4), apresenta-se na

Tabela 5.1 o erro calculado através de (4.5) para cada uma das assinaturas elétricas presentes nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4. Os resultados expostos na Tabela 5.1 mostram que o dispositivo responsável pelo respectivo evento origina um erro, calculado a partir de (4.5), três a quatro ordens de grandeza inferior aos originados pelos restantes dispositivos. A discrepância existente entre os erros calculados é evidente, alcançando-se deste modo o correto reconhecimento dos dispositivos responsáveis pelos eventos.

Evento	Dispositivo Elétrico			
	Torradeira	Televisão	Batedeira	Micro-ondas
1	9.01	1.36×10^4	3.54×10^3	3.14×10^4
2	1.38×10^4	8.07	3.42×10^3	2.52×10^4
3	3.63×10^4	3.64×10^3	12.8	1.03×10^4
4	3.78×10^4	2.73×10^4	1.56×10^4	40.1

Tabela 5.1 – Erros calculados a partir de (4.5) para cada assinatura elétrica em cada evento ocorrido.

Ao gerir a monitorização dos dispositivos elétricos presentes no edifício, o utilizador tem à sua disposição várias funcionalidades que lhe são expostas através da interface gráfica representada nas Figuras 5.9 e 5.10. As informações apresentadas, a título de exemplo, provêm de uma experiência realizada com o intuito de determinar a precisão de reconhecimento do MDE.

A partir da interface gráfica apresentada na Figura 5.9, o utilizador tem acesso aos horários de funcionamento e respetivos consumos energéticos e custos monetários associados ao dispositivo elétrico com o nome Aquecedor. Através da interface gráfica presente na Figura 5.10, o utilizador é informado sobre a data e hora de ocorrência de cada evento, recebendo ainda informação sobre os dispositivos elétricos e respetivos modos de funcionamento responsáveis pelas variações no consumo energético do edifício, durante o período de tempo selecionado. Além destas informações, o utilizador tem ainda acesso a estatísticas calculadas referentes ao intervalo de tempo selecionado.

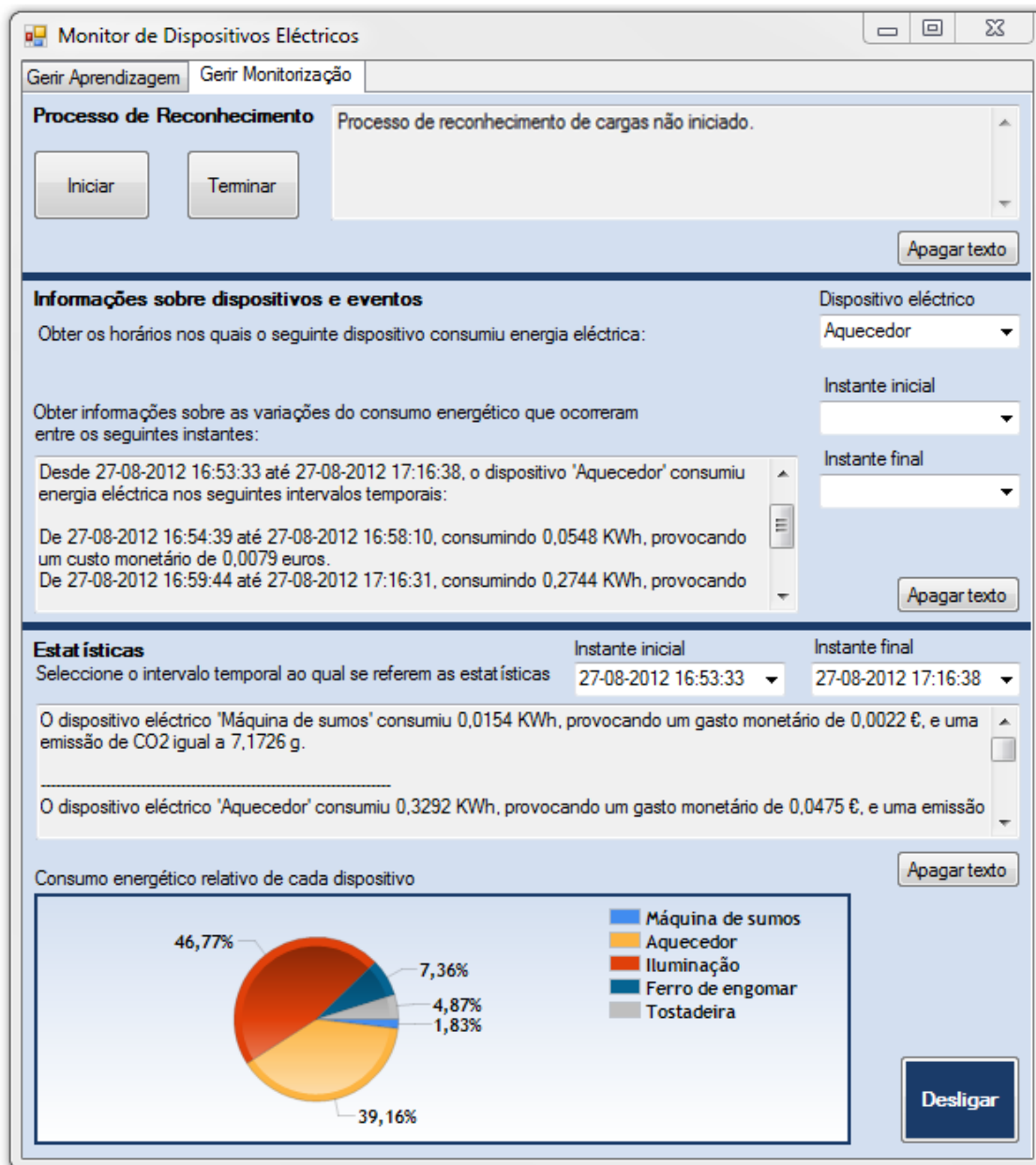


Figura 5.9 – Interface gráfica do MDE mostrando os horários de funcionamento de um dispositivo eléctrico e as estatísticas calculadas.

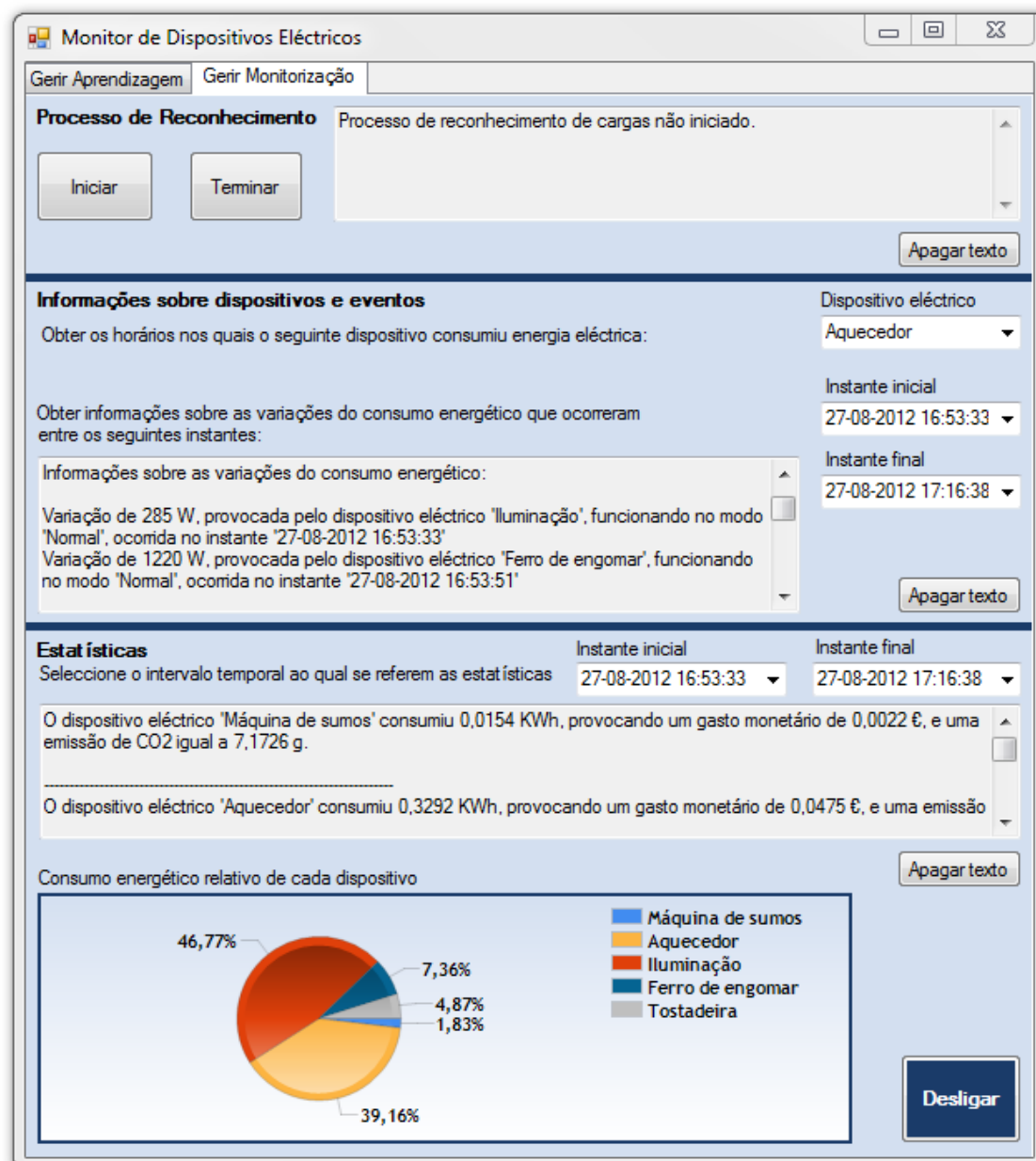


Figura 5.10 – Interface gráfica do MDE mostrando as informações associadas aos eventos ocorridos e as estatísticas calculadas.

A potência consumida ao longo de toda a experiência encontra-se representada na Figura 5.11. Na tabela 5.2 apresentam-se os dispositivos eléctricos utilizados nesta experiência, bem como o número de eventos correta e incorretamente atribuídos a cada um dos eletrodomésticos. Dos 56 eventos detetados, o MDE reconheceu corretamente 54 eventos, resultando numa precisão de reconhecimento de 96,43%. Nos dois eventos reconhecidos erradamente, o MDE responsabilizou o eletrodoméstico com o nome Ferro de Engomar pelos eventos causados pela entrada e saída de funcionamento do eletrodoméstico denominado

Tostadeira.

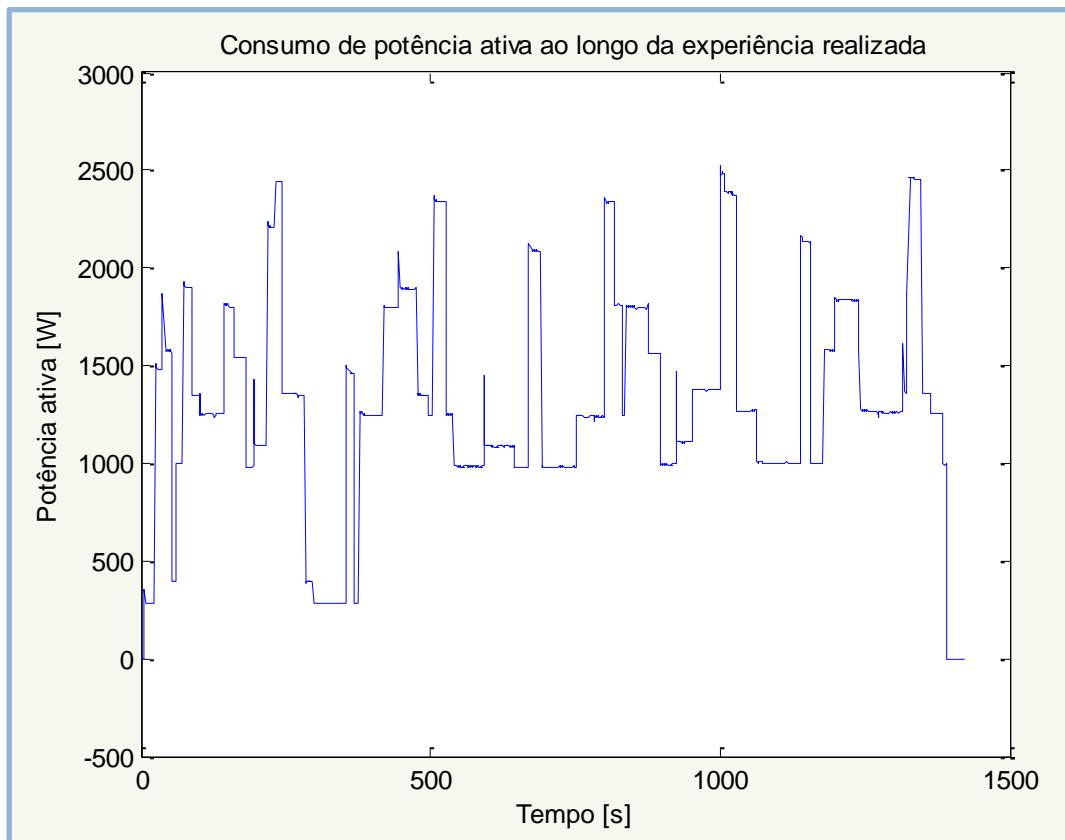


Figura 5.11 – Andamento temporal da potência ativa consumida no decorrer na experiência realizada.

Dispositivo Elétrico	Eventos Corretamente atribuídos	Eventos incorretamente atribuídos
Aquecedor	6	0
Ferro de Engomar	18	2
Iluminação	10	0
Máquina de Sumos	12	0
Tostadeira	8	0
Total	54	2

Tabela 5.2 – Dispositivos elétricos utilizados na experiência realizada e número de eventos correta e incorretamente atribuídos.

Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo começa por apresentar a síntese geral do trabalho desenvolvido, levando em consideração os objetivos estabelecidos para o mesmo. De seguida apresentam-se as contribuições da investigação realizada, bem como do sistema desenvolvido. Por último, os trabalhos futuros que poderiam melhorar o sistema desenvolvido são expostos.

6.1 Síntese Geral

O acesso às várias formas de energia, a preços acessíveis, apresenta-se indiscutivelmente como um requisito fundamental ao desenvolvimento económico e social de qualquer sociedade. No entanto, tendo em consideração a progressiva redução dos recursos energéticos, o acesso a este bem poderá estar condicionado no futuro caso não se adotem as medidas necessárias para satisfazer a crescente procura energética. Neste contexto, o melhoramento da eficiência energética revela-se parte integrante da solução para este problema, uma vez que reduz a quantidade de energia necessária para o cumprimento de um determinado nível de conforto, apresentando em simultâneo os menores custos associados.

No caso particular do consumo de energia elétrica em edifícios, o acesso em tempo real a informações detalhadas sobre o consumo energético destas instalações provoca nos seus utilizadores a adoção de determinados comportamentos que conduzem ao melhoramento da eficiência energética. Assim, com o intuito de provocar o referido melhoramento, este trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema de monitorização não intrusiva de cargas, capaz fornecer informação detalhada sobre o consumo energético de cada um dos dispositivos elétricos presentes num determinado edifício.

O sistema desenvolvido neste trabalho (i.e., o MDE) é capaz de reconhecer, em tempo real, os dispositivos elétricos responsáveis pelas variações no consumo energético do respetivo edifício. A partir dos dados provenientes do processo de reconhecimento de cargas, o MDE é capaz de determinar os horários de funcionamento de cada um dos dispositivos elétricos presentes no edifício, bem como a energia elétrica consumida em cada um destes períodos temporais e os respetivos custos monetários e emissões de CO₂ associados.

Nas experiências realizadas, o MDE aprendeu corretamente o comportamento elétrico de

todos os dispositivos utilizados, utilizando para tal a transformada S como assinatura elétrica de cada um dos estados que compõem os referidos comportamentos. Utilizando os dados provenientes destas aprendizagens, o MDE reconheceu corretamente os dispositivos responsáveis pelos eventos detetados em 96,43 por cento das ocorrências. Além destes resultados, o sistema desenvolvido foi ainda capaz de fornecer várias estatísticas sobre o consumo energético do edifício durante a experiência realizada.

6.2 Contribuição da Investigação

Os sistemas de monitorização não intrusiva de cargas apresentados no capítulo 2 adquirem os dados necessários à construção das assinaturas elétricas no ponto de fornecimento de energia aos dispositivos (i.e., nas tomadas elétricas), aumentando desta forma o nível de intrusão destes sistemas. Contrariamente a estes, o MDE apenas utiliza no seu processo de aprendizagem dados adquiridos no ponto de entrada de energia elétrica no edifício (i.e., quadro elétrico), simplificando assim a sua utilização.

Relativamente aos sistemas apresentados no capítulo 2, o MDE oferece funcionalidades que detalham de uma melhor forma o consumo energético do respetivo edifício. Assim, o utilizador adquire uma melhor perceção sobre a forma como a energia elétrica é consumida, podendo, deste modo, modificar alguns dos seus comportamentos e melhorar a eficiência energética nos edifícios.

O MDE apresenta-se como pioneiro na utilização da transformada S na construção de assinaturas elétricas. O facto de a transformada S apresentar simultaneamente uma resposta em amplitude invariante e uma resolução dependente da frequência, permite determinar da melhor forma as componentes harmónicas presentes no sinal em cada instante, relativamente a outras representações tempo-frequência existentes.

As características supracitadas da transformada S e o facto de o sinal de corrente utilizado na construção das referidas assinaturas ter como referência o sinal de tensão, permitem que dispositivos elétricos, cujo consumo de potência ativa seja semelhante, possam ser corretamente diferenciados. Os resultados obtidos confirmam que a transformada S da forma de onda da corrente consumida pelos dispositivos, tendo como referência o sinal de tensão, permite descrever corretamente os seus comportamento elétricos.

O trabalho desenvolvido deu origem à publicação dos seguintes artigos científicos:

- Martins, J.F.; Lopes, R.; Lima, C.; Romero-Cadaval, E.; Vinnikov, D.; , "A novel nonintrusive load monitoring system based on the S-Transform," Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM2012), 13th International Conference on , vol., no., pp.973-978, 24-26 May 2012;
- J. F. Martins, J. A. Oliveira-Lima, V. Delgado-Gomes, Rui Lopes, D. Silva, S. Vieira, C. Lima; , "Smart Homes and Smart Buildings," The 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012); e
- J. F. Martins, Rui Lopes, V. Fernão Pires, A. J. Pires, Celson Lima; , "The Application of S-Transform in Fault Detection and Diagnosis of Grid-Connected Power Inverters," aceite em IEEE Industrial Electronics, IECON 2012 – 38th Annual Conference.

Os três artigos científicos supracitados encontram-se em anexo.

6.3 Trabalhos Futuros

A principal limitação do MDE prende-se com o facto de apenas detetar eventos que se distanciem temporalmente entre si por mais de 1 segundo. Esta limitação é provocada pelo tempo de espera estático referente ao término do transitório exibido pela corrente elétrica consumida por alguns dispositivos. A solução para esta limitação assenta na adoção de um tempo de espera variável, cuja duração seja uma função dos dispositivos elétricos existentes no edifício (e.g., as cargas indutivas apresentam transitórios de maior duração do que as cargas resistivas puras).

O limiar de potência ativa utilizado no processo de reconhecimento de cargas do MDE, para a deteção das variações do consumo energético dos edifícios, apresenta uma magnitude estática. Deste modo, apenas os dispositivos elétricos cujo consumo de potência ativa seja superior a este limiar podem ser monitorizados. Num trabalho futuro, de forma a possibilitar a monitorização dos dispositivos menos consumidores, a magnitude do referido limiar poderia variar em função dos dispositivos elétricos presentes no edifício.

De forma a facilitar o acesso às informações fornecidas pelo MDE, seria interessante desenvolver uma aplicação para dispositivos móveis que as disponibilizasse em tempo real. Deste modo, o utilizador poderia acompanhar o comportamento dos vários dispositivos elétricos a partir de qualquer localização, permitindo-lhe adquirir uma melhor perceção sobre a forma como a energia elétrica é gasta no edifício em questão.

Por último, poder-se-ia elaborar um estudo sobre a influência do MDE nos comportamentos dos utilizadores de vários edifícios. A partir deste estudo seria possível inferir sobre os efeitos provocados pelo MDE no melhoramento da eficiência energética em edifícios.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Varun, Ravi Prakash, I.K. Bhat, A figure of merit for evaluating sustainability of renewable energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 6, August 2010, Pages 1640-1643, ISSN 1364-0321, 10.1016/j.rser.2010.02.003.
- [2] Bukarica, V.; Robic, S.; Tomsic, Z., "Securing energy supply by harnessing negajoules," *Energy Market (EEM)*, 2011 8th International Conference on the European , vol., no., pp.741-746, 25-27 May 2011.
- [3] *World Energy Outlook 2006*, International Energy Agency, 2006.
- [4] J.A. Stanislaw, "Climate Changes Everything: The Dawn of the Green Economy", Delloite Development LCC, 2008.
- [5] *Action Plan for Energy Efficiency: Realizing the Potential (COM(2006) 545 final)*, European Commission, 2006.
- [6] Attari, S. Z. et al., 2010. Public perceptions of energy consumption and savings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(37), p.16054-16059.
- [7] Chisik, Y., 2011. *An Image of Electricity : Towards na Understanding of How People Perceive Electricity*. Ifip International Federation For Information Processing, p.100-117.
- [8] *World Energy Outlook 2010*, International Energy Agency (IEA), IEA PUBLICATIONS, Paris, France, 2010
- [9] G. W. Hart, "Nonintrusive Appliance Load Monitoring," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 80, pp. 1870-1891, 1992.
- [10] F. Sultanem, "Using Appliance Signatures for Monitoring Residential Loads at Meter Panel Level," *IEEE Transactions on ower Delivery*, Vol. 6., pp. 1380-1385, 1991.
- [11] C. Laughman, et al., "Power Signature Analysis," *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 56-

63, March/April 2003.

- [12] L. K. Norfold, S. B. Leeb, "Non-intrusive electrical load monitoring in commercial buildings based on steady-state and transient load-detection algorithms," *Energy and Buildings*, Vol. 24, pp. 51-64, 1996.
- [13] Zeifman, M.; Roth, K.; , "Nonintrusive appliance load monitoring: Review and outlook," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on* , vol.57, no.1, pp.76-84, February 2011.
- [14] J. Powers, B. Margossian, B. Smith, "Using a Rule-Based Algorithm to Disaggregate End-Use Load Profiles from Premise-level Data," *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 42-47, 1991.
- [15] L. Farinaccio, R. Zmeureanu, "Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses," *Energy and Buildings*, vol. 30, pp. 245-259, 1999.
- [16] S. R. Shaw, S. B. Leeb, , L. K. Norfold, R. W. Cox, "Nonintrusive Load Monitoring and Diagnostics in Power Systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, pp. 1445-1454, 2008.
- [17] D. Srinivasan, W. S. Ng, A. C. Liew, "Neural-Network-Based Signature Recognition for Harmonic Source Identification," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 398-405, 2006.
- [18] S. Gupta, M. S. Reynolds, S. N. Patel, "ElectriSense: Single-Point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in the Home," *Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 139-148, 2010.
- [19] H.Y. Lam, G. S. K. Fung, W. K. Lee, "A Novel Method to Construct Taxonomy of Electrical Appliances Based on Load Signatures," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 653-660, May 2007.
- [20] K. Suzuki, S. Inagaki, T. Suzuki, H. Nakamura, K. Ito, "Nonintrusive Appliance Load Monitoring Based on Integer Programming," *SICE Annual Conference*, pp. 2742-2747, 2008.
- [21] J. Liang, S. K. K. Ng, G. Kendall, J. W. M. Cheng, "Load Signature Study—Part I: Basic

Concept, Structure, and Methodology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 551-560, 2010.

- [22] J. Liang, S. K. K. Ng, G. Kendall, J. W. M. Cheng, "Load Signature Study—Part II: Disaggregation Framework, Simulation, and Applications," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 561- 569, 2010.
- [23] E.O. Brigham. The fast fourier transform. Prentice-Hall Inc., 1974.
- [24] Simon Haykin. An introduction to analog and digital communications. Wiley, New York, 1989.
- [25] Portnoff, M.; , "Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis," *Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE Transactions on , vol.28, no.1, pp. 55- 69, Feb 1980.
- [26] D. Gabor; Theory of communication, J. IEE, vol. 93(III), no. 26, pp. 429 - 457, 1946.
- [27] P. Goupillaud, A. Grossmann, J. Morlet, Cycle-octave and related transforms in seismic analysis, *Geoexploration* 23 (1984) 85–102.
- [28] O. Rioul, M. Vetterli, Wavelets and signal processing, *IEEE Signal Processing Magazine* 8 (1991) 14–38.
- [29] I. Daubechies, "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 36, no. 5, Sept. 1990.
- [30] Xinhao Tian; Jing Lin; Fyfe, K.R.; Zuo, M.J.; , "Gearbox fault diagnosis using independent component analysis in the frequency domain and wavelet filtering," *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on*, vol.2, no., pp. II- 245-8 vol.2, 6-10 April 2003.
- [31] Stockwell, R.G.; Mansinha, L.; Lowe, R.P., "Localization of the complex spectrum: the S transform," *Signal Processing*, IEEE Transactions on , vol.44, no.4, pp.998-1001, Apr 1996.
- [32] Ventosa, S.; Simon, C.; Schimmel, M.; Danobeitia, J.J.; Manuel, A., "The S -Transform From a Wavelet Point of View," *Signal Processing*, IEEE Transactions on , vol.56, no.7, pp.2771-

2780, July 2008.

[33] Modbus (2012). [Online]

Disponível em <http://www.modbus.org>.

[34] EDP,2012. *Origens da Eletricidade*. [Online]

Disponível em

<http://www.edp.pt/pt/empresas/precolivre/energiacorporate/Pages/EnergianaEDPComericial.aspx>, consultado em 25/07/2012.

ANEXO I

Código Fonte dos Procedimentos

```
public void leitura_corrente_tensao(double[] corrente, double[] tensao, int freq_amost, int duracao)
{
    double[] data = new double[NrPontosPeriodoLeitura * 2];
    int i = 0;
    Ler2sinaisInit(out taskHandle, freq_amost, duracao); // Inicializa a leitura, cria uma nova tarefa
    error = Ler2sinais(taskHandle, data); // Leitura da tensao e corrente
    Ler2sinaisClose(taskHandle); // Termina a tarefa anteriormente criada

    for (i = 0; i < NrPontosPeriodoLeitura; i++) // Atribuição dos sinais lidos aos vectores "Tensao" e "Corrente"
    {
        tensao[i] = (-data[2 * i] + 2.5) * (230 / 1.656) * Math.Sqrt(2);
        corrente[i] = (data[(2 * i) + 1] - 2.5) * (15 / 0.625);
    }
}

private void aprendizagem(string dispositivo, string modo_de_funcionamento)
{
    // Parametros referentes à leitura
    double[] data = new double[NrPontosPeriodoLeitura * 2];
    double[] tensao = new double[NrPontosPeriodoLeitura];
    double[] corrente = new double[NrPontosPeriodoLeitura];
    double[] correnteActual = new double[NrPontosPeriodo];
    double[] correnteAnterior = new double[NrPontosPeriodo];
    double[] correnteDif = new double[NrPontosPeriodo];

    // Parametros referentes à Transformada S
    double[] st_dif = new double[2 * NrPontosPeriodo * ((NrPontosPeriodo / 2) + 1)];
    double[] st_dif_ABS = new double[NrPontosPeriodo * ((NrPontosPeriodo / 2) + 1)];

    // Outros parametros
    int i = 0;
    int aux = -1;
    int dispositivo_existente = 0;
    int modo_existente = 0;
    double pot_act_last = 0;
    double pot_act = 0;
    double potencia_estado = 0;
    double potencia_inicial = 0;
    System.Text.StringBuilder sb_corrente_dif = new System.Text.StringBuilder();
    System.Text.StringBuilder sb_st_dif = new System.Text.StringBuilder();

    // Listas com o tempo e potencia consumida pelo electrodomestico
    List<double> potencia = new List<double>();
    List<double> tempoList = new List<double>();

    // Parametros Base de Dados
    int ID_Modo_de_Funcionamento = -1;
    int ID_dispositivo = -1;
    int ID_estado = -1;
    int nr_estados = -1;
    int nr_eventos = 0;
    int potencia_BD = -1;
    int gravar = -1;
```

```

string descricao;

DateTime centuryBegin = new DateTime(2011, 11, 11);
DateTime time1;
DateTime time2;
System.Text.StringBuilder sb = new System.Text.StringBuilder();

MySQLCommand cmd1 = new MySQLCommand("SELECT COUNT(descricao) FROM Dispositivo WHERE
descricao=" + dispositivo + "'", mConn);

if (resultado(cmd1) == 0)
{
    // Gera uma chave unica para o dispositivo a gravar
    ID_dispositivo = IdGenerator("Dispositivo");
    // Gravação do Dispositivo na Base de Dados
    cmd1 = new MySQLCommand("INSERT INTO Dispositivo VALUES (" + Convert.ToString(ID_dispositivo) + ","
+ dispositivo + "')", mConn);
    cmd1.ExecuteNonQuery();
}
else
    dispositivo_existente = 1;

cmd1 = new MySQLCommand("SELECT idDispositivo FROM Dispositivo WHERE descricao =" + dispositivo + "'",
mConn);
ID_dispositivo = resultado(cmd1);

// Gravacao do modo de funcionamento na BD, se necessario (e.g., podem existir varios dispositivos que
funcionam no modo normal)
cmd1 = new MySQLCommand("SELECT COUNT(descricao) FROM Modo_de_funcionamento WHERE
descricao=" + modo_de_funcionamento + "'", mConn);
cmd1.ExecuteNonQuery();
MySQL.Data.MySqlClient.MySqlDataReader myDataReader = cmd1.ExecuteReader();
myDataReader.Read();
aux = myDataReader.GetInt32(0);
myDataReader.Close();

// Grava o modo de funcionamento na BD, se este ainda nao existir
if (aux == 0)
{
    cmd1 = new MySQLCommand("INSERT INTO Modo_de_funcionamento VALUES(" +
Convert.ToString(IdGenerator("Modo_de_funcionamento")) + "," + modo_de_funcionamento + "'",
mConn);
    cmd1.ExecuteNonQuery();
}
else
    modo_existente = 1;

// Para não gravar modos de dispositivos repetidos
if (!(modo_existente == 1 && dispositivo_existente == 1))
{
    // Obtem-se o Id deste modo de funcionamento
    cmd1 = new MySQLCommand("SELECT idModo_de_Funcionamento FROM Modo_de_Funcionamento
WHERE descricao =" + modo_de_funcionamento + "'", mConn);
    ID_Modo_de_Funcionamento = resultado(cmd1);

    leitura_corrente_tensao(corrente, tensao, FREQ_AMOST, DURACAO);
    pot_act_last = potenciaActiva(tensao, corrente); // Calculo da Potencia activa referente A leitura actual
    potencia_inicial = pot_act_last;

    time1 = DateTime.Now;

```

```

while (terminar_aprendizagem == 0)
{
    leitura_corrente_tensao(corrente, tensao, FREQ_AMOST, DURACAO);
    pot_act = potenciaActiva(tensao, corrente); // Calculo da Potencia activa referente A leitura actual
    time2 = DateTime.Now;
    tempoList.Add((time2.Ticks - time1.Ticks) / 10000); // Abcissa do gráfico da potencia [ms]
    potencia.Add(pot_act); // Adiciona o valor calculado à lista da potencia consumida

    correnteActual = rearranjoCorrente(tensao, corrente); // A corrente começa no zero da tensao

    if ((pot_act - pot_act_last) > POTENCIA_EVENTO) // Tratar evento crescente...
    {
        cmd1 = new MySqlCommand("SELECT COUNT(idEstado) FROM
Estado_do_Dispositivo_no_Modo_de_Funcionamento WHERE idDispositivo =" + Convert.ToString(ID_dispositivo) +
" AND idModo_de_Funcionamento =" + Convert.ToString(ID_Modo_de_Funcionamento), mConn);
        nr_estados = resultado(cmd1);

        // Se ainda não existe nenhum estado guardado na BD então o evento corresponde a um estado novo
        if (nr_estados == 0)
        {
            gravar = 1;
        }
        else
        { // Se já existe algum estado, então verifica-se se o novo evento não é repetido, considerando uma
margem de POTENCIA_EVENTO [W]
            // Grava na BD se não existir nenhum estado semelhante_1
            gravar = 1;
            for (ID_estado = 1; ID_estado <= nr_estados; ID_estado++)
            {
                cmd1 = new MySqlCommand("SELECT potencia_activa FROM
Estado_do_Dispositivo_no_Modo_de_Funcionamento WHERE idDispositivo =" + Convert.ToString(ID_dispositivo) +
" AND idModo_de_Funcionamento =" + Convert.ToString(ID_Modo_de_Funcionamento) + " AND idEstado =" +
Convert.ToString(ID_estado), mConn);
                potencia_BD = resultado(cmd1);
                // Grava na BD se não existir nenhum estado semelhante_2
                if (((pot_act - pot_act_last) < potencia_BD + POTENCIA_EVENTO) && ((pot_act - pot_act_last) >
potencia_BD - POTENCIA_EVENTO) && potencia_BD > 0)
                {
                    gravar = 0;
                }
            }
        }
        if (gravar == 1)
        {
            nr_eventos = nr_eventos + 1;
            cmd1 = new MySqlCommand("SELECT COUNT(idEstado) FROM Estado", mConn);

            // É necessário comparar o numero de eventos desta aprendizagem com o numero de estados
presentes na BD
            if (nr_eventos > resultado(cmd1))
            {
                ID_estado = IdGenerator("Estado");
                cmd1 = new MySqlCommand("INSERT INTO Estado VALUES (" + Convert.ToString(ID_estado) + ","
+ "" "" + """, mConn);
                cmd1.ExecuteNonQuery();
            }

            for (i = 0; i < NrPontosPeriodo; i++)
            {
                correnteDif[i] = correnteActual[i] - correnteAnterior[i];
            }
            st(NrPontosPeriodo, 0, 0, correnteDif, st_dif); // Calculo da S-Transform do sinal de diferença

```



```

    for (i = 0; i < NrPontosPeriodo; i++)
    {
        correnteDif[i] = correnteAnterior[i] - correnteActual[i];
        // sb_corrente_dif.AppendLine(Convert.ToString(correnteDif[i]));
    }
    st(NrPontosPeriodo, 0, 0, correnteDif, st_dif); // Calculo da S-Transform do sinal de diferença
    st_ABS(st_dif, st_dif.Length, st_dif_ABS);

    for (i = 0; i < st_dif_ABS.Length; i++)
    {
        sb_st_dif.AppendLine(Convert.ToString(st_dif_ABS[i]));
    }
    potencia_estado = (pot_act - pot_act_last);
    if (Math.Abs(potencia_inicial - pot_act) < POTENCIA_EVENTO)
        descricao = "Final";
    else
        descricao = "Not Final";
    cmd1 = new MySqlCommand("INSERT INTO Estado_do_Dispositivo_no_Modo_de_Funcionamento
VALUES(" + Convert.ToString(ID_dispositivo) + "," + Convert.ToString(ID_Modo_de_Funcionamento) + "," +
Convert.ToString(nr_eventos) + "," + Convert.ToString(FA) + "," + sb_st_dif.ToString() + "," +
Convert.ToString(Convert.ToInt32(potencia_estado)) + "," + descricao + ")", mConn);
    cmd1.ExecuteNonQuery();
    sb_st_dif.Remove(0, sb_st_dif.Length);
}
}
pot_act_last = pot_act;
gravar = 0;
// Corrente anterior passa a ser a corrente actual
for (i = 0; i < NrPontosPeriodo; i++)
    correnteAnterior[i] = correnteActual[i];
}
}
else
    MessageBox.Show("O comportamento do dispositivo eléctrico com o nome " + dispositivo + ','
funcionando no " + modo_de_funcionamento + ", já é conhecido");
    terminar_aprendizagem = 0;

}

private void informacao_detalhada(string dispositivo)
{
    string texto;
    string descricao_modos;
    int nr_modos = -1;
    int nr_estados;
    int idDispositivo = -1;
    int idEstado = -1;
    int potencia_activa = 0;
    int i = 0;
    int k = 0;

    textBox1.AppendText("\r\n");
    textBox1.AppendText("-----");
    textBox1.AppendText("\r\n");

    MySqlCommand cmd1 = new MySqlCommand("SELECT idDispositivo FROM Dispositivo WHERE descricao = "
+ dispositivo + "'", mConn);
    idDispositivo = resultado(cmd1);

    cmd1 = new MySqlCommand("SELECT COUNT(DISTINCT idMODO_de_funcionamento) FROM

```

```

Estado_do_dispositivo_no_modos_de_funcionamento WHERE idDispositivo = " + Convert.ToString(idDispositivo),
mConn);
nr_modos = resultado(cmd1);

texto = "O dispositivo eléctrico com o nome " + dispositivo + " possui " + Convert.ToString(nr_modos) + "
modo(s) de funcionamento.";
textBox1.AppendText(texto);
textBox1.AppendText("\r\n");
textBox1.AppendText("\r\n");

for (i = 1; i <= nr_modos; i++)
{
cmd1 = new MySqlCommand("SELECT descricao FROM Modo_de_funcionamento WHERE
idModo_de_funcionamento = " + Convert.ToString(i), mConn);
descricao_modos = resultado_string(cmd1);

cmd1 = new MySqlCommand("SELECT COUNT(DISTINCT idEstado) FROM
Estado_do_dispositivo_no_modos_de_funcionamento WHERE idModo_de_funcionamento = " + Convert.ToString(i)
+ " AND idDispositivo = " + Convert.ToString(idDispositivo), mConn);
nr_estados = resultado(cmd1);

texto = "No " + descricao_modos + " o dispositivo eléctrico " + dispositivo + " passa por " +
Convert.ToString(nr_estados) + " estados.";
textBox1.AppendText(texto);
textBox1.AppendText("\r\n");

for (idEstado = 1; idEstado <= nr_estados; idEstado++)
{
cmd1 = new MySqlCommand("SELECT potencia_activa FROM
Estado_do_dispositivo_no_modos_de_funcionamento WHERE idModo_de_funcionamento = " + Convert.ToString(i)
+ " AND idDispositivo = " + Convert.ToString(idDispositivo) + " AND idEstado = " + Convert.ToString(idEstado),
mConn);
potencia_activa = resultado(cmd1);

texto = "O estado " + Convert.ToString(idEstado) + " provoca uma variação de aproximadamente " +
potencia_activa + " W no consumo total do edifício";
textBox1.AppendText(texto);
textBox1.AppendText("\r\n");
}
if (i != nr_modos)
textBox1.AppendText("\r\n");
}
}

private void reconhecimento ()
{
// Parametros referentes à leitura
double[] data = new double[NrPontosPeriodoLeitura * 2];
double[] tensao = new double[NrPontosPeriodoLeitura];
double[] corrente = new double[NrPontosPeriodoLeitura];
double[] correnteActual = new double[NrPontosPeriodo];
double[] correnteAnterior = new double[NrPontosPeriodo];
double[] correnteDif = new double[NrPontosPeriodo];

// Parametros referentes à Transformada S
double[] st_dif = new double[2 * NrPontosPeriodo * ((NrPontosPeriodo / 2) + 1)];
double[] st_dif_ABS = new double[NrPontosPeriodo * ((NrPontosPeriodo / 2) + 1)];

// Parametros referentes à BD
int idDispositivo = -1;
int idModo_de_funcionamento = -1;
int idEstado = -1;

```

```

MySQLCommand cmd1;

// Tempos
DateTime instante;

// Listas de dispositivos
List<string> dispositivos_ligados = new List<string>();
List<string> dispositivos_desligados = new List<string>();

// Listas com o tempo e potencia consumida pelo dispositivo
List<double> potencia = new List<double>();
List<double> tempoList = new List<double>();

// Outros parametros
int i = 0;
double pot_act_last = 0;
double pot_act = 0;
double variacao_do_consumo = 0;
System.Text.StringBuilder sb_corrente_dif = new System.Text.StringBuilder();
System.Text.StringBuilder sb_st_dif = new System.Text.StringBuilder();
DateTime centuryBegin = new DateTime(2011, 11, 11);
DateTime time1;
DateTime time2;
System.Text.StringBuilder sb = new System.Text.StringBuilder();

// Carregamento das assinaturas presentes na BD
List<Assinatura> assinaturas = new List<Assinatura>();
carrega_assinaturas(assinaturas);

SetText("Processo de reconhecimento iniciado.");

leitura_corrente_tensao(corrente, tensao, FREQ_AMOST, DURACAO);
pot_act_last = potenciaActiva(tensao, corrente); // Calculo da Potencia activa referente A leitura actual

time1 = DateTime.Now;
while (terminar_reconhecimento == 0)
{
    leitura_corrente_tensao(corrente, tensao, FREQ_AMOST, DURACAO);
    pot_act = potenciaActiva(tensao, corrente); // Calculo da Potencia activa referente A leitura actual
    correnteActual = rearranjoCorrente(tensao, corrente); // A corrente começa no zero da tensao

    time2 = DateTime.Now;
    tempoList.Add((time2.Ticks - time1.Ticks) / 10000); // Abcissa do gráfico da potencia [ms]
    potencia.Add(pot_act); // Adiciona o valor calculado à lista da potencia consumida

    if ((pot_act - pot_act_last) > POTENCIA_EVENTO) // Tratar evento crescente...
    {
        leitura_corrente_tensao(corrente, tensao, FREQ_AMOST, DURACAO);
        pot_act = potenciaActiva(tensao, corrente); // Calculo da Potencia activa referente A leitura actual
        correnteActual = rearranjoCorrente(tensao, corrente); // A corrente começa no zero da tensao

        for (i = 0; i < NrPontosPeriodo; i++)
        {
            correnteDif[i] = correnteActual[i] - correnteAnterior[i];
        }
        st(NrPontosPeriodo, 0, 0, correnteDif, st_dif); // Calculo da S-Transform do sinal de diferença
        st_ABS(st_dif, st_dif.Length, st_dif_ABS);

        reconhecimento_crescente(ref idDispositivo, ref idModo_de_funcionamento, ref idEstado, st_dif_ABS,
dispositivos_ligados, assinaturas);
        instante = DateTime.Now;
        variacao_do_consumo = pot_act - pot_act_last;

```

```

        cmd1 = new MySqlCommand("INSERT INTO Evento VALUES(" + Convert.ToString(IdGenerator("Evento"))
+ "," + Convert.ToString(idDispositivo) + "," + Convert.ToString(idModo_de_funcionamento) + "," +
Convert.ToString(idEstado) + "," + Convert.ToString(instante) + "," +
Convert.ToString(Convert.ToInt32(variacao_do_consumo)) + "," + Convert.ToString(Convert.ToInt32(pot_act)) + ")",
mConn);
        cmd1.ExecuteNonQuery();

        // Adiciona o dispositivo e o respectivo modo de funcionamento à lista de dispositivos em
funcionamento
        dispositivos_ligados.Add(Convert.ToString(idDispositivo));
        dispositivos_funcionamento_escreve_texto(dispositivos_ligados);
    }

    if ((pot_act_last - pot_act) > POTENCIA_EVENTO) // Tratar evento decrescente...
    {
        for (i = 0; i < NrPontosPeriodo; i++)
        {
            correnteDif[i] = correnteAnterior[i] - correnteActual[i];
        }

        st(NrPontosPeriodo, 0, 0, correnteDif, st_dif); // Calculo da S-Transform do sinal de diferença
        st_ABS(st_dif, st_dif.Length, st_dif_ABS);
        if(dispositivos_ligados.Count > 0)
            reconhecimento_decrescente(ref idDispositivo, ref idModo_de_funcionamento, ref idEstado,
st_dif_ABS, dispositivos_ligados, assinaturas);
        dispositivos_funcionamento_escreve_texto(dispositivos_ligados);

        instante = DateTime.Now;
        variacao_do_consumo = pot_act - pot_act_last;
        cmd1 = new MySqlCommand("INSERT INTO Evento VALUES(" + Convert.ToString(IdGenerator("Evento"))
+ "," + Convert.ToString(idDispositivo) + "," + Convert.ToString(idModo_de_funcionamento) + "," +
Convert.ToString(idEstado) + "," + Convert.ToString(instante) + "," +
Convert.ToString(Convert.ToInt32(variacao_do_consumo)) + "," + Convert.ToString(Convert.ToInt32(pot_act)) + ")",
mConn);
        cmd1.ExecuteNonQuery();
    }

    pot_act_last = pot_act;

    // Corrente anterior passa a ser a corrente actual
    for (i = 0; i < NrPontosPeriodo; i++)
        correnteAnterior[i] = correnteActual[i];
}
}

private void informacao_dispositivo(string dispositivo)
{
    List<Evento> eventos = new List<Evento>();
    carrega_eventos(eventos);

    DateTime instante1 = new DateTime();
    DateTime instante2 = new DateTime();
    DateTime instante_inicial = new DateTime();

    double tempo_decorrido;
    double segundos;
    double horas;
    double potencia_kw;

    int inst1 = 0;

```

```

int potencia_atual = 0;
double energia_kwh = 0;

int i = 0;
int idDispositivo = -1;
string descricao = "";
string texto;

MySQLCommand cmd1 = new MySQLCommand("SELECT idDispositivo FROM dispositivo WHERE descricao = "
+ dispositivo + "'", mConn);
idDispositivo = resultado(cmd1);

textBox4.AppendText("Informações sobre os horários de funcionamento dos dispositivos eléctricos:");
textBox4.AppendText("\r\n");
textBox4.AppendText("\r\n");

texto = "Desde " + eventos[0].instante + " até " + eventos[eventos.Count - 1].instante + ", o dispositivo " +
dispositivo + " consumiu energia eléctrica nos seguintes intervalos temporais: ";
textBox4.AppendText(texto);
textBox4.AppendText("\r\n");
textBox4.AppendText("\r\n");

for (i = 0; i < eventos.Count; i++)
{
    if (eventos[i].idDispositivo == idDispositivo)
    {
        if (inst1 == 0) //Passagem do repouso para o consumo
        {
            instante1 = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);
            instante_inicial = instante1;
            potencia_atual = eventos[i].variacao_do_consumo;
        }
        if (inst1 == 1) // Já se encontra em funcionamento
        {
            instante2 = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);
            tempo_decorrido = instante2.Ticks - instante1.Ticks;
            segundos = tempo_decorrido / TimeSpan.TicksPerSecond;
            horas = segundos / 3600;
            potencia_kw = Convert.ToDouble(potencia_atual) / 1000;

            energia_kwh = energia_kwh + potencia_kw * horas;
            cmd1 = new MySQLCommand("SELECT descricao FROM
Estado_do_dispositivo_no_modulo_de_funcionamento WHERE idDispositivo = " +
Convert.ToString(eventos[i].idDispositivo) + " AND idModulo_de_funcionamento = " +
Convert.ToString(eventos[i].idModulo_de_funcionamento) + " AND idEstado = " +
Convert.ToString(eventos[i].idEstado), mConn);
            descricao = resultado_string(cmd1);
            potencia_atual = potencia_atual + eventos[i].variacao_do_consumo;
        }

        if (descricao != "Final")
        {
            instante1 = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);
        }

        if (inst1 == 0)
            inst1 = 1;

        if (descricao == "Final")
        {
            texto = "De " + Convert.ToString(instante_inicial) + " até " + Convert.ToString(instante2) + ",
consumindo " + Convert.ToString(Math.Round(energia_kwh, 4)) + " KWh" + ", provocando um custo monetário de "

```

```

+ Convert.ToString(Math.Round(energia_kwh * tarifario_ISM(instante_inicial, instante2), 4)) + " euros.";
    textBox4.AppendText(texto);
    textBox4.AppendText("\r\n");
    inst1 = 0;
    energia_kwh = 0;
    descricao = "";
    }
}
}
textBox4.AppendText("-----");
textBox4.AppendText("\r\n");
textBox4.AppendText("\r\n");
}

private void informacao_eventos(string instante_inicial, string instante_final)
{
    int i = 0;
    DateTime instante_BD = new DateTime();

    string descricao = "";

    inst_inicial = Convert.ToDateTime(instante_inicial);
    inst_final = Convert.ToDateTime(instante_final);

    List<Evento> eventos = new List<Evento>();
    MySqlCommand cmd1 = new MySqlCommand("SELECT * FROM dispositivo", mConn);

    carrega_eventos(eventos);
    textBox4.AppendText("Informações sobre as variações do consumo energético:");
    textBox4.AppendText("\r\n");
    textBox4.AppendText("\r\n");

    for (i = 0; i < eventos.Count; i++)
    {
        instante_BD = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);
        if ((instante_BD.Ticks >= inst_inicial.Ticks) && (instante_BD.Ticks <= inst_final.Ticks))
        {
            cmd1 = new MySqlCommand("SELECT descricao FROM dispositivo WHERE idDispositivo = " +
Convert.ToString(eventos[i].idDispositivo), mConn);
            descricao = resultado_string(cmd1);
            cmd1 = new MySqlCommand("SELECT descricao FROM modo_de_funcionamento WHERE
idModo_de_funcionamento = " + Convert.ToString(eventos[i].idModo_de_funcionamento), mConn);

            textBox4.AppendText("Variação de " + eventos[i].variacao_do_consumo + " W, provocada pelo
dispositivo eléctrico " + descricao + ", funcionando no modo " + resultado_string(cmd1) + ", ocorrida no instante " +
Convert.ToString(instante_BD) + "");
            textBox4.AppendText("\r\n");
        }
    }
    textBox4.AppendText("-----");
    textBox4.AppendText("\r\n");
    textBox4.AppendText("\r\n");
}

private void calculo_estatisticas (string instante_inicial, string instante_final)
{
    List<Evento> eventos = new List<Evento>();
    carrega_eventos(eventos);

    DateTime instante1 = new DateTime();
    DateTime instante2 = new DateTime();

```

```

DateTime instante_inicial = new DateTime();
DateTime instante_final = new DateTime();
DateTime instante_BD = new DateTime();

double tempo_decorrido;
double segundos;
double horas;
double potencia_kw;
double custo = 0;

int potencia_estado = 0;

bool primeiro_estado = true;

double energia_kwh = 0;
double energia_aux = 0;

int i = 0;
int idDispositivo = 0;
int max_IdDispositivo = -1;
int nr_dispositivos_evento = -1;
string descricao = "";

inst_inicial = Convert.ToDateTime(instante_inicial);
inst_final = Convert.ToDateTime(instante_final);

MySqlCommand cmd1 = new MySqlCommand("SELECT MAX(idDispositivo) FROM dispositivo", mConn);
max_IdDispositivo = resultado(cmd1);

cmd1 = new MySqlCommand("SELECT COUNT(DISTINCT idDispositivo) FROM evento", mConn);
nr_dispositivos_evento = resultado(cmd1);

string[] xNames = new string[nr_dispositivos_evento];
double[] yValues = new double[nr_dispositivos_evento];

for (idDispositivo = 1; idDispositivo <= max_IdDispositivo; idDispositivo++)
{
    for (i = 0; i < eventos.Count; i++)
    {
        instante_BD = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);
        if ((instante_BD.Ticks >= inst_inicial.Ticks) && (instante_BD.Ticks <= inst_final.Ticks))
        {
            if (eventos[i].idDispositivo == idDispositivo)
            {
                if (primeiro_estado == true)
                {
                    instante1 = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);
                    potencia_estado = eventos[i].variacao_do_consumo;
                }
                if (primeiro_estado == false)
                {
                    instante2 = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);

                    tempo_decorrido = instante2.Ticks - instante1.Ticks;
                    segundos = tempo_decorrido / TimeSpan.TicksPerSecond;
                    horas = segundos / 3600;
                    potencia_kw = Convert.ToDouble(potencia_estado) / 1000;
                    energia_aux = potencia_kw * horas;

                    energia_kwh = energia_kwh + energia_aux;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        custo = custo + energia_aux * tarifario_ISM(instante1, instante2);

        instante1 = Convert.ToDateTime(eventos[i].instante);
        potencia_estado = potencia_estado + eventos[i].variacao_do_consumo;

        cmd1 = new MySqlCommand("SELECT descricao FROM
Estado_do_dispositivo_no_modos_de_funcionamento WHERE idDispositivo = " +
Convert.ToString(eventos[i].idDispositivo) + " AND idModo_de_funcionamento = " +
Convert.ToString(eventos[i].idModo_de_funcionamento) + " AND idEstado = " +
Convert.ToString(eventos[i].idEstado), mConn);
        descricao = resultado_string(cmd1);
    }
    if (primeiro_estado == true)
    {
        primeiro_estado = false;
    }
    if (descricao == "Final")
    {
        primeiro_estado = true;
        descricao = "";
    }
}
}
}
if (energia_kwh != 0)
{
    cmd1 = new MySqlCommand("SELECT descricao FROM dispositivo WHERE idDispositivo = " +
Convert.ToString(idDispositivo), mConn);
    estatisticas_textBox.AppendText("O dispositivo eléctrico " + resultado_string(cmd1) + " consumiu " +
Convert.ToString(Math.Round(energia_kwh, 4)) + " KWh," + " provocando um gasto monetário de " +
Convert.ToString(Math.Round(custo, 4)) + " €, e uma emissão de CO2 igual a " +
Convert.ToString(Math.Round(energia_kwh * emissao_CO2, 4)) + " g.");
    estatisticas_textBox.AppendText("\r\n");
    estatisticas_textBox.AppendText("\r\n");
    estatisticas_textBox.AppendText("-----");
    estatisticas_textBox.AppendText("\r\n");
    energia_kwh = 0;
    custo = 0;
}
}
}
}

```

ANEXO II

Artigos Científicos Publicados

A Novel Nonintrusive Load Monitoring System Based on the S-Transform

J. F. Martins¹, Rui Lopes¹, Celson Lima², E. Romero-Cadaval³, D. Vinnikov⁴

¹CTS/UNINOVA and FCT/UNL, Lisbon, Portugal

²Instituto de Ciências e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará, Brazil

³University of Extremadura, Badajoz, Spain

⁴Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia

jf.martins@fct.unl.pt, rm.lopes@campus.fct.unl.pt, celsonlima@ufpa.br, eromero@unex.es, dmitri.vinnikov@gmail.com

Abstract - This paper presents a new nonintrusive load identification method for home appliances, supported by a computational tool. Load identification is a major topic for emergent concepts such as smart homes and smart grids. The nonintrusive identification is performed using both current and voltage signals acquired from power meter. The method is based on the use of the S-Transform, where the obtained patterns perfectly allow the identification of distinct home appliances. Preliminary experimental results are presented in order to show the effectiveness of the proposed method.

I. INTRODUCTION

New power distribution paradigms lead to the concept of smart grid. A smart grid is described as a power network that can intelligently integrate actions of all involved players (generators, consumers and both) in order to efficiently deliver sustainable, economic and secure electricity supplies [1]. Energy usage is one of the key topics in smart grids, where smart meter (operating stand alone or part of a network) play a major role [2]. However, energy metering is not enough when the smart grid concept is involved.

The energy consumption of houses and buildings is responsible for 40% of total energy consumption in Europe and it is the main contributor to greenhouse gas emissions (about 36% of the total CO₂ emissions in Europe and about half of the CO₂ emissions which are not covered by the Emission Trading System). From 1997 to 2008 households and services (primarily buildings) accounted for 56% of total electrical consumption within EU27 [3]. In order to have energy efficient houses and buildings it requires more than just managing the load profile; it is necessary to know the installed equipment in order to get a better control of the energy consumption.

Until now, Low Voltage consumers were only seen as passive elements on the grid. However, in the near future, it is expected that they become proactive consumers (or prosumers), acting dynamically through demand side management programs, targeting energy efficiency standards at home. For this purpose is vital to have the accurate knowledge of individual loads in a given consumer.

Load monitoring systems, providing accurate power and energy usage information, can offer valuable inputs to power usage prediction and management, providing essential elements for the smart grid management. Relevant literature reports two common approaches to monitor electric loads in a building: intrusive and nonintrusive methods.

Intrusive methods are based on individual meters, one for each appliance, which can be integrated into power sockets or outlets. This approach allows energy monitoring in real time, with high accuracy results. However, it requires complex installation procedures. Even if wireless communications are used [4], the overall equipment and installation cost will be very expensive, compromising large-scale deployments.

Nonintrusive methods, referred to in the literature as Nonintrusive Load Monitoring (NILM) or Nonintrusive Appliance Load Monitoring (NIALM), consider a single power meter where essential electrical information is gathered in order to establish which appliances are consuming energy [5]. This approach is less expensive, presents lower installation and maintenance problems, and does not force home tenants to suffer with installation works. From the scientific point of view, this approach offers a bigger challenge. This problem was first addressed by Hart [6], in the 80's, in order to get an insight about the final use of electricity. From this work, most of the subsequent methodologies consider that every home load has a distinct "signature" that may be defined by its operational characteristics, either during startup or normal operation.

Regarding nonintrusive methods, there are several good surveys [7-9]. Nonintrusive methods can be divided into steady state analysis methods (mostly base on low frequency hardware setups) and transient state analysis (based on higher frequency sampling hardware). Steady state methods monitor the active and reactive power and compute their differences whenever a current variation, larger than an established threshold, occurs [10,11]. The analysis of the harmonic content helps overcoming some ambiguous cases, particularly for non-linear loads [12,13]. In order to achieve a high accuracy of detection and monitoring of appliances, not only current harmonics, but also the waveforms should be considered, either in steady state or in transient analysis [14].

Wavelets have also been used as a valuable nonintrusive load monitoring approach [15,16], but they won't have frequency invariant amplitude response.

This paper presents a new method for nonintrusive load monitoring, based on the use of S-Transform. S-Transform advantages over the others time-frequency representations (e.g. Wavelets) is that it uniquely has progressive resolution, absolutely referenced phase information and invariant amplitude response [17].

This paper is organized in six sections, including the present introduction. Section II presents a brief description of the S-Transform. The experimental setup is firstly presented in Section III, to support the description of the proposed methodology which is presented in Section IV. In section V several experimental results are presented in order to demonstrate the method's performance. Finally, in section VI, the conclusions of the work are synthesized.

II. THE S-TRANSFORM

Both phase and amplitude spectrums provide useful input to S-Transform based processes. The data about the phase of the continuous wavelet transform (CWT), is modified to the phase of the mother wavelet. The S-Transform produces a time-frequency representation of a time series signal by uniquely combining a frequency-dependent resolution that simultaneously localizes the real and imaginary spectra. Using S-Transform allows generating contours, which are suitable for classification purposes by simple visual inspection, unlike the CWT that requires specific methods like standard multi resolution analysis [18].

Being the wavelet a continuous function $y(t)$ given by (1), the S-Transform (2) of the same function $y(t)$ is obtained multiplying (1) by a phase factor $e^{j2\pi f\tau}$ and given by (2).

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)w(t - \tau, d)dt \quad (1)$$

$$S(\tau, d) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)w(t - \tau, d)e^{j2\pi f\tau} dt \quad (2)$$

$w(\tau, d)$ is the mother wavelet and d is a scale parameter representing the wavelet width and τ is the wavelet translation factor. This parameter is the inverse of the frequency f and controls the resolution.

For this particularly case, the mother wavelet is defined by (3), where $g(t)$ is a Gaussian window (4) and σ the Gaussian window width (5).

$$w(t, f) = g(t)e^{-j2\pi ft} \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2\sigma^2} \quad (4)$$

$$\sigma(f) = T = \frac{1}{|f|} \quad (5)$$

By substituting (4) and (5) into (3), one gets (6), and substituting (6) into (2) the S-Transform equation is given by (7).

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2 f^2/2} e^{-j2\pi ft} \quad (6)$$

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-(t-\tau)^2 f^2/2} e^{-j2\pi f\tau} dt \quad (7)$$

The S-Transform distinguishes itself from other time-frequency representations by combining progressive resolution with absolutely referenced phase information. The output of the S-Transform is a matrix whose rows relate to frequency while columns to time. Each element of this S matrix is a complex value.

III. EXPERIMENTAL SETUP

For the sake of readability, the experimental setup is presented before the explanation of the proposed methodology. The setup is composed by the following elements (Fig 1): (i) pair of sensors (voltage and current) directly connected to the main electrical switchboard; (ii) Data Acquisition Board (DAB) which provides a gateway to gather the data collected by sensors; and (iii) piece of software responsible for the recognition process, named Electrical Device Recognizer (EDReco) which runs in the notebook.

Both sensors generate a 0-5 V signal proportional to their respective inputs, and are connected to a 14-bit resolution DAB. Such component sends the acquired data (through a USB connection), to EDReco, where data it is treated and used in the load recognition process. EDReco can also be deployed in PDAs or Smartphones, simplifying the whole process for tenants.

It is worth noticing that: (i) since it is not necessary to change any electrical connection, the installation of sensors is simple and can easily be performed by the tenant him/herself; and (ii) data acquisition from smart meters can be performed using a wireless connection, as such further simplifying the installation procedure.

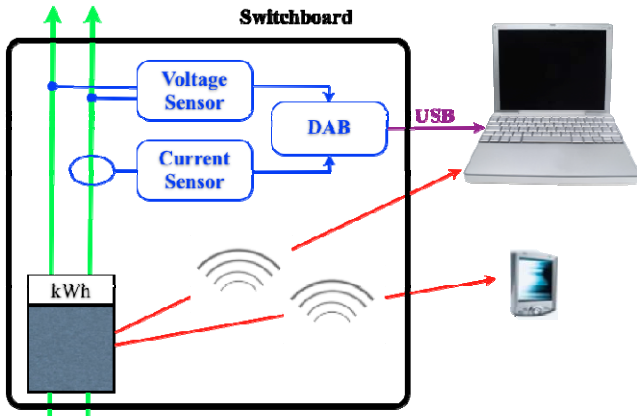


Fig. 1. The experimental setup.

According to [7] the minimum sampling rate necessary to capture microscopic features is between 1.2 and 2 kHz (“Microscopic” refers to, e.g., harmonics and signal waveforms). EDReco computes the S-Transform of the current’s waveform, in the load recognition process, considering a sampling rate of 12.5 kHz.

IV. THE PROPOSED METHODOLOGY

The current waveform of each appliance characterises its operation. The proposed methodology is based on the use of the S-Transform, thus using a time-frequency representation of the appliance’s current’s waveform, in the load recognition process. EDReco database stores the S-Transform of each appliance current’s waveform, currently available in a given space. Our work targets the recognition of which appliance, stored in the database, is responsible for a certain energy consumption variation.

EDReco architecture is shown in Fig. 2, depicting four modules (namely Data Acquisition, Event Detection, Data Processing, and Load Recognition) and the S-Transform database. More details about them are given in the following sections.

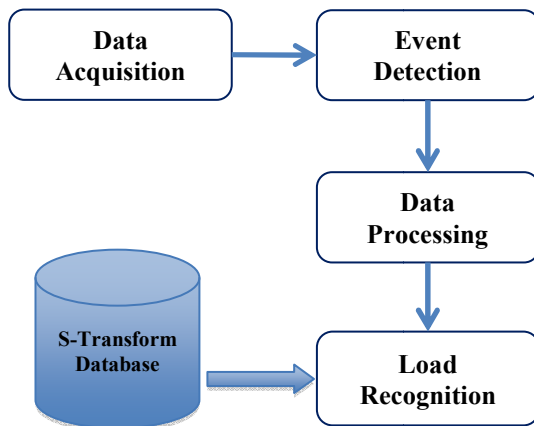


Fig. 2. EDReco Internal Structure.

A. Data Acquisition Module (DA)

DA works asynchronously, acquiring voltage and current signals with a sampling rate of 12.5 kHz. The acquisition process takes 40 milliseconds, corresponding to two cycles of the power line signal (considering a fundamental frequency of 50 Hz).

B. Event Detection Module (ED)

ED detects changes (greater than a given P_0 value) in the consumed active power, relatively to the previous data acquisition. In this paper we assume $P_0 = 100$ W. Thus, an event is detected if (8) is satisfied.

$$\left| \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T u(n)i(n) - P_L \right| > P_0 \quad (8)$$

where P_L denotes the active power related to the previous data acquisition and T the number of points acquired (in 20 milliseconds). Our assessment considers $T = 250$. If (8) is satisfied the Data Processing Module is notified that an event has occurred, otherwise new data is requested to the Data Acquisition Module.

C. Data Processing Module (DP)

In order to guarantee proper phase relationship between the signals involved in the load recognition process, DP firstly modifies the current’s waveform starting point. The new starting point corresponds to the zero crossing (with positive derivative) of the voltage signal. After this, in order to obtain the current’s waveform of the appliance responsible by the occurred event, the difference between the current signals before and after the event is computed.

D. Load Recognition Module (LR)

Using the current’s waveform obtained from the Data Processing Module, the appliance responsible for the event is recognized. In order to perform this recognition the methodology refers to the home appliances’ S-Transform Database.

Firstly, the S-Transform of the current’s waveform responsible for the event is computed. This operation outputs $S(k,j)$, a matrix with N columns and $M = N/2 + 1$ rows, where N is the number of points of the obtained current signal. In this paper we consider $N = 250$. Then the error between the amplitude of $S(k,j)$ and the amplitude of each S-Transform present in the database is calculated using (9), where j is related to frequency while k to time.

$$\varepsilon(i) = \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^N (|S(k,j)| - |S_{DB}(k,j|i)|)^2 \quad (9)$$

where $S_{DB}(k,j|i)$ is the S-Transform of the current’s waveform of the i appliance present in the database. The appliance

responsible for the detected event, in the home's power consumption, is recognized by solving (10). That is, the appliance whose S-Transform amplitude of its current's waveform, present in the database, is closest to the one responsible for the event.

$$\min_i \mathcal{E}(i) \quad (10)$$

V. EXPERIMENTAL RESULTS

Figs. 3 to 6 present the experimental results for some common appliances, namely TV set, toaster, microwave and mixer. For each appliance, the current's waveform and its respective S-Transform amplitude are presented. The differences among the several S-Transforms amplitude are evident. Each S-Transform is stored in the Database, and then used by the Load Recognition Module whenever the Event Detection Module reports an event.

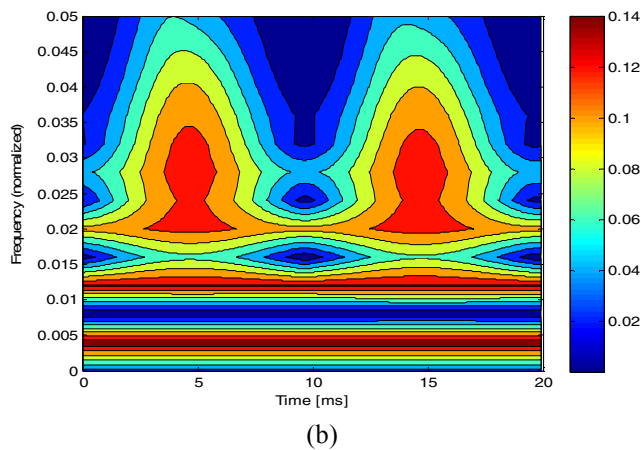
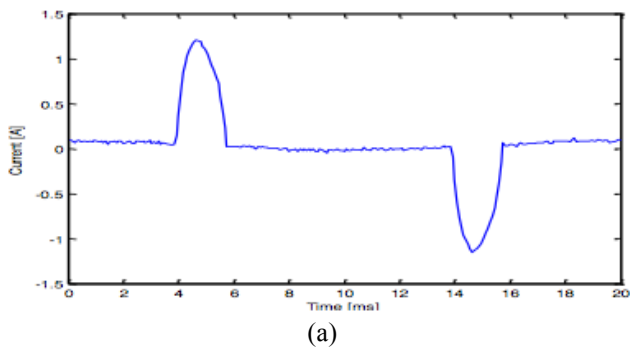


Fig. 3. TV set experimental results. (a) Current's waveform, (b) S-Transform Amplitude.

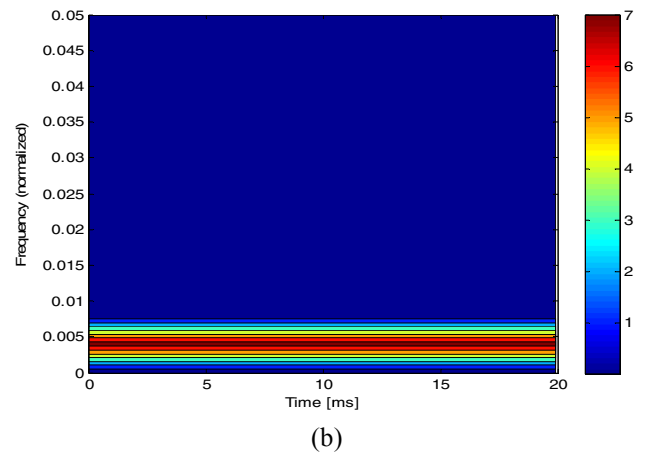
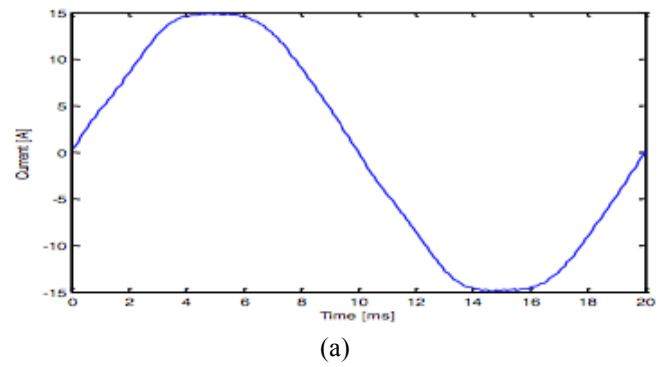


Fig. 4. Toaster experimental results. (a) Current's waveform, (b) S-Transform Amplitude.

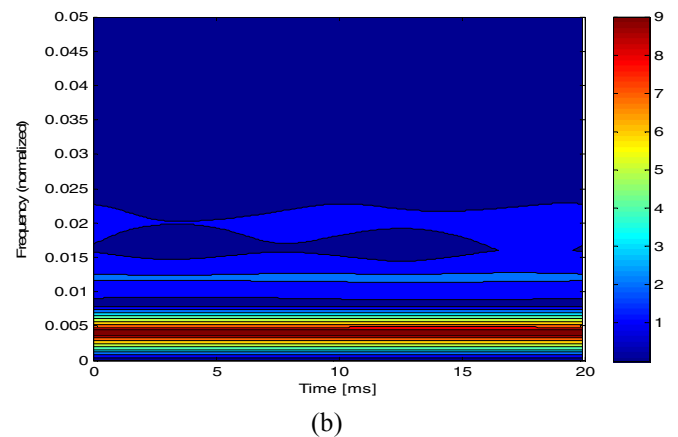
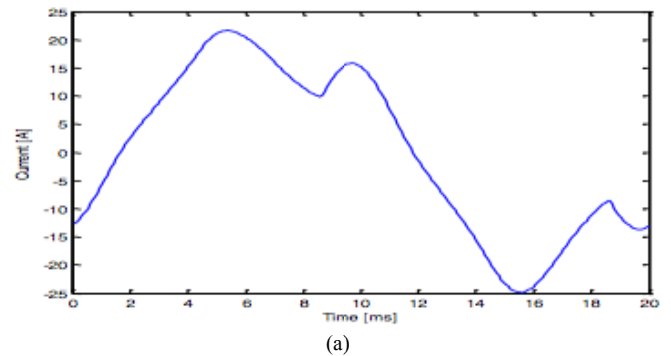
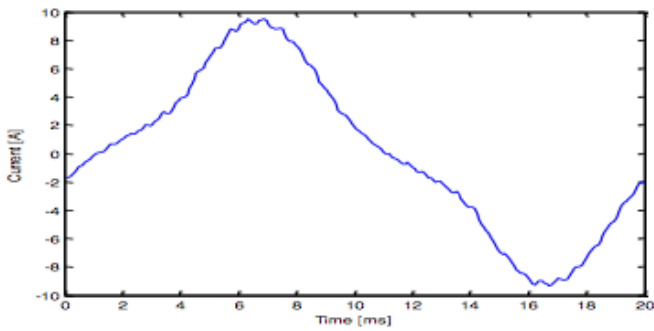
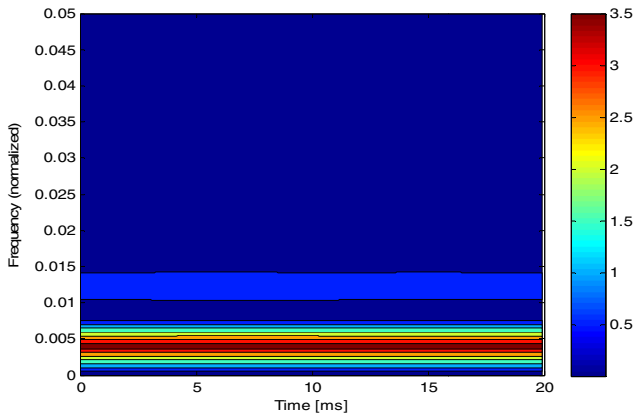


Fig. 5. Microwave experimental results. (a) Current's waveform, (b) S-Transform Amplitude.



(a)



(b)

Fig. 6. Mixer experimental results. (a) Current's waveform, (b) S-Transform Amplitude.

Fig. 7 presents the consumed active power, considering a sequence of events using the appliances previously identified. The sequence of events, and the name of the appliances turned on and off during the experiment, are labeled in the load curve.

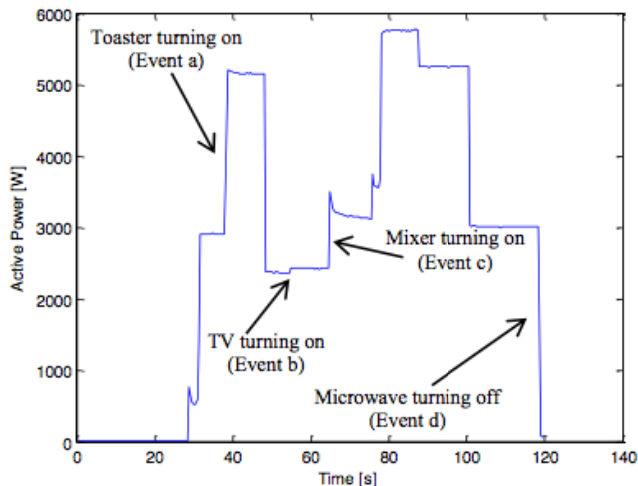


Fig. 7. Total consumed Active Power versus time during a sequence of events.

Whenever an event is detected (by ED Module), the DP Module computes the current's waveforms difference and the LR module firstly computes the associated S-Transform and

then the error for each appliance stored in the database, using (9). For each event, presented in Fig. 7, Table I illustrates the computed errors for each appliance. For each event the computed error for the correct associated appliance is much lower (10^3 and 10^4 times less) than the error for the other appliances. The discrepancy between the computed errors is evident, providing that all the appliances responsible for the events in the experiment were perfectly well recognized.

TABLE I
COMPUTED ERROR (9) FOR EACH EVENT AND APPLIANCE

Event	Appliance			
	Toaster	TV set	Mixer	Microwave
a	9.01	1.36×10^4	3.54×10^3	3.14×10^4
b	1.38×10^4	8.07	3.42×10^3	2.52×10^4
c	3.63×10^4	3.64×10^3	12.8	1.03×10^4
d	3.78×10^4	2.73×10^4	1.56×10^4	40.1

VI. CONCLUSIONS AND REMARKS

In this paper, a new nonintrusive load identification method for home appliances is proposed, also including the preliminary assessment of experimental results. Our method uses the S-Transform of the total current's waveform and can be implemented using voltage and current sensors or acquiring signals from smart meter. The signal acquisition can be wired (through USB connection) or wireless.

The major advantage of the proposed methodology relies on the fact that only the current's S-Transform is used, discarding the use of other parameters. The identification procedure is fast enough (less than one second) and is able to isolate the loads causing the events. Furthermore, since the Data Processing Module makes the computation referred to the zero of the voltage, the real phase shift of the load can be identified.

REFERENCES

- [1] US National Institute of Standards and Technology. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards. sl : NIST, 2010
- [2] Varaiya, P.P.; Wu, F.F.; Bialek, J.W.; , "Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch," *Proceedings of the IEEE* , vol.99, no.1, pp.40-57, Jan. 2011
- [3] World Energy Outlook 2010, International Energy Agency (IEA), IEA PUBLICATIONS, Paris, France, 2010.
- [4] David Silva, Sergio Vieira, Celso Lima, João Martins, "Home Energy Saving Adviser System", International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2011), Malaga, Spain, 11-13 May 2011.
- [5] F. Sultanem, "Using Appliance Signatures for Monitoring Residential Loads at Meter Panel Level," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oct 1991, Vol. 6, Iss. 4, pp. 1380 - 1385.
- [6] G.W. Hart, "Nonintrusive Appliance Load Monitor," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 12, pp. 1870-1891, Dec. 1992.
- [7] Michael Zeifman and Kurt Roth, "Nonintrusive Appliance Load Monitoring: Review and Outlook", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 57, No. 1, February 2011.

- [8] Du Y., Du L., Lu B., Harley R., Habetler T., "A Review of identification and monitoring methods for electric loads in commercial and residential buildings", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ECCE 2010. Sep 12-16, pp. 4527-4533.
- [9] Laughman, C.; Kwangduk Lee; Cox, R.; Shaw, S.; Leeb, S.; Norford, L.; Armstrong, P.; "Power signature analysis", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 1, No. 57, pp. 56-63, Mar-Apr 2003.
- [10] Bernard C. Lesieutre, "Improving Dynamic Load and Generator Response Performance Tools," Energy Analysis Department, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, November 2005.
- [11] Jian Liang, S. Ng, G. Kendall, and J. Cheng, "Load Signature Study—Part I: Basic Concept, Structure, and Methodology," IEEE Transactions on Power Delivery, April 2010, Vol. 25, Iss. 2, pp. 551-560.
- [12] C. Laughman, et al., "Power Signature Analysis," IEEE Power & Energy Magazine, pp. 56-63, March/April 2003.
- [13] W. Wichakool, A.-T. Avestruz, R. W. Cox, S. B. Leeb, "Modeling and Estimating Current Harmonics of Variable Electronic Loads," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, pp. 2803-2811, 2009.
- [14] Jian Liang, S. Ng, G. Kendall, and J. Cheng, "Load Signature Study—Part I: Basic Concept, Structure, and Methodology," IEEE Transactions on Power Delivery, April 2010, Vol. 25, Iss. 2, pp. 551-560.
- [15] W. L. Chan, A. T. P. So, L. L. Lai, "Harmonics Load Signature Recognition by Wavelets Transforms," International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 666-671, 2000.
- [16] Chan, W.L.; So, A.T.P.; Lai, L.L.; "Harmonics load signature recognition by wavelets transforms"; International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings (DRPT 2000); pp. 666-671; Apr 2000.
- [17] R. G. Stockwell, L. Mansinha, and R. P. Lowe, "Localization of the complex spectrum: the S transform," IEEE Trans. Signal Processing, vol.44, no.4, pp.998-1001, Apr.1996.
- [18] Reddy, Jaya Bharata; Mohanta, Dusmanta Kumar; and Karan, B.M. (2004) "Power System Disturbance Recognition Using Wavelet and S-Transform Techniques," International Journal of Emerging Electric Power Systems: Vol. 1: Iss. 2, Article 1007.

Smart Homes and Smart Buildings

J. F. Martins¹, J. A. Oliveira-Lima¹, V. Delgado-Gomes¹, Rui Lopes¹,
D. Silva¹, S. Vieira¹, C. Lima²

¹*CTS/UNINOVA-DEE-FCT Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal*

*E-mail: jf.martins@fct.unl.pt, jose.a.o.lima@gmail.com, vmdg@uninova.pt, rm.lopes@campus.fct.unl.pt,
david.jg.silva@gmail.com, sergio.sasv@gmail.com*

²*Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Brazil
Email: celson.lima@ufopa.edu.br; celson.ufopa@gmail.com*

ABSTRACT: Actual power systems are evolving towards the Smart Grid concept. Being buildings part of the grid, and considering their distributed generation and controllable demand capabilities, they are becoming key players in the framework of liberalized electricity markets. New integrated smart homes and buildings will contribute to the protection of the earth environment while reducing their operational costs. They will take into account not only technical issues of their integrated sub-systems but also users requirements. In order to fulfil these goals an accurate building model could be considered using a standard-based communication infrastructure, linking all buildings elements (physical and human) and allowing buildings to become an active part of the smart grid itself.

1 Introduction

From immemorial times buildings have evolved from basic constructions to very complex structures that accommodate not only our need for a shelter but also places for producing goods and services. From the academic point of view, smart houses and smart buildings emerged strongly in the last decade as a major research topic. The notion of smart controlled houses is directly connected with the notion of comfort, economic benefits and, nowadays, reduced energy consumption. This last issue is mandatory to sustainable zero-energy buildings [1].

Some authors prefer the word intelligent rather than the word smart. An intelligent building (IB) does not deal only with smart control, but goes beyond that concept. For example, it starts together with the architectural design. However, the word intelligent appeared, in the beginning of the 80's, with the development of Information and Communication Technologies (ICT) in buildings [2] and the notion of sophisticated living environment at home [3]. In 1991, B. M. Flax [4] introduced intelligent buildings as infrastructures to maximize the efficiency of their occupants work with minimum operational cost. The idea was to effectively manage and integrate all buildings components (from

lightning to fire detection), correlating their data in order to improve the overall building operational costs.

Since the beginning of this century, a great deal of research has been devoted to the smart grid subject. This caused a tremendous boost in intelligent buildings' research. Buildings are no longer isolated entities, but become part of the grid itself, not only as consumers but also as energy producers. At the same time, it is also mandatory to act positively towards the environment, thus accomplishing the zero-energy building. Highly connected communication networks, innovative interactive devices and methodologies, effective control procedures and full integration will be the main drivers to support the transition towards sustainable buildings with less energy demands and less carbon dioxide emissions.

2 Intelligent Buildings

There is no consensus about the definition of intelligent buildings in the scientific community. Wigginton [3] found more than 30 different definitions related to intelligence and buildings. First definitions were focused only on technological aspects without considering users' interactions [5]. Nowadays definitions have included learning capabilities and performance regulation regarding the building occupancy and its relation with the surrounding environment [6]. Today building is not a reactive entity but a pro-active one, not just reacting according to performance requirements and also learning and adjusting from the environment and occupancy trends. At this point it is worth looking at definitions coming from the Intelligent Building Institute of the United States and from European Intelligent Building Group. The former states that "IB provides a productive and cost-effective environment through optimization of its four basic elements including structures, systems, services and management and the interrelationships between them" while the latter states that "IB creates an environment which maximizes the effectiveness of the building occupants, while at the same time enabling

efficient management of resources with minimum life-time costs of hardware and facilities”. Clearly there are two concurrent notions: one is more focused on users requirements (Europe), whilst the other (United States) is more focused on technological aspects. An interesting definition given by Caffrey [7] is the following: “IB provides a productive and a cost-effective environment through optimization of its four basic elements: structure, systems, services, and management and the interrelationships among them”. From this point of view, IBs must have three main features (Fig. 1):

- Automatic control;
- Learning abilities;
- Occupancy trends incorporation.



Figure 1. Intelligent Building features

Every system is tightly interconnected, with sensors networking, allowing occupancy behaviour prediction and fault detection. There must be a constant balance between user comfort and energy efficiency [8]. Modern buildings have become system of systems. They integrate several dimensions such as heat exchange, airflow, water, energy, safety, access/security, and movement control subsystems, using embedded sensing and control. By exchanging state information among them, each subsystem directly affects the operational decisions from another subsystem. Viewed as an energy system, i.e., one with energy input/output and internal energy flows, a modern building presents an example of a deeply coupled system of energy usage, comfort and performed work. Currently, efforts are devoted concerning the improvement of building energy efficiency and the concept of intelligent buildings, due to the increase in energy costs and legal restrictions [9].

3 Buildings and Smart Grids

Smart grid is an electrical grid where all players (suppliers and consumers) are digitally connected. This connection supports information exchange among them in order to improve the reliability, efficiency, and sustainability of the overall electricity services. The need to transform the classical electric grid in a Smart Grid

challenged research works to assure the quality of the future electric grids.

European Union created in 2005 the Smart Grids European Technology Platform with representatives from industry, production and transmission companies, researchers and regulators, to generate objectives and tasks with the main purpose of obtaining a common vision about electric grid in Europe, after the year 2020 [10]. The future trans-European grid aims to incorporate small distributed power sources throughout Europe, contributing to a more reliable and cost-effective power supply [11]. In USA several initiatives arose in parallel, in order to study the electric grids of the future, such as Grid Wise [12], created by the Department of Energy or Modern Grid Initiative [13], from the National Energy Technology Laboratory.

Considering the common goals defined for the Smart Grid, one can consider, among others, distributed power generation as one of the major issues to be addressed [14]. Together with huge wind farms projects (high power capacity) there is an increasing number of small distributed generators based on small wind farms and photovoltaic plants, with low power production but capable of influencing the smart grid operation (mainly under the micro grid context). Most of these energy production units are installed in buildings. Real time monitoring and control of Smart Grid elements is essential to assure reliable grid operation. This implies that every element must embed data processing capacity [15].

Two main characteristics of smart grids are consumers active involvement, and distinct generation and storage technologies, which are very important from the IBs point of view. Considering that an IB produces and stores energy, its interaction with the grid benefits both the grid and the environment, likely offering cost reduction and a more efficient and cleaner power production.

From 1997 to 2008 households and services (primarily buildings) accounted for 56% of total electrical consumption within EU27 [16]. Additionally, if we consider that over 100 million households exists only in the United States, it is very important to consider consumers as one of the major beneficiaries of smart grids. Among other benefits, residential consumers will get more detailed information and the possibility to manage their electricity dependency in a more economically and environmental friendly way. Also important is the micro-generation issue, where consumers can sell their generation and storage energy resources. Non-residential buildings, apart from selling their own generation and storage resources, they will be able to reduce their energy costs and get a more reliable supply service.

Integration, into the grid, of the distributed generation coming from consumers is a very important factor [17]. Until now micro-generation units had followed a “fit and forget” approach. However they can play an important role in the real-time operation of transmission and

distribution networks. This challenge can be achieved by using the Virtual Power Plant (VPP) concept, which is based on the idea of aggregating the capacity of many distributed energy resources - generation, storage, or demand - in order to create a single operating profile [18]. In order to achieve this goal an IB needs to incorporate the following features:

- Smart metering;
- Energy management;
- Communication tools.

The implementation of an advanced metering infrastructure will be essential to increase the use of distributed production resources in everyday operations.

4 Building Models

Building energy management may simultaneously integrate multiple energy areas and sources of information. The coordination of synergies allow better-informed decisions, such as performing forecasts and adjustments of energy production and storage, while adapting electrical loads to off-peak times, when energy rates are lower. It is essential to improve and optimize energy management operations in buildings and large complexes, by introducing conceptual models for supporting advanced reasoning and inference mechanisms towards an efficient energy management.

Accurate and easy to use models are useful in several buildings contexts. Computer-based simulation models have been used to evaluate building energy consumption levels [19]. They provide a useful planning tool for energy providers and building managers, in order to better schedule their energy trades. On the one hand, future building models should incorporate information about the smart grid context, being of the most importance to provide mechanisms to guarantee the interoperation of building and grid. On the other hand, these models will also help designers to get the most of the interaction with the smart grid, and with the Building Information Model (BIM) [20].

From the operational point of view it is crucial to consider interoperability issues at the data level and at the protocols and processes level. Common framework should be considered among the several subsystems models and with the smart grid modelling. In order to evolve towards energy efficient operation the several considered models should share a common understanding about the involved processes [21].

Huge research on Buildings subsystems has already been carried out. Some authors present solutions regarding integration issues [22][23], while others focus on communications protocols [24][25][26]. Research on subsystems includes HVAC system [27], lightning system [28][29], fire detection system [30], lift system and security system [31].

Regarding IBs, several authors consider three levels of system integration [32][33], as presented in Fig. 2:

- Top level: communication management and normal/emergency building operations;
- Middle level: among others, building automation system, energy management system, communication management system and office automation system;
- Bottom level: HVAC system, lighting system, fire protection system, vertical transportation system, security system, communication system and other subsystems.

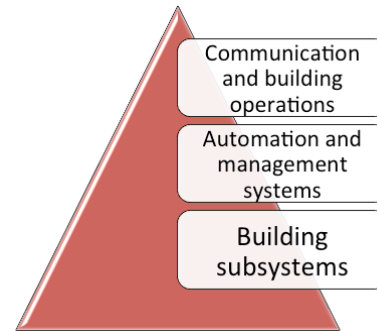


Figure 2. Intelligent Building levels of integration

Intelligent buildings should consider the interaction and integration of all those levels [34][35]. The key issue is the integration of systems, rather than the systems themselves. Also important is the integration of building models with the BIM, which can be used for energy efficiency improvement [36] or correlation of occupants indoors flow [37]. Moreover the integration of real time power monitoring into BIM environment allows energy managers to locate exactly when, where, and how energy is being consumed in the building [38].

5 Building Energy Consumption

Building power consumption is not only affected by some key envelope parameters, but also depends on specific periodic or predictable factors, such as periodic daily tasks, holydays, building occupancy and weather conditions. In order to ensure that efficient load management, load scheduling and energy allocation are performed according to the available energy supplies, trustable power demand forecasting methods must be employed. Accurate load forecasting is of very high importance, and has been subject of study for plenty of years, reaching back as far as 1966 [39] with the correlation study between summer weather and the use of temperature control equipment.

The concept of Demand-Side Management (DSM) [40] encompasses every planning, implementation and monitoring mechanism for grid related activities, designed to interfere in the overall energy use with the purpose of achieving the desired electrical load profile. In [41] a DSM system was developed for electric power control in households. The system uses smart metering for predicting and controlling the household electrical load by creating and analyzing usage patterns. Data acquisition and monitoring system, for applications involving lighting and air-conditioning systems, was developed in [42]. The

DSM system was able to improve the building comfort conditions, while reducing the overall electrical energy consumption.

Some studies regarding the integration of DSM with renewable energy production management were also conducted [43][44]. These approaches were able to combine the benefits of DSM with the efficient management of various renewable energy sources and energy storage devices. On the one hand, DSM allows adjusting the electrical load profile to achieve relatively constant load profiles, and on the other hand, the management of renewable energy production and storage coordinates the electrical load with the produced renewable energy.

Meanwhile, in order to precisely understand the details of the electrical consumption and use of specific electrical loads, correlating those with specific events or patterns, the specification of qualitative and quantitative indicators are required [45]. These indicators should provide enough information for specifying the building consumption model. In [46] the consumption model for an urban building is described, being divided into both macro and micro consumption models. In [47] the weather sensitivity in specific household appliances is also studied, where a correlation is performed between the usage pattern and energy consumption of the appliances, and thermal comfort indices.

The occupant behaviour particularly influences the building energy consumption. There are several studies and methodologies to analyse this feature. In [48] a study was performed regarding Kuwaiti buildings energy consumption and its relation with respective occupants behaviour and activity patterns. In this study, by performing a correlation between occupancy patterns and the operation schedules of specific electrical appliances it was possible to identify enough behavioural corrections that would significantly drop the energy consumption.

6 Building Conceptual Energy Model

The major objectives for a building energy model are:

- Support the building's description, organizing all the relevant data;
- Perform real-time energy consumption and production forecasting, regarding building-related data;
- Provide elements to support optimization algorithms for advanced reasoning and decision regarding building energy management.

Regarding the previously described related work and the goals of this work, a conceptual model has been defined [21]. The proposed conceptual model is divided into two groups of distinct concepts, namely:

- Static concepts (Building, Device and User), which meet general topics regarding sporadically inserted, edited or inference data;
- Dynamic concepts (Context and Energy), which meet general topics regarding dynamic data.

Each concept represents one type of data. For instance, the Device concept holds information regarding the specifications of each device (model, manufacturer), while the Energy concept holds information specifying what is a renewable power source and its electrical attributes. Although the types of data held by these two concepts are different, they are related since the device may be a wind generator, which is also a renewable energy source.

These concepts and their respective relations are shown in Fig. 3, where each concept is related to the ones it shares a frontier.

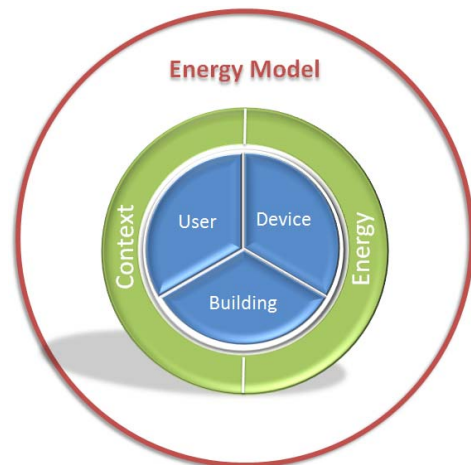


Figure 3. Conceptual Building Energy Model

Sub Modelling:

As shown in Fig. 4, the model includes several specific sub models. For instance, by combining three types of information (Weather, Model/Manufacturer and Wind Generator Specifications) from three distinct concepts (Context, Device and Energy), the wind renewable energy production can be predicted.

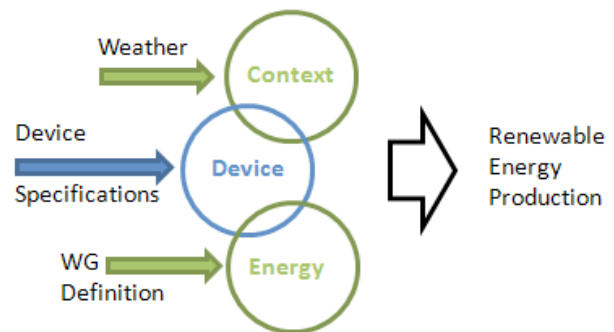


Figure 4. Sub modelling approach.

Modelling Process:

In order to better discuss simulation and experimental results, as well as to achieve a reliable proof-of-concept, the modelling process is divided in two stages:

- **Qualitative modelling:** includes the introduction of quantitative data and inference of qualitative data, as depicted in Fig. 5.

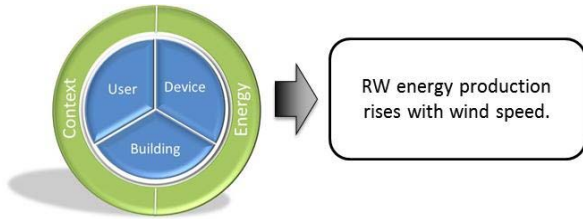


Figure 5. Qualitative modelling

- **Quantitative modelling:** includes the introduction and inference of quantitative data, as presented in Fig. 6.

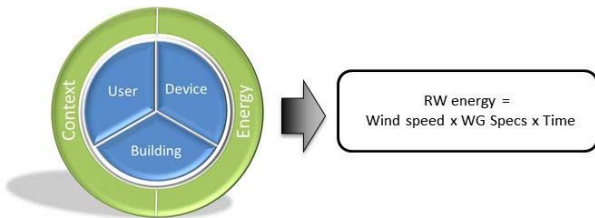


Figure 6. Quantitative modelling

7Modelling Examples

The sub modelling approach is essential to deal with the interoperability and integration issues inside the building, namely considering the several subsystems. The fire alarm system often is integrated with the electrical and HVAC systems (exhaust dampers and outdoor air intake dampers are actuated in case of a fire), through the building management system. Also the lifting is constrained in fire conditions. The lightning system is usually controlled by the building management system accordingly to building occupancy, time schedule and lightning conditions.

Several research works have been published on these interoperability and integration issues, but there are other non-technical systems that should be also modelled. The control of the buildings subsystems (lightning, HVAC...) is closely linked, not only to operational and space characteristics but also to the behavior of the building occupants. This influence comes not only from their direct control actions but also, and this is an extremely important issue, from their presence, activities and behavior inside the building. The modeling of this “human load” is extremely important, and such a model, named Building Occupancy Model (BOM), considers not only the human presence of occupants but also their flow through the building (Fig. 7).

BOM represents the current occupancy of a building as well as the occupancy trends based on the historical data analysis. BOM is built relying on the use of mobile devices creating ad-hoc networks, wireless sensors and standard-based communication protocols.

Ad-hoc networks, dynamically built, provide BOM with accurate information about building rate occupancy, enabling the learning (with the use of intelligent learning algorithms) of how and when people move around the building. Fig. 8 presents the occupancy trend in a room of the Department of Electrical Engineering (DEE) of the Faculty of Science and Technology of the Universidade Nova de Lisboa for three consecutive weekdays, where the trend line (BOM modeling) was obtained with a neural network based learning algorithm.

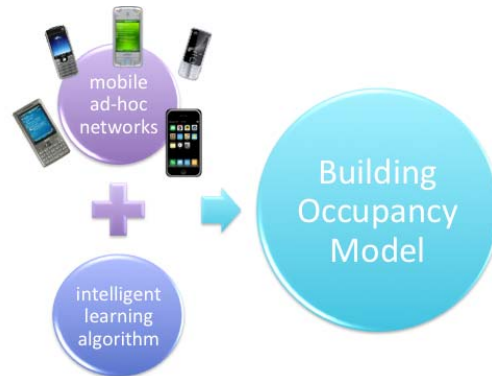


Figure 7. Building Occupancy Model

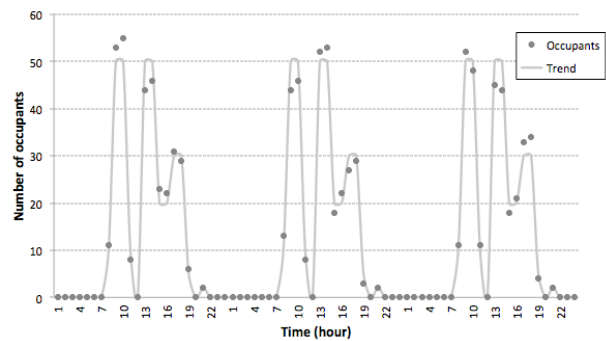


Figure 8. Occupancy trend in an academic building

The VPP concept, previously addressed, when considered on a top-down approach (from the district level, through the building level to the home level) requires knowing, understanding and modelling the loads behaviour inside a house. Visibility into load or appliance energy usage is essential for energy-efficient management of building loads. The big reductions in energy usage are made when users are provided with disaggregated energy use data for each appliance, rather than just aggregated energy use data [49]. Energy usage is one of the key topics in smart grids, where smart meter (operating stand alone or part of a network) play a major role [50]. However, energy metering is not enough when the smart grid concept is involved. In order to determine appropriate energy management strategies, it is enough to have only the load diagram; rather it is also important to know the largest loads, peak usage times and their usage patterns. Load monitoring systems, providing accurate power and energy usage information, can offer valuable

inputs to power usage prediction and management, providing essential elements for the smart grid management [51].

Fig. 9 presents a non intrusive load monitoring system, composed by a set of sensors (voltage and current) directly connected to the main electrical switchboard, a data acquisition board (DAB) which provides a gateway to gather the data collected by sensors and the software responsible for the recognition process [52]. The recognition software is based on the use of the S-Transform and recognizes which load was switched on by analyzing only the global electrical current.

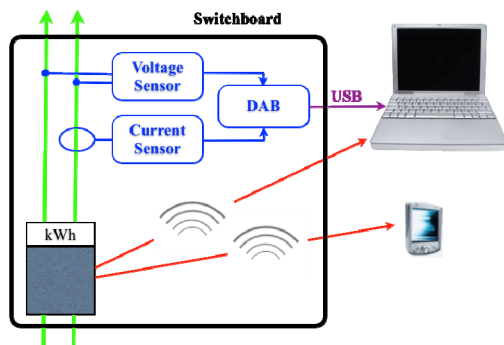
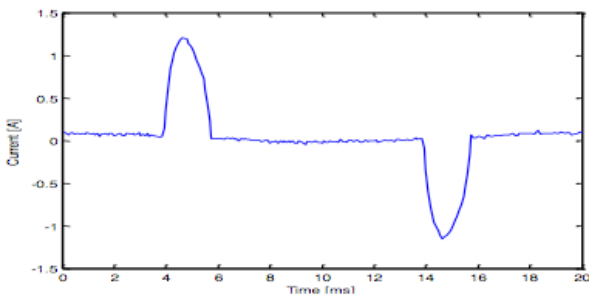
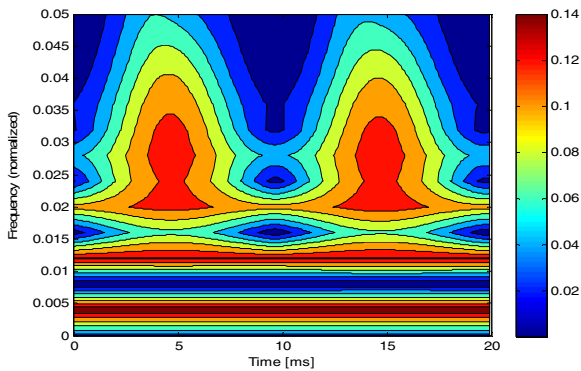


Figure 9. Non-intrusive load monitoring system

Fig. 10 present the experimental results for a TV set. Fig. 10(a) presents the current waveform and Fig. 10(b) presents the S-Transform amplitude, which is used for the recognition process.



(a)



(b)

Figure 10. TV set experimental results. (a) Current waveform, (b) S-Transform Amplitude

Fig. 11 presents the consumed active power, considering a sequence of events using previously identified appliances.

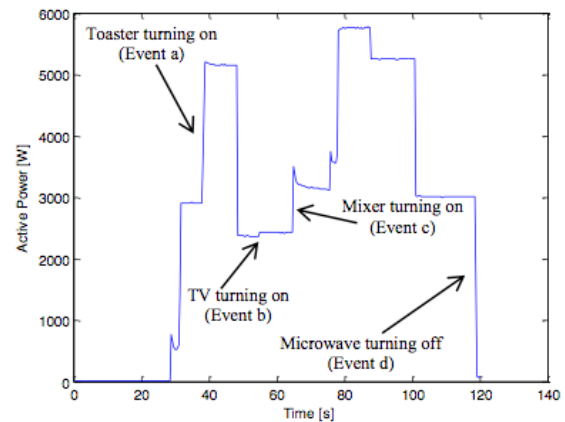


Figure 11. Total consumed Active Power versus time during a sequence of events

Energy efficiency is achieved not only through elaborated Building Management Systems but also through the increase of energy awareness among users. Currently, there are no strong strategies that ensure a minimum level of efficiency for all occupants in a building. There is a large discrepancy between desired and real building energy usage. This is a serious problem, with significant impact on the carbon reduction targets objectives.

The HOME energy advisER system (HOMER) is a Plug and Play Instrumentation Kit, which acts as a packaged Energy Assessment Instrumentation “kit” to be made available to homeowners, landlords and tenants in order to help them reducing their energy bill through real accounts of energy usage and links with lifestyle patterns [53]. The system is based on an easy to install wireless network of sensors, which are connected to a web-server, allowing the recording and analysis of residential building data (Fig. 12).

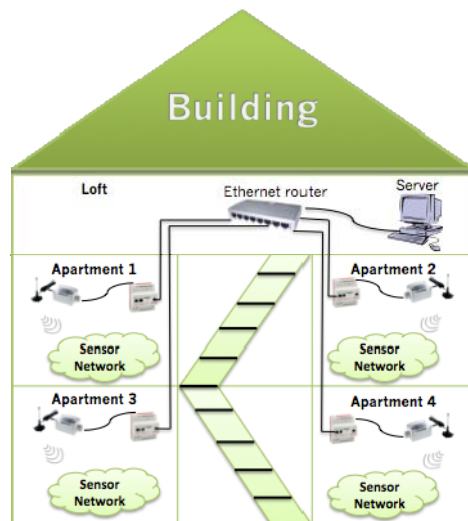


Figure 12. HOMER architecture

The HOMER inference machine will record and “learn” the behaviour of appliances and equipments, internal and external climate as well as the ways in which occupants manage and control appliances and equipments and how often they are used (along with energy sources, of course). The inference perception module will infer the behaviours of the occupants while the rule-based decision module is responsible for alerting them about their energy misbehaviours. A web interface, presented in Fig. 13, informs the users about their energy efficiency progress.

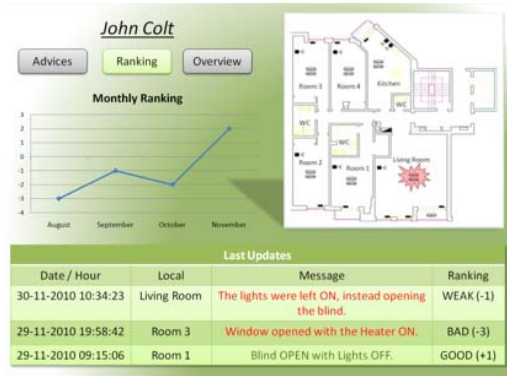


Figure 13. HOMER interface with experimental results

8Standard-based Infrastructure

There are more than 50 standards related with smart grids [54]. Some of the most relevant are the following ones: communication, network and system standard for substation automation (IEC 61850); telecontrol supervisory control and data acquisition standard for power system automation (IEC 60870); application program interfaces standards for energy management systems (IEC 61970); standards for information exchanges between electrical distribution systems (IEC 61968) and communications protocols used between components in process automation systems (DNP3). Some standards covering the buildings communication issues are: BACNet (CEN EN ISO 16484-5), LonWorks (CEN EN 14908, ISO/IEC 14908-1), KNX (CENELEC EN 50090, CEN EN 13321-1 ISO/IEC 14543-3) or ModBus, just to name a few.

Buildings are no longer just a set of envelope factors, and their respective energy consumption is no longer dictated only by air conditioning and lighting requirements, due to available construction materials and architecture details. Currently, buildings are not just passive loads but active players in the energy storage, management and production game. They integrate energy storage devices as well as wind and PV production systems that are connected into the grid through power transformers. The integration of building together with their respective energy management system in the Smart Grid will require new communication procedures in order to provide the building with the means to be an active player in this new paradigm. This will enable an effective management of all the elements integrated in the building,

including power transformers, not only with the objective of optimizing the energy consumption, but also to exploit the existing distribution networks infrastructures more efficiently. Modern buildings bring a new purpose and pose new challenges to ICT. Recent developments regarding smart energy systems monitoring and control have been registered [55], and most manufacturers are focusing efforts on developing new tools for efficient building monitoring and operation, regarding energy usage.

IEC 61850 is considered to be a better suited standard to support Smart Grid functions [54]. IEC 61850 is a comprehensive standard for substation automation [56] that supports monitoring and control of grid equipments (relays, circuit breakers, power transformers) as well as smart metering [57], renewable energy resources [55], power control [58] and energy storage [59]. Many of the new Smart Grid deployments will require rapid, high-bandwidth communications that are better supported by IEC 61850.

While device-to-device interoperability in power utilities was recently proposed via IEC 61850, device-to-application interoperability has been achieved via legacy SCADA protocols, such as DNP3 or IEC 60870, which offer communication between remote terminal units (RTUs), as field devices, and the SCADA system as control center application [57]. This calls for the need of mapping DNP3 with IEC 61850 objects, which is one of the Priority Action Plans of National Institute of Standards and Technology (NIST) Smart Grid Collaboration.

There is an obvious need to perform a seamless integration and communication of every device (related with distributed energy systems) plugged into the grid, despite its manufacturer or communication capabilities, using communication standards. A recent conceptual vision is that networks of energy-related devices can be operated helped by ICT [60].

9Proof of Concept

The conceptual vision guiding this implementation is that networks of energy-related devices can be operated with the assistance of a (distributed) software infrastructure based on service oriented architecture paradigm and standards [60]. Therefore, each system is composed by two networks: Energy and Software. Fig. 14 presents the system implemented in the Electrical Engineering Department of the Faculty of Sciences and Technology of Universidade Nova de Lisboa.

The energy network is composed by systems & devices producing, distributing, and consuming energy. In particular it is composed by: wind generator, PV generator, fuel cell, storage battery, smart meters, protective relays and building management system (BMS). The software network is used to monitor and control the energy network. The considered energy network can use both new and legacy devices, grouped under the label Intelligent Electronic Devices (IED). They

are required to have a minimum level of ‘intelligence’ in order to be virtualised into the system. In other words, they have to provide a software-enabled communication channel to be used by the software network in a standard-based communication process.

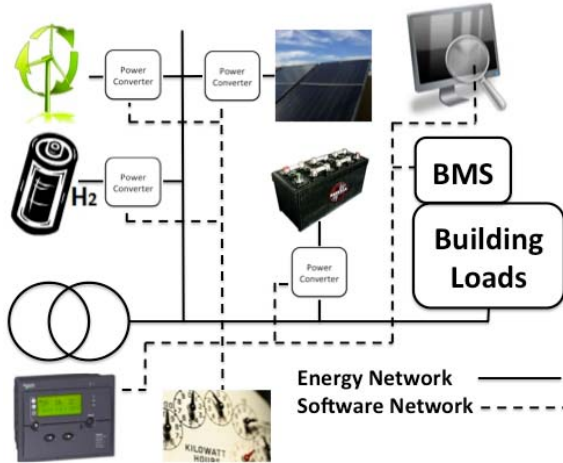


Figure 14. General overview of the implemented system

The strategy adopted in this implementation relies on two main pillars, namely Service Oriented Architecture (SOA) and Standards. The implementation follows SOA architectural guidelines, which is fundamentally standard-based using Devices Profile for Web Services (DPWS) profile for communication with and among networked devices, and IEC 61850 to support the data modelling process of physical devices from the energy network.

SOA paradigm provides the bottom line in terms of architectural principles and guidelines used to support the implementation of software network, which is to be service-based and must operate within a naturally distributed environment. Architectural principles in SOA aim, essentially, to enhance the efficiency, agility, and productivity of a given system by providing services as the primary means through which solution logic is represented to support the realization of strategic goals associated with service-oriented computing [61][62].

10 The role of the standards

Standards represent a safe and reliable option to this type of systems implementation because they will allow the interaction with other systems in the future, especially regarding the wide range of existing IEDs of the energy process. Standards cover fundamentally two areas: web services and the interoperability of IEDs inside the system networks.

Web Services provide an open and universally accepted way to provide interoperation among heterogeneous systems [63][64]. DPWS proposed and promoted by OASIS, is the standard aiming to leverage the use of Web Services to support inter-devices communication [65].

The IEC 61850 standardises the identification (in a large sense, including technical description and

functionalities provided by the IED) of most common IEDs and the communication among them, through the provision of generic services allowing both data exchange and commands execution.

IEDs are abstracted as entities offering their services to the software network. The integration and virtualisation of IEDs into this network is enabled and supported through the use of the IEC 61850 standard.

Shortly, this standard is used through the following particular elements: the Abstract Communication Service Interface (ACSI), which is used to describe IEDs and their specific set of technical features in the so-called ACSI data model; and the Substation Configuration Language (SCL), which provides both syntax and semantics required to describe the technical features of IEDs in the ACSI data model. In other words, ACSI defines the data model structure used to characterise IEDs and SCL offers the way to fill in that data model.

The adoption of IEC features in the implemented system is completed with the use of ACSI services supported by the ACSI data model, which are general purpose services specifically conceived to support monitoring and operation of devices involved into the energy process. Additionally, IEC also offers some general purpose services allowing operation and monitoring of IEDs.

System operation relies on two ACSI services, namely GetDataValues and SetDataValues. While the former is used for monitoring operations, when knowledge about the state of a physical feature is required, the later allows the physical control of a given device.

Services provided by ACSI compliant IEDs are mapped using a specific data attribute reference named Functional Data Constraint Attribute (FCDA). It can be viewed as a data path that univocally characterise the physical operation (monitoring or control) to be performed.

IEDs DPWS enabled can be detected in a given network and, from this point on, their services can be automatically discovered and invoked using the following DPWS built in services: WS-Discovery, WSEventing and WSMetadataExchange [65].

11 Architecture – Internal and external services

Fig. 15 offers a closer look at the main components of the software network. It shows five major components: Kernel, API, Bus, Connector and IEDs.

IEDs are at the closest possible level regarding the physical devices (in the picture the following are considered: H2 fuel cell, solar panel, power meter PM870 and wind turbine) and, through them, commands are sent to the devices or data is gathered from them. The structure of an IED for the considered system contains the processing unit (provided by the manufacturer), which guarantees the communication with the physical device itself, i.e., the data exchange to and from the physical device (dataflow).

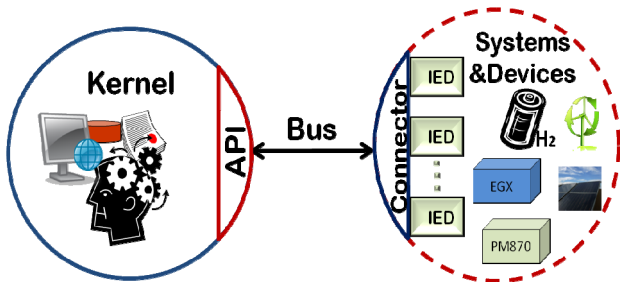


Figure 15. General Overview of the software network components

On the opposite side, we have the Kernel, which coordinates the operation of its system instance. The Kernel manages the services that can be provided by its instance to the rest of the world. These services are named External Services and they are implemented as web services.

The BUS supports the interaction between the Kernel and every single device found in the network. It represents the communication channel through which SCL and XML data will flow back and forward, when commands are sent to the devices or when operational data must be acquired.

API is the interface offered by Kernel to interact within the software network or to provide a channel of interaction between the outside world and the Kernel.

The Connector is a wrapper that allows both integration and virtualisation of IEDs into a given system instance.

It is useful to recall that each network (software and energy) form one system instance. Every instance offers its services to the external world, in order to allow, for example, monitoring and/or controlling actions from a higher point of view. However, internally, the Kernel must interact with IEDs through the Connector using another set of services – Internal Services. Whilst the internal ones guarantee the establishment and operation of an instance of the system, the external ones offer the possibility to create networks of systems, in a scalable and evolving way.

Services, both internal and external, are implemented as web services using DPWS mechanisms and built-in services previously described. Services execution is handled in a two stage process, where first stage is determined by the ACSI compliancy of the service itself, and the second one is defined by the ACSI compliancy of the IED itself.

12Connector

The Connector is a kind of system mediator since it is responsible for the very integration and virtualisation of IEDs into the software network. Connector provides a communication channel using DPWS mechanisms to exchange SCL data between every single IED and its respective Kernel. The Connector is structured into two layers, namely services and communication layer (Fig. 16). The former is divided into the following components: IS, IS.to.NonACSI, and IS.to.ACSI. The latter is

structured into the following components: NonACSI.to.IED, ACSI Wrapper, and Communicator.

Fig. 16 is completed by a double-sided arrow to indicate a direct communication channel to the IEDs compliant with the IEC standard.

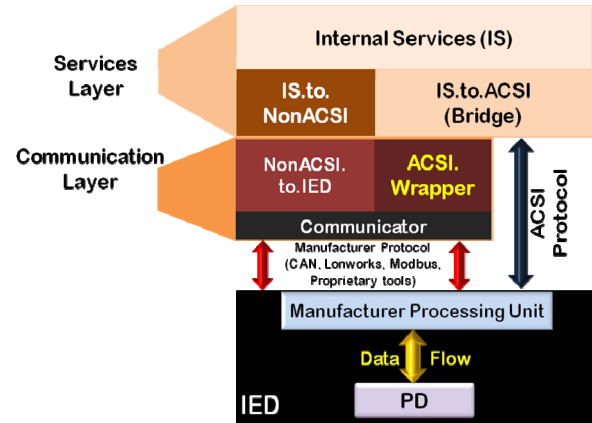


Figure 16. Connector Architecture

Inside the Services layer, the Internal Services (ISs) component handles the requests coming from the Kernel which invoke the execution of the ISs. Indeed, IS are a DPWS server which offers four web services, namely: GetIEC (FCDA) & PutIEC (FCDA, new_value) to handle ACSI compliant services; and GetNonIEC (ServiceID) & PutNonIEC (ServiceID, new_value) to handle non ACSI compliant. These four web services cover all the services execution. The execution request of a given ISs follows two possible routes, depending on the level of ACSI compliancy of the invoked service itself. Whilst GetIEC() and PutIEC() services will unleash the IS.to.ACSI component, both GetNonIEC() and PutNonIEC() will trigger the IS.to.NonACSI component. The IS.to.NonACSI converts IS to the specific service of a given physical device and, through the NonACSI.to.IED component (from the communication layer). This operation is performed through the Communicator, which interacts with IED using the appropriate communication protocol or tool (e.g. Lonworks, RS-485, CAN, Modbus, proprietary tools). The operation of IS.to.ACSI depends on the type of the IED in use. For IEC compliant IEDs, service requests are converted by the IS.to.ACSI and directly sent to IEDs using the ACSI protocol. For non-compliant IEDs, the ACSI Wrapper (from the communication layer) handles the last phase of the process, by converting the requests to the specific service which will be invoked in the Communicator.

13Example results

Let us consider that the Kernel wants to request an ACSI service, for example, a monitoring operation regarding the output voltage from the PV inverter. This operation starts with the invocation, from a given IED, of the standard compliant web service GetIEC(). This web service request will be received by the IS component and since it

is identified as a compliant standard service, is dispatched to the IS.to.ACSI component, which verifies if the FCDA parameter from the service requested complies with the SCL file of the IED. If the IED being virtualized by Connector is a standard compliant device, the operation is performed according to the IEC61850 protocols. Otherwise the ACSI.wrapper component will take action and the service is performed according to the Connector FCDA mapping.

Fig. 17 presents a monitoring operation between the Kernel and two devices: the PV inverter and an Active Front End (AFE) power converter. Through this monitoring operation it is possible to control the energy origin according to the sources production during the day.

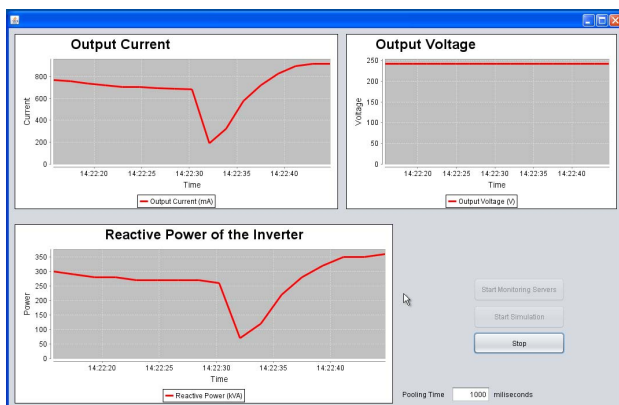


Figure 17. Kernel monitoring a PV inverter and an AFE power converter

At time 14:22:32 a cloud passing by in front of the PV panels, forces a decrease in the output current. In order to mitigate the intermittency of the PV panels, the Kernel sends a request to the AFE, which will act like a power source, to increase the current production and through this method it is possible to have a constant current, mitigating the intermittency characteristic of renewable energy sources and also improving the electric power quality.

14 Conclusions

The present work proposes a new approach for building modelling and communications infrastructure. The model considers not only technological issues but also user requirements and occupancy trends. The model combines static concepts (which meet general topics regarding sporadically inserted, edited or inference data) with dynamic concepts (which meet general topics regarding dynamic data). Also important is the integration of human factors such as occupancy trends and behavioral issues. The model is established over a standard-based communication infrastructure that interconnects all buildings elements (physical and human) and connects the building with the smart grid management. This network is established considering the use of SOA and Standards. The former provides architectural guidelines to handle all

devices and the IEC 61850 standard models, configures, and characterizes these devices into the system.

References

- [1] W. Kastner, G. Neugschwandtner, S. Soucek, and H. M. Newman, "Communication systems for building automation and control," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1178–1203, 2005.
- [2] W.M. Kroner, "An intelligent and responsive architecture", *Automation in Construction*, vol. 6 pp. 381–393, 1997.
- [3] M. Wigginton, J. Harris, *Intelligent Skin*, Architectural Press, Oxford, UK, 2002.
- [4] B. Flax, "Intelligent buildings," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 29, no. 4, pp. 24–27, 1991.
- [5] J.A. Powell, "Intelligent design teams design intelligent building", *Habitat International* vol. 14 (2/3), pp. 83–94, 1990.
- [6] J. Yang, H. Peng, "Decision support to the application of intelligent building technologies", *Renewable Energy*, vol. 22, 67–77, 2001.
- [7] R. Caffrey *The Intelligent Building, an ASHRAE opportunity*. ASHRAE Technical Data Bulletin, vol. 4 no. 1, 1985.
- [8] J. Paradiso, P. Dutta, H. Gellersen, E. Schooler, "Guest Editors' Introduction", *Smart Energy Systems. Pervasive Computing*, IEEE, vol. 10, no. 1, pp. 11-12, 2001.
- [9] J. Kleissl and Y. Agarwal, "Cyber-physical energy systems: focus on smart buildings," in *Proc. of the 47th Design Automation Conference*, ser. DAC '10. New York, NY, USA: ACM, pp. 749–754, 2010.
- [10] E. Comission, "Towards Smart Power Networks - Lessons learned from European research FP5 projects", Office for Official Publications of the European Communities, 2005.
- [11] E. Comission, "A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy", *European Commission Green Paper*, 2006.
- [12] S. Cherian, R. Ambrosio, "Towards realizing the gridwise vision: integrating the operations and behavior of dispersed energy devices, consumers, and markets", In *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. IEEE, pp. 38-43, 2004.
- [13] S. W. Pullins, "The NETL Modern Grid Initiative: What Will the US Modern Grid Cost?" In *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, pp. 1-6, 2007.
- [14] K. Tanaka, A. Yoza, K. Ogimi, A. Yona, T. Senjyu, T. Funabashi, C. Kim, "Optimal operation of DC smart house system by controllable loads based on smart grid topology", *Renewable Energy* vol. 39, pp. 132-139, 2012.
- [15] S. Massoud Amin, B. F. Wollenberg, "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 5, pp. 34-41, 2005.

- [16] IEA, "World Energy Outlook 2010", International Energy Agency publications, Paris, France, 2010.
- [17] IEA, "Scenarios and strategies to 2050", Energy Technology Perspectives, International Energy Agency publications, Paris, France, 2010.
- [18] N. Ruiz, I. Cobelo, and J. Oyarzabal, "A direct load control model for virtual power plant management," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 959–966, 2009.
- [19] Y. Zhu, "Applying computer-based simulation to energy auditing: a case study", *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 5, pp. 421-428, 2006.
- [20] R. S. Weygant, *BIM Content Development: Standards, Strategies, and Best Practices*, Wiley, 2011.
- [21] J. A. Oliveira-Lima, J. F. Martins, C. Lima, V. Delgado-Gomes, G. Benysek, "Towards an Energy Model for Supporting Real Time Building Management", *Proc. of the 16th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2012 (INES 2012)*, Lisbon, Portugal, 2012.
- [22] S. W. Wang, J. L. Xie, "Integrating building management system and facility management on internet", *Automation in Construction*, vol. 11, no. 6, pp. 707 – 715, 2002.
- [23] C. Lima, V. Gomes, J. Lima, J. F. Martins, J. Barata, L. Ribeiro, G. Candido, "A standard-based software infrastructure to support energy efficiency using renewable energy sources", in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2011)*, Gdansk, Poland, 2011.
- [24] W. Y. Chung, L. C. Fu, S. S. Huang, "A flexible, hierarchical and distributed control kernel architecture for rapid resource integration of intelligent building system", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul Korea, pp. 1981-1987, 2011.
- [25] S. Sharples, V. Callaghan, G. Clarke, "A multi-agent architecture for intelligent building sensing and control", *International Sensor Review Journal*, vol. 1, no. 8, 1999.
- [26] J. F. Martins, J. Barata, L. Ribeiro, G. Candido, "DPWS as Specific Communication Service Mapping for IEC 61850", *9th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN2011)*, Lisbon, Portugal, 2011.
- [27] T. Bernard, H. B. Kuntze, "Sensor-based management of energy and thermal comfort", *Sensor Application Vol. 2: Sensors in Intelligent Buildings*, Wiley-VCH, Weinheim, pp. 103-126, 2001.
- [28] M. V. Harrold, D. M. Lush, "Automatic controls in building services", *Electric Power Applications*, IEE Proceedings B, vol. 135, no. 3, pp. 105-133, 1988.
- [29] F. J. Bellido-Outeirino, J. M. Flores-Arias, F. Domingo-Perez, A. Gil-de-Castro, A. Moreno-Munoz, "Building lighting automation through the integration of DALI with wireless sensor networks", *Consumer Electronics*, *IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 1, pp. 47-52, 2012.
- [30] Su Wei, Xue Li-jun, Liu Ying, "Development and Implementation of Software Gateways of Fire Fighting Subsystem Running on EBI", *Control, Automation and Systems Engineering (CASE2009)*, IITA International Conference on, pp. 9-12, 2009.
- [31] T. Novak, A. Gerstinger, "Safety and Security Critical Services in Building Automation and Control Systems", *Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 11, pp. 3614-3621, 2010.
- [32] J. Carlini, *The Intelligent Building Definition Handbook*, IBI, Washington, DC, 1988.
- [33] H. Arkin, M. Paciuk, "Evaluating intelligent building according to level of service system integration", *Automation in Construction*, vol. 6, pp. 471–479, 1997.
- [34] R. C. Luo, S. Y. Lin, K. L. Su, "A multi-agent multi-sensor based security system for intelligent building", *2003 IEEE International Conference on Multi-sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, IEEE Computer Society Press, Washington DC, pp. 311 – 316, 2003.
- [35] W. L. Chan, A. T. P. So, *Intelligent Building Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- [36] S. Yoon, N. Park, J. Choi, "A BIM-Based Design Method for Energy-Efficient Building", *Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC*, pp. 376-381, 2009.
- [37] J. Lertlakkhanakul, L. Yongzhi, J. Choi; S. Bu, "GongPath: Development of BIM Based Indoor Pedestrian Navigation System", *Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC*, pp.382-388, 2009.
- [38] M. Alahmad, W. Nader, J. Neal, J. Shi, C. Berryman, Y. Cho, Siu-Kit Lau, H. Li, A. Schwer, Z. Shen, J. Stansbury, T. Zhang, "Real Time Power Monitoring & integration with BIM", *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2454-2458, 2010.
- [39] V. Hartkopf, V. Loftness, A. Mahdavi, S. Lee, J. Shankavaram, "An integrated approach to design and engineering of intelligent buildings - the intelligent workplace at carnegie mellon university," *Automation in Construction*, vol. 6, no. 56, pp. 401-415, 1997.
- [40] C. Gellings, "The concept of demand-side management for electric utilities," *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, no. 10, pp. 1468-1470, 1985.
- [41] Y. Suhara, T. Nakabe, G. Mine, H. Nishi, "Distributed demand side management system for home energy management," in *IECON 2010 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2430 –2435, 2010.
- [42] M. Majid, F. Taha, N. Maricar, S. Rahman, "Impact of demand-side retrofit on the energy savings at the

- universiti teknologi malaysia,” in IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, pp. 534–539, 2001.
- [43] J. Figueiredo, J. Martins, “Energy production system management renewable energy power supply integration with building automation system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 6, pp. 1120 – 1126, 2010.
- [44] P. S. Moura, A. T. de Almeida, “Multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 5, pp. 1461-1468, 2010.
- [45] A. Gligor, H. Grif, S. Oltean, “Considerations on an intelligent buildings management system for an optimized energy consumption,” in *Automation, Quality and Testing, Robotics*, IEEE International Conference on, vol. 1, pp. 280-284, 2006.
- [46] Q. Shilin, S. Zhifeng, F. Huifang, L. Kun, “BP neural network for the prediction of urban building energy consumption based on matlab and its application,” in *Computer Modeling and Simulation, ICCMS '10. Second International Conference on*, vol. 2, pp. 263 –267, 2010.
- [47] M. Hart, R. de Dear, “Weather sensitivity in household appliance energy end-use,” *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 2, pp. 161 – 174, 2004.
- [48] A. Al-Mumin, O. Khattab, G. Sridhar, “Occupants behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the kuwaiti residences,” *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 6, pp. 549 – 559, 2003.
- [49] J. Froehlich, E. Larson, S. Gupta, G. Cohn, M. Reynolds, S. Patel, “Disaggregated End-Use Energy Sensing for the Smart Grid”, *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 10, no. 1, pp. 28-39, 2010.
- [50] P. P. Varaiya, F. F. Wu, J. W. Bialek, “Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch”, *Proceedings of the IEEE*, vol.99, no.1, pp.40-57, 2011
- [51] Z. Michael, R. Kurt, “Nonintrusive Appliance Load Monitoring: Review and Outlook”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 57, No. 1, 2011.
- [52] J. F. Martins, Rui Lopes, Celso Lima, E. Romero-Cadaval, D. Vinnikov, “A Novel Nonintrusive Load Monitoring System Based on the S-Transform”, *Proc. of the 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM2012)*, Brasov, Romania, 2012
- [53] D. Silva, S. Vieira, C. Lima, J. Martins, “Home Energy Saving Adviser System”; *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2011)*, Malaga, Spain, 2011.
- [54] NIST, “NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0”, Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, USA, January 2010.
- [55] C. Lima, V. Gomes, J. Lima, J. Martins, J. Barata, L. Ribeiro, and G. Candido, “A standard-based software infrastructure to support energy efficiency using renewable energy sources,” in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2011)*, pp. 1175 –1180, 2011.
- [56] Seung-Ho Yang; Hyo-Sik Yang; Yong-Ho Ahn; Yong-Hak Kim, “Performance analysis of IEC 61850 based substation”, in *14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pp.854-858, 2012.
- [57] S. Jaloudi, A. Schmelter, E. Ortjohann, W. Sinsukthavorn, P. Wirasanti, D. Morton, “Employment of programmable controllers, control systems and service oriented architecture for the integration of distributed generators in the grid”, in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2011 (ISIE2011)*, pp.1033-1038, 2011.
- [58] A. Colet-Subirachs, A. Ruiz-Alvarez, O. Gomis-Bellmunt, F. Alvarez-Cuevas-Figuerola, A. Sudria-Andreu, “Centralized and Distributed Active and Reactive Power Control of a Utility Connected Microgrid Using IEC61850”, in *IEEE Systems Journal*, vol.6, no.1, pp.58-67, 2012.
- [59] V. Delgado-Gomes, J. Oliveira-Lima, J. F. Martins, C. Lima, “A Standard-based Software Infrastructure to Support Energy Storage in Distributed Energy Systems”; in *1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems (SMARTGREENS)*, 19-20 April, Porto, Portugal.
- [60] C. Lima, J. F. Martins, J. Barata, L. Ribeiro, G. Candido, “Towards a service based infrastructure to improve efficiency into energy systems: the NEMO&CODED quest”, in *10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'10)*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [61] M. Rosen, *Applied SOA: service-oriented architecture and design strategies*. Wiley, 2008.
- [62] M. Bell, *Service-oriented modeling: service analysis, design, and architecture*. Wiley, 2008.
- [63] L. Ribeiro, J. Barata, P. Mendes, “Mas and soa: Complementary automation paradigms,” in *Innovation in Manufacturing Networks*, ser. IFIP International Federation for Information Processing, A. Azevedo, Ed. Springer Boston, vol. 266, pp. 259–268, 2008.
- [64] G. Cândido, F. Jammes, J. Barata, A. Colombo, “Generic management services for dpws-enabled devices,” in *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, pp. 3931 – 3936, 2009.
- [65] D. Driscoll, A. Mensch, “Devices profile for web services version 1.1 specification,” <http://docs.oasis-open.org/ws-dd/ns/dpws/2009/01>, 2009.

The Application of S-Transform in Fault Detection and Diagnosis of Grid-Connected Power Inverters

J. F. Martins^{1,2}, Rui Lopes², V. Fernão Pires^{3,4}, A. J. Pires^{1,3}, Celson Lima⁵

¹CTS/UNINOVA, Lisbon, Portugal

²Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, Portugal

³Escola Superior Tecnologia Setúbal / Instituto Politécnico Setúbal, Setúbal, Portugal

⁴Center for Innovation in Electrical and Energy Engineering (CIEEE), Lisbon, Portugal

⁵Instituto de Ciências e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará, Brazil

Abstract — One of the most used power converters is the three-phase voltage source power inverter. This is one of the reasons why it is so important to assure a continuous and safety operation of this power converter. This paper considers the application of the S-Transform to detect and identify faulty power switches in voltage source inverters. The S-Transform is applied to the inverter output currents in order to get a specific pattern that allows the identification of the fault. This results in a fast and reliable fault detection methodology. The applicability of the proposed technique is confirmed through simulation and experimental results.

Index Terms—Voltage source inverter, fault diagnosis, power switches, S-Transform.

I. INTRODUCTION

With the continuing need of productivity increase and better performance specifications lead to more demanding operating condition of many electrical systems. Among these systems are three-phase voltage source power inverters, which cover a wide range of applications from adjustable-speed drives to renewable energy grid connections. Usually a fault in the power inverter forces a stop in the associated system for a non-programmed maintenance procedure. Thus preventive maintenance programs are essential to enhance the overall system productivity. However, in order to implement preventive maintenance programs is mandatory to develop accurate fault detection procedures.

In this way it is important to research simple and accurate fault detection techniques applicable to the voltage source power inverter. Several types of fault can be considered (Input supply single line to ground fault; earth fault on dc bus; DC link capacitor short circuit fault; power switch open fault; power switch short circuit fault; line to line short circuit; single line to ground fault) [1], however major fault causes are related with the power semiconductors [2]. Regarding the possible types of fault there are different techniques that can be applied for fault detection, which are reported in [3]. However, typical power semiconductors faults are the short circuit and the open circuit faults. Nowadays, the short circuit fault is easily detected inside drive ICs and has become a standard feature, preventing the damage of the system. However, there is still no standard feature regarding open circuit faults, being this issue an active research area in the past

years. Open circuit faults can lead to overstress on the healthy power switches as well to pulsating currents. On other hand, this fault can be undetected for an extended period of time. Due to this, secondary faults in other semiconductors can appear. This type of faults are usually produced by driver breakdown or failure, connections rupture due to induced overheating or bonding wire lifting due to thermic cycling. Several methodologies have been proposed in the literature [4-6], and several of them use current signature techniques to identify the faulty power switches [7-11].

This paper proposes a new fault diagnosis procedure to detect open switch faults in three-phase voltage source power inverters. This method is based on the application of the S-Transform to the output currents and the corresponding analysis of the obtained pattern. Several simulation and experimental results are presented in order to confirm the effectiveness of the proposed approach. One of the advantages of the proposed methodology is its low computational effort.

This paper is organized in six sections. The first one is the present introduction. Section II briefly describes the open power switch fault behavior and related fault detection approaches. Section III presents a brief description of the S-Transform. The proposed methodology is presented in Section IV and Section V present several experimental results. Finally, in section VI the conclusions of the work are synthesized.

II. OPEN FAULT BEHAVIOR

The configuration of the three-phase voltage source power inverter is presented in Fig. 1. The switching semiconductor devices are numbered from 1 to 6.

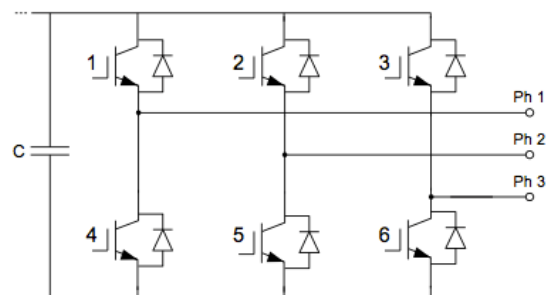


Fig. 1. Three-phase voltage source power inverter.

In normal operation, and considering symmetrical switching conditions, the three-phase currents will be balanced and sinusoidal according to (1). i denotes the instantaneous value of each phase current, I_{\max} its maximum value, ω the angular frequency and t denotes the time.

$$\begin{cases} i_1(t) = I_{\max} \sin(\omega t - \theta) \\ i_2(t) = I_{\max} \sin(\omega t - \theta - 2\pi/3) \\ i_3(t) = I_{\max} \sin(\omega t - \theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

If we consider a 3D current state space (currents 1, 2 and 3), their corresponding current pattern is a circle centered at the origin of the coordinates, as presented in Fig. 2. Due to the pulse width modulation (PWM), the space pattern is obviously not a perfect circle, but exhibits a donut shape.

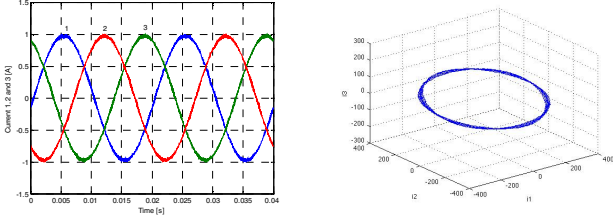


Fig. 2. Output currents and 3D current pattern in a no-fault condition.

A power switch open fault originates an unbalanced current and a consequent distortion in the circle. Fig. 3 presents the distorted patterns for each open switch fault.

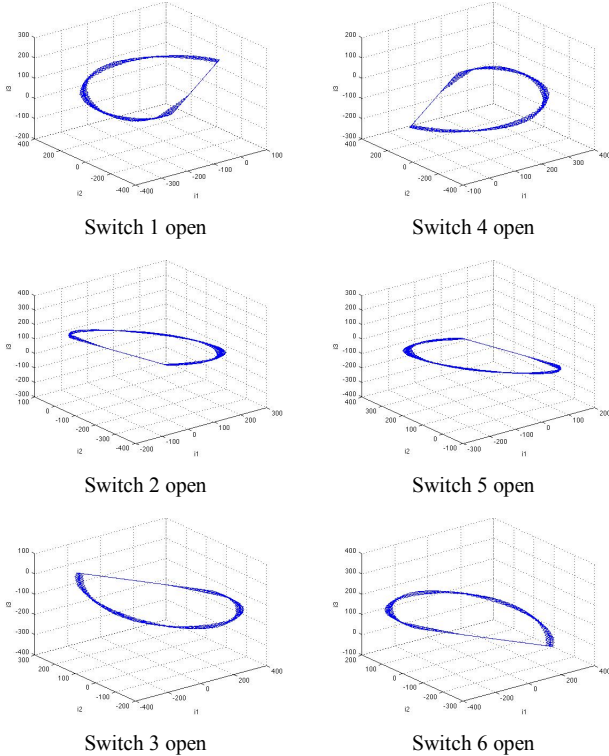


Fig. 3. Open switch fault 3D patterns.

Several approaches have been taken in order to identify the open switch.

Principal Components Analysis (PCA) has been used to extract information from the 3D space patterns [12]. High frequency ripple effects are easily filtered by this approach. Other pattern recognition approaches have been used to extract this information. A mass center approach can be used to identify the position of the distorted circle [13]. The Park's Vector approach has been used in order to obtain the direct component [14], which is used for detection purposes. This methodology uses a 2D space. The normalized DC current method [15] also uses the direct component along with output currents first order harmonic coefficients (computed by means of a DFT). This methodology is easier to tune than the previous one.

III. S-TTRANSFORM BASIC PRINCIPLES

Both phase and amplitude spectrums provide useful input to S-Transform based processes. The data about the phase of the continuous wavelet transform (CWT), is modified to the phase of the mother wavelet. The S-Transform produces a time–frequency representation of a time series signal by uniquely combining a frequency-dependent resolution that simultaneously localizes the real and imaginary spectra. Using S-Transform allows generating contours, which are suitable for classification purposes by simple visual inspection, unlike the CWT that requires specific methods like standard multi resolution analysis [16].

Being the wavelet a continuous function $y(t)$ given by (2), the S-Transform (3) of the same function $y(t)$ is obtained multiplying (2) by a phase factor $e^{j2\pi f t}$ and given by (3).

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) w(t - \tau, d) dt \quad (2)$$

$$S(\tau, d) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) w(t - \tau, d) e^{j2\pi f t} dt \quad (3)$$

$w(\tau, d)$ is the mother wavelet and d is a scale parameter representing the wavelet width and τ is the wavelet translation factor. This parameter is the inverse of the frequency f and controls the resolution.

For this particular case, the mother wavelet is defined by (4), where $g(t)$ is a Gaussian window (5) and σ the Gaussian window width (6).

$$w(t, f) = g(t) e^{-j2\pi f t} \quad (4)$$

$$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2\sigma^2} \quad (5)$$

$$\sigma(f) = T = \frac{1}{|f|} \quad (6)$$

By substituting (5) and (6) into (4), one gets (7), and substituting (7) into (3) the S-Transform equation is given by (8).

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2 f^2 / 2} e^{-j2\pi ft} \quad (7)$$

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-(t-\tau)^2 f^2 / 2} e^{-j2\pi f\tau} dt \quad (8)$$

The S-Transform distinguishes itself from other time–frequency representations by combining progressive resolution with absolutely referenced phase information. The output of the S-Transform is a matrix whose rows relate to frequency while columns to time. Each element of this S matrix is a complex value.

IV. PROPOSED METHODOLOGY

The proposed approach is depicted in Fig. 4 and is based on the following three major steps:

- Acquisition of the three-phase voltage source power inverter output currents;
- Application of the S-Transformation to the acquired currents;
- Fault detection and diagnosis of the faulty switch.

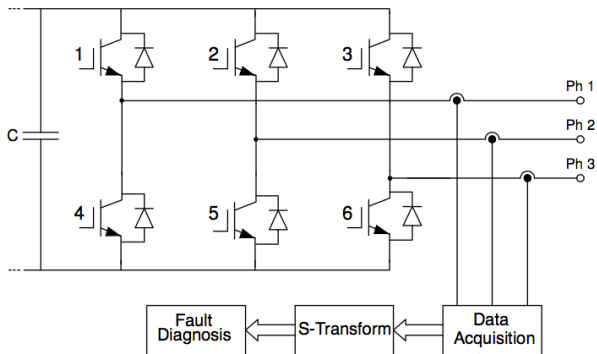


Fig. 4. Three-phase voltage source power inverter fault detection methodology.

For illustration purposes, let us first examine the case of a Matlab/Simulink simulated power inverter. Output currents were acquired with a maximum frequency component considered of 0.5 kHz. According to the Shannon’s sampling theorem, the sampling frequency should be at least twice the highest frequency component present in the signal. However, in real practice instead of considering the sampling frequency exactly twice the maximum, it is taken as somewhat higher so as to capture the signal properly. Therefore, the sampling frequency considered here is 2 kHz, which equals 40 points/cycle. Twenty-five power frequency cycles, which contain the disturbance, are used for a total of 1000 points. Power system fundamental frequency is 50 Hz.

Fig. 5 presents the normalized phase 1 current signal for a healthy power inverter.

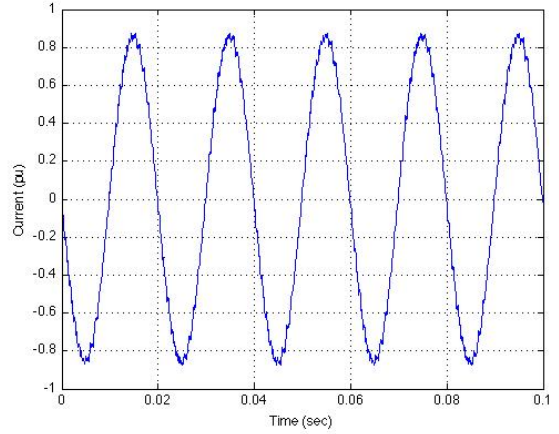


Fig. 5. Normalized phase 1 output current for a healthy power inverter.

After applying the S-Transform to the previous current signal, the S matrix is obtained and its values are used for the fault detection and diagnosis procedure. One must recall that each element of this S matrix is a complex value, however presents a real value for zero frequency. For this frequency the amplitude is not considered but the value itself (positive or negative).

Fig. 6 presents the time–frequency contour, which is the normalized frequency versus time of the S matrix. On the right hand side the magnitude scale is presented, while on the left hand side the magnitude of each frequency is depicted over the time. The highest value appears at the fundamental frequency (50 Hz), all values are equally distributed and there is no dc component.

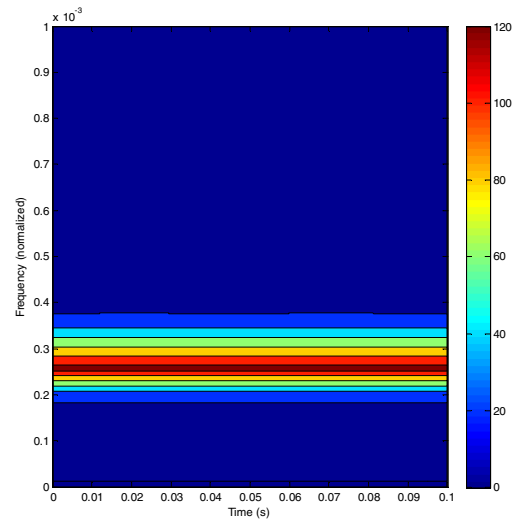


Fig. 6. Phase 1 output current’s S-Transform amplitude for a healthy power inverter.

When the voltage source inverter’s phase has an open switch fault a typical rectified current waveform will appear. This waveform differs if the fault occurs in the upper or down switch.

Fig. 7 presents the steady state fault condition for open switch fault in switch 1 (phase 1 – upper switch). As can

be seen by this figure, the current in phase 1 becomes zero during a part of the period and it is unsymmetrical. Due to this unsymmetrical current the voltage source inverter operation is affected although continuous to operate. An open fault in switch 1 implies a negative dc component in phase 1's output current.

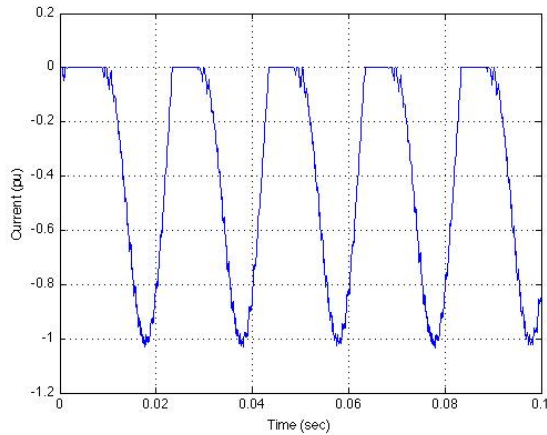


Fig. 7. Normalized phase 1 output current for a fault in switch number 1.

After applying the S-Transform to the previous output line currents, the S matrix is obtained and the time-frequency contour is presented in Fig. 8. The highest value does no longer appear at the fundamental frequency (50 Hz). It has moved to a dc component (zero frequency) and presents a negative value. The values are not equally distributed, although the fundamental frequency is still quite visible. This feature will be used to distinguish between a healthy power inverter and a faulty one.

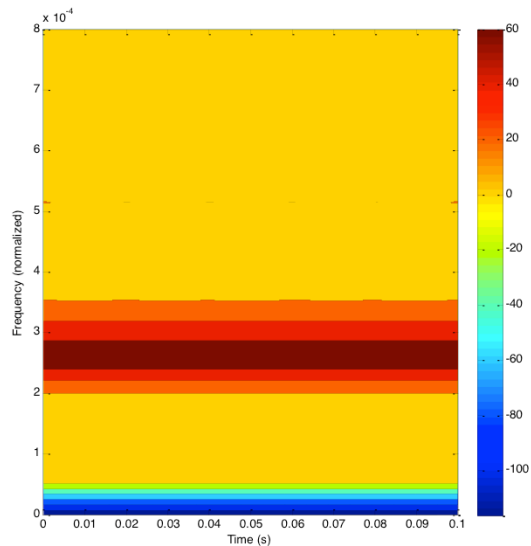


Fig. 8. Phase 1 output current's S-Transform amplitude for a fault in switch number 1.

Fig. 9 shows the steady state fault condition for open switch 4 (phase 1 – down switch). As can be seen by this figure, the current in phase 1 becomes again zero during a part of the period and it is unsymmetrical. An open fault in switch 4 implies a positive dc component in phase 1's output current.

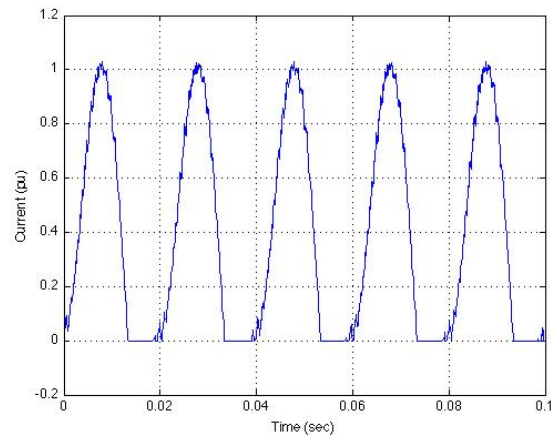


Fig. 9. Normalized phase 1 output current for a fault in switch number 4.

After applying the S-Transform to the previous output line currents, the S matrix is obtained and the time-frequency contour is presented in Fig. 10. As in the previous case, all the values are not equally distributed, but the fundamental frequency is still quite visible. The highest value does no longer appear at the fundamental frequency (50 Hz) and has moved to a dc component. However, in the case of switch 4 (positive dc component in the output current) it presents a positive value. This feature shall be used to distinguish between the upper and the down switch, in the case of an open fault.

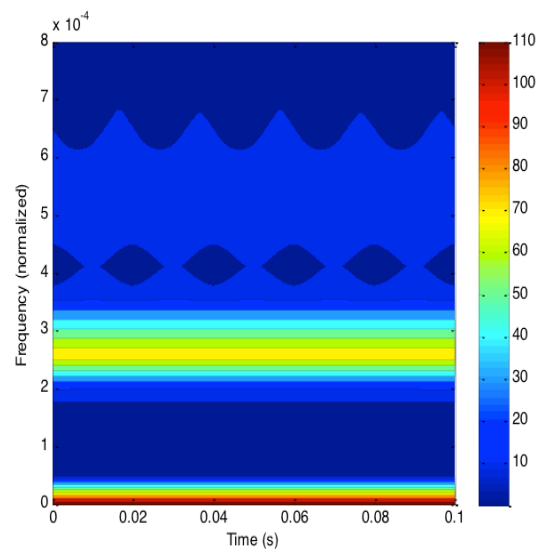


Fig. 10. Phase 1 output current's S-Transform amplitude for a fault in switch number 4.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

The results presented in the previous section have been validated by laboratory experiments, using the prototype presented in Fig. 11. The current signals are acquired through current sensors and a data acquisition board, while the fault detection algorithm is implemented on a personal computer.



Fig. 11. Experimental system.

The system was initially operated without any fault. Fig. 12a presents the phase 1 current for this healthy power inverter. In this case the corresponding inverter output currents present no dc component, although one can observe the presence of PWM noise. This effect appears in the S-Transform time-frequency contour, but the highest value still appears at the fundamental frequency (50 Hz) denoting the absence of faulty switches (as can be seen in Fig. 12b).

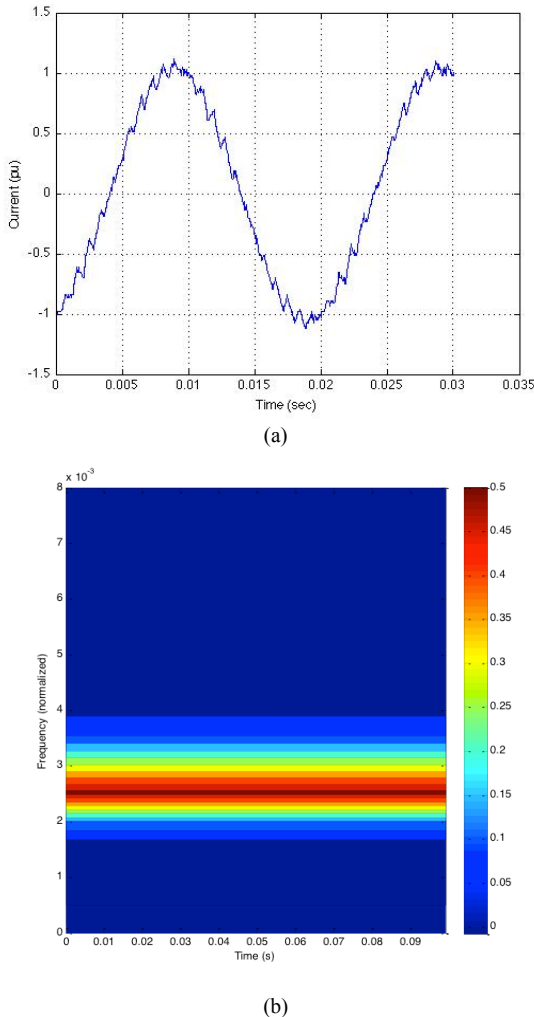


Fig. 12. Phase 1 output current for a healthy power inverter. a) Waveform. b) S-Transform time-frequency contour

Fig. 13 present the experimental inverter output current in the case of a faulty switch in phase 1. In this case a fault in switch 1 was imposed. The S-Transform time-

frequency contours do not show the highest value at the fundamental frequency (50 Hz), thus indicating the presence of a faulty switch. In Fig. 13b one can see that the highest value moved to a dc component with a negative value. This feature clearly identifies switch 1 as the faulty one.

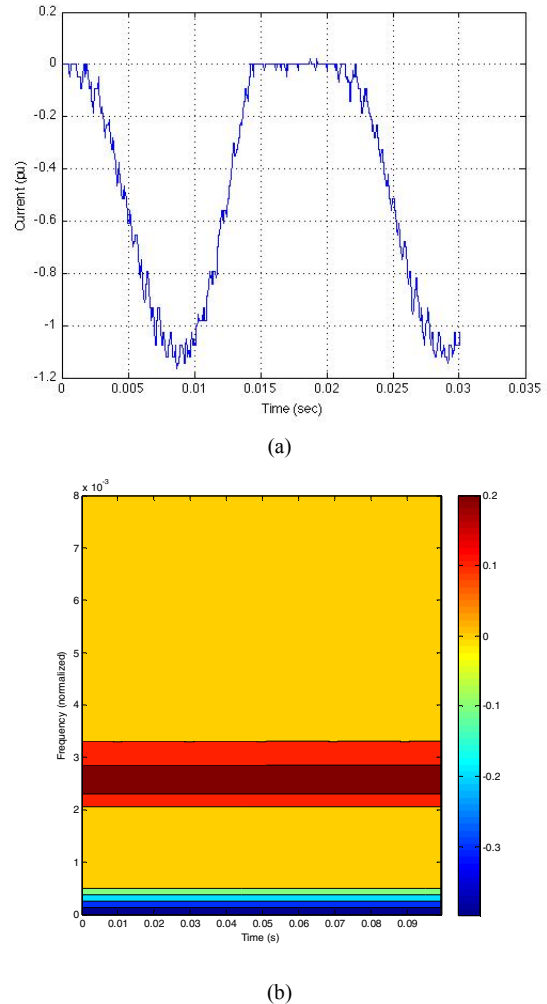


Fig. 13. Phase 1 output current for a fault in switch number 1. a) Waveform. b) S-Transform time-frequency contour

VI. CONCLUSIONS

A new approach for the detection of open switch faults, and respective diagnosis of which switch is open, in a voltage source power inverter was presented. This approach is based on the application of the S-Transform on the output currents. The obtained S matrix present specific patterns that allow the identification of a fault. The time-frequency contour allows the detection and identification of the faulty switch.

Simulation and experimental results demonstrated the ability of the proposed methodology to effectively be used in power switches open faults detection and diagnosis.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank the CIEEE – “Center for Innovation in Electrical and Energy Engineering” of IST/TU Lisbon and FCT – “Fundação para a Ciência e a Tecnologia” for financial support of this work.

REFERENCES

- [1] D. Kastha, and B.K. Bose, "Investigation of Fault Modes of Voltage-Fed Inverter System for Induction Motor Drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, No. 4, pp. 1028-1037, 1994.
- [2] H. Schwab, A. Kloßne, S. Reck, I. Ramesohl, G. Sturtzer, and B. Keith, "Reliability Evaluation of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for an Automotive Application," EPE 2003, 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France. CD-ROM paper.
- [3] Bin Lu; Sharma, S.K., "A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.45, no.5, pp.1770-1777, Sept.-oct. 2009.
- [4] B. A. Welchko; T. A. Lipo; T. M. Jahns; S.E. Schulz, "Fault Tolerant Three-Phase AC Motor Drive Topologies: A Comparison of Features, Cost and Limitations", *IEEE – Transaction on Power Electronics*, vol 19, pp. 1108-1116, 2004.
- [5] R. L. A. Ribeiro; C. B. Jacobina; E. R. C. da Silva; A. M. N. Lima, "Fault Detection of Open-Switch Damage in Voltage-Fed PWM Motor Drive Systems", *IEEE – Transaction on Power Electronics*, vol 18, no 2 , pp. 587-593, 2003.
- [6] Bowen Cui "Simulation of Inverter with Switch Open Faults Based on Switching Function", *IEEE-International Conference on Automation and Logistics*, pp. 2774-2778, 2007.
- [7] F. Zidani; D. Diallo; M. E. H. Benbouzid; R. Naït-Saïd, "A Fuzzy-Based Approach for the Diagnosis of Fault Modes in Voltage-Fed PWM Inverter Induction Motor Drive", *IEEE – Transaction on Industrial Electronics*, vol 55, no 2 , pp. 586-593, 2008.
- [8] R. Peugeot; S. Courtine; J. Rognon, "Fault Detection and Isolation a PWM Inverter by Knowledge-Based Model", *IEEE – Transaction on Industry Applications*, vol 34, no 6 , pp. 1318-1326, 1998.
- [9] S. Castellán; M. Favot; R. Menis; A. Tassarolo "A Simple Fault-Tolerant Induction Motor Drive for Dependable Electrical Auxiliary Equipment of Railway Locomotives", *IEEE International Symposium on power Electronics, Electrical Drives, Automation and motion, SPEEDAM'08*, pp. 1175-1179, 2008.
- [10] Shahram Karimi; Arnaud Gaillard; Philippe Poure; Shahrokh Saadate " FPGA-Based Real-Time Power Converter Failure Diagnosis for Wind Energy Conversion Systems", *IEEE – Transaction on Industrial Electronics*, vol 55, no 12, pp. 4299-4308, 2008.
- [11] Fernanda Briz; Michael W. Degner; Pablo Garcia; Alberto B. Diez High-Frequency Carrier-Signal Voltage Selection for Stator Winding Fault Diagnosis in Inverter-Fed AC Machines, *IEEE – Transaction on Industrial Electronics*, vol 55, no 12, pp. 4181-4190, 2008.
- [12] Daniel Foito, João Martins, Vitor Fernão Pires, José Maia; "An Eigenvalue/Eigenvector 3D Current Reference Method for Detection and Fault Diagnosis in a Voltage Source Inverter"; 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON09, Porto, Portugal, November 3-5, 2009.
- [13] Vitor Pires, Tito Amaral, Joao Martins; "Stator Winding Fault Diagnosis in Induction Motors using the dq Current Trajectory Mass Center"; 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON09, Porto, Portugal, November 3-5, 2009.
- [14] A.M.S. Mendes, A.J.M. Cardoso. Fault Diagnosis in a Rectifier-Inverter System Used in Variable Speed AC Drives, by the Average Current Park's Vector Approach, EPE'99. 8th European Conference on Power Electronics and Applications, pp.1-9 , Lausanne, 1999.
- [15] S. Abramik, W. Sleszynski, J. Nieznanski, H. Piquet. A Diagnostic Method for On-Line Fault Detection and Localization in VSI-Fed AC Drives, EPE 2003, 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France. CD-ROM paper.
- [16] R. G. Stockwell, L. Mansinha, and R. P. Lowe, "Localization of the complex spectrum: the S transform," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.44, no.4, pp.998-1001, Apr.1996.