

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Desenvolvimento de Sistema de Gestão e Controlo de Cargas

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dário Aníbal Azevedo Gambão

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Ana Isabel Lopes Estanqueiro
Engenheiro Luís Carlos Rodrigues Júnior

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Professora Doutora Ana Estanqueiro pela oportunidade de desenvolver este projeto, pela sua ajuda e sobretudo pela confiança depositada no meu trabalho.

Ao Engenheiro Luís Rodrigues pela sua dedicação, disponibilidade, esclarecimentos e conselhos ao longo deste projeto.

Ao LNEG pelo apoio fornecido que tornou possível o desenvolvimento deste desafio.

À minha família por toda a confiança depositada em mim, ensinamentos e esforço realizado para que nada me faltasse na concretização de mais este objetivo pessoal. Sem eles não teria chegado até aqui.

Aos meus amigos que me acompanham diariamente, em especial aos que conheci na FCUL e com quem ao longo destes anos partilhei momentos que ficarão para sempre na minha memória.

Resumo

O atual paradigma na produção de energia elétrica, em particular com o aumento da percentagem de produção variável no tempo de fontes renováveis, introduz a necessidade de aumentar a capacidade de controlo dos agentes dos sistemas electroprodutores modernos, não só ao nível da produção, mas igualmente através da gestão do consumo por forma a manter os padrões de segurança de operação e estabilidade do sistema electroprodutor.

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de gestão e controlo ao nível dos equipamentos elétricos domésticos capaz de realizar, não somente a monitorização dinâmica de grandezas como a corrente e tensão eficazes, potência ativa, potência reativa, fator de potência e temperatura ambiente, mas também realizar ações de controlo das cargas.

Com base em dispositivos de baixo custo e *software* suportado em bibliotecas de *software* livre, o sistema desenvolvido é constituído por uma unidade de controlo, capaz de gerir a coleta de dados e apresentar resultados aos utilizadores, e unidades auxiliares instaladas ao nível das tomadas elétricas, capazes de realizar funções de aquisição e processamento de sinais e controlo de equipamentos elétricos. Os elementos do sistema comunicam entre si através de uma rede malhada sem fios auto-reconfigurável.

Os resultados obtidos, através de testes de funcionamento do sistema constituído por uma unidade de controlo e duas unidades auxiliares em ambiente laboratorial, validam a capacidade do sistema em cumprir os objetivos pretendidos. A informação é apresentada aos utilizadores ao nível da unidade de controlo, quer através de uma visualização dinâmica num monitor, quer através do armazenamento dos dados num ficheiro disponível para consulta. A leitura dos valores eficazes da tensão e corrente obtidos pelo sistema proposto apresentam uma forte correlação linear face a medições realizadas por um multímetro de precisão. O sistema ordena a ativação ou desativação das cargas corretamente com base numa variável de controlo como pretendido, alcançando todos os objetivos pretendidos, nomeadamente a sua construção recorrendo a componentes eletrónicos de baixo custo.

Palavras-chave: gestão do consumo, sistemas de monitorização e controlo de cargas, *Raspberry Pi*, *Arduino*, rede malhada sem fios

Abstract

The actual power generation paradigm, particularly with the increasing share of time variable production from renewable energy sources, prompts for better control capacity in modern power systems. The required control capacity cannot be achieved only in terms of production control, making demand side management a critical need, so as to maintain the actual safety and stability standards of the power system.

The aim of this thesis is to develop a domestic load management and control system able to do the dynamic monitoring of parameters such as effective current and voltage, active power, reactive power, power factor and temperature.

The proposed system is based on low-cost hardware and free software libraries and is composed of 1) a control unit, able to manage the system and present the results to users, and 2) slave units installed at electrical outlets, able to do the acquisition and processing signal functions. All these elements communicate with each other through a self-reconfigurable wireless mesh network.

The results obtained by testing the operating system with a control unit and two slave units in a laboratory condition, show its capacity to meet the main objectives. The information is presented to users at the control unit through a dynamic preview on a monitor and by storing data in a file available for users. The acquisition of an effective voltage and current values has a strong linear relationship from measurements made by a precision multimeter. The system orders the activation or deactivation of the loads correctly based on a control variable as intended, achieving all the goals of the work, namely the construction of the load control system using low-cost electronic components.

Keywords: *demand side management, domestic loads monitoring and control system, Raspberry Pi, Arduino, wireless mesh network*

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento Geral.....	1
1.2	Objetivos e Organização da Dissertação	3
2.	O Sistema Electroprodutor e a Gestão de Consumos	5
2.1	Operação do Sistema Electroprodutor Nacional	5
2.2	Gestão do Consumo	10
2.3	Enquadramento e Posição do Problema	15
3.	Monitorização e Controlo de Consumos Domésticos	17
3.1	Métodos de Medição	18
3.2	Métodos de Comunicação	21
4.	Sistema de Gestão e Controlo de Consumos Domésticos Proposto.....	25
4.1	Parâmetros a Avaliar	25
4.2	Rede Comunicação.....	25
4.3	Unidade de Controlo	28
4.3.1	<i>Hardware</i>	29
4.3.1.1	Raspberry Pi	29
4.3.1.2	Rádio nRF24L01+.....	30
4.3.2	<i>Software</i>	32
4.4	Unidades Auxiliares	34
4.4.1	Componentes e Equipamentos	34
4.4.1.1	Arduino	34
4.4.1.2	Rádio nRF24L01+.....	37
4.4.1.3	Sensor de Temperatura.....	38
4.4.1.4	Sensor de Corrente	40
4.4.1.5	Transformador de Tensão.....	43
4.4.2	Programa de Gestão e Controlo.....	46
4.5	Controlo de uma Carga Resistiva com Gestão da Temperatura Ambiente	51

5.	Aplicação do Sistema de Gestão de Cargas	53
5.1	Visualização de Resultados	53
5.2	Ensaio de Aquisição de Grandezas Elétricas	53
5.3	Ensaio do Controlo de Cargas	59
5.4	Análise de Resultados	60
6.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	63
	Referências Bibliográficas	65

Índice de Figuras

Figura 1 - Distribuição do consumo de energia final (DGEG, 2015).	2
Figura 2 - Esquema simplificado da organização do SEN (Castro, 2011).	5
Figura 3 - Repartição da produção de energia elétrica, em Portugal continental, referente a 2009 e 2014 (REN, 2011) (REN, 2015).	6
Figura 4 - Evolução do consumo de energia elétrica em Portugal (PORDATA, 2014) (REN, 2015).	7
Figura 5 - Cenários referentes a 2020 para diagrama de cargas relativos a dias com elevada penetração de centrais não despacháveis (Mateus & Estanqueiro, 2012).	9
Figura 6 - Alterações do perfil de consumo obtidas através de estratégias de gestão do consumo (TATA Power, 2015).	11
Figura 7 - Diferentes impactos entre estratégias de eficiência energética e DR (Palensky & Dietrich, 2011).	12
Figura 8 - Perfil de consumo para consumidores domésticos com controlo remoto de aquecedores de água elétricos (Saele & Grande, 2011).	14
Figura 9 - Arquitetura do sistema referente ao algoritmo do sistema automático (Pipattanasomporn et al., 2012).	15
Figura 10 - Resultado simulado da aplicação do sistema de controlo de carga automatizado (Pipattanasomporn et al., 2012).	15
Figura 11 - Diagrama de carga nacional no dia de ponta anual - 4 de Fevereiro de 2014 (REN, 2015).	16
Figura 12 - Estrutura tipo de uma ligação malhada (Young, 2008).	22
Figura 13 - Diagrama de elementos do sistema. Tracejado - comunicação sem fios.	25
Figura 14 - Estrutura dos encaminhamentos da rede de comunicação.	27
Figura 15 - <i>Raspberry Pi 2 Model B</i> (Raspberry Pi Foundation, 2015).	29
Figura 16 - Mapa pinos GPIO (Design Spark, 2014).	30
Figura 17 - Módulo do rádio nRF24L01+.	30
Figura 18 - <i>Hardware</i> que constitui a unidade de controlo.	32
Figura 19 - Diagrama representativo do <i>software</i> associado à unidade de controlo.	33
Figura 20 - Mapa de pinos do microcontrolador "Atmega328" (Arduino, 2015).	35
Figura 21 - Circuito de montagem do <i>Arduino</i>	37
Figura 22 - NTC10KΩ utilizado para medição de temperatura.	38
Figura 23 - Esquema do circuito de ligação do NTC 10KΩ ao microcontrolador.	39
Figura 24 - Sensor de corrente não invasivo ECS1030-L72 (Wolfram, 2015).	40
Figura 25 - Circuito elétrico de aplicação do sensor de corrente.	41
Figura 26 - Circuito elétrico de aquisição do sinal de corrente.	43

Figura 27 - Transformador de tensão PCB TEZ 2,0/D.	43
Figura 28 - Circuito elétrico de aquisição do sinal de tensão.	44
Figura 29 - <i>Hardware</i> que constitui a unidade secundária.	46
Figura 30 - Diagrama representativo do <i>software</i> das unidades auxiliares.	47
Figura 31 - Estrutura da função de cálculo das grandezas elétricas.	49
Figura 32 - Síntese das condições de controlo de cargas.	52
Figura 33 - Interface do sistema. a) Em tempo real disponível no monitor.	53
Figura 34 - Multímetro de precisão <i>Fluke 8845A</i>	54
Figura 35 - Calibração da medição da corrente eficaz por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	55
Figura 36 - Calibração da medição da tensão eficaz por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	55
Figura 37 - Calibração da medição da corrente eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	56
Figura 38 - Calibração da medição da tensão eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	56
Figura 39 - Calibração da medição da corrente eficaz por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	57
Figura 40 - Calibração da medição da tensão eficaz por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	57
Figura 41 - Calibração da medição da corrente eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	58
Figura 42 - Calibração da medição da tensão eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.	58
Figura 43 - Desempenho da capacidade de controlo do sistema. A numeração corresponde às alterações da variável de controlo. Entre as situações 4 e 6 foi testada a saída e posterior reentrada da unidade auxiliar 1 na rede de comunicação do sistema.	60

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características das tecnologias de comunicação mais utilizadas em sistemas de monitorização e controlo do consumo doméstico (Hafeez et al., 2014) (Nordic Semiconductor, 2008) (HopeRF, 2006).....	21
Tabela 2 - Organização do modelo padrão OSI (Li et al., 2011).	26
Tabela 3 - Pacotes de informação a transitar pela rede de comunicação e respetivo carácter ASCII identificador.....	28
Tabela 4 - Mapa dos pinos de ligação do módulo nRF24L01+.	31
Tabela 5 - Correspondências entre os números dos pinos na ligação SPI.....	32
Tabela 6 - Ligação do USB 2 Serial Converter ao microcontrolador.	37
Tabela 7 - Correspondência de pinos na ligação entre rádio e microcontrolador.	38
Tabela 8 - Pontos utilizados da reta de relação entre temperatura e resistência do termistor e respetivos coeficientes obtidos.....	48
Tabela 9 - Média dos erros relativos associados às medições com filtragem das grandezas elétricas do sistema proposto, comparativamente com o multímetro <i>Fluke 8845A</i>	59
Tabela 10 - Média dos erros relativos associados às medição com filtragem da corrente eficaz comparativamente com o multímetro <i>Fluke 8845A</i>	59
Tabela 11 - Temperaturas de referência estipuladas para o teste de controlo.	59

Lista de Abreviaturas

AC - *Alternating Current*

ACK - *Acknowledgment packet*

ADC - *Analog-to-Digital Converter*

ASCII - *American Standard Code for Information Interchange*

CE - *Chip Enable*

CL - *Comercializador Liberalizado*

CML - *Clientes de Mercado Liberalizado*

CMR - *Cliente Mercado Regulado*

CSN - *Chip Select*

CUR - *Comercializador Último Recurso*

DHCP - *Dynamic Host Configuration Protocol*

DR - *Demand Response*

DSM - *Demand Side Management*

ECO.AP - *Programa de Eficiência Energética na Administração Pública*

EDP - *Energias de Portugal*

EEPROM - *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memomry*

ERSE - *Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos*

ESB - *Enhanced ShockBurst*

FER - *Fontes de Energia Renovável*

GFSK - *Gaussian Frequency Shift Keying*

GND - *Ground*

GPIO - *General Purpose Input/Output*

IRQ - *Maskable Interrupt*

MISO - *Master In Slave Out*

MO - *Mercado Organizado*

MOSI - *Master Out Slave In*

NTC - *Negative Temperature Coefficient*

OEM - *OpenEnergyMonitor*

OSI - *Open Systems Interconnection*

PCB - *Printed Circuit Board*

PLC - *Power Line Communication*

PNAEE - *Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética*

PNAER - *Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis*

PRE - *Produção em Regime Especial*

PRO - *Produção em Regime Ordinário*

PRX - *Receptor*

PTX - Transmissor
RMS - *Root Mean Square*
RND - Rede Nacional de Distribuição
RNT - Rede Nacional de Transporte
RX - Recepção
SCK - *Serial Clock*
SEN - Sistema Electroprodutor Nacional
SPI - *Serial Peripheral Interface*
SRAM - *Static Random Access Memory*
TX - Transmissão
UE - União Europeia
VCC - *Voltage Supply*

Simbologia e Notações

α - Fase na origem dos tempos

C - Condensador

f - Frequência

F - Fator de conversão

FP - Fator de potência

Hz - Hertz

I - Intensidade de corrente elétrica

I_m - Amplitude do sinal de corrente

I_p - Corrente enrolamento primário

I_{RMS} - Corrente eficaz

I_s - Corrente enrolamento secundário

$i(t)$ - Função temporal da corrente

N - Número de espiras

N_p - Número de espiras do enrolamento primário

N_s - Número de espiras do enrolamento secundário

P - Potência ativa

$p(t)$ - Função temporal da potência

Q - Potência reativa

R - Resistência elétrica

R^2 - Quadrado do coeficiente de correlação linear

R_c - Resistência de carga

R_t - Resistência variável do termistor

S - Potência aparente

t - Tempo

T - Temperatura

T_p - Período

T_{ligar} - Temperatura a partir da qual é ligado o dispositivo controlado

T_{max} - Temperatura máxima

T_{min} - Temperatura mínima

V - Tensão

V_{in} - Tensão de entrada

V_m - Amplitude do sinal de tensão

V_{out} - Tensão de saída.

V_p - Tensão circuito primário

V_{ref} - Tensão de referência

V_{RMS} - Tensão eficaz

V_s - Tensão circuito secundário

V_1 - Tensão *offset*

$v(t)$ - Função temporal da tensão

ω - Frequência angular

1. Introdução

1.1 Enquadramento Geral

Ao longo da história assistiu-se a uma constante procura pelo desenvolvimento social e económico. Esta ambição manteve uma relação direta com alterações no sector energético, demonstrando que este ocupa um papel essencial no progresso das sociedades.

O paradigma energético do século XX foi caracterizado por um domínio do petróleo, beneficiando do melhoramento das tecnologias para a sua exploração, transporte e armazenamento. Apesar do seu alto poder energético, a exploração desenfreada deste recurso não renovável, finito e limitado a reservas consideradas rentáveis face à capacidade económica e operacional, teve como consequência uma diminuição da oferta.

Em particular a partir de 1970-80, período que corresponde ao auge das crises petrolíferas, assistiu-se a um considerável aumento dos preços dos recursos energéticos fósseis. Este facto, em conjunto com a crescente preocupação ambiental sobre os efeitos da queima dos combustíveis, precipitaram uma procura de soluções para atenuar estes problemas (Castro, 2011). Os recursos renováveis, teoricamente inesgotáveis e menos prejudiciais para o ambiente, surgiram assim como uma alternativa a ter em conta na geração de energia em geral, e elétrica em particular. O avanço das tecnologias de aproveitamento desses recursos permitiu um crescente investimento ao ponto da sua implantação no paradigma do sector energético ser, cada vez mais, uma realidade (IEA, 2015).

No que diz respeito aos países que constituem a União Europeia (UE), a intenção de agregar os temas da energia e clima foi demonstrada com a imposição de objetivos próprios para três horizontes temporais diferentes, 2020, 2030 e 2050. A atingir no horizonte mais próximo, as metas europeias «20-20-20» têm como objetivo (EUROSTAT, 2015):

- Redução de, pelo menos, 20% da emissão de GEE face aos níveis de 1990;
- Aumentar para 20% a fração do consumo de energia da UE proveniente de fontes renováveis;
- Redução de 20% no consumo de energia primária através da aposta na eficiência energética.

Com o aproximar do limite temporal dos objetivos «20-20-20», os países da UE evidenciaram a intenção de continuar a reformar as áreas de energia e clima, alcançando, em 2014, um acordo para a renovação ambiciosa das metas anteriormente propostas (EUROSTAT, 2015).

O contexto energético nacional tem acompanhado as alterações ocorridas um pouco por todos os países membros da UE. Para além dos fatores ambientais, a acentuada dependência energética externa de Portugal é um importante elemento na balança comercial e, desse modo, a mudança de paradigma energético em Portugal é também uma necessidade económica (Deloitte, 2009).

As intenções nacionais foram concretizadas através do desenvolvimento de planos e programas, onde se destacam o PNAEE - Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética (Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013, 2013) e o PNAER - Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013, 2013). Direcionado especificamente para a administração pública distingue-se o Programa de Eficiência Energética na Administração Pública (ECO.AP) (Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008, 2008), que pretende uma redução de 30% na fatura energética até 2020 nos serviços e organismos públicos. Face às alterações das situações político-económicas que ocorreram nos últimos anos no país, estes planos e os seus objetivos têm sido alvo de atualização (ADENE, 2015).

Ainda que as políticas tenham incentivado uma alteração do paradigma energético nacional, é necessário um esforço permanente para continuar a descarbonizar o *mix* energético nacional. A

utilização das fontes de energia renovável (FER) tem obtido relevância sobretudo no setor da eletricidade, setor este que em 2014 representou 26,9% do consumo de energia final, conforme apresenta a **Figura 1** (DGEG, 2015).

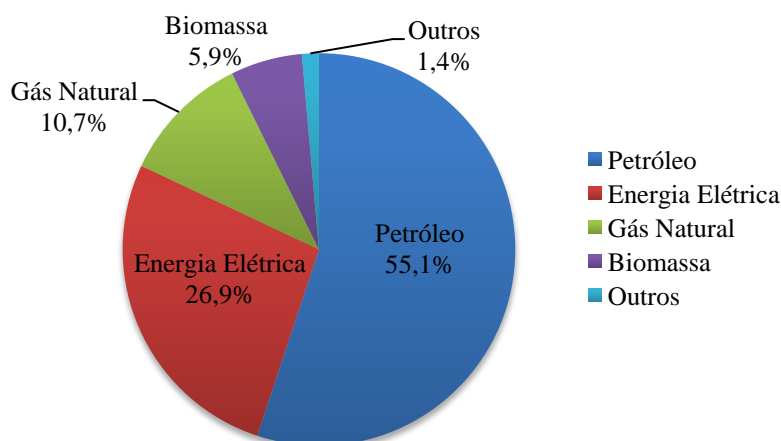


Figura 1 - Distribuição do consumo de energia final (DGEG, 2015).

O aumento significativo da produção FER no sector elétrico - em 2014 constituiu 62% da produção do setor (REN, 2015) - representou notáveis alterações para o Sistema Electroprodutor Nacional (SEN). O principal desafio criado por estas transformações é o de assegurar a operação estável e segura do sistema, nomeadamente garantir o equilíbrio entre a produção e o consumo, a cada instante. Tal desafio deve-se ao facto das centrais renováveis possuírem reduzida capacidade de adaptarem a sua produção às necessidades do sistema electroprodutor, existindo atualmente a necessidade de aumentar a capacidade de controlo, não só da forma clássica, i.e. controlo da produção, mas igualmente através do controlo da potência requerida pelos consumidores.

A transformação do parque electroprodutor, com a descentralização da produção e o acentuado aumento das FER, alteraram o perfil de produção. De forma a compensar a variabilidade característica das fontes renováveis não controláveis, tem-se verificado o aumento da implementação de estratégias que pretendem aumentar a capacidade de controlo da produção (Mateus & Estanqueiro, 2012). O aumento dos níveis de reservas do sistema, soluções que permitem o armazenamento de energia e as interligações com redes de países vizinhos, são soluções de gestão do SEN importantes para assegurar nos dias de hoje o normal funcionamento do sistema (ERSE, 2014).

Para além do reforço das soluções implementadas atualmente, estratégias que permitam aumentar a controlabilidade através da gestão do consumo (DSM - *Demand Side Management*) desempenham um papel importante no renovado SEN, assente numa gestão ativa da rede elétrica.

Em particular, a monitorização dos consumos domésticos, permite aos consumidores controlar o seu desempenho energético, promovendo a utilização eficiente da energia. Desde os contadores tradicionais, responsáveis somente pela contabilização acumulada do consumo, aos contadores inteligentes, capazes de medir e transmitir informações em tempo real aos gestores da rede, existem diversas soluções alternativas de monitorização impulsionadas por uma constante evolução tecnológica enquadrada pelo novo conceito de desenvolvimento de redes e cidades "inteligentes".

A referida evolução permitiu transformar os volumosos sistemas de monitorização, em sistemas funcionais e de fácil manuseamento disponíveis para uma aplicação residencial (Asare-Bediako et al., 2012). Os sistemas de monitorização comercializados hoje em dia permitem não só uma abordagem geral relativa aos consumos do quadro elétrico, mas também uma monitorização destinada aos equipamentos elétricos, como é exemplo dos projetos *Cloogy* (ISA, 2013) e *Efergy* (Efergy Technologies Limited, 2014).

A monitorização dos consumos dos equipamentos elétricos é uma solução de instalação na tomada elétrica, que informa os consumidores acerca do consumo local. A incorporação de um sistema composto por vários dispositivos portáteis de medição local e um dispositivo base que comunique através de uma rede sem fios com todos os restantes elementos, permite não só o conhecimento global do consumo numa habitação, mas também de cada uma das cargas em questão.

Os sistemas de monitorização são elementos passivos com impacto limitado na gestão do consumo, já que atuação sobre as cargas depende em exclusivo da ação do utilizador. Neste sentido, a criação de uma solução de domótica que permite o controlo automático das cargas em questão, expande as funcionalidades dos sistemas, tornando-os elementos ativos na gestão do desempenho energético dos consumidores.

1.2 Objetivos e Organização da Dissertação

A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de gestão e controlo que engloba, não somente a monitorização dinâmica de consumos, mas também a ação sobre cargas domésticas não prioritárias, com base em dispositivos eletrónicos de baixo custo existentes no mercado e controlados por *software* suportado por bibliotecas de *software* livre que permitam a sua execução, estudo e melhoramento (Stallman, 2010).

Pretende-se que o sistema seja composto por um dispositivo central, unidade de controlo, e dispositivos de aquisição de dados e ação sobre as cargas associadas às tomadas elétricas, unidades secundárias, que comuniquem entre si através de uma rede de comunicação.

O sistema deverá ser capaz de:

- Efetuar, através das unidades auxiliares, a aquisição dos sinais de tensão da rede elétrica, corrente de alimentação das cargas em questão e temperatura do local;
- Processar os sinais recebidos de forma a calcular os valores da tensão e corrente eficazes, potência ativa, potência aparente, fator de potência e temperatura local relativos a cada carga monitorizada;
- Apresentar, na unidade de controlo, as informações recolhidas de forma dinâmica num dispositivo de visualização, e proceder ao seu arquivo, através do armazenamento dos dados devidamente identificados e ordenados num ficheiro disponível para consulta;
- A comunicação entre os elementos do sistema deverá realizar-se através de uma rede malhada sem fios;
- Executar, segundo condições de temperatura, uma ordem para ativar ou desativar as cargas monitorizadas.

A presente tese encontra-se organizada da seguinte forma:

No Capítulo 2 está presente uma breve caracterização do sistema electroprodutor nacional, a sua organização e funcionamento. Neste capítulo são ainda apresentados cenários relativos à evolução do mesmo e a estratégias da sua gestão, em particular estratégias de gestão do consumo e o seu enquadramento na gestão global do sistema electroprodutor nacional.

O Capítulo 3 é dedicado à caracterização dos sistemas de monitorização de consumo. É neste capítulo que está presente a caracterização dos sinais elétricos a medir e os métodos de cálculo das grandezas elétricas. É ainda abordado o método de comunicação através de rede malhada sem fios.

No Capítulo 4 é apresentado o sistema proposto. É descrita a composição e ligação do *hardware*, tal como a programação do *software* do sistema e o seu funcionamento.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação e discussão de resultados relativos a ensaios laboratoriais realizados ao funcionamento do sistema proposto.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do estudo, assim como propostas para desenvolvimento futuro.

2. O Sistema Electroprodutor e a Gestão de Consumos

O SEN tem sido alvo de reestruturações ao longo dos anos. A primeira grande modificação ocorreu em 1995 quando foi estabelecido a coexistência de um sistema electroprodutor de serviço público e um sistema electroprodutor independente. O primeiro tinha como objetivo fundamental a garantia da segurança do abastecimento do país segundo uma lógica de prestação de um serviço público, enquanto o segundo regia as suas atividades por regras de mercado (DL 182/95, 1995).

Atualmente, em oposição ao regime de 1995, está estabelecido um sistema integrado, tal como está esquematizado na **Figura 2**, onde as atividades de produção e comercialização são exercidas em regime de livre concorrência, mediante atribuição de licença, e as atividades de transporte e distribuição são exercidas mediante a atribuição de concessões de serviço público (DL 29/2006, 2006).

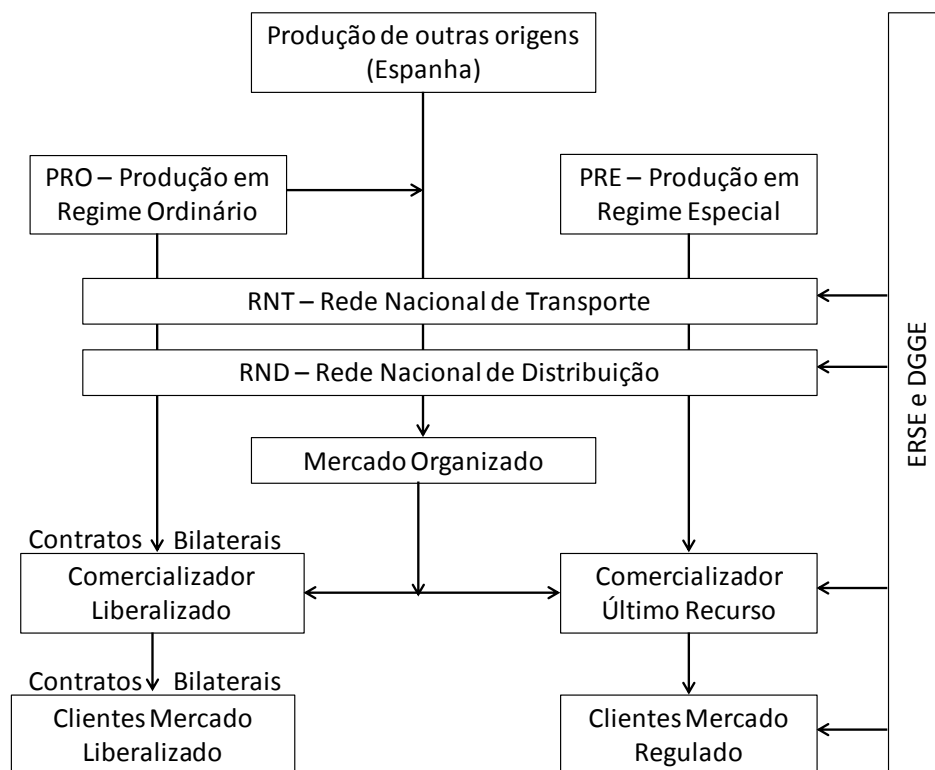


Figura 2 - Esquema simplificado da organização do SEN (Castro, 2011).

2.1 Operação do Sistema Electroprodutor Nacional

A operação do SEN tem como objetivo essencial o fornecimento de energia elétrica de forma a satisfazer as necessidades dos consumidores. Com o propósito de aumentar a eficiência e a concorrência no SEN, sem prejuízo do cumprimento das obrigações de serviço público, as atividades devem ter como base os princípios de racionalidade e eficiência na utilização de recursos, para além dos princípios de concorrência e sustentabilidade ambiental (EDP, 2009a).

Produção

Historicamente, a produção de energia elétrica em Portugal teve a sua génese assente em aproveitamentos hidroelétricos. Contudo, as centrais térmicas com a utilização de fontes primárias fósseis - inicialmente o fuel, seguidamente o surgimento das centrais térmicas a carvão, e posteriormente a introdução do gás natural - tornaram-se dominantes neste sector

(Castro, 2011). Utilizando incentivos tarifários na tentativa de diminuir os impactos ambientais do sector, tem-se forçado uma alteração dessa tendência resultando numa crescente contribuição das Fontes de Energia Renováveis - FER (ERSE, 2009c).

Atualmente, a produção de eletricidade está sujeita a licenciamento, aberta à concorrência e pode enquadrar-se, do ponto de vista legal, em dois regimes (Castro, 2011):

- I. Produção em Regime Ordinário (PRO) - integra toda a produção de eletricidade com base em fontes convencionais de energia, inclui as centrais de produção com base em combustíveis fósseis e os grandes centros electroprodutores hídricos. Associada a esta definição, está o facto da PRO recorrer a recursos primários armazenáveis e a tecnologias capazes de controlarem a produção de energia elétrica, i.e., centrais que oferecem garantia de potência.
- II. Produção em Regime Especial (PRE) - relativa à cogeração e à produção de eletricidade através de recursos endógenos e renováveis, exceto os grandes centros electroprodutores hídricos. Está sujeita a regras diferentes de licenciamento e a tarifas bonificadas. A entidade que assume o papel de garantir o fornecimento de eletricidade a todos os consumidores - comercializador de último recurso - tem legalmente a obrigatoriedade de adquirir a energia elétrica produzida em regime especial.

O regime de apoio às PRE tem permitido o aumento das FER no sector eléctrico, promovendo assim uma melhoria do impacto ambiental do sector. Como demonstra a **Figura 3**, entre 2009 e 2014 houve um crescimento da contribuição das FER para o abastecimento do consumo em 27%, fixando-se, em 2014, num total de 62%. A energia hídrica e eólica figuram como as que mais contribuem para a componente renovável do sector. Ao longo dos últimos anos tem-se verificado também um aumento da produção de origem solar, que a partir de 2010 assume uma participação já visível na matriz de produção (REN, 2011) (REN, 2015).

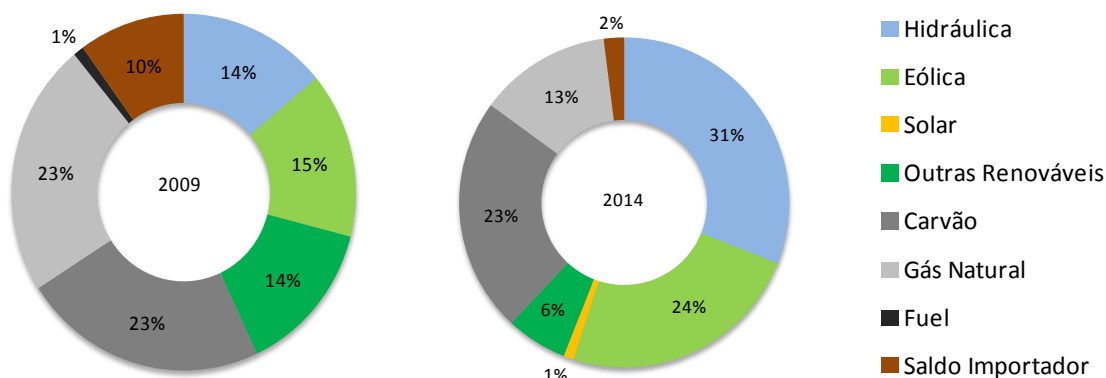


Figura 3 - Repartição da produção de energia eléctrica, em Portugal continental, referente a 2009 e 2014 (REN, 2011) (REN, 2015).

Transporte

No SEN, o transporte de eletricidade é efetuado através da Rede Nacional de Transporte (RNT), mediante uma concessão única exercida em exclusivo e em regime de serviço público. A concessão integra a gestão técnica total, de forma a assegurar a coordenação entre a produção e a distribuição, assegurando a continuidade e a segurança do abastecimento (ERSE, 2009a).

Distribuição

A distribuição tem por base a Rede Nacional de Distribuição (RND), composta por redes de alta, média e baixa tensão. Tal como a RNT, é explorada por um regime de única concessão do Estado, exercida em exclusivo e perante regulamento de serviço público. As RND são

responsáveis pelo escoamento da energia elétrica desde as subestações da RNT até às instalações consumidoras sendo que, para além da fiabilidade, segurança e qualidade de serviço, é importante assegurar a interoperacionalidade com as redes a que esteja ligada e com as instalações consumidoras (EDP, 2009b).

Comercialização

A comercialização de eletricidade é livre, estando sujeita a licenciamento e permitindo a entrada de novos agentes. A liberalização do setor pretende gerar concorrência que estimule o aumento da eficiência das empresas e gere benefícios para os consumidores.

O exercício desta atividade consiste na compra e venda de eletricidade para comercialização a clientes finais ou outros agentes, através de contratos bilaterais ou da participação em mercados de eletricidade. Os agentes estão sujeitos a obrigações de serviço público para assegurar a qualidade e continuidade do fornecimento, e devem disponibilizar informação aos consumidores (Castro, 2011).

Consumo

As necessidades de energia elétrica dos consumidores são o motivo para o funcionamento de toda a complexa estrutura do SEN.

Em Portugal, entre 1994 e 2010, o consumo de energia elétrica quase duplicou, registando um aumento superior a 80% - em 2010 registou-se o maior consumo de eletricidade no país, 50,5 TWh. Apesar disso, nos últimos anos, influenciado quer pela crise económica, quer pelas medidas de eficiência energética entretanto aplicadas, o consumo tem experimentado uma tendência de queda (ligeira) como é visível na **Figura 4** (PORDATA, 2014).

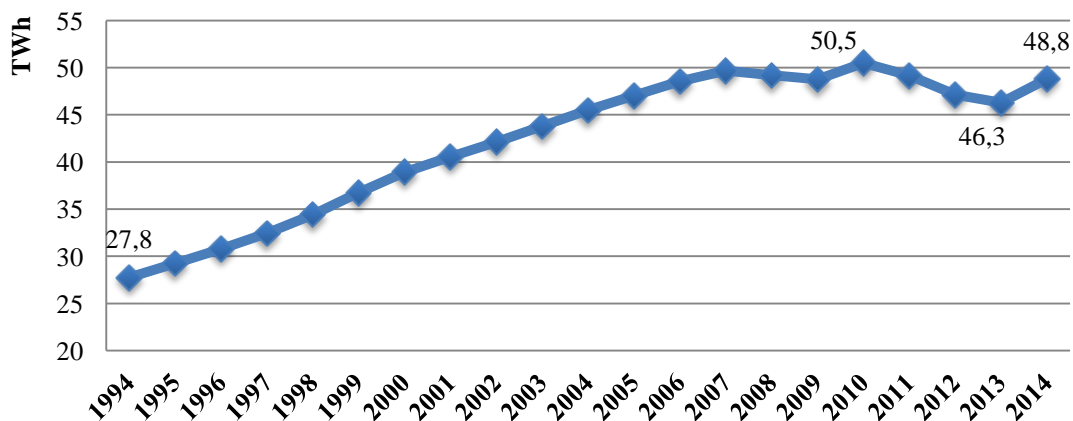


Figura 4 - Evolução do consumo de energia elétrica em Portugal (PORDATA, 2014) (REN, 2015).

O consumo global de energia elétrica não varia somente ao longo do ano, mas sim a cada instante. Para uma operação estável e segura do SEN é necessário garantir, a cada momento, o equilíbrio entre a produção e o consumo, garantia de estabilidade de um sistema electroprodutor (Kundur, 1994).

Resultado das alterações verificadas ao longo dos últimos anos, atualmente o parque electroprodutor é composto por centrais de diferentes características. O crescente aumento de incorporação de centrais não despacháveis, i.e. centrais que não permitem variação da energia entregue à rede, como é o caso das renováveis sem sistema de acumulação (e.g. centrais eólicas ou fotovoltaicas) dificulta o ajuste entre a produção e o consumo (IEA, 2015).

Num contexto com considerável penetração de fontes de energia não controláveis e caracterizadas por uma acentuada variabilidade temporal e espacial do recurso, é fundamental implementar estratégias de equilíbrio do sistema. As alterações do parque electroprodutor terão

de ser acompanhadas por alterações do conceito de gestão da rede, em particular com a introdução de tecnologia que permite monitorizar e gerir a rede de forma ativa, tornando a rede elétrica cada vez mais inteligente - "*Smart Grid*" (IEA, 2011).

Nos dias de hoje, já estão implementadas no sistema elétrico estratégias que pretendem compensar a variabilidade da produção, de modo a garantir a segurança do abastecimento. No plano de gestão destaca-se a importância da reserva térmica, do armazenamento em albufeira e as interligações com outras redes (REN, 2008).

A utilização de centrais controláveis é uma das soluções mais testadas em termos de operacionalidade do sistema para compensar súbitas oscilações da procura. Para este efeito são utilizadas centrais controláveis preferencialmente com curtos tempos de resposta, que garantem uma rápida atuação e asseguram reserva de potência ao sistema electroprodutor, correspondente ao diferencial entre a potência instalada e o somatório das potências geradas pelas centrais em cada momento (REN, 2008). Apesar dos custos económicos acrescentados ao sistema, a variação de potência capaz de ser acomodada em segurança pelo sistema electroprodutor, desempenha uma importante função para permitir o seguro funcionamento do mesmo perante situações de súbitas oscilações da procura (IEA, 2005).

Por seu lado, o armazenamento de energia acrescenta flexibilidade ao sistema na gestão do equilíbrio entre produção e consumo. No sistema electroprodutor, somente as centrais hidroelétricas com albufeira, e em certos casos acrescentadas de bombagem, apresentam capacidade de armazenamento relevante, fruto de um conjunto de vantagens que englobam o potencial para armazenar energia em larga escala, o rápido tempo de resposta e custos de funcionamento sustentáveis para o SEN. Estas centrais podem ser consideradas também como um potencial gerador de mais-valias económicas, através do armazenamento de energia em períodos de menor consumo - períodos de vazio - onde o preço da energia é menor, e posterior reintrodução no sistema em períodos de maior consumo - períodos de ponta - onde o preço é mais elevado (IEA, 2005). Atualmente, também a troca de energia entre diferentes sistemas electroprodutores, possível em redes interligadas, como é exemplo a rede elétrica europeia, se apresenta como um mecanismo importante no funcionamento equilibrado do sistema (ENTSO-E, 2015).

Uma nova rede de interligações com países próximos, o aumento da capacidade de armazenamento, quer por incremento de bombagem em hidroelétricas com albufeira, quer numa perspetiva de proliferação de veículos elétricos que permitam o armazenamento em baterias, são meios normalmente apontados para aumentar a flexibilidade do sistema electroprodutor, uma característica essencial na maximização da integração de fontes renováveis variáveis no tempo (IEA Wind Task 25, 2009).

Contudo, o aumento do controlo, não só da produção, através do aumento da sua flexibilidade e capacidade de resposta, mas igualmente da potência requerida pelos consumidores, sobretudo através do desenvolvimento de sistemas ativos e geridos pelos próprios consumidores, desempenhará certamente um papel crucial no novo paradigma das redes ativas, normalmente referidas por "redes inteligentes" (IEA, 2011).

Gestão do Novo Paradigma

Um dos desafios atuais é investigar soluções para uma gestão eficiente e segura dos sistemas electroprodutores, nos quais se prevê que FER não despacháveis assumam um papel dominante. Neste sentido, os esforços de I&D recentemente realizados (IEA Wind Task 25, 2009) propõem a combinação de soluções de forma a mitigar o impacto da variabilidade deste tipo de recursos renováveis.

Um desses estudos simula um aumento do consumo e cenários extremos de produção FER, em particular hídrica e eólica, com horizonte em 2020 e com base em dados referentes a 2010. Para compensar a variabilidade temporal da produção foram utilizados como meios de gestão do

binómio produção/consumo, o armazenamento de energia em albufeiras com recurso a sistemas de bombagem e, de forma distribuída, nas baterias que equipam os veículos elétricos, e ainda o recurso a centrais despacháveis (Mateus & Estanqueiro, 2012). Foram estimados cenários do diagrama de carga para dias do ano com abundância extrema dos recursos renováveis mais utilizados na produção de energia, **Figura 5**.

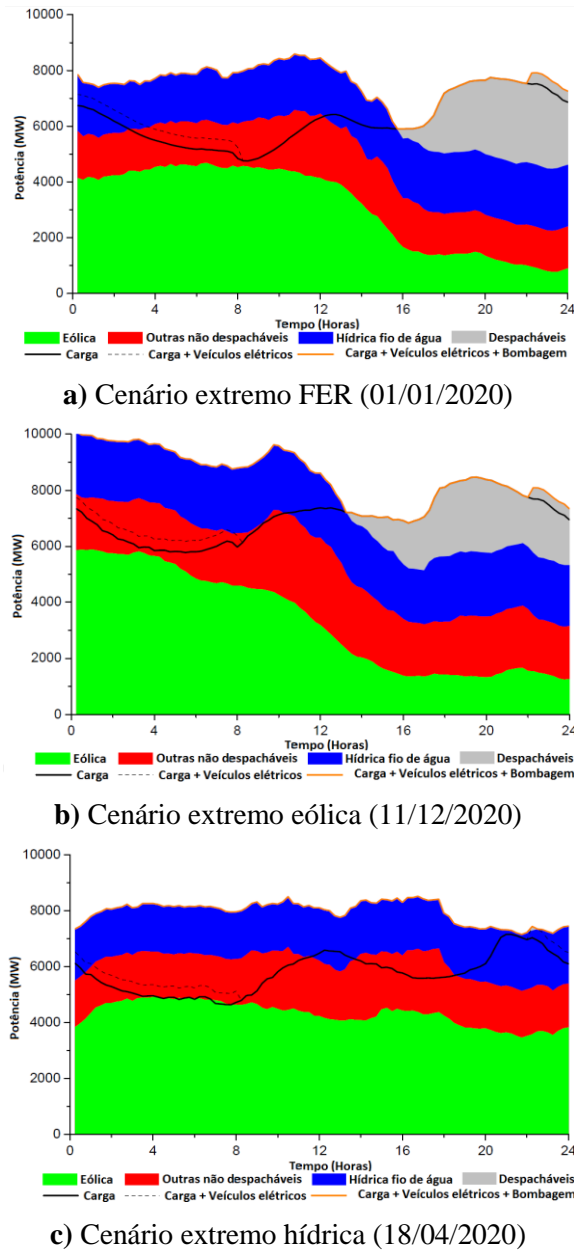


Figura 5 - Cenários referentes a 2020 para diagrama de cargas relativos a dias com elevada penetração de centrais não despacháveis (Mateus & Estanqueiro, 2012).

A análise dos cenários anteriormente apresentados ilustra a variabilidade diária das FER e a forma como a produção com base nestes recursos não é controlável e ajustável à curva da procura de energia. Para além do recurso a centrais despacháveis, que assumem o papel de *backup* para períodos de insuficiente produção de origem FER, urge a necessidade de utilização de soluções adicionais que permitam conciliar a produção com o consumo a cada momento.

O aumento de soluções de armazenamento, especialmente com recurso a bombagem, é uma solução que permite rapidamente equilibrar as curvas de consumo e procura. Este conceito alcança maior destaque em momentos do dia caracterizados por baixo consumo e elevada

produção. A conjugação entre a elevada produção eólica variável e a hídrica com bombagem é uma estratégia que permite o aumento da disseminação destas tecnologias FER no parque electroprodutor nacional (Resende & Peças Lopes, 2011).

Outros mecanismos utilizados hoje em dia na gestão do SEN consistem no reforço das interligações com os sistemas dos países da Europa eletricamente mais próximos, nomeadamente Espanha, no caso português, permitindo assim trocas comerciais de energia entre sistemas electroprodutores. Num cenário dominado sobretudo pela utilização de recursos renováveis com características semelhantes para a produção FER por parte de países vizinhos, este último mecanismo de gestão torna-se pouco significativo, visto que o excesso de produção FER em Portugal coincidirá com o excesso no país vizinho. Fruto desta similaridade do perfil de produção, a exportação energética assumirá um papel menos significativo e não é considerada em muitos cenários futuros, como os apresentados na **Figura 5** (Mateus & Estanqueiro, 2012).

A limitação das técnicas de controlo da produção estimula a necessidade do controlo da procura de energia. A gestão, por exemplo, de um possível advento dos veículos elétricos permitirá influenciar o diagrama de consumo durante o período noturno - período de baixo consumo e elevada produção - aproximando, através do carregamento das baterias dos veículos durante o período de vazio, o consumo à produção (Resende & Peças Lopes, 2011).

Contudo, nas horas de maior consumo, períodos de ponta, a maior parte dos recursos implementados para compensar a variabilidade das FER estará a ser utilizado. Um súbito aumento de consumo ou decréscimo de produção variável nesses períodos, poderá colocar em causa a estabilidade do sistema electroprodutor (Moura & de Almeida, 2010). Estratégias que permitam gerir as cargas de forma a controlar o perfil de consumo, contribuirão para a operacionalidade do sistema, os seus custos operacionais e aumentando a confiabilidade e a segurança do abastecimento do mesmo.

2.2 Gestão do Consumo

A participação dos consumidores na operação do sistema electroprodutor é um ponto essencial ao estabelecimento das "redes inteligentes". As estratégias de gestão do consumo são um dos focos principais das abordagens e projetos pilotos implementados com o objetivo de estudar o desempenho das "cidades inteligentes" (IEEE, 2015). Exemplo disso é o projeto piloto InovGrid, com aplicação em Portugal, mais concretamente em Évora, liderado pela empresa Energias de Portugal (EDP) e inserido num projeto europeu de planeamento e integração de "cidades inteligentes". Este projeto pretende dotar a rede elétrica com capacidade de inteligência na sua gestão e controlo, permitindo a regulação de produção distribuída. Um dos focos consiste na implementação de tecnologia associada aos consumidores, permitindo a troca de informação e incentivando a gestão dos seus consumos. São também dotadas as subestações com equipamentos responsáveis por centralizar as comunicações, realizar a sua monitorização e controlo remoto (Prata et al., 2011).

Contexto e Aplicabilidade

A gestão do consumo consiste num conjunto de tecnologias, produtos e programas que pretendem influenciar os padrões de consumo de forma a otimizar a utilização da capacidade instalada no sistema electroprodutor. Estas iniciativas, processos e equipamentos promovem, essencialmente, duas práticas: a utilização eficiente da energia e a alteração do perfil de consumo, em particular atuando sobre os picos do mesmo (Davito et al., 2010) deslocando temporalmente consumos em horas de ponta (i.e. as horas de maior consumo) para os períodos de vazio (períodos de menor consumo, normalmente durante a noite). A gestão do consumo envolve a implementação de diferentes estratégias que pretendem contribuir para a operação estável do SEN, podendo atuar de diversas formas sobre o diagrama de carga, **Figura 6**.

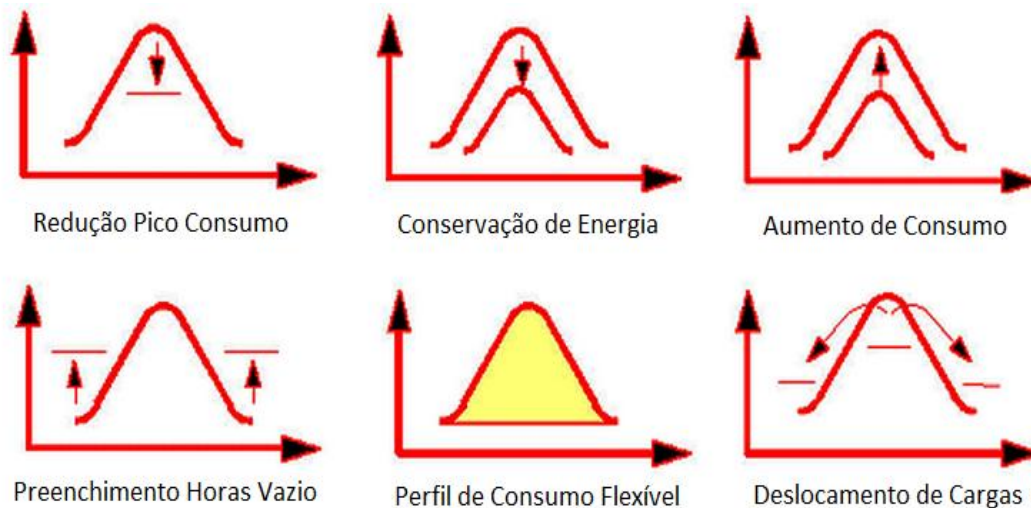


Figura 6 - Alterações do perfil de consumo obtidas através de estratégias de gestão do consumo (TATA Power, 2015).

O aumento do controlo que a gestão do consumo oferece ao SEN satisfaz alguns dos requisitos necessários para possibilitar a mudança de paradigma e a entrada de maior capacidade de centrais renováveis no parque electroprodutor. A menor capacidade de controlo sobre a produção, devido à elevada participação de geração não despachável no parque electroprodutor, é colmatado com um maior controlo sobre os padrões de consumo, mantendo o equilíbrio entre as duas variáveis.

Existem diferentes formas de introduzir ações de gestão do consumo, entre as quais (Monteiro, 2005):

- Técnicas de telecontagem e atuação remota sobre os consumos;
- Estratégias de comercialização de energia;
- Estratégias de educação do consumidor;
- Estratégias de ordenamento e planeamento;
- Estratégias sobre as tecnologias de consumo.

A aplicação destas ações tem, para além dos objetivos gerais, interesses específicos por parte dos diferentes intervenientes do sector (Monteiro, 2005):

I. Empresas do sector:

- Adiar o investimento em novos equipamentos;
- Diminuir os custos de operação através da diminuição de perdas;
- Maximizar o fator de utilização dos equipamentos.

II. Interesses Nacionais:

- Diminuir o consumo energético;
- Melhorar a eficiência na utilização de recursos nacionais;
- Evitar a construção de novas infra-estruturas elétricas e consequentes impactos sociais e ambientais;
- Cumprir compromissos nacionais sobre impactos ambientais globais.

III. Consumidor:

- Diminuição da fatura referente a gastos energéticos;
- Aumento da consciencialização ambiental.

Consoante o seu modo de aplicação e o impacto no desempenho energético dos consumidores, as estratégias de gestão do consumo podem dividir-se em dois tipos: i) estratégias que pretendem influenciar a eficiência da utilização de energia; e ii) estratégias que pretendem a exclusiva alteração do perfil dos consumidores domésticos, pequenas indústrias e comércio, geralmente designado como *Demand Response* (DR) (U.S. Department of Energy, 2006).

No que diz respeito ao conjunto de procedimentos que pretendem atuar sobre a eficiência da utilização da energia elétrica, estas pretendem controlar a energia consumida através da informação dos consumidores relativamente ao seu desempenho energético. A disseminação de tecnologia, que permite a partilha de informação entre os pontos de controlo da rede e os consumidores, dotando-os de ferramentas capazes de gerir os seus consumos em prol de uma redução da fatura energética, é uma das estratégias mais exploradas (Palensky & Dietrich, 2011).

Por sua vez, o conceito de DR é definido como a ocorrência de alterações do perfil do consumo em resposta a alterações do preço de eletricidade (ou através de outros incentivos) para reduzir o consumo nos picos de carga. O conjunto de medidas incluídas no conceito de DR, ao contrário das estratégias que pretendem incidir sobre a eficiência energética, não implicam necessariamente uma redução do consumo (Palensky & Dietrich, 2011). Existem três formas principais de alterar o perfil de consumo através de estratégias de DR: 1) reduzir a procura nos períodos de ponta sem deslocamento temporal de cargas; 2) reduzir as cargas no período de ponta transferindo-as para períodos de baixa procura; 3) produção local para responder a uma necessidade pontual do consumidor (Saele & Grande, 2011).

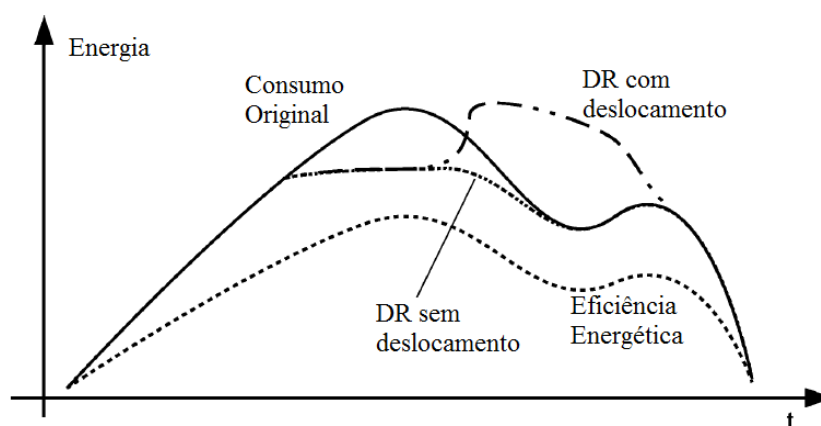


Figura 7 - Diferentes impactos entre estratégias de eficiência energética e DR (Palensky & Dietrich, 2011).

Estratégias de Demand Response

Os programas de DR são mais implementados no âmbito de consumidores industriais e comerciais, sendo que, recentemente, têm ocorrido esforços para ampliar a sua aplicação aos consumidores domésticos. Esses programas ocorrem essencialmente através de quatro formas distintas: 1) controlo direto das cargas domésticas por parte dos operadores da rede; 2) interrupções de cargas previamente definidas em troca de benefícios económicos; 3) aplicação de sistemas tarifários com diferentes preços consoante o período do dia - aumento do preço da

energia elétrica em períodos de elevada procura, períodos de ponta, e diminuição do preço em períodos de baixa procura, vazios; 4) sistema de preços em tempo real, através da transmissão, aos consumidores, da informação referente ao preço da eletricidade (Pipattanasomporn et al., 2012).

O momento de aplicação de uma estratégia DR corresponde a um período no qual é necessário fornecer uma resposta rápida para diminuir a procura de energia, colmatando uma condição de sobrecarga do sistema (Pipattanasomporn et al., 2012). Os consumidores que participam nos programas em questão são informados por um sinal externo, proveniente do operador da rede, através da disseminação de tecnologia que permite a troca de informação entre os dois intervenientes. A informação, consoante a estratégia em questão, poderá referir-se ao preço da energia elétrica, uma ordem para o controlo, ou ainda a informação para deslocamento de uma carga para certo período de menor procura (Palensky & Dietrich, 2011).

Neste contexto de controlabilidade de cargas domésticas, a definição das cargas quanto à possibilidade do seu controlo em tempo real, i.e. a flexibilidade do seu funcionamento, é uma questão essencial. O DR aplica-se a cargas cujo controlo, por parte do operador da rede elétrica (ou sistema electroprodutor) não provoca impactos significativos no estilo de vida dos consumidores, cargas não prioritárias (e.g. cargas de climatização ambiente, aquecedores de água, máquina de lavar ou secar roupa e máquinas de lavar loiça). Por outro lado, as cargas que não podem ser controladas sob o propósito de afetar o estilo de vida dos consumidores (e.g. iluminação, frigoríficos), não são inseridas nos programas de DR (Shao et al., 2011).

No universo de programas de gestão do consumo, e em particular de DR, aplicados aos consumidores domésticos, os sistemas mais utilizados referem-se a sistemas de controlo manual. Estes sistemas dependem, em exclusivo, da ação dos consumidores perante informações que lhes são transmitidas (Pipattanasomporn et al., 2012). Neste contexto, o sucesso dos programas depende, não só do modo de comunicação com os consumidores, mas também da consciência, atitude e do comportamento dos mesmos (Lujano-Rojas et al., 2012). Se, no caso da transmissão de informação, o avanço tecnológico tem permitido uma melhoria na forma de comunicação, no que envolve o fator humano, o seu desempenho é variável consoante a sensibilidade e empenho dos consumidores (Palensky & Dietrich, 2011).

Vários estudos têm sido realizados no sentido de avaliar o comportamento dos consumidores perante os programas de DR. Em particular, um estudo realizado na Suécia (Bartusch et al., 2011), demonstra que os consumidores são, na sua maioria, sensíveis às variações de preços da eletricidade, recorrendo a um deslocamento temporal de cargas dos períodos de ponta, para períodos de menor consumo e tarifas mais reduzidas. Contudo, a dependência do comportamento dos consumidores e a sua falta de conhecimentos, continua a ser considerado um dos maiores entraves à aplicação de programas de gestão do consumo (IEEE, 2015).

Por forma a ultrapassar os constrangimentos dependentes do comportamento humano, para além do aumento da informação e tentativas de consciencialização dos consumidores, alguns projetos pilotos combinam medidas automáticas na tentativa de aumentar a eficácia dos programas de DR. Um desses projetos, realizado na Noruega (Saele & Grande, 2011), combina soluções informativas relativas à variação do preço da eletricidade, com a medida de controlo remoto de cargas. No que diz respeito ao controlo remoto, este foi realizado sobre cargas não prioritárias, no caso aquecedores de água elétricos, e aplicado aos períodos de maior consumo (8:00 - 10:00 e 17:00 - 19:00), durante os dias da semana. Os resultados do estudo evidenciam a capacidade do programa, sem que tenham sido demonstradas consequências negativas relativas ao controlo remoto das cargas em questão (Saele & Grande, 2011).



Figura 8 - Perfil de consumo para consumidores domésticos com controlo remoto de aquecedores de água elétricos (Saele & Grande, 2011).

Tendo em vista os resultados dos projetos que incluem nível de automação na gestão do consumo dos consumidores domésticos, existem já algoritmos que pretendem gerar programas de DR totalmente automatizados. A gestão totalmente automatizada é normalmente apoiada através de sistemas de monitorização dos consumos domésticos, especificamente através da monitorização dos aparelhos em questão, com objetivo de realizar o seu controlo consoante requisitos específicos (Pipattanasomporn et al., 2012).

A investigação realizada nesta área, tem permitido gerar simulações que fornecem informação relativa à classificação de cargas que podem ser utilizadas para o controlo doméstico, à otimização das preferências dos consumidores e ao impacto dos sistemas automatizados no perfil dos mesmos (Pipattanasomporn et al., 2012).

Um dos algoritmos desenvolvidos (Pipattanasomporn et al., 2012), pretende a simulação do impacto no perfil de um consumidor doméstico, resultante da atuação de um sistema de gestão e controlo de cargas, em resposta a sinais recebidos por parte dos operadores da rede. Na definição do algoritmo, foram determinadas as cargas a monitorizar e as preferências dos consumidores de forma a provocar o mínimo impacto no estilo de vida dos mesmos. Foram definidas como cargas não prioritárias, segundo ordem de prioridade, o aquecedor de água, o sistema de climatização, secadores de roupa, e o carregamento dos carros elétricos, **Figura 9**. A estas cargas foram adicionadas informações preferenciais.

Os resultados do algoritmo desenvolvido indicam que o sistema concebido responde adequadamente a um limite de carga imposto, sendo que, para o efeito, poderá sacrificar algumas das preferências de conforto dos consumidores e criar um pico de consumo adicional após períodos de controlo significativo, como representado na **Figura 10**.

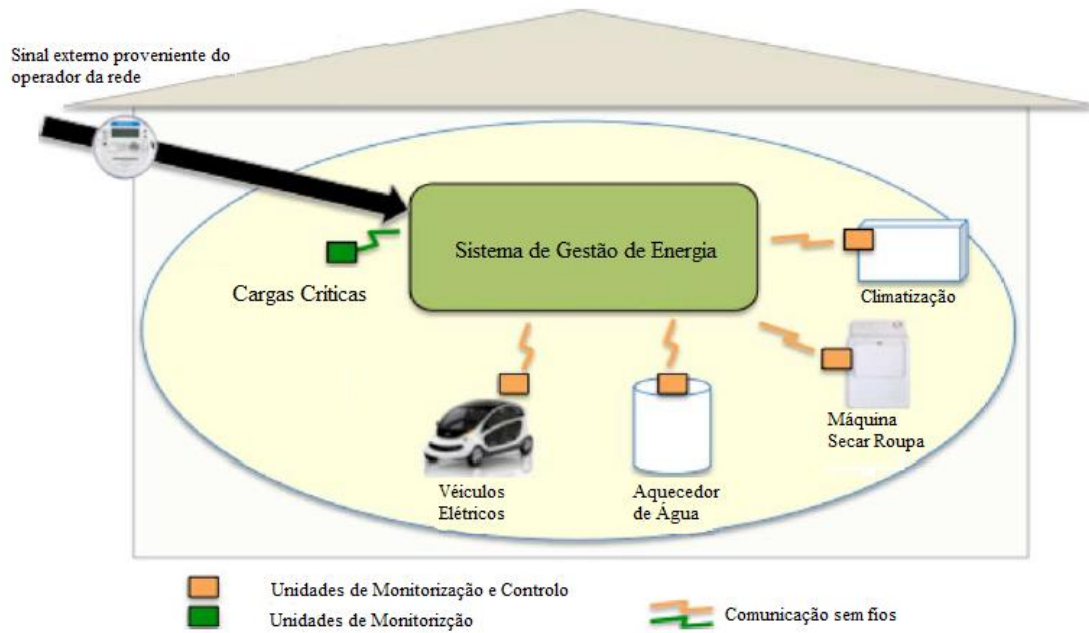


Figura 9 - Arquitetura do sistema referente ao algoritmo do sistema automático (Pipattanasomporn et al., 2012).

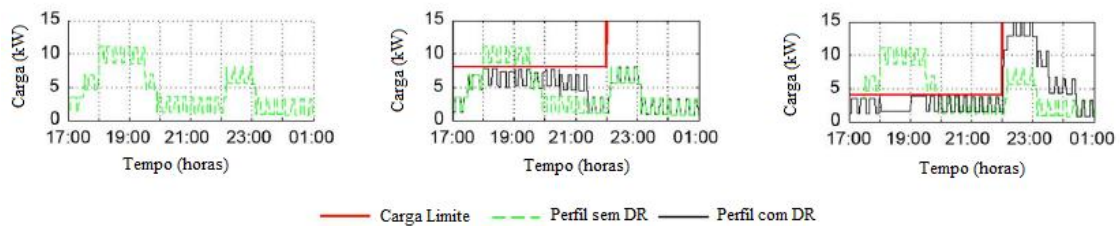


Figura 10 - Resultado simulado da aplicação do sistema de controlo de carga automatizado (Pipattanasomporn et al., 2012).

O potencial destes programas automatizados indicia o papel crucial que os sistemas de monitorização e gestão automática dos consumos domésticos terão para a implementação dos programas de DR, deixando a sua aplicabilidade de depender do comportamento e iniciativas por parte dos consumidores (Pipattanasomporn et al., 2012).

2.3 Enquadramento e Posição do Problema

Em Portugal, dados referentes a 2013 indicam que o sector doméstico é o terceiro sector que mais eletricidade consome, 26%, logo a seguir aos serviços que representam 34% e à indústria com 37% (DGEG, 2015). A análise do típico diagrama de carga nacional evidencia o peso das cargas domésticas, o pico de consumo diário ocorre a partir das 17 horas, ou seja, é provocado pelo consumo doméstico, **Figura 11** (REN, 2015).

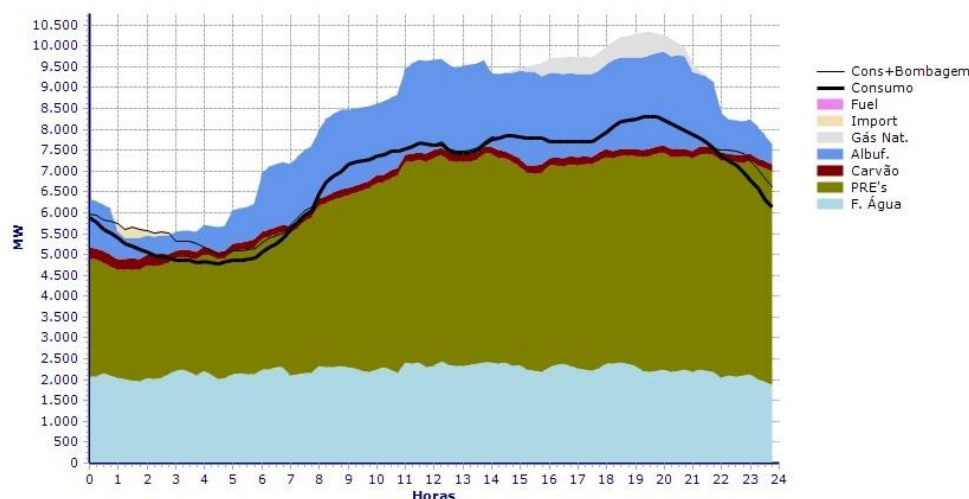


Figura 11 - Diagrama de carga nacional no dia de ponta anual - 4 de Fevereiro de 2014 (REN, 2015)

Neste enquadramento nacional, a atuação sobre os consumidores domésticos, em particular através da criação de estratégias de gestão do seu consumo, permite uma contribuição efetiva para a regulação do sistema electroprodutor e intervenção sobre os períodos de maior consumo.

Num futuro ideal, a difusão da tecnologia pela rede elétrica irá permitir uma gestão automática e inteligente, capaz de regular um SEN assente em produção de centrais não controláveis como as renováveis (IEA, 2011). Atualmente, e para que prossiga a mudança de paradigma, é vital a criação e inclusão junto dos consumidores de novos sistemas capazes de controlar o perfil do consumo doméstico.

Para além do âmbito dos gestores da operação do SEN, em Portugal existe um número considerável de instalações domésticas cuja potência instalada é muito baixa, que podem beneficiar, quer económica, quer socialmente, da instalação de sistemas desta natureza, evitando assim o investimentos adicionais no reforço das baixadas de alimentação.

Neste contexto, um sistema de gestão e controlo de cargas domésticas que englobe, não somente a monitorização dinâmica de consumos, mas também a ação sobre as cargas domésticas não prioritárias, será um instrumento que permite controlar os consumos das instalações elétricas e os seus custos.

Na definição das cargas não prioritárias a controlar, as cargas domésticas resistivas (e.g. sistemas de aquecimento) são as melhores candidatas a este tipo de sistemas, visto o controlo de cargas que indutivas, quer capacitivas, requerer cuidados acrescidos no seu controlo.

Neste trabalho é proposto, tendo por base dispositivos eletrónicos de baixo custo, o desenvolvimento de um sistema de gestão e controlo de cargas domésticas resistivas não prioritárias, típicas de um sistema de aquecimento, através da gestão da temperatura ambiente.

3. Monitorização e Controlo de Consumos Domésticos

A monitorização de consumos domésticos permite a utilização racional da energia por parte dos consumidores, através do conhecimento do seu desempenho energético. Possibilita a perceção de quais os comportamentos mais gastadores, induzindo a alteração de hábitos perante a possibilidade de redução da fatura elétrica.

Os sistemas de monitorização fornecem um conjunto de benefícios, entre os quais:

- Suporte à tomada de decisão - a disponibilidade de informação permite a alteração comportamental;
- Redução da fatura energética - a utilização racional da energia resulta numa redução de custos;
- Vantagens ambientais - uma maior eficiência energética diminui o nível de emissões de gases para a atmosfera provenientes da produção energética;
- Previsibilidade de consumos - o conhecimento do desempenho energético permite aos consumidores prever custos associados e desta forma regular a sua atividade.

O avanço da tecnologia tem permitido aperfeiçoar a troca de informação entre os gestores da rede e os consumidores. Os tradicionais contadores unidirecionais foram sendo alvo de evoluções tecnológicas e, atualmente, existem contadores digitais capazes de fornecer informação detalhada sobre os consumos de energia, facilitando a comunicação bidirecional entre os consumidores e a empresa que presta os serviços. Pelo facto de estarem dotados por elevado nível tecnológico são comumente designados por contadores inteligentes - *Smart Meters* (Benzi et al., 2011).

Para além dos contadores inteligentes, que são predominantemente desenhados para uma comunicação automática de informação, existem sistemas intermédios de monitorização de consumos domésticos que têm como principal objetivo o de fornecer aos consumidores acesso direto ao seu desempenho energético, gerando benefícios quer para o gestor da rede, quer para os consumidores (van Dam et al., 2013). Estes sistemas têm a capacidade de recolha de dados através de sensores e medidores inteligentes, permitindo a gestão dos próprios consumos com base na informação obtida (Vega et al., 2015).

O universo de sistemas de monitorização de consumos domésticos pode dividir-se, consoante a função para a qual são projetados, em sistemas de monitorização dos quadros elétricos - capazes de medir o consumo total de eletricidade na habitação - e sistemas de monitorização de equipamentos elétricos - dotados para a medição do consumo associado somente a certas cargas domésticas.

Os sistemas concebidos para a medição do quadro elétrico, são sistemas preparados para a avaliação do consumo de toda a habitação, requerem um maior cuidado de manuseamento pelo facto de medirem valores elevados dos parâmetros elétricos, e, por norma, são mais robustos. Por seu lado, os sistemas dotados para a medição do consumo de equipamentos elétricos, são por regra de menores dimensões e concedido para uma instalação menos complexa.

A monitorização de consumos dos equipamentos elétricos é realizada com dispositivos portáteis, que se instalam nas tomadas elétricas, e efetuam a ligação entre a tomada elétrica e o equipamento a monitorizar. Para realizar uma monitorização total dos consumos de uma habitação é necessária a utilização de vários equipamentos, dotando as tomadas elétricas com sistemas portáteis de monitorização.

A informação avaliada pelos dispositivos portáteis pode ser transmitida aos consumidores através, por exemplo, de um visor do próprio equipamento, de uma ligação a um computador, da transmissão de dados para uma plataforma na internet ou através de uma rede de

comunicação sem fios (vulgarmente designada em inglês por *wireless*) com um dispositivo de interface do sistema. Neste último caso, quer os equipamentos de medição de consumo local, quer o dispositivo de interface da informação, necessitam de incluir módulos de comunicação para que estabeleçam uma rede sem fios entre si.

Devido ao crescente interesse verificado, nos últimos anos, neste tipo de sistemas, atualmente existem diversas soluções no mercado. Um dos projetos que tem permitido o desenvolvimento nesta área é o denominado *OpenEnergyMonitor* (OEM). O OEM é um projeto de *software* livre, elaborado por especialistas voluntários, que pretende desenvolver ferramentas de monitorização energética. Um dos objetivos deste projeto é a constituição de unidades de monitorização de energia, compatíveis com a plataforma *Arduino*, que comunicam com uma unidade base através de comunicação sem fios (*OpenEnergyMonitor*, 2015).

Os sistemas de monitorização de energia são, por regra, elementos passivos visto que, apesar de transmitirem informação sobre os consumos, a tomada de decisão e atuação sobre o seu desempenho energético depende somente das ações dos consumidores. O acréscimo da capacidade de controlo sobre as cargas domésticas, tal como é pretendido neste trabalho, converte os sistemas passivos de monitorização, atualmente já existentes na totalidade das aplicações de redes inteligentes em Portugal (e.g. Projeto *InovGrid* (Prata et al., 2011) ou projeto *Lisboa E-Nova* (Lisboa E-Nova, 2015)), em instrumentos ativos da gestão e controlo dos hábitos energéticos dos consumidores amplificando, desse modo, os impactos positivos da gestão de consumos.

3.1 Métodos de Medição

Apesar das especificidades definidas consoante, por exemplo, a quantidade de parâmetros a avaliar e o tipo de interface, os sistemas de gestão e controlo de cargas são constituídos geralmente por um conjunto definido de componentes:

- Sensores e transdutores que detetam os sinais desejados e respondem em consequência dos mesmos;
- Dispositivo capaz de realizar a aquisição e tratamento de dados;
- Componente de armazenamento de dados;
- Interface para a visualização de resultados;
- Capacidade de estabelecer comunicação entre os diferentes componentes do sistema.

O ciclo de funcionamento destes sistemas inicia-se com a deteção dos sinais elétricos e, opcionalmente, também de condições ambientais do local, através de sensores capazes de realizar tais funções. Posteriormente, ocorre a análise e o processamento de dados por parte do dispositivo base, geralmente um microcontrolador, e, por fim, os resultados são disponibilizados aos utilizadores.

A informação disponibilizada referente ao consumo de cada equipamento elétrico monitorizado, tem por base os sinais de alimentação da carga - tensão e corrente. A deteção dos sinais destas grandezas permite o cálculo dos valores eficazes das mesmas, a potência aparente, potência ativa, e por consequente o fator de potência.

A distribuição de energia elétrica das fontes geradoras até aos consumidores é feita em corrente alternada e a instalação típica de um cliente doméstico é de 230V (ERSE, 2009c). Devido à sua natureza alternada, estas grandezas elétricas são caracterizadas por sinais que variam sinusoidalmente no tempo, com frequência de 50 Hz no continente Europeu.

Desta forma, o funcionamento dos sistemas de monitorização tem por base a deteção e estudo de sinais elétricos de natureza sinusoidal, cujas suas características são (Estanqueiro, 2013):

- Valor instantâneo - representa-se matematicamente por uma função sinusoidal que varia com o tempo (t). Respetivamente para a tensão - $v(t)$ - e para a corrente - $i(t)$:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \alpha_v) \quad (1)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \alpha_i) \quad (2)$$

onde V_m e I_m são, respetivamente, as amplitudes dos sinais de tensão e corrente, ω a frequência angular em radianos por segundo e α a fase na origem dos tempos ($t = 0$).

- Período e frequência - uma função com variação sinusoidal tem como característica um intervalo de tempo no qual o ciclo se repete - o período (T_p), em segundos. Define-se também outra característica diretamente relacionada com o período - a frequência (f), número de ciclos por segundo, cuja unidade é o *Hertz* (Hz). A relação entre a frequência e o período é:

$$f = \frac{1}{T_p} \quad (3)$$

- Valor de pico - corresponde às amplitudes dos sinais, V_m e I_m . Representam o valor instantâneo mais elevado dos sinais de tensão e corrente, respetivamente.
- Valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*) - valor de uma grandeza alternada que a relaciona com uma grandeza contínua. Define-se como o valor da grandeza contínua que produz o mesmo calor para uma dada resistência, que a grandeza alternada em questão. Matematicamente, este valor expressa-se, respetivamente para a tensão (V_{RMS}) e a corrente (I_{RMS}) (Estanqueiro, 2013):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v(t))^2 dt} \quad (4)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i(t))^2 dt} \quad (5)$$

O valor eficaz relaciona-se com o valor de pico do sinal sinusoidal segundo (Estanqueiro, 2013):

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

$$I_{RMS} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

As medições efetuadas a sinais de natureza alternada com recurso, quer a voltímetros, quer a amperímetros, com transdutores convencionais e disponíveis no mercado, resultam no valor eficaz do sinal em questão. Nos sistemas de monitorização, o objetivo consiste no cálculo dos valores eficazes da tensão e corrente, através da leitura de um conjunto de pontos das ondas sinusoidais características dos sinais. Ao desenvolver um sistema de medição da tensão da rede, é necessário ter em atenção que este terá de ser dimensionado para o valor máximo instantâneo do sinal, no caso em estudo, o valor eficaz de 230V corresponde ao valor de pico (nominal) da tensão de aproximadamente 330V.

A leitura do conjunto de pontos das ondas da tensão e corrente, permite aos sistemas de monitorização a caracterização do fluxo de energia. Num sistema elétrico linear, conhecidos os sinais da tensão aplicada, $v(t)$, e a corrente que percorre o sistema, $i(t)$, a potência instantânea corresponde à potência dissipada a cada instante do tempo, $p(t)$, e dada por (Estanqueiro, 2013):

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \alpha_v) \cos(\omega t + \alpha_i) \quad (8)$$

Tendo em conta as definições de valor eficaz e de ângulo de impedância ($\varphi = \alpha_v - \alpha_i$), obtém-se (Estanqueiro, 2013):

$$p(t) = V_{RMS} I_{RMS} [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t + \alpha_v + \alpha_i)] \quad (9)$$

Na prática, a potência consumida para a produção de trabalho útil é denominada por potência ativa (P) e resulta do valor médio da função referida e não dos valores instantâneos de potência. Esta grandeza tem como unidades o Watt (Estanqueiro, 2013):

$$P = (p(t))_{\text{médio}} = \frac{1}{T} \int_T v(t)i(t)dt \quad (10)$$

Em regimes sinusoidais, tendo em conta que o segundo termo da equação (9) tem valor médio nulo, a potência ativa pode ser obtida segundo os valores eficazes dos sinais e o fator de potência (Estanqueiro, 2013):

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi) \quad (11)$$

A grandeza em questão, pode ainda ser descrita como o produto entre uma outra grandeza de caracterização do fluxo de energia, potência aparente (S), e o fator de potência (Estanqueiro, 2013):

$$P = S \cos(\varphi) \quad (12)$$

A potência aparente, tem como unidades o Volt-Ampère e é obtido como resultado do produto entre a tensão eficaz de alimentação e a corrente eficaz que percorre o circuito (Estanqueiro, 2013):

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (13)$$

O cálculo das potências ativa e reativa, permite a obtenção do valor do fator de potência, também designado por FP , que quantifica a fração de energia elétrica que é transformada em

trabalho. Este fator relaciona a potência aparente com a potência ativa, segundo (Kuphaldt, 2006):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (14)$$

Em sistemas puramente dissipativos, i.e. com impedâncias resistivas puras, a potência aparente é igual à potência ativa, sendo o fator de potência igual a 1.

Para além das grandezas referidas anteriormente, o fluxo energético é caracterizado também por uma potência reativa. A potência reativa (Q) representa a oscilação da potência instantânea relativamente ao seu valor médio (potência ativa) e ocorre sempre que nos circuitos existem elementos capacitivos ou indutivos. A potência reativa não realiza trabalho.

3.2 Métodos de Comunicação

Atualmente, a maioria dos sistemas de monitorização e controlo dos equipamentos elétricos domésticos, recorrem a redes de comunicação que permitem a transmissão de dados e a realização de controlo remoto. Dentro das tecnologias de comunicação, existe dois grupos distintos: as tecnologias que incluem a utilização de cabos, e as tecnologias sem fios (Hafeez et al., 2014).

No universo das tecnologias que necessitam de cabos para estabelecer a comunicação, destaca-se a *Power Line Communication* (PLC), visto que a utilização dos cabos condutores da energia para a transmissão de informação, não requer a implementação de *hardware* adicional (Hafeez et al., 2014). Contudo, as tecnologias de comunicação sem fios, devido à sua facilidade de instalação e operacionalidade, têm dominado o modo de comunicação dos sistemas de monitorização e controlo de consumos domésticos (Thanuj, 2013).

Neste contexto, as tecnologias de comunicação mais utilizadas são o Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee e, recentemente, a utilização de outros módulos rádio como o RFM12B e o nRF24L01+ (Thanuj, 2013). A **Tabela 1** compara algumas das características das referidas tecnologias.

Tabela 1 - Características das tecnologias de comunicação mais utilizadas em sistemas de monitorização e controlo do consumo doméstico (Hafeez et al., 2014) (Nordic Semiconductor, 2008) (HopeRF, 2006).

	Bluetooth	Wi-Fi	ZigBee	RFM12B	nRF24L01+
Banda de Operação	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	433/868 MHz	2.4 GHz
Taxa de Transmissão	1 Mbps	11,000+kbps	250 kbps	115.2-256 kbps	250 kbps/ 1Mbps/ 2 Mbps
Alcance	10 m	1-100 m	10-100 m	300 m	100 m
Consumo	Alto	Alto	Baixo	Baixo	Baixo
Complexidade	Complexo	Muito Complexo	Simples	Simples	Simples

A tecnologia ZigBee, pelo facto de ser projetada para o estabelecimento de uma rede que permite a comunicação entre dois pontos através da utilização de dispositivos intermediários -

- Segurança da comunicação - somente o nó coordenador é indispensável para o funcionamento da rede. Os restantes nós podem alterar o seu estado de funcionamento e posição sem interromper a atividade de comunicação;
- Baixo consumo de energia - a constituição da rede baseia-se somente em módulos de baixa potência. O aumento da área de cobertura não implica o aumento da potência dos instrumentos, somente da utilização de nós de encaminhamento.

O conceito de rede malhada sem fios tem sido alvo de progressos e pretende-se que seja uma forma de resolver as limitações de outras redes sem fios mais utilizadas até hoje (Akyildiz et al., 2005). Para além da capacidade de endereçamento automático, pretende-se que a rede seja auto-reconfigurável, sendo capaz de estabelecer automaticamente a comunicação e manter de forma dinâmica a conectividade entre os nós, atualizando as ligações.

As características anteriormente expostas permitem que a rede seja alvo de pouca manutenção por parte do administrador durante o seu funcionamento. Por exemplo, as falhas de conexão são resolvidas pela própria rede ao restabelecer a conectividade entre nós, e a extração ou entrada de um nó na rede de comunicação não implica a configuração manual do utilizador, visto que a rede auto-reconfigurável identifica as alterações e automaticamente elimina ou incorpora o nó na rede (Young, 2008).

O estabelecimento de uma rede deste tipo, garante um serviço de cobertura fiável, robusto e onde a danificação de um dos nós não representa necessariamente a falha da conectividade entre todos os nós. O funcionamento da rede de comunicação depende da atividade do nó coordenador e, no caso dos nós de fecho da estrutura da rede, na existência de nós de encaminhamento.

Relativamente aos sistemas de monitorização do consumo doméstico, e tendo em conta que as funções de monitorização e controlo são realizadas nas tomadas elétricas, num cenário de uma eficiente intervenção sobre o consumo doméstico global, o sistema deverá estar espalhado por várias tomadas elétricas ao longo da habitação. Devido à limitação de alcance dos módulos de comunicação, a utilização de uma topologia malhada é assim fundamental para o correto funcionamento do sistema. As características desta topologia permitem conjugar a utilização de módulos de baixo custo, potência e alcance limitado, com a necessidade de o estabelecimento de uma ampla área de cobertura da rede.

4. Sistema de Gestão e Controlo de Consumos Domésticos Proposto

Neste capítulo será apresentado o sistema de gestão e controlo de cargas domésticas desenvolvido, construído com dispositivos eletrónicos de baixo custo existentes no mercado e *software* com base em bibliotecas de *software* livre.

O sistema deverá permitir, não somente a monitorização de consumos, mas também o controlo em tempo real sobre as cargas, segundo condições de temperatura local. Pretende-se que o sistema seja formado por uma unidade de controlo e duas unidades auxiliares que sejam capazes de realizar medições referentes às tomadas elétricas a que estão associadas. Todos os elementos deverão estar inseridos numa rede malhada sem fios, que possibilita a comunicação de dados e a atividade de controlo em tempo real, tornando as vulgares tomadas elétricas "inteligentes" e economizadoras. Na **Figura 13** pode observar-se o diagrama geral dos elementos constituintes do sistema.

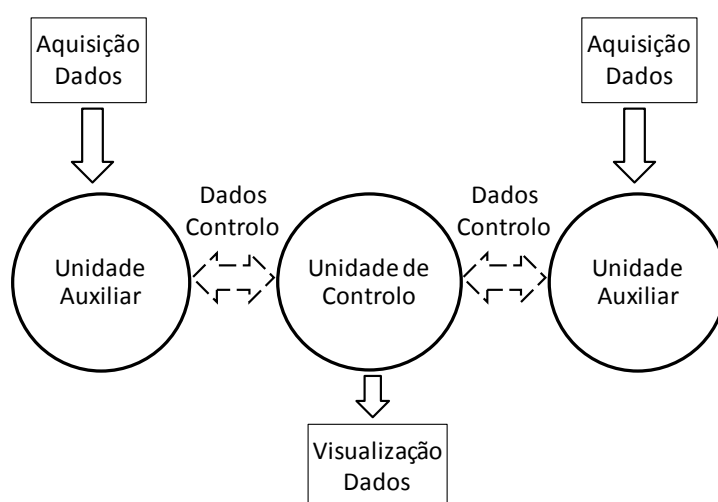


Figura 13 - Diagrama de elementos do sistema. Tracejado - comunicação sem fios.

4.1 Parâmetros a Avaliar

A implementação deste sistema permite a gestão e o controlo das cargas domésticas. Estas funcionalidades resultam da análise dos dados adquiridos por parte das unidades auxiliares, referentes às tomadas elétricas às quais estão associadas.

As unidades auxiliares têm a capacidade de obter dados relativos à corrente e à tensão de alimentação das cargas. Com a leitura desses sinais é possível analisar a tensão e a corrente eficazes, a potência ativa e, conseqüentemente, o valor da potência aparente. O cálculo dessas grandezas permite a avaliação do fator de potência.

Além das grandezas elétricas, as unidades auxiliares possuem a capacidade de medir a temperatura ambiente junto à tomada.

4.2 Rede Comunicação

A rede de comunicação entre os elementos do sistema tem por referência o modelo padrão OSI (*Open Systems Interconnection*). Este modelo é formado por sete níveis, que definem as etapas necessárias para a transmissão de dados entre dois dispositivos através de uma rede de comunicação, como está sintetizado na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Organização do modelo padrão OSI (Li et al., 2011).

Níveis	Função
1 - Meio Físico	Codificação da transmissão de dados no <i>hardware</i> que constitui o meio físico.
2 - Ligação de Dados	Acesso ao meio físico.
3 - Rede	Encaminhamento dos pacotes de dados.
4 - Transporte	Gestão do transporte de dados ao longo da rede.
5 - Sessão	Estabelecimento e término de conexões.
6 - Apresentação	Formatação de dados.
7 - Aplicação	Interface da rede de comunicação para aplicações.

Os módulos de comunicação utilizados para conceber a transmissão de dados entre os elementos do sistema são módulos rádio de baixa potência e custo, combinam as funcionalidades de transmissor e recetor no mesmo circuito, operam na banda de 2,4 GHz e incorporam o protocolo *Enhanced ShockBurst* (ESB) de comunicação de dados bidirecionais - módulos nRF24L01+ (Nordic Semiconductor, 2008). O dispositivo utilizado transmite os dados através de ondas rádio, com modulação de frequência GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), que representam o nível físico da comunicação do sistema.

O processo de comunicação de dados entre dois módulos, em que um dele funciona como transmissor (PTX) e o outro como recetor de dados (PRX), divide-se em três fases principais (RF24Network, 2015):

1. A comunicação inicia-se com a transmissão de um pacote de dados por parte do módulo PTX para o PRX. De imediato, o PTX ativa automaticamente o modo de receção para receber um pacote de reconhecimento da transmissão (*ACK - Acknowledgment packet*);
2. Se o pacote for recebido de forma válida pelo PRX, este transmite automaticamente um *ACK* para o PTX, antes de regressar ao modo recetor;
3. Caso o PTX não receba automaticamente a informação de confirmação *ACK*, retransmite, depois de aguardar um intervalo de tempo programado, o pacote de dados original e aguarda pela receção de nova confirmação *ACK*. O número máximo de retransmissões e o intervalo entre cada uma delas são parâmetros configuráveis. É importante ter-se em conta que um excesso de retransmissões, por aumentar o número de mensagens a transmitir na rede, pode tornar-se prejudicial para a comunicação do sistema.

Para além do dispositivo físico, é necessária a implementação de um nível de rede de comunicação onde é configurada a transmissão de informação entre os módulos rádios. O *software* que garante essa configuração necessária foi estabelecido com base na biblioteca de *software* livre RF24Mesh (TMRh20, 2015), que foi desenvolvida para a criação de uma rede malhada sem fios com rádios nRF24L01+, especificamente para dispositivos *Arduino* e *Raspberry Pi*.

A biblioteca RF24Mesh tem por base uma outra biblioteca, também de *software* livre anteriormente construída, RF24Network (RF24Network, 2015), que implementa o nível de rede

do modelo OSI, capaz de fornecer um sistema de endereços e encaminhamentos da informação entre rádios nRF24L01+. A RF24Mesh acrescenta funções avançadas na criação de uma rede malhada.

Na configuração da rede, são estabelecidos encaminhamentos de dados ao longo de uma sequência de módulos de comunicação até a informação atingir o ponto desejado. É composta por um ponto base, unidade de controlo, e pontos de várias ordens de comunicação distribuídos pela rede, as unidades auxiliares. A distribuição dos endereços é gerada automaticamente e de forma dinâmica, sendo o encaminhamento da informação entre a unidade de controlo e a unidade auxiliar em questão, definido pela rede e automaticamente reconfigurado ao atualizar o estado da rede e o número de pontos presentes na mesma. A estrutura dos encaminhamentos da rede é exemplificada na **Figura 14** (RF24Network, 2015).

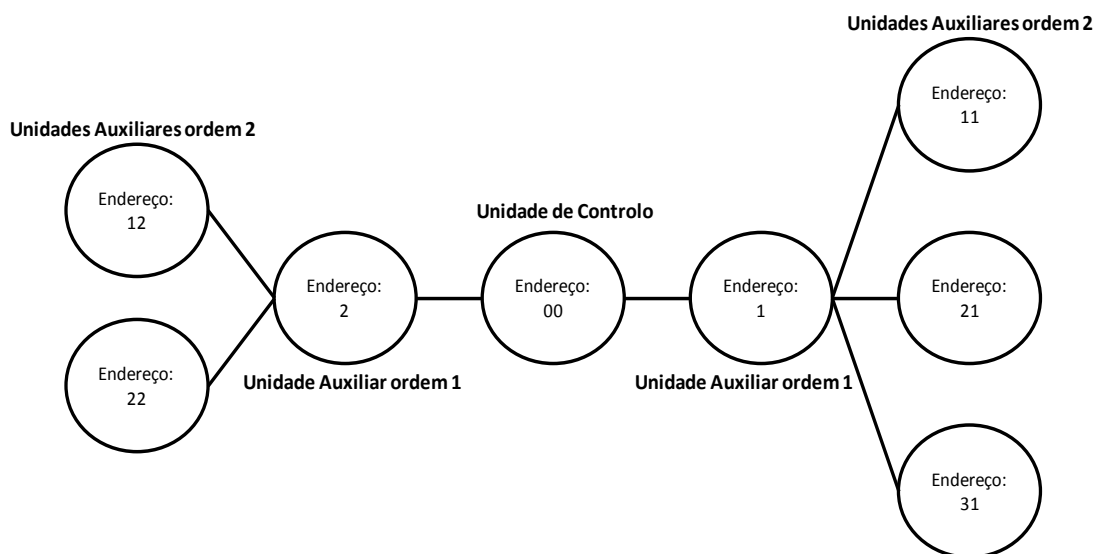


Figura 14 - Estrutura dos encaminhamentos da rede de comunicação.

Como pode observar-se no exemplo da **Figura 14**, a unidade de controlo é o ponto central com o qual comunicam as unidades auxiliares, quer diretamente no caso das de primeira ordem, quer através de outras unidades auxiliares no caso das de ordem superior. O número de ordem corresponde ao número de módulos pelos quais é encaminhada a informação até atingir o seu destino.

Nesta rede de comunicações, a unidade de controlo recebe um número identificador único, considerado ponto 00 do sistema, e todas as restantes unidades auxiliares são identificadas por um número entre 1 e 255 - intervalo máximo de módulos suportados pela rede - implementado manualmente na programação do sistema.

O número identificador permite que as unidades auxiliares sejam reconhecidas dentro da rede e, assim, gerados os endereços automáticos consoante a sua localização e conseqüente modo de comunicação com a base. Os pontos que comunicam diretamente com a base, de ordem 1, permitem a comunicação de pontos mais distantes e sem capacidade de ligação direta com a unidade de controlo, servindo de intermediários para a transmissão de mensagens. Cada elemento tem a capacidade de executar as funções de intermediário para o máximo de quatro unidades auxiliares, estando igualmente o ponto base preparado para executar ligações de primeira ordem no máximo com quatro módulos rádio (RF24Network, 2015).

Às unidades de ordem 1 é atribuído um endereço com um número entre 1 e 4. Cada módulo que depende de outro como intermediário, recebe como endereço, o número do endereço do seu intermediário mais próximo, antecedido de um número entre 1 e 4 - **Figura 14** (RF24Network, 2015).

Uma valência importante da rede é a sua capacidade de auto-reconfiguração dinâmica. Cada unidade auxiliar tem inserido manualmente o seu número identificador, sendo a sua localização

na rede e o número de ordem a que pertence determinados pelo nó coordenador de forma automática. A estrutura da rede e os respetivos endereços são atualizados em caso de falhas de comunicação, trocas de localização física que implicam utilização de pontos intermediários para comunicar, ou mesmo entrada de novas unidades na rede de comunicação.

Quando a troca de informação implica a utilização de intermediários - por exemplo a comunicação entre a base, 00, e o ponto 21, a mensagem é transmitida pelo ponto 00 para o ponto 1, que por sua vez reencaminha-a para o ponto 21. A mensagem de confirmação da transmissão, ACK, é enviado pelo ponto 21 para o ponto 1, que a reencaminha ao ponto 00, de origem.

A transmissão de informação na rede de comunicação é realizada através de pacotes de informação, onde cada um deles contém uma variável e é identificado por um carácter que distingue cada mensagem, facilitando a comunicação e o funcionamento do sistema. O identificador de cada pacote corresponde a um carácter pertencente à tabela ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), sendo possível adicionar até 127 variáveis a serem transmitidas, limitadas pelos caracteres descritos da referida tabela de código universal (RF24Mesh, 2015).

Para que ocorra a propagação dos pacotes de informação é necessário que, quer a unidade de controlo, quer as unidades auxiliares, sejam programadas para operar com cada um deles através do seu carácter identificador. No sistema desenvolvido, foi definido para cada variável a transitar através da rede de comunicação um carácter específico, enumerados na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Pacotes de informação a transitar pela rede de comunicação e respetivo carácter ASCII identificador.

Tipo de informação:	Carácter identificador:
Temporal	'M'
Identificação Unidade Auxiliar	'N'
Temperatura	'T'
Tensão Eficaz	'V'
Corrente Eficaz	'I'
Potência Ativa	'P'
Controlo	'C'

4.3 Unidade de Controlo

A unidade de controlo é o ponto central do sistema, independentemente do número de unidades auxiliares em funcionamento, sendo a sua existência indispensável para que o sistema cumpra o seu objetivo.

Este elemento é responsável por receber os dados das unidades auxiliares, processar essa informação, disponibilizar em tempo real os parâmetros avaliados referentes à tomada elétrica aos utilizadores e ordenar ações para as unidades auxiliares atuarem sobre as cargas - ligar ou desligar.

4.3.1 Hardware

A base deste elemento é constituída por um dispositivo eletrónico com as funcionalidades de um computador - *Raspberry Pi*. Para além deste dispositivo e alguns acessórios indispensáveis ao seu funcionamento, esta unidade é formada por um equipamento de visualização de dados e um rádio que permite a ligação deste ponto do sistema à rede sem fios.

4.3.1.1 *Raspberry Pi*

Este dispositivo eletrónico de baixo custo reúne, integrado numa única placa com o tamanho de um cartão de crédito, todas as funcionalidades de um computador. Possibilita, por exemplo, aceder à internet, ver vídeos, processar textos, jogar ou até mesmo programar. O facto do principal objetivo da sua criação ter sido a promoção em ciência da computação básica nas escolas, permitiu garantir uma das suas maiores valências, a facilidade de manuseamento (Raspberry Pi Foundation, 2015).

Para constituir esta unidade do sistema é utilizado um *Raspberry Pi* de segunda geração, nomeadamente o *Raspberry Pi 2 Model B* apresentado na **Figura 15**.

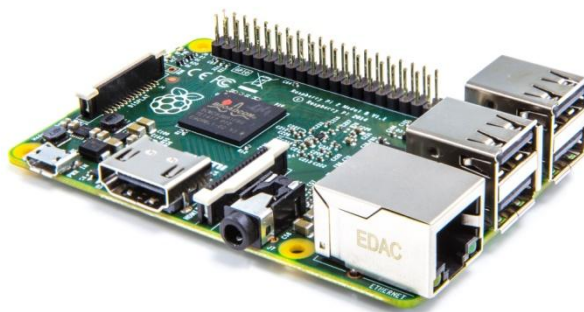


Figura 15 - *Raspberry Pi 2 Model B* (Raspberry Pi Foundation, 2015).

Para além do processador, como se pode observar pela **Figura 15**, este dispositivo possui um conjunto de acessórios como entradas USB, entrada HDMI, encaixe para cartão de memória, porta de *Ethernet*, conectores de áudio, vídeo e 40 pinos de entrada e saída (GPIO - *General Purpose Input/Output*), entre outros. Os pinos GPIO acrescentam diversas aplicabilidades ao dispositivo pois representam uma interface física com outros elementos, podendo funcionar como entradas de informação, por exemplo de um sensor, ou como saídas de informação, por exemplo, ligar ou desligar um LED (Raspberry Pi Foundation, 2015).

O carácter das ligações relativas aos pinos GPIO estão representadas no mapa de pinos da **Figura 16**. A programação destes pinos permite também, por exemplo, a conectividade deste dispositivo a redes de comunicação e a sua interação com outros elementos da rede.

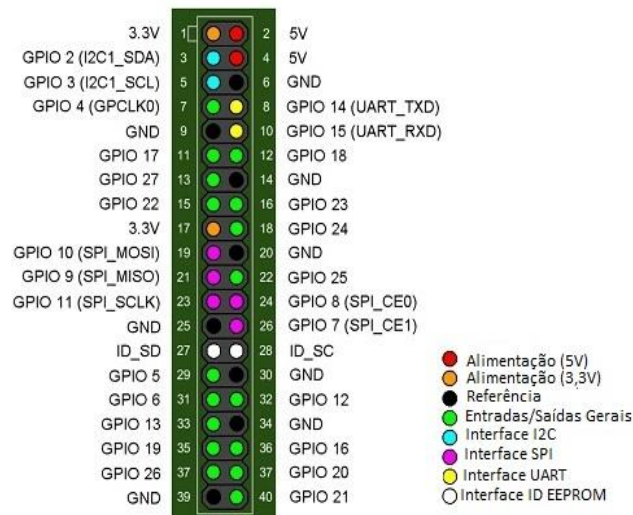


Figura 16 - Mapa pinos GPIO (Design Spark, 2014).

A unidade de controlo, para além da utilização da capacidade de processamento deste dispositivo eletrónico, é constituída por alguns acessórios, compatíveis com o circuito base, que garantem a execução de todas as suas funções:

- Monitor - é utilizada a capacidade do *Raspberry Pi* permitir uma saída gráfica, semelhante a um computador, através da ligação de um monitor que é responsável pela visualização dos parâmetros avaliados pelo sistema em tempo real;
- Cartão de memória - permite a instalação do sistema operativo utilizado e garante o armazenamento de dados;
- Periféricos de entrada - ligação via USB de um rato e um teclado, periféricos de entrada de dados que permitem controlar o sistema em ambiente de interface gráfica;
- Alimentação - para a utilização do dispositivo base desta unidade, *Raspberry Pi*, é necessário uma fonte de alimentação de 5V;
- Caixa de suporte - apesar de não ser indispensável ao funcionamento da unidade, a caixa de suporte para o dispositivo assegura uma proteção de forma a garantir o bom funcionamento.

4.3.1.2 Rádio nRF24L01+

Para que a unidade de controlo esteja conectada à rede de comunicação, e assim esteja ligada aos restantes elementos do sistema, são necessários dispositivos capazes de realizar fisicamente essa ligação. No sistema proposto esses dispositivos são rádios, especificamente módulos nRF24L01+.

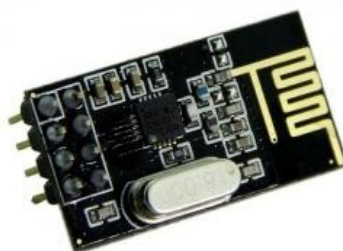


Figura 17 - Módulo do rádio nRF24L01+.

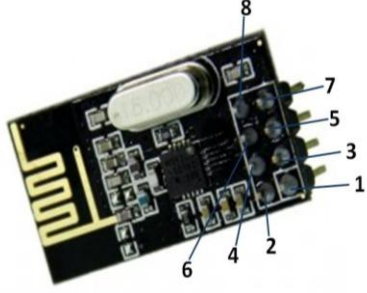
Estes componentes são produzidos pela empresa *Nordic Semiconductor*. A sua taxa de transmissão pode ser configurada para 250 kbps, 1 Mbps ou 2 Mbps (Nordic Semiconductor, 2008). Esta última característica representa uma vantagem sobre outros dispositivos utilizados para comunicação neste tipo de sistemas, em particular com a tecnologia atualmente mais utilizado, *ZigBee*, cuja taxa máxima de transmissão é de 250 kbps (Digi, 2008). Uma taxa baixa representa uma maior capacidade de alcance das mensagens, no entanto, uma taxa de transmissão elevada permite uma comunicação mais rápida e reflete-se numa menor probabilidade de colisões entre mensagens (Nordic Semiconductor, 2008).

A ligação do módulo nRF24L01+ ao dispositivo base ocorre através da *Serial Peripheral Interface (SPI)*. O SPI é um protocolo de dados utilizado por unidades de controlo para comunicar de forma rápida com dispositivos periféricos a curtas distâncias

Para efetuar-se uma ligação deste tipo, têm de existir, tipicamente, três pontos em comum entre os dispositivos: ponto de envio de dados dos dispositivos periféricos para o de controlo (MISO - *Master In Slave Out*); ponto de envio de dados do dispositivo de controlo para os periféricos (MOSI - *Master Out Slave In*); e o ponto responsável pela sincronização da transmissão de dados gerada pelo controlo (SCK - *Serial Clock*) (Arduino, 2015).

Na unidade de controlo do sistema proposto, a ligação entre o rádio e o *Raspberry Pi* permite a operação e a configuração do primeiro - periférico - por parte do dispositivo de controlo, o segundo. O módulo nRF24L01+ é composto por oito pinos de ligação, cujo mapa é apresentado na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Mapa dos pinos de ligação do módulo nRF24L01+.

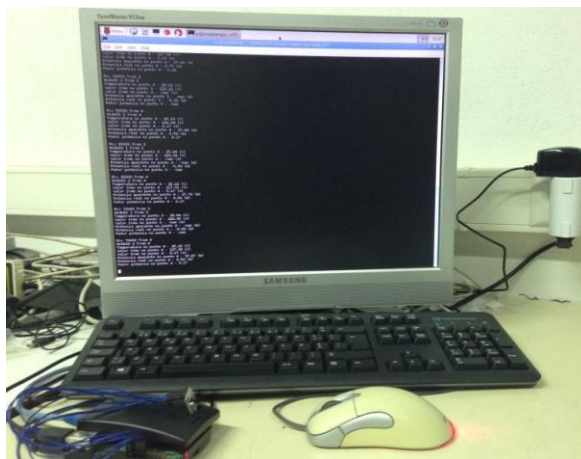
	Pino	Função
	1-GDN	<i>Ground</i> - ponto de referência
	2 - VCC	<i>Voltage Supply</i> - alimentação tensão contínua (1,9 - 3,6V)
	3 - CE	<i>Chip Enable</i> - ativação função transmissor ou recetor
	4 - CSN	<i>Chip Select</i> - seleção SPI
	5 - SCK	Serial Clock
	6 - MOSI	Master Out Slave In
	7 - MISO	Master In Slave Out
	8 - IRQ	<i>Maskable Interrupt</i> - pino de interrupção comunicação

A referida ligação realiza-se através da união dos pinos correspondentes entre o módulo nRF24L01+ e o *Raspberry Pi*. A **Tabela 5** sintetiza essa ligação física entre os dispositivos. O pino IRQ não é conectado, visto a sua funcionalidade nesta união - interromper a comunicação da unidade de controlo do sistema proposto - não ser desejada em nenhum momento.

Tabela 5 - Correspondências entre os números dos pinos na ligação SPI.

nRF24L01+	Raspberry Pi
1 - GND	25 - GND
2 - VCC	17 - 3,3V
3 - CE	15 - GPIO 22
4 - CSN	24 - GPIO 8
5 - SCK	23 - GPIO 11 (SPI - SCLK)
6 - MOSI	19 - GPIO 10 (SPI - MOSI)
7 - MISO	21 - GPIO 9 (SPI - MISO)

O conjunto de dispositivos que formam o *hardware* da unidade de controlo concebe um computador pessoal convencional, que está representado na **Figura 18**.

**Figura 18** - *Hardware* que constitui a unidade de controlo.

4.3.2 *Software*

Para que a unidade de controlo funcione corretamente, é necessário programar os dispositivos eletrónicos que a constituem, de forma a explorar as suas potencialidades em benefício dos objetivos pretendidos. A unidade de controlo funciona tendo como base o sistema operativo *Raspbian*, uma variante do sistema operativo livre *Debian Linux* para o *Raspberry Pi*, e o *software* foi desenvolvida tendo por base a linguagem de programação *C++*.

Para além da ligação física entre o *Raspberry Pi* e o módulo nRF24L01+, para que esta unidade esteja inserida na rede de comunicação em questão, é indispensável configurar um *software* de rede. Na criação deste *software* foi utilizado como base a biblioteca RF24Mesh (TMRh20, 2015), nomeadamente um *software* livre desenvolvido para *Raspberry Pi* e preparado para representar um ponto central numa rede malhada, que tem funções semelhantes à unidade de controlo do sistema proposto. Este *software* base utilizado detém a capacidade de conectar a unidade de controlo numa rede malhada estabelecida com outros módulos nRF24L01+ reconhecidos na vizinhança, receber um pacote de dados da rede e imprimir esses dados num monitor.

Tendo por base esse *software* de rede, foram adicionadas funções que permitem cumprir os objetivos pretendidos para a unidade de controlo do sistema desenvolvido, entre elas, a criação automática de um documento de texto no qual são guardadas ordenadamente todas as informações recebidas referentes às unidades auxiliares, a codificação da rede para a receção de todos os pacotes de dados pretendidos através do seu carácter identificador, e os cálculos de processamento dos dados recebidos.

O *software* criado tem ainda uma função de controlo, com base em restrições relativas a dados de temperatura, e foi implementada a capacidade de transmitir informação para as unidades auxiliares, nomeadamente a variável com a ordem relativa ao controlo das cargas.

O diagrama apresentado na **Figura 19** resume o funcionamento do *software* desenvolvido para a unidade de controlo do sistema.

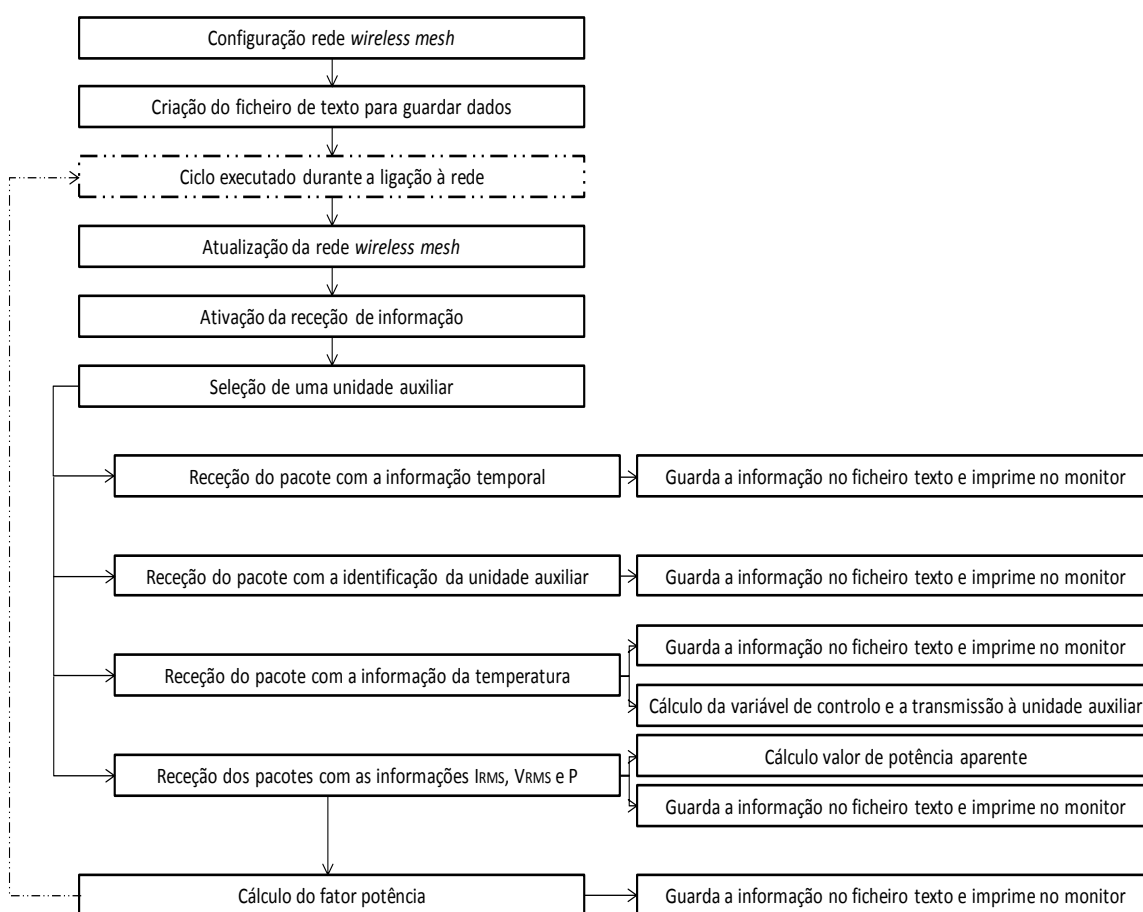


Figura 19 - Diagrama representativo do *software* associado à unidade de controlo.

Ao ligar a unidade de controlo, ocorre a configuração da rede e são requeridos endereços para os elementos que estabelecem a comunicação. A unidade de controlo, como elemento coordenador da rede, possui um endereço fixo, tendo a capacidade de detetar a comunicação por parte das unidades auxiliares e realizar uma configuração dinâmica de forma semelhante ao protocolo DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*), que permite a distribuição de endereços na rede.

Depois de estabelecida a rede, a unidade de controlo cria automaticamente um ficheiro de texto identificado pela data do dia em questão. Esse ficheiro é constituído por um cabeçalho, dividido por várias colunas referentes a cada uma das informações resultantes do sistema, sendo que em cada linha de dados é colocada uma iteração com uma unidade auxiliar, antecedida com a respetiva informação horária da ocorrência. A criação deste ficheiro permite o armazenamento sequencial dos dados, devidamente datados, num documento disponível para consulta.

Durante o funcionamento da unidade de controlo, é executado um ciclo de iterações com as unidades auxiliares. A unidade de controlo define, para cada ciclo, através dos endereços da rede, a unidade auxiliar com a qual interagir e recebe os diferentes pacotes de informação. Durante cada ciclo é pretendido a aquisição de seis pacotes de informação, respetivamente, informação temporal, identificação da unidade auxiliar em questão, temperatura, valor eficaz da corrente, valor eficaz da tensão e potência ativa.

Ao receber cada variável, a unidade de controlo guarda os dados no ficheiro de armazenamento e simultaneamente imprime-os no monitor, estando assim a informação atualizada disponível para os utilizadores do sistema.

Para além da receção de dados e sua apresentação para os utilizadores do sistema, a unidade de controlo tem a capacidade de processar os dados e transformá-los em grandezas que caracterizam o consumo das tomadas elétricas. Com a informação referente aos valores eficazes da tensão e corrente, a unidade de controlo calcula, segundo a equação (13) apresentada no subcapítulo 3.1, a potência aparente consumida na tomada elétrica.

Com os valores de potência ativa e aparente, o sistema calcula o fator de potência, que relaciona estas duas variáveis, equação (14).

A unidade de controlo tem ainda a capacidade de, em função dos parâmetros das unidades auxiliares, realizar uma ação sobre as cargas associadas às tomadas elétricas, transmitindo uma variável de controlo. Essa ordem é representada por um número - 0 ou 1 - que indica respetivamente a ordem de desligar ou ligar a carga. A função de controlo foi implementada tendo em conta condicionantes relacionadas com a temperatura e a limitação do número de cargas ligadas em simultâneo, como é descrito no subcapítulo 4.5.

4.4 Unidades Auxiliares

As unidades auxiliares são os elementos do sistema que estão associadas às tomadas elétricas, sendo responsáveis pela aquisição dos dados em tempo real relativo a estas. Têm a capacidade de obter informação referente à temperatura, corrente e tensão.

Com a aquisição dos sinais, as unidades auxiliares são capazes de calcular a potência ativa, tensão e corrente eficazes, para além da temperatura. Estas unidades estão conectadas à rede de comunicação, que permite o constante envio da informação que será recebida pela unidade de controlo. Tem ainda a faculdade de, perante instruções recebidas da unidade de controlo que processa a informação, agir sobre a carga associada à tomada monitorizada - ligar ou desligar a mesma.

4.4.1 Componentes e Equipamentos

Para ter capacidade de realizar todas as funções pretendidas, estas unidades têm por base um dispositivo com capacidade de entrada, processamento e saída de informação. O dispositivo com essas capacidades utilizado é a plataforma *Arduino*.

As unidades auxiliares são compostas também por sensores que permitem a obtenção dos sinais pretendidos, e um módulo rádio que estabelece a ligação à rede de comunicação.

4.4.1.1 *Arduino*

Arduino é uma plataforma eletrónica, assente em *hardware* e *software* de fácil utilização, que permite a sua programação através de um computador de forma a realizar diferentes funções. A plataforma é baseada num microcontrolador e tem a capacidade de, por exemplo, adquirir sinais

de tensão provenientes de sensores, processar informação ou controlar dispositivos (Arduino, 2015).

O *Arduíno* utilizado foi construído numa *breadboard* e tem as mesmas especificações de um *Arduíno Uno* visto ter por base o mesmo microcontrolador, "Atmega328". Este dispositivo funciona a uma tensão de alimentação de 5V, com uma frequência de 16MHz e contém três tipos de memória: memória EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*), memória Flash e memória SRAM (*Static Random Access Memory*) (Atmel, 2015).

As duas primeiras memórias referidas caracterizam-se por serem não-voláteis, ou seja, a informação é guardada mesmo depois de desligada a alimentação do dispositivo, enquanto a terceira é volátil, i.e. somente guarda a informação durante o período em que o dispositivo é alimentado. Deste modo, a EEPROM é utilizada para armazenar dados permanentes, na memória Flash é gravado o *software* a ser executado e o *Bootloader* - programa executado ao ligar-se o microcontrolador que tem como função carregar o *software* a ser executado -, e na memória SRAM são criadas e manipuladas as variáveis ao longo do projeto (Atmel, 2015).

O microcontrolador "Atmega328" contém 28 pinos, entre eles 14 portas digitais, 6 portas analógicas, e uma porta que permite o *reset* do dispositivo, **Figura 20**.



Figura 20 - Mapa de pinos do microcontrolador "Atmega328" (Arduino, 2015).

Os pinos digitais podem funcionar tanto como entrada ou saída de informação, sendo que alguns deles têm funções específicas, como por exemplo, pinos que permitem a recepção (RX) e transmissão (TX) de dados, pinos PWM (*Pulse Width Modulation*) - permitem obter resultados analógicos através de sinais digitais -, e ainda pinos que permitem conexões SPI. Por sua vez, as portas analógicas permitem a entrada de sinais de tensão analógicos, e a sua conversão em sinais digitais. O conversor analógico-digital (ADC - *Analog-to-Digital Converter*) transforma o sinal analógico, que varia continuamente dentro de um intervalo conhecido, num conjunto de pontos digitais lidos com uma determinada frequência de aquisição. Neste microcontrolador, o ADC tem uma resolução de 10 *bits*, ou seja, caracteriza os valores contínuos - que variam entre 0 e 5V - numa escala homogénea de 1024 (2^{10}) valores digitais. Ao valor de 0V corresponde o valor digital 0, e à referência, 5V, corresponde o valor 1023 (Atmel, 2015).

A cada ponto do sinal analógico medido é atribuído um valor digital segundo:

$$\frac{\text{Resolução}_{ADC}}{\text{Tensão}_{refer\acute{e}ncia}} = \frac{\text{Sinal}_{digital}}{\text{Valor}_{anal\acute{o}gico,tens\acute{o}o}} \quad (15)$$

No caso do "Atmega328", onde a tensão de referência é 5V e a esse valor corresponde o valor digital de 1023, a cada ponto do sinal analógico avaliado corresponde um valor digital, segundo:

$$\text{Sinal}_{digital} = \frac{1023}{5} \times \text{Valor}_{anal\acute{o}gico,tens\acute{o}o} \quad (16)$$

De forma a construir o *Arduino*, iniciou-se pela montagem na *breadboard* do circuito de alimentação da unidade a 5V. Foi utilizado um regulador de tensão, LM317, que regula a tensão de saída (V_{out}) segundo a relação entre a sua tensão típica de referência (V_{ref}) - 1,25V para variações entre a tensão de entrada (V_{in}) e de saída entre os 3 e os 40V (Texas Instruments, 2014) - e o quociente entre as resistências que compõem o circuito divisor de tensão.

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_L}{R_H}\right) \quad (17)$$

Tendo em conta estas características utilizou-se uma fonte de tensão de corrente contínua, V_{in} , de 8V e um circuito regulador por forma a garantir as condições de alimentação necessárias ao funcionamento do microcontrolador, i.e. aproximadamente 5V. Foi também inserido no circuito um LED de forma a representar visivelmente a alimentação do *Arduino*.

Depois de regulada a alimentação, estabeleceram-se as ligações dos pinos de alimentação, inseriu-se um cristal de quartzo de 16 MHz entre os pinos cristal e conectou-se, através de condensadores, estes últimos pinos à referência. O interruptor que permite reiniciar o dispositivo é instalado no primeiro pino, destinado ao *reset*. Para além destes elementos, foi ainda introduzido um LED acessório que é destinado à execução das funções de teste da plataforma *Arduino*.

O circuito de alimentação e respetivas ligações necessárias à criação do *Arduino* estão demonstradas na **Figura 21**.

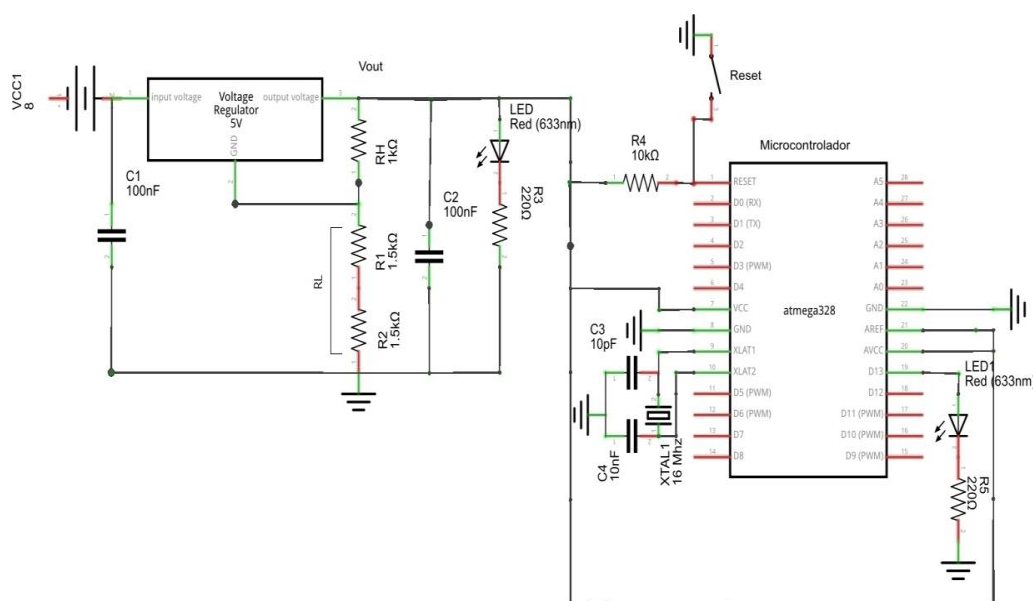



Figura 21 - Circuito de montagem do Arduino.

De forma a permitir o carregamento de *software* a ser executado pelo microcontrolador, é necessária a instalação de uma ligação a um computador. Na plataforma criada para as unidades auxiliares, essa ligação é estabelecida através da utilização de uma porta *USB 2 Serial Converter*.

A ligação desta porta adicional ao microcontrolador é efetuada através da união com os pinos de transmissão e receção de dados do dispositivo, **Tabela 6**. A referida ligação a um computador representa também uma alimentação alternativa de 5V à unidade.

Tabela 6 - Ligação do USB 2 Serial Converter ao microcontrolador.

	<i>USB 2 Serial Converter</i>	"Atmega328"
	GND	8 - GND
	+5V	7 - VCC
	TX	3 - Pino digital 2 (TX)
	RX	2 - Pino digital 1 (RX)
	Reset	1 - Reset

4.4.1.2 Rádio nRF24L01+

Para a ligação das unidades auxiliares à rede de comunicação é utilizado um dispositivo rádio idêntico ao da unidade de controlo, o módulo nRF24L01+.

A união entre o rádio e o dispositivo responsável pela sua operação e configuração, o microcontrolador, efetua-se através de uma interface SPI. A ligação física entre os pinos de ambos os dispositivos está sintetizada na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Correspondência de pinos na ligação entre rádio e microcontrolador.

nRF24L01+	"Atmega328"
1 - GND	22 - GND
3 - CE	13 - Pino digital 7
4 - CSN	14 - Pino digital 8
5 - SCK	19 - Pino digital 13 (SCK)
6 - MOSI	17 - Pino digital 11 (MOSI)
7 - MISO	18 - Pino digital 12 (MISO)
8 - IRQ	4 - Pino digital 2

Visto que o módulo nRF24L01+ funciona a uma tensão de alimentação de aproximadamente 3,3V, a ligação do pino referente à alimentação do módulo não pode ser conectada diretamente ao pino de alimentação do microcontrolador, que funciona a 5V. Assim, é utilizado um circuito de regulação de tensão, formado por um regulador LM317 e resistências adequadas, de forma a obter a tensão de alimentação do módulo, V_{out} , a partir da tensão do microcontrolador, V_{in} , perante a relação da equação (17).

4.4.1.3 Sensor de Temperatura

Para além do dispositivo base de processamento e da comunicação à rede sem fios, as unidades auxiliares são constituídas também por sensores capazes de captar dados em forma de sinais elétricos.

Em particular para obter a leitura dos valores da temperatura, as unidades auxiliares recorrem a um dispositivo elétrico de baixo custo constituído por material semiconductor cuja resistência elétrica é alterada com o efeito da temperatura, um termistor. É utilizado um termistor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*), cuja resistência diminui com o aumento da temperatura, nomeadamente o NTC 10K Ω , **Figura 22**, que tem uma resistência nominal de 10K Ω a uma temperatura de 25°C.

**Figura 22** - NTC10K Ω utilizado para medição de temperatura.

Este dispositivo funciona num vasto intervalo de temperaturas, entre -40 aos 125°C, sendo que a relação entre a resistência elétrica e a temperatura não é linear. A curva que relaciona estas duas variáveis pode ser descrita pelo coeficiente de temperatura. Este coeficiente assume valores mais elevados para as temperaturas mais baixas do intervalo de funcionamento e vai diminuindo com o aumento da temperatura operacional (Vishay, 2012).

A incorporação deste elemento na unidade auxiliar ocorre através da ligação entre este dispositivo e uma entrada analógica do dispositivo base da unidade, o microcontrolador.

Contudo, pelo facto das entradas analógicas somente lerem sinais de tensão, a resistência elétrica que caracteriza a temperatura não pode ser medida diretamente.

Desta forma, para a medição da resistência variável, a ligação entre o NTC 10K Ω e o microcontrolador é feita através de um circuito divisor de tensão, que permite transformar a resistência variável num sinal adequado de tensão. A ligação é então consumada com recurso a uma resistência fixa adicional, como esquematizado na **Figura 23**, à conexão a uma porta GND, uma porta VCC e uma porta analógica do "Atmega328".

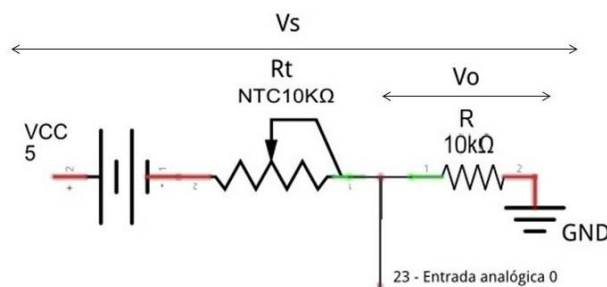


Figura 23 - Esquema do circuito de ligação do NTC 10K Ω ao microcontrolador.

Como resultado da referida ligação é assim obtido, através da entrada analógica do microcontrolador, o valor da tensão identificada na **Figura 23** como V_o .

Tendo em conta que as duas resistências do circuito de ligação estão em série, a corrente que passa pelas duas é idêntica e a tensão V_s é:

$$V_s = I(R_t + R) \quad (18)$$

Por sua vez, a tensão V_o é:

$$V_o = IR \quad (19)$$

Resolvendo as duas equações anteriores, (18) e (19), em ordem a I , e considerando que a corrente é idêntica em todo o circuito, resulta:

$$\frac{V_s}{V_o} = \frac{R + R_t}{R} \quad (20)$$

Rearranjando em ordem à resistência variável do termístor, R_t :

$$R_t = R\left(\frac{V_s}{V_o} - 1\right) \quad (21)$$

Uma vez que é conhecido o valor de V_s , V_o e da resistência fixa introduzida no circuito, é calculado o valor da resistência variável do termístor através da equação (21), que transmite informação sobre a temperatura.

4.4.1.4 Sensor de Corrente

A leitura de corrente por parte da unidade auxiliar é efetuada com recurso a um sensor de corrente não invasivo. Esta designação deve-se à capacidade de medição da corrente, através do seu envolvimento em torno de um dos fios de alimentação da carga, sem a necessidade de proceder à interrupção do circuito para a sua instalação.

Este sensor é um transformador de corrente constituído por um enrolamento primário, um núcleo magnético e um enrolamento secundário. Mede a intensidade da corrente através do fluxo magnético induzido pelas cargas elétricas que fluem pelo condutor. A corrente que circula no enrolamento primário (I_p) é reproduzida no enrolamento secundário (I_s), em função da relação do número de espiras (N) dos dois enrolamentos, segundo a equação:

$$I_s = I_p \frac{N_p}{N_s} \quad (22)$$

Designadamente o modelo utilizado, ECS1030-L72, tem a capacidade de medir correntes monofásicas alternadas até um máximo de 30A e uma relação entre o número de espiras do enrolamento primário e secundário de 1:2000, **Figura 24** (EChun, s.d.).



Figura 24 - Sensor de corrente não invasivo ECS1030-L72 (Wolfram, 2015).

A escolha deste sensor de baixo custo proporciona uma escala de leitura adequada para cargas domésticas e a sua aplicação independente aos circuitos de alimentação permite a medição de corrente de forma segura.

Ao produzir no enrolamento secundário uma corrente AC, proporcional à corrente que flui pelo condutor num fator de 1/2000, o transformador opera como uma fonte de corrente. Na aplicação do instrumento é importante garantir que este não está a funcionar em circuito aberto, visto que, ao anular a corrente no enrolamento secundário enquanto circula corrente no primário, a tensão no circuito secundário será diferente de zero, e potencialmente alta. Como resposta a este acontecimento, e tendo em conta que o fluxo magnético deixa de ser nulo, o núcleo aquece por fenómeno de histerese.

Neste contexto, e de forma a fechar o circuito secundário, ao utilizar o sensor é essencial a adição de uma resistência de carga (R_c) em paralelo com a fonte de corrente. A aplicação da R_c produz uma tensão de saída proporcional à corrente I_s (EChun, s.d.):

$$V_{saída} = R_c I_s \quad (23)$$

De modo a garantir a proporcionalidade expressa pela equação (23), é necessário dimensionar adequadamente o valor de R_c de modo a evitar a saturação do núcleo do transformador de corrente.

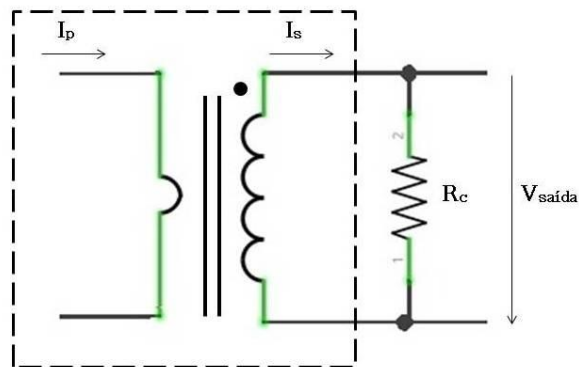


Figura 25 - Circuito elétrico de aplicação do sensor de corrente.

A aplicação da R_c permite converter a medição de corrente num sinal de tensão, essencial para que possa ser lido pelo microcontrolador. Contudo, tal como é característico dos sinais AC, este sinal varia entre um pico positivo e o seu simétrico, enquanto os níveis admitidos pelo microcontrolador variam entre 0 e 5V. Desta forma, no processo de condicionamento de sinal, é necessária mais uma etapa que permita a realização de um *offset* ao sinal AC, para que este varie dentro do intervalo admitido pelo dispositivo de processamento.

Uma vez que o sensor utilizado permite a medição de um sinal de corrente com um valor eficaz até 30A, o pico positivo e negativo desse sinal no enrolamento primário será dado segundo a relação expressa pela equação (7) e com o valor de:

$$I_{p,pico} = \sqrt{2} \times 30 \Leftrightarrow I_p \cong 42,43A \quad (24)$$

Em conformidade com a equação (22), o valor absoluto do pico positivo e negativo no enrolamento secundário será então influenciado pela relação entre o número de espiras:

$$I_{s,pico} = 42,43 \times \frac{1}{2000} \Leftrightarrow I_{s,pico} \cong 0,02125A \quad (25)$$

De maneira a maximizar a resolução da medição por parte do microcontrolador, no ponto onde o pico de corrente é máximo, o valor ideal da R_c é aquele que transforma a corrente máxima num valor igual a 2,5V, metade da tensão de referência:

$$R_{c,ideal} = \frac{2,5}{0,02125} \Leftrightarrow R_c \cong 117,65\Omega \quad (26)$$

Sabendo que, de modo a garantir a correta leitura dos dados e respeitar o valor máximo do pino analógico de entrada, o valor máximo de corrente medida não pode corresponder a um valor de tensão superior a 2,5V, qualquer aumento da R_c implica uma diminuição do valor máximo capaz de ser medido pela unidade secundária.

No caso do sistema proposto, a corrente associada à grande maioria das cargas domésticas, e em particular às utilizadas neste trabalho, é inferior a 30A e portanto foi definida uma R_c de 127 Ω ,

visto que este aumento garante uma maior resolução da medição – assim, o conversor ADC, para a mesma variação de corrente, recebe uma maior variação de tensão e diminuem-se os erros de conversão - em detrimento de uma pequena perda no nível máximo de corrente RMS a ser medido, 27,83A invés dos 30A estipulados pela capacidade do sensor:

$$I_{s,pico} = \frac{2,5}{127} \Leftrightarrow I_{s,pico} \cong 0,01968A \quad (27)$$

$$I_{p,pico} = 0,01968 \times 2000 \Leftrightarrow I_{p,pico} = 39,36A \quad (28)$$

$$I_{RMS} = \frac{39,36}{\sqrt{2}} \Leftrightarrow I_{RMS} = 27,83A \quad (29)$$

Com a utilização de um valor de R_c superior ao ideal, verificou-se experimentalmente o aumento da precisão na leitura dos valores de corrente que justifica a perda de capacidade de leitura. O valor máximo de corrente eficaz que pode ser medido pelo sistema é então 27,83A.

Sendo o valor de R_c também superior ao utilizado nos exemplos da ficha informativa do material, é importante garantir que esse valor mantém a proporcionalidade entre a corrente e a tensão. Essa proporcionalidade foi verificada experimentalmente.

A tensão AC (*Alternating Current*), obtida através do circuito esquematizado na **Figura 25** para o valor de R_c utilizado, tem a forma de uma onda sinusoidal que varia, para o nível máximo de corrente medida pelo sistema, entre -2,5 e 2,5V. Antes de ser lido pelo microcontrolador é necessário uma nova etapa de condicionamento. Ao utilizar um divisor resistivo à tensão de alimentação do microcontrolador com duas resistências de igual valor, é estabelecida uma tensão de 2,5V que é somada ao valor da tensão AC obtido pelo circuito do sensor:

$$V_1 = V_{microcontrolador} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow V_1 = 5 \frac{470}{470 + 470} \Leftrightarrow V_1 = 2,5V \quad (30)$$

Ao condicionar o sinal com um *offset* de 2,5V, para o nível máximo de corrente medido pelo sistema, o sinal resultante passa a ter como limites inferior e superior, respetivamente, os valores de 0 e 5V. Ao garantir que, para o nível máximo, o sinal de tensão de entrada no microcontrolador é apropriado ao funcionamento do pino analógico, é assegurado que isso acontecerá para todos os valores lidos dentro do limite do sistema.

O circuito completo de condicionamento de sinal entre o transformador de corrente e o microcontrolador está representado na **Figura 26** e requer a ligação a uma entrada analógica, um pino VCC e um pino GND do "Atmega328". Foi utilizado um condensador para reduzir o ruído do sinal AC e resistências variáveis de forma a ajustar os valores e atenuar alguns desvios entre os valores teóricos e os obtidos na prática.

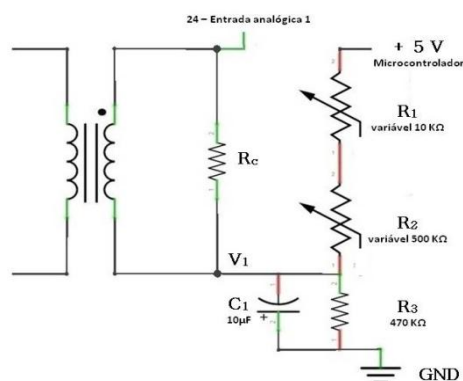


Figura 26 - Circuito elétrico de aquisição do sinal de corrente.

Visto que o objetivo do trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema a utilizar para cargas domésticas de consumo reduzido (e.g. residência com limitação de potência instalada), foi utilizada uma última estratégia de aumento de precisão à custa da privação de capacidade de leitura. Foi estipulado que a utilização do sensor de corrente do sistema envolveria a passagem do fio condutor três vezes no mesmo sentido pelo núcleo do transformador, simulando assim um sinal três vezes superior, o que resulta num aumento de precisão para sinais de baixa amplitude. Tal é conseguido através do enrolamento do fio condutor à volta da abertura do sensor e tem como consequência uma diminuição do valor máximo de corrente eficaz medido pelo sistema - um terço da imposta pelo circuito de medição, 9,27A.

4.4.1.5 Transformador de Tensão

A leitura da tensão de alimentação das tomadas elétricas às quais estão associadas as unidades auxiliares é efetuada com recurso a um transformador ligado diretamente à rede elétrica. Em Portugal, o sector doméstico é abastecido com uma tensão da rede com um valor eficaz de 230V entre a fase e o neutro e com uma frequência de 50Hz.

A utilização de um transformador de tensão evita o manuseamento direto das tensões elevadas da rede elétrica, transformando o sinal da rede num sinal igualmente AC mas com uma escala de tensão inferior, sendo o seu uso comum em sistemas elétricos. Neste sistema é utilizado um transformador PCB (*Printed Circuit Board*), nomeadamente o transformador TEZ 2,0/D que transforma uma tensão eficaz 230V do circuito primário numa tensão, igualmente eficaz, de 6V na saída do circuito secundário. Este transformador de baixo custo é de reduzido tamanho e de fácil montagem numa placa de prototipagem, **Figura 27** (TEZ, s.d).



Figura 27 - Transformador de tensão PCB TEZ 2,0/D.

Apesar de baixar a tensão da rede para valores seguros de manuseamento e garantir o isolamento entre o circuito primário e o circuito secundário, de forma a permitir o processamento do sinal por parte do microcontrolador, é necessário adequar o sinal aos níveis permitidos pelas entradas analógicas deste dispositivo, entre 0 e 5V.

Foi realizada a verificação prática das características de funcionamento do transformador e concluiu-se que o comportamento do circuito é um pouco diferente das características teóricas do equipamento. Para um valor de tensão RMS da rede de 226V AC, a saída do circuito secundário do transformador corresponde a um valor RMS de 8,48V AC. Na realização dos cálculos do circuito de condicionamento do sinal foram utilizados estes valores reais da aplicação do transformador como os valores de referência, em detrimento dos valores teóricos fornecidos pelo fabricante nas especificações deste equipamento.

Segundo a entidade reguladora dos serviços energéticos em Portugal (ERSE), a variação da tensão permitida é aproximadamente de 10%, correspondente a um intervalo entre 207 e 253V, em condições normais de exploração. Tendo em conta estes dados, foi adequado o circuito da leitura de tensão da unidade secundária para o valor máximo permitido (ERSE, 2009b).

Tendo por base o valor de referência de transformação do equipamento - e considerando que, no funcionamento de um transformador de tensão, a relação entre a tensão no circuito primário (V_p) e a tensão no circuito secundário (V_s) se pode assumir como linear - para o valor RMS máximo da tensão da rede, 253V, é esperado um valor eficaz máximo no circuito secundário de 9,49V AC. Pela relação entre o valor eficaz e os valores de pico, obtém-se:

$$V_{s,pico} = \sqrt{2} \times 9,49 \Leftrightarrow V_{s,pico} \cong 13,42V \quad (31)$$

O condicionamento do sinal entre a saída do circuito secundário do transformador de tensão e a entrada analógica do microcontrolador inclui dois processos:

1. Diminuição da escala do sinal AC;
2. Adição de um *offset* para eliminar a componente negativa do sinal AC.

O condicionamento do sinal foi realizado com recurso a divisores de tensão resistivos entre os terminais do transformador de tensão e entre a alimentação do microcontrolador, tal como pode observar-se pelo esquema do circuito, representado na **Figura 28**.

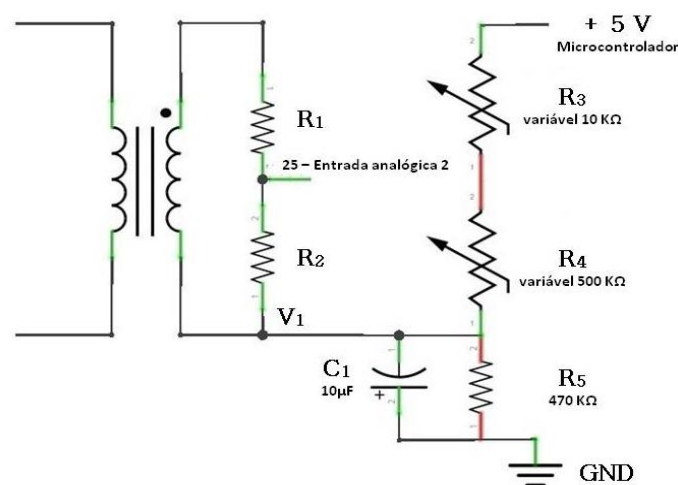


Figura 28 -Circuito elétrico de aquisição do sinal de tensão.

A primeira etapa do condicionamento foi realizada com recurso a um divisor de tensão resistivo entre os terminais do circuito secundário do transformador de tensão, segundo a equação:

$$V_{s,pico,saída} = V_{s,pico} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (32)$$

Por forma a aumentar a precisão do sistema de leitura da tensão, o valor máximo do sistema deverá corresponder a um valor próximo do máximo permitido pelo microcontrolador, 5V. Tendo em conta este fato, o valor de pico de saída deverá corresponder a metade da tensão de alimentação do microcontrolador. Idealmente, o valor do fator resistivo será:

$$2,5 = 13,42 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Leftrightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cong 0,1863 \quad (33)$$

A escolha das resistências que constituem o divisor de tensão conjuga a aproximação ao valor ideal do fator resistivo e o facto de resistências com valores baixos aumentarem o consumo de energia e com valores demasiados elevados aumentarem o ruído do sinal. Desse modo, e como solução de compromisso, foram escolhidas resistências de 47KΩ e 10kΩ, respetivamente para R_1 e R_2 . Sendo assim, para o valor máximo de tensão, tem-se:

$$V_{s,pico,saída} = 13,42 \times \frac{10}{47+10} \Leftrightarrow V_{s,pico,saída} \cong 2,35V \quad (34)$$

Após a primeira etapa do condicionamento do sinal, é obtido um sinal de tensão AC que, para o valor máximo admitido de tensão da rede, varia entre um pico positivo e negativo de $\pm 2,35V$. Visto que a entrada analógica do microcontrolador não funciona corretamente para valores negativos, é necessário realizar a segunda etapa do condicionamento para obter um sinal que varia somente entre valores positivos.

A adição do *offset* é efetuada recorrendo também a um divisor de tensão resistivo, mas desta feita, entre a tensão de alimentação do microcontrolador e o ponto de referência terra. O valor do *offset* terá que garantir que o sinal da entrada analógica varia entre valores positivos e, em simultâneo, seja inferior ao valor da tensão de alimentação do microcontrolador, 5V.

$$V_{analógica} = V_{s,pico,saída} + V_1 \leq 5V \quad (35)$$

O valor do *offset* (V_1) resulta do divisor de tensão resistivo constituído entre R_5 e a série das resistências R_3 e R_4 representadas na **Figura 28**.

$$V_1 = V_{microcontrolador} \frac{R_5}{R_5 + (R_3 + R_4)} \quad (36)$$

De modo a respeitar a condição especificada na equação (35), foi definido o valor do *offset* igual a metade da tensão de alimentação do microcontrolador, i.e. 2,5V. Como pode observar-se pela **Figura 28**, duas das três resistências que constituem este divisor de tensão são variáveis, permitindo o ajuste real do valor do *offset* no circuito.

Assim sendo, para o valor máximo da tensão da rede, 253V, obtém-se um valor de tensão na entrada analógica totalmente positivo e com um valor de pico igual a:

$$V_{analógica} = 2,35 + 2,5 \leq 5V \quad (37)$$

O procedimento descrito e realizado garante a adequação do sinal de entrada no microcontrolador para o máximo da tensão na rede, e assegura o bom condicionamento do sinal para todo o intervalo de valores de tensão permitida na rede nacional, como pretendido.

Para o funcionamento do circuito completo de leitura da tensão, é necessária a ligação física a um pino VCC, um pino GND e uma entrada analógica do microcontrolador, como está representado na **Figura 28**. Para além das componentes referidas, é ainda de destacar a utilização de um condensador (C_1) que tem como função diminuir o ruído do sinal.

Na **Figura 29** pode observar-se a agregação dos dispositivos que constituem o *hardware* da unidade secundária.

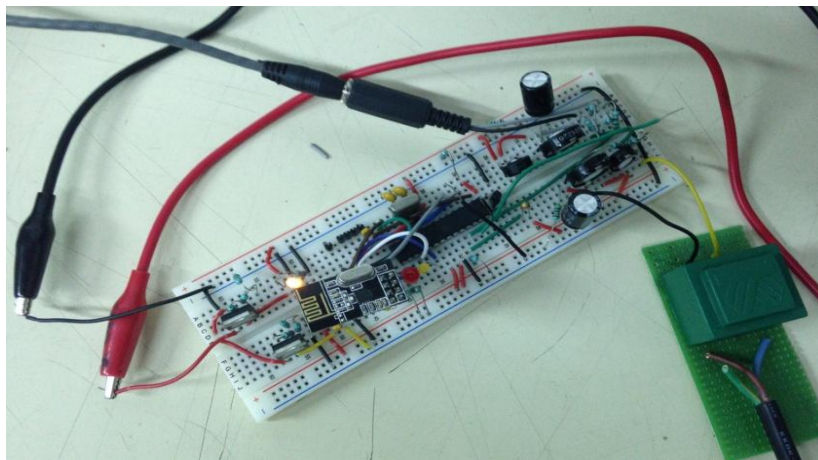


Figura 29 - *Hardware* que constitui a unidade secundária.

4.4.2 Programa de Gestão e Controlo

A utilização do *software Arduino IDE* permite a codificação de projetos em linguagem *Arduino* e o seu fácil carregamento para o microcontrolador.

Tal como na unidade de controlo, o *software* das unidades auxiliares tem por base a biblioteca de *software* livre RF24Mesh (TMRh20, 2015). Neste caso utilizou-se um *software* desenvolvido para plataformas *Arduino* e com funções de aquisição de dados e a transmissão destes através da rede malhada sem fios.

De modo a cumprir os propósitos do sistema, foram adicionadas ao *software* base funções que calculam, a partir dos sinais adquiridos, a temperatura e as grandezas elétricas - tensão eficaz, corrente eficaz e potencia ativa - para além da codificação dos pacotes de informação responsáveis pela transmissão de cada uma destas variáveis para a rede de transmissão de dados. Foi ainda adicionado ao programa a capacidade de receber informação relativa ao controlo das cargas, bem como o processamento dessa ordem, que resulta em ativar ou desativar uma entrada digital do microcontrolador. No esquema da **Figura 30** pode observar-se a sequência de ações programadas para o funcionamento das unidades auxiliares.

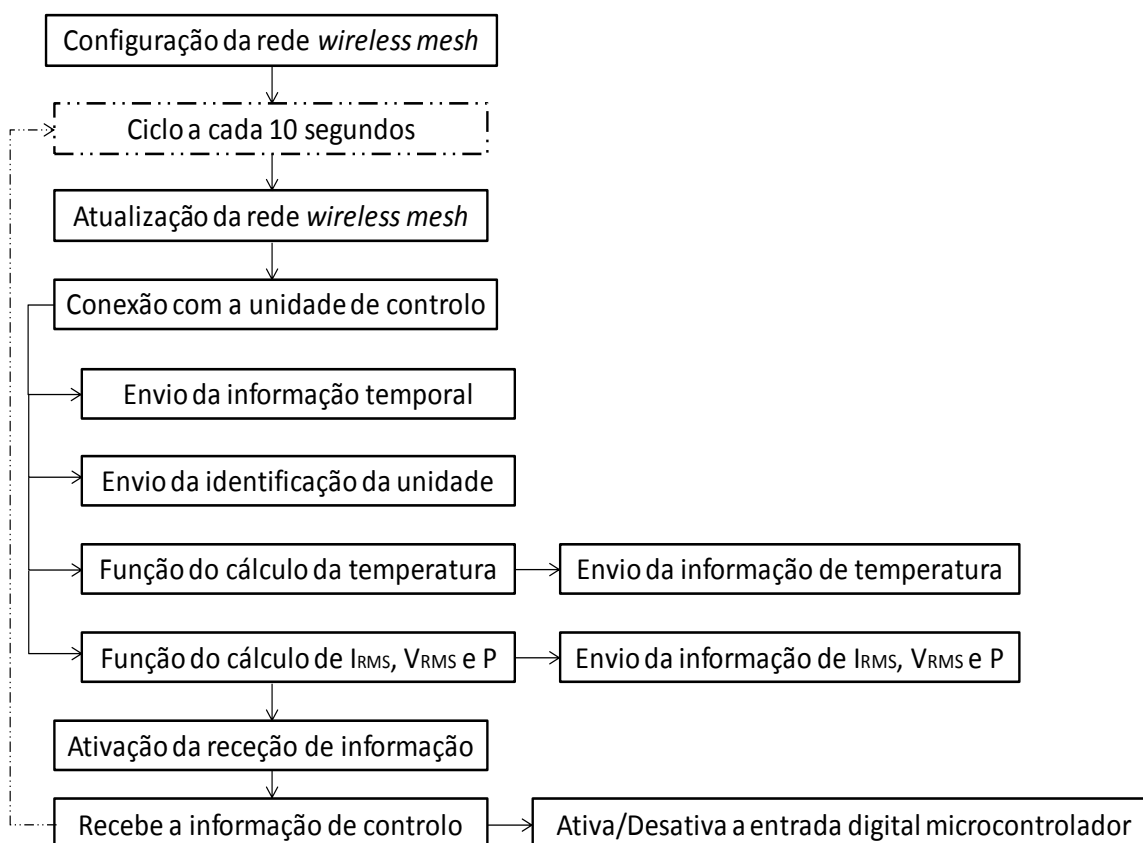


Figura 30 - Diagrama representativo do *software* das unidades auxiliares.

Ao iniciar o seu funcionamento, cada unidade auxiliar ativa funcionalidades de ligação à rede comunicação. Através da sua configuração na rede e obtenção do endereço que a identifica, cada unidade distingue-se de todos os outros dispositivos da rede. Depois da primeira conexão, inicia-se um ciclo de interações com a unidade de controlo que repete-se a cada 10 segundos.

Em cada um dos ciclos ocorre inicialmente a verificação e atualização da ligação à rede, que pode incluir a requisição de novo endereço caso tenha ocorrido alguma alteração. Após verificada a conexão, é transmitido à unidade de controlo informação temporal e o número de identificação da unidade auxiliar. Seguidamente inicia-se a aquisição de sinais e a sua transmissão para a unidade de controlo.

A função que calcula a temperatura tem por base a equação *Steinhart-Hart*, que representa uma relação empírica entre a resistência e a temperatura para termístores do tipo NTC. Esta equação utiliza o valor da resistência local do termístor (R_t) e três coeficientes (a, b, c) para calcular o valor da temperatura local em Kelvin (T) (Engineering Notes, 2013):

$$\frac{1}{T} = a + b \times \ln(R_t) + c \times (\ln(R_t))^3 \quad (38)$$

Os coeficientes são obtidos com base na resolução da equação anterior para três pontos conhecidos da relação entre a temperatura e a resistência do termístor em questão. Foram utilizados três pontos fornecidos pela ficha informativa do termístor, **Tabela 8**.

Tabela 8 - Pontos utilizados da reta de relação entre temperatura e resistência do termístor e respetivos coeficientes obtidos.

R_t (Ω)		T ($^{\circ}\text{C}$)
25 339		5
10 000		25
4 372		45
Coeficientes da equação		
a	b	c
$1,133582007e^{-3}$	$2,331668630e^{-4}$	$0,9328901740e^{-7}$

O resultado da medição da entrada analógica à qual está conectada o termístor é um valor de tensão. Este valor é transformado num número digital pelo conversor de 10 *bits* numa escala de 1024 valores. Desta forma, e com base na equação (21), é obtido o valor R_t através dos valores conhecidos de V_s , R e o valor da leitura da entrada analógica V_o :

$$R_t = 10000.0 \times \left(\frac{1023.0}{V_o} - 1 \right) \quad (39)$$

Ao conhecer o valor da resistência do termístor e os coeficientes da equação, a função do cálculo da temperatura obtém o valor da variável, em graus Celsius, segundo a equação (40). O valor calculado é então transmitido através da rede de comunicação para a unidade de controlo.

$$T = \left[\frac{1}{a + b \times \ln(R_t) + c \times (\ln(R_t))^3} \right] - 273,15 \quad (40)$$

Seguidamente, o cálculo dos valores de V_{RMS} e I_{RMS} tem por base uma coleção de pontos lidos referentes às ondas sinusoidais que caracterizam os sinais de tensão e corrente, respetivamente. Sendo sinais de natureza alternada, é indispensável obter um número de pontos satisfatório, e em diferentes instantes da onda, por forma a caracterizar corretamente os sinais. Para a coleção de valores obtidos, aproximam-se os valores eficazes de tensão e corrente de acordo com as equações (41) e (42) (Tamkittikhun et al., 2015):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i)^2}{N}} \quad (41)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i)^2}{N}} \quad (42)$$

O cálculo das grandezas elétricas tem como etapas principais, a escolha do instante para iniciar a recolha de valores, a duração do ciclo de recolha de amostras de cada onda de sinal, a

conversão do valor digital no valor de tensão correspondente e, por fim, o cálculo do valor RMS. A função de cálculo tem por suporte a biblioteca de *software* livre do projeto de desenvolvimento de sistemas de monitorização de energia, *OpenEnergyMonitor* (OpenEnergyMonitor, 2015), e a sua estrutura está simplificada no diagrama da **Figura 31**.

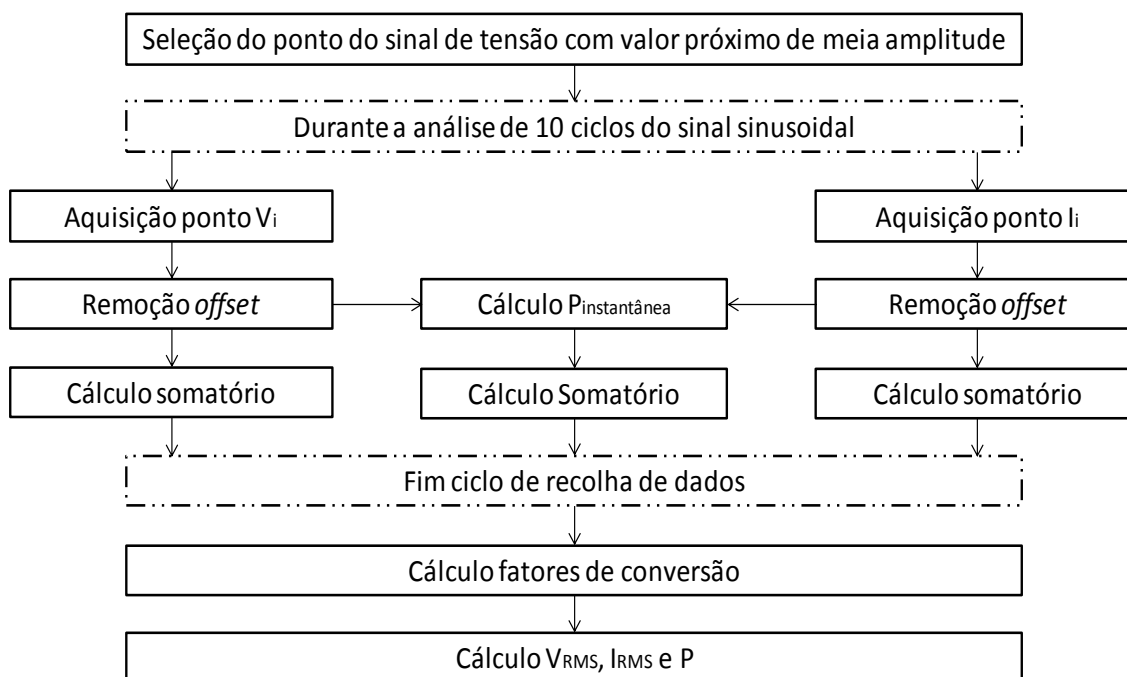


Figura 31 - Estrutura da função de cálculo das grandezas elétricas.

A primeira etapa reside na escolha do ponto a partir do qual irá iniciar-se a recolha de valores da onda sinusoidal. O objetivo é que o processo inicie num ponto de meia amplitude que funciona como valor de controlo para a contagem dos ciclos. Para tal, é criado um ciclo de recolha de valores que termina somente quando o valor está próximo do valor intermédio. De forma a evitar erros de leitura, o ciclo é também controlado por uma variável temporal que evita a existência de um ciclo permanente.

A recolha de dados é garantida por um ciclo que realiza a aquisição constante de sinais até percorridos 10 períodos de onda. Ao detetar a passagem da onda sinusoidal 20 vezes na região de meia amplitude, próximos do ponto de controlo, significa que foram analisados 10 ciclos - cada ciclo contém dois pontos de meia amplitude. A contagem do número de ciclos é uma condição que, apesar de não garantir sempre igual número de amostras, mantém um bom compromisso entre a caracterização do sinal e o tempo de execução.

Cada valor lido referente aos sinais analógicos corresponde, em resultado da ação do conversor ADC da entrada analógica do microcontrolador, a um valor digital da escala entre 0 e 1023. O ciclo de recolha de dados inclui a remoção, em cada ponto, do *offset* imposto ao sinal no circuito de condicionamento de sinal - 2,5V que corresponde na escala digital a 512 - e o cálculo do somatório das equações (41) e (42) para os valores recolhidos durante as iterações do ciclo.

Ao terminar o ciclo de recolha de valores, é conhecido o número de iterações e o resultado do somatório, permitindo assim terminar o cálculo das equações (41) e (42). Os valores V_{RMS} e I_{RMS} obtidos são calculados tendo em conta a escala digital. Para obter os valores pretendidos na escala real de tensão e corrente, respetivamente, é necessário multiplicar esse valor por fatores práticos de conversão:

$$V_{RMS} = V_{RMS,digital} \times F_{convers\tilde{a}o,tens\tilde{a}o} \quad (43)$$

$$I_{RMS} = I_{RMS,digital} \times F_{convers\tilde{a}o,corrente} \quad (44)$$

Os fatores de convers\~ao pretendem restabelecer o valor do sinal original, anulando a convers\~ao digital da entrada anal\~ogica do microcontrolador (F_{ADC}) e as condicionantes impostos pelos dispositivos de medida e circuitos de condicionamento de sinal ($F_{condicionamentos,tens\tilde{a}o}$ e $F_{condicionamentos,corrente}$):

$$F_{convers\tilde{a}o,tens\tilde{a}o} = F_{ADC} \times F_{condicionamentos,tens\tilde{a}o} \quad (45)$$

$$F_{convers\tilde{a}o,corrente} = F_{ADC} \times F_{condicionamentos,corrente} \quad (46)$$

Na medi\~ao das duas grandezas el\~etricas, o fator de convers\~ao resultante da transforma\~ao ADC \u00e9 id\~entico visto ser caracter\u00edstico do microcontrolador, neste caso, cada valor digital corresponde aproximadamente a 4,88mV - divis\~ao uniforme da escala de tens\~ao, entre 0 e 5V, pelos 1024 algarismos digitais. Por sua vez, o fator que inclui as limita\~oes do sinal impostas pelos instrumentos de medida e pelo circuito de condicionamento de sinal, varia no c\~alculo da tens\~ao e corrente.

O fator de convers\~ao referente ao sinal de tens\~ao, para al\u00e9m do fator de convers\~ao ADC, \u00e9 constitu\u00eddo pelo fator de atenua\~ao por parte do transformador e o fator de atenua\~ao do sinal imposto pelo divisor resistivo:

$$F_{convers\tilde{a}o,tens\tilde{a}o} = \frac{5}{1023} \times \frac{226}{8,46} \times \frac{1}{0,175} \cong 0,7443 \quad (47)$$

Por sua vez, o fator de convers\~ao do sinal de corrente \u00e9 influenciado pela atenua\~ao feita pelo sensor de corrente, do fator multiplicativo imposto pela resist\~encia de carga e pelo fator imposto pela passagem do fio condutor tr\~es vezes pelo n\u00facleo do sensor, para al\u00e9m do fator de convers\~ao ADC:

$$F_{convers\tilde{a}o,corrente} = \frac{5}{1023} \times 2000 \times \frac{1}{127} \times \frac{1}{3} \cong 0,0256 \quad (48)$$

A aplica\~ao das equa\~oes (43) e (44) resulta nos valores da tens\~ao e corrente eficazes associados \u00e0s tomadas el\~etricas. Os resultados da fun\~ao s\~ao transmitidos para a unidade de controlo atrav\u00e9s da rede de comunica\~ao.

Para al\u00e9m dos valores V_{RMS} e I_{RMS} , a fun\~ao de c\~alculo das grandezas el\~etricas avalia tamb\u00e9m, como pode observar-se pelo diagrama da **Figura 31**, o valor da pot\~encia ativa, P . Para cada conjunto de dados recolhido por ciclo \u00e9 calculada a pot\~encia instant\~anea segundo a equa\~ao (49). Visto a recolha dos pontos V_i e I_i estar espa\~ada no tempo, e a pot\~encia instant\~anea ser resultado da multiplica\~ao de dois pontos exatamente no mesmo instante, \u00e9 calculado um valor de tens\~ao afetado de um fator de fase constante, que pretende aproximar o instante de leitura das duas vari\~aveis, assumindo que n\~ao h\~a varia\~ao do desfaseamento entre os sinais. Desta forma o

valor da potência é calculado segundo uma onda de tensão deslocada no tempo face à onda medida:

$$P_{inst} = V_{fase} \times I_i \quad (49)$$

Durante o funcionamento do ciclo, é também calculado o somatório das potências instantâneas referentes a todas as iterações. Ao terminar o ciclo de recolha de dados, é estimada a potência ativa através da média das potências instantâneas, afetadas pelos fatores de transformação que convertem o valor de potência de um número digital para o seu correspondente em *Watt*:

$$P = \frac{\sum P_{inst}}{N} \times F_{conversão,tensão} \times F_{conversão,corrente} \quad (50)$$

Após este processo, o valor do consumo da potência ativa estimada para a tomada elétrica é enviado para a unidade de controlo.

Terminada a execução das funções de aquisição, tratamento e transmissão de dados para a rede de comunicação, as unidades auxiliares têm também a capacidade de receber informação enviada por parte da unidade de controlo. Recebem informação referente a uma variável de controlo, que assume o valor 0 ou 1, respetivamente para desligar ou ligar a carga em questão. Como resposta à ordem de controlo recebida, a unidade auxiliar desativa ou ativa a porta digital que funciona como saída de informação, consoante a ordem seja respetivamente de desligar ou ligar.

4.5 Controlo de uma Carga Resistiva com Gestão da Temperatura Ambiente

A capacidade de controlo, segundo parâmetros pré-definidos, sobre uma carga ligada à unidade auxiliar através de uma porta digital do microcontrolador, é uma competência essencial do sistema proposto. Neste trabalho em particular, foi definido o controlo como uma função dependente de condições de temperatura, adequado ao controlo de cargas de aquecimento. A aplicação do sinal de controlo a um circuito de potência, capaz de efetuar a comutação do estado da carga, está fora dos objetivos desta dissertação. Desta forma, para avaliar a adequabilidade do sinal de controlo gerado, foi utilizado um LED ligado a uma porta digital do microcontrolador como representação deste sinal.

A função de controlo é processada na unidade de controlo, que analisa as condições impostas e ordena que seja ativada ou desativada a porta digital através da transmissão de uma variável que assume o valor, respetivamente, de 1 ou 0. Por sua vez, a unidade auxiliar com a qual está a trocar informação é responsável por executar, consoante a ordem recebida, a ação de controlo.

As condições de controlo impostas ao funcionamento do sistema experimental, composto por duas unidades auxiliares, tem como objetivo simular o funcionamento de cargas de aquecimento, garantindo que são mantidas condições de temperatura adequadas, através de um controlo automático em que existe a limitação do número de cargas em funcionamento - nunca poderão estar os dois dispositivos controláveis ligados em simultâneo. As condições de controlo são efetuadas para três casos distintos, tal como está sintetizado na **Figura 32**.

Nas condições de controlo destacam-se três valores de temperatura que funcionam como pontos de referência, a temperatura a partir da qual é ligado o dispositivo controlável (T_{ligar}), a temperatura mínima (T_{min}) a partir da qual se deve ligar o dispositivo com maior brevidade, e a

temperatura máxima (T_{max}) a partir da qual se devem desligar os dispositivos controláveis. As condições incluem ainda diferenças de temperatura que garantem um controlo com histerese, evitando que ocorram repetidamente trocas entre dispositivos sem que exista a estabilização da temperatura do local.

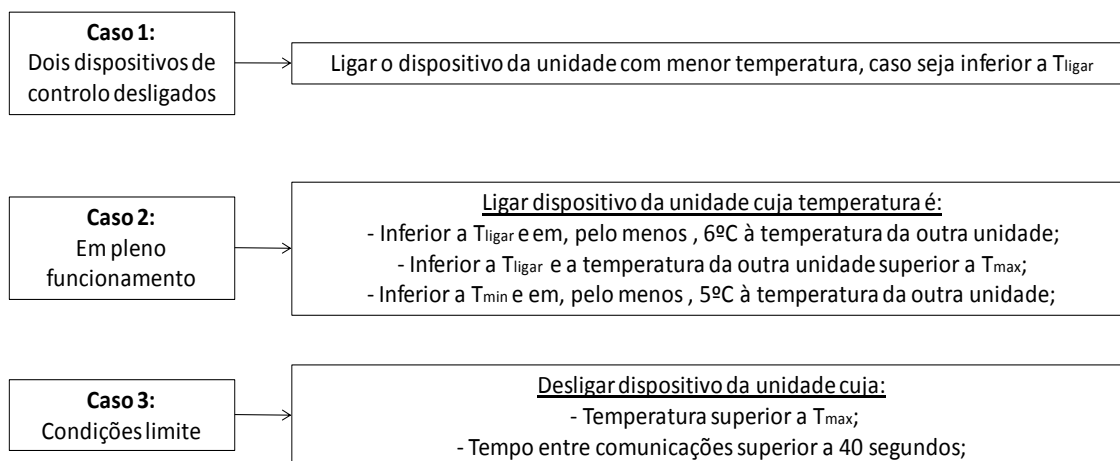


Figura 32 - Síntese das condições de controlo de cargas.

O caso 1 refere-se ao momento inicial do sistema e a situações em que a temperatura das duas unidades seja considerada propícia, não estando ligada nenhuma das cargas de aquecimento. Por sua vez, o caso 2, refere-se ao funcionamento dentro do intervalo de valores de temperatura de referência, onde ocorrem as trocas entre os dispositivos ativos de forma a manter os dois locais a temperaturas agradáveis. Por fim, o caso 3 garante a desativação do dispositivo caso ultrapasse a temperatura máxima, ou a suposição de tal situação caso deixe de comunicar com o sistema durante um determinado tempo, a partir do qual considera-se que está fora de funcionamento.

O resultado da função corresponde a uma variável de controlo, que assume o valor 0 ou 1, transmitida à unidade auxiliar em questão, ordenando, respetivamente, a ação de desligar ou ligar a carga.

De forma a garantir que em nenhum momento os dois dispositivos estão ligados em simultâneo, nos momentos em que deverá ocorrer a troca entre qual a carga ativa, a ordem para ativar a carga até então desligada só é transmitida depois de executada a ordem de desativar a carga referente à outra unidade.

5. Aplicação do Sistema de Gestão de Cargas

Após a conceção e montagem do sistema de gestão de cargas do sistema proposto, realizaram-se testes em ambiente laboratorial ao seu funcionamento. Os resultados dos testes experimentais ao desempenho do sistema desenvolvido serão apresentados neste capítulo.

Para além da verificação da comunicação entre as unidades do sistema, da transmissão de todos os pacotes de informação e das interfaces de visualização da informação disponibilizada, foram igualmente avaliadas as capacidades de aquisição de sinais e de controlo de cargas.

Por forma a obter resultados da operação do sistema para a aquisição das grandezas elétricas, foi realizada a sua calibração para as medições de I_{RMS} e V_{RMS} com um multímetro de precisão, *Fluke 8845A*.

5.1 Visualização de Resultados

Durante o funcionamento do sistema de gestão de cargas, a unidade de controlo disponibiliza num monitor, de forma dinâmica para os utilizadores, os resultados das interações com as unidades auxiliares. Para além desta interface do sistema, a unidade de controlo cria automaticamente um ficheiro de texto, identificado pela data do dia de execução do sistema, onde são armazenados todos os dados relativos às operações efetuadas. O ficheiro é constituído por um cabeçalho organizador e, em cada linha, é gravada o resultado de uma comunicação com uma unidade auxiliar, com a respetiva informação horária da ocorrência.

As duas formas de interface do sistema, que permitem ao utilizador aceder aos resultados, são apresentadas na **Figura 33**, operação cujo interesse era somente de visualização de interface.

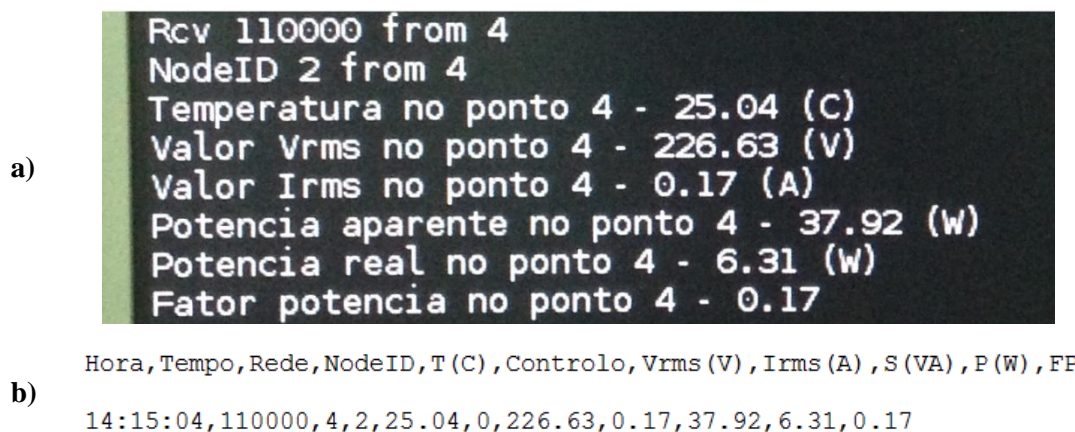


Figura 33 - Interface do sistema. a) Em tempo real disponível no monitor

b) Dados de operação do sistema armazenados num documento de texto (ASCII).

5.2 Ensaio de Aquisição de Grandezas Elétricas

De modo a testar o desempenho do sistema na medição das grandezas elétricas, foi avaliado individualmente cada uma das unidades auxiliares. Procedeu-se à sua calibração e posterior recolha de medidas.

A calibração realizou-se com recurso a um multímetro de precisão *Fluke 8845A*, através do ajuste das resistências variáveis que compõem os circuitos de condicionamento dos sinais de

corrente e tensão adquiridos. Apesar do sistema ler as duas variáveis a cada iteração, com frequência de 0.1 Hz (i.e. a cada 10 s), devido à limitação do multímetro para realizar esse mesmo processo simultâneo, cada grandeza foi avaliada individualmente.

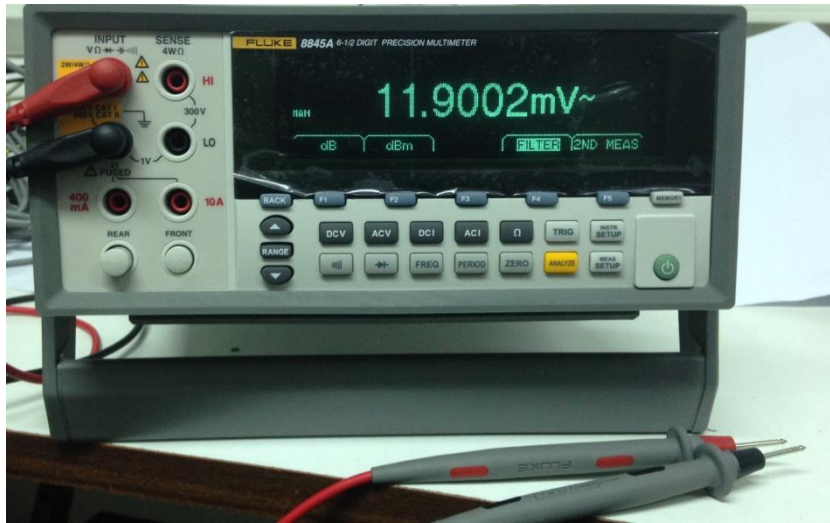


Figura 34 - Multímetro de precisão *Fluke 8845A*.

Depois de realizada a calibração, recorreu-se ao *software* de comunicação entre o instrumento *Fluke 8845A* e um computador - *FlukeView Forms Basic* - para recolher as medições do multímetro organizadas numa tabela.

Os dados recolhidos pelo multímetro correspondem a médias de medições instantâneas realizadas durante intervalos de dois segundos. Através da informação temporal de cada medição, foram agrupados os valores a comparar entre os dois instrumentos.

Por forma a se obterem resultados para uma ampla escala de medidas, foram utilizadas diversas cargas existentes no laboratório. O processo de calibração e comparação de medições foi realizado inicialmente para uma das unidades auxiliares, designada por unidade auxiliar 1, para as grandezas I_{RMS} e V_{RMS} .

O resultado de todas as iterações de medição dos valores I_{RMS} e V_{RMS} estão representados, respetivamente, na **Figura 35** e **Figura 36**.

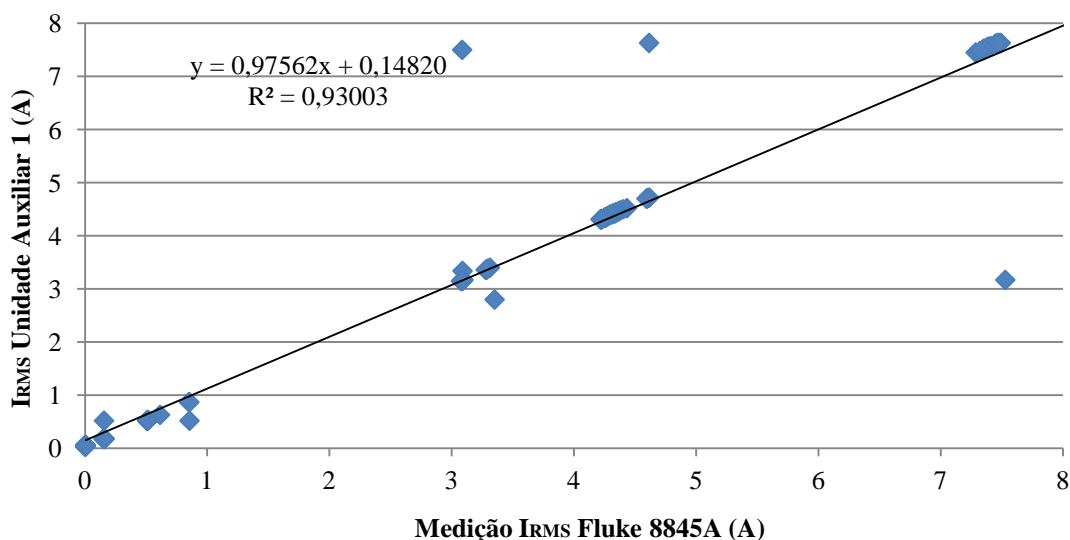


Figura 35 - Calibração da medição da corrente eficaz por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

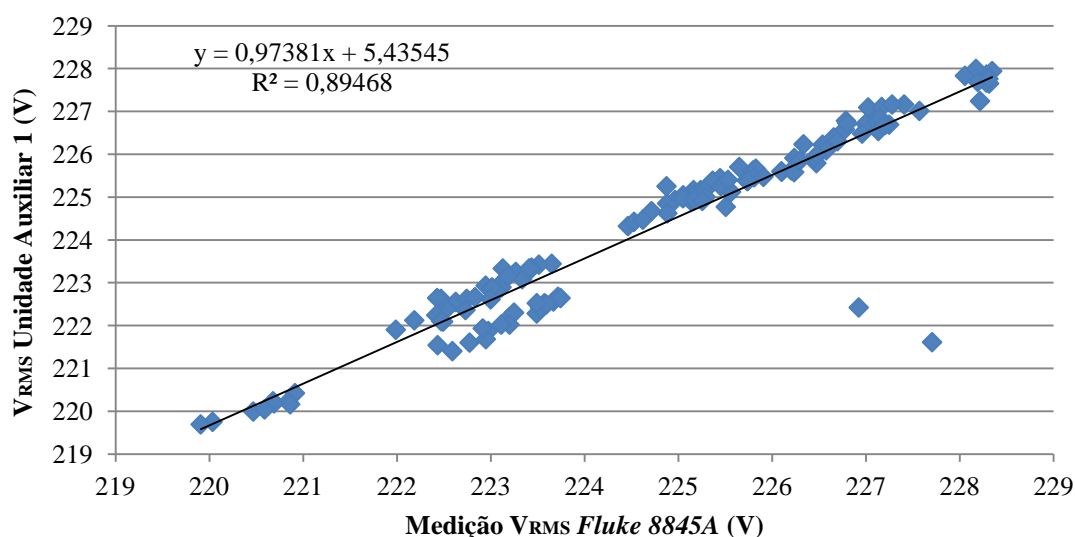


Figura 36 - Calibração da medição da tensão eficaz por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

Os resultados anteriormente expostos demonstram uma boa concordância entre as grandezas elétricas identificadas pelo sistema de gestão de cargas e as medidas obtidas com o multímetro de precisão, existindo no entanto alguns pontos nos quais essa capacidade não é verificada. A análise da sequência de medições permitiu concluir que estes valores atípicos, calculados pelo sistema, correspondem a momentos nos quais ocorre uma alteração da carga imposta ao sistema.

Em consequência desses valores atípicos resultarem de regimes transitórios de carga, conclui-se que esses dados correspondem a medições instáveis realizadas pelo sistema. A eliminação dessa pequena fração atípica de pontos, atesta a concordância entre os dois instrumentos para medições sem interferências no processo de leitura dos sinais, **Figura 37** e **Figura 38**.

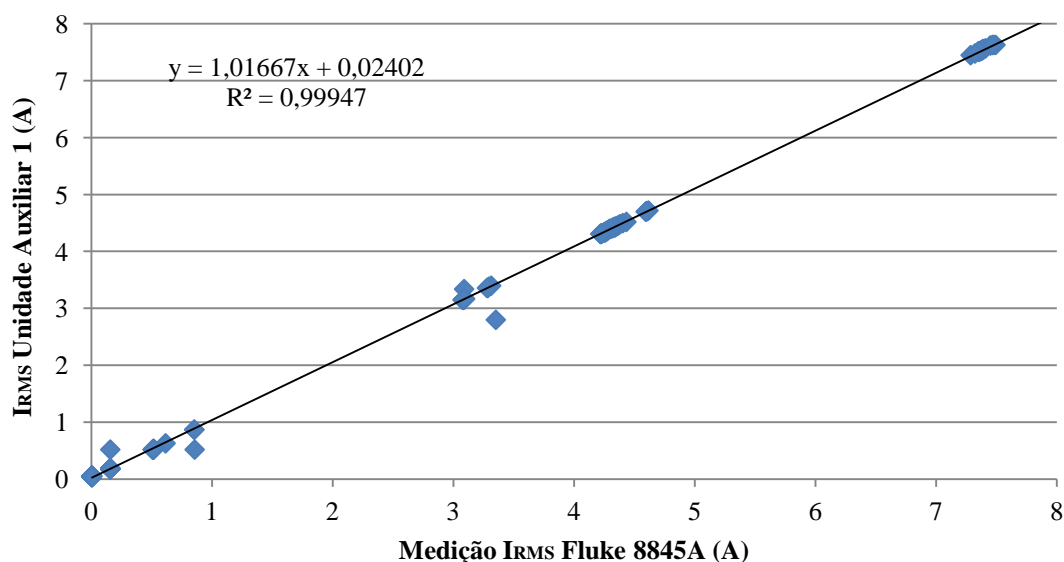


Figura 37 - Calibração da medição da corrente eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

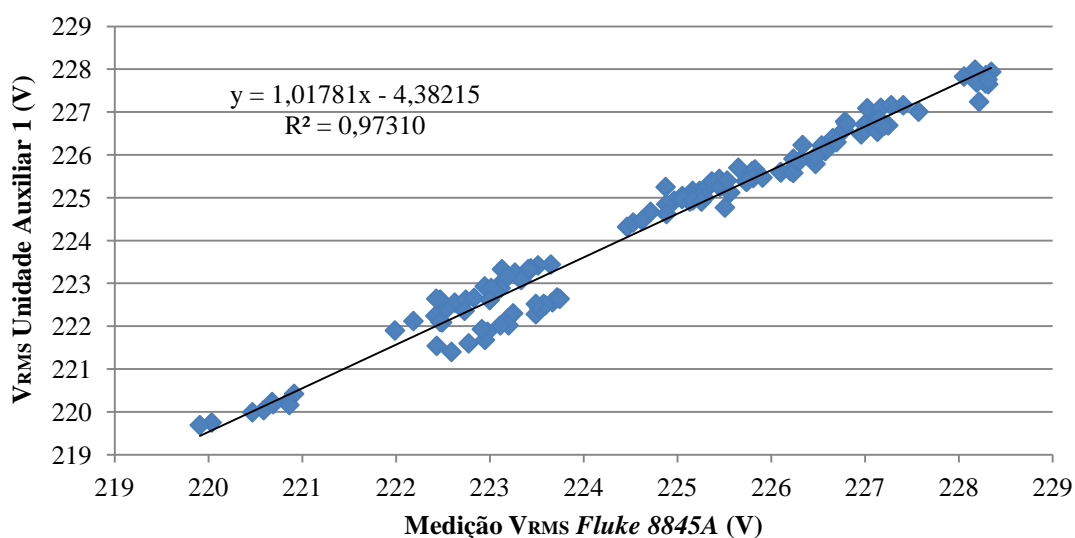


Figura 38 - Calibração da medição da tensão eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 1 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

Após realizadas as medições para a unidade auxiliar 1, foi igualmente realizado o mesmo processo para a segunda unidade auxiliar construída, designada por unidade auxiliar 2. Os resultados de todas as iterações efetuadas são apresentados na **Figura 39** e **Figura 40**.

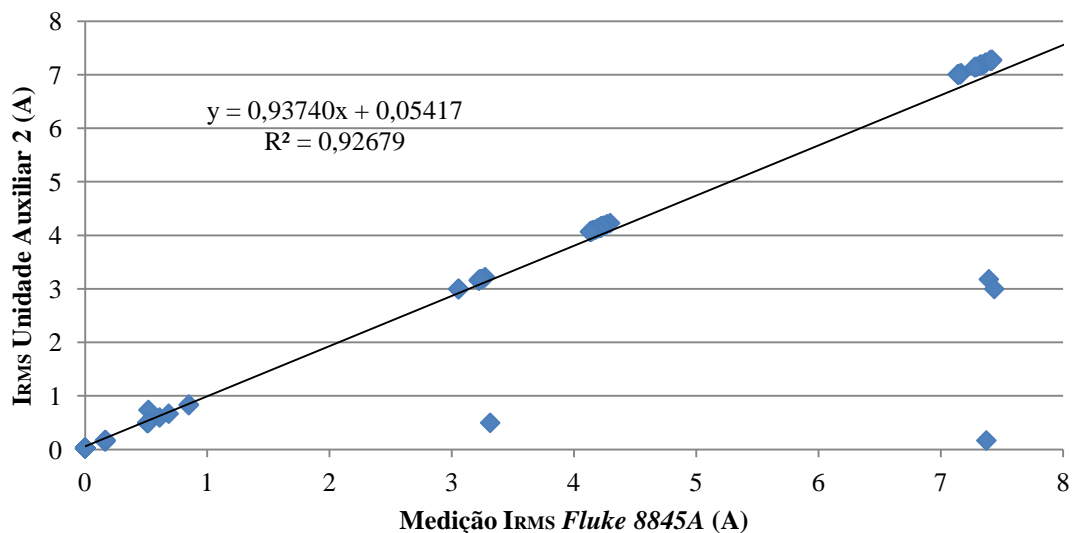


Figura 39 - Calibração da medição da corrente eficaz por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

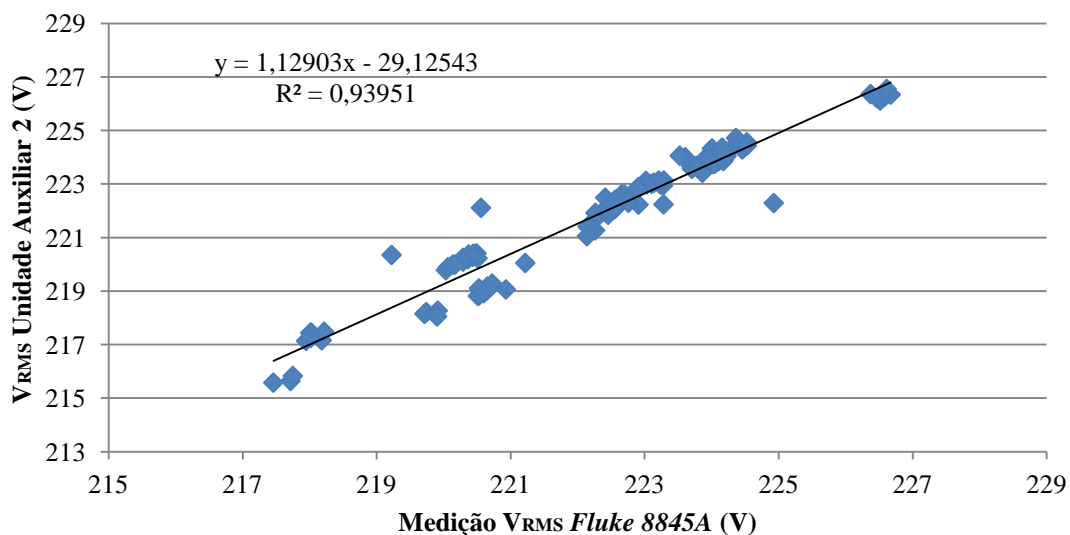


Figura 40 - Calibração da medição da tensão eficaz por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

Tal como para a unidade 1, a eliminação da pequena fração de valores atípicos, evidencia a concordância entre as medições, **Figura 41** e **Figura 42**.

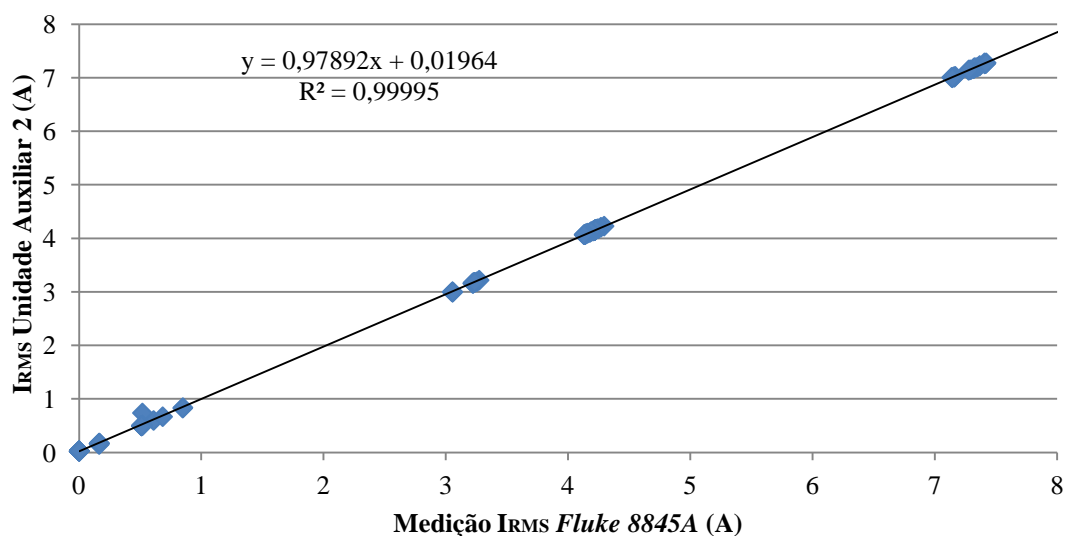


Figura 41 - Calibração da medição da corrente eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

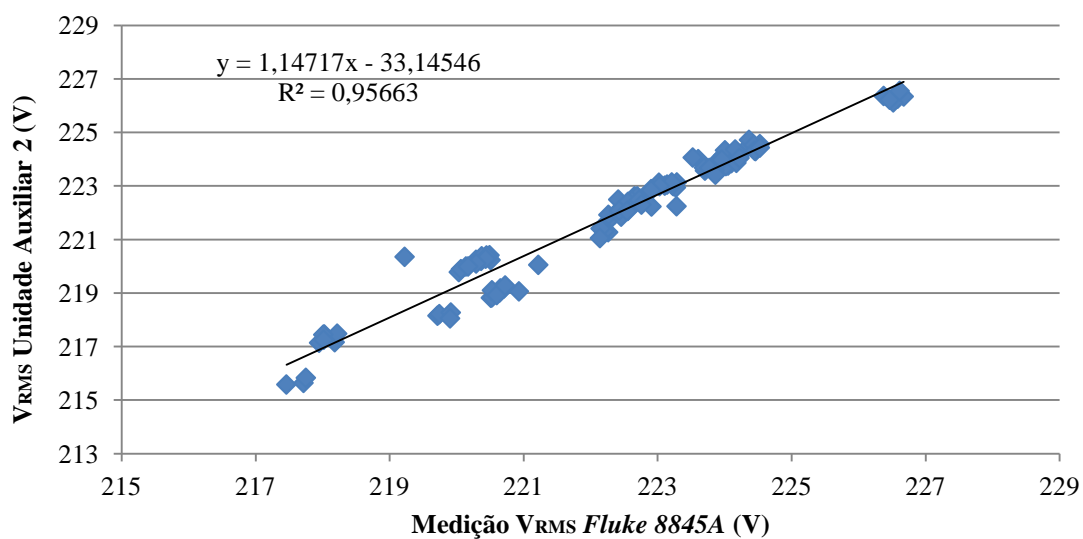


Figura 42 - Calibração da medição da tensão eficaz, com filtragem dos regimes transitórios de carga, por parte da unidade auxiliar 2 do sistema proposto, com recurso a um multímetro de precisão.

A avaliação da média dos erros relativos, calculados segundo a equação (51), para cada coleção de medições com filtragem, está representada na **Tabela 9**.

$$Erro_{relativo} = \frac{|Medição_{sistema} - Medição_{Fluke8845A}|}{Medição_{Fluke8845A}} \quad (51)$$

Tabela 9 - Média dos erros relativos associados às medições com filtragem das grandezas elétricas do sistema proposto, comparativamente com o multímetro *Fluke 8845A*.

	Média dos Erros da Unidade Auxiliar 1	Média dos Erro da Unidade Auxiliar 2
Medições com filtragem I_{RMS}	6,42%	2,28%
Medições com filtragem V_{RMS}	0,18%	0,23%

As medições obtidas evidenciam a existência de duas regiões definidas no que diz respeito à medição da corrente eficaz por parte do sistema proposto, tal ocorrência é demonstrado pelas médias dos erros apresentadas na **Tabela 10**.

Tabela 10 - Média dos erros relativos associados às medição com filtragem da corrente eficaz comparativamente com o multímetro *Fluke 8845A*.

	Média dos Erro da Unidade Auxiliar 1	Média dos Erro da Unidade Auxiliar 2
Medições com filtragem $I_{RMS} < 1A$	9,58%	4,35%
Medições com filtragem $I_{RMS} > 3A$	2,43%	1,70%

5.3 Ensaio do Controlo de Cargas

Para testar a capacidade de controlo do sistema, este foi ligado com o funcionamento simultâneo das duas unidades auxiliares de forma a avaliar o desempenho e a tomada de decisão de qual a carga a ligar. A condição básica de teste da função impõe que nunca podem estar as duas cargas ligadas em simultâneo. A ligação de um LED, que responde à ativação ou desativação de uma porta digital do microcontrolador, simula a carga a controlada.

Visto as condições impostas pela função de controlo programada terem como base parâmetros de temperatura para gerir cargas de aquecimento, foi necessário estipular as temperaturas de referência indispensáveis à execução da função. Estas foram definidas, tendo em conta as condições do local de teste, i.e. o laboratório da Unidade de Análise Energética do LNEG.

Tabela 11 - Temperaturas de referência estipuladas para o teste de controlo.

Variável Referência	Temperatura (°C)
T_{\min}	15
T_{ligar}	21
T_{\max}	30

O desempenho da capacidade de controlo foi testada através da variação da temperatura ambiente junto ao termistor, com a utilização de um aquecedor para aumentar a temperatura e

porções de gelo para permitir descer a mesma rapidamente. Foram testadas situações que abrangem as condições incluídas nos três casos da função de controlo.

Acompanhando as variações da temperatura, o sistema altera o valor da variável de controlo para cada unidade auxiliar, agindo sobre a porta digital onde está conectado o LED. Quando a variável de controlo assume o valor 1, o LED está ligado, pelo contrário, com o valor 0, a porta digital é desativada e por consequente o LED desligado.

Foi simulado também a interrupção do funcionamento de uma das unidades auxiliares, 1, de forma a testar a capacidade do sistema em reagir à saída e posterior reentrada da mesma na rede de comunicação - período entre a situação 4 e 6.

As situações que implicam mudanças de estado estão numeradas de 1 a 6 na **Figura 43**.

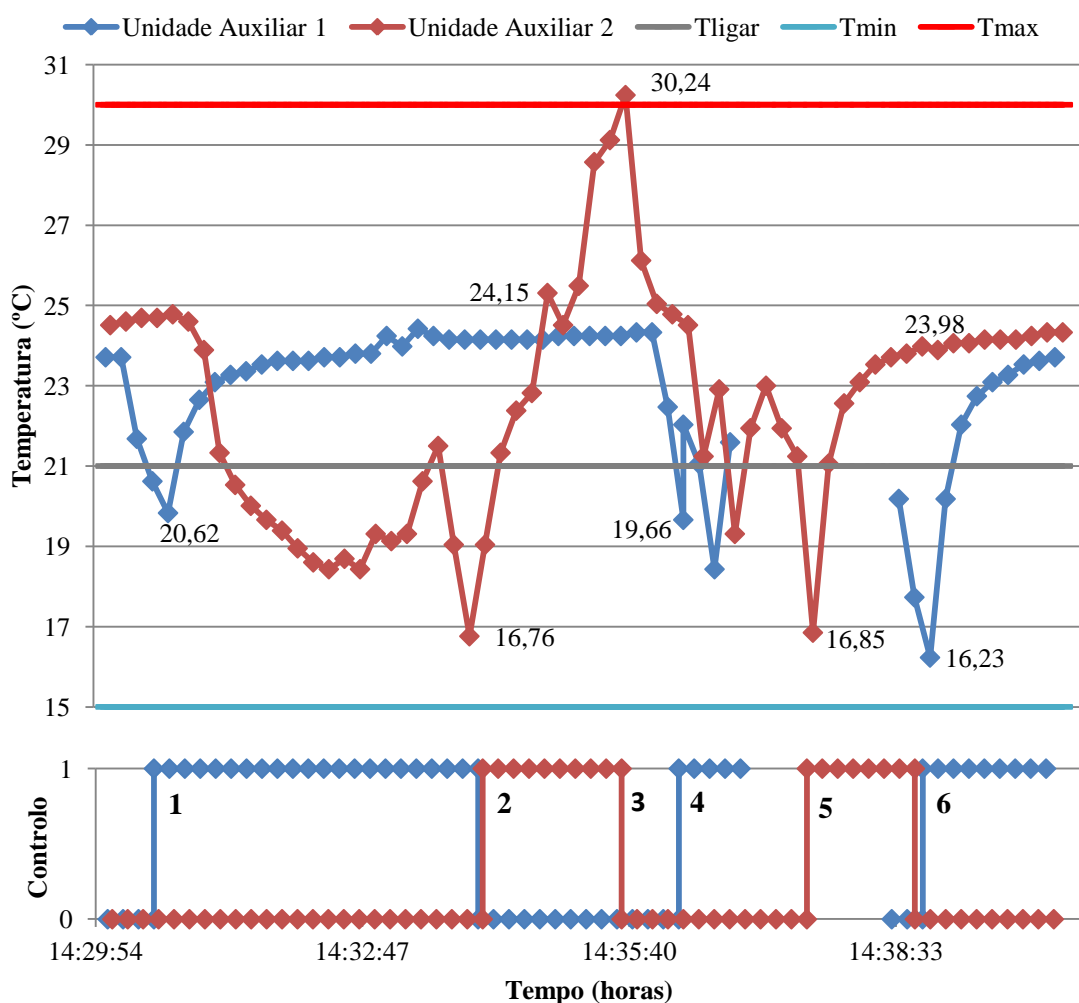


Figura 43 - Desempenho da capacidade de controlo do sistema. A numeração corresponde às alterações da variável de controlo. Entre as situações 4 e 6 foi testada a saída e posterior reentrada da unidade auxiliar 1 na rede de comunicação do sistema.

5.4 Análise de Resultados

A comparação efetuada entre o sistema proposto e um multímetro de precisão para a medição dos parâmetros elétricos I_{RMS} e V_{RMS} , após filtragem dos regimes transitórios de carga,

demonstra uma boa concordância de valores, tanto para os dados adquiridos pela unidade auxiliar 1, como para a unidade auxiliar 2, a qual se traduz por expressivos valores do coeficiente de correlação linear (R^2) da curva de calibração: $R^2 = 0,999$ para a regressão, quer para a unidade auxiliar 1, como para a unidade auxiliar 2, nas medições referentes à grandeza I_{RMS} , e valores de 0,973 e 0,956, respetivamente para a unidade auxiliar 1 e 2, para as medições referentes a V_{RMS} . É de salientar que esta correlação ocorre para um intervalo de medições alargado.

A avaliação apresentada na **Tabela 9** destaca a elevada capacidade do sistema na medição da tensão, apresentando uma média dos erros relativos inferior a 1%. Por sua vez, os erros associados à medição da corrente eficaz são consideravelmente mais elevados. Contudo, estes valores estão associados à medição de valores baixos de corrente, tal como indica a **Tabela 10**, sendo inferiores a 2,5% em cargas a partir dos 3A, o que indiciam um funcionamento aceitável e adequado para cargas de aquecimento doméstico de capacidade regular.

Ainda no que se refere à medição da corrente eficaz, o sistema demonstra dificuldade na medição do valor zero nos momentos de ausência de carga, detetando-se um *offset* na ordem dos 0,05A para a unidade auxiliar 1, e na ordem dos 0,03A para a unidade auxiliar 2. A existência desse *offset* na leitura dos sinais de corrente origina a ocorrência de erros relativos superiores para valores mais baixos de corrente, como se verifica através da **Tabela 10**. A diferença entre os valores de *offset* relativos às duas unidades auxiliares, superior para a unidade auxiliar 1, justifica a diferença verificada entre a média dos erros relativos das duas unidades do sistema, no que diz respeito à medição de valores mais baixos de corrente.

Apesar de terem sido utilizadas duas resistências variáveis no divisor de tensão que constitui o circuito do sinal de corrente, em que uma delas é de baixa amplitude - precisamente para aumentar a precisão da calibração do mesmo - este método de calibração é suscetível à ocorrência de erros devido à precisão necessária na manipulação com as resistências em questão. Além disso, a união física entre estes componentes e a *breadboard* é alterada ao ocorrer a manipulação dos mesmos, o que influencia os resultados das medições. Devido a este último facto, o erro de *offset* poderá, eventualmente, ser reduzido através da prototipagem do circuito que garante uma ligação dos componentes de melhor qualidade.

No que diz respeito à verificação da capacidade do controlo das cargas de aquecimento, o sistema cumpriu as condições inicialmente definidas.

Pela **Figura 43** pode averiguar-se que nunca estão os dois LEDs ligados em simultâneo, mesmo em situações de troca da ativação das cargas entre unidades auxiliares. Nestes últimos casos, primeiramente assiste-se à desativação da carga a desligar e de imediato à ativação da restante, ou seja, o momento de transição resulta na desativação das duas cargas garantindo que nunca estão ligadas em simultâneo.

Em resposta às alterações de temperatura produzidas, o sistema correspondeu sempre com a resposta desejada. A primeira alteração de estado resulta da interpretação do caso 1 da função de controlo. Nesse caso, estão as duas cargas desligadas e somente é ligada a carga de temperatura mais baixa, quando esta é inferior a T_{ligar} .

Após a ativação do LED, e apesar das linhas de temperatura se cruzarem rapidamente, a troca do estado de ativação não ocorre de imediato. Segundo a função de controlo esta situação corresponde ao caso 2 no qual, para não existirem trocas repetitivas entre as cargas, a troca somente ocorre quando a diferença entre as temperaturas é igual (ou superior) a 6°C. Ao se atingir o ponto onde essa situação ocorre - temperatura da unidade 1 de 24,15°C e da unidade 2, 16,76°C - dá-se a desativação da unidade 1 e por sua vez a ativação da unidade 2.

A situação 3 assinalada na **Figura 43**, refere-se ao caso de um aquecimento extremo, caso 3 da função de controlo, onde a temperatura excedeu a T_{max} e por isso o sistema processou a ordem

de desativar a carga da unidade em questão. Visto a restante unidade auxiliar em funcionamento estar a uma temperatura superior a T_{ligar} , esta não foi ligada.

Entre a situação **4** e a situação **5**, simulou-se um corte da comunicação durante 40 segundos da unidade que está com a carga ativa. O sistema respondeu conforme a função de controlo e desativou a carga.

De notar a resposta adequada do sistema à saída, e posterior reentrada, de uma das unidades auxiliares na rede de comunicação do sistema. No momento da entrada da segunda unidade novamente em funcionamento, apesar de estar com uma temperatura inferior à de referência para ativar a carga, a ativação só ocorre quando a diferença entre as duas unidades atinge os 6°C, e depois de ocorrer a desativação da carga correspondente à outra unidade - situação **6**.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

Neste trabalho desenvolveu-se um sistema capaz de vir a realizar a gestão e o controlo de cargas domésticas resistivas, que traduzem sistemas de aquecimento ambiente, de forma a constituir um instrumento de controlo do perfil energético dos consumidores.

Analisados os sistemas de monitorização atualmente no mercado e projetos de desenvolvimento de *software* livre existentes, foram definidos quais os parâmetros elétricos a medir, para além da medição de temperatura, a qual permite realizar o controlo sobre uma situação típica de cargas de aquecimento.

Tendo em conta que um dos objetivos deste sistema proposto é o desenvolvimento de um instrumento com as funcionalidades semelhantes a um contador inteligente de consumos domésticos, mas com base em dispositivos de baixo custo, foi realizada uma investigação exaustiva dos dispositivos eletrónicos atualmente disponíveis no mercado, que permitam garantir as funcionalidades desejadas, e com adequado baixo custo.

Verificada a informação necessária, definiu-se a constituição das componentes das unidades (*hardware*) que devem constituir o sistema de gestão de cargas proposto, bem como as bibliotecas de *software* livre de apoio para a criação da aplicação de gestão de consumo (*software*) com todas as funcionalidades desejadas. A ligação dos diferentes dispositivos, a execução do *software* de rede de comunicação sem fios e a criação das funções de aquisição, processamento, transmissão e apresentação da informação, tal como a programação do controlo, facultaram ao sistema de gestão de cargas a capacidade de medição da tensão e corrente eficazes, potência ativa, potência reativa, fator de potência e ainda a temperatura ambiente em redor das cargas monitorizadas.

Após o processamento da informação, esta é apresentada aos utilizadores, não só através de um monitor, que informa os consumidores domésticos em tempo real acerca dos consumos associados às cargas em questão, mas também através do armazenamento num documento texto que está disponível para consulta posterior. Para além da capacidade de monitorização, que concede ao sistema as funções de um instrumento passivo da gestão do consumo, a atuação sobre as cargas através de uma variável de controlo permite transformar este sistema num elemento ativo na regulação dos consumos domésticos.

As funcionalidades do sistema proposto neste trabalho foram testadas com recurso à criação de uma unidade de controlo e duas unidades auxiliares. Inicialmente, realizou-se a calibração e verificação do desempenho da aquisição dos dados de tensão e corrente eficazes por parte de cada uma das unidades auxiliares, e, de seguida, foi aferida a capacidade de controlo através da imposição de variações de temperatura em ambiente laboratorial.

A calibração da aquisição das grandezas V_{RMS} e I_{RMS} foi realizada com sucesso, com coeficientes de regressão próximos de 1, relativamente a um multímetro de precisão

A função de controlo, programada para a gestão de cargas de aquecimento consoante a temperatura ambiente, foi testada através do forçamento da alteração da temperatura ambiente no laboratório. Apesar das variações abruptas impostas durante o ensaio, diferentes das lentas variações que ocorrem em condições reais de funcionamento, foram testados todos os casos da função que implicariam alterações da variável de controlo. O sistema respondeu corretamente às condições de controlo programadas.

A análise do desempenho do sistema nos ensaios realizados em ambiente laboratorial permite concluir que os objetivos do trabalho foram inteiramente cumpridos. Contudo, e como ocorre neste tipo de tarefas de desenvolvimento de um novo sistema assente em dispositivos eletrónicos que incluem montagem de *hardware* e *software*, existem continuamente melhoramentos e sofisticações que se podem realizar.

Para dar continuidade a este projeto, depois desta primeira abordagem que valida a utilidade e a capacidade do sistema, trabalho futuro poderá ser realizado de forma a seguir as etapas até à sua implementação prática em larga escala, como por exemplo:

- Incorporação de um circuito de controlo de potência - a introdução de um relé responsável pela ligação entre a unidade auxiliar e a alimentação da carga em questão, capaz de comutar uma carga de elevada corrente a 230V, permitirá controlar a carga através da ativação ou desativação da porta digital do microcontrolador coordenada pela função de controlo;
- Introdução de mais unidades auxiliares - a aplicação real deste sistema pelos utilizadores implica a utilização de uma rede de unidades composta por várias unidades secundárias. Um passo futuro deverá ser o teste da utilização de um número superior de unidades auxiliares no sistema de comunicação;
- Configurações da rede malhada sem fios - a rede é estabelecida para a utilização de um número considerável de dispositivos, no entanto, o aumento do número de unidades auxiliares implicará contínuas inovações na configuração da mesma, de forma a gerir o número crescente de mensagens a transitar;
- Prototipagem - a substituição da utilização da *breadboard* por placas de circuito impresso nas unidades auxiliares facilitará a aplicação do sistema de forma compacta;
- Interface - criação de uma interface gráfica mais apelativa para a apresentação dinâmica dos resultados no monitor.

Apesar da necessidade de constante atualização e inovação, o sistema desenvolvido neste trabalho revelou um desempenho adequado, cumprindo as expectativas relativas às funcionalidades pretendidas. A criação deste projeto pretende ser um incentivo ao desenvolvimento de produtos e investigação deste tipo de sistemas, que num futuro próximo serão cada vez mais difundidos entre os consumidores domésticos como forma de controlar o seu desempenho energético e a potência requerida.

Referências Bibliográficas

- ADENE, 2015. *Energia: Planos e Programas*. [Online] Available at: <http://www.adene.pt/planos-e-programas> [Accessed 20 Maio 2015].
- Akyildiz, I.F., Wang, X. & Wang, W., 2005. Wireless mesh networks: a survey. *Wireless mesh networks: a survey*, 47 (4), pp.445–87.
- Arduino, 2015. *Arduino Genuino*. [Online] Available at: <https://www.arduino.cc/> [Accessed 5 Julho 2015].
- Asare-Bediako, B., Kling, W.L. & Ribeiro, P.F., 2012. Home Energy Management Systems: Evolution, Trends and Frameworks. In *Proceeding of 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. London, 2012. IEEE.
- Atmel, 2015. *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P*. [Datasheet] Atmel Available at: http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet_complete.pdf [Accessed 30 Novembro 2015].
- Bartusch, C. et al., 2011. Introducing a Demand-Based Electricity Distribution Tariff in the Residential Sector: Demand Response and Customer Perception. *Energy Policy*, 39 (9), pp.5008–25.
- Benzi, F., Norma, A., Bassi, E. & Frosini, L., 2011. Electricity Smart Meters Interfacing the Households. *Transactions on Industrial Electronics*, 58 (10), pp.4487 - 4494.
- Castro, R., 2011. *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica*. 2nd ed. Lisboa, Lisboa, Portugal: IST Press. pp. 4-26.
- Davito, B., Tai, H. & Uhlaner, R., 2010. The Smart Grid and the Promise of Demand-Side Management. pp.38-44.
- Deloitte, 2009. *Estudo do Impacto Macroeconómico do Sector das Energias Renováveis em Portugal*. [Online] Deloitte Available at: http://www.apren.pt/fotos/noticias/apren_impacto_energias_renovaveis_1266829068.pdf [Accessed 14 Setembro 2015].
- Design Spark, 2014. *Introducing the Raspberry Pi B+*. [Online] Available at: <http://www.rs-online.com/designspark/electronics/eng/blog/introducing-the-raspberry-pi-b-plus> [Accessed 7 Julho 2015].
- DGEG, 2015. *Balanço Energético - Sintético 2014*. [Online] Direção Geral de Energia e Geologia Available at: <http://www.dgeg.pt/> [Accessed 15 Outubro 2015].
- DGEG, 2015. *Energia em Portugal 2013*. [Online] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia Available at: <http://www.dgeg.pt/> [Accessed 15 Outubro 2015].
- Digi, 2008. *Demystifying 802.15.4 and ZigBee*. [Online] Available at: http://www.digi.com/pdf/wp_zigbee.pdf [Accessed 15 Julho 2015]. Minnetonka.
- DL 182/95, 1995. *Decreto-Lei n.º 182/1995*. [Online] Ministério da Indústria e Energia: Diário da República - 1 Série-A N.º 172 de 27-7-1995 Available at: <http://www.base-geral.com/pt/dr1/diploma-apresentar.asp?diploma=182> Decreto-Lei%5EDecreto-Lei&ano=1995 [Accessed 15 Maio 7].
- DL 29/2006, 2006. *Decreto-Lei n.º 29/2006*. [Online] Ministério da Economia e da Inovação - Diário da República - 1 Série-A N.º33: Diário da República Available at: <https://dre.tretas.org/pdfs/2006/02/15/dre-194774.pdf> [Accessed 15 Maio 2015].
- EChun, s.d. *Split Core Current Transformer ECS1030-L72*. [Online] Available at: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Current/ECS1030-L72-SPEC.pdf> [Accessed 21 Abril 2015].

EDP, 2009a. *Sistema Eléctrico Português*. [Online] Available at: <http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/sistemaelectricoportugues/Pages/SistElectNacional.aspx> [Accessed 10 Maio 2015].

EDP, 2009b. *Distribuição de Electricidade*. [Online] Available at: <http://www.edp.pt/pt/aedp/unicidadesdenegocio/distribuicaoodeelectricidade/Pages/Distribuicao.aspx> [Accessed 15 Maio 2015].

Efergy Technologies Limited, 2014. *Efergy*. [Online] Available at: <http://efergy.com/> [Accessed 16 Abril 2015].

Engineering Notes, 2013. *NTC Thermistors*. [Online] Available at: http://precisionsensors.meas-spec.com/pdfs/ntc_engineering_notes.pdf [Accessed 16 Junho 2015].

ENTSO-E, 2015. *European Network of Transmission System Operators for Electricity*. [Online] Available at: <https://www.entsoe.eu/Pages/default.aspx> [Accessed 3 Dezembro 2015].

ERSE, 2009a. *Transporte*. [Online] Available at: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/transporte/Paginas/default.aspx> [Accessed 8 Maio 2015].

ERSE, 2009b. *Qualidade de serviço: o que é?* [Online] Available at: <http://www.erse.pt/consumidor/electricidade/querosabermais/qualidadedeservicooquee/Paginas/default.aspx?master=ErsePrint.master> [Accessed 8 Junho 2015].

ERSE, 2009c. *Produção*. [Online] Available at: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/producao/Paginas/default.aspx?master=ErsePrint.master> [Accessed 15 Maio 2015].

ERSE, 2014. *Manual de Procedimentos da Gestão Global do Sistema do Setor Eléctrico*. [Online] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos Available at: http://www.erse.pt/pt/electricidade/regulamentos/operacaodasredes/Documents/MPGGS%20SE%20consolidado_Abril2014_vs%20PEexterno.pdf [Accessed 3 Novembro 2015]. Lisboa.

Estanqueiro, A., 2013. *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*. [Online] Aulas de Redes de Distribuição de Energia - 4º Ano Mestrado Integrado Engenharia da Energia e do Ambiente Available at: http://moodle.ciencias.ulisboa.pt/pluginfile.php/49225/mod_resource/content/4/6.GrandezasElectricas_revisao_En.pdf [Accessed 8 Abril 2015].

EUROSTAT, 2015. *Europe 2020 headline indicators*. [Online] Available at: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe_2020_headline_indicators [Accessed 5 Maio 2015].

Hafeez, A. et al., 2014. Smart Home Area Networks Protocols within the Smart Grid Context. *Journal of Communications*, 9 (9).

HopeRF, 2006. *HopeRF*. [Online] Available at: <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Wireless/General/RFM12B.pdf> [Accessed 8 Junho 2015].

IEA Wind Task 25, 2009. *IEA Wind Task 25 - Design and operation of power systems with large amounts of wind power*. [Online] IEA Wind Available at: https://www.ieawind.org/annex_XXV/PDF/Final%20Report%20Task%2025%202008/T2493.pdf [Accessed 5 Novembro 2015]. Final report, IEA WIND Task 25, Phase one 2006-2008, VTT TIEDOTTEITA-Research Notes 2493, Helsinki.

IEA, 2005. *Variability of Wind Power and Other Renewables - Management options and strategies*. [Online] IEA, Paris Available at: http://www.uwig.org/iea_report_on_variability.pdf [Accessed 15 Novembro 2015].

IEA, 2011. *Technology Roadmap - Smart Grids*. [Online] IEA, Paris Available at: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids_roadmap.pdf [Accessed 23 Novembro 2015].

- IEA, 2015. *Energy and Climate Change*. [Online] International Energy Agency (World Energy Outlook Special Report) Available at: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf> [Accessed 20 Outubro 2015]. Paris.
- IEEE, 2015. Smart Grid - The Next Decade. *IEEE Smart Grid Newsletter - Compendium 2015*, pp.22-44. 1ª Edição, Piscataway - USA.
- ISA, 2013. *Cloogy*. [Online] Available at: <http://www.cloogy.com/pt/> [Accessed 10 Abril 2015].
- Kundur, P., 1994. *Power System Stability and Control*. 1st ed. USA: Electric Power Research Institute. pp. 3-30.
- Kuphaldt, T.R., 2006. *Lessons In Electric Circuits, Volume II - AC*. 6th ed. USA: Design Science. pp. 340-400.
- Li, Y., Li, D., Cui, W. & Zhang, R., 2011. Research based on OSI model. In *Proceeding of 3rd International Conference on Communication Software and Networks*., 2011. IEEE.
- Lisboa E-Nova, 2015. *Contadores Inteligentes para Decisões Eficientes*. [Online] Available at: <http://lisboaenova.org/contadoresinteligentesdecisoeseeficientes> [Accessed 9 Setembro 2015].
- Lujano-Rojas, J.M., Monteiro, C., Dufo-López, R. & Bernal-Agustín, J.L., 2012. Optimum Residential Load Management Strategy for Real Time Pricing (RTP) Demand Response Programs. *Energy Policy*, 45, pp.671–79.
- Mateus, C.B. & Estanqueiro, A., 2012. Regulation of the wind power production: contribution of the electric vehicles and other energy storage systems. In *Proceeding of 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Power Plants*. Lisboa, 2012.
- Monteiro, C., 2005. *Gestão de consumos - DSM e Telecontagem*. [Online] Available at: <http://paginas.fe.up.pt> [Accessed 7 Abril 2015].
- Moura, P.S. & de Almeida, A.T., 2010. Demand-Side Management to the Grid Integration of Renewable Resources. In *Proceeding of Energy Saving Information Platform (ENERsip)*., 2010.
- Nordic Semiconductor, 2008. *nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification v1.0*. [Online] Nordic Semiconductor (Datasheet) Available at: https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Plus Preliminary Product Specification v1_0.pdf [Accessed 20 Abril 2015].
- OpenEnergyMonitor, 2015. *OpenEnergyMonitor*. [Online] Available at: <http://openenergymonitor.org/emon/> [Accessed 10 Abril 2015].
- Palensky, P. & Dietrich, D., 2011. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7 (3), pp.381-88.
- Pipattanasomporn, M., Kuzlu, M. & Rahman, S., 2012. An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3 (4), pp.2166-73.
- PORDATA, 2014. *Portugal: Ambiente, Energia e Território*. [Online] Available at: <http://www.pordata.pt/Subtema/Portugal/Energia-90> [Accessed 7 Maio 2015].
- Prata, R., Craveiro, H., Santos, C.A. & Quaresma, E., 2011. SmartGrid role in reducing electrical losses – the InovGrid experience. In *Proceeding of 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*. Lisboa, 2011. IEEE.
- Raspberry Pi Foundation, 2015. *Raspberry Pi*. [Online] Available at: <https://www.raspberrypi.org/> [Accessed 11 Abril 2015].

- REN, 2008. *Manual de Procedimentos do Gestor do Sistema*. [Online] Available at: <http://www.mercado.ren.pt/EN/Electr/MarketInfo/Document/BibSubregula/MPGS.pdf> [Accessed 10 Julho 2015].
- REN, 2011. *Dados Técnicos 2010*. [Online] Rede Eléctrica Nacional Available at: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/EN/InformacaoTecnica/TechnicalData/TechnicalData2010.pdf> [Accessed 15 Maio 2015].
- REN, 2015. *Dados Técnicos 2014*. [Online] Rede Eléctrica Available at: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/DadosTecnicos/2014.pdf> [Accessed 15 Julho 2015].
- Resende, F.O. & Peças Lopes, J.A., 2011. Management and control systems for large scale integration of renewable energy sources into the electrical networks. In *Proceeding of EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*. Lisboa, 2011. IEEE.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008, 2008. *Programa de Eficiência Energética na Administração Pública*. [Online] Diário da República 1.ª Série - N.º 97 Available at: http://ecoap.adene.pt/documents/10179/10742/Resolu%C3%A7%C3%A3o+do+Conselho+de+Ministros+80_2008.pdf/b7c9ff21-ed06-4d0f-911b-363ab9a56f6b [Accessed 20 Outubro 2015].
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, 2013. *Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética*. [Online] Diário da República , 1ª Série - N.º70 Available at: <https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/2013/04/07000/0202202091.pdf> [Accessed 23 Agosto 2015].
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, 2013. *Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis*. [Online] Diário da República , 1ª Série - N.º70 Available at: <https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/2013/04/07000/0202202091.pdf> [Accessed 23 Agosto 2015].
- RF24Mesh, 2015. *Mesh Networking Layer for RF24 Radios*. [Online] Available at: <http://tmrh20.github.io/RF24Mesh/index.html> [Accessed 5 Maio 2015].
- RF24Network, 2015. *Newly Optimized RF24Network Layer*. [Online] Available at: http://tmrh20.github.io/RF24Network_Dev/index.html [Accessed 12 Junho 2015].
- Saele, H. & Grande, O.S., 2011. Demand Response From Household Customers: Experiences From a Pilot Study in Norway. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2 (1), pp.102-09.
- Schneider Electric, 2010. *Wireless Mesh Network - Concepts and Best Practices Guide*. [Online] Schneider Electric, USA Available at: <http://195.70.43.12/Vista/wirelessmeshnetworkconceptsandbestpracticesguide35023.pdf> [Accessed 10 Outubro 2015].
- Shao, S., Pipattanasomporn, M. & Rahm, S., 2011. Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid With Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid* , 2 (4), pp.624-31.
- Stallman, R.M., 2010. *Free Software, Free Society: Selected Essays of Richard M. Stallman*. 2nd ed. Boston, USA: Free Software Foundation. pp. 3-50.
- Tamkittikhun, N., Tantidham, T. & Intakot, P., 2015. AC power meter design for home electrical appliances. In *Proceeding of 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. Hua Hin, 2015. IEEE.
- TATA Power, 2015. *Defining Demand Side Management*. [Online] Available at: https://cpx.tatapower.com/customer_care/save-energy/explore/difining-demand-side.aspx [Accessed 17 Junho 2015].

Texas Instruments, 2014. *LM117, LM317-N Wide Temperature Three-Pin Adjustable Regulator*. [Online] Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117.pdf> [Accessed 8 Maio 2015].

TEZ, s.d. *Transformer for PCB*. [Online] Available at: <http://www.tme.eu/en/Document/539865e675f27153c23510de49b984c9/TEZ-EN.pdf> [Accessed 8 Junho 2015].

Thanuj, P.P., 2013. Remote Power On-Off Control For Home Electric. *International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking*, 1 (10).

TMRh20, 2015. *RF24Mesh - Mesh Networking for RF24Network*. [Online] Available at: <https://github.com/TMRh20/RF24Mesh> [Accessed 6 Abril 2015].

U.S. Department of Energy, 2006. *Benefits of Demand Response in Electricity and Recommendations for Achieving Them*. [Online] Department of Energy Available at: http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_Benefits_of_Demand_Response_in_Electricity_Markets_and_Recommendations_for_Achieving_Them_Report_to_Congress.pdf [Accessed 2015 Setembro 9].

van Dam, S.S., Bakker, C.A. & Buiters, J.C., 2013. Do Home Energy Management Systems Make Sense? Assessing their Overall Lifecycle Impact. *Energy Policy*, 63, pp.398–407.

Vega, A.M., Santamaria, F. & Rivas, E., 2015. Modeling for Home Electric Energy Management: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, pp.948–59.

Vishay, 2012. *NTC Thermistors, Radial Leaded, Standard Precision*. [Online] Vishay BCcomponents (Datasheet) Available at: <http://dsp.rice.edu/sites/dsp.rice.edu/files/ntcle100.pdf> [Accessed 6 Maio 2015].

Wolfram, 2015. *ECHUN Electronic*. [Online] Available at: <http://devices.wolfram.com/devices/echun-electronic-ecs1030-172-split-core-current-transformer.html> [Accessed 16 Maio 2015].

Young, J.K., 2008. *Untangling the Mesh - The Ins and Outs of Mesh Networking Technologies*. [Online] Available at: http://www.digi.com/pdf/wp_untanglingthemesh.pdf [Accessed 20 Junho 2015].