

A Nossa
Universidade

Colégio dos Jesuítas
Rua dos Ferreiros - 9000-082, Funchal

Tel: +351 291 209400
Fax: +351 291 209410
Email: gabinetedareitoria@uma.pt

DM

Projecto de Gestão de Energia do Edifício da Penteada
na Universidade da Madeira
Adriano Gonçalo Lopes da Silva Freitas



Projecto de Gestão de Energia do
Edifício da Penteada na Universidade da Madeira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Adriano Gonçalo Lopes da Silva Freitas
MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA


UNIVERSIDADE da MADEIRA
A Nossa Universidade
www.uma.pt

Abril | 2013

DIMENSÕES: 45 X 29,7 cm
PAPEL: COUCHÊ MATE 350 GRAMAS
IMPRESSÃO: 4 CORES (CMYK)
ACABAMENTO: LAMINAÇÃO MATE

NOTA*

Caso a lombada tenha um tamanho inferior a 2 cm de largura, o logótipo institucional da Uma terá de rodar 90°, para que não perca a sua legibilidade/identidade.

Caso a lombada tenha menos de 1,5 cm até 0,7 cm de largura o layout da mesma passa a ser aquele que consta no lado direito da folha.



Projecto de Gestão de Energia do Edifício da Penteada na Universidade da Madeira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Adriano Gonçalo Lopes da Silva Freitas

MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA

ORIENTATION

Fernando Manuel Rosmaninho Morgado Ferrão Dias



Centro de Competências das Ciências Exactas e da Engenharia

Tese

Projecto de Gestão de Energia do Edifício da Penteada na Universidade da Madeira



Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Informática

Orientador: Professor Doutor Morgado Dias

Realizado por: Adriano Gonçalo Lopes da Silva Freitas

Funchal, 15 de Abril de 2013

ABSTRACT

Today, the management of energy resources is increasingly seen as one of the major challenges of humanity. With the successive increase in the cost of energy in Portugal, it is essential to monitor and take necessary and important actions for the effective reduction of energy consumption.

This master thesis describes the development and testes the monitoring energy system at the building of Penteadá at the University of Madeira, using low-cost generic components and open source software for its implementation and use does not represent additional costs.

In this work is made the monitoring energy consumption in the building of Penteadá at the University of Madeira, through the installation of multiple current sensors at strategic points, where passes the totality of energy consumed in order to collect the energy consumption in the building and use them to construct a data base for future reference, contributing to compare the intake at different times and obtain a saving in terms of costs and power consumption.

We resorted to the mbed microcontroller to do the processing and delivery in real-time the data obtained through the current sensors, and the microchip CAN (Controller Area Network) to create a physical network to support the sending of data between various microcontrollers mbed and the computer (with the database).

KEYWORDS

Energy monitoring system, building energy consumption, Sensors, CAN Bus, mbed

RESUMO

Hoje em dia a gestão dos recursos energéticos é considerada cada vez mais como um dos principais desafios da humanidade. Com o aumento sucessivo do custo da energia em Portugal, é essencial monitorizar e tomar as acções necessárias e importantes para a redução efectiva dos consumos energético.

Esta tese de mestrado descreve o desenvolvimento e o teste de um sistema de monitorização de energia no edifício da Penteada da Universidade da Madeira, usando componentes genéricos de baixo custo e *software* aberto, para que a sua implementação e uso não represente custos adicionais.

Neste trabalho é feita a monitorização dos consumos energéticos realizados no edifício da Penteada da Universidade da Madeira, através da instalação de vários sensores de corrente em pontos estratégicos, por onde passa a energia consumida na sua totalidade, de forma a recolher os dados de consumo energético do edifício e usá-los para a construção de uma base de dados para referência futura, contribuindo para comparar os consumos em períodos diferentes e obter uma poupança em termos de custos e consumo de energia.

Recorreu-se ao microcontrolador mbed para fazer o processamento e envio em tempo real dos dados obtidos através dos sensores de corrente, e ao *microchip* CAN (*Controller Area Network*) de forma a criar uma rede física para suportar o envio dos dados entre os vários microcontroladores mbed e o computador (com a base de dados).

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de monitorização de energia, Consumo de energia edifícios, Sensores, CAN Bus, mbed

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os amigos, colegas e professores que contribuíram para a minha formação ao longo destes últimos anos.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Morgado Dias, o reconhecimento pelos ensinamentos dados ao longo do curso, que foram essenciais para o desenvolvimento deste projecto, e a oportunidade para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos que durante estes últimos meses foram fundamentais, pelo seu apoio, sugestões e colaboração.

Um agradecimento especial ao Engenheiro Filipe Santos, Responsável pelo Laboratório de Electrónica e Telecomunicações, pela colaboração e ajuda importante no desenvolvimento deste projecto.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha família, mãe, pai e irmão pelo apoio dado e motivação para atingir esta etapa.

ÍNDICE

Abstract	III
Resumo.....	IV
Agradecimentos	V
Índice.....	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas	XIV
Lista de Abreviaturas e Terminologia.....	XVI
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objectivos.....	3
1.4 Organização.....	4
1.5 Contributos.....	5
Capítulo 2 – Estado da arte.....	6
2.1 Análise da literatura.....	6
2.1.1 A eficácia do feedback na monitorização de energia.....	6
2.1.2 Controlo e monitorização de electrodomésticos baseados num sistema de comunicação através da rede eléctrica.....	7
2.1.3 A aplicação de sistemas de poupança de energia em ambiente doméstico.....	8
2.1.4 Implementação e gestão governamental dos sistemas de monitorização de energia em tempo real, para grandes edifícios na China.....	9
2.1.5 Solução de monitorização de energia sem fios usando Wireless Sensor Networks (WSN)	10
2.1.6 Desenvolvimento de um Sistema de Monitorização Energia para um Edifício.....	10
2.1.7 Sistema de monitorização de energia eléctrica para um Campus usando a Internet...	11
2.2 Trabalhos relacionados	13
2.2.1 Monitorização de Energia num Campus universitário em França.....	13
2.3 Exemplos de sistemas de monitorização comercializados.....	15
2.3.1 Sistemas de monitorização de âmbito doméstico.....	16
2.3.1.1 Efergy e2.....	16
2.3.1.2 Efergy Elite	17
2.3.1.3 MEO Energy	17
2.3.1.4 TED 5000	18
2.3.2 Sistemas de monitorização de âmbito industrial.....	19
2.3.2.1 Acuvim II Three Phase Power Meter	19
2.3.2.2 Dent Instruments ELITEpro SP Recording	20
2.3.2.3 Opto 22 OptoEMU Sensor Energy Monitoring Unit	20
2.4 Sensores de Corrente comercializados.....	23
2.4.1 Sensores de Corrente <i>Solid Core</i>	23
2.4.2 Sensores de Corrente <i>Split Core</i>	24
2.4.3 Sensores de Corrente <i>Clamp-On</i>	25
2.4.4 Sensores de Corrente Flexíveis.....	26

Capítulo 3 – Fundamentos Teóricos.....	28
3.1 Sistemas de Monitorização de Energia.....	28
3.1.1 Constituição e funcionamento.....	29
3.1.2 Vantagens.....	30
3.2 <i>Controller Area Network</i> (CAN).....	30
3.2.1. Funcionamento.....	31
3.1.3 Vantagens do protocolo CAN.....	32
2.2.1.3. Distância	33
3.3 Monitorização trifásica.....	34
Capítulo 4 – Desenvolvimento do Projecto.....	36
4.1 Requisitos.....	36
4.1.1 Requisitos funcionais.....	36
4.1.2 Requisitos não funcionais	36
4.2 Locais de recolha de dados	37
4.3 Opções tomadas.....	38
4.3.1 Protocolo de comunicação	38
4.3.1.1 <i>Controller Area Network</i> (CAN)	40
4.3.1.2 Ethernet	43
4.3.2 <i>Chip</i> de Medição de Energia.....	44
4.3.3 Microcontrolador	47
4.3.4 Sensores de corrente.....	50
4.3.4.1 Sensor de corrente Dent RoCoil mV CT16” (1000A)	53
4.3.4.2 Sensor de corrente SCT-019-000 (0-200A).....	54
4.3.4.3. Sensor de corrente CT801-10 (0.01-80A)	55
4.3.5 Transformador de Potência.....	57
4.3.6 Cabo de ligação.....	58
4.3.7 Fonte de Alimentação	59
4.3.7.1 Dispositivo principal	59
4.3.7.2 Dispositivo de aquisição de dados	60
4.3.7.3 Sensores de Corrente Dent RoCoil mV CT16” (CT-RMV-16-1000-U).....	61
4.3.8 Condicionamento de sinal.....	62
4.3.8.1 Condicionamento do sinal de corrente do sensor SCT-019-000	62
4.3.8.2 Condicionamento do sinal de corrente do sensor CT801-10	64
4.3.8.3 Condicionamento do sinal de tensão.....	65
4.3.9 Comunicação	65
4.3.9.1 SPI (mbed ↔ ADE7758)	65
4.3.9.2 CAN (mbed ↔ MCP2551-E/P)	67
4.3.9.3 CAN (MCP2551-E/P ↔ barramento CAN)	69
4.3.9.4 Ethernet (mbed ↔ router com funcionalidade DHCP).....	70
4.4 Firmware.....	72
4.4.1 Rotina do dispositivo principal.....	73
4.4.2 Rotina do dispositivo de aquisição de dados.....	73
4.4.2.1 Rotina de calibração do ADE7758.....	73
4.4.2.2 Rotina de leitura, cálculo e envio dos consumos	75

4.5 Arquitectura do sistema.....	76
Capítulo 5 - Implementação do Projecto.....	78
5.1 Estrutura Geral	79
5.1.1 Dispositivo principal.....	79
5.1.2 Dispositivo de aquisição de dados.....	80
5.2 Equipamento	81
5.3 Construção dos dispositivos.....	83
5.4 Funcionalidades do sistema.....	87
5.5 Especificações do sistema	87
5.6 Conclusões	87
Capítulo 6 – Resultados Experimentais.....	88
6.1 Calibração.....	88
6.1.1 <i>Offset</i> dos canais de entrada do ADE7758.....	88
6.1.2 Deslocação da fase.....	89
6.1.3 Factores de conversão	91
6.2 Erros de medição.....	91
6.2.1 Valor eficaz da tensão.....	91
6.2.2 Valor eficaz da corrente	92
6.2.3 Potência activa	93
6.3 Montagem e Monitorização	95
Capítulo 7 – Conclusões finais	97
Referências Bibliográficas.....	98
Anexo 1 – Lista de material.....	101
Anexo 2 – Especificações dos Dispositivos	103
Anexo 3 – Layouts PCB.....	105
Anexo 4 - Artigo da Conferência CONTROLO2012.....	109
Anexo 5 – Lista de registos ADE7758.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do sistema de <i>hardware</i> do sistema nacional de monitorização de energia em tempo-real[5]	9
Figura 2 - Estrutura da topologia de <i>hardware</i> do MSBEC [7]	11
Figura 3 - Configuração do Sistema de Monitorização de Energia[8].....	12
Figura 4 - Exemplo de instalação do NCT[8].....	13
Figura 5 - <i>Kit</i> de monitorização de energia eléctrica[16].....	14
Figura 6 - Esquema de funcionamento do <i>kit</i> de monitorização de energia OpenEnergyMonitor[15]	14
Figura 7 - Sistema de monitorização de energia Efergy e2[20]	16
Figura 8 - <i>Software</i> elink oferecido junto com o Efergy e2[20]	16
Figura 9 - Sistema de monitorização de energia Efergy Elite[21].....	17
Figura 10 - Sistema de monitorização de energia MEO Energy e modo de funcionamento[22]..	17
Figura 11 - Sistema de monitorização TED 5000[24]	18
Figura 12 - Acuvim Three Phase Power Meter[25].....	19
Figura 13 - Dent Instruments ELITEpro SP Recording Power Meter[26]	20
Figura 14 - Opto 22 OptoEMU Sensor Energy Monitoring Unit[27].....	20
Figura 15 - Sistema OptoEMU ligado directamente ao pulso de entrada (esquerda) e ligado directamente ao quadro eléctrico (direita).....	21
Figura 16 – Sensores de corrente <i>solid core</i>	23
Figura 17 – Sensores de corrente <i>split core</i>	24
Figura 18 – Sensores de corrente <i>clamp-on</i>	25
Figura 19 - Sensores de corrente flexíveis	26
Figura 20 - Diagrama do funcionamento de um sistema de monitorização simples	29
Figura 21 - Rede CAN[32]	31
Figura 22 - Estrutura de um nó[32]	31
Figura 23 - Monitorização trifásica em sistemas de corrente alternada	34
Figura 24 - Vista lateral da Universidade da Madeira.....	37
Figura 25 - Transceptor CAN MCP2551-E/P[36]	40
Figura 26 - Diagrama de blocos do MCP2551-E/P	41
Figura 27 - Diagrama do MCP2551-E/P.....	42
Figura 28 - Diagrama de ligações para o <i>microchip</i> CAN MCP2551-E/P	43
Figura 29 - Porta <i>Ethernet</i> MAGJACK STEWART CONNECTOR SI-61007-F W/O LEDS.....	43
Figura 30 - Diagrama da Porta <i>Ethernet</i>	44
Figura 31 - Medidor de potência ADE7758	44
Figura 32 - Diagrama de blocos do ADE7758	45
Figura 33 - Diagrama do circuito integrado ADE7758.....	46
Figura 34 - Diagrama de ligações do ADE7758	47

Figura 35 - Microcontrolador mbed NXP LPC1768.....	47
Figura 36 - Diagrama do microcontrolador mbed NXP LPC1768[39].....	48
Figura 37 - Diagrama de ligações para o microcontrolador mbed do dispositivo principal	49
Figura 38 - Diagrama de ligações para o microcontrolador mbed do dispositivo de aquisição de dados	49
Figura 39 - Compilador online do microcontrolador mbed[40].....	50
Figura 40 - Analisador de Potência Chauvin Arnoux Qualistar CA 8332B.....	51
Figura 41 – Alçado do edifício da Penteada da Universidade da Madeira, com a localização dos pontos de medição verificados.....	52
Figura 42 - Sensor de corrente Dent RoCoil mV CT16" (CT-RMV-16-1000-U)	53
Figura 43 - Quadro eléctrico onde vão ser instalados os sensores Dent RoCoil.....	54
Figura 44 - Sensor de corrente SCT-019-000.....	54
Figura 45 - Circuito eléctrico do sensor de corrente SCT-019-000	55
Figura 46 - Sensor de corrente CT801-10	56
Figura 47 - Circuito eléctrico do sensor de corrente CT801-10	56
Figura 48 - Quadro eléctrico parcial.....	57
Figura 49 - Transformador de potência Saber 230V – 2,4VA	57
Figura 50 - Cabo de rede de par entrançado UTP CAT5e	58
Figura 51 - Courette e Calha técnica no edifício da UMa (da esquerda para a direita)	58
Figura 52 - Alçado lateral do Edifício da UMa com as courettes e calhas técnicas assinaladas...	59
Figura 53 - Carregador USB.....	59
Figura 54 - Diagrama da fonte de alimentação para o dispositivo de aquisição.....	60
Figura 55 - Transformador de potência Saber 230V - 2,4VA.....	60
Figura 56 - Transformador vendido em separado para sensores Dent RoCoil.....	62
Figura 57 - Circuito de condicionamento para o sinal de corrente do sensor SCT-019-000	63
Figura 58 - Circuito de condicionamento para o sinal de corrente do sensor CT801-10	64
Figura 59 - Circuito de condicionamento para o sinal de tensão.....	65
Figura 60 - Ligação do barramento SPI entre o ADE7758 e o microcontrolador mbed	66
Figura 61 - Sequência do canal SPI para escrita e leitura de dados do ADE7758.....	67
Figura 62 - Exemplo do byte de leitura do registo AIRMS.....	67
Figura 63 - Ligações utilizadas na comunicação CAN entre as mbed e os MCP2551-E/P	68
Figura 64 - Diagrama temporal de funcionamento do MCP2551-E/P	68
Figura 65 - Ligações utilizadas pelo barramento CAN.....	70
Figura 66 - Caixa e circuito do Barramento CAN	70
Figura 67 - Ligação Ethernet entre a mbed e a porta <i>Ethernet</i>	71
Figura 68 - Fluxograma da rotina dos microcontroladores	72
Figura 69 - Fluxograma da rotina do dispositivo principal.....	73
Figura 70 - Fluxograma da rotina de calibração do dispositivo de medição.....	74
Figura 71 - Fluxograma da rotina do dispositivo de aquisição de dados.....	76
Figura 72 - Arquitectura do sistema de monitorização de energia	76
Figura 73 - Diagrama de blocos geral do sistema de monitorização de consumos.....	79

Figura 74 - Diagrama de blocos do dispositivo principal.....	80
Figura 75 - Diagrama dos dispositivos de aquisição de dados.....	80
Figura 76 - Concepção do layout da PCB no programa NI Ultiboard.....	84
Figura 77 - Componentes soldados no dispositivo principal	84
Figura 78 - Componentes soldados no dispositivo de aquisição de dados.....	85
Figura 79 – Dispositivo principal	86
Figura 80 - Dispositivos de aquisição (1. Limite máximo 1000A; 2. Limitado a 100A; 3. Limitado a 12A).....	86
Figura 81 - Auto-transformador variável monofásico OFICEL	88
Figura 82 - Analisador de Potência com o sensor ligado ao quadro eléctrico ao mesmo tempo que o sensor de corrente do dispositivo de aquisição de dados para efectuar a calibração	89
Figura 83 - Leitura da deslocação de fase introduzida pelo sensor SCT-019-000	90
Figura 84 - Leitura da deslocação de fase introduzida pelo sensor CT801-10.....	90
Figura 85 - Exemplo de instalação dos dispositivos de aquisição de dados.....	95
Figura 86 - Circuito do barramento CAN com todos os dispositivos de monitorização conectados	96
Figura 87 - Interface Web com os consumos energéticos do edifício da Penteada da Universidade da Madeira	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de soluções para o sistema de gestão de energia [3].....	7
Tabela 2 - Comparação de sistemas de monitorização de âmbito doméstico	18
Tabela 3 - Comparação entre os sistemas de monitorização de âmbito industrial.....	22
Tabela 4 - Comparação entre diversos sensores de corrente <i>solid core</i>	24
Tabela 5 - Comparação entre diversos sensores de corrente <i>split core</i>	25
Tabela 6 - Comparação entre diversos sensores de corrente <i>clamp-on</i>	26
Tabela 7 - Comparação entre diversos sensores de corrente flexíveis.....	27
Tabela 8 - Relação entre Baud Rate e distância no protocolo CAN.....	34
Tabela 9 - Descrição dos pins do <i>microchip</i> MCP2551-E/P.....	42
Tabela 10 - Especificações do microcontrolador mbed NXP PLC1768[37].....	48
Tabela 11 - Resultados da medição da corrente nos pontos de medição	52
Tabela 12 - Corrente máxima consumida no dispositivo principal	60
Tabela 13 - Corrente máxima consumida nos dispositivos de aquisição de dados.....	61
Tabela 14 - Valores obtidos na saída do sensor de corrente SCT-019-000.....	63
Tabela 15 - Valores obtidos na saída do sensor de corrente CT801-10.....	64
Tabela 16 - Formato padrão da mensagem utilizada na comunicação entre os dispositivos.....	69
Tabela 17 - Descrição dos elementos utilizados no pacote de dados da comunicação CAN.....	69
Tabela 18 - Formato da mensagem utilizada na comunicação entre o dispositivo principal e o computador.....	71
Tabela 19 - Equipamento utilizado no sistema de aquisição dos dados de consumo energético.	82
Tabela 20 - Orçamento da construção do sistema.....	83
Tabela 21 - Erro de medição do valor eficaz de tensão.....	91
Tabela 22 - Erro de medição do valor eficaz da corrente para o sensor CT801-10.....	92
Tabela 23 - Erro de medição do valor eficaz da corrente para o sensor SCT-019-000	92
Tabela 24 - Erro de medição do valor eficaz da corrente para o sensor CT-RMV-16-1000-U.....	93
Tabela 25 - Erro de medição da potência activa para o sensor CT801-10 (PF = 1).....	94
Tabela 26 - Erro de medição da potência activa para o sensor SCT-019-000 (PF = 1)	94
Tabela 27 - Erro de medição da potência activa para o sensor CT-RMV-16-1000-U (PF = 1).....	94
Tabela 28 - Especificações dos dispositivos do sistema de monitorização	103
Tabela 29 - Especificações do dispositivo principal	104

LISTA DE ABREVIATURAS E TERMINOLOGIA

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
APCF	<i>Active Power Calibration Frequency</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
AREAM	Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Code</i>
DIP	<i>Dual In-Line Package</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
ECU	<i>Electronic control unit</i>
EEM	Empresa de Electricidade da Madeira
EMD	<i>Energy Monitoring Device</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
KNX	Norma aberta para todas as aplicações de domótica
MSBEC	<i>Monitoring System of Building Energy Consumption</i>
PPDA	Planos Promoção do Desempenho Ambiental
PPEC	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PF	<i>Power Factor</i>
ROI	<i>Return On Investment</i>
RT	Regulamento Tarifário
SQL	<i>Structured Query Language</i>

UMA *Universidade da Madeira*

USB *Universal Serial Bus*

VARCF *Reactive Power Calibration Frequency Logic Output*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo introduz-se o trabalho e a respectiva contextualização com o tema escolhido. São apresentados os motivos que levaram à realização da dissertação e são enunciados os objectivos do trabalho. No final do capítulo é descrita a organização da tese e são enumerados os contributos deste projecto para esta área de Gestão de Energia.

1.1 Contextualização

Para promover um consumo responsável da energia e minimizar os impactes ambientais associados, é necessário conhecer como é consumida a energia, em cada tipo de utilização e face às condições externas que influenciam as necessidades de energia para climatização, iluminação e outros usos. A base para obter um conhecimento detalhado e útil sobre a utilização de energia é a monitorização.

Apesar da aposta nacional e regional em várias formas de produção de energias renováveis (energia eólica, energia solar, entre outras), é cada vez mais importante encontrar formas de aumentar a eficiência energética nos edifícios, não só em termos construção, mas também através de medidas simples, que não precisam de um investimento elevado, como é o caso dos sistemas de monitorização de energia.

Neste trabalho de mestrado foi feita investigação e colocado em prática o método adequado, que foi testado em laboratório e por sua vez, redimensionado para servir as necessidades de medição dos consumos energéticos do edifício da Penteada da Universidade da Madeira, através do desenvolvimento de um sistema de monitorização de energia eléctrica. O *hardware* escolhido tem em conta a dimensão do edifício, as necessidades de medição, assim como a possibilidade de actualizações futuras de forma a fornecer mais informação sobre os consumos energéticos nos diferentes pontos de medição.

Um dos objectivos fundamentais, inerentes a este projecto, é monitorização dos consumos de electricidade, aplicada ao edifício da Universidade da Madeira, na Penteada, que inclui a recolha de dados, as comunicações, o armazenamento e o tratamento da informação, de forma a produzir indicadores de utilização dos consumos de energia por sector, que permitam comparar consumos de períodos homólogos, considerando as diferentes condições externas ao longo do dia e do ano que

influenciam as necessidades de climatização e de iluminação, bem como os diferentes tipos de ocupação do edifício em função do calendário escolar. Para atingir esse objectivo é necessário criar uma rede de dados adequada para a dimensão do edifício, sensores de corrente adequados para a quantidade de energia que passa pelo contador trifásico, usar componentes genéricos de baixo custo e consumo de forma a desenvolver uma solução económica, conhecer os pontos de medição e as limitações do *hardware*.

Os sensores de corrente eléctrica são responsáveis pela medição da quantidade de energia que está a passar em cada fase do quadro eléctrico, sendo necessário medir as três fases para obter o valor total de energia eléctrica que está a ser consumida num determinado momento. Existem vários tamanhos de sensores, que variam em função do valor máximo de corrente em Amperes que pode medir.

A escolha deste tema de estudo deve-se à necessidade global de criar um sistema de monitorização que atenda às necessidades de um grande edifício, que tem como objectivo descobrir em tempo real a quantidade de energia consumida, para depois guardar numa base de dados, para análise futura. A partir desta informação pode ser analisado ao pormenor o consumo energético do edifício, para poder aplicar medidas eficiência energética e depois saber quais foram as medidas aplicadas que trouxeram mais ganhos na redução real em termos de consumo de energia, assim como no preço da factura.

Este projecto enquadra-se nos objectivos das políticas regionais e nacionais de melhoria da eficiência energética em edifícios, em particular no âmbito do Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios [1], bem como nos objectivos das iniciativas comunitárias para a redução das emissões de dióxido de carbono, como o Pacto das Ilhas e o Pacto dos Autarcas (Covenant of Mayors), a que a Região Autónoma da Madeira e o Município do Funchal aderiram em 2011.

1.2 Motivação

A energia é um bem fundamental para o desenvolvimento, conforto e qualidade de vida do ser humano. Infelizmente, os meios actuais de produção de energia não são infinitos, nem a capacidade actual de produção de energia é ilimitada. Daí, ser necessário encontrar uma forma de consumir menos energia e aprender quais devem ser as regras de gestão necessárias a seguir para evitar desperdícios ou consumir energia de uma forma mais poupada. Embora o trabalho de dissertação seja da área de Engenharia Informática, este projecto é motivante pois é uma questão de elevada importância, tendo um enorme impacto sobre a vida das pessoas em geral,

pretendendo-se contribuir na construção de um sistema de monitorização barato e simples de operar, para diminuir em geral com o desperdício de energia, assim como para se obter um planeta melhor.

Actualmente já existem diversos sistemas de monitorização de energia, mas têm um problema: estão dimensionados para o sector doméstico ou possuem diversas limitações (os sistemas de monitorização de edifícios). Daí este projecto ter como propósito criar um sistema de monitorização de energia, capaz de ajudar na optimização do consumo de energia eléctrica.

É cada vez maior a preocupação dos governos em procurar formas alternativas de produzir energia eléctrica, mas com as restrições orçamentais actuais ou devido ao retorno do investimento levar vários anos a acontecer, tem motivado o desenvolvimento de projectos de investigação nesta área para fornecer boas soluções. É um desafio pessoal contribuir para o desenvolvimento técnico dos sistemas de monitorização de energia eléctrica, podendo conjugar, desta forma, a experiência adquirida no trabalho de investigação com a melhoria da consciência energética.

1.3 Objectivos

Esta tese de mestrado surge no âmbito do desenvolvimento de um projecto cujo objectivo é construir um sistema de monitorização de energia a aplicar no edifício da Universidade da Madeira, na Penteada. O projecto de gestão de energia do edifício da penteada na Universidade da Madeira está dividido em duas partes, sendo a primeira parte, a construção de uma plataforma de *hardware* capaz de enviar os dados dos consumos obtidos através dos sensores de corrente para uma base de dados MySQL, e a segunda parte, o desenvolvimento de uma interface web que mostra os dados de consumo energético e as variáveis ambientais (luminosidade, temperatura e humidade), analisa os dados obtidos através comparação com períodos homólogos e emite alertas sempre que se verifiquem situações anómalas.

O presente trabalho visa a primeira parte do projecto, ou seja, a construção de sistema de monitorização capaz de vigiar os consumos de energia eléctrica realizados no edifício da Universidade da Madeira. A segunda parte do projecto está a ser desenvolvida pelo aluno do Mestrado em Engenharia Informática, António Carvalho.

Os objectivos desta tese de mestrado são os seguintes:

- Conhecer as tecnologias associadas aos sistemas de monitorização de energia;
- Estudar e escolher componentes genéricos de baixo custo, que permitam o uso de *software* aberto, e não representem custos adicionais;

- Projectar e construir um sistema capaz de medir em tempo real os consumos de energia eléctrica do edifício;
- Determinar a melhor configuração para as tecnologias utilizadas na implementação de sistemas de monitorização de energia, que permita suportar a monitorização em edifícios;
- O sistema deve permitir guardar os dados de energia medidos numa base de dados MySQL;
- Ajudar o responsável de gestão do edifício a tomar decisões, de forma a otimizar e reduzir os consumos de energia eléctrica.

1.4 Organização

Esta tese está organizada em 6 capítulos (Introdução, Estado de arte, Fundamentos teóricos, Desenvolvimento do projecto, Implementação do projecto e Conclusões finais), Referências e Anexos.

No capítulo 1, Introdução, é feito um enquadramento sobre o tema, realçando a necessidade do uso de sistemas de monitorização de energia eléctrica para a redução nos consumos eléctricos.

No capítulo 2, Estado de arte, são apresentados a literatura relacionada com o tema, trabalhos relacionados e é feita uma análise comparativa entre diferentes soluções de monitorização de consumos energéticos e diversos tipos de sensores de corrente.

No capítulo 3, Fundamentos Teóricos, é apresentado a constituição, funcionamento e as vantagens de um sistema genérico de monitorização de consumos energéticos. Também é apresentado o protocolo CAN (*Controller Area Network*) e ainda como funciona a monitorização trifásica.

No capítulo 4, Desenvolvimento do Projecto, é apresentado os requisitos funcionais e não funcionais do projecto, onde será feita a recolha dos dados de consumos energéticos, as opções tomadas a nível de hardware e protocolos de comunicação, como é realizada a alimentação do circuito, o condicionamento do sinal, modo de funcionamento da comunicação implementada nos dispositivos, detalhes do *firmware* e a arquitectura do sistema.

No capítulo 5, Implementação do Projecto, é apresentada a estrutura geral do sistema de monitorização de energia eléctrica, o equipamento principal utilizado para construir o sistema, o orçamento com o custo estimado de desenvolvido do projecto,

passos necessários para construir os dispositivos, funcionalidades, os requisitos alcançados, a avaliação do projecto e a conclusão da implementação.

No capítulo 6, Conclusões, é feito o balanço geral do projecto realizado, realçando os pontos mais importantes e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros nesta área.

Nos anexos 1, 2, 3 e 4 são incluídos, respectivamente, a lista de material utilizado para a construção do sistema de monitorização de energia, os *layouts* das PCBs, o artigo publicado na conferência CONTROL02012 e a lista de registos do *chip* ADE7758.

A construção do sistema foi realizada no Laboratório de Electrónica e Telecomunicações, do edifício da Penteada na Universidade da Madeira.

1.5 Contributos

Os contributos originais deste projecto de mestrado de forma geral são os seguintes:

- Desenvolvimento de um sistema de monitorização de energia que pode ser aplicado na maior parte dos edificios e escolas;
- Comparação do sistema com os diversos sistemas de monitorização conhecidos.
- A utilização do barramento CAN num sistema de monitorização de energia.
- Integração dos dados de consumos energéticos do edifício da Universidade da Madeira com os dados de variáveis ambientais (luminosidade, temperatura e humidade) disponíveis numa base de dados.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é feita a revisão do estado da arte relativo a sistemas e processos de monitorização dos consumos de energia eléctrica. Inicia-se com o levantamento de literatura relacionada com sistemas de monitorização de energia usados no contexto doméstico e industrial.

Sendo a escolha da tecnologia e o *hardware* os elementos centrais no processo de construção de sistemas de monitorização de energia, apresentam-se vários trabalhos relacionados e é apresentada uma análise comparativa entre as várias soluções disponíveis no mercado para monitorizar os consumos.

2.1 Análise da literatura

Nesta secção é feito um resumo da literatura relacionada com consumos energéticos e os sistemas de monitorização de energia eléctrica, que servem de base para o desenvolvimento da dissertação.

Como a área da monitorização de energia é uma área que está relativamente no seu início no que diz respeito à monitorização de consumos energéticos no contexto industrial (edifícios e escolas), recolheu-se também informação da aplicação dos conceitos de monitorização de energia em ambiente doméstico.

2.1.1 A eficácia do feedback na monitorização de energia

No artigo com o título original “The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption” [2], a autora começa por mencionar que a maior parte dos consumos de energia em casa são invisíveis ao utilizador. Sendo que a maior parte das pessoas não tem sequer uma vaga ideia sobre quanta energia gastam para realizar diferentes tarefas. Daí, a autora ressalva a importância e eficácia do conhecimento na mudança do comportamento das pessoas, afirmando que esse *feedback* de informação é útil para descobrir (por si próprio) o consumo aproximado de cada electrodoméstico, funcionando com uma ferramenta de auto-aprendizagem.

Segundo a norma de *feedback* directo, é possível obter poupanças entre 5 a 15% na energia consumida. Mas ao usar o histórico dos consumos, a poupança de energia será muito maior, pois poderá consultar as horas de pico e descobrir os gastos em termos de custos, de acordo com o preço da electricidade. [2]

2.1.2 Controlo e monitorização de electrodomésticos baseados num sistema de comunicação através da rede eléctrica

No artigo “Home Appliance Energy Monitoring and Controlling Based on Power Line Communication” [3], é apresentado o desenvolvimento de um sistema remoto de monitorização e controlo de electrodomésticos, que não requer modificações na forma como a casa está construída e tem a vantagem de possuir um custo baixo, consumir pouca energia eléctrica e ser fácil de instalar, substituindo o PC pela construção de um servidor *web* incorporado.

Este sistema, denominado por *remote monitoring and controlling power socket* (RMCPs), segundo os seus autores, consiste em três módulos: o módulo essencial, o módulo de comunicação, através da rede eléctrica – *Power Line Communication* (PLC), e o módulo de detecção (inclui o sensor de luz e temperatura). Permitindo o controlo e monitorização dos electrodomésticos através da Internet, sem necessidade de usar cabos adicionais, simplesmente ao combinar as tecnologias PLC e Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL), sendo esta última responsável por colocar o sistema online, disponível através de qualquer navegador *web*. [3]

Ao longo do artigo é apresentado o circuito do RMCPs, a arquitectura de *software* seguida para o desenvolvimento do sistema e os resultados de implementação, com uma tabela onde são comparadas as tecnologias disponíveis para usar no desenho do sistema doméstico de gestão de energia, incluindo variáveis como a tecnologia de comunicação, servidor *web*, consumo do sistema e dificuldade de instalação, como mostra a imagem abaixo.

	Method 1 [1]	Method 2 [2]	Method 3 [3]	Our design
Communication	RF	PLC	Ethernet	PLC
Home server	X	PC	PC	Embedded
System power consumption	X	156 Watts	156 Watts	5 Watts
Setup	Complicated	Complicated	Easy	Easy
Scale out	Limited	Limited	Limited	Unlimited
Monitoring each socket	X	X	X	Yes
Monitoring total power	X	Yes	X	Yes
Detecting temperature/light	X	X	X	Yes
Remote control software	Local control	Specific software	Specific software	Web browser
Detecting minimum power	X	About 5 Watts	About 5 Watts	About 0.1 Watt

Tabela 1 - Comparativo de soluções para o sistema de gestão de energia [3]

2.1.3 A aplicação de sistemas de poupança de energia em ambiente doméstico

Embora os electrodomésticos consumam cada vez menos electricidade, ainda existem problemas de consumo de energia em ambiente doméstico, daí, haver a necessidade de otimizar a energia consumida, como é apresentado no artigo “Enabling Applicability of Energy Saving Applications on the Appliances of the Home Environment”[4], onde os seus autores apresentam uma arquitectura de rede que pode ser aplicada genericamente nos electrodomésticos que as pessoas geralmente têm em casa, e que permite fazer a gestão em tempo-real do consumo de energia.

Segundo [4], esse sistema é capaz de fornecer em tempo-real o consumo de energia, controlar o uso de energia por parte dos electrodomésticos para que os consumos estejam dentro dos limites definidos pelos utilizadores e, gerir e identificar os electrodomésticos em standby para obter o mínimo consumo possível.

No que diz respeito aos requisitos de comunicação, foi proposto em [4] o uso das últimas tecnologias de comunicação sobre IP através da junção de redes wireless, cabo e power line, e um gateway residencial para juntar toda a informação de consumos energéticos para fornecer os dados aos utilizadores domésticos, operadores de redes de comunicações e empresas de produção de electricidade.

Em [4] os autores começam por categorizar os electrodomésticos em categorias: electrodoméstico em que é possível gerir o consumo de energia instantâneo, electrodomésticos em que o consumo de energia é estável durante o ciclo do programa e electrodomésticos em que o consumo instantâneo ou total não é conhecido. Depois de definir as categorias anteriores, começam por explicar a metodologia usada para calcular a estimativa de consumo de energia. Apresentando mais à frente, duas formas de implementação da comunicação entre os diferentes dispositivos, para enviar o valor dos consumos energéticos do electrodoméstico para o dispositivo de monitorização de energia, conhecido como *energy monitoring device* (EMD). Em que as funções EMD são implementadas apenas em *software*, quando o electrodoméstico vem equipado com a capacidade de comunicar os dados através de uma interface física, tendo a vantagem de não introduzir gastos extra de energia. Caso contrário é necessário recorrer a uma interface power line KNX (o único protocolo padrão aberto no mundo, para a gestão de edifícios residenciais e escritórios) para fazer a comunicação dos consumos. Essa interface fica em modo *sleep* a maior parte do tempo para poupar energia, e só quando o serviço necessita de comunicar é que entra em modo *run*.

2.1.4 Implementação e gestão governamental dos sistemas de monitorização de energia em tempo real, para grandes edifícios na China

O artigo “Government management and implementation of national real-time energy monitoring system for China large-scale public building”[5] descreve os métodos utilizados para monitorizar a energia e sumariza as diversas funcionalidades do sistema de monitorização de energia, que foi implementado como projecto-piloto em três municípios da China (Shenzen, Beijing e Tianjin), de forma a identificar os consumos energéticos dos edifícios e o potencial de eficiência energética.

Segundo [5], a supervisão da eficiência energética em edifícios públicos de escritórios e grandes edifícios públicos, denominado por GOBLPB – *government office buildings and large-scale public buildings*, faz parte das medidas de implementação do governo chinês. O GOBLPB representa cerca de 22% da energia total consumida anualmente a nível nacional, consumindo entre 10 a 20 vezes mais do que um edifício residencial na China, e entre 1.5 a 2 vezes mais que um edifício com as mesmas características na Europa ou no Japão. Por isso, o Ministério da Habitação e Construção Urbano-Rural da China colocou em prática um plano e estatísticas de consumos energéticos e auditorias de energia para supervisionar a eficiência energética em 32 áreas locais (província ou cidade).

Em [5] os seus autores apontam que, para obter melhores estatísticas e poder comparar os consumos com outros edifícios, os edifícios são divididos em categorias, é usado a informação básica sobre o edifício, e é realizada uma investigação e análise temporal (em estações do ano ou anualmente) sobre as diferentes formas de consumo energético (electricidade, gás natural, aquecimento, etc). Depois os dados são publicados em sites governamentais ou sites autorizados, e também na imprensa local.

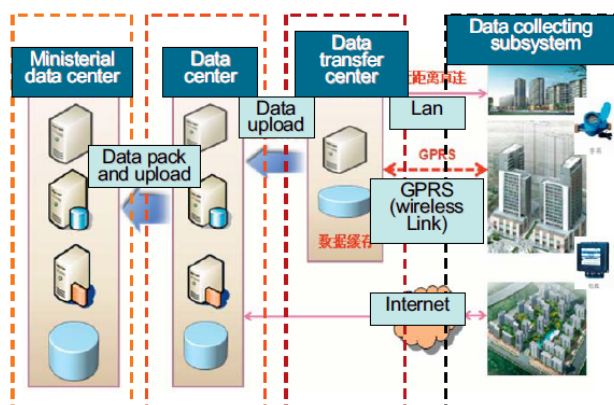


Figura 1 - Esquema do sistema de *hardware* do sistema nacional de monitorização de energia em tempo-real[5]

Através do uso do sistema apresentado na Figura 1 as autoridades locais têm resultados precisos sobre o consumo energético em tempo-real do GOBLP na cidade inteira, obtendo melhoramentos na redução de consumos através das fases de construção e gestão dos edifícios de escritórios do governo e grandes edifícios públicos.[5]

Este tipo de sistemas é de extrema importância, pois apesar de ser enviada uma factura mensal da electricidade com os gastos de electricidade, a mesma não reflecte os consumos em tempo-real. Daí, o sistema de monitorização é importante na tarefa de poupança de energia. Os dados recolhidos são depois classificados em quatro níveis, que são: ao nível ministerial, ao nível provincial, ao nível citadino e o nível do edifício. Onde são usados diferentes atributos para cada nível.[5]

2.1.5 Solução de monitorização de energia sem fios usando Wireless Sensor Networks (WSN)

Através do artigo “Missouri S&T Mote-Based Demonstration of Energy Monitoring Solution for Network Enabled Manufacturing Using Wireless Sensor Networks (WSN)”[6], os seus autores demonstram uma solução de monitorização de energia que faz uso de redes de sensores *wireless* que podem ser instaladas facilmente e eliminar custos desnecessários.

O sistema desenvolvido conta com processamento de 8 bits com baixo consumo, e tem como objectivo a monitorização de energia para reduzir custos com o consumo energético e a monitorização da qualidade dos motores polifásicos para suportar as práticas inteligentes de manutenção. [6]

2.1.6 Desenvolvimento de um Sistema de Monitorização Energia para um Edifício

Com o objectivo de resolver os sérios problemas de eficiência energética em grandes edifícios públicos e governamentais na China, o artigo “Development of Monitoring System of Building Energy Consumption”[7], apresenta um sistema de monitorização de consumos de energia em edifícios, denominado de MSBEC – *monitoring system of building energy consumption*, que não só mede os consumos de energia, como também verifica a qualidade da energia.

Segundo o artigo [7], 4% do espaço ocupado nas cidades chinesas diz respeito a grandes edifícios públicos, que consomem mais de 27% da energia total consumida em toda a cidade. Embora esteja no seu início, o objectivo do MSBED para os grandes edifícios públicos na China, é a monitorização e diagnóstico do consumo de energia de forma a saber a razão real dos consumos excessivos.

Em [7] é abordado o desenho do sistema com três camadas, mostrado na imagem abaixo, que tem como objectivo assegurar a estabilidade do sistema. São usados os modos RS485-TCP/IP e ZigBee-TCP/IP na camada de rede (*Network layer*), para recolher informação através dos módulos de terminal com o protocolo RS485. Sendo que o RS485 bus é simples e estável, ideal para o meio industrial, com distâncias máximas de 1200m entre um nó e o dispositivo, de acordo com os detalhes do protocolo.

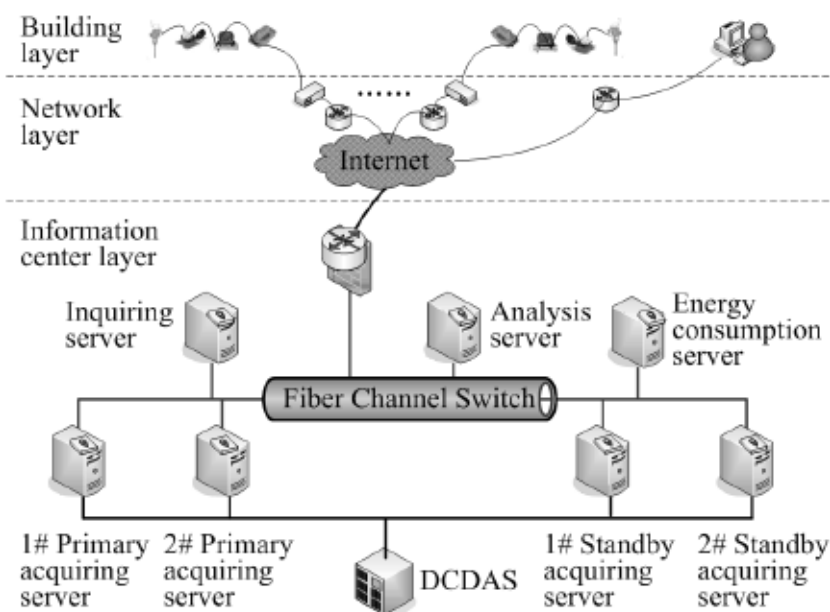


Figura 2 - Estrutura da topologia de hardware do MSBEC [7]

De forma a funcionar de forma ininterrupta, o centro de informação (Figura 2) usa um sistema de energia de *backup*, que é capaz de operar durante duas horas caso haja um problema de energia eléctrica. Onde o servidor de análise (Figura 2) analisa os dados de consumo de energia, e cria relatórios de optimização e oferece suporte técnico para melhorar a eficiência energética. [7]

Para efeitos de medição no sistema de monitorização, em [7] a electricidade do edifício pode ser dividida em quatro tipos, que são: a Iluminação e Electricidade das tomadas, Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), e a área especial de electricidade. Em que o medidor geral de electricidade só pode monitorizar tensão trifásica.

2.1.7 Sistema de monitorização de energia eléctrica para um Campus usando a Internet

No artigo “An Electric Power Energy Monitoring System in Campus using an Internet”, o seu autor começa por mencionar que a energia eléctrica é o recurso base

que suporta a actividade socioeconómica e é indispensável para o desenvolvimento económico continuado. Apesar do uso de tecnologias de inversor para a redução no consumo de energia em fábricas, edifícios, lojas e escolas, é necessário obter dados sobre o consumo corrente, e para isso deve ser desenvolvido um sistema de monitorização de energia.[8]

O sistema apresentado em [8] é composto por um terminal de rede, denominado por Network Computing Terminal (NCT), que é basicamente um PC especial, localizado no sistema de recepção de energia de cada edifício, com o intuito de recolher e supervisionar os dados de electricidade para um servidor de monitorização através da Intranet. Contudo o sistema consiste em dois servidores, o servidor de monitorização e o servidor web, em que a recolha de informação analógica e digital feita pelo sistema (Figura 3) só é possível graças à sincronização das horas usando um sinal GPS (Global Positioning System).

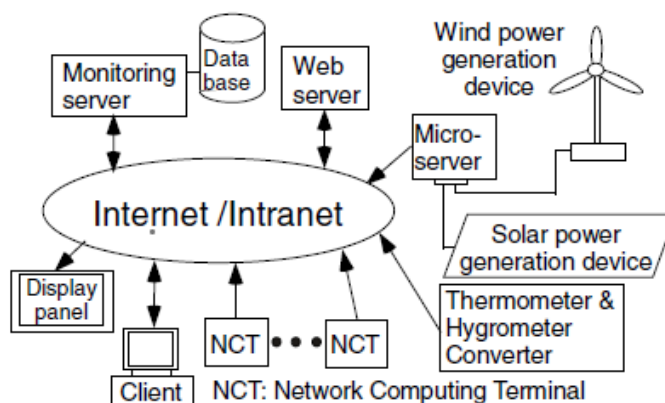


Figura 3 - Configuração do Sistema de Monitorização de Energia[8]

Segundo o autor, o NCT tem as seguintes funcionalidades: medição da tensão e corrente, cálculo da energia activa e energia reactiva, receber os dados mês por mês, transmitir os dados medidos para o servidor de monitorização e criar os gráficos de tendências. O NCT é um dispositivo pequeno com capacidade de medir circuitos com corrente trifásica, como pode ser visto na Figura 4. [8]

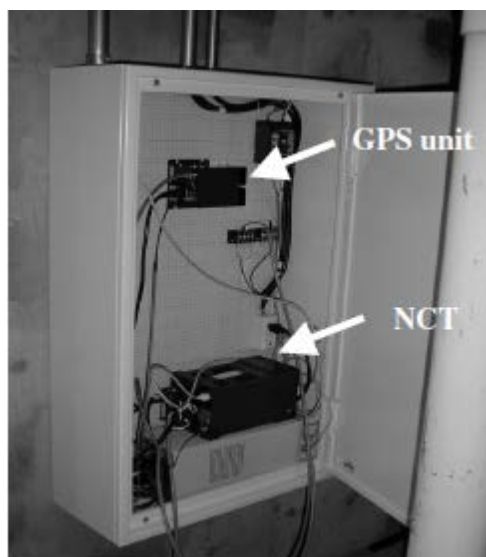


Figura 4 - Exemplo de instalação do NCT[8]

2.2 Trabalhos relacionados

Tradicionalmente a crise na energia foi resolvida através de equipamentos mais eficientes, fontes de energia renovável, e subida do preço[9]. Contudo, nem sempre é possível substituir todos os equipamentos, pois isso implicaria investimentos muito avultados. O uso de sistemas de monitorização de energia pode ajudar no processo de decisão dos tipos de investimentos que devem ser realizados.

Cada vez é mais comum encontrar exemplos de universidades que usam estes sistemas para indicar os gastos com energia, como é o caso da Universidade de Curtin[10] ou da Universidade de McGill (que pretende reduzir o consumo de energia no campus universitário em 12%)[11]. Existem também exemplos de universidades que disponibilizam os seus consumos energéticos online, como é o caso da Universidade do Delaware[12] e a Universidade do Iowa[13].

A área dos sistemas de monitorização de consumos de energia ainda está no seu início. Por isso, a nível académico não é fácil encontrar trabalhos relacionados, especialmente na monitorização de grandes edifícios ou universidades.

2.2.1 Monitorização de Energia num Campus universitário em França

O artigo online[14], aborda a implementação de um sistema de monitorização de energia, no campus universitário da escola de engenharia Telecom Bretagne, localizado em Brittany, na França, é possível ter uma ideia geral sobre o conceito aplicado para o desenvolvimento do sistema, para medir, guardar e analisar os dados de consumo energético do campus.

Devido à existência de muitos produtos com um preço demasiado elevado, o seu autor, Baptiste Gaultier, decidiu recorrer ao *kit* de monitorização de energia desenvolvido pelo projecto OpenEnergyMonitoring[15], de forma a implementar o sistema de monitorização sem fios. Esta solução foi escolhida pois, é uma solução de monitorização poderosa, com interface *web* integrada, permite a conexão à Internet e é *open-source*. [14]

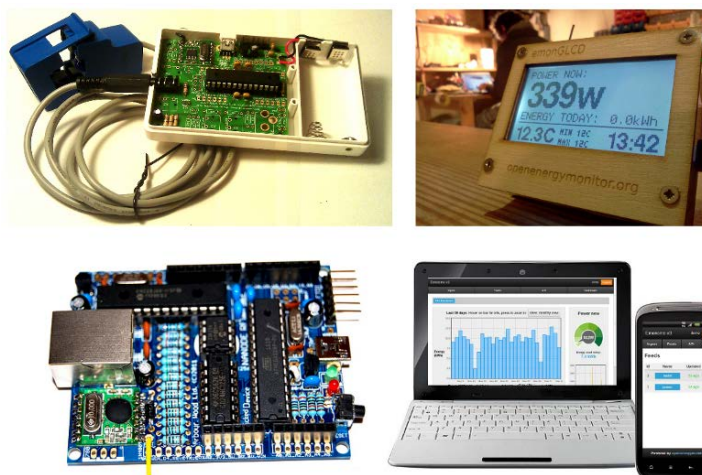


Figura 5 - Kit de monitorização de energia eléctrica [16]

O *kit* de monitorização de energia eléctrica [16] usado (Figura 5) permite a criação de sistemas de monitorização sem fios do consumo energético com um âmbito doméstico ou industrial. Cada *kit* custa 145,69€ na loja online [17], e inclui um sensor de corrente, uma placa emonTx, uma placa NanodeRF e um ecrã emonGLCD. Sendo necessário comprar à parte o cabo Mini-USB, o programador FTDI e os adaptadores de corrente, e soldar os componentes. A forma de funcionamento do sistema é muito simples, como mostra a figura abaixo, existindo uma página de ajuda online [18], onde é possível aprender como criar um sistema de monitorização usando o *kit*.

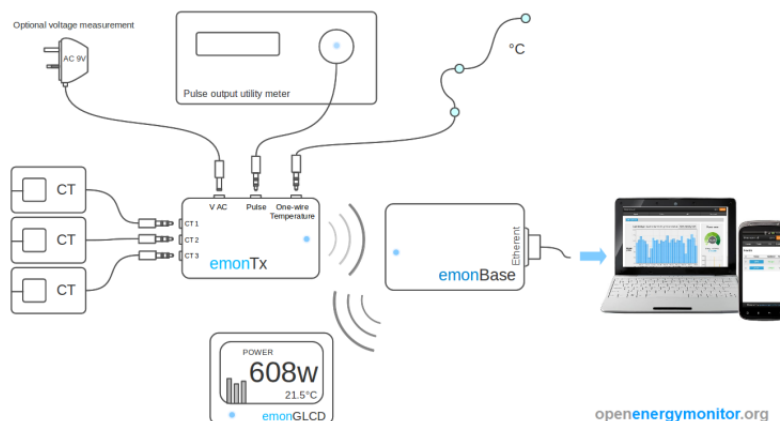


Figura 6 - Esquema de funcionamento do *kit* de monitorização de energia OpenEnergyMonitor [15]

Segundo a informação presente no site do OpenEnergyMonitor[15], o sistema funciona da seguinte maneira:

1. Os sensores de corrente (CT) medem a corrente eléctrica que está a ser consumida em tempo-real e enviam os valores dos consumos para a caixa emonTx.
2. Os dados são processados e enviados para a caixa emonBase. A comunicação é feita através de tecnologia sem fios. É importante ressaltar que são possíveis 3 frequências diferentes dependendo do país: 433Mhz (mundo inteiro), 868Mhz (Europa), 915Mhz (EUA e Austrália).
3. Agora que os dados estão na emonBase, são enviados para o ecrã emonGLCD, através de tecnologia sem fios, e para a Internet (emoncms) através da porta *Ethernet*.
4. O emoncms é a interface *web* (ou *webapp*), onde é possível consultar todos os dados de consumo. Desde visualizar o consumo energético, histórico, processar os dados, possuindo diversas funcionalidades. Podendo ser modificado para atender às necessidades dos utilizadores.

Embora o artigo[14] possua alguma informação relevante sobre o projecto de implementação do sistema de monitorização no campus universitário de uma universidade francesa, não é mencionado a quantidade de material usada e os custos totais de implementação do projecto.

2.3 Exemplos de sistemas de monitorização comercializados

Hoje em dia é possível encontrar vários tipos de sistemas de monitorização de consumo energético que medem o consumo de electricidade parcial ou total. Nos sistemas de monitorização de consumo de electricidade parcial o consumo é medido ao nível do equipamento eléctrico, enquanto nos sistemas de monitorização de consumos totais, a medição dos consumos é feita a nível do quadro eléctrico, sendo este último tipo de sistemas comercializados, os que interessam para este projecto de gestão de energia.

Os sistemas de monitorização ao nível do quadro eléctrico usam sensores de corrente, normalmente são transformadores de corrente *split core*, que podem ser ligados facilmente ao quadro eléctrico da habitação ou edifício, onde se quer medir o consumo de energia. Estes sensores têm a vantagem de não necessitar interromper o circuito para ser instalados, enviando os dados dos consumos eléctricos para uma placa ou caixa que faz o processamento dos dados medidos e envia os dados através de

tecnologia sem fios ou *Ethernet*, para um visor ou PC, mostrando neste último caso, os consumos numa interface *web* ou *software*.

Para desenvolver um sistema eficaz e pelo menos com as funcionalidades mais importantes, foi necessário estudar todos os sistemas de monitorização de energia que são comercializados. De forma a obter um conhecimento amplo nesta área, foram analisados os sistemas de âmbito doméstico e industrial.

2.3.1 Sistemas de monitorização de âmbito doméstico

2.3.1.1 Efergy e2



Figura 7 - Sistema de monitorização de energia Efergy e2 [20]

O sistema Efergy e2, ilustrado na Figura 7 é desenvolvido pela empresa especialista em sistemas de monitorização domésticos, Efergy. Este *kit* é constituído por um sensor de corrente, um transmissor sem fios e um ecrã para visualização dos dados de consumo eléctrico, sendo possível comprar sensores de corrente para valores mais elevados.



Figura 8 - Software elink oferecido junto com o Efergy e2 [20]

Este sistema permite o acompanhamento instantâneo, diário, semanal ou mensal do consumo eléctrico, calculando ainda o custo financeiro da energia consumida, de acordo com diferentes tarifários. Além do monitor, onde é possível visualizar toda essa informação, vem com o *software* eLink (Figura 8), que permite descarregar os dados do monitor Efergy para o computador através do cabo USB, permitindo uma gestão mais eficaz dos consumos, obtendo gráficos e curvas dos consumos.[20]

2.3.1.2 Efergy Elite



Figura 9 - Sistema de monitorização de energia Efergy Elite[21]

O *kit* Efergy Elite, mostrado na Figura 9, é desenvolvido pela mesma empresa do *kit* anterior, a Efergy. Tal como o Efergy e2, este sistema é constituído por um sensor de corrente, um transmissor sem fios e o ecrã de visualização dos consumos, sendo possível comprar sensores de corrente para valores mais elevados. No entanto, não permite a ligação com o PC, fazendo o armazenamento dos dados dos consumos eléctricos no visor LCD.

2.3.1.3 MEO Energy



Figura 10 - Sistema de monitorização de energia MEO Energy e modo de funcionamento[22]

O *kit* MEO Energy foi recentemente lançado pela MEO em parceria com ISA, no sentido de prestar informação sobre consumos energéticos na TV, através da *powerbox* MEO. O *kit* inclui o transmissor sem fios, sensor de corrente, mostrador digital LCD e o dispositivo iMeterbox, que recolhe dados e faz a ligação ao *router* MEO.

Este sistema é muito similar ao iMeter desenvolvido pela ISA, que é baseado no Efergy Elite. A diferença entre este *kit* e o Efergy Elite está na possibilidade de, através do MEO Energy, poder ver os consumos através da TV ou ter acesso aos relatórios detalhados na Internet através do portal Enerbook[23] da ISA.

2.3.1.4 TED 5000



Figura 11 - Sistema de monitorização TED 5000[24]

O sistema de monitorização doméstico TED 5000 é desenvolvido pela empresa Energy Inc, apresentando mais funcionalidades que os sistemas anteriores, daí o seu preço mais elevado. O *kit* é constituído por um sensor de corrente, módulo de visualização e um módulo de leitura da tensão, que deve ser instalado numa tomada eléctrica. Os dados lidos pelos sensores de corrente são enviados para o módulo de visualização através de tecnologia sem fios Zigbee, mostrando diversos dados dos consumos energéticos, conseguindo armazenar os dados durante dez anos.

Sistema	Efergy e2	Efergy Elite	MEO Energy	TED 5000
Gama de tensão	110V – 400V	110V – 400V	110V – 400V	-
Corrente Máxima	95 A	95 A	95 A	100 A
Medição Trifásica	Sim, é necessário comprar sensores	Sim, é necessário comprar sensores	Sim, é necessário comprar sensores	Sim, é necessário comprar sensores
Visor	Sim	Sim	Sim	Sim
Transmissão sem fios	Sim	Sim	Sim	Sim
Ligação ao PC	Sim, através de cabo USB	Não	Não	Sim, através de cabo Ethernet ou router sem fios
Erro de medição	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 2 %
Preço	99€	85€	89€	185€

Tabela 2 - Comparação de sistemas de monitorização de âmbito doméstico

A Tabela 2 mostra algumas das principais funcionalidades e as especificações dos sistemas de monitorização de energia de âmbito doméstico que foram apresentados.

Além dos sistemas anteriormente apresentados, também existem outros a ser comercializados. Por exemplo: iMeter, nPower, Tweet-a-Watt e The Energy Detective. Os sistemas anteriores não foram analisados pois a nível de funcionalidades são iguais ou oferecem menos funcionalidades. Além disso, são menos populares do que as soluções apresentadas.

2.3.2 Sistemas de monitorização de âmbito industrial

2.3.2.1 Acuvim II Three Phase Power Meter



Figura 12 - Acuvim Three Phase Power Meter[25]

O Acuvim II é um sistema de monitorização, desenvolvido pela Accuenergy, podendo ser aplicado no meio comercial ou industrial e está disponível em diferentes versões, com preços entre os 384€ e 615€. O preço não inclui sensores de corrente.

Este sistema permite a medição monofásica e trifásica, podendo medir a tensão (V), corrente (A), a energia reactiva, a energia aparente, a frequência, o factor potência, monitorizar a qualidade da energia, entre outras medidas. Pode ser definido um alarme de acordo em parâmetros (até 16 parâmetros), comunicar os dados através do protocolo RS485 (protocolo standard Modbus) ou usando o módulo *Ethernet*, oferecendo um ecrã onde é possível visualizar os dados vários dados.

Também está disponível (opcional) o módulo de *software*, *web server* e *email*. Os sensores de corrente são opcionais nos sistemas de monitorização de energia eléctrica de âmbito industrial, ao contrário dos sistemas domésticos, pois não é possível estimar qual será o melhor sensor de corrente a usar devido a existirem diferenças grandes nas necessidades entre o meio industrial. Neste sistema é possível usar sensores de corrente *split core*, *clamp-on* e sensores flexíveis, que são mostrados no subcapítulo 2.4 Sensores de Corrente comercializados.

2.3.2.2 Dent Instruments ELITEpro SP Recording



Figura 13 - Dent Instruments ELITEpro SP Recording Power Meter[26]

O sistema de monitorização Dent Instruments ELITEpro SP custa 1160€, e é uma solução portátil e completa para monitorizar o consumo energético. É capaz de medir, guardar e analisar os dados de consumo eléctrico que são derivados dos valores de corrente e tensão obtidos pelos sensores. Permite o uso de sensores de corrente *split core* ou sensores flexíveis *RoCoils* (para grandes cargas ou cabos grandes) para monitorizar a corrente em cada fase.

Este sistema permite monitorização monofásica e trifásica, conseguindo medir até quatro canais de corrente até 6000A, é alimentado através da corrente eléctrica (não necessita de baterias), possui intervalos curtos de gravação dos dados de apenas 1 segundo, tem uma memória não volátil de 8MB que permite guardar dados de consumo energético de vários meses, pode ser ligado ao PC através de conexão USB e visualizar os dados gravados através do *software* para Windows ELOG. Mais informação técnica sobre o sistema pode ser encontrada na Tabela 3 - Comparação entre os sistemas de monitorização de âmbito industrial.

Como acontece com o sistema de monitorização de âmbito industrial analisado anteriormente, o sistema Dent Instruments ELITEpro SP também não inclui sensores de corrente. Além disso, só é compatível com sensores flexíveis Dent Rocoils, semelhantes aos sensores mostrados na Figura 13.

2.3.2.3 Opto 22 OptoEMU Sensor Energy Monitoring Unit



Figura 14 - Opto 22 OptoEMU Sensor Energy Monitoring Unit[27]

O sistema de monitorização Opto 22 OptoEMU custa 1000€, é desenvolvido pela empresa optimum Energy Products LTD., e fornece uma série de funcionalidades úteis

no âmbito industrial, sendo superior às soluções vistas anteriormente. Permite a monitorização do consumo eléctrico de duas formas distintas: conectando ao pulso de entrada ou directamente ao quadro de energia eléctrica.

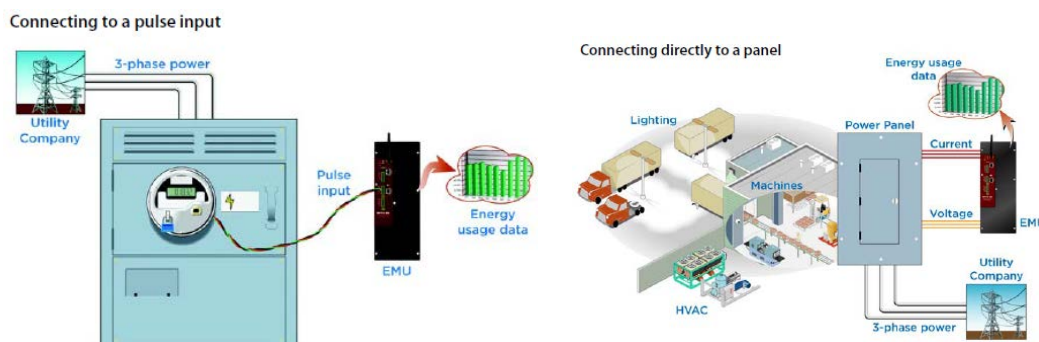


Figura 15 - Sistema OptoEMU ligado directamente ao pulso de entrada (esquerda) e ligado directamente ao quadro eléctrico (direita)

Este sistema permite monitorizar o consumo de energia através de painéis de electricidade, subpainéis de electricidade, equipamento eléctrico (por ex.: *chillers*, *boilers*, compressores, elevadores e unidades de AVAC), permitindo ver os dados de consumo energético em tempo-real ou o histórico de consumos, através da Internet, usando o site Pulse Energy[28]. É compatível com monitorização monofásica e trifásica. Além disso, também permite incorporar os dados no Controlo de estratégia PAC (Programmable Automation Controllers), e outros sistemas de controlo que comunicam através dos protocolos Modbus/TCP ou OPC. Em adição, é possível enviar os dados de consumos energéticos para bases de dados *Structured Query Language* (ex.: MySQL e SQL Server). Mais informações técnicas sobre este sistema podem ser encontradas na Tabela 3 - Comparação entre os sistemas de monitorização de âmbito industrial.

Como acontece com os sistemas de âmbito industrial anteriores, este sistema não inclui sensores de corrente, no entanto, segundo o documento técnico fornecido pelo fabricante, os sensores de corrente devem ter uma saída (*output*) com uma tensão igual a 0.333V. Estão disponíveis vários sensores *split core*, *clamp-on* e sensores flexíveis com as especificações exigidas.

A Tabela 3 mostra algumas das principais funcionalidades e as especificações dos sistemas de monitorização de energia de âmbito industrial que foram apresentados anteriormente.

Sistema	Acuvin II	Dent ELITEpro	Opto 22 OptoEMU
Gama de tensão	100 – 415V	0-600VAC ou 850VDC	220 – 600V
Corrente Máxima	50000 A	0-6000 A (Corrente Alternada apenas)	-
Medição Trifásica	Sim	Sim	Sim
Visor	Sim	Não	Não
Transmissão sem fios	Não	Não	Sim
Ligação ao PC	Sim, através do módulo Ethernet ou porta série RS485	Sim, através de cabo USB	Não
Armazenamento dos dados	Dispositivo ou PC	Dispositivo ou PC	Bases de dados SQL (MySQL e SQL Server)
Erro de medição	0.2%	< 0.2%	± 0.2 V mais ±0.2%
Inclui sensores	Não, são comprados à parte	Não, são comprados à parte	Não, são comprados à parte
Preço	Entre 384€ e 615€	1,160€	1,000€

Tabela 3 - Comparação entre os sistemas de monitorização de âmbito industrial

É de salientar que a maior parte dos sistemas de monitorização de âmbito industrial não inclui no seu preço final os sensores de corrente, ao contrário dos sistemas domésticos comercializados vistos anteriormente. Dependendo do alcance de valores de corrente a serem medidos, o preço praticado na venda dos sensores varia de acordo com o limite máximo de leitura e o tipo (*split core*, *clamp-on*, *solid core* ou flexível). Contudo, é preciso ter em conta que é necessário comprar três sensores de corrente se o objectivo for a medição de quadros eléctricos trifásicos, sem contar que os preços anteriores não incluem portes e taxas alfandegárias (quando o produto vem de fora da Europa).

2.4 Sensores de Corrente comercializados

Actualmente existem diversos tipos de sensores de corrente comercializado por vários fabricantes, que podem ser usados na maior parte dos sistemas de monitorização de energia eléctrica e estão divididos em quatro categorias: *split core*, *clamp-on*, *solid core* ou flexível.

A principal diferença entre cada tipo de sensor reside no seu diâmetro ou “tamanho de abertura”, no entanto os valores máximos de medição de corrente (*input*) e de saída (*output*) variam de acordo com o tipo de sensor, sendo possível afirmar que o valor máximo de leitura está directamente relacionado com o diâmetro do sensor e com o âmbito da sua aplicação.

2.4.1 Sensores de Corrente *Solid Core*

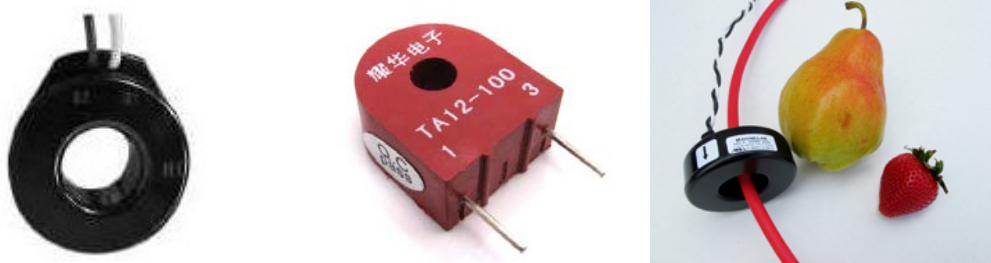


Figura 16 – Sensores de corrente *solid core*

Os sensores de corrente *solid core* são os sensores mais simples, e têm como principal desvantagem não possuir modo de abertura, o que pode ser um problema em instalações eléctricas onde não é possível retirar ou desligar o cabo eléctrico. São normalmente usados em *transceptores*, placas de circuitos, painéis de controlo e motores de gerador, estando disponível sensores com um limite máximo de medição de 2000 amperes. Para o desenvolvimento deste projecto este tipo de sensores não é útil pois requer o corte da energia para poder começar a monitorizar os consumos.

A Tabela 4 mostra algumas das especificações dos sensores de corrente do tipo *solid core* que estão disponíveis. Para apresentar algumas das características foram escolhidos três sensores de corrente com um limite de 100A, 500A e 2000A.

Sensor	AL101 current transformer	BL501 current transformer	CL202 current transformer
Entrada máxima (input)	100A AC	500A AC	2000A AC
Saída (output)	0-5A AC	0-5A AC	0-5A AC
Precisão	1.0 @ 30°C	1.0 @ 30°C	1.0 @ 30°C
Diâmetro de abertura	1.05"	2.06"	3.00"
Preço	32,60€ (aprox.)	37,60€ (aprox.)	75,60€ (aprox.)
Loja Online	http://goo.gl/R6SF1	http://goo.gl/n9Gvm	http://goo.gl/PUqru

Tabela 4 - Comparação entre diversos sensores de corrente *solid core*

2.4.2 Sensores de Corrente *Split Core*

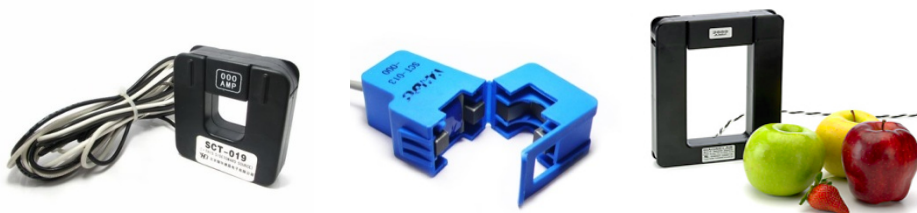


Figura 17 – Sensores de corrente *split core*

Os sensores de corrente *split core* são os mais populares em sistemas de monitorização de energia eléctrica de âmbito doméstico, mas também são amplamente utilizados no meio industrial, sendo útil para medir quadros eléctricos em que o seu valor máximo por fase não ultrapasse os 1200 Amperes (por fase), no entanto é preciso ter em conta o diâmetro do cabo. A principal vantagem é, ser fácil de instalar, não sendo necessário interromper o circuito eléctrico. Basta abrir o sensor e “abraçar” o cabo eléctrico, sendo óptimo para o projecto de monitorização de energia.

A Tabela 5 mostra algumas das especificações dos sensores de corrente do tipo *split core* que estão disponíveis. Foram escolhidos três sensores de corrente, com um limite de 200A, 600A e 1200A.

Sensor	SCT-019-200	MAG SCT-1250-600	MAG SCT-2000-1200
Entrada máxima (<i>input</i>)	200A	600A	1200A
Saída (<i>output</i>)	0-0.333V	0-0.333V	0-0.333V
Precisão	± 1% (10% - 130% do sensor)	± 1% (10% - 130% do sensor)	± 1% (10% - 130% do sensor)
Diâmetro de abertura	0.75"	1.25"	2.00"
Preço	12,20€ (aprox.)	45,00€ (aprox.)	56,30€ (aprox.)
Loja Online	http://goo.gl/gwBYr	http://goo.gl/xmn2l	http://goo.gl/DYHzb

Tabela 5 - Comparação entre diversos sensores de corrente *split core*

2.4.3 Sensores de Corrente *Clamp-On*



Figura 18 – Sensores de corrente *clamp-on*

Os sensores de corrente *clamp-on* são os sensores normalmente utilizados em motores DC, baterias, análise do motor do automóvel, análise na medição de qualidade da potência e monitorização da carga da energia. Devido a funcionarem como se fossem uma pinça, a sua principal vantagem é a facilidade de instalação e flexibilidade. No entanto, a desvantagem destes sensores é o preço, sendo muito mais caros que os sensores *split core* e *solid core*.

A Tabela 6 mostra algumas das especificações dos sensores de corrente do tipo *clamp-on* que estão disponíveis no mercado. Foram escolhidos três sensores de corrente, com um limite máximo de medição de 150A, 1000A e 3000A.

Sensor	Dent COM-0150-U	AEMC SR600 AC	AEMC JM861
Entrada máxima (input)	150A	1000A AC	30A, 300A e 3000A
Saída (output)	2.22 mV/A; 0.333V	1mAAC/AAC	10mA/AAC, 1mV/AAC, 0.1mA/AAC
Precisão	2% para 80A 1% para 80-150A	≤3% + 0.1 ^a para 10A 1.5% para 50A 0.75% para 200A 0.5% para 1000A	2% ± 1mV para 30A 2% ± 0.5mV para 300A 2% ± 0.2mV para 3000A
Diâmetro de abertura	0.8"	2.25"	2.52"
Preço	162,70€ (aprox.)	129,50€ (aprox.)	402,70€ (aprox.)
Loja Online	http://goo.gl/xAY1p	http://goo.gl/dEl6N	http://goo.gl/4Eu2o

Tabela 6 - Comparação entre diversos sensores de corrente *clamp-on*

2.4.4 Sensores de Corrente Flexíveis



Figura 19 - Sensores de corrente flexíveis

Os sensores de corrente flexíveis são os sensores mais utilizados no meio industrial e têm como principal vantagem, a sua flexibilidade, sendo úteis para usar em quadros eléctricos de difícil acesso ou quando os cabos eléctricos estão amarrados entre si, dificultando a medição. Normalmente este tipo de sensores tem um limite de medição muito alto, entre os 200 e 30000 Amperes, devido ao seu âmbito de utilização.

A Tabela 7 mostra algumas das especificações dos sensores de corrente do tipo flexível que estão disponíveis no mercado. Foram escolhidos três sensores de corrente, com um limite máximo de medição de 200A, 1000A e 5000A.

Sensor	AEMC 200-24-1-1 AmpFlex (2112.20)	AEMC 1000-36-2- 1 AmpFlex (2113.00)	Dent RoCoil Flexible CT 16”, 50-5000A AC
Entrada máxima (input)	5-200A	5-1000A	50-5000A AC
Saída (output)	1mV/A	10mV/A 1mV/A	131mVAC/1000A @ 60Hz 110mVAC/1000A @ 50Hz
Precisão	1%	1%	< 1%
Diâmetro de abertura	7.64”	11.46”	16”
Preço	242,60€ (aprox.)	315,70€ (aprox.)	100€ (aprox.)
Loja Online	http://goo.gl/qGY1E	http://goo.gl/dwjnk	http://goo.gl/MchzP

Tabela 7 - Comparação entre diversos sensores de corrente flexíveis

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nos fundamentos teóricos são apresentados assuntos que constituem a introdução teórica ao desenvolvimento de sistemas de monitorização de energia. Este capítulo incide ainda sobre o estudo de algumas das tecnologias de envio e recepção de dados dos sistemas de monitorização e o cálculo do consumo de energia.

3.1 Sistemas de Monitorização de Energia

A monitorização dos consumos é uma área em plena expansão, tendo sido aplicado um conceito eficaz ao longo destes últimos anos nos automóveis, gerando resultados positivos para os condutores. Agora, com a crise económica este tipo de sistemas começa a ter uma procura cada vez maior no sector doméstico e industrial, pois fornece informação detalhada e em tempo-real sobre os consumos, de forma a consciencializar os seus utilizadores para que adoptem certos comportamentos para melhorar a eficiência do consumo energético.

Através do *feedback* do consumo energético[2] é possível identificar o uso inicial de energia e as tendências, de forma a poder reduzir os consumos e criar um plano para melhorar a eficiência energética.

Embora existam algumas soluções de monitorização de energia eléctrica de âmbito industrial, o seu preço é muito elevado, não permitem a personalização de acordo com as necessidades do projecto e não incluem algumas funcionalidades necessárias. Daí, é importante encontrar uma solução excelente, fácil de utilizar e com uma boa relação custo-benefício.

Os sistemas de monitorização são uma boa opção para medir e tratar os consumos eléctricos em tempo-real, assim como para ter uma ideia concreta dos consumos ao longo das últimas semanas, meses ou anos, para ajudar a melhorar eficiência energética do edifício e poder obter ganhos reais de eficiência. Além disso, alguns sistemas podem emitir alertas de consumos para o telemóvel e/ou endereço de correio electrónico, fazer a medição de vários pontos ou disponibilizar os dados na Internet.

3.1.1 Constituição e funcionamento

Como foi visto no Capítulo 2 – Estado da arte, os sistemas de monitorização de energia eléctrica são normalmente constituídos pelos seguintes componentes:

- Sensores de corrente – são usados para a leitura dos sinais analógicos da corrente;
- Microcontrolador – é capaz de fazer o processamento dos dados recebidos pelos sensores de corrente, para depois enviar os dados para uma interface (por ex.: visor LCD com memória não volátil ou interface web com base de dados).
- Interface – é usado um visor LCD portátil ou interface web, onde é possível consultar em tempo real os consumos, ver o histórico de consumos, fazer comparações e obter o preço do custo da electricidade consumida. O visor ou interface web permitem armazenar dados lidos pelo microcontrolador e analisar os históricos dos consumos de energia.

Na Figura 20 é possível ver o exemplo do diagrama de blocos para um sistema de monitorização de energia eléctrica simples.

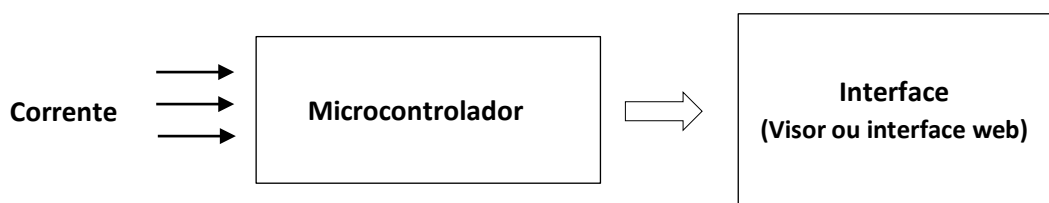


Figura 20 - Diagrama do funcionamento de um sistema de monitorização simples

A leitura da corrente e da tensão é realizada através de sensores de corrente. Este componente “abraça” o cabo no quadro eléctrico, onde é necessário medir os consumos energéticos, enviando para o microcontrolador a quantidade de energia que está a passar no fio nesse preciso momento. Normalmente nos grandes edifícios os quadros eléctricos são trifásicos, o que significa que, é necessário usar três sensores de corrente, um sensor para cada fase, para poder determinar exactamente a quantidade de energia que está a ser consumida.

O microcontrolador é responsável por fazer o processamento dos dados lidos através do sensor de corrente, efectuar os cálculos necessários e depois enviar os dados dos consumos para o dispositivo de armazenamento (visor com memória ou base de

dados), através de comunicação sem fios, USB ou *Ethernet*. É a unidade de processamento central, sendo composto por um processador de baixo consumo.

Na interface, que é normalmente representada por um visor LCD ou *interface web*, é possível verificar em tempo-real os consumos energéticos, ver o histórico de consumos e calcular os custos energéticos.

3.1.2 Vantagens

Como resultado directo da informação sobre os consumos energéticos de pontos importantes do edifício, os sistemas de monitorização de energia têm as seguintes vantagens:

- Financeiras – o conhecimento exacto sobre quais são os equipamentos ou zonas do edifício que consomem mais energia, pode ajudar a definir regras ou estratégias específicas, reduzindo o preço da factura de electricidade no final do mês;
- Política – vai de encontro com os objectivos das iniciativas comunitárias para a redução das emissões de dióxido de carbono, como o Pacto das Ilhas e o Pacto dos Autarcas (*Covenant of Mayors*), a que a Região Autónoma da Madeira e o Município do Funchal aderiram em 2011.
- Ambiental – este tipo de sistemas oferece informação inteligente capaz de minimizar os desperdícios, reportar anomalias e reduzir os consumos energéticos, de forma a reduzir as emissões de dióxido de carbono e o consumo de combustíveis fósseis.

3.2 Controller Area Network (CAN)

O protocolo de comunicação CAN foi desenvolvido durante a década de 80 para aplicações da indústria automóvel com necessidade de funcionamento em tempo-real[32]. “A necessidade de novas soluções para o problema das comunicações dentro dos veículos, tendo como limitação a quantidade de cablagem a utilizar, serviram de motor para o desenvolvimento de uma série de barramentos de campo e protocolos de comunicação, entre os quais o protocolo CAN.” O protocolo CAN foi bem recebido e rapidamente adoptado pela indústria automóvel. A primeira aplicação comercial na indústria automóvel foi introduzida pela Mercedes, no modelo classe S lançado em 1992. Nesta mesma década muitos outros fabricantes se seguiram, abandonando os protocolos existentes ou em desenvolvimento. O CAN veio também a conhecer larga aplicação noutras áreas, ainda na mesma década, como por exemplo no controlo industrial” [32].

3.2.1. Funcionamento

“O protocolo CAN é um protocolo série, com capacidades *multimaster* que segue o paradigma produtor-consumidor e apresenta um elevado desempenho e robustez”[32]. A implementação do protocolo pode ser feita com baixos custos, devido à existência de soluções comerciais desenvolvidas por vários fabricantes e podem ser utilizados vários suportes físicos. Tratando-se de um protocolo série, é utilizado um suporte de transmissão comum sobre o qual estão ligados todos os nós que pertencem à mesma rede[32].

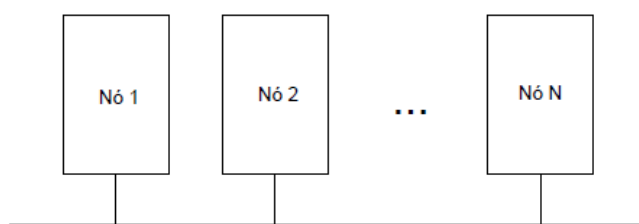


Figura 21 - Rede CAN[32]

De acordo com [32], “a arquitectura conceptual utilizada como referência para este tipo de protocolos inclui apenas três das camadas do modelo de referência ISO/OSI (*Open Systems Interconnection*): a camada física, a camada da ligação de dados e a camada da aplicação, organizadas segundo o diagrama da Figura 22”.

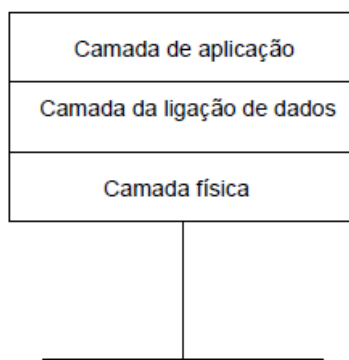


Figura 22 - Estrutura de um nó[32]

Como o próprio nome indica, a camada física codifica e descodifica os bits, faz a temporização, sincronização e controlo as características físicas do barramento[32].

A camada de ligação de dados é responsável pela transferência de informação entre vários pontos da rede, incluindo o encapsulamento/descapsulamento da informação sob a forma de tramas, arbitragem do barramento, detecção, sinalização e limitação de erros[32]. A cada pacote de informação que se pretende transmitir é sempre adicionado um conjunto de informação adicional que contém informação de

remetente, destinatário, verificação de erros e eventualmente outras informações que os diferentes protocolos definem.

Na camada de aplicação são escolhidos os serviços apropriados para cada uma das aplicações. O protocolo CAN define a forma como funciona a camada da ligação de dados, mostra algumas especificações para a camada física, não a definindo completamente, e não se refere à camada de aplicação[32].

3.1.3 Vantagens do protocolo CAN

A decisão de utilizar o protocolo CAN foi tomada em função dos seguintes benefícios:

- Permite criar uma rede de baixo custo simples – O protocolo CAN fornece uma forma de criar uma rede de baixo custo e simultaneamente durável, permitindo que múltiplos dispositivos CAN comuniquem entre si. Uma vantagem resultante é que as unidades de controlo eléctrico (ECUs – *Electronic control units*) podem ter apenas uma interface CAN em vez de inputs digitais e analógicos para cada dispositivo no sistema, o que diminui o custo total e o peso do produto final[33].
- Permite fazer comunicação em modo *Broadcast* – Cada um dos dispositivos na rede tem um chip controlador CAN e por isso, possui alguma capacidade de processamento e decisão. Todos os dispositivos na rede conseguem ver as mensagens transmitidas. Cada dispositivo pode decidir quais as mensagens que são relevantes para o seu nó ou se deve filtrar a mensagem rejeitando-a. Esta estrutura permite realizar modificações nas redes CAN com o mínimo de impacto[33].
- Prioridade - Cada mensagem tem a sua própria prioridade, por isso se dois nós tentarem enviar mensagens simultaneamente, aquele que tiver a mensagem com maior prioridade é o que consegue enviar, enquanto o outro, com menor prioridade, adia a mensagem, voltando a tentar transmiti-la após um período de espera. Este modo de arbitragem é não-destrutivo e resulta em transmissões sem interrupções para as mensagens com maior prioridade. Isto também permite que as redes possam atender às restrições de tempo determinísticas[33].
- Capacidade de Erro – A especificação CAN inclui um Código de Redundância Cíclica (CRC – *Cyclic Redundancy Code*) para implementar a verificação de erros no conteúdo de cada *frame*. *Frames* com erros são desconsideradas por

todos os nós, e a *frame* com erro pode ser transmitida para sinalizar o erro à rede. Erros globais e locais são diferenciados pelo controlador, e se forem detectados vários erros, os nós individuais podem parar de transmitir os erros ou desconectar-se completamente da rede[33].

- Robustez – A robustez do CAN resulta das capacidades de detecção e limitação de erros definidas pelo protocolo. Está prevista a existência de cinco tipos de erros durante a transmissão de mensagens: erro de bit, erro de *stuff*, erro de CRC, erro de forma e erro de confirmação. O erro de bit é detectado por cada nó através de monitorização directa do barramento. Caso o nó envie um bit de determinada polaridade e detecte na rede polaridade diferente da transmitida, identifica a existência de um erro. Esta situação apenas não se verifica no caso do envio de um bit “recessivo” e da monitorização de um *bit* “dominate”. Detecta-se um erro de *stuff* quando se verifica a ocorrência na rede do sexto bit consecutivo da mesma polaridade (deveria ser introduzido um *bit* de *stuff* para evitar esta situação, garantindo a periodicidade das transições na linha de transmissão). Detecta-se um erro de CRC quando a sequência CRC calculada pelo nó receptor não é idêntica àquela enviada pelo nó emissor. Tal disparidade indica a possibilidade de corrupção dos dados enviados. Detecta-se um erro de forma quando ocorrem polaridades ilegais nos bits que compõem os campos de trama, que são constituídos por níveis pré-definidos. Por último, o nó emissor detecta um erro de confirmação quando não monitoriza na rede nenhum bit “dominante” durante o *slot* de confirmação, indicando que nenhum dos nós receptores recebeu correctamente a mensagem[32].

2.2.1.3. Distância

De acordo com o *standard* ISO-11898, que é o *standard* implementado pela camada física do microcontrolador escolhido – MCP2551, a distância física de uma rede CAN depende, acima de tudo, do baud rate aplicado, como mostra a tabela abaixo.

Embora a distância de 30m a 1Mbit/s possa parecer restritiva, especialmente para a construção de soluções industriais, o baud rate de 1Mbit/s pode no entanto ser considerado um exagero para tais aplicações. A maior parte das aplicações de automação pode trabalhar apenas com *baud rates* de 500kbit/s ou até 250kbit/s, incluindo as aplicações de controlo de movimento[34].

No caso deste trabalho, a distância da cablagem CAN pode atingir os 100m. Atendendo à natureza série da ligação, a cablagem tem de percorrer o edifício da forma ilustrada na Figura 24, por isso é necessário ter em conta a velocidade máxima (baud rate) para a distância desejada, de acordo com a Tabela 8.

Baud Rate (kbits/s)	Distância (m)
1000	30
500	100
250	250
125	500
62.5	1000

Tabela 8 - Relação entre Baud Rate e distância no protocolo CAN

A implementação escolhida terá um barramento que fisicamente é composto por um par entrançado (semelhante às ligações telefónicas mais simples). Apresenta como vantagem o facto de ser pouco dispendioso e flexível. O barramento CAN pode funcionar com um mínimo de duas ligações. Neste caso a própria alimentação dos módulos CAN, que são de baixo consumo, será feita através de ligações com o par entrançado.

3.3 Monitorização trifásica

Segundo o artigo disponível *online* [35], em teoria, a monitorização trifásica é tão simples e fácil como ter três sistemas monofásicos, com um sensor de corrente por cada fase, contudo, na vida real é bem diferente. Na maior parte das vezes, as diferentes fases possuem um desfasamento, ou não existe a possibilidade de poder conectar a uma ou mais fases, fazendo com que seja necessário usar três sensores de tensão.

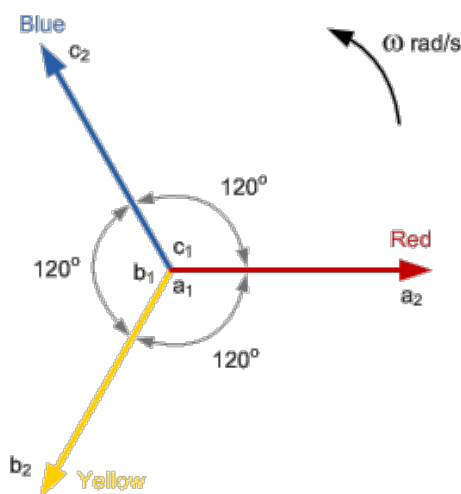


Figura 23 - Monitorização trifásica em sistemas de corrente alternada

Em [35], os seus autores partilham a Figura 23 onde é possível ver que os três vectores de tensão estão sempre desfasados. Partindo deste princípio tem-se que, se for calculado o factor potência da corrente com qualquer outra tensão, obtém-se sempre o valor errado, mas se adicionarmos um desfasamento de 120° então teremos o valor correcto.

Devido às limitações do OpenEnergyMonitor ao nível de medição de consumos energéticos a partir de 3 fases, um dos utilizadores do projecto, que criou um sistema de monitorização de energia para uma universidade francesa usando esta ferramenta *open-source* fornece algumas informações em [35] sobre uma forma simples de calcular os consumos num quadro eléctrico trifásico. A abordagem sugerida é a seguinte:

1. Obter uma forma de onda para a tensão a partir de três ondas;
2. Obter três formas de onda para a corrente (em cada fase);
3. Calcular o desfasamento (i.e. factor potência) para cada uma das três formas de onda de corrente para uma forma de onda de tensão;
4. Enviar o V_{rms1} , L_1 , L_2 , L_3 e o factor potência relativo a cada fase para o emonCMS;
5. Inverter os factores potência para obter a fase errada, e depois compensar em 120° e recalcular o factor potência correcto;
6. Calcular a potência correcta através de $P = L_x \times V_{rms1} \times FP$ correcto

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO

O desenvolvimento e implementação do sistema de monitorização está dividido em diversas fases, dando-se inicialmente maior relevância aos requisitos (funcionais e não funcionais), às opções tomadas, à arquitectura do sistema e os casos de uso do sistema de monitorização de energia do edifício da Penteada da Universidade da Madeira.

4.1 Requisitos

De forma a desenvolver um sistema de monitorização de energia eléctrica de raiz que preencha as necessidades deste projecto de mestrado, os requisitos funcionais e não funcionais do sistema foram levantados, tendo um papel importante nas decisões tomadas.

4.1.1 Requisitos funcionais

- O sistema deve permitir monitorizar 9 pontos e transmitir a informação ao longo de cerca de 200 metros dentro do edifício;
- O microcontrolador deve permitir fazer a gestão da leitura dos sensores de corrente, de forma a obter os consumos com um intervalo de 1 minuto ou menos;
- O sistema deve permitir monitorizar a iluminação comum (corredores), a iluminação e tomadas das salas de aulas, o AVAC e a alimentação geral

4.1.2 Requisitos não funcionais

- Usar componentes genéricos, de baixo custo e *software* livre;
- O *chip* de medição de energia deverá suportar medição trifásica;
- O sistema deve ser capaz de enviar os dados dos consumos energéticos para uma base de dados *MySQL*;
- Deve ser estável e enviar constantemente os dados com um intervalo não superior a 1 minuto para a base de dados;
- O sistema deve possuir uma porta *Ethernet* no microcontrolador principal para enviar os dados do microcontrolador para a Internet ou um servidor local;
- O *hardware* deverá estar numa caixa para protecção das condições exteriores e maior durabilidade;
- Os sensores de corrente devem ter um *output* máximo inferior a 500mV, porque é o limite máximo de leitura da maior parte dos chips de leitura de consumos energéticos;

- O sistema precisa que os sensores de corrente sejam previamente instalados no local de medição;
- A tecnologia ou tecnologias de comunicação usadas devem ter em conta o alcance, velocidade e custo das soluções disponíveis.

4.2 Locais de recolha de dados

O sistema de aquisição de dados relativos ao consumo de energia está espalhado por diversos pontos do edifício. O alçado lateral do edifício da Penteada pode ser visto na Figura 24.

A recolha de dados é feita utilizando um sistema de comunicação que é colocado nas *courettes* e calhas técnicas do piso -3 ao piso 3 do edifício. A zona das *courettes* pode ser identificada como uma coluna que percorre a totalidade do edifício representada com uma grelha mais estreita sobre o lado direito da figura, existindo um outro conjunto de *courettes* no outro extremo do edifício que percorre igualmente os diversos pisos. A comunicação entre pisos pode ser feita utilizando as calhas técnicas que atravessam todo o piso.

A situação ideal para a gestão energética seria poder medir todos os pontos que permitissem recolher informação relevante para a análise e correcção dos consumos. Por exemplo, seria relevante poder medir todos os consumos relativos à iluminação, para analisar como a luminosidade exterior afecta o consumo e verificar o impacto de medidas de redução de consumo relativas a esta área. No entanto, para este edifício, tal implicaria medir as saídas dos circuitos de iluminação nos quadros parciais (cada piso tem 2 quadros parciais), nos laboratórios (cada laboratório tem um quadro parcial), e nas saídas dos circuitos de iluminação gerais (escadas, corredores) o que representa muitas dezenas de pontos de medição.



Figura 24 - Vista lateral da Universidade da Madeira

Após uma análise detalhada dos pontos a medir concluiu-se que seria possível caracterizar o comportamento do edifício da Penteada através da medição dos seguintes pontos:

- Iluminação comum (corredores) – medição trifásica no piso -3, junto da alimentação geral do edifício;
- Iluminação das salas de aulas – recolha nos quadros trifásicos, 10 pontos distintos em 5 pisos;
- Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) – medição trifásica no piso -3, junto da alimentação geral do edifício;
- Alimentação geral – medição trifásica no piso -3, junto da alimentação geral do edifício.

Esta estrutura para o sistema de aquisição de dados implica a monitorização de 39 pontos e a transmissão de informação ao longo de cerca 200 metros dentro do edifício, mostrado na Figura 24 através de uma linha vermelha.

4.3 Opções tomadas

De seguida são apresentadas as decisões tomadas para a implementação do projecto, nomeadamente ao nível de comunicação, do microcontrolador, do *microchip* para envio e recepção de dados entre os microcontroladores e os sensores de corrente.

4.3.1 Protocolo de comunicação

Um sistema de monitorização de energia como este necessita ser pouco dispendioso, sob o risco dos benefícios económicos introduzidos pela monitorização e melhoramento energético serem absorvidos pelo custo associado ao próprio sistema.

Além disso, pretende-se um sistema estável e fiável, com baixos custos de funcionamento para que, uma vez instalado, não seja necessário intervir muitas vezes.

Antes de ser tomada uma decisão foram analisadas diversas alternativas técnicas para transmissão de dados, das quais se destacam os seguintes:

- *Power line* – vantagem: permite transmissão com distâncias relativamente longas. Descartada devido ao custo e à dificuldade em encontrar soluções multiponto; Para implementar este protocolo de comunicação foi encontrada solução ponto a ponto com um preço a rondar os 44€ (Mamba Shield). Também poderia ser implementado recorrendo a uma solução comercial, o kit Devolo

Powerline dLAN, contudo seria necessário o uso também do protocolo LAN e o seu custo seria muito mais alto, com preços a começar nos 99,90€ pelo kit.

- *Wireless* – existindo diversas soluções técnicas de transmissão *wireless* há três obstáculos principais: (i) a substituição periódica de baterias para manter o sistema operacional; (ii) a dificuldade em garantir que a disposição espacial dos diversos elementos existentes nas *courettes* não se altera, impedindo a transmissão de sinal inicialmente verificada; (iii) o número de pontos de transmissão necessários para garantir a transmissão sem perdas de informação num espaço com muitos obstáculos. Para implementar este protocolo a solução mais popular e barata seria o uso do microcontrolador XBee, com preços a rondar os 27€, sendo necessário comprar uma unidade por cada ponto de medição, sem contar com o investimento necessário para garantir que não existe perda de sinal.
- *Ethernet* – protocolo de transmissão sobre fios para redes locais. Vantagem: estável, fiável e com baixos custos de manutenção. Desvantagem: não existem ligações nos pontos onde é necessário recolher informação dos sensores. É uma das soluções mais práticas, sendo que o preço de uma porta Ethernet custa 9€, sem contar com o investimento necessário para a instalação de ligações para permitir a recolha de informação dos sensores.
- *Controller Area Network (CAN)* – tal como a solução anterior trata-se de um protocolo de transmissão sobre fios para redes locais. Apresenta como vantagem o facto de poder ser implementado sobre diversos tipos de meio de comunicação (cabo coaxial, par entrançado, fibra óptica,...) e a existência de muitas plataformas de *hardware* desenvolvidas por diversos fabricantes e de baixo custo. Para implementar o protocolo CAN a solução mais popular é o *microchip* CAN MCP2551-E/P, que custa apenas 1,60€ (no site farnell.com), sendo necessário adquirir dois microchips por cada microcontrolador usado. A ligação dos microcontroladores em barramento CAN não implica um investimento avultado, pois apenas é necessário usar uma resistência entre os *microchip* CAN.

Usar o mesmo protocolo de comunicação nem sempre é viável para diferentes necessidades, por isso, para implementar o sistema de aquisição de dados foi decidido usar dois protocolos de comunicação: o protocolo *Controller Area Network (CAN)* e o protocolo *Ethernet*. O protocolo CAN é usado para o envio e recepção de dados entre os microcontroladores, criando uma rede de microcontroladores usando a topologia em barramento. Enquanto o protocolo *Ethernet* é usado para ligar o microcontrolador

principal a um *router*, com funcionalidade *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP), que por sua vez vai estar ligado a um PC que vai ter uma base de dados MySQL instalada, de forma fazer o envio dos dados de consumo de energia de todos os pontos de medição de cada um dos dispositivos de aquisição de dados para uma única base de dados *MySQL*.

4.3.1.1 *Controller Area Network (CAN)*

A transmissão dos dados de consumo energético entre os vários microcontroladores será feita através de comunicação usando o protocolo CAN. Uma vez que os microcontroladores precisam de enviar e receber dados de outros microcontroladores foi necessária criar uma rede em barramento, daí este protocolo foi escolhido tendo em conta o alcance máximo, a flexibilidade, o baixo consumo e o preço.



Figura 25 - Transceptor CAN MCP2551-E/P[36]

Para implementar a comunicação de dados entre microcontroladores foi escolhido o *microchip* CAN MCP2551-E/P do fabricante MICROCHIP, mostrado na Figura 25, pois oferece uma série de funcionalidades úteis para o projecto, como por exemplo, suporta velocidades máximas de 1Mbps, implementa os requisitos do padrão ISO 11898 da camada física, possui baixo consumo, protecção contra alta tensão, protecção térmica para desligar automaticamente, pode ser conectados até um máximo 112 nós e apresenta imunidade a ruídos devido ao diferencial de implementação de barramento. Pode ser encontrada informação sobre o protocolo CAN e o seu funcionamento no capítulo 3.

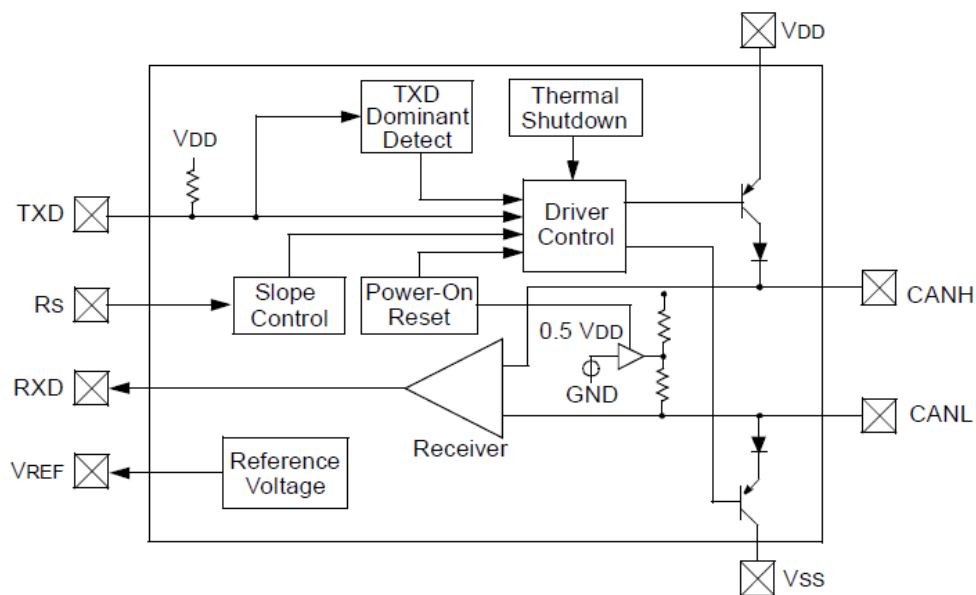


Figura 26 - Diagrama de blocos do MCP2551-E/P

O *microchip* CAN MCP2551-E/P, cujo diagrama de blocos se encontra ilustrado na Figura 26, faz parte da geração de transceptores CAN de alta-velocidade, tolerante a falhas que serve de interface entre o controlador de protocolo CAN e o barramento físico. É totalmente compatível com o padrão ISO-11898, incluindo os requisitos de 24V. Podendo operar em velocidades até 1Mbps e necessita de um sinal de alimentação (no mínimo) de 5V.[36]

Segundo [36], na função de transmissão de dados, o barramento CAN tem dois estados: o dominante e o recessivo. O estado dominante ocorre quando o diferencial de tensão entre CANH (CAN *High-Level Voltage I/O*) e CANL (CAN *Low Level Voltage I/O*) é maior que a tensão definida (por ex.: 1.2V). Enquanto o estado recessivo ocorre normalmente quando o diferencial de tensão é menor que a tensão definida (tipicamente 0V). O estado dominante iniciado por outro nó CAN tem prioridade sobre o estado recessivo no barramento CAN.

Enquanto na recepção de dados, o pin de *output* RXD reflecte o diferencial de voltagem do barramento entre CANH e CANL. Os estados *low* e *high* do pin de output RXD correspondem aos estados dominante e recessivo do barramento CAN.

O pin RS é responsável por fazer o controlo do modo de operação do *microchip* CAN, estando disponível três estados: *High-speed*, *Slope-Control* e *Standby*. No modo *High-speed*, como o próprio nome indica, os drivers de *output* de transmissão funcionam de modo a suportar altas taxas de transmissão no barramento CAN. Enquanto no modo *Slope-Control* os tempos de descida e subida são limitados para o

CANH e CANL, e no modo *Standby* o chip é colocado a “dormir”, onde o transmissor (TXD) é desligado e o receptor (RXD) opera com uma corrente baixa. Neste último caso é possível receber informação, mas a uma velocidade mais baixa.

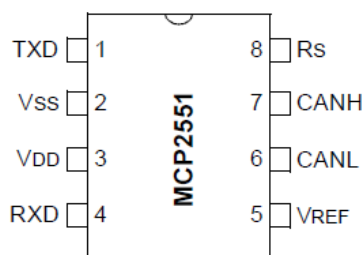


Figura 27 - Diagrama do MCP2551-E/P

As portas CANH e CANL devem ser ligadas entre os *microchip* CAN disponíveis nos microcontroladores, para ser efectuada o envio e recepção de dados. Segundo o fabricante, entre os *microchips* CAN é necessário usar uma resistência de 120 ohms para efectuar a conexão das portas CANH e CANL.

Pino	Nome do Pino	Função do Pino
1	TXD	Transmissão dos dados - <i>Input</i>
2	VSS	<i>Ground (0V)</i>
3	VDD	Tensão (5V)
4	RXD	Recepção dos dados - <i>Ouput</i>
5	VREF	Voltagem de Referência <i>Ouput</i>
6	CANL	<i>CAN Low-Level Voltage I/O</i>
7	CANH	<i>CAN High-Level Voltage I/O</i>
8	Rs	Seleccção do modo de funcionamento

Tabela 9 - Descrição dos pins do *microchip* MCP2551-E/P

Na Figura 28 é possível encontrar o diagrama de ligações do *microchip* MCP2551-E/P, com informação sobre a configuração usada pelos dispositivos.

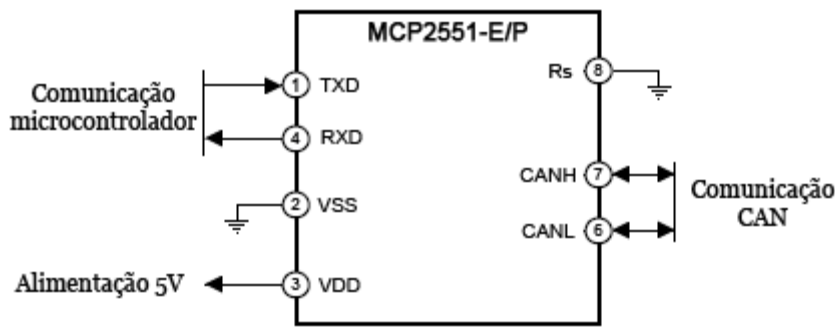


Figura 28 - Diagrama de ligações para o *microchip* CAN MCP2551-E/P

4.3.1.2 Ethernet

Para a transmissão dos dados dos consumos energéticos recolhidos por todos os sensores espalhados pelo edifício da Penteadá, que estão localizados no microcontrolador principal, foi escolhido o protocolo de comunicação *Ethernet*, pois além de ser flexível, fácil de implementar e barato, é o protocolo usado nos PCs e *routers* para a transmissão de dados. Assim, não é necessário recorrer a conversores ou usar componentes caros.



Figura 29 - Porta *Ethernet* MAGJACK STEWART CONNECTOR SI-61007-F W/O LEDs

Foi escolhida uma porta *Ethernet* MAGJACK SI-61007-F sem *LEDs* para implementar o protocolo e permitir a transmissão de dados (dos consumos energéticos do vários pontos de medição) do microcontrolador *mbed* principal para o PC. Esta porta tem uma velocidade máxima de 100Mbit/s e deve ser conectada a um *router* com funcionalidade *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP), através de um cabo de rede de par trançado, para enviar os dados dos consumos energéticos para a base de dados *MySQL* instalada no PC. É necessário um *router* com funcionalidade DHCP, para que seja atribuído automaticamente um endereço IP ao microcontrolador principal. Os dados guardados na base de dados *MySQL* podem ser posteriormente consultados através da *Interface Web* – que é a segunda parte deste projecto.

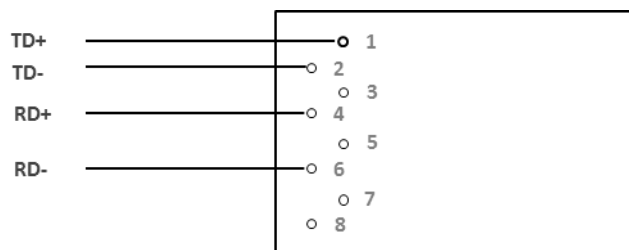


Figura 30 - Diagrama da Porta Ethernet

O diagrama da porta *Ethernet* disponível acima mostra quais os *pins* que devem ser ligados ao microcontrolador mbed, nas respectivas portas (TD+, TD-, RD+ e RD-).

4.3.2 Chip de Medição de Energia

Durante o desenvolvimento do projecto foi necessário definir como seria medida a potência activa a partir de sinais analógicos de tensão e corrente. Depois de estudar e analisar as diferentes soluções para a implementação desta parte do projecto, foi decidido usar um circuito integrado analógico desenhado unicamente para a medição da potência. Pois, além centrar todos os cálculos complexos num só circuito, também ajudou a tornar o projecto mais simples, sem contar que estes componentes são baratos e precisos.

Actualmente é possível encontrar circuitos integrados de mediação dos consumos energéticos de diversas empresas, como é o caso da Analog Devices e da Cirrus Logic. Em todos os dispositivos de aquisição de dados foi utilizado o ADE7758 da Analog Devices (Figura 31), pois é um componente electrónico fácil de usar e um dos poucos que suporta a medição de quadros eléctricos trifásicos. Também foi escolhido pelo suporte oferecido por parte do fabricante e popularidade do circuito integrado no desenvolvimento de sistemas de monitorização de energia para diversos fins.



Figura 31 - Medidor de potência ADE7758

O ADE7758, cujo diagrama é apresentado na Figura 32, faz parte dos novos circuitos integrados com suporte para medição da energia eléctrica trifásica, possui um erro de medição inferior a 0.1% da energia activa, fornece dados de medição

importantes (potência activa, reactiva e aparente, tensão rms, corrente rms), e integra uma interface de comunicação série e dois pulsos de saída (*output*), disponíveis nos pinos 1 e 17 (apresentados na Figura 33) que são usados para a operação e calibração do *chip*.

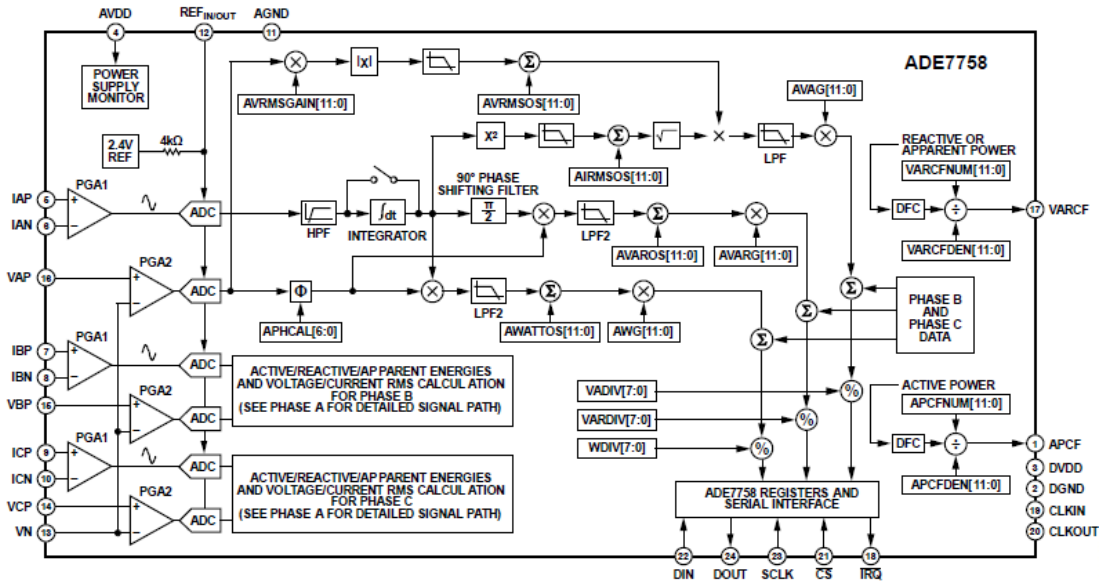


Figura 32 - Diagrama de blocos do ADE7758

Este circuito integrado possui dois tipos de entradas diferenciais destinadas aos sinais de tensão e de corrente, sendo necessário colocar na entrada das portas um valor em tensão. As entradas de corrente estão assinaladas pelas portas I_{AP} , I_{AN} , I_{BP} , I_{BN} , I_{CP} e I_{CN} , enquanto as entradas de tensão estão assinaladas pelas portas V_{AP} , V_{BP} e V_{CP} . Ambas as entradas têm um ganho que pode ser programável (PGA 1 e PGA 2, respectivamente), de 1, 2 ou 4. Neste caso foi escolhido um ganho de 1 para ambas as entradas. Para este ganho, ambas as entradas podem ter um valor máximo de tensão de 1V pico a pico, ou seja, um valor eficaz igual a $1V \div (2 \times \sqrt{2}) = 0,353V$ para ondas sinusoidais. Por isso, foi necessário fazer o condicionamento do sinal para ajustar os valores disponíveis à entrada para os valores padrão do chip de medição de energia eléctrica. O condicionamento dos sinais é descrito detalhadamente na secção 4.3.7.

O ADE7758 é um circuito integrado de alta precisão, de medição de energia eléctrica trifásica, com uma interface SPI e duas saídas de pulso. Incorpora também um ADC Σ - Δ de segunda ordem, um sensor de temperatura, um integrador digital e todos os sinais de processamento necessários para medir a energia activa, reactiva e aparente, e os cálculos RMS. Este circuito integrado é o ideal para medir a energia activa, reactiva e aparente em várias configurações trifásicas, como em quadros eléctricos WYE e DELTA, com três ou quatro fios.

A comunicação com o microcontrolador é feita usando barramento SPI (*Serial Peripheral Interface*), através do qual é possível fazer operações de leitura dos dados de medição dos consumos e dos registos necessários, assim como a escrita dos registos de configuração. A comunicação SPI é realizada através dos cinco pinos de SPI BUS: IRQ (*Interrupt request output*), CS (*Chip Select*), SCLK (*Serial Bit Clock*), DIN (*Data In*), DOUT (*Data Out*).

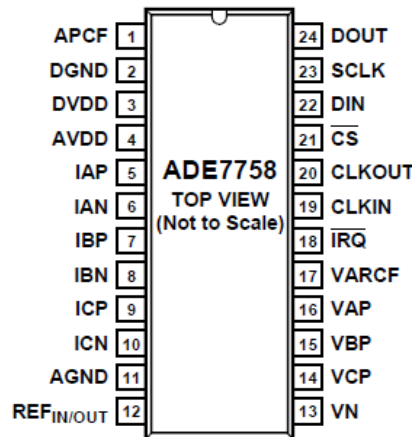


Figura 33 - Diagrama do circuito integrado ADE7758

Este *chip* tem um registo *waveform* que permite o acesso às saídas de ADC. Também tem um circuito de detecção para grandes e pequenas variações de tensão, e detecção de passagem por zero (*zero-crossing*) que está sincronizado com o ponto de passagem por zero da linha da tensão em cada uma das três fases. Esta informação pode ser usada para medir o período de cada um das três entradas de tensão. Graças às funcionalidades oferecidas pelo chip é possível uma calibração mais rápida e precisa ao sincronizar a acumulação de energia com um número inteiro de ciclos de linha. Para calibrar o ADE7758 é necessário usar uma medição de referência ou uma fonte precisa, sendo possível calibrar o *chip* através dos pulsos de saída nas portas de *Active Power Calibration Frequency* (APCF) e *Reactive Power Calibration Frequency Logic Output* (VARCF) do circuito ou através da acumulação de ciclos de linha. Permite ainda a correcção de *offset rms*, calibração de fase e calibração de energia de forma a obter melhores resultados.

O ADE7758 precisa de ser alimentado com $5V \pm 5\%$ DC (AVDD e DVDD) e funciona a uma frequência de oscilação de 10 MHz (CLKOUT e CLKIN). Nestas condições tem um consumo máximo de 13 mA. Este circuito tem a particularidade de fornecer informação da potência instantânea reactiva ou aparente através da saída lógica VARCF e da potência activa na saída lógica APCF. Na Figura 34 está ilustrado o

diagrama de ligações usado para o circuito integrado ADE7758, que indica resumidamente qual o sinal ou função dos principais pinos de entrada e saída.

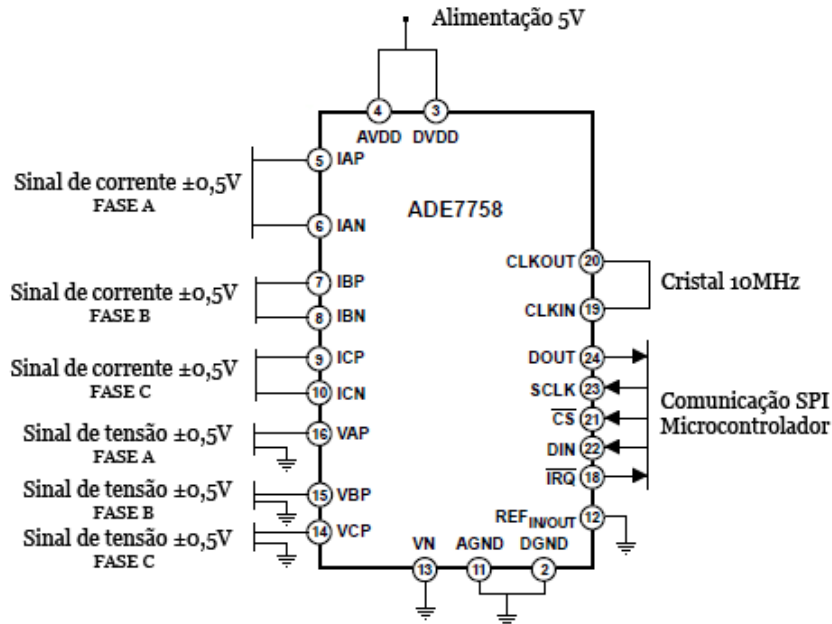


Figura 34 - Diagrama de ligações do ADE7758

4.3.3 Microcontrolador

Para controlar os diversos componentes electrónicos associados ao sistema de monitorização, suportar a comunicação dos dados dos consumos energéticos e dotar o sistema de monitorização de alguma capacidade de processamento, foi escolhido o microcontrolador mbed NXP LPC1768 depois de ser comparado, de acordo com os requisitos necessários, com os diversos microcontroladores existentes no mercado, como por exemplo, o Arduino ou o PIC.

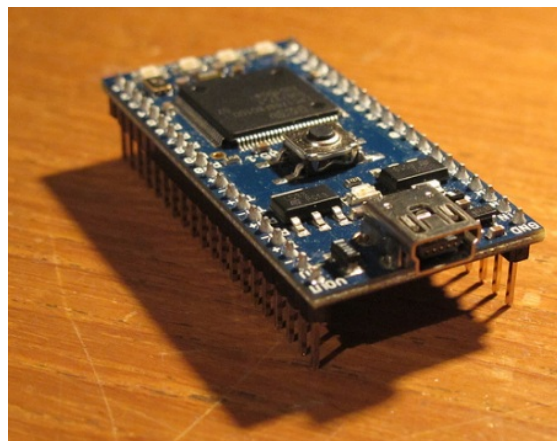


Figura 35 - Microcontrolador mbed NXP LPC1768

Foi escolhido o microcontrolador mbed NXP LPC1768 pois fornece as funcionalidades necessárias para cumprir com os requisitos do projecto de monitorização de energia eléctrica, além de permitir que no futuro seja possível

adicionar mais características ao projecto, fornecendo um espaço de manobra para possíveis actualizações futuras. Este microcontrolador é ideal para prototipagem rápida de diferentes tipos de aplicações, com base no microcontrolador ARM, é indicado para aplicações que necessitam de performance e várias formas de conectividade.

Core	ARM Cortex-M3[38]
Frequência	96MHz
Flash	512Kb
RAM	32Kb
Alimentação	60-120mA (V_{IN})
Fonte	5V (USB) ou 4.5V – 9.0V (aplicado ao V_{IN})
Saída	5.0V (no V_U , se estiver ligado por USB) ou 3.3V (no V_{OUT})
Interfaces	Ethernet, UART, USB Host, USB Device, SPI, I2C, CAN, AnalogIn, PwmOut e AnalogOut

Tabela 10 - Especificações do microcontrolador mbed NXP PLC1768[37]

O microcontrolador mbed dispõe de uma biblioteca C/C++ que oferece interfaces de alto nível, que permitem controlar os diversos periféricos, permitindo uma abordagem orientada à *Application Programming Interface* (API). Suporta as interfaces de comunicação CAN (*pins* 29 e 30, e opcionalmente os *pins* 9 e 10), SPI (*pins* 9 e 10 e/ou 13 e 14) para o chip de medição de energia e *Ethernet* (*pins* 33 a 36, assinalados com as portas TD+, TD-, RD+ e RD-) necessários para a comunicação dos dados, e o desenvolvimento deste projecto. No entanto, também conta com suporte a interfaces serial, USB, UART e I2C, que poderão ser úteis, caso seja necessário aumentar o nível de processamento e dificuldade do projecto num futuro próximo.

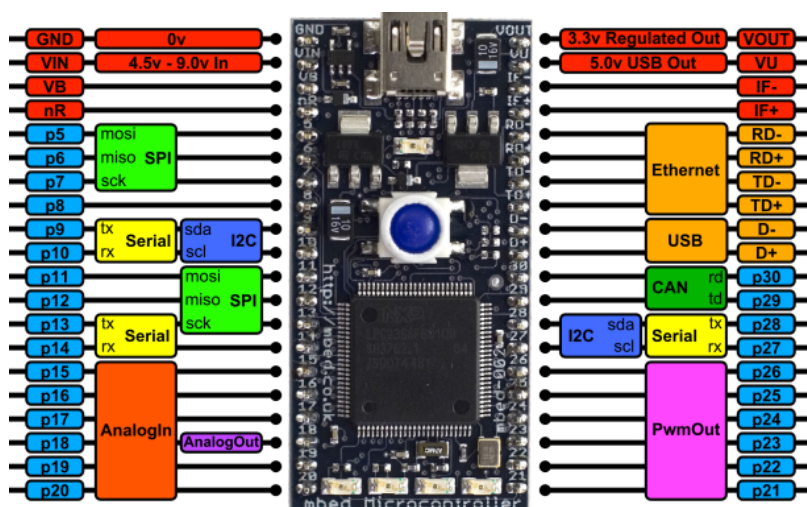


Figura 36 - Diagrama do microcontrolador mbed NXP LPC1768[39]

Devido à complexidade do projecto, e de forma a atender aos requisitos necessários, foi necessário criar dois tipos de dispositivos completamente diferentes, em que ambos utilizam o microcontrolador mbed, para tratar de todo o processamento e envio dos dados, mas que suportam diferentes protocolos de comunicação e têm funcionalidades diferentes no âmbito do projecto. Na Figura 37 é possível encontrar o diagrama de ligações do microcontrolador mbed para o dispositivo principal – responsável por lidar com a recepção de dados usando a interface CAN, tratamento dos dados e envio dados dos consumos energéticos para a base de dados disponível no PC usando a interface *Ethernet*.

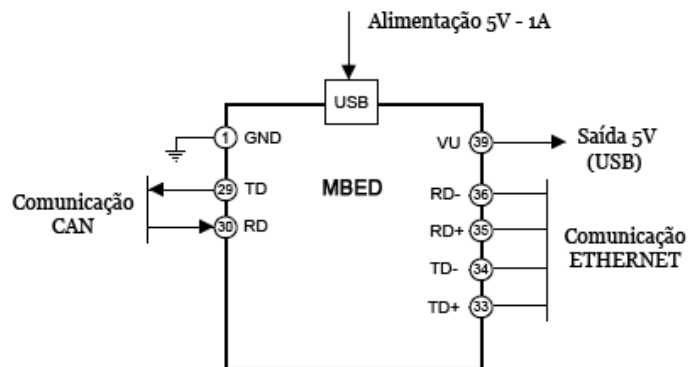


Figura 37 - Diagrama de ligações para o microcontrolador mbed do dispositivo principal

Na Figura 38 é possível encontrar o diagrama de ligações usado para o microcontrolador mbed na construção dos dispositivos de aquisição de dados – responsáveis pela medição dos consumos energéticos, tratamento dos dados, e envio e recepção dos dados dos consumos energéticos através do protocolo CAN.

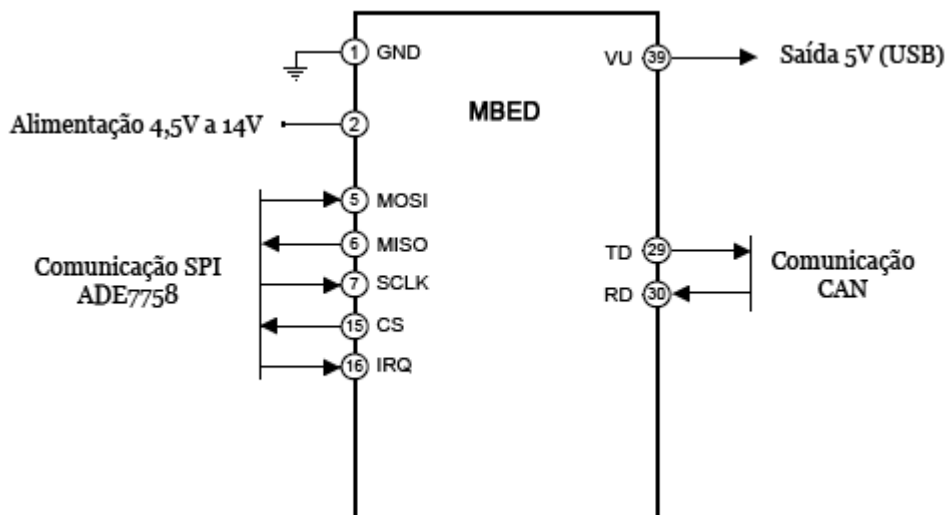


Figura 38 - Diagrama de ligações para o microcontrolador mbed do dispositivo de aquisição de dados

A programação do microcontrolador é feita *online* através do <https://mbed.org/compiler/>, usando linguagem C. Contudo, também existem diversas

maneiras de conseguir programar em ambiente local, sem ser necessário recorrer ao compilador *online*, mas para o bom desenvolvimento do projecto foi decidido usar o compilador online pois fornece alguns benefícios. Algumas das vantagens associadas ao compilador *online* são: possibilidade de guardar um *log* de revisões, obter mais informação sobre os erros (em termos de programação para o microcontrolador), API *online* com informação sobre todas as bibliotecas disponíveis, exemplos de código fornecido por outros utilizadores, possibilidade de partilhar código com a comunidade mbed e compatibilidade com o Windows, Linux e Mac OS - sendo necessária ligação à *Internet*.

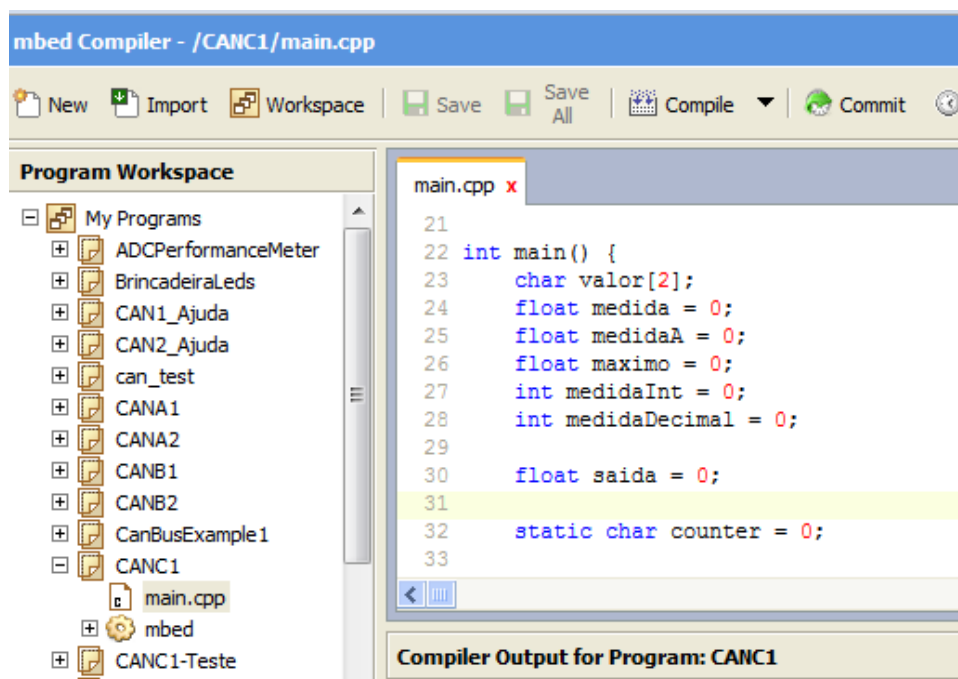


Figura 39 - Compilador online do microcontrolador mbed[40]

Depois de compilado o programa, basta ligar o microcontrolador mbed NXP PLC1768 através da porta USB e “arrastar” o ficheiro (que foi feito download) para o microcontrolador como se tratasse de uma *pen disk*.

4.3.4 Sensores de corrente

A leitura da corrente eléctrica em cada ponto de medição deve ser realizada com recurso a três sensores de corrente, dado que todos os quadros eléctricos são trifásicos. No entanto, antes de escolher quais os sensores de corrente a utilizar nos diversos pontos de medição, foi necessário medir a corrente nos quadros eléctricos a monitorizar, de forma a escolher os melhores sensores de corrente para cada ponto.

A decisão dos sensores a utilizar é extremamente importante pois, se forem utilizados sensores de corrente com um limite máximo de medição baixo (por ex.:

200A) em relação ao valor medido no quadro eléctrico (por ex.: 450A), além de não apresentar resultados correctos, também poderá danificar o sensor. No caso de serem utilizados sensores com um limite máximo de medição muito alto (por ex.: 5000A), para medir quadros eléctricos com consumos muito baixos (por ex.: 10A), o erro introduzido no sistema será elevado e o *chip* de medição de energia não será capaz de medir a corrente com precisão.

Para fazer a leitura da corrente das três fases do quadro eléctrico localizado nos pontos de medição, foi necessário utilizar o analisador de potência, mostrado na Figura 40, que está disponível no laboratório de Electrónica e Telecomunicações. O analisador de potência inclui sensores de 5A, 100A e 1000A, permitindo medir a corrente com o máximo de precisão, de forma a ajudar no planeamento do projecto.



Figura 40 - Analisador de Potência Chauvin Arnoux Qualistar CA 8332B

Os resultados das medições dos quadros eléctricos trifásicos espalhados pelo edifício da Penteada da Universidade da Madeira, que foram obtidos com a ajuda do analisador de potência, são apresentados na

- (1) o AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) encontra-se avariado, no entanto quando em funcionamento tem valores de corrente superiores a 250A

Tabela 11. De forma a ser mais fácil de localizar cada um dos pontos, na Figura 41 é possível verificar a que ponto de medição corresponde cada um dos valores da tabela de resultados.



Figura 41 – Alçado do edifício da Penteada da Universidade da Madeira, com a localização dos pontos de medição verificados

De seguida, são apresentados os valores de corrente eficaz (I_{RMS}) medidos em cada ponto de medição, assinalado na figura acima:

Ponto de Medição	Piso	Descrição	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	-3	Alimentação Geral	355A	420A	340A
2		AVAC ⁽¹⁾	-	-	-
3		Iluminação corredores principais	22,7A	15,4A	15,8A
4	-2	Alimentação e Iluminação Salas	2,3A	4,9A	0,3A
5		Alimentação e Iluminação Salas	2,0A	1,8A	0,6A
6	-1	Alimentação e Iluminação Salas	3,2A	0A	2,1A
7		Alimentação e Iluminação Salas	2,3A	2,8A	1,7A
8	0	Alimentação e Iluminação Salas	0,1A	0,3A	0,2A
9		Alimentação e Iluminação Salas	2,0A	1,7A	0,4A
10	1	Alimentação e Iluminação Salas	3,2A	0A	1,4A
11		Alimentação e Iluminação Salas	1,9A	2,6A	2,7A
12	2	Alimentação e Iluminação Salas	1,3A	0,6A	0,5A
13		Alimentação e Iluminação Salas	3,1A	3,8A	4,2A
14	3	Alimentação e Iluminação Salas	8,7A	2,3A	6,8A
15		Alimentação e Iluminação Salas	0,7A	4,3A	2,9A

(1) o AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) encontra-se avariado, no entanto quando em funcionamento tem valores de corrente superiores a 250A

Tabela 11 - Resultados da medição da corrente nos pontos de medição

Depois de fazer a medição da corrente nos pontos onde vão ser instalados os dispositivos de aquisição de dados, foi necessário escolher os sensores que melhor se

adaptam às necessidades do projecto, com base na Tabela 11 e nos sensores estudados no capítulo 2.4 Sensores de Corrente comercializados.

4.3.4.1 Sensor de corrente Dent RoCoil mV CT16" (1000A)

Nos pontos de medição onde a corrente que passa em cada fase é superior a 180A, vão ser utilizados os sensores de corrente Dent RoCoil mV CT16", com a referência CT-RMV-16-1000-U, que estão disponíveis no laboratório.

O sensor de corrente flexível Dent RoCoil CT-RMV-16-1000-U tem uma entrada máxima de 1000A, e para esse valor uma saída de 333mV AC (333mV @ 1000A). Tem um comprimento de 16" e um diâmetro de 5", oferecendo um bom nível precisão na medição da corrente para valores altos. Além disso, tem um valor de saída em tensão seguro, na ordem dos milivolts.

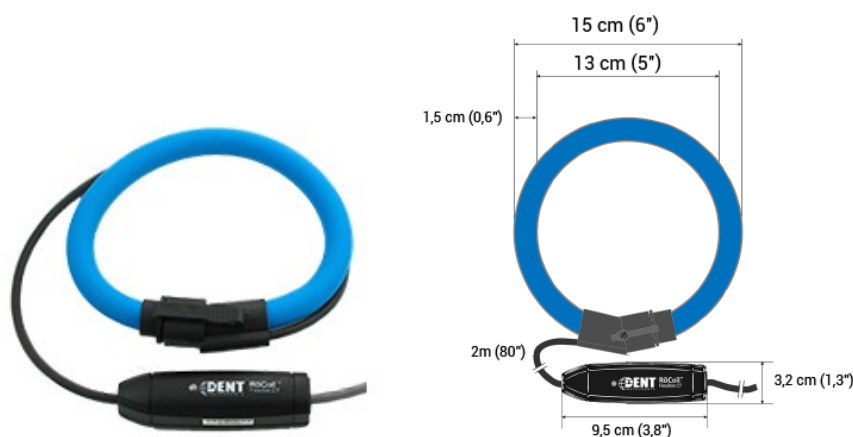


Figura 42 - Sensor de corrente Dent RoCoil mV CT16" (CT-RMV-16-1000-U)

De modo a ler o consumo de energia, é necessário alimentar o sensor de corrente com uma alimentação entre 5 e 24V DC. O fabricante do sensor, a Dent Instruments, vende transformadores em separado para este sensor, no entanto o seu custo é muito elevado – cerca de 60€. Por isso, foi decidido utilizar um transformador USB normal, mostrado na Figura 53, que tem um custo de apenas 2€.

Como o valor de saída do sensor Dent RoCoil CT-RMV-16-1000-U (333mV) está perto do valor máximo do canal de entrada da corrente do *chip* ADE7758 (353mV), não vai ser necessário efectuar o condicionamento do sinal nos dispositivos de aquisição de dados que utilizarem estes sensores.

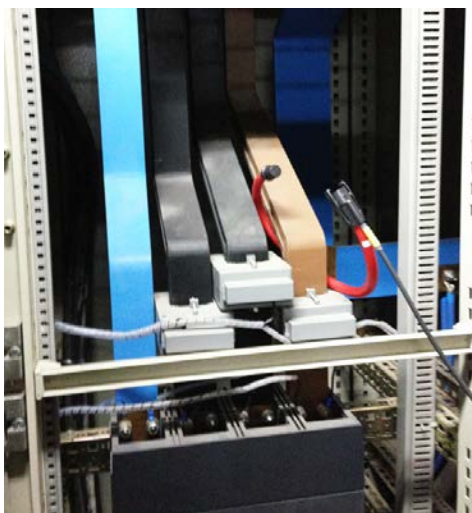


Figura 43 - Quadro eléctrico onde vão ser instalados os sensores Dent RoCoil

Este sensor de corrente flexível é o ideal para usar nos pontos onde os consumos são elevados, pois nestes pontos de medição o fio que é necessário “abraçar” em cada uma das três fases tem um diâmetro muito maior do que nos quadros eléctricos de menor consumo, sendo estes os únicos sensores compatíveis com as características do quadro eléctrico. A Figura 43 apresenta um dos quadros eléctricos de elevado consumo, localizados no piso -3 do edifício da Penteada da Universidade da Madeira, onde vão ser instalados os sensores de corrente Dent RoCoil CT-RMV-16-1000-U.

Na figura acima, apenas um sensor de corrente está a abranger uma das fases, contudo, dado que este é um quadro eléctrico trifásico, é necessário ligar um sensor de corrente em cada uma das três fases – assinaladas pelas barras pretas e castanha.

4.3.4.2 Sensor de corrente SCT-019-000 (0-200A)

Para efectuar a medição dos consumos energéticos nos quadros eléctricos onde a corrente é inferior a 180A foram escolhidos os sensores *split core* SCT-019-000, pois são fáceis de instalar e mais baratos. Não é necessário interromper o circuito que se está a medir ou realizar mudanças ao nível do quadro eléctrico.



Figura 44 - Sensor de corrente SCT-019-000

Segundo o analisador de potência, a corrente que passa na maior parte dos quadros eléctricos situa-se entre os 1A e 30A por cada fase, logo foi utilizado o sensor de corrente SCT 019-000, mostrado na figura acima, pois era o que estava disponível no laboratório. O sensor de corrente escolhido tem um valor de saída em Amperes, por isso é possível tornar os valores medidos pelo dispositivo de aquisição de dados mais precisos, através do uso de uma resistência, de forma a definir a precisão do sensor de corrente, trazendo diversas vantagens para o projecto.

O circuito eléctrico do sensor de corrente SCT019-000 está representado na Figura 45, onde CT é o transformador de corrente escolhido e R_L é a resistência *resistor-inductor* para produzir uma corrente (I_{OUT}) proporcional à corrente disponível no secundário (I_S). A resistência R_L já vem incluída dentro do sensor de corrente.

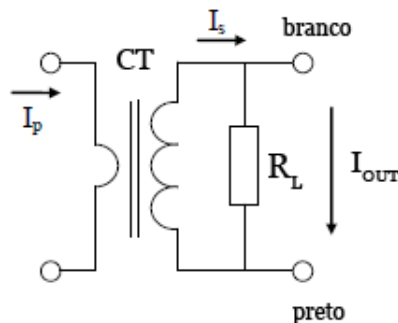


Figura 45 - Circuito eléctrico do sensor de corrente SCT-019-000

Como o sensor de corrente escolhido tem uma saída em corrente foi necessário converter esse valor para tensão e efectuar o condicionamento de sinal, demonstrado na secção 4.3.8.1, de forma a colocar na entrada do ADE7758 um valor que esteja dentro do limite de funcionamento do *chip* de medição de energia, que é de $\pm 0,5V$.

4.3.4.3. Sensor de corrente CT801-10 (0.01-80A)

Embora o sensor de corrente SCT-019-000 seja uma boa escolha para a medir os quadros eléctricos com uma corrente por cada fase entre os 0 e 200A, devido ao seu tamanho torna-se impossível utilizá-los em alguns pontos de medição, pois esses quadros eléctricos não possuem espaço suficiente para armazenar três sensores de corrente com as dimensões do SCT-019-000, ligados a cada uma das fases. Por essa razão, foi necessário escolher um sensor de corrente de menores dimensões, que fosse barato e que tivesse sensibilidade em medições entre os 0 e 30A, por isso foi escolhido o sensor de corrente *split core* CT801-10, mostrado na Figura 46.

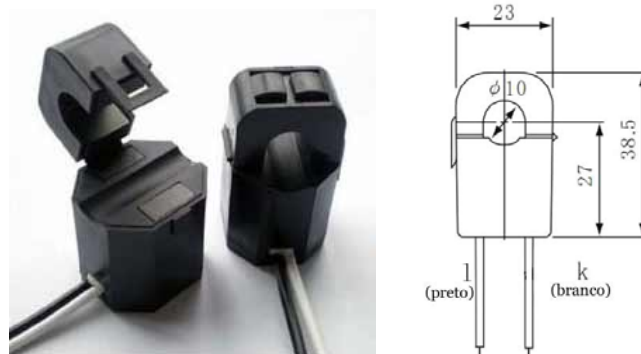


Figura 46 - Sensor de corrente CT801-10

O sensor de corrente CT801-10 tem uma entrada máxima de corrente de 80A, sendo capaz de medir correntes baixas, na ordem dos 0.01A. Este sensor tem um diâmetro de 10mm, ideal para “abraçar” o fio de cada fase no quadro eléctrico. Pode ser instalado sem ser necessário desligar o quadro eléctrico ou ter que cortar fios, é compacto e permite medir com precisão a corrente que passa em cada fase.

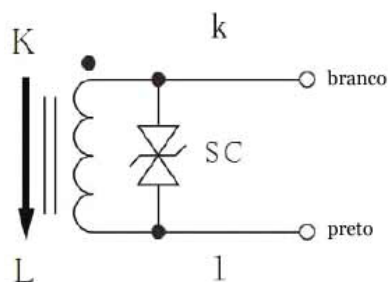


Figura 47 - Circuito eléctrico do sensor de corrente CT801-10

Como o sensor de corrente CT801-10 tem uma saída em tensão muito alta, então foi necessário efectuar o condicionamento de sinal, demonstrado na secção 4.3.8.2, de forma a colocar na entrada do ADE7758 um valor que esteja dentro do limite de funcionamento do *chip* de medição de energia, que é de $\pm 0,5V$.

Na Figura 48 é possível verificar um dos pontos de medição onde vão ser utilizados os sensores de corrente CT801-10. Em cada piso estão disponíveis dois quadros parciais, similares ao da figura abaixo, onde é possível medir os consumos das tomadas e iluminação para as salas e anfiteatros.



Figura 48 - Quadro eléctrico parcial

Como é possível ver na imagem acima, o espaço disponível para colocar os três sensores de corrente para medir os consumos é pequeno, e por isso foi bastante importante não só escolher um sensor com precisão para valores baixos de corrente (entre os 0.1A e 12A), como também um sensor que fosse pequeno, de forma a ter espaço para instalar um sensor por cada fase e poder fechar o quadro eléctrico sem problemas.

4.3.5 Transformador de Potência

Para calcular os consumos energéticos do edifício, além de ser necessário obter o sinal da corrente que passa pelos pontos de medição, o chip de medição de energia ADE7758 também precisa do valor da tensão. A forma mais simples e mais usada pelos principais sistemas de monitorização para obter o sinal de tensão é através do uso de um transformador de potência.



Figura 49 - Transformador de potência Saber 230V – 2,4VA

Foi escolhido o transformador de potência produzido pela Saber de 230V AC e 2,4VA (2 saídas de 6V AC), apresentado na Figura 49, que custa cerca de 7€. O transformador de potência possui isolamento galvânico e, por essa razão, protege o dispositivo de aquisição de dados contra diversos problemas, tais como sobretensões (até 4kV), ruído eléctrico e curto-circuitos.

4.3.6 Cabo de ligação

Foi escolhido o cabo de rede de par entrançado UTP CAT5e para ligar os diversos componentes electrónicos (microcontrolador mbed, microchip CAN, circuito integrado ADE7758 e porta *Ethernet*) e também para ligar os dispositivos de aquisição instalados em todo o edifício, pois traz várias vantagens para o projecto. É barato e possui protecção contra interferências.

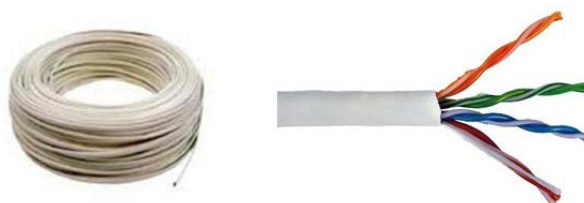


Figura 50 - Cabo de rede de par entrançado UTP CAT5e

Foram compradas duas bobines de cabo de ligação UTP CAT5e, com um comprimento de 300 metros, cada bobine. O tamanho máximo do cabo UTP segundo a especificação da Categoria 5e é de 100m. Foi necessário adquirir mais do que uma unidade porque o sistema de aquisição tem uma distância superior a 200 metros e vai ser usado para criar o cabo de rede para a ligação do dispositivo principal ao *router* (através da porta *Ethernet*) e interligar os dispositivos de aquisição de dados ao barramento CAN.



Figura 51 - Courette e Calha técnica no edifício da UMa (da esquerda para a direita)

A Figura 51 mostra os locais por onde o cabo de rede vai ser passado, em todo o edifício da Penteadá da Universidade da Madeira. As courettes fazem a ligação entre o piso 3 e o piso -3, enquanto as calhas técnicas, que estão localizadas no piso -3, fazem a ligação de uma ponta à outra do edifício.



Figura 52 - Alçado lateral do Edifício da UMA com as courettes e calhas técnicas assinaladas

No alçado lateral do edifício (Figura 52), é possível ter uma visão mais pormenorizada sobre onde se situam as courettes e calhas técnicas por onde vai passar o cabo de ligação UTP CAT5e, para interligar todo o sistema de monitorização dos consumos energéticos.

4.3.7 Fonte de Alimentação

4.3.7.1 Dispositivo principal

O dispositivo principal é alimentado a partir da rede eléctrica, usando um carregador de energia USB (Figura 53), similar aos carregadores usados nos dias de hoje para carregar *smartphones*, *tablets* e diverso material informático. Tem uma entrada de 110V-240V, funcionando com uma frequência de 50/60HZ e tem uma saída de 5V e 1A. O carregador USB é ligado directamente à porta micro USB do microcontrolador mbed.



Figura 53 - Carregador USB

Esta solução é a ideal para o desenvolvimento do projecto, pois torna a sua implementação simples e ajuda a reduzir a complexidade e os custos do dispositivo principal. Além de ser mais fácil e barato, também torna o circuito do dispositivo ainda mais simples, pois não é necessário fazer o condicionamento do sinal de tensão, dado que os componentes electrónicos incluídos no dispositivo necessitam de ser alimentados com uma tensão de 5V.

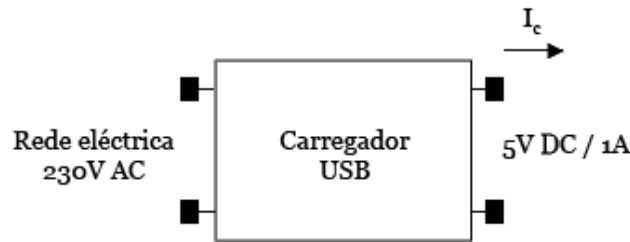


Figura 54 - Diagrama da fonte de alimentação para o dispositivo de aquisição

Na Tabela 12 é apresentada a corrente máxima consumida pelo dispositivo principal, para verificar se os consumos máximos do dispositivo principal não ultrapassam o valor fornecido pela alimentação.

Componente	I_c (mA)
Microcontrolador mbed	120
<i>Microchip</i> MCP2551-E/P	75
Porta Ethernet	8
TOTAL	203

Tabela 12 - Corrente máxima consumida no dispositivo principal

4.3.7.2 Dispositivo de aquisição de dados

De início, optou-se por utilizar o transformador de potência (Figura 55) como alimentação do dispositivo de aquisição de dados, como fonte de alimentação do dispositivo. Assim, não seria necessário utilizar componentes extra e o transformador de potência colocado na entrada dos canais de tensão do *chip* de medição dos consumos energéticos, também seria usado para fornecer os 5V, necessário para alimentar o circuito. Contudo, não foi possível utilizar este método pois a tensão do secundário tem uma variação muito grande, dado que o consumo do dispositivo não é sempre constante (quando existe transmissão de dados entre os *microchips* CAN ou quando os LEDs estão ligados o consumo é maior). Desta forma, os dados dos consumos energéticos calculados iriam conter diversos erros de medição, visto que o transformador de potência precisa de estar isolado.



Figura 55 - Transformador de potência Sabert 230V - 2,4VA

Logo, foi necessário procurar por outra solução para alimentar o circuito. Daí, foi escolhido usar o carregador USB (Figura 53), que é alimentado a partir da rede eléctrica, e tem tensão de saída de 5V DC e uma corrente de 1A. Ao utilizar esta solução não é necessário usar protecções no circuito contra picos de tensão, curto-circuitos,

entre outros problemas eléctricos comuns, pois o carregador USB já vem preparado para estes casos.

De forma, a saber se a fonte de alimentação escolhida é capaz de suportar a alimentação do circuito, foi necessário descobrir qual o consumo máximo total dos componentes electrónicos que fazem parte do dispositivo de aquisição de dados (I_c). Os componentes electrónicos que consomem energia são o microcontrolador mbed, o ADE7758, o MCP2551-E/P e os LEDs.

A corrente máxima obtida em cada LED é de 7mA. Mas, como a diferença do brilho do LED entre uma corrente com 7mA e uma corrente de 3mA nos LEDs utilizados no circuito é pequena, foi decidido limitar a corrente aos 3,3mA. A tensão de condução ideal para os LEDs utilizados é de 0,7V, o que resultou em resistência de 1k Ω ligadas em série com o LED.

Componente	I_c (mA)
Microcontrolador mbed	120
<i>Microchip</i> MCP2551-E/P	75
LEDs	6,6
TOTAL	201,6

Tabela 13 - Corrente máxima consumida nos dispositivos de aquisição de dados

Na Tabela 13 é indicada a corrente máxima consumida pelos dispositivos de aquisição de dados, para poder decidir quais os tipos de componentes a utilizar para o seu correcto funcionamento.

4.3.7.3 Sensores de Corrente Dent RoCoil mV CT16" (CT-RMV-16-1000-U)

Além do planeamento dos dispositivos de aquisição de dados, também foi necessário analisar como seria feita a alimentação dos sensores de corrente Dent RoCoil mV CT16, com a referência CT-RMV-16-1000-U.

Os sensores Dent RoCoil necessitam de uma alimentação entre 5 e 24V DC, e são os únicos sensores que necessitam de alimentação separada, já que os outros sensores de corrente utilizados neste projecto são sensores passivos - não requerem alimentação.



Figura 56 - Transformador vendido em separado para sensores Dent RoCoil

O fabricante dos sensores Dent RoCoil vende transformadores em separado para este sensor, no entanto o seu custo é muito elevado. O transformador vendido em separado, mostrado na Figura 56, custa cerca de 60€ (preço não inclui custos de transporte e taxas alfandegárias) e permite ligar até 4 sensores. Por isso, foi decidido utilizar um transformador USB normal, mostrado na Figura 53, que tem um custo de apenas 2€.

4.3.8 Condicionamento de sinal

Foi necessário realizar o condicionamento de sinal nos dispositivos de aquisição de dados para os sensores de corrente SCT-019-000 e CT801-10, e também para o sinal de tensão obtido através do transformador de tensão. No caso do sensor Dent RoCoil CT-RMV-16-1000-U, não foi necessário realizar o condicionamento de sinal, devido ao valor de *input* máximo estar dentro dos limites do *chip* de medição de energia.

4.3.8.1 Condicionamento do sinal de corrente do sensor SCT-019-000

De forma a ajustar os sinais de corrente e de tensão lidos pelo medidor de energia ADE7758 foi utilizado uma resistência na saída do sinal dos sensores de corrente, de forma a obter nas entradas de corrente do ADE7758 um valor eficaz de tensão máximo de $\pm 0,353V$. Este valor foi obtido através da aplicação da Fórmula 1, onde temos que $V_P = 0,5V$, e obtemos o resultado de $V_{RMS} = 0,353V$.

$$V_{RMS} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}$$

Fórmula 1 - Fórmula para cálculo do valor eficaz RMS

O sensor de corrente escolhido, permite a leitura de correntes entre 0 e 200A, contudo, como a sua saída é em corrente, o valor disponível à saída é bastante grande, o que para este projecto é uma vantagem já que usando apenas este modelo de sensor de corrente é possível definir a precisão do sensor de acordo com quadro eléctrico em que está a ser feita a medição.

Dado que é necessário obter na entrada de ligação dos sensores de corrente ao *chip* de medição de energia eléctrica um valor em tensão (Volts) em vez de um valor em corrente (Amperes), foi necessário usar utilizar uma resistência entre o sensor de corrente e os pinos de entrada do sensor de corrente para fazer essa conversão.

Sabendo que o valor eficaz de tensão máximo é de 0,353V foi necessário dimensionar o divisor de tensão utilizado no circuito de condicionamento do sinal da corrente disponível na entrada do pino de corrente do ADE7758, apresentado na Figura 57.

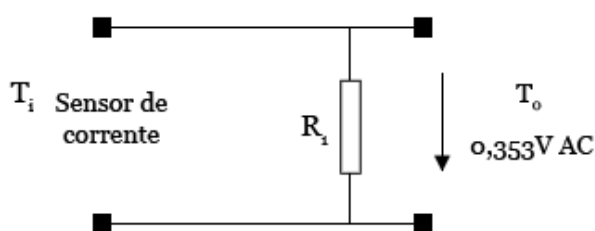


Figura 57 - Circuito de condicionamento para o sinal de corrente do sensor SCT-019-000

Através do osciloscópio, foi possível determinar qual o melhor valor de resistência a utilizar no circuito. Na Tabela 14 são apresentados os valores de tensão médios disponíveis à saída do sensor de corrente SCT-019-000 para um valor de corrente de 16,6A, foram obtidos os seguintes valores:

Resistência (Ω)	Valor eficaz médio (V)
Sem resistência	± 24
1	$\pm 0,034$
5,6	$\pm 0,021$
10	$\pm 0,037$
15	$\pm 0,054$
22	$\pm 0,078$
39	$\pm 0,096$
56	$\pm 0,130$

Tabela 14 - Valores obtidos na saída do sensor de corrente SCT-019-000

Foi decidido usar a resistência de 15 Ω , como referência padrão para o circuito criado, pois é a que apresenta melhores valores e permite ser aplicada na medição de valores máximos na ordem dos 100A em cada fase.

4.3.8.2 Condicionamento do sinal de corrente do sensor CT801-10

Para o sensor de corrente CT801-10 foi necessário realizar o condicionamento do sinal. Embora o sensor consiga medir valores máximos de corrente de 80A, o sensor foi otimizado para medições de corrente entre os 0.1A e 12A. Foi decidido ajustar o sensor para os valores anteriores porque, segundo as medições apresentadas na Tabela 11, os quadros eléctricos (trifásicos) parciais de alimentação e iluminação possuem valores de corrente entre os 0.1A e 8.7A. Dado que poderá haver ocasiões com picos ou dias em que o consumo possa aumentar excepcionalmente, foi decidido dar uma margem de erro.

Entre o sensor de corrente CT801-10 e o *chip* de medição de energia ADE7758 foi necessário utilizar uma resistência (Figura 58), de forma a condicionar o sinal de tensão que sai do sensor, para não ultrapassar o valor de tensão eficaz máximo $V_{RMS} = 0,353V$ do ADE7758

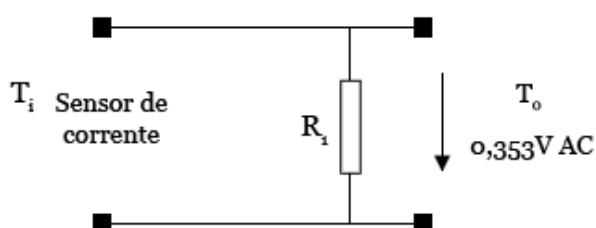


Figura 58 - Circuito de condicionamento para o sinal de corrente do sensor CT801-10

Através do osciloscópio, foi possível determinar qual o melhor valor de resistência a utilizar no circuito. Na Tabela 15 são apresentados os valores de tensão médios disponíveis à saída do sensor de corrente CT801-10 para um valor de corrente de 13,8A, foram obtidos os seguintes valores:

Resistência (Ω)	Valor eficaz médio (V)
Sem resistência	$\pm 5,08$
10	$\pm 0,047$
56	$\pm 0,281$
68	$\pm 0,312$
82	$\pm 0,373$
100	$\pm 0,458$

Tabela 15 - Valores obtidos na saída do sensor de corrente CT801-10

Foi decidido usar a resistência de 82Ω , como referência padrão para o circuito criado, pois é a que apresenta melhores valores e permite ser aplicada na medição de valores máximos na ordem dos 12A em cada fase.

4.3.8.3 Condicionamento do sinal de tensão

Além do sinal da corrente para os sensores de corrente SCT-019-000 e CT810-10, também foi necessário realizar o condicionamento de sinal para o sinal de tensão. A Figura 59 ilustra o circuito criado para obter na entrada do canal de tensão do ADE7758 o valor eficaz máximo de tensão de 0,300V. Como neste caso o sinal é obtido directamente do transformador de potência, foi decidido usar um sinal diferente para colocar na entrada do canal de tensão do ADE7758. O sinal de tensão é obtido através do transformador de potência que está ligado à rede eléctrica e tem um valor eficaz máximo de 8,65V. Para fazer o divisor de tensão foram utilizadas as resistências R_3 e R_4 .

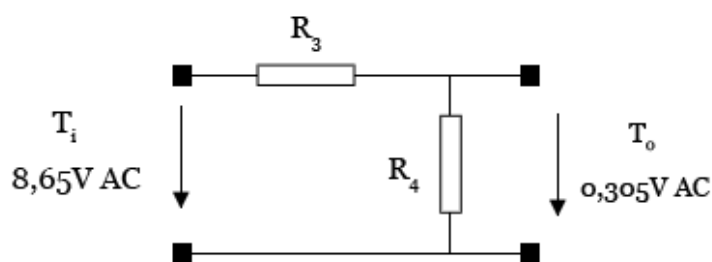


Figura 59 - Circuito de condicionamento para o sinal de tensão

Assumindo que $T_i = 8,65V$, $T_o = 0,300V$ e $R_4 = 1k\Omega$, através da Fórmula **1Erro!** **A origem da referência não foi encontrada.** obteve-se que $R_3 = 28k\Omega$. Dado que não existe uma resistência com esse valor disponível no mercado, foi utilizada no lugar da resistência $R_3 = 27k\Omega$. Em que, o valor eficaz máximo da tensão à entrada do ADE7758, no pino de tensão, é de 0,308V.

4.3.9 Comunicação

4.3.9.1 SPI (mbed ↔ ADE7758)

A transmissão de dados e comandos entre o circuito integrado de medição de consumos energéticos (ADE7758) e o microcontrolador (mbed) dos dispositivos de aquisição de dados é efectuada através do protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*).

A comunicação SPI é caracterizada pelo facto de ser uma ligação série síncrona que opera no modo *full duplex* (transmissão de dados simultaneamente em ambos os sentidos). Este tipo de comunicação segue o paradigma mestre-escravo, em que a comunicação é iniciada pelo mestre, que envia um comando para o escravo, e este

último responde. Além disso, o mestre é responsável por gerar um sinal de relógio (clock) que é fornecido ao pino de sincronização SCLK, do circuito integrado de medição de energia. Os dados são transmitidos em ambos os sentidos, utilizando a transmissão de dados do mestre para o escravo, assinalado pela porta MOSI (*Master Out Slave In*), e a transmissão de dados do escravo para o mestre, assinalado pela porta MISO (*Master In Slave Out*).

Na Figura 60 são apresentadas as ligações do barramento SPI configurado entre o microcontrolador mbed e o circuito integrado ADE7758. O microcontrolador mbed representa o mestre, enquanto o ADE7758 é o escravo.

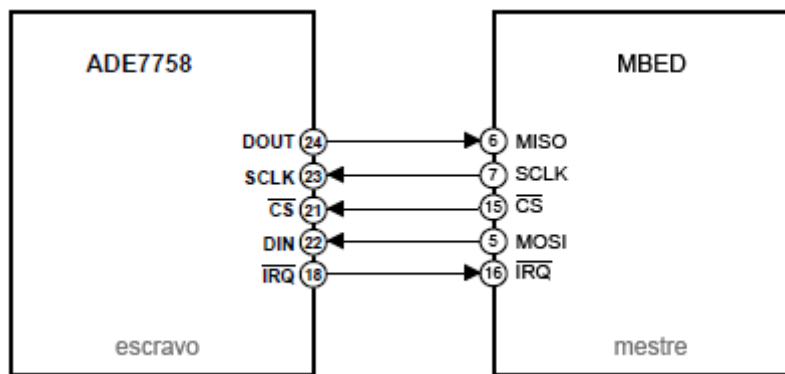
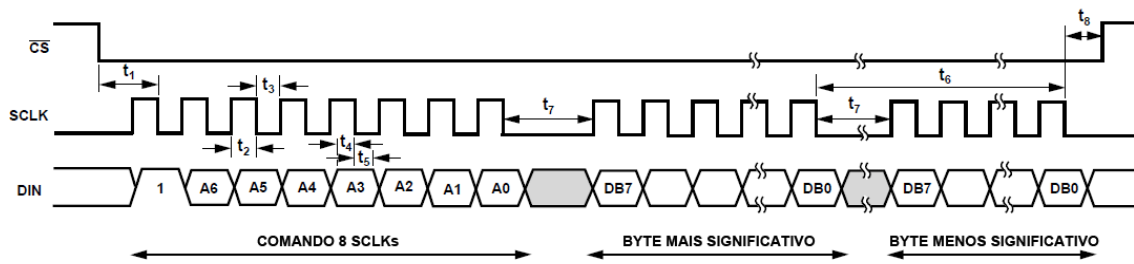


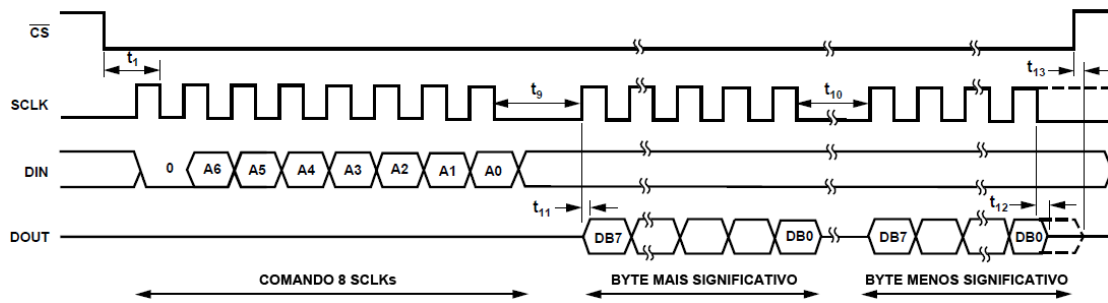
Figura 60 - Ligação do barramento SPI entre o ADE7758 e o microcontrolador mbed

O ADE7758 interpreta comandos de 8 bits, de dois tipos diferentes: leitura e escrita do registo. Na leitura e escrita dos registos do *chip* de medição dos consumos energéticos são utilizados os comandos de registo que possuem o endereço do registo pretendido e um bit de operação para leitura (0) ou para escrita (1). O ADE7758 possui diversos registos de 8, 12, 16 e 24 bits onde são guardadas as configurações do circuito integrado e os consumos energéticos.

A transmissão de dados é inicializada pelo microcontrolador mbed, através do envio de um comando de registo de 8 bits com o endereço do registo que se pretende aceder, junto com o *bit* de operação. Na Figura 61 é apresentada a sequência necessária para a escrita e leitura dos comandos e dados do circuito integrado ADE7758. Os comandos de escrita devem ser seguidos pelo envio de três bytes de dados, no entanto, é preciso ter em atenção ao tamanho do registo pois, como mencionado anteriormente, nem todos os registos possuem o mesmo tamanho.



a) Ciclo de escrita



b) Ciclo de leitura

Figura 61 - Sequência do canal SPI para escrita e leitura de dados do ADE7758

Um exemplo de leitura simples, para perceber melhor o funcionamento do ADE7758 é o seguinte: se for necessário ler o valor do canal de corrente RMS da fase A (registo AIRMS com o endereço “0x0A”, ou em binário “0001010”), é enviado o comando “00001010” do microcontrolador mbed para o ADE7758, seguindo de um *dummy byte* (ou *byte vazio*, que é representado pelo “00000000”).

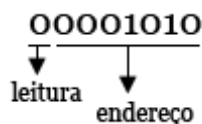


Figura 62 - Exemplo do byte de leitura do registo AIRMS

O ADE7758 envia 3 bytes de informação, com o valor correspondente à corrente RMS na fase A para o microcontrolador mbed, que depois tem que juntar todos os bytes e converter para um valor decimal.

4.3.9.2 CAN (mbed ↔ MCP2551-E/P)

A transmissão de dados entre os dispositivos de aquisição de dados e o barramento CAN é realizada através de comunicação CAN (*Controller Area Network*), com a ajuda do *microchip* CAN (MCP2551-E/P). Os microcontroladores mbed possuem duas *interfaces* CAN, no entanto só foi necessário utilizar uma das *interfaces* disponíveis. Além dos *microchips* CAN, não é necessário comprar componentes extra para o microcontrolador mbed suportar este protocolo de comunicação. A Figura 63

ilustra as ligações utilizadas na comunicação CAN entre os microcontroladores mbed e os *microchips* MCP2551-E/P.

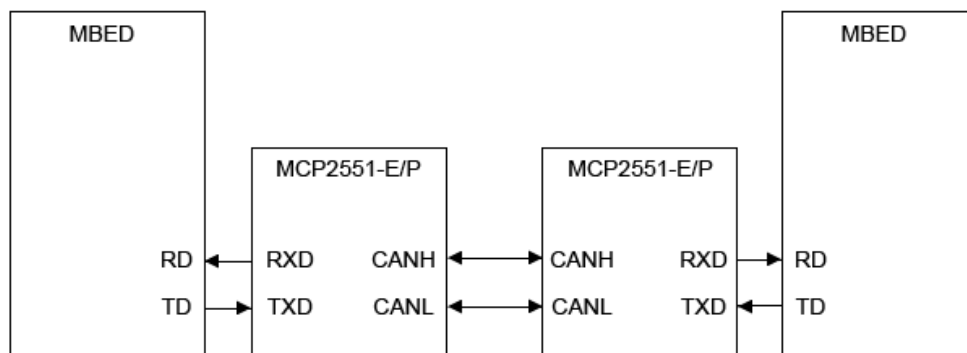


Figura 63 - Ligações utilizadas na comunicação CAN entre as mbed e os MCP2551-E/P

Os microcontroladores mbed e os *microchips* CAN foram configurados através do seu *firmware* para comunicarem com um *baud rate* médio de 500 kbits/s, no entanto a sua velocidade de transmissão pode ser ajustada de acordo com a distância máxima entre cada nó, como foi visto na Tabela 8. Os dados são transmitidos no padrão CAN e têm que ser enviados em formato hexadecimal. O limite máximo de envio é de 8 bytes por cada pacote de mensagem.

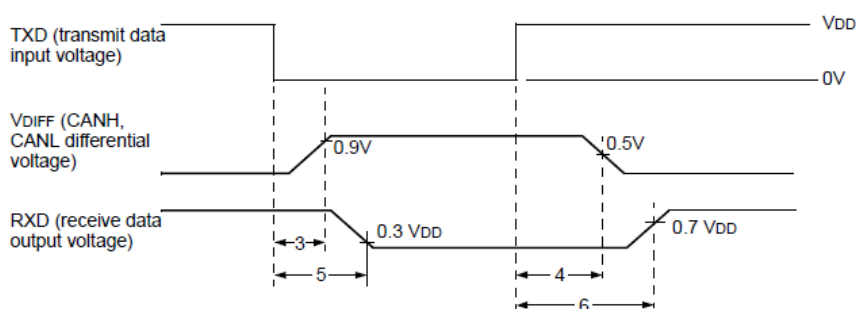


Figura 64 - Diagrama temporal de funcionamento do MCP2551-E/P

O dispositivo de aquisição de dados envia os dados dos consumos energéticos pela porta CAN, usando o *baud rate* máximo de acordo com a sua distância, sendo previamente definido no seu *firmware*. Estes dados são enviados para o barramento CAN através do *microchip* MCP2551-E/P, que está ligado à mbed. O dispositivo principal disponível na outra extremidade do edifício, ao detectar a existência de novos dados entra num ciclo que faz o tratamento dos dados recebidos e executa as acções necessárias relativamente ao tipo de informação recebida.

Como na comunicação CAN não existe um processo de negociação entre o transmissor e o receptor, os dados são enviados pelo microcontrolador quando existe nova informação por enviar. Pelo que, o dispositivo principal deve estar sempre a verificar o barramento CAN à procura de novos dados.

A utilização de *microchips* CAN vem facilitar e garantir maior segurança na comunicação de dados entre os microcontroladores. Sem contar, que o protocolo CAN pode ser implementado a baixos custos.

Para que a troca de dados seja mais eficaz, foi necessário definir um padrão para a estrutura de mensagens de forma tornar o sistema mais genérico e identificar os dados recebidos. Na Tabela 16 é apresentado o formato da mensagem utilizado nos pacotes de mensagens enviados para o barramento CAN.

1 byte	2 bytes	4 bytes
ID	HORA	CONSUMO

Tabela 16 - Formato padrão da mensagem utilizada na comunicação entre os dispositivos

A mensagem apresentada acima é composta por diversos elementos, descritos na Tabela 17. Devido à complexidade do sistema de monitorização de energia eléctrica, foi decidido colocar o projecto em funcionamento primeiro apenas com algumas variáveis, no entanto, no futuro é possível tornar o sistema mais complexo.

Elemento	Descrição
ID	Número do dispositivo de aquisição de dados
HORA	Indica a hora em que o dispositivo verificou o consumo energético
CONSUMO	Indica o consumo energético em kWh

Tabela 17 - Descrição dos elementos utilizados no pacote de dados da comunicação CAN

4.3.9.3 CAN (MCP2551-E/P ↔ barramento CAN)

Todos os dispositivos (dispositivos de aquisição de dados e dispositivo principal) possuem um *chip* CAN MCP2551-E/P, que permite fazer o envio e leitura de dados usando o protocolo CAN. Contudo, para utilizar a topologia de rede em barramento na transmissão de dados usando o protocolo CAN foi necessário construir um circuito físico para ligar as duas portas (*CAN High* e *CAN Low*) de todos os dispositivos, de forma a criar um barramento físico.

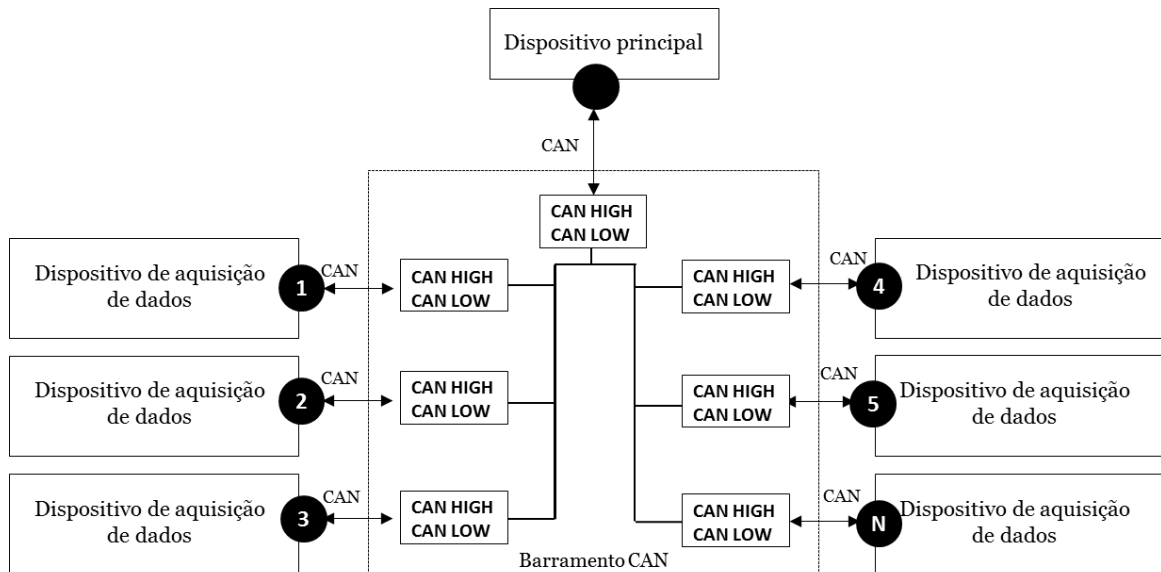


Figura 65 - Ligações utilizadas pelo barramento CAN

Foi necessário usar uma resistência de 120Ω , indicada pelo fabricante MICROCHIP no *datasheet* do *chip*. A Figura 66 apresenta o circuito utilizado para suportar a criação do barramento CAN. Todos os dispositivos espalhados pelo edifício do UMA estão ligados neste barramento.



Figura 66 - Caixa e circuito do Barramento CAN

A caixa (com o circuito) encontra-se instalada no piso -3, mais concretamente, na sala do quadro eléctrico principal, por onde passa toda a energia consumida pela Universidade da Madeira. Este é o local ideal para instalar o barramento, pois é nesta parte do edifício que os cabos de ligação do eixo norte e do eixo sul se encontram, não sendo necessário instalar mais comprimento de cabo.

4.3.9.4 Ethernet (mbed ↔ router com funcionalidade DHCP)

A transmissão de dados entre o microcontrolador mbed - do dispositivo principal - e o computador é realizada através do protocolo de comunicação *Ethernet*. O dispositivo principal está ligado a um *router* com funcionalidade *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP).

A utilização da porta *Ethernet* tem como vantagem a sua facilidade de utilização, uma vez que hoje em dia muitos edifícios possuem um ou mais *routers*, com ligação à *Internet*. O que torna mais fácil todo o processo de comunicação dos dados para o posterior armazenamento dos dados dos consumos energéticos numa base de dados.

O microcontrolador *mbed* vem com suporte à *interface Ethernet*, sendo apenas necessário instalar uma porta *Ethernet* nos pinos que correspondem à respectiva interface. É necessário conectar os pinos *TD+*, *TD-*, *RD+* e *RD-*, como ilustrado na Figura 67.

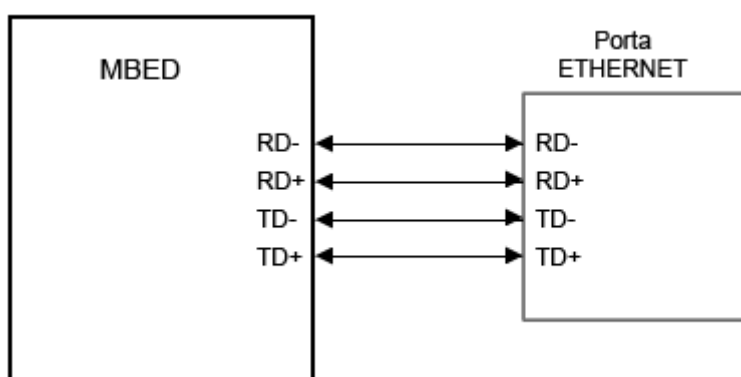


Figura 67 - Ligação Ethernet entre a mbed e a porta Ethernet

O microcontrolador *mbed* é o elemento activo desta comunicação, sendo o próprio a fazer o pedido de ligação à base de dados e a enviar os dados para a tabela definida inicialmente. A base de dados *MySQL* é o elemento passivo, sendo que apenas informa se a introdução dos dados ocorreu com sucesso ou não. A mensagem enviada pelo microcontrolador é uma simples *query SQL*, que segue o formato ilustrado na Tabela 18.

ID	DATA	HORA	CONSUMO
----	------	------	---------

Tabela 18 - Formato da mensagem utilizada na comunicação entre o dispositivo principal e o computador

Numa fase inicial do projecto, está a ser usado este formato de mensagem simples para enviar para a base de dados o histórico de consumos energéticos para testes, contudo, num futuro próximo, a estrutura da mensagem poderá incluir mais dados importantes no cálculo dos consumos, como é o caso da tensão e corrente RMS, entre outras variáveis.

A comunicação dos dados dos consumos energéticos através do protocolo *Ethernet* é simples, pois o próprio microcontrolador *mbed* possui bibliotecas *Ethernet* e *MySQL* que permitem enviar os dados directamente para uma base de dados *MySQL*.

Apenas é necessário definir no início do programa os dados de acesso ao servidor web (endereço IP, nome de utilizador, palavra-chave e base de dados).

A velocidade de transmissão varia consoante o tipo de porta *Ethernet* utilizada no circuito. É compatível com velocidades máximas entre os 10 e 100Mbit/s. A porta *Ethernet* instalada no dispositivo principal suporta velocidades de comunicação de dados até 100Mbit/s.

4.4 Firmware

A *firmware* dos microcontroladores mbed foi desenvolvida em linguagem C, com a ajuda do compilador *online* disponível no site do fabricante do microcontrolador (mbed.org) e com base na documentação fornecida pelo fabricante.

Foi necessário desenvolver pelo menos duas versões de código para os microcontroladores mbed, uma versão para o dispositivo principal, que usa as interfaces *Ethernet* e CAN, e uma outra versão para os dispositivos de aquisição de dados, que utilizam as *interfaces* CAN e SPI.

Inicialmente, foi desenvolvida uma versão simples para cada tipo de dispositivo, que faz as tarefas necessárias para a versão inicial do projecto. Contudo, com o evoluir do projecto, as *firmware* vão ser actualizadas ao longo do tempo, para garantir que o sistema de monitorização continua a fornecer a informação necessária e útil para a gestão do edifício da Penteada da Universidade da Madeira.

As rotinas dos microcontroladores mbed disponíveis no dispositivo principal e nos dispositivos de aquisição de dados são um pouco semelhantes, podendo ser descritas através do fluxograma, ilustrado na Figura 68.

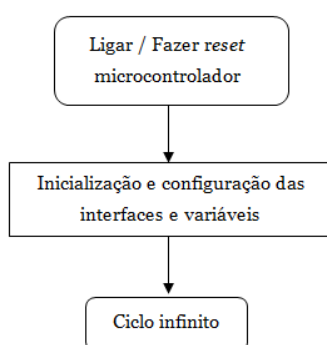


Figura 68 - Fluxograma da rotina dos microcontroladores

Os microcontroladores, ao serem ligados à fonte de alimentação ou ao sofrerem um *reset* externo, inicializam o programa e fazem a configuração das interfaces e

variáveis utilizadas pelo *firmware* que estão a correr. De seguida os microcontroladores entram num ciclo infinito, executando de uma forma infinita as suas tarefas.

4.4.1 Rotina do dispositivo principal

A rotina do dispositivo principal, ilustrada na Figura 69, é composta por um ciclo de espera activa, em que o microcontrolador fica à espera de receber dados através do protocolo CAN para depois executar uma *query SQL* que faz a inserção dos dados na tabela dos consumos energéticos, com os dados dos consumos energéticos para um dado dispositivo, com a identificação da hora e data em que foram obtidos os consumos.

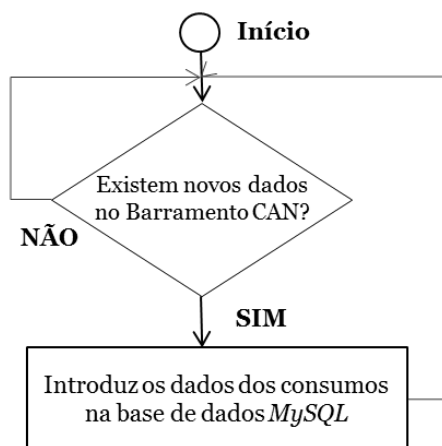


Figura 69 - Fluxograma da rotina do dispositivo principal

4.4.2 Rotina do dispositivo de aquisição de dados

A rotina do dispositivo de aquisição de dados é completamente diferente da rotina do dispositivo principal. Este dispositivo participa activamente no sistema de monitorização de energia através da leitura, cálculo e envio dos consumos energéticos para o barramento CAN, sendo a parte mais importante em todo o sistema.

4.4.2.1 Rotina de calibração do ADE7758

O processo de calibração do chip de medição de energia ADE7758 é feito de forma a compensar os valores de *offset* dos canais de entrada de corrente e de tensão, o ganho e o desfasamento das fases. O chip ADE7758 apresenta dois métodos de calibração. É possível calibrar o *chip* usando pulsos de saída (*pulse output*) ou a acumulação de ciclos de linha (*line cycle accumulation*). Para este projecto, a *firmware* desenvolvida segue o método de calibração usando a acumulação de ciclos de linha.

Antes de colocar o dispositivo de aquisição de dados a fazer a leitura e envio dos consumos energéticos, é necessário efectuar a calibração do dispositivo, para que os dados dos consumos contenham o mínimo de erro possível. Só é necessário realizar a calibração uma vez (por cada dispositivo), sendo que depois são guardados os dados de

configuração nos registos do *chip* de medição de energia, para que o sistema funcione já com todos os ajustes feitos na fase de calibração. O processo de calibração do dispositivo está disponível no *datasheet* do circuito integrado ADE7758, que pode ser resumido de acordo com o fluxograma da Figura 70.

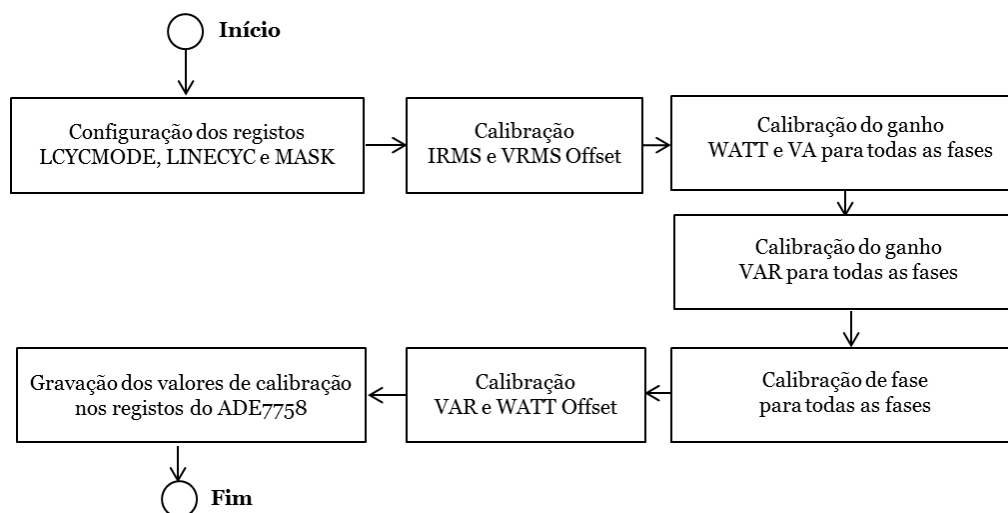


Figura 70 - Fluxograma da rotina de calibração do dispositivo de medição

Primeiro, é necessário configurar os registos para a detecção da passagem por zero (*zero crossing*) para todas as fases ao escrever 0x38 no registo LCYCMODE (0x17), 0xE00 no registo MASK (0x18) e definir o número de ciclos de meia-linha para a acumulação de linha no registo LINECYC (0x1C) – foi utilizado LINECYC = 0x10.

Depois de configurar os registos, é possível começar o processo de calibração. É bastante importante começar com a calibração do *offset* do I_{RMS} e V_{RMS} para cada uma das fases. É necessário colocar o sistema com um valor de corrente e de tensão altos (I_{TESTE} e V_{NOM}), para retirar diversas medições quando faz a passagem por zero, usando a interrupção do registo RSTATUS (0x1A), e fazer uma média dos valores obtidos através dos registos xIRMS (0x0A a 0x0C) e xVRMS (0x0D a 0x0F). Após esta medição, é necessário fazer uma nova medição, mas agora com valores de corrente e de tensão mais baixos. No fim, deve ser usada a fórmula disponibilizada pelo fabricante no *datasheet*, para calcular os valores que devem ser gravados no registo de *offset* para a corrente – em xIRMSOS (0x36 a 0x38), e a tensão – em xVRMSOS (0x33 a 0x35).

A calibração do ganho é o passo seguinte, sendo utilizado para o ajustamento do ganho medidor-a-medidor, grau de calibração da saída APCF ou VARCF, e também para determinar o *byte* menos significativo – LSB (*Less Significant Byte*) – das constantes Wh, VARh e VAh. É necessário limpar os registos xWG, xVARG e xVAG, para depois seleccionar as fases A, B e C para a medição do período da linha.

A calibração dos registos da fase, para cada fase, serve para compensar pequenos erros na deslocação da fase. Esta calibração faz o ajuste do tempo de atraso positivo ou negativo. É necessário definir o sistema para um valor de corrente e de tensão altos, para um factor de potência indutivo ($PF = 0.5$). Depois fazer um *reset* ao registo de estado através da leitura do registo RSTATUS (0x1A). Os registos xWATTHR (0x01 a 0x03) devem ser lidos logo após a interrupção de LENERGY, de forma a calcular o erro da fase. Ao saber o grau de defasamento da fase, é possível saber qual o valor que deverá ser guardado nos registos xPHCAL (0x3F a 0x41), de forma a compensar o defasamento.

O último passo da calibração consiste em aumentar a precisão dos valores de medição da potência activa e reactiva, através da comparação e ajuste dos valores medidos pelo dispositivo de aquisição de dados em comparação com um analisador de potência. Depois, é necessário gravar os valores de ajuste nos registos xWATTOS (0x39 a 0x3B) e xVAROS (0x3C a 0x3E).

No final da calibração, os dados a gravar em cada registo de calibração devem ser escritos na *firmware* da rotina 4.4.2.2, para que o sistema faça os ajustes necessários, de forma aos erros de medição serem muito baixos.

4.4.2.2 Rotina de leitura, cálculo e envio dos consumos

Após a calibração do dispositivo de medição dos consumos energéticos – obrigatório apenas no primeiro uso do dispositivo, deve ser executado o programa que efectua a leitura dos consumos energéticos, usando os registos calibrados.

O programa é inicializado com a leitura dos registos do ADE7758 com os dados dos consumos energéticos. São lidos os registos AWATTHR (0x01), BWATTHR (0x02) e CWATTHR (0x03), de forma a obter a potência activa para, no passo seguinte, o microcontrolador fazer os cálculos necessários para obter o valor real dos consumos no quadro eléctrico trifásico. Depois, o consumo total, é enviado numa mensagem com os dados em hexadecimal, segundo o formato da mensagem definido na Tabela 18, através do protocolo CAN (*Controller Area Network*) para o barramento CAN. Após o envio dos dados dos consumos para o barramento CAN, o dispositivo faz um *reset* a todas as variáveis e repete o programa para fazer uma nova medição.

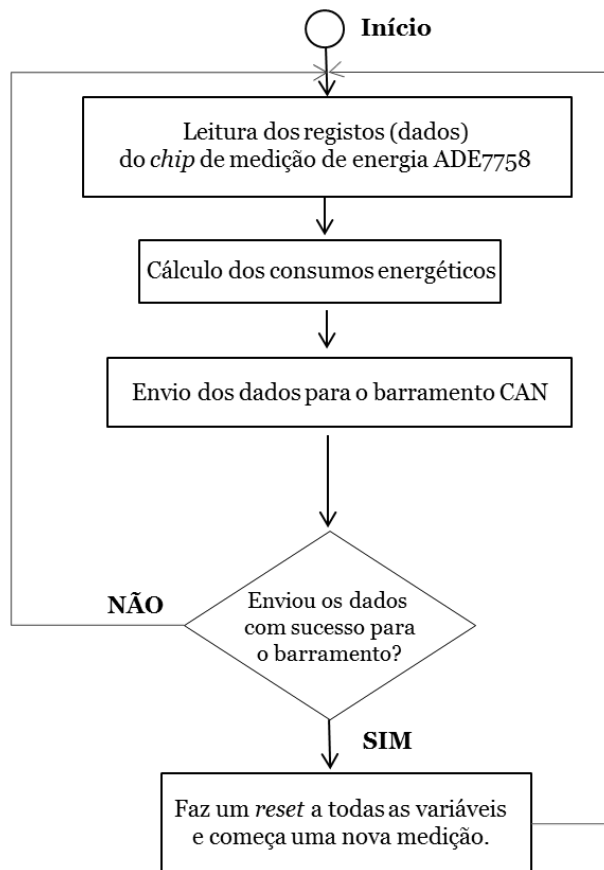


Figura 71 - Fluxograma da rotina do dispositivo de aquisição de dados

4.5 Arquitectura do sistema



Figura 72 - Arquitectura do sistema de monitorização de energia

Ilustrada na Figura 72, a arquitectura do sistema é composta por 9 dispositivos de aquisição de dados e 1 dispositivo principal ligados ao um barramento CAN, que

permitiu implementar um sistema de comunicação de baixo custo. Os dispositivos de aquisição estão espalhados por todo o edifício, e fazem a leitura dos consumos energéticos. Depois, os dados dos consumos são enviados para o dispositivo principal, localizado no piso -3, que recebe os dados dos consumos através do barramento CAN e envia-os para a base de dados *MySQL*, através da porta *Ethernet* – que está ligada a um *router* com funcionalidade *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP). Desta forma, foi possível criar um sistema de monitorização dos consumos energéticos do edifício da Universidade da Madeira de baixo custo e com as funcionalidades necessárias, através da combinação de diversos protocolos e componentes.

CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO DO PROJECTO

Neste capítulo são apresentados todos os aspectos relacionados com a implementação do projecto de monitorização de energia no edifício da Penteada, nomeadamente o equipamento usado na sua totalidade, as funcionalidades do sistema de aquisição de dados construído, os requisitos que foram alcançados, a avaliação do projecto e as conclusões de implementação.

Ao longo deste trabalho foi desenvolvido a primeira parte do sistema de monitorização de consumos energéticos, que consiste no sistema de aquisição de dados, para o posterior envio dos dados de consumos energéticos para uma base de dados *MySQL* onde, através da interface web, que faz parte da segunda parte do projecto, é possível consultar o histórico de consumos, comparar os consumos com igual período homólogo, definir alertas e calcular o custo da electricidade consumida. Este projecto tem como objectivo ajudar a Universidade da Madeira a reduzir os consumos energéticos do edifício localizado na Penteada. O sistema de aquisição de dados construído é capaz de medir e calcular em tempo-real diversos dados de energia, como o valor da corrente e a energia consumida.

O sistema que foi desenvolvido é composto por duas versões diferentes de dispositivos electrónicos de medição dos consumos energéticos: o dispositivo principal, e os vários dispositivos de aquisição.

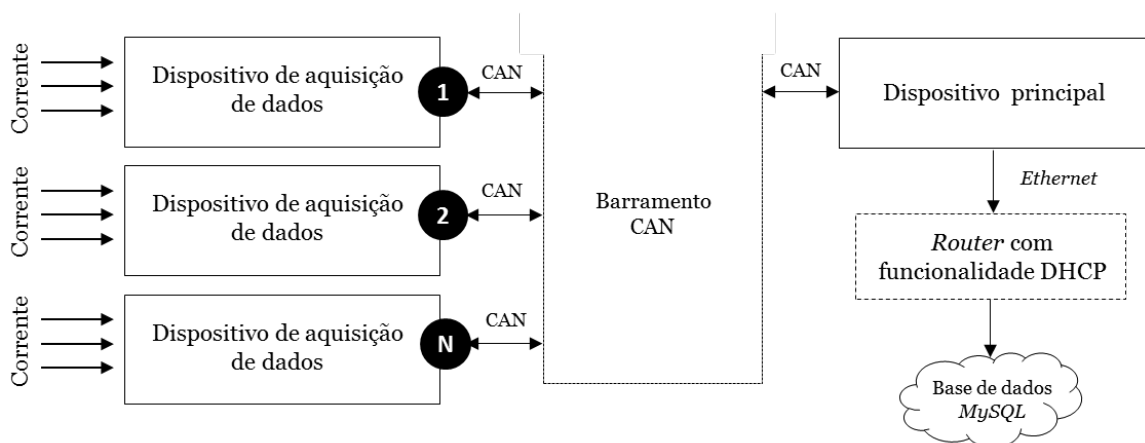
O dispositivo principal é responsável por receber os dados dos consumos de todos os dispositivos de aquisição de dados e enviá-los para servidor *MySQL*. Do lado dos dispositivos de aquisição de dados a troca de informação é realizada através da *interface CAN*, enquanto do lado do *router*, o envio de dados dos consumos energéticos é feito através da *interface Ethernet*.

Os dispositivos de aquisição são responsáveis por fazer a medição dos consumos energéticos através do uso de três sensores de corrente, ligados em cada fase, para posteriormente enviarem os dados dos consumos via interface CAN para o dispositivo principal. Dado que existem pontos de medição com maiores consumos que outros pontos, e com características diferentes, foi necessário escolher vários tipos de sensores diferentes. No entanto, o funciona do dispositivo é praticamente igual.

Cada ponto de medição dos consumos envia os dados com um número de identificação associado, para que seja possível ver os dados dos consumos, na interface web, por ponto de medição.

5.1 Estrutura Geral

O sistema de monitorização de dados é composto vários dispositivos de aquisição de dados que usam a *interface* CAN, e um dispositivo principal que usa as *interfaces* CAN e *Ethernet*. Os dispositivos de aquisição lêem os sinais analógicos de corrente do quadro eléctrico, e comunicam esses resultados para o dispositivo principal, que por sua vez envia os dados dos consumos energéticos para a base de dados *MySQL*. A figura abaixo ilustra o diagrama de blocos geral do sistema de monitorização implementado.



No total são 9 Dispositivos de aquisição de dados

Figura 73 - Diagrama de blocos geral do sistema de monitorização de consumos

O sistema de monitorização de energia eléctrica é composto por dez dispositivos (um dispositivo principal e nove dispositivos de aquisição), como ilustrado na Figura 73, onde o dispositivo principal é responsável pela comunicação dos dados recebidos pelos dispositivos de medição dos consumos para a base de dados *MySQL*, onde serão utilizados pela *interface web*, de forma a ajudar o gestor do edifício na tomada de decisões de poupança de energia.

5.1.1 Dispositivo principal

O dispositivo principal é composto por três blocos principais: a fonte de alimentação, o microcontrolador e o *chip* CAN. Este dispositivo utiliza os protocolos CAN e *Ethernet*. É possível encontrar no capítulo 4 mais informação detalhada sobre cada um dos blocos. O diagrama de blocos do dispositivo principal encontra-se ilustrado na Figura 74.

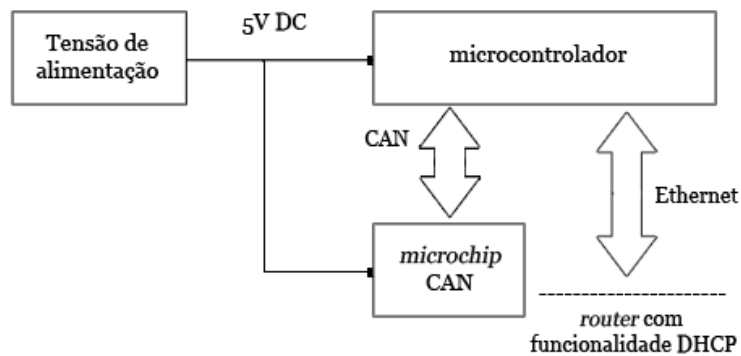


Figura 74 - Diagrama de blocos do dispositivo principal

O dispositivo principal recebe os dados dos consumos energéticos de cada um dos dispositivos de aquisição que estão espalhados pelo edifício, ligados através de um barramento CAN.

O microcontrolador controla todos os fluxos de informação – envia os dados dos consumos energéticos para a base de dados *MySQL* através da porta *Ethernet* que está ligada a um *router* com funcionalidade *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP), que por sua vez tem acesso à *Internet* ou à rede local, onde está o computador ou servidor web online com a base de dados *MySQL*.

A alimentação do dispositivo é realizada através de um carregador USB que é ligado directamente à porta de *microUSB* do microcontrolador e alimenta todo o circuito com uma tensão de alimentação de 5V DC e uma corrente suficiente.

5.1.2 Dispositivo de aquisição de dados

Os dispositivos de aquisição de dados do sistema de monitorização de energia são compostos por cinco blocos principais: a fonte de alimentação, o condicionamento de sinal, o medidor de energia, o microcontrolador e o *microchip* CAN. É possível encontrar uma descrição detalhada sobre cada componente no capítulo 4. A Figura 75 ilustra o diagrama dos dispositivos de aquisição de dados construídos para o projecto.

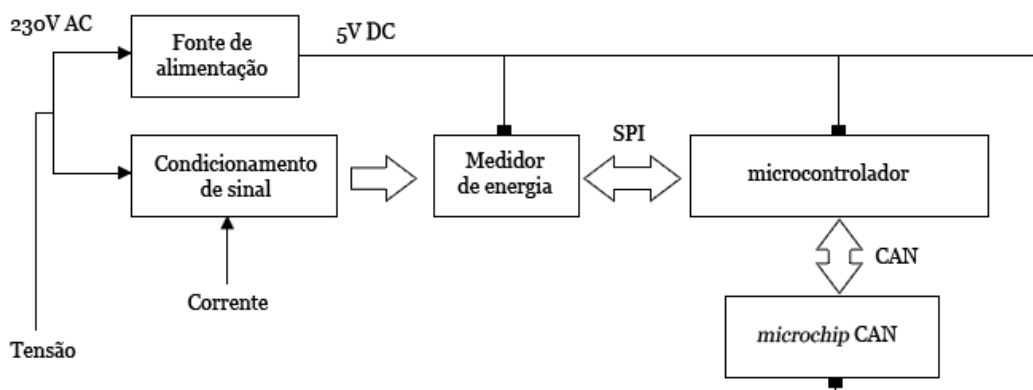


Figura 75 - Diagrama dos dispositivos de aquisição de dados

No dispositivo de aquisição de dados, os sinais de tensão e corrente são lidos através dos sensores de corrente e do transformador de tensão. Estes sinais são condicionados, de forma a estar entre os limites de tensão máximo padrão do medidor de energia. Por sua vez, o circuito integrado faz a medição dos dados de energia e envia a informação para o microcontrolador quando recebe um pedido de transmissão.

O microcontrolador é responsável por fazer a leitura dos registos do medidor de energia e com esses dados efectuar os cálculos e conversões necessárias. Depois comunica os dados dos consumos energéticos ao barramento CAN, através da *interface* CAN. O *microchip* CAN é responsável por enviar os dados dos consumos para o dispositivo principal.

O dispositivo de aquisição de dados é alimentado através de um carregador USB que é ligado directamente à porta de *microUSB* do microcontrolador e alimenta todo o circuito com uma tensão de alimentação de 5V DC e uma corrente suficiente. Além disso, também é necessário ligar o transformador de tensão à tomada eléctrica, para que o dispositivo possa calcular os consumos no ponto de medição e envie os dados certos. Inicialmente optou-se por usar três transformadores de tensão por cada dispositivo de aquisição de dados, no entanto, segundo os engenheiros da Analog, empresa responsável pela produção do chip de medição de energia, pode ser usado apenas um transformador de tensão ligado aos três canais de tensão do *chip*.

5.2 Equipamento

Para a construção da primeira parte do projecto de monitorização de energia no edifício da Universidade da Madeira na Penteada, foi necessário recorrer ao equipamento apresentado na Tabela 19, onde é descrito a função de cada componente na construção do projecto.

Nome do artigo	Descrição
Dent RoCoil mV CT16" (Máximo 1000A)	Sensor de corrente flexível com um nível de precisão alto e um limite de medição de 1000A, com uma saída em Volts. Óptimo para os quadros com consumos elevados.
Sensor de Corrente SCT-019-000 (Máximo 200A)	Sensor de corrente <i>split core</i> com um nível de precisão alto e um limite de medição entre 0 e 200A, com saída em Amperes.
Sensor de Corrente CT801-10 (Máximo 80A)	Sensor de corrente <i>split core</i> com um nível de precisão alto e um limite de medição entre 0.01A e 80A, com saída em Volts.

Nome do artigo	Descrição
Transformador de potência Saber 230V - 2,4VA	O transformador de potência é responsável por fornecer o sinal de tensão ao chip de medição dos consumos energéticos, que é necessário para calcular a potência.
Microcontrolador mbed NXP LPC1768	O microcontrolador mbed é o componente electrónico que efectua o pedido de leitura dos dados dos consumos ao chip de medição de energia eléctrica, faz o tratamento dos dados e envia-os pelo barramento CAN até chegar ao microcontrolador mbed principal. No microcontrolador principal, envia os dados dos consumos através da rede <i>Ethernet</i> .
Circuito integrado ADE7758	O <i>chip</i> de medição dos consumos energéticos. O circuito integrado escolhido permite a medição de correntes trifásicas (3 fases), através da ligação de 3 sensores de corrente, no máximo.
Porta <i>Ethernet</i> Stewart Connector – SI- 61007-F – MAGJACK RJ45 Gigabit W/O LEDS	Esta porta <i>Ethernet</i> está disponível apenas no dispositivo principal, que inclui o microcontrolador mbed (principal), e serve de <i>interface</i> de comunicação para o envio dos dados dos consumos energéticos de todos os pontos de medição para a base de dados <i>MySQL</i> . Foi usado o cabo de rede CAT5e para ligar o dispositivo principal ao <i>router</i> .
Bobine Cabo de ligação UTP Cat5e 100 metros	O cabo de ligação UTP foi usado para ligar a porta <i>Ethernet</i> ao <i>router</i> e efectuar as ligações entre os dispositivos de aquisição de dados e o dispositivo principal.
PC	O computador aloja a base de dados <i>MySQL</i> e a <i>Interface Web</i> , onde são guardados os dados dos consumos energéticos, para posteriormente apresentar através da <i>Internet</i> ou da Rede local.

Tabela 19 - Equipamento utilizado no sistema de aquisição dos dados de consumo energético

Na Tabela 20 é apresentada a quantidade, preço unitário e preço total para cada componente utilizado. Para referência, foi adicionado na secção Anexo 1 – Lista de material o preço unitário de cada componente.

Nome do artigo	Quantidade	Preço Unitário (€)	Preço Total (€)
Sensor de Corrente Dent RoCoil mV CT16" (Máximo 1000A)	6	155	930,00
Sensor de Corrente SCT-019-000 (Máximo 200A)	3	11,50	34,50
Sensor de Corrente CT801-10 (Máximo 80A)	18	2,40	43,20
Microcontrolador mbed NXP LPC1768	10	50,97	509,70
<i>Medidor de energia ADE7758</i>	9	10,81	97,29
<i>Microchip CAN Transceiver MCP2551-E/P</i>	11	1,60	17,60
Porta Ethernet Stewart Connector – SI-61007-F – MAGJACK RJ45 Gigabit W/O LEDS	1	12,94	12,94
Bobine Cabo de ligação UTP Cat5e 300 metros	2	23,50	47,00
PC	1	500	500,00
Adaptador de Potência USB	10	1,90	19,00
Transformador de potência Saber 6-0-6	7	7,08	49,56
Preço Total			2260,79

Tabela 20 - Orçamento da construção do sistema

Contudo, é preciso ter em conta que a tabela de orçamento apresentada acima, não apresenta os custos de alguns produtos (ex.: resistências, díodos, condensadores, caixas, etc), custos de produção das PCBs, custos de envio dos produtos, mão-de-obra e de instalação associados com um projecto desta dimensão.

5.3 Construção dos dispositivos

Primeiro, foi necessário montar e testar os circuitos necessários para cada dispositivo do sistema de monitorização de energia. Depois de saber exactamente os componentes a incluir em cada dispositivo, foi iniciado o processo de criação do *layout* das PCBs através do programa Ultiboard da National Instruments (Figura 76). Os circuitos eléctricos e os *layouts* PCB de cada dispositivo deste sistema encontram-se nos anexos 2 e 3, respectivamente.

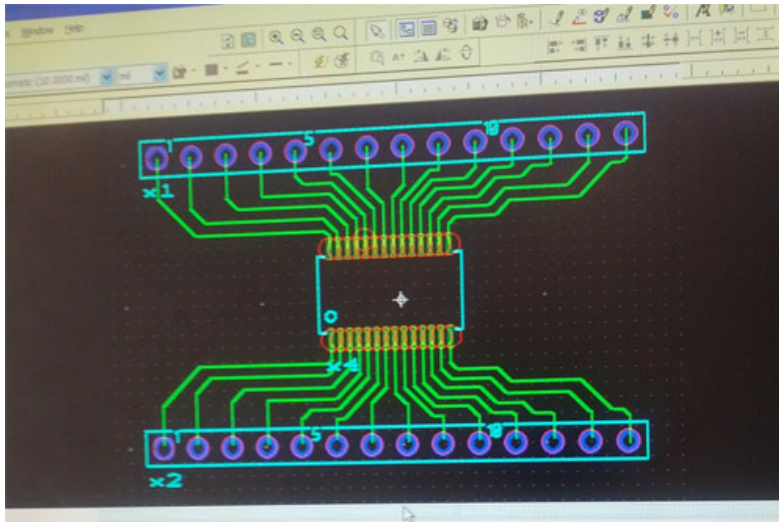


Figura 76 - Concepção do layout da PCB no programa NI Ultiboard

Depois de desenhado o *layout* das PCBs foi necessário imprimir os layouts em folha de acetato para usar no processo de exposição da imagem do acetato para o cobre. Foi utilizado a máquina disponível no laboratório, que gera radiação ultravioleta.

Após a radiação UV, seguiu-se a revelação para retirar o verniz que foi destruído pela radiação UV. Utilizou-se um banho de hidróxido de sódio, ou soda cáustica como também é vulgarmente chamado. Em alguns segundos o circuito tornou-se mais visível.

O passo seguinte consistiu em colocar a PCB na máquina de percloro de ferro, de forma a haver uma corrosão do cobre que não foi revelado, ou seja, que não foi protegido pela tinta preta do *stencil* e ficou à vista no passo anterior.

Depois das placas de circuito impresso estarem prontas, foi soldado os componentes eléctricos que compõem cada tipo de dispositivo, mencionado anteriormente. O processo de soldagem foi rápido e fácil, tendo sido realizado na sala “Arrumos 2” localizada no piso -2 da Universidade da Madeira.



Figura 77 - Componentes soldados no dispositivo principal

Legenda da Figura 77:

1. Microcontrolador mbed NXP LPC1768
2. *Microchip* CAN MCP2551-E/P
3. Porta *Ethernet* MAGJACK RJ45 Gigabit W/O LEDs

(Conectores)

- A. Alimentação 5V e *Ground*
- B. Portas CAN High e CAN Low

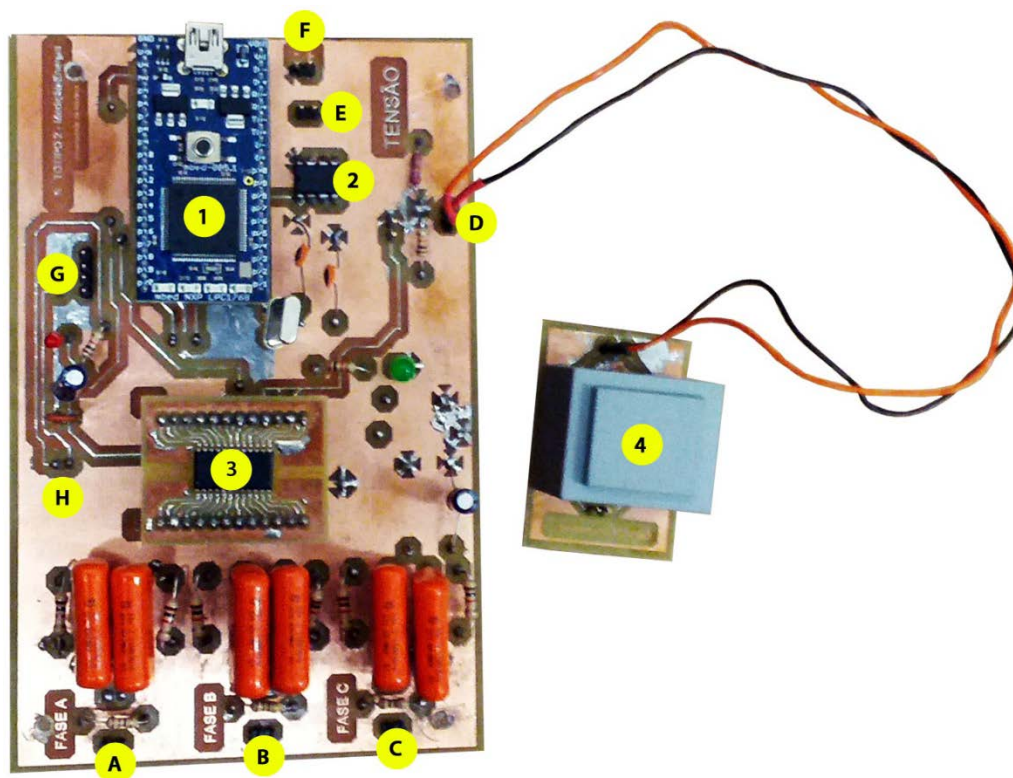


Figura 78 - Componentes soldados no dispositivo de aquisição de dados

Legenda da Figura 78:

1. Microcontrolador mbed NXP LPC1768
2. *Microchip* CAN MCP2551-E/P
3. *Chip* medição de energia ADE7758
4. Transformador de tensão

(Conectores)

- A. Entrada do sinal de corrente - Fase A
- B. Entrada do sinal de corrente - Fase B
- C. Entrada do sinal de corrente - Fase C

- D. Entrada do sinal de tensão - Fase A, B e C
- E. Portas *CAN High* e *CAN Low*
- F. Alimentação 5V e *Ground*
- G. *Pins* extra de entrada (*Analog In*) do microcontrolador mbed
- H. Pin APCF (saída lógica de potência activa) e VARCF (potência reactiva ou aparente) do *chip* ADE7758

O passo seguinte foi a instalação das PCBs com os componentes soldados em caixas de plástico, de forma a proteger os componentes electrónicos e dar um aspecto mais profissional aos dispositivos montados. Foi necessário realizar algumas aberturas na caixa de plástico, para ligar os conectores e sensores de corrente, e permitir o acesso às *interfaces* de comunicação de dados.



Figura 79 – Dispositivo principal

Para o desenvolvimento deste projecto foi necessário utilizar três tipos de sensores diferentes, dado que a corrente máxima que passa em cada um dos quadros eléctricos possui uma grande variação de valores de corrente, onde em alguns pontos os valores de corrente são baixos – entre 0,01 e 5A, noutros são um pouco mais altos – entre 20 e 50A, enquanto noutros pontos o valor é elevado – entre os 350 e 700A. Além disso, também existia o problema de espaço para colocar os sensores. Como os quadros eléctricos possuem pouco espaço de armazenamento, foi necessário escolher os sensores com as dimensões ideais para cada ponto de medição, assim os sensores poderiam ficar escondidos na instalação do quadro eléctrico e ao mesmo tempo fornecer os dados dos consumos energéticos. Na Figura 80 são apresentados os diferentes dispositivos de aquisição de dados utilizados no projecto.

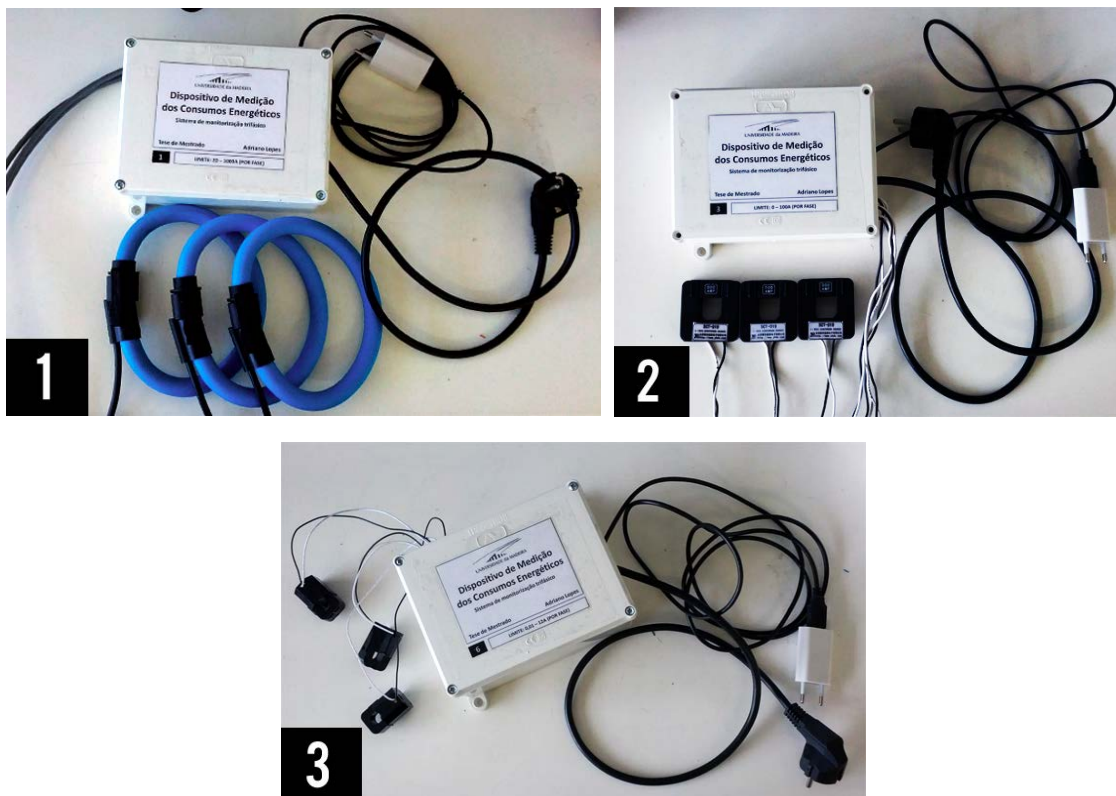


Figura 80 - Dispositivos de aquisição (1. Limite máximo 1000A; 2. Limitado a 100A; 3. Limitado a 12A)

Embora tenham sido utilizados três tipos de sensores diferentes, não foi necessário construir um circuito para cada um dos sensores. Foi possível utilizar o circuito apresentado na Figura 78, e trocar apenas a resistência que é colocada em cada fase, na entrada do sensor de corrente, pelo valor da resistência escolhido na secção 4.3.8, de condicionamento de sinal.

5.4 Funcionalidades do sistema

O sistema de monitorização dos consumos energéticos está actualmente a funcionar. Diversas funcionalidades foram implementadas no sistema. Para o dispositivo de aquisição de dados, algumas das funcionalidades implementadas incluem: a calibração do sistema, a leitura dos consumos energéticos, o envio dos dados dos consumos para o barramento CAN. Enquanto na parte do dispositivo principal, foi implementada a leitura dos consumos – disponível no barramento CAN, e envio dos dados dos consumos através da rede local/*Internet* para uma base de dados *MySQL*. No entanto, podem ser adicionadas novas funcionalidades de acordo com as necessidades da Universidade da Madeira ou dos responsáveis pela gestão do sistema, já que o sistema permite actualizações a nível de *hardware* e *software*.

5.5 Especificações do sistema

Na Tabela 28 e Tabela 29 disponível nos anexos, é possível encontrar as especificações dos dispositivos de aquisição de dados e do dispositivo principal.

5.6 Conclusões

O projecto de construção de um sistema de monitorização de energia a aplicar no edifício da Universidade da Madeira encontra-se na fase final de testes, com os dispositivos a serem configurados nos pontos de medição previamente definidos no projecto. Os dados dos consumos energéticos lidos pelo sistema de monitorização de dados são guardados numa base de dados *MySQL*. A *interface web* com base de dados *MySQL* é a segunda parte deste projecto e está a ser desenvolvida pelo aluno do Mestrado em Engenharia Informática, António Carvalho.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais para os protótipos desenvolvidos para a implementação do sistema de monitorização de energia ao edifício da Universidade da Madeira na Penteada, de forma a avaliar a capacidade do sistema e as especificações do projecto.

6.1 Calibração

Para garantir a qualidade dos dados foi necessário efectuar a calibração dos dispositivos de aquisição de dados. Na primeira fase do processo de calibração foi necessário eliminar a componente *offset* dos canais de entrada da tensão e da corrente para o ADE7758, seguindo-se a compensação da deslocação de fase e ajuste nos factores de conversão do *chip* de medição de energia.

6.1.1 *Offset* dos canais de entrada do ADE7758

O *chip* de medição dos consumos energéticos, o ADE7758, pode ser calibrado por *software* através da leitura de sinais de tensão e corrente conhecidos, de forma a fazer a compensação dos valores de *offset* DC e AC. O dispositivo de aquisição de dados foi programado para que seja possível efectuar a calibração da componente *offset* do ADE7758 de uma forma rápida e simples. O processo de calibração inicia-se com a execução do código de calibração do dispositivo, seguindo os passos descritos no fluxograma da Figura 70, onde é necessário usar um medidor de referência de forma a começar o primeiro passo de calibração. Inicialmente devem ser usados valores de tensão e corrente altos para teste (V_{NOM} e I_{TESTE}) e depois, valores baixos ($V_{FULLSCALE}/20$ e $I_{FULLSCALE}/500$).



Figura 81 - Auto-transformador variável monofásico OFICEL

De forma a conseguir fazer a calibração dos valores de *offset* de V_{RMS} e I_{RMS} foi necessário obter dois valores de tensão e de corrente – um valor alto e outro valor baixo. Para variar os valores de tensão, foi utilizado um auto-transformador variável monofásico disponível no laboratório, apresentado na Figura 81, de forma a obter um valor alto (por ex.: 226V) e um valor pequeno (por ex.: 25V), no canal de entrada da tensão. Enquanto para a corrente, foi utilizado o analisador de potência CHAUVIN ARNOUX C.A. 8332B e o quadro eléctrico do laboratório de Electrónica e Telecomunicações, apresentado na Figura 82, para fazer a calibração da componente *offset* para o I_{RMS} .



Figura 82 - Analisador de Potência com o sensor ligado ao quadro eléctrico ao mesmo tempo que o sensor de corrente do dispositivo de aquisição de dados para efectuar a calibração

A calibração de *offset* dos canais de entrada de tensão e corrente do ADE7758 traz diversas vantagens para o sistema de monitorização de energia porque elimina parte do erro introduzido pelos sensores de corrente e o transformador de tensão.

6.1.2 Deslocação da fase

A segunda parte da calibração do sistema foi representada pela compensação da deslocação de fase (*phase shift*), introduzida pelos sensores de corrente. O fabricante do sensor de corrente Dent RoCoil mV CT16" (CT-RMV-16-1000-U) especifica que a deslocação do sensor é $<1^\circ$. No caso dos sensores SCT-019-000 e do CT801-10, os seus fabricantes não especificam a deslocação de fase de cada sensor. Logo, foi necessário recorrer ao osciloscópio digital Tektronix TDS 1002B, que apresenta uma resolução de 1° e uma exactidão a 1° no cálculo da deslocação de fase na comparação entre dois sinais. Na entrada A do osciloscópio (onda amarela) foi ligado o sinal de tensão da rede eléctrica (sinal condicionado) e na entrada B (onda azul) foi ligado o sinal de tensão

produzido pelo sensor de corrente SCT-019-000, proporcional ao sinal de corrente consumida por um equipamento eléctrico com um factor de potência $PF = 1$. Na Figura 83 é possível observar que o sinal da entrada B, da corrente ligada pelo sensor SCT-019-000, tem um atraso $< 1^\circ$ em relação ao sinal de tensão da rede eléctrica, na entrada A.

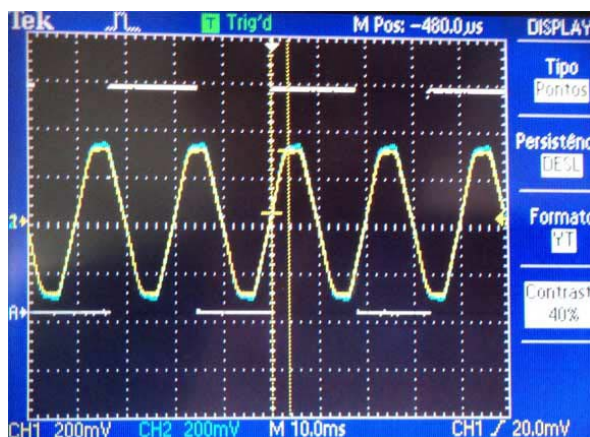


Figura 83 - Leitura da deslocação de fase introduzida pelo sensor SCT-019-000

Para o sensor de corrente CT801-10 também foi necessário realizar o procedimento anterior, pois o fabricante do sensor não especifica a deslocação de fase (*phase shift*) introduzida por este sensor. Na entrada A do osciloscópio (onda azul) foi ligado o sinal de tensão da rede eléctrica (sinal condicionado) e na entrada B (onda amarela) foi ligado o sinal de tensão produzido pelo sensor de corrente CT801-10, proporcional ao sinal de corrente. Através da Figura 84 é possível verificar que o sensor de corrente CT801-10 tem um atraso $< 1^\circ$ em relação ao sinal de tensão da rede eléctrica.

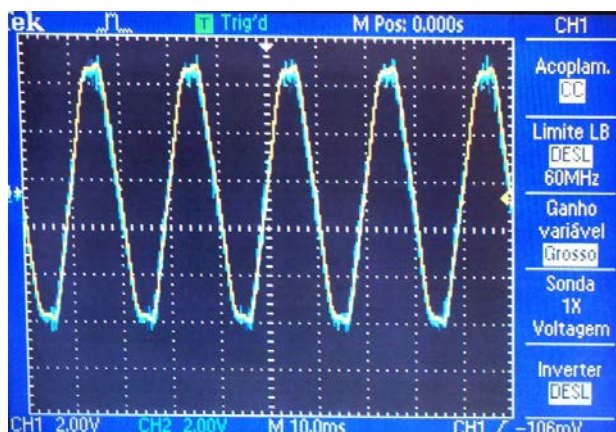


Figura 84 - Leitura da deslocação de fase introduzida pelo sensor CT801-10

Para os sensores de corrente CT-RMV-16-1000-U, SCT-019-000 e CT801-10 foi realizado a compensação da deslocação da fase através do processo de calibração de fase, disponibilizado pelo chip ADE7758 de forma a diminuir os erros na medição. No

entanto, como a deslocação de fase dos sensores utilizados é relativamente baixa, e como não é necessária uma grande exactidão na medição, este passo podia ser considerado como opcional.

6.1.3 Factores de conversão

O último passo do processo de calibração passou pelo ajuste dos factores de conversão utilizados para converter os dados dos consumos energéticos medidos e guardados no ADE7758, nos registos de 3 bytes para valores reais. Estes factores dependem normalmente nas resistências que foram utilizadas para o condicionamento dos sinais de corrente e de tensão. De forma a minimizar o erro de conversão, todas as resistências foram medidas e utilizados os valores reais. Para medir as resistências foi utilizado um multímetro Fluke 110, que oferece uma resolução de $0,1\Omega$ e uma exactidão inferior a 0,9%.

6.2 Erros de medição

Depois de efectuada a calibração dos dispositivos de aquisição de dados foram efectuados diversos ensaios, de forma a determinar os erros de medição do valor eficaz da corrente (I_{RMS}), do valor eficaz da tensão (V_{RMS}) e da potência activa (P_{activa}).

Para verificar os valores de I_{RMS} e V_{RMS} medidos pelos dispositivos de aquisição de dados, os valores da medição foram comparados com os valores medidos pelo multímetro Fluke 110. Este multímetro tem a vantagem de ser *True RMS* e apresentar uma resolução de 0,1V e uma exactidão inferior a 1% - para medição de tensões alternadas, e uma resolução de 0,001A e uma exactidão inferior a 1,5% - para medição de correntes alternadas.

6.2.1 Valor eficaz da tensão

O sinal de tensão é lido directamente do transformador de potência, podendo ter uma variação de $\pm 10\%$. Por isso, bastou ligar o dispositivo de aquisição à rede eléctrica e efectuar algumas leituras para determinar o erro de medição de V_{RMS} .

V_{RMS} (V)		Erro de medição (%)
Fluke 110	Protótipo	
225,90	226,22	0,14
226,00	226,32	0,14
226,70	226,86	0,07
227,20	227,43	0,10

Tabela 21 - Erro de medição do valor eficaz de tensão

Como é possível verificar os dados apresentados na Tabela 21, o dispositivo de aquisição de dados desenvolvido apresenta um erro de medição de V_{RMS} inferior a 0,15%, o que é razoável face à aplicação a que se destina.

6.2.2 Valor eficaz da corrente

Dado que existem vários dispositivos de aquisição de dados para suportar os três sensores diferentes, utilizados neste sistema de monitorização de energia, foi necessário criar uma tabela para cada um dos sensores utilizados. Como o dispositivo de aquisição de dados é capaz de medir correntes alternadas até 12A (sensor CT801-10), 100A (sensor SCT-019-000) e 1000A (CT-RMV-16-1000-U), foi necessário realizar testes para diferentes valores de corrente. Foi utilizada uma fonte conhecida para produzir uma corrente alternada que permitisse testar os dispositivos. Nas tabelas abaixo são apresentados os valores do erro de medição de I_{RMS} :

I_{RMS} (A)		Erro de Medição (%)
Analizador de potência	Protótipo	
0,150	0,152	1,40
1,200	1,209	0,71
1,600	1,610	0,60
2,520	2,531	0,45
5,100	5,110	0,20
7,500	7,510	0,13
8,050	8,059	0,11

Tabela 22 - Erro de medição do valor eficaz da corrente para o sensor CT801-10

I_{RMS} (A)		Erro de Medição (%)
Analizador de potência	Protótipo	
5,100	5,184	1,65
7,500	7,581	1,08
8,050	8,127	0,96
13,650	13,754	0,76
15,350	15,456	0,69
22,450	22,529	0,49
26,340	26,419	0,45

Tabela 23 - Erro de medição do valor eficaz da corrente para o sensor SCT-019-000

I_{RMS} (A)		Erro de Medição (%)
Analizador de potência	Protótipo	
5,65	6,020	6,50
15,150	15,470	2,10
22,450	22,670	0,96
32,040	32,330	0,89
480,000	481,490	0,31
560,000	561,510	0,27

Tabela 24 - Erro de medição do valor eficaz da corrente para o sensor CT-RMV-16-1000-U

Como era de esperar, para um valor de I_{RMS} muito baixo, o dispositivo de aquisição de dados apresenta um erro de medição alto. Este problema deve-se ao ruído presente na entrada do sinal do sensor de corrente, por isso é importante escolher um sensor de corrente com uma escala pequena ou fazer o condicionamento de sinal apropriado. O ADE7758 só tem uma exactidão de 0,1% para uma gama de entrada de correntes entre 0,5% e 100% do valor máximo de 1V de pico a pico. No entanto, se o dispositivo de aquisição medir correntes com um valor eficaz superior a 1A – para o sensor CT801-10, 8A – para o sensor SCT-019-000, ou 20A - para o sensor CT-RMV-16-1000-U, o erro de medição é inferior a 1%, conforme é possível verificar nas tabelas acima para cada um dos sensores de corrente utilizado.

Para o sensor de corrente CT-RMV-16-1000-U é natural obter um erro de medição muito alto para valores baixos de corrente, relativamente ao limite máximo de medição. Como este sensor de corrente é para usar em pontos de medição onde o consumo é sempre superior aos 180A, então não existirá o problema de obter medições de consumos com erros de medição altos.

6.2.3 Potência activa

Para determinar o erro de medição da P_{activa} foi necessária realizar diversas medições com cargas com $PF = 1$. Os valores medidos de P_{activa} pelo dispositivo de aquisição de dados foram comparados com os valores de potência medidos pelo analisador de potência Chauvin Arnoux C.A. 8332B. As tabelas abaixo apresentam os resultados da avaliação do erro de medição de P_{activa} para os diferentes sensores de corrente utilizados neste projecto.

Protótipo			P_{activa} Calculada (W)	Erro de Medição (%)
V_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	P_{activa} (W)		
226,40	0,127	29,21	28,75	1,60
226,70	0,354	81,38	80,25	1,40
226,90	1,300	296,95	294,97	0,67
227,10	3,568	813,70	810,29	0,42
227,10	4,980	1134,46	1130,96	0,31
227,40	7,500	1707,21	1705,50	0,10

Tabela 25 - Erro de medição da potência activa para o sensor CT801-10 (PF = 1)

Protótipo			P_{activa} Calculada (W)	Erro de Medição (%)
V_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	P_{activa} (W)		
227,10	3,56	835,56	808,48	3,35
227,20	8,65	1988,86	1965,28	1,20
227,40	12,62	2883,28	2869,79	0,47
227,50	15,45	3526,12	3514,88	0,32
227,50	19,54	4454,69	4445,35	0,21
227,70	24,46	5575,11	5569,54	0,10

Tabela 26 - Erro de medição da potência activa para o sensor SCT-019-000 (PF = 1)

Protótipo			P_{activa} Calculada (W)	Erro de Medição (%)
V_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	P_{activa} (W)		
226,40	10,56	2457,73	2390,78	2,80
226,70	16,54	3802,11	3749,62	1,40
226,90	24,45	5151,98	5093,91	1,14
227,10	30,65	7028,13	6960,62	0,97
227,20	480,50	109289,69	109169,60	0,11
227,40	540,25	122975,70	122852,85	0,10

Tabela 27 - Erro de medição da potência activa para o sensor CT-RMV-16-1000-U (PF = 1)

De acordo com as tabelas acima, é possível verificar que a P_{activa} medida pelo dispositivo de aquisição de dados tem, em média, um desvio de 2W – para o sensor CT801-10, 15W – para o sensor SCT-019-000, ou 81W - para o sensor CT-RMV-16-1000-U, em relação à potência calculada pelo analisador de potência Chauvin Arnoux CA 8332B. O erro de medição de P_{activa} para potências baixas é maior, devido à

sensibilidade do sensor. No entanto, para medir cargas superiores a A – para o sensor CT801-10, A – para o sensor SCT-019-000, ou A - para o sensor CT-RMV-16-1000-U, o erro de medição será sempre inferior a 1%.

6.3 Montagem e Monitorização

Depois de ter sido efectuada a calibração dos dispositivos de aquisição de dados, e a verificação dos dados dos consumos energéticos obtidos através dos dispositivos, foi necessário instalar os dispositivos em cada um dos pontos de medição previamente definidos, para começar a guardar na base de dados *MySQL* os dados dos consumos energéticos do edifício da Penteadá da Universidade da Madeira. A Figura 85 mostra como foram instalados os dispositivos de aquisição no edifício da Penteadá da Universidade da Madeira, de forma a serem fáceis fazer manutenção no futuro.

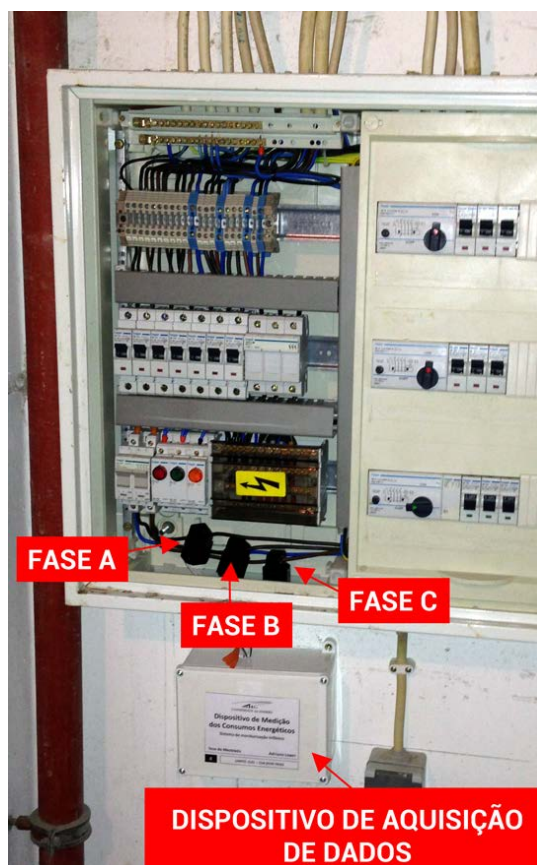


Figura 85 - Exemplo de instalação dos dispositivos de aquisição de dados

Após a instalação, todos os dispositivos de aquisição de dados foram ligados ao barramento físico, de forma a poderem começar a ler e enviar dados usando o barramento CAN. A Figura 86 mostra as ligações do barramento. Os fios soldados à placa representam os pontos de medição espalhados pelo edifício. De forma a poder aumentar ainda mais o número de pontos de medição no futuro, foram criadas portas extras de propósito, para que não seja necessário fazer um novo circuito.



Figura 86 - Circuito do barramento CAN com todos os dispositivos de monitorização conectados

Com os dispositivos de aquisição de dados a funcionar correctamente, todos os consumos obtidos nos pontos de medição são enviados para uma base de dados *MySQL*, onde é possível visualizar através de uma *Interface Web*. A *Interface Web* está localizada num PC local, para que os consumos possam ser monitorizados, no entanto, devido às características deste projecto é possível colocar os dados *online* sem custos extra, basta ter acesso a um servidor *web* com suporte *PHP* e *MySQL*.



A segunda parte deste projecto está ser desenvolvido pelo colega do Mestrado em Engenharia Informática António Carvalho, e baseia-se no desenvolvimento de uma Interface Web com base de dados *MySQL*, apresentada na Figura 87. Através desta interface é possível verificar através de um navegador web, os consumos energéticos por piso, fazer comparações entre períodos homólogos, obter uma estimativa do custo em euros da energia consumida pelo edifício, receber alertas de consumos excessivos, entre outras funcionalidades.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES FINAIS

O projecto de desenvolvimento e implementação do sistema de monitorização de energia eléctrica para o edifício da Penteada da Universidade da Madeira, objecto da dissertação, encontra-se concluído. De todos os pontos de medição previamente definidos, só não foi possível instalar e obter dados dos consumos do AVAC, localizado no piso -3, porque o mesmo encontra-se avariado. No entanto, quando o mesmo entrar em funcionamento, vai ser instalado um dispositivo de aquisição no local, para que se possa conhecer os consumos ao longo do ano, pois o AVAC é um dos pontos de maior consumo e tem uma grande importância nos custos energéticos do edifício.

O estudo dos diversos sistemas de monitorização de energia eléctrica disponíveis no mercado, foi essencial para poder compreender e definir as funcionalidades e requisitos deste sistema. Desta forma, o produto final obtido através deste projecto poderá ser implementado noutros lugares, como é o caso de edifícios de dimensão semelhante, edifícios públicos e privados ou escolas.

Apesar do custo total do projecto ser de 2260,70€ e parecer algo elevado para os objectivos a cumprir, que se podem traduzir na diminuição dos custos energéticos e optimização dos recursos, basta uma poupança mensal de pelo menos 2% nos custos energéticos para, em menos de um ano, o sistema de monitorização ser pago na totalidade e representar uma poupança significativa ao fim do mês. Estes cálculos têm em conta as facturas da electricidade disponibilizadas pela Universidade da Madeira no âmbito deste projecto, que apresentam um valor médio mensal de 10.500€.

Este projecto foi apresentado durante a Expo Energias 2012, que fez parte das jornadas de energia promovida pela Câmara Municipal do Funchal, depois de ter sido um dos dois projectos premiados com o primeiro prémio do Prémio Fernão Ornelas.

Durante o desenvolvimento do sistema foram identificados alguns pontos que poderão ser melhorados ou explorados em trabalhos futuros. De seguida são apresentados algumas sugestões no sentido de:

- Adicionar mais inteligência ao sistema de monitorização de energia;
- Utilizar componentes de menores dimensões e optimizar o tamanho da placa;
- Criar uma aplicação para iPhone/Android que permita verificar os consumos em tempo real e controlar o sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios”, AREAM, http://www.aream.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=39&Itemid=2&lang=pt (Consultado a 8 de Maio de 2012)
- [2] S. Darby, “The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption”, UK: Environmental Change Institute of University of Oxford, Artigo, 2006
- [3] C. –H. Lien, Y. –W. Bai, H. –C. Chen, C. –H. Hung, “Home appliance energy monitoring and controlling based on Power Line Communication”, Consumer Electronics, 2009. ICCE '09. Digest of Technical Papers, International Conference on Las Vegas, NV, 10-14 Janeiro de 2009
- [4] S. Tompros, N. Mouratidis, M. Draaijer, A. Foglar e H. Hrasnica, “Enabling Applicability of Energy Saving Applications on the Appliances of the Home Environment”, IEEE Network, Vol. 23, No 6, November-December 2009
- [5] W. Na, Y. Wu, Y. Song, “Government management and implementation of national real-time energy monitoring system for China large-scale public building”, Science Direct, 27 de Fevereiro de 2009
- [6] J. W. Fonda, M. J. Zawodniok, S. Jagannathan, A. Salour, D. Miller Jr, “Missouri S&T Mote-Based Demonstration of Energy Monitoring Solution for Network Enabled Manufacturing Using Wireless Sensor Networks (WSN)”, IEEE Computer Society, Washington, IPSN '08 Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks , 2008
- [7] C. Yongpan, M. Xianmin, Z. Jili, L. Zhen, “Development of Monitoring System of Building Energy Consumption”, Computer Science-Technology and Applications, 2009. IFCSTA '09. International Forum on Chongqing, 25-27 Dec. 2009
- [8] T. Nagata, “An electric power energy monitoring system in campus using an Internet”, Power Engineering Society, General Meeting, 2006. IEEE, 16 de Outubro de 2006
- [9] A. Matta, A. Heitz, B. Banerjee, “Use of sensor-based feedback technology in reducing home energy consumption”, IEEE, Collaboration Technologies and Systems (CTS), 2011 International Conference on Philadelphia, PA, 11 de Julho de 2011
- [10] “Bentley Campus Energy Monitoring Solution”, Curtin University, http://properties.curtin.edu.au/about/projects/energy_monitoring.cfm (Consultado a 8 de Maio de 2012)
- [11] Pulse energy, “McGill University Selects Pulse Energy to Cut Campus Energy Use 12%”, <http://www.pulseenergy.com/site/pulse/mcgill-university-selects-pulse-energy-to-cut-campus-energy-use-12/> (Consultado a 8 de Maio de 2012)
- [12] Blue Henergy, University of Delaware, <http://web.facilities.udel.edu/bluehenergy/> (Consultado a 8 de Maio de 2012)

- [13] “Energy Control Center - Building Energy Dashboards”, <http://facilities.uiowa.edu/uem/energy-management/ecc-bldg-dashboard.asp> (Consultado a 8 de Maio de 2012)
- [14] “University campus energy monitoring in France”, <http://openenergymonitor.blogspot.pt/2012/01/openenergymonitor-in-france.html> (Consultado em Maio de 2012)
- [15] OpenEnergyMonitor, <http://openenergymonitor.org> (Consultado a 8 de Maio de 2012)
- [16] Home Energy Monitor Kit Bundle 868Mhz (Europe only), <http://shop.openenergymonitor.com/home-energy-monitor-kit-bundle-868mhz/> (Consultado a 10 de Maio de 2012)
- [17] OpenEnergyMonitor Shop, <http://shop.openenergymonitor.com> (Consultado em 10 Maio 2012)
- [18] “Build a home electricity monitoring system”, <http://openenergymonitor.org/emon/applications/homeenergy> (Consultado a 10 de Maio de 2012)
- [19] emonBase, <http://openenergymonitor.org/emon/emonbase> (Consultado a 10 de Maio de 2012)
- [20] Efergy e2, http://www.efergy.com.pt/store/product.php?id_product=10 (Consultado a 10 de Maio de 2012)
- [21] Efergy Elite, http://www.efergy.com.pt/store/product.php?id_product=11 (Consultado a 10 de Maio de 2012)
- [22] “PT MEO e ISA lançam Energy para Consumos de Electricidade”, Blog A minha Alegre Casinha, <http://aminhaalegrecasinha.com/2012/02/pt-meo-e-isa-lancam-energy-para.html> (Consultado em 10 Maio 2012)
- [23] EnerBook, <http://www.enerbook.pt>
- [24] “TED 5000 Home Energy Monitor”, Loja Online PowerMeterStore.com, http://www.powermeterstore.com/p7774/ted_5000.php (Consultado a 10 de Maio de 2012)
- [25] “Acuvim IIE Power & Energy Meter”, PowerMeterStore.com, http://www.powermeterstore.com/p8466/acuvim_iiie.php (Consultado a 10 de Maio de 2012)
- [26] “Dent Instruments ELITEpro SP Recording Power Meter”, PowerMeterStore.com, http://www.powermeterstore.com/p10662/dent_instruments_elitepro_sp.php (Consultado a 12 de Maio de 2012)
- [27] “Opto 22 OptoEMU Sensor Energy Monitoring Unit”, PowerMeterStore.com, http://www.powermeterstore.com/p8919/opto_22_optoemu_sensor.php (Consultado a 12 de Maio de 2012)
- [28] Pulse Energy, <http://www.pulseenergy.com>
- [29] “Powerline Communications – Realidade nos lares portugueses”, PPLWare, <http://pplware.sapo.pt/informacao/powerline-communications-realidade-nos-lares-portugueses/> (Consultado a 12 de Maio de 2012)

- [30] “Entenda como funciona o PLC: internet pela rede elétrica”, Tecnoblog, <http://tecnoblog.net/1236/entenda-como-funciona-o-plc-internet-pela-rede-eletrica/> (Consultado a 12 de Maio de 2012)
- [31] “Vantagens e Desvantagens da Powerline”, <http://mysteriis.web.simplesnet.pt/Tecnologias/powerline/doc/9.htm> (Consultado a 12 de Maio de 2012)
- [32] A. Antunes, A. Mota, “O protocolo CAN”, 1^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia, Leiria, Novembro de 2001
- [33] CAN Benefits, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2732#toc1> (Consultado a 17 de Maio de 2012)
- [34] Extending the reach of your CAN application, <http://copperhillmedia.com/cannewsletter/article1.html> (Consultado a 17 de Maio de 2012)
- [35] “3 Phases AC monitoring”, OpenEnergyMonitor Blog, <http://openenergymonitor.blogspot.pt/2012/02/if-you-are-active-member-of.html> (Consultado em 17 de Maio de 2012)
- [36] Datasheet Microchip MCP2551, MICROCHIP, <http://pt.farnell.com/microchip/mcp2551-e-p/ic-can-transceiver-dip8-2551/dp/1439745> (Consultado em 29 Maio 2012)
- [37] “mbed Microcontrollers”, mbed website, <http://mbed.org/handbook/mbed-Microcontrollers> (Consultado em 1 de Junho de 2012)
- [38] “Cortex-M3 Processor”, ARM website, <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m3.php> (Consultado em 1 de Junho de 2012)
- [39] “mbed NXP LPC1768”, mbed website, <http://mbed.org/handbook/mbed-NXP-LPC1768> (Consultado em 1 de Junho de 2012)
- [40] “mbed online compiler”, mbed website, <https://mbed.org/compiler/> (Consultado em 1 de Junho de 2012)

ANEXO 1 – LISTA DE MATERIAL

Descrição	Preço (€)	Código Farnell
Microcontrolador mbed NXP LPC1768	50,97	1761179
Microchip CAN Transceiver MCP2551-E/P	1,60	1439745
Stewart Connector – SI-61007-F – MAGJACK RJ45 Gigabit W/O LEDS	12,94	1572193
LED 5mm Vermelho	0,18	1003232
LED 5mm Verde	0,18	1003234
Condensador electrolítico 33nF	0,30	1216436
Condensador electrolítico 22pF	0,10	1141760
Condensador electrolítico 10µF	0,27	1144640
Condensador electrolítico 100mF	0,08	9451625
Resistência 15Ω 3W 5%	0,181	2117959
Resistência 1kΩ 0,25W 5%	0,29	1265072
Resistência 2,2kΩ 0,25W 5%	1,32	1879009
Resistência 27kΩ 5W 5%	1,60	1692552
Resistência 33kΩ 5W 5%	2,10	1179801
Resistência 39kΩ 0,25W 5%	0,97	1133393
Cristal 10MHz	2,12	2063946

Descrição	Preço (€)	Código dx.com
USB Power Adapter	1,90	48615

Descrição	Preço (€)	Código iteadstudio.com
Sensor de Corrente SCT-019-000 (Máximo 200A)	11,50	SCT-019-000

Descrição	Preço (€)	Código powermeterstore .com
Sensor de Corrente Dent RoCoil mV CT 16" (máximo 1000A)	155	DT CT-RMV-16-1000-U

Descrição	Preço (€)	Código alibaba.com
Sensor de corrente CT801-10 (lote de 10 sensores)	25	CT801-10

Descrição	Preço (€)	Código rudadanet.com
Bobine Cabo de ligação UTP Cat5e 300 metros	23,50	65504A 300M

Descrição	Preço (€)	Código digikey.com
Analog Devices ADE7758	10,82	ADE7758ARWZ-ND

Descrição	Preço (€)	Código sonigate.com
Transformador AC-AC Encapsulado Primário 230V Secundário 6V 2.4VA	7,08	6V2VA

ANEXO 2 – ESPECIFICAÇÕES DOS DISPOSITIVOS

Parâmetro	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
-----------	---------	--------	--------	--------	----------

Condição de Funcionamento normal para o Dispositivo de Aquisição de dados					
Gama de Tensão	V_{RMS}	207	230	253	V
Gama de Corrente sensor 1	I_{RMS1}	0	-	1000	A
Gama de Corrente sensor 2	I_{RMS2}	0	-	100	A
Gama de Corrente sensor 3	I_{RMS3}	0	-	12	A
Frequência	Freq	-	50	-	Hz

Erros de Medição ⁽¹⁾					
V_{RMS} (207 – 253 V)	V_{erro}	-	< 0,15	-	%
I_{RMS} sensor 1 (1000A)	I_{erro1}	-	< 1	-	%
I_{RMS} sensor 2 (100A)	I_{erro2}	-	< 1	-	%
I_{RMS} sensor 3 (12A)	I_{erro3}	-	< 1	-	%
P_{activa} sensor 1 (115 – 450000 W)	P_{erro1}	-	< 1	-	%
P_{activa} sensor 2 (115 – 25500 W)	P_{erro2}	-	< 1	-	%
P_{activa} sensor 3 (115 – 3055 W)	P_{erro3}	-	< 1	-	%

Consumos dos dispositivos ⁽²⁾					
Dispositivo de aquisição	I_{DAD}	-	159	202	mA

Características da Comunicação CAN					
Baud rate	B_r	-	500	-	kbits/s
Distância	D_T	-	-	100	m

(1) Os cálculos dos erros de medição são apresentados no capítulo 6.2 Erros de medição

(2) Consumos típicos dos dispositivos medidos durante os testes de funcionamento

sensor 1 = CT-RMV-16-1000-U | sensor 2 = SCT-019-000 | sensor 3 = CT801-10

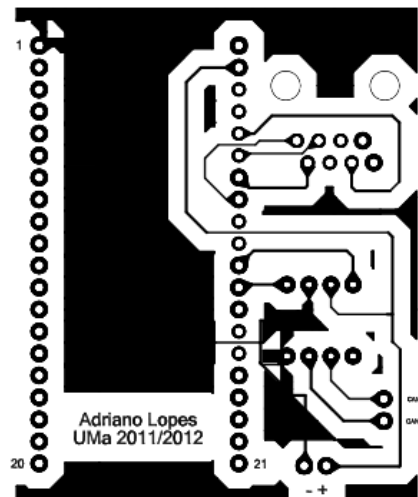
Tabela 28 - Especificações dos dispositivos do sistema de monitorização

Parâmetro	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Consumos dos dispositivos					
Dispositivo principal	I _{DP}	-	151	203	mA
Características da Comunicação CAN					
Baud rate	B _r	-	500	-	kbits/s
Distância	D _T	-	-	100	m
Características da Comunicação <i>Ethernet</i>					
Velocidade de transmissão	V _T	-	-	100	Mbit/s
Distância	D _T	-	-	100	m

Tabela 29 - Especificações do dispositivo principal

ANEXO 3 – LAYOUTS PCB

A. Dispositivo principal

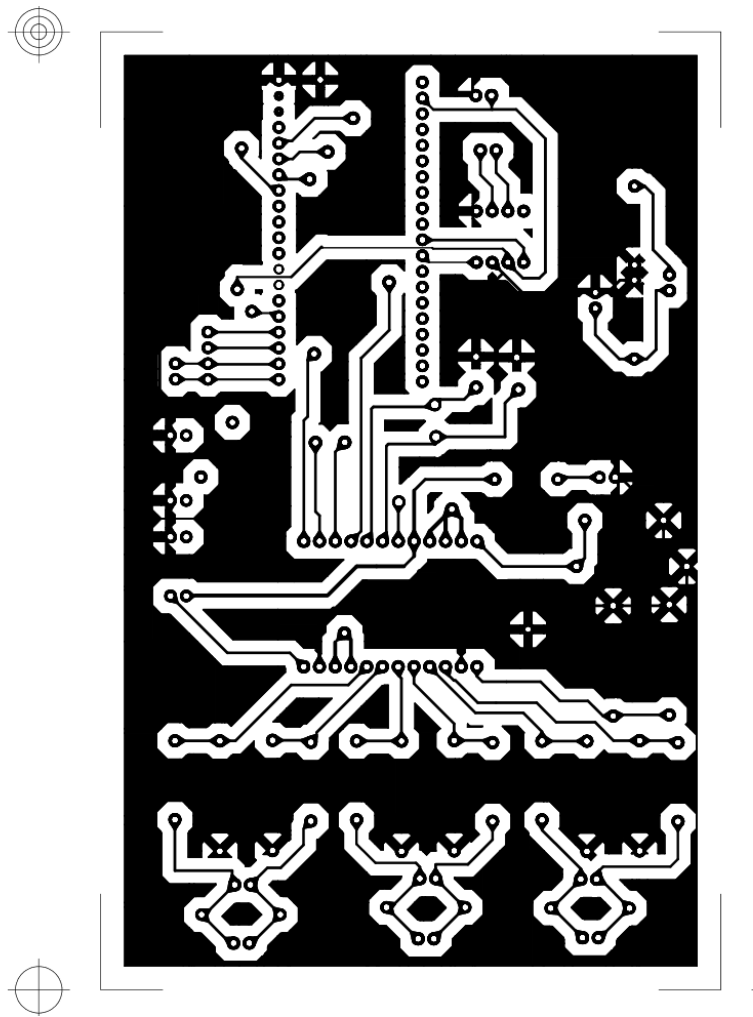


B. Dispositivo de aquisição de dados

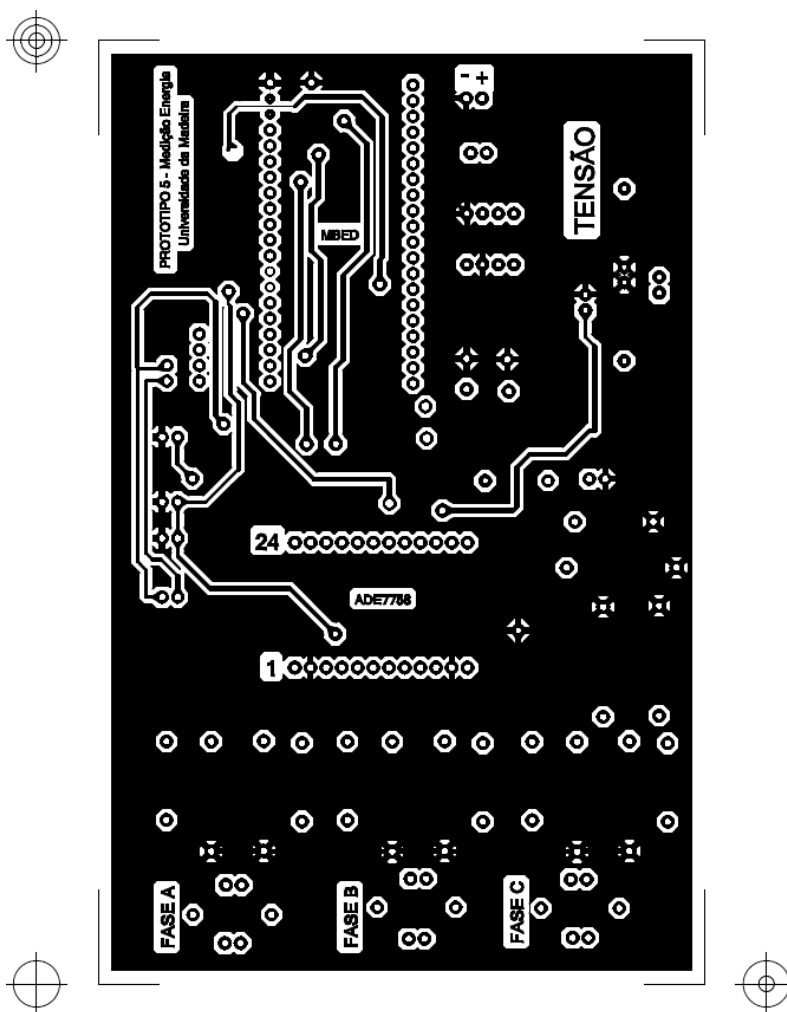
(Placa do transformador de tensão)



(Placa principal – Cooper Bottom)

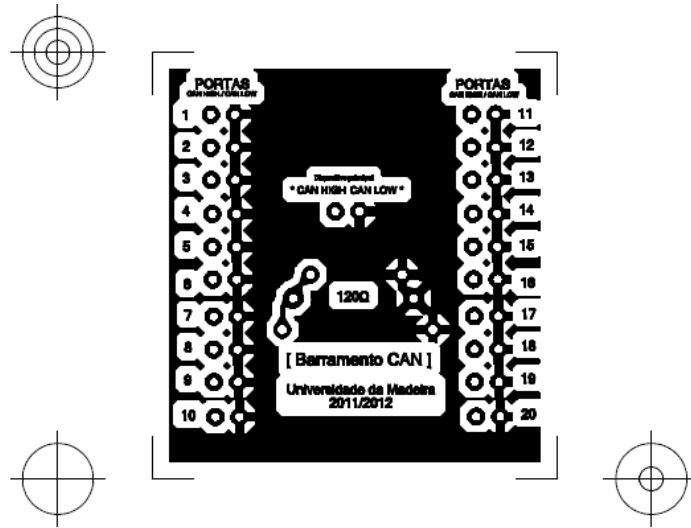


(Placa principal – Cooper Top)

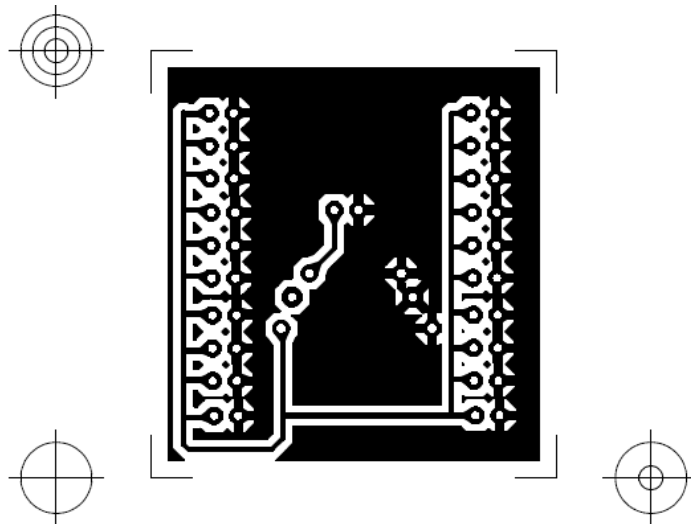


C. Barramento CAN

(Barramento CAN – Cooper Top)



(Barramento CAN – Cooper Bottom)



ANEXO 4 - ARTIGO DA CONFERÊNCIA CONTROLO2012

MONITORING AND MANAGEMENT OF ENERGY IN PENTEADA BUILDING – A CASE STUDY

Adriano Lopes¹, António Carvalho¹, Filipe Oliveira² and Fernando Morgado-Dias¹

¹*Madeira Interactive Technologies Institute and Centro de Competências de Ciências Exactas e da Engenharia,
Universidade da Madeira
Campus da Penteada, 9000-039 Funchal, Madeira, Portugal.
Tel: +351 291-705150/1, Fax: +351 291-705199*

²*Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira,
Edifício Madeira Tecnopolo
9020-105 Funchal, Madeira, Portugal
Tel: +351-291723300
morgado@uma.pt*

Abstract: This paper describes a low cost monitoring and management energy project that is currently being implemented and tested at the main University of Madeira building in Penteada. The project is composed of a data acquisition system, a communication system, a database, a management tool and an interface for internet access. Data is collected at relevant points through the building over more than 200 meters distance, sent to the database, processed and displayed with the interface. The management tool allows introducing base energy costs, yearly calendar for the university activities and other relevant information and processes this data to compare consumption for similar periods, in different points of the building, under different atmospheric conditions and issuing e-mail and sms alerts to the administrators of the building. The current work is part of a strategy to improve the energy efficiency of the building and its results will be used for decision making about the interventions.

Keywords: Monitoring elements, Sensors, Energy management systems

1. INTRODUCTION

Energy efficiency has become a very important issue since several analysis led to an understanding that there is more to achieve by improving efficiency, with less investment involved, when compared with many renewable energy solutions available.

Large public buildings are usually problematic in terms of energy consumption. They are difficult to monitor and manage in terms of energy and usually are not an example of efficiency.

The issue of energy monitoring and management in buildings has been studied in many different research

works. As examples it is possible to point out: home (Tompros et. al, 2009); home using power line communication (Chia-Hung et. al, 2009); internet based campus energy monitoring system (Nagata, 2006); Mosque (Al-Homoud et. al, 2005); industrial with Wireless Sensor Network - WSN (Fonda et. al, 2008) and large public buildings (Yongpan et. al, 2009). In (Wei et. al, 2009), national policy for large scale public buildings is also discussed.

The present work, which is still under development, aims to build a generic solution for monitoring and energy management in a building.

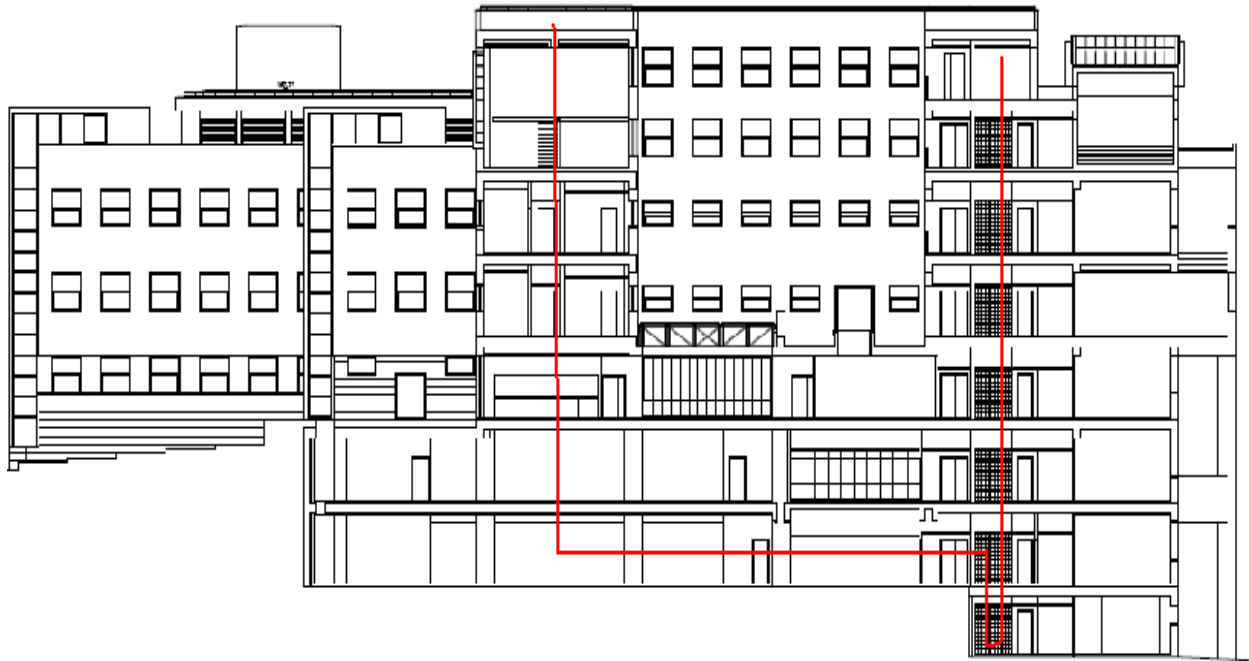


Fig. 1. Lateral view of the building with a red line showing the communication path

The main objective is to develop a system that allows to collect energy data and build a database for future reference and comparison in order to determine the utility of energy intervention in the building (to lower consumption) and the influence of external factors such as temperature, humidity and lighting (this can also lead to intervention in the building).

The project must be developed using generic, low cost components with open software so that its implementation and use do not represent an important additional cost.

The case study chosen to test the solutions developed is the main building of the University of Madeira in Portugal. This building, used mainly for research and teaching has around 3500 daily users and includes classrooms, laboratories, offices, parking, bar, canteen, copy center and commercial spaces.

2. MONITORING SYSTEM

The monitoring system comprises environmental data, such as temperature, humidity and luminosity. The environmental data is provided by a pre-existent Wireless Sensor Network (WSN), which is connected to the main database.

The data acquisition system is going to be installed along the building. Figure 1 shows a lateral view of the building. The red line represents a possibility to build a communication system through the building using service areas to pass the communication cable. After studying the building it was immediate to conclude that WSN was not an option due to the obstacles and price that such a solution would cost with this large distance to cover.

Ideally it would be of interest to measure all the lighting consumption to analyze the influence of external light and evaluate future improving in the lighting system (replacement of the actual equipment for more efficient one). Unfortunately, for this building this would imply measuring every partial circuit breaker panel (many different points in each floor, including one in each laboratory) and this would be both too expensive and difficult to implement in terms of communication system.

After detailed analysis the measurement points are:

- Common lighting (main halls and corridors), three-phase measurement – Measured next to the energy entrance at the lower level of the building;
- Classroom lighting, measure at the partial circuit breaker panel – 10 measurements in 5 floors.
- Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC), three phase measurement – Measured next to the energy entrance at the lower level of the building;
- Main power supply, three-phase measurement – Measured next to the energy entrance at the lower level of the building;

In total, this amounts to 19 measurement points and data transmission along almost 200 meters.

2.1 Type of communication system

The desired monitoring system needs to be cheap so that the economic benefits introduced by monitoring and improving the efficiency are not absorbed by its cost. The system also needs to be stable and reliable in order to attain low operating costs.

In order to choose the communication system several solutions were considered, including the following ones:

- Power line – Advantage: allows transmission at reasonably long distances. Disadvantages: cost and difficulty to find multipoint solutions. The basic

communication elements were found starting at 44€ (approx.).

- Wireless – although there are many technical solutions for wireless transmission, there are 3 main obstacles: i) periodic replacement of batteries; ii) difficulty to guarantee that the position of the elements in the technical areas is not changed, blocking signal transmission; iii) the number of transmission points necessary to guarantee the appropriate transmission in an environment with many obstacles. XBee is one of the most popular solutions that can be used to implement this protocol and the basic communication elements costs 27€ (approx.).

- Ethernet – Advantage: stable, reliable and low maintenance costs. Disadvantages: there are no connection points next to the measurement places. To implement this solution there is a huge variety of connectors with prices starting at 9€(approx.).

- Controller Area Network (CAN) – Advantage: can be implemented over different transmission media, has many low cost hardware platforms, developed by different manufacturers. To implement this protocol there are some microchips available, with prices starting at 2€(approx.).

The latter solution was chosen to implement the communication system and some of its relevant aspects are pointed out in the following section.

3. CONTROLLER AREA NETWORK

CAN communication protocol was developed during the eighties for industry applications, namely the automobile industry, with real-time requirements (Antunes and Mota, 2001). CAN protocol is regulated by standards such as ISO 11898-1, 11898-2, 11898-3 and 11898-4 (Road Vehicle 2003a) (Road Vehicle 2003b) and had a rapid growth of use in the industry, namely in industrial control applications.

CAN protocol is serial, with multi master capabilities, follows the producer-consumer paradigm and presents a high performance and robustness. Since it is a serial protocol, a single bus is used to connect all the nodes (Antunes and Mota, 2001).

The conceptual architecture of CAN, used with CAN Open, defines 3 layers from the Open Systems Interconnection (OSI) model: Application layer, Data Link layer and Physical layer (Antunes and Mota, 2001).

CAN has several advantages but one of the most interesting ones for the present work is the possibility to work over long distances. Table presents the relation between distance and maximum baud rate.

Table 1 - Distance and maximum baud rate relation.

Baud Rate (kbits/s)	Maximum distance (m)
1000	30
500	100
250	250
125	500
62.5	1000

3.1 CAN Hardware

CAN hardware chosen for this project is the mbed board that can be seen in figure 2. This hardware offers:

- Development environment and compiler accessible through the internet;
- Libraries with examples;
- Simplicity of use: the software works as an USB pen. It is sufficient to drag and drop the files for compilation, files in mbed website (www.mbed.org);
- Small size: Dual In-line Package (DIP) format with only 53mmx30mm.
- Accessible price: with transceivers for the selected bus, it costs about 50€

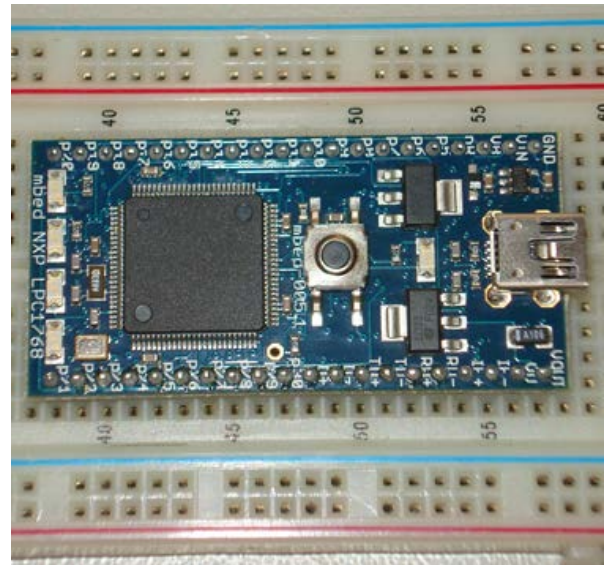


Fig. 2. mbed Microcontroller

4. DATA ACQUISITION SYSTEM

The data acquisition system is under development and is composed of:

- 10 current transducers of 200 Amperes for each of the partial circuit breaker panels;
 - 9 current transducers of 1000 Amperes for the main energy supply, HVAC and common lighting;
 - 10 mbed microcontrollers for processing data and CAN communication, with 18 CAN Bus transceivers for rolled pair telephone cable. Most mbed boards will use 2 CAN Bus transceivers, with the exception of the main and the last mbed;
 - 1 personal computer that holds the database and connects to the main mbed via router, which receives the measured results from the transducers.
 - 200 meters of rolled pair telephone cable;
- Rolled pair telephone cable was chosen because it is cheap and offers some protection to interferences. In total, the cost of this solution without labor cost amounts to 2500€ which is quite inexpensive when compared to the commercial solutions available in the market.



Figure 3. Current transducer of 200 Amperes.



Figure 4. Current transducer of 1000 Amperes.

Figures 3 and 4 show the current transducers used in this work. The transducer in figure 4 was selected due to its diameter. The maximum current it supports is probably too high but due to the diameter of the cables present in the electrical network, this transducer was the only one capable of embracing it. The reactive power is not measure since the installation of the building already includes compensation.

The measurements are done in real-time and sent to the database for registration each hour. This time period can be changed, depending on the building needs.

The final system is going to output the energy consumption data along with environmental data. The energy will be tagged with the following variables: energy consumption in kWh, measurement point identification, hour and date.

At present, the acquisition system is reaching the end of the development phase. The first weeks of operation will be used for test purposes, where the final system is going to be assessed by comparing the obtained results using the developed system against the data obtained with commercial equipment and the official electric invoice.

5. DATABASE AND MONITORING INTERFACE

As mentioned earlier, the monitoring data is concentrated in a database. It is associated with this database that most of the functionalities of management can be operated.

The database information can be accessed through a web interface with a local application of data flow control.



Figure 5. Main window of the web interface.

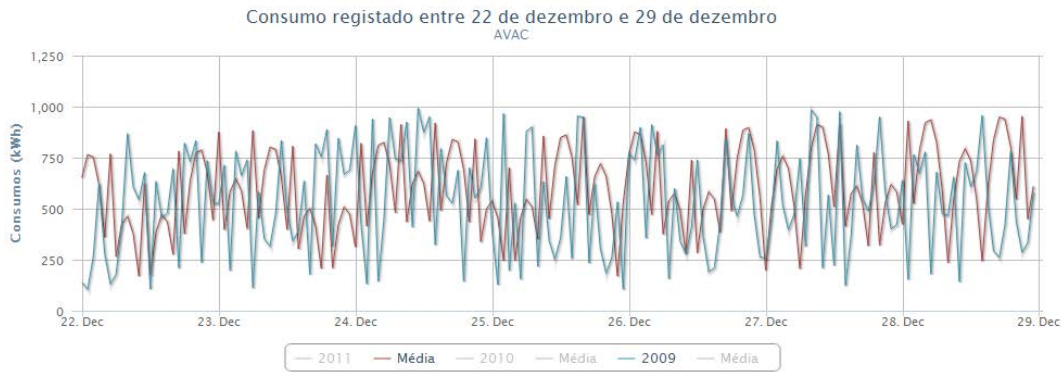


Figure 6. Example of comparison of yearly consumptions during the same week.

5.1 Database

The database used is MySQL and it was chosen because it is free, supported by the servers available for this work and has extensive functionality for handling the data as needed.

Operating on the database there are two applications: a graphical interface for visualization and a local application that receives data from the CAN network and stores it in the database.

Besides the information received from the monitoring system, the database holds additional information. It has tables about relevant events (example: missing data from sensors); data from the yearly calendar of the university and data about energy costs that can be updated.

The database also holds the environmental data that is provided by a pre-existent WSN, in order to produce correlations with consumption.

5.2 Monitoring Interface

The interface was chosen as a web interface to allow accessing from any point with internet access to monitor the building consumption.

The interface was built using HTML, PHP and JavaScript which are compatible with any Internet browser.

When entering the interface, after authentication, the first page reports data collected during the last week, as can be seen from figure 5. Please note that the current version of the interface is still in Portuguese.

Figure 5 is composed of two graphics, the upper part shows energy values, while lower part shows the cost associated with this energy. Below the graphics a table can be seen that holds daily data for consumption and cost. On the right side it is possible to change the criteria for data retrieving to access different periods, use the yearly calendar and use a smaller or larger window of analysis.

Data from different sensors and period averages can also be superposed for visual comparison or placed in adjacent windows, as can be seen from figure 6. In this case yearly averages are compared.

Additional features:

- access only after authentication;
- different access permissions;
- special area for administrators (enables energy price and calendar editing);
- automatic monitoring and alert emission. With the use of artificial intelligence tools the interface can be configured for issuing warnings and alerts regarding consumption levels. The warnings will be issued by e-mail and sms, according to configuration. This feature is still under development.
- Reports. It is possible to generate reports with data defined by the administrators. These reports are very relevant for measuring the effects of efficiency improvement in the building and can be exported in pdf format and sent by e-mail.

6. CONCLUSION

In a building with 3500 daily users, that has a consumption of 1MWh, which corresponds to costs of more than 100,000€ each year at Portuguese energy prices, monitor and reduce costs is a top priority task.

The energy market tendency points to a rise in electricity prices, moreover, Madeira island has a high dependence on fossil fuels for electricity generation. Therefore, large efforts must be made to improve efficiency in the energy use.

This work makes use of a stable and reliable communication system, composed of a CAN fieldbus, which has been used in the automobile industry and has low cost and easy configuration, to implement a monitoring and management system for a large scale public building.

This project is the initial step of a large energy intervention that must be made in the main building of the University of Madeira. The interventions will cover shadowing, lighting automation, lighting reduction and lighting replacement to more efficient appliances.

The project is still an undergoing project and therefore there is no real data to present yet.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge the Portuguese Foundation for Science and Technology for their support for this work through project PEst-OE/EEI/LA0009/2011.

REFERENCES

- Al-Homoud, M. S., Abdou, A.A., and Budaiwi, I. M. (2005), Mosque Energy Performance, Part II: Monitoring of Energy End Use in a Hot-Humid Climate, JKAU: Eng. Sci., vol. 16 no. 1, pp. 185-202
- Tompros, S., Mouratidis, N., Draaijer, M., Foglar, A., Hrasnica, H. (2009), Enabling applicability of energy saving applications on the appliances of the home environment, IEEE Network, Vol. 23, Is. 6, pp.8-16
- Yongpan, C., Mu Xianmin ; Zhang Jili ; Lu Zhen Development of Monitoring System of Building Energy Consumption (2009), International Forum on Computer Science-Technology and Applications, IFCSTA '09, Vol. 2, pp. 363-366.
- Fonda, J. W., Zawodniok, M. J., Jagannathan. S., Salour, A., Miller, D., Missouri S&T Mote-Based Demonstration of Energy Monitoring Solution for Network Enabled Manufacturing Using Wireless Sensor Networks (WSN), (2008), IPSN '08 Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks.
- Nagata, T., An electric power energy monitoring system in campus using an Internet (2006), Power Engineering Society General Meeting.
- Chia-Hung, L., Ying-Wen, B., Hsien-Chung, C., Chi-Huang, H., Home appliance energy monitoring and controlling based on Power Line Communication (2009) ICCE '09. Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics
- Wei, N., Yong, W., Yan, S., Zhongcheng, D., Government management and implementation of national real-time energy monitoring system for China large-scale public building (2009), Energy Policy, Vol. 37, Is. 6, pp. 2087–2091
- Road Vehicles—Controller Area Network (CAN)—Part 1: Data Link Layer and Physical Signalling, ISO Standard-11898-1, 2003.
- Road Vehicles—Controller Area Network (CAN)—Part 2: High-Speed Medium Access Unit, ISO Standard-11898-2, 2003
- Antunes, A., Mota, A., "O protocolo CAN", 1^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia, Leiria, 2001.

ANEXO 5 – LISTA DE REGISTOS ADE7758

REGISTERS

COMMUNICATIONS REGISTER

The communications register is an 8-bit, write-only register that controls the serial data transfer between the ADE7758 and the host processor. All data transfer operations must begin with a write to the communications register.

The data written to the communications register determines whether the next operation is a read or a write and which register is being accessed.

Table 16 outlines the bit designations for the communications register.

Table 16. Communications Register

Bit Location	Bit Mnemonic	Description
0 to 6	A0 to A6	The seven LSBs of the communications register specify the register for the data transfer operation. Table 17 lists the address of each ADE7758 on-chip register.
7	W/R	When this bit is a Logic 1, the data transfer operation immediately following the write to the communications register is interpreted as a write to the ADE7758. When this bit is a Logic 0, the data transfer operation immediately following the write to the communications register is interpreted as a read operation.

DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
W/R	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0

Table 17. ADE7758 Register List

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x00	Reserved	–				Reserved.
0x01	AWATTHR	R	16	S	0	Watt-Hour Accumulation Register for Phase A. Active power is accumulated over time in this read-only register. The AWATTHR register can hold a maximum of 0.52 seconds of active energy information with full-scale analog inputs before it overflows (see the Active Energy Calculation section). Bit 0 and Bit 1 of the COMPMODE register determine how the active energy is processed from the six analog inputs.
0x02	BWATTHR	R	16	S	0	Watt-Hour Accumulation Register for Phase B.
0x03	CWATTHR	R	16	S	0	Watt-Hour Accumulation Register for Phase C.
0x04	AVARHR	R	16	S	0	VAR-Hour Accumulation Register for Phase A. Reactive power is accumulated over time in this read-only register. The AVARHR register can hold a maximum of 0.52 seconds of reactive energy information with full-scale analog inputs before it overflows (see the Reactive Energy Calculation section). Bit 0 and Bit 1 of the COMPMODE register determine how the reactive energy is processed from the six analog inputs.
0x05	BVARHR	R	16	S	0	VAR-Hour Accumulation Register for Phase B.
0x06	CVARHR	R	16	S	0	VAR-Hour Accumulation Register for Phase C.
0x07	AVAHR	R	16	S	0	VA-Hour Accumulation Register for Phase A. Apparent power is accumulated over time in this read-only register. The AVAHR register can hold a maximum of 1.15 seconds of apparent energy information with full-scale analog inputs before it overflows (see the Apparent Energy Calculation section). Bit 0 and Bit 1 of the COMPMODE register determine how the apparent energy is processed from the six analog inputs.
0x08	BVAHR	R	16	S	0	VA-Hour Accumulation Register for Phase B.
0x09	CVAHR	R	16	S	0	VA-Hour Accumulation Register for Phase C.
0x0A	AIRMS	R	24	S	0	Phase A Current Channel RMS Register. The register contains the rms component of the Phase A input of the current channel. The source is selected by data bits in the mode register.
0x0B	BIRMS	R	24	S	0	Phase B Current Channel RMS Register.
0x0C	CIRMS	R	24	S	0	Phase C Current Channel RMS Register.
0x0D	AVRMS	R	24	S	0	Phase A Voltage Channel RMS Register.

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x0E	BVRMS	R	24	S	0	Phase B Voltage Channel RMS Register.
0x0F	CVRMS	R	24	S	0	Phase C Voltage Channel RMS Register.
0x10	FREQ	R	12	U	0	Frequency of the Line Input Estimated by the Zero-Crossing Processing. It can also display the period of the line input. Bit 7 of the LCYCMODE register determines if the reading is frequency or period. Default is frequency. Data Bit 0 and Bit 1 of the MMODE register determine the voltage channel used for the frequency or period calculation.
0x11	TEMP	R	8	S	0	Temperature Register. This register contains the result of the latest temperature conversion. Refer to the Temperature Measurement section for details on how to interpret the content of this register.
0x12	WFORM	R	24	S	0	Waveform Register. This register contains the digitized waveform of one of the six analog inputs or the digitized power waveform. The source is selected by Data Bit 0 to Bit 4 in the WAVMODE register.
0x13	OPMODE	R/W	8	U	4	Operational Mode Register. This register defines the general configuration of the ADE7758 (see Table 18).
0x14	MMODE	R/W	8	U	0xFC	Measurement Mode Register. This register defines the channel used for period and peak detection measurements (see Table 19).
0x15	WAVMODE	R/W	8	U	0	Waveform Mode Register. This register defines the channel and sampling frequency used in the waveform sampling mode (see Table 20).
0x16	COMPmode	R/W	8	U	0x1C	Computation Mode Register. This register configures the formula applied for the energy and line active energy measurements (see Table 22).
0x17	LCYCMODE	R/W	8	U	0x78	Line Cycle Mode Register. This register configures the line cycle accumulation mode for WATT-HR, VAR-HR, and VA-Hr (see Table 23).
0x18	Mask	R/W	24	U	0	IRQ Mask Register. It determines if an interrupt event generates an active-low output at the $\overline{\text{IRQ}}$ pin (see the Interrupts section).
0x19	Status	R	24	U	0	IRQ Status Register. This register contains information regarding the source of the ADE7758 interrupts (see the Interrupts section).
0x1A	RSTATUS	R	24	U	0	IRQ Reset Status Register. Same as the STATUS register, except that its contents are reset to 0 (all flags cleared) after a read operation.
0x1B	ZXTOUT	R/W	16	U	0xFFFF	Zero-Cross Timeout Register. If no zero crossing is detected within the time period specified by this register, the interrupt request line ($\overline{\text{IRQ}}$) goes active low for the corresponding line voltage. The maximum timeout period is 2.3 seconds (see the Zero-Crossing Detection section).
0x1C	LINECYC	R/W	16	U	0xFFFF	Line Cycle Register. The content of this register sets the number of half-line cycles that the active, reactive, and apparent energies are accumulated for in the line accumulation mode.
0x1D	SAGCYC	R/W	8	U	0xFF	SAG Line Cycle Register. This register specifies the number of consecutive half-line cycles where voltage channel input may fall below a threshold level. This register is common to the three line voltage SAG detection. The detection threshold is specified by the SAGLVL register (see the Line Voltage SAG Detection section).
0x1E	SAGLVL	R/W	8	U	0	SAG Voltage Level. This register specifies the detection threshold for the SAG event. This register is common to all three phases' line voltage SAG detections. See the description of the SAGCYC register for details.
0x1F	VPINTLVL	R/W	8	U	0xFF	Voltage Peak Level Interrupt Threshold Register. This register sets the level of the voltage peak detection. Bit 5 to Bit 7 of the MMODE register determine which phases are to be monitored. If the selected voltage phase exceeds this level, the PKV flag in the $\overline{\text{IRQ}}$ status register is set.
0x20	IPINTLVL	R/W	8	U	0xFF	Current Peak Level Interrupt Threshold Register. This register sets the level of the current peak detection. Bit 5 to Bit 7 of the MMODE register determine which phases are to be monitored. If the selected current phase exceeds this level, the PKI flag in the $\overline{\text{IRQ}}$ status register is set.
0x21	VPEAK	R	8	U	0	Voltage Peak Register. This register contains the value of the peak voltage waveform that has occurred within a fixed number of half-line cycles. The number of half-line cycles is set by the LINECYC register.

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x22	IPEAK	R	8	U	0	Current Peak Register. This register holds the value of the peak current waveform that has occurred within a fixed number of half-line cycles. The number of half-line cycles is set by the LINECYC register.
0x23	Gain	R/W	8	U	0	PGA Gain Register. This register is used to adjust the gain selection for the PGA in the current and voltage channels (see the Analog Inputs section).
0x24	AVRMSGAIN	R/W	12	S	0	Phase A VRMS Gain Register. The range of the voltage rms calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x25	BVRMSGAIN	R/W	12	S	0	Phase B VRMS Gain Register.
0x26	CVRMSGAIN	R/W	12	S	0	Phase C VRMS Gain Register.
0x27	AIGAIN	R/W	12	S	0	Phase A Current Gain Register. This register is not recommended to be used and it should be kept at 0, its default value.
0x28	BIGAIN	R/W	12	S	0	Phase B Current Gain Register. This register is not recommended to be used and it should be kept at 0, its default value.
0x29	CIGAIN	R/W	12	S	0	Phase C Current Gain Register. This register is not recommended to be used and it should be kept at 0, its default value.
0x2A	AWG	R/W	12	S	0	Phase A Watt Gain Register. The range of the watt calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x2B	BWG	R/W	12	S	0	Phase B Watt Gain Register.
0x2C	CWG	R/W	12	S	0	Phase C Watt Gain Register.
0x2D	AVARG	R/W	12	S	0	Phase A VAR Gain Register. The range of the VAR calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x2E	BVARG	R/W	12	S	0	Phase B VAR Gain Register.
0x2F	CVARG	R/W	12	S	0	Phase C VAR Gain Register.
0x30	AVAG	R/W	12	S	0	Phase A VA Gain Register. The range of the VA calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x31	BVAG	R/W	12	S	0	Phase B VA Gain Register.
0x32	CVAG	R/W	12	S	0	Phase C VA Gain Register.
0x33	AVRMSOS	R/W	12	S	0	Phase A Voltage RMS Offset Correction Register.
0x34	BVRMSOS	R/W	12	S	0	Phase B Voltage RMS Offset Correction Register.
0x35	CVRMSOS	R/W	12	S	0	Phase C Voltage RMS Offset Correction Register.
0x36	AIRMSOS	R/W	12	S	0	Phase A Current RMS Offset Correction Register.
0x37	BIRMSOS	R/W	12	S	0	Phase B Current RMS Offset Correction Register.
0x38	CIRMSOS	R/W	12	S	0	Phase C Current RMS Offset Correction Register.
0x39	AWATTOS	R/W	12	S	0	Phase A Watt Offset Calibration Register.
0x3A	BWATTOS	R/W	12	S	0	Phase B Watt Offset Calibration Register.
0x3B	CWATTOS	R/W	12	S	0	Phase C Watt Offset Calibration Register.
0x3C	AVAROS	R/W	12	S	0	Phase A VAR Offset Calibration Register.
0x3D	BVAROS	R/W	12	S	0	Phase B VAR Offset Calibration Register.
0x3E	CVAROS	R/W	12	S	0	Phase C VAR Offset Calibration Register.
0x3F	APHCAL	R/W	7	S	0	Phase A Phase Calibration Register. The phase relationship between the current and voltage channel can be adjusted by writing to this signed 7-bit register (see the Phase Compensation section).
0x40	BPHCAL	R/W	7	S	0	Phase B Phase Calibration Register.
0x41	CPHCAL	R/W	7	S	0	Phase C Phase Calibration Register.
0x42	WDIV	R/W	8	U	0	Active Energy Register Divider.
0x43	VARDIV	R/W	8	U	0	Reactive Energy Register Divider.
0x44	VADIV	R/W	8	U	0	Apparent Energy Register Divider.

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x45	APCFNUM	R/W	16	U	0	Active Power CF Scaling Numerator Register. The content of this register is used in the numerator of the APCF output scaling calculation. Bits [15:13] indicate reverse polarity active power measurement for Phase A, Phase B, and Phase C in order; that is, Bit 15 is Phase A, Bit 14 is Phase B, and so on.
0x46	APCFDEN	R/W	12	U	0x3F	Active Power CF Scaling Denominator Register. The content of this register is used in the denominator of the APCF output scaling.
0x47	VARCFNUM	R/W	16	U	0	Reactive Power CF Scaling Numerator Register. The content of this register is used in the numerator of the VARCF output scaling. Bits [15:13] indicate reverse polarity reactive power measurement for Phase A, Phase B, and Phase C in order; that is, Bit 15 is Phase A, Bit 14 is Phase B, and so on.
0x48	VARCFDEN	R/W	12	U	0x3F	Reactive Power CF Scaling Denominator Register. The content of this register is used in the denominator of the VARCF output scaling.
0x49 to 0x7D	Reserved	–	–	–	–	Reserved.
0x7E	CHKSUM	R	8	U	–	Checksum Register. The content of this register represents the sum of all the ones in the last register read from the SPI port.
0x7F	Version	R	8	U	–	Version of the Die.

¹ This column specifies the read/write capability of the register. R = Read only register. R/W = Register that can be both read and written.

² Type decoder: U = unsigned; S = signed.