

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Sistema de contagem de energia eléctrica
baseado em tecnologia GSM**

Nuno António Dias Ferreira

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Portugal

27-07-2011

Nuno Ferreira, 2011

Resumo

Este documento descreve o projecto de um sistema medição de energia eléctrica baseado em tecnologia GSM. Trata-se, portanto, de um sistema capaz de efectuar a medição de energia consumida em clientes residenciais e efectuar a respectiva facturação de forma autónoma e pré-paga. A rede GSM é utilizada para realizar a troca de mensagens entre os vários intervenientes deste sistema.

O conceito consiste em desenvolver um dispositivo que monitoriza continuamente os consumos de energia e efectua a sua cobrança de forma pré-paga. Assim, cada medidor possui o saldo relativo ao cliente e realiza a sua actualização mediante a energia consumida. Quando o saldo se esgota o cliente fica inabilitado de consumir energia.

Este sistema utiliza a rede de multibanco para efectuar o recarregamento do saldo de cada cliente através da realização de um pagamento. Sempre que se regista um pagamento é enviada uma mensagem de texto para o respectivo medidor informando o valor do carregamento, de modo a que este possa proceder à sua actualização. Outras mensagens podem ser trocadas de modo a autorizar ou impossibilitar o consumo de energia, efectuar um pedido de diagnóstico do medidor e diminuir o saldo. Na troca de mensagens foi implementado um sistema de segurança de modo a garantir a integridade e autenticidade de todas as mensagens.

Em suma, o sistema implementado permite realizar de forma simples a distribuição e facturação de energia em zonas remotas e em zonas onde não existem infra-estruturas de suporte à facturação, sendo que estão presentes todos os mecanismos de segurança e detecção de fraude necessários.

Abstract

This document aims to describe the design and development of an energy meter based on GSM technology. The system measures the consumption of electric energy in residential customers and proceeds to their billing in a prepaid manner. The GSM network is used as an infrastructure for message exchange between the system components.

Therefore, the aim of this project is developing a device that holds an energy balance, which in turn diminishes as the customer consumes energy. Once the customer has run out of "energy credits" the system cuts the energy supply till client refills his energy account. The account can be refilled with new credits using any ATM machine. Every time the system receives a new payment a text message is sent to the energy meter updating its balance. Further message options are available comprising: decrease the balance, energy consumption authorization and diagnostic request. The project also involved implementing a security system, in order to grant the authenticity and integrity of the messages exchanged.

To sum up, this system can enhance the distribution of electric energy in remote places where billing method is not possible. The developed system also prevents from fraud attempts due to the security mechanisms implemented.

Agradecimentos

Gostaria de deixar o meu especial agradecimento a todos, que directa ou indirectamente, permitiram e colaboraram para o desfecho desta formação académica.

Ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Portugal, pela confiança, motivação e dedicação que sempre prestou ao longo deste projecto.

Aos meus pais, António Marinho e Libânia Moreira, a oportunidade e a motivação que me deram para prosseguir os meus estudos e apoio incondicional nos melhores e piores momentos.

À minha irmã, Fátima Ferreira, o apoio e o carinho que sempre me deu ao longo desta longa caminhada, permitindo desde muito cedo o sucesso em toda a formação académica.

À minha namorada, Dulce Gomes, por toda a atenção, paciência, carinho e apoio que sempre demonstrou, em todos os momentos, sendo uma forte contribuição para ultrapassar todos os obstáculos.

A toda a minha família a educação e o apoio prestado ao longo de toda a minha vida.

Aos meus eternos amigos, Alexandre Santos e José Xavier, pela amizade, companheirismo e espírito de entreaajuda ao longo de todos estes anos. Juntos passámos momentos de grande diversão, assim como contribuímos para o sucesso de cada um de nós.

Por fim, agradeço a todos os meus colegas de profissão que contribuiram para esta jornada tivesse o desfecho desejado, José Luís, Emanuel Damaso, Pedro Moreira, Luís Alves, José Duarte, Luís Pinto, Eduardo Mota, Hugo Pinto, André Moreira, Pedro Burmester, Rui Santos, Filipe Ribeiro, Nuno Boaventura, Roberto Moreira e Diogo Sousa.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiv
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação e Contexto	1
1.2 - Objectivos.....	2
1.3 - Organização do documento	3
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1 - Medição de Energia	5
2.1.1- Conceitos Básicos	5
2.2 - Técnicas de Medição de Energia	7
2.2.1- Medidor de energia convencional	8
2.2.2- Medidor de energia electrónico	9
2.3 - Projectos relacionados.....	13
2.3.1 - Design and implementation of low cost electronic prepaid energy meter [14].....	13
2.3.2- Embedded energy meter - A new concept to measure the energy consumed by a consumer and to pay the bill [15]	15
2.3.3- Automatic power meter reading system using GSM network [16]	16
2.4 - Sumário	17
Capítulo 3	18
Solução Proposta.....	18
3.1- Perspectiva geral do sistema	18
3.1.1- Medidores locais.....	18
3.1.2- Empresa distribuidora de energia	19

3.2 - Funcionalidades do sistema.....	20
3.3 - Restrições	20
3.4 - Utilizadores	21
3.4.1- Empresa distribuidora de energia.....	21
3.4.2- Cliente	21
3.4.3- Técnico	21
3.4.4- Engenheiro Responsável	21
3.5 - Requisitos	22
3.5.1- Lista de Requisitos.....	22
3.6 - Apresentação da Solução	24
3.6.1- Métodos para realizar a facturação da energia consumida.....	24
3.6.2- Definição da arquitectura da solução proposta	29
3.7 - Sumário.....	33
Capítulo 4	34
Implementação do Sistema - Hardware.....	34
4.1 - Microprocessador	35
4.2 - Medição de energia.....	37
4.2.1- Características de funcionamento [10]	38
4.2.2- Interface com a rede eléctrica	45
4.3 - Comunicações sem fios	48
4.4 - Interface Homem-Máquina	50
4.4.1- Características gerais do AS1115.....	51
4.4.2- Implementação da interface Homem-Máquina	51
4.5 - Corte da energia	52
4.6 - Alimentação do sistema e alimentação auxiliar.....	52
4.6.1- Alimentação principal.....	53
4.6.2- Alimentação auxiliar	55
4.7 - Detecção de fraude	56
4.8 - Testes e validação da solução	58
4.9 - Sumário.....	60
Capítulo 5	61
Implementação do Sistema - Software.....	61
5.1 - Medição, facturação e corte da energia.....	62
5.1.1- Comunicação com o ADE7753.....	62
5.2.2- Software para comunicação com ADE7753	63
5.2 - Comunicações sem fios	64
5.2.1- Inicialização do <i>modem</i> GSM.....	65
5.2.2- Definição das mensagens de texto.....	66
5.2.3- Segurança nas comunicações	67
5.2.4- <i>Software</i> desenvolvido para a interpretação das mensagens.....	74
5.3 - Interface Homem-Máquina	75
5.4 - Aplicação para simulação da troca de mensagens.....	76
5.5 - Testes e validação da solução	78
5.6 - Sumário.....	79
Capítulo 6	81
Conclusões e Trabalho Futuro	81
6.1 - Conclusões	81
6.2 - Trabalho Futuro.....	82
Anexos	85
Referências	90

Lista de figuras

Figura 1.1 - Crescimento de subscrições móveis nos diversos continentes [2]	2
Figura 2.1 - Triângulo de Potências	6
Figura 2.2 - Medidor de energia electromecânico	8
Figura 2.3 - Esquema do medidor electromecânico [4]	9
Figura 2.4 - Contadores de electricidade utilizados no projecto InovGrid[8].....	10
Figura 2.5 - ADE7753	11
Figura 2.6 - Cálculo da energia activa no ADE7753	12
Figura 2.7 - Cálculo da energia aparente no ADE7753	13
Figura 2.8- Diagrama de blocos do medidor [14].....	14
Figura 2.9 - Esquema do medidor de energia [15]	15
Figura 2.10 - Organização do sistema de medição de energia [16]	16
Figura 3.1- Elementos do sistema de medição de energia	19
Figura 3.2 - Classificação dos Smart Cards [19]	26
Figura 3.3 - Smart Card [20]	27
Figura 3.4 - Sistema gerido pela SIBS	28
Figura 3.5 - Talão para pagamento por Multibanco.....	29
Figura 3.6 - Arquitectura funcional do sistema de medição de energia	31
Figura 3.7 - Esquema do <i>hardware</i> necessário para o sistema	32
Figura 4.1- Esquema de ligações e interfaces entre os vários componentes de hardware	34
Figura 4.2 - <i>Arduino</i>	35
Figura 4.3 - Ambiente de desenvolvimento do <i>Arduino</i>	37
Figura 4.4 - ADE7753	38

Figura 4.5 - Esquema de circuito de aquisição dos sinais[10].....	39
Figura 4.6- Detecção do cruzamento em zero do sinal de tensão[10]	40
Figura 4.7 - <i>Timeout</i> da detecção do cruzamento em zero[10]	40
Figura 4.8 - Monitorização da tensão de alimentação do ADE7753[10]	41
Figura 4.9- Monitorização da tensão e corrente na linha monofásica[10].....	41
Figura 4.10 - Rotina de atendimento às interrupções[10].....	42
Figura 4.11 - Diagrama de blocos de um ADC Σ - Δ [10].....	43
Figura 4.12- Efeito de <i>aliasing</i> [10]	44
Figura 4.13 - Cálculo da potência activa[10]	45
Figura 4.14 - LEM LTS15-NP[27]	46
Figura 4.15 - Circuito de condicionamento de sinal para o sensor de corrente	46
Figura 4.16 - Esquemático das ligações do sistema de medição de energia	47
Figura 4.17- Transformador desenvolvido	47
Figura 4.18 -Cellular Shield with SM5100B [37]	48
Figura 4.19- Esquema de ligações da placa de desenvolvimento: " <i>Celular shield with SM5100B</i> "	50
Figura 4.20- Esquema de ligações entre o AS1115 e os <i>dispalys de 7 segmentos</i> [30]	50
Figura 4.21 - Interface Homem-Máquina	51
Figura 4.22 - Esquema de ligações para o subsistema de corte de energia	52
Figura 4.23 - Esquema de ligações da alimentação do sistema	53
Figura 4.24 - Conversor AC/DC[31]	53
Figura 4.25 - Forma de onda da tensão rectificad[a] [31]	54
Figura 4.26 - Formas de onda obtidas na simulação do conversor	55
Figura 4.27 - Baterias auxiliares [32].....	56
Figura 4.28 - Selos de chumbo	56
Figura 4.29 - Mecanismo de detecção de fraude através da utilização de botões de pressão .	57
Figura 4.30 - Mecanismo de detecção de fraude utilizando um fio condutor na tampa da caixa.....	57
Figura 4.31 - Multímetro <i>True RMS</i> utilizado	58
Figura 4.32 - Aplicação desenvolvida para calibração do medidor de energia	59
Figura 5.1- Organização do software desenvolvido para o medidor de energia	61

Figura 5.2 - Organização dos registos utilizados no ADE7753 [10]	62
Figura 5.3 - Operação de escrita utilizando o protocolo SPI[10]	63
Figura 5.4 - Operação de leitura utilizando o protocolo SPI[10]	63
Figura 5.5 - Leitura da energia consumida	64
Figura 5.6 - Mensagens de inicialização do <i>modem</i> GSM.....	65
Figura 5.7 - Detecção das inicializações do <i>modem</i> GSM	66
Figura 5.8 - Trama definida para as mensagens.....	66
Figura 5.9 - Exemplo de cálculo de uma <i>hash</i>	69
Figura 5.10 Operações envolvidas no processo de encriptação de dados utilizando o algoritmo GOST[38]	70
Figura 5.11 resultados obtidos na implementação do algoritmo RSA.....	71
Figura 5.12 - Resultados obtidos na implementação do algoritmo GOST	71
Figura 5.13 - Processos envolvidos na programação de um microprocessador e actualização do seu <i>firmware</i> utilizando o <i>bootloader AVR230: DES Bootloader</i> [39] ...	73
Figura 5.14 - Interpretação das mensagens recebidas	74
Figura 5.15 - Interface desenvolvida	75
Figura 5.16 - " <i>Pen banda larga</i> "	76
Figura 5.17 - Modelo entidade-associação da base de dados criada.....	76
Figura 5.18 - Aplicação para simulação de troca de mensagens (Envio de mensagem)	77
Figura 5.19- Aplicação para simulação de troca de mensagens (Lista de mensagens enviadas).....	77
Figura 5.20 - Aplicação para simulação de troca de mensagens (Adicionar clientes)	78
Figura A.1 - Esquema eléctrico de todo o Hardware	85
Figura A.2 - Comunicação SPI entre um mestre e vários escravos[41]	86
Figura A.3 - Comunicações utilizando SPI[41]	87
Figura A.4 - Sinais representativos da comunicação I2C.....	88

Lista de tabelas

Tabela 3.1- Lista de requisitos dos medidores locais	22
Tabela 4.1- Características do <i>Arduino</i>	36
Tabela 4.2 - Relação entre o ganho e a gama de valores escolhida[10]	39
Tabela 4.3 - Características eléctricas do <i>modem SM5100B</i>	49
Tabela 4.4 - Teste ao medidor de energia	59
Tabela 5.1 - Mensagens implementadas no protótipo.....	67
Tabela 5.2 - Avaliação qualitativa dos algoritmos de encriptação seleccionados.....	71

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

ADC	Analog-to-digital converter
DAC	Digital-to-analog converter
CLKIN	Frequência de relógio do ADE7753
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile Communications
HLR	Home Location Register
IMEI	Mobile Equipment Identity
ISDN	Integrated Services Digital Network
MS	Mobile Station
PWM	<i>Pulse with modulation</i>
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
SMSC	Short Message System Center
TDMA	Time Division Multiple Access
TRX	Transceiver

Lista de símbolos

E	Energia
I	Corrente
P	Potência
P_{ac}	Potência activa
P_{inst}	Potência instantânea
Q	Potência reactiva
T	Binário
S	Potência aparente

V	Tensão
V_r	Tensão de ripple
V_{ef}	Valor eficaz da tensão
V_s	Valor de pico da tensão
i	Corrente
I_{ef}	Valor eficaz da corrente
I_s	Valor de pico da corrente
Δt	Intervalo de tempo
ω	Frequência angular
φ	Ângulo do desfasamento

Capítulo 1

Introdução

Nesta secção será apresentada a motivação e o contexto do problema em estudo, bem como os objectivos propostos no âmbito da dissertação.

1.1 - Motivação e Contexto

Hoje em dia, existem inúmeras situações em que não é possível realizar uma eficaz facturação de energia eléctrica consumida. Um bom exemplo deste facto é a distribuição de energia em locais onde as estruturas de suporte à facturação não existem ou não são fiáveis, como é o caso de zonas remotas ou países gravemente afectados por problemas socioeconómicos.

Segundo um relatório das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), ***“um terço da população mundial vive sem acesso à energia eléctrica, sendo que 80 por cento dessas pessoas vivem nos países menos desenvolvidos da África subsaariana”*** [1].

Neste contexto e tendo em consideração o actual cenário macroeconómico mundial, nomeadamente ao nível energético, pretende-se desenvolver um sistema capaz de fornecer um serviço de facturação de energia eléctrica pré-pago, de modo a salvaguardar os interesses quer da empresa de distribuição de energia quer do próprio utilizador, na medida em que a facturação e a cobrança do serviço realizar-se-á de forma completamente automática.

Por outro lado, este sistema pode também ser utilizado no países desenvolvidos em situações onde não é possível efectuar facilmente a facturação da energia consumida, como é o caso das casas de férias, parques de campismo, etc.

No que diz respeito à utilização das redes GSM, estas estão amplamente difundidas em todo o mundo, o que as torna propícias para o desenvolvimento deste tipo de tecnologia:

2 Introdução

“On a continent where rolling blackouts, undrinkable water, and fetid mounds of refuse remain the stuff of everyday existence, wireless telecommunications services stand out as a rare, perhaps unique, technological success story.” [2]

A figura 1.1 representa o aumento de subscrições móveis em cada um dos continentes, destacando-se o continente africano onde se regista o maior crescimento de todos e quase três vezes mais que o crescimento registado na América.

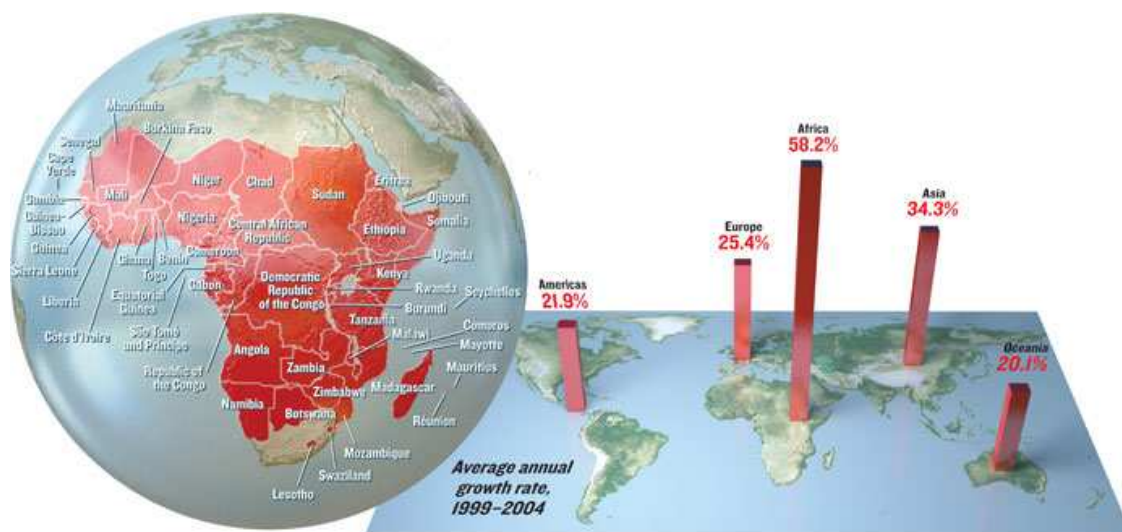


Figura 1.1 - Crescimento de subscrições móveis nos diversos continentes [2]

Sendo África um continente em vias de desenvolvimento e não possui infra-estruturas de suporte à facturação, impera a necessidade de desenvolver uma nova tecnologia capaz de colmatar as necessidades do mercado, no âmbito da medição e facturação de energia eléctrica.

1.2 - Objectivos

O objectivo desta dissertação é desenvolver um sistema de medição e facturação de energia eléctrica, autónomo e pré-pago. A comunicação entre os vários elementos deste sistema será realizada utilizando redes GSM, disponíveis no local.

Pretende-se que o sistema armazene em cada medidor o saldo disponível e proceda à taxação da energia eléctrica consumida automaticamente, actuando sobre o valor do saldo disponível. O sistema deve permitir aumentar o saldo de cada medidor através de uma operação de carregamento electrónico.

Existirá também um elemento de processamento central que será responsável pelo tratamento dos dados recebidos relativos aos pagamentos dos clientes, bem como, pelo envio de todos os dados necessários para cada medidor, via GSM.

O sistema de medição/contagem possuirá ainda um mecanismo de corte de energia, que será activado, sempre que o saldo disponível se esgote. Será implementada também uma interface Homem-Máquina que permitirá ao utilizador consultar os dados do seu medidor.

Em suma, pretende-se desenvolver um sistema de baixo custo capaz de efectuar autonomamente a medição da energia consumida, bem como proceder à respectiva cobrança.

1.3 - Organização do documento

Este documento está organizado em seis capítulos. O presente capítulo introdutório serve para caracterizar o problema a tratar, a sua motivação e contexto e os objectivos propostos. Seguidamente apresenta-se o segundo capítulo onde serão apresentados os principais conceitos teóricos fundamentais para o desenvolvimento da dissertação, assim como uma revisão literária.

No terceiro capítulo será apresentada a proposta da solução devidamente fundamentada através de uma exaustiva análise de requisitos.

No quarto e quinto capítulo apresentar-se-ão todos os pormenores relativos a implementação do sistema, sendo que o quarto capítulo abordará os aspectos de hardware e o quinto todos os aspectos relacionados com o software desenvolvido.

Por fim, segue-se o sexto capítulo onde serão efectuadas as conclusões finais desta dissertação e serão apresentadas algumas ideias para o trabalho a desenvolver futuramente.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo será efectuada a revisão da literatura. Este será um passo fulcral para o desenvolvimento do sistema de medição de energia, uma vez que, serão abordados aspectos inerentes ao seu desenvolvimento, como é o caso da medição de energia.

2.1 - Medição de Energia

2.1.1 - Conceitos Básicos

Nesta secção serão focados os conceitos teóricos envolvidos no processo de medição de energia. A potência de um sinal, qualquer que ele seja, é uma grandeza que determina a quantidade de energia transferida por uma fonte por unidade de tempo.

No caso da potência eléctrica instantânea, o seu valor é calculado com base no produto das duas grandezas envolvidas: **tensão eléctrica** e **corrente eléctrica**.

No caso particular do sistema eléctrico de energia, os dispositivos são alimentados por uma corrente alternada. Assim, a corrente e tensão de alimentação possuem uma forma de onda sinusoidal com uma frequência de 50 Hz. A potência eléctrica instantânea de um equipamento alimentado através da rede eléctrica é também um sinal com uma forma sinusoidal mas com o dobro da frequência.

$$P_{inst}(t) = v(t) * i(t) \quad (2.1)$$

A energia de um sinal pode ser definida como o somatório do valor da potência instantânea do sinal.

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t) dt \quad (2.2)$$

Quando a impedância associada aos dispositivos é puramente resistiva, então toda a energia consumida corresponde à energia transformada, por exemplo em luz, calor, som, etc.

Por vezes a impedância da carga contém uma componente reactiva, que pode ser indutiva ou capacitiva. Este facto conduz a um desfasamento entre os sinais de corrente e tensão, que será tanto maior quanto maior for a razão da componente reactiva pela resistiva.

O desfasamento introduzido entre a tensão e corrente leva a que em determinados momentos o sentido de circulação da corrente seja contrário à queda de tensão nos terminais da carga, nesses instantes a carga devolve energia à rede. Assim, a existência das componentes reactivas levam ao aparecimento de uma energia que oscila na rede entre a carga e o gerador.

Este facto tem como consequência o aparecimento de três tipos de potência associadas, são elas, potência aparente, potência activa e potência reactiva.

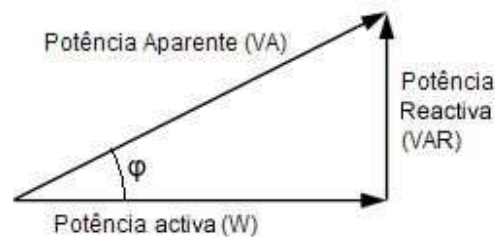


Figura 2.1 - Triângulo de Potências

Derivado ao facto da existência destes três tipos de potência pode-se definir o conceito de factor de potência. O factor de potência é razão da potência activa pela potência aparente, tratando-se por isso, de um número adimensional entre 0 e 1. Este factor é definido pelo tipo de carga, podendo esta ser resistiva, indutiva ou capacitiva e designa-se por $\cos(\varphi)$.

Potência Aparente

A potência aparente é aquela que é efectivamente disponibilizada pela rede, sendo as suas unidades o VA (Volt-Ampere).

Assim o módulo da potência aparente no sistema eléctrico pode ser obtido a partir do produto entre os valores eficazes de tensão eléctrica e a corrente eléctrica:

$$|S| = V_{ef} * I_{ef} \quad (2.3)$$

Potência Activa

A potência activa é a potência utilizada pelas cargas para realizar o trabalho de gerar calor, luz ou movimento e é expressa em W (Watt).

Pode-se descrever a potência activa como o valor médio da potência absorvida. Assim sendo, pode-se definir a potência activa como:

$$P_{ac} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{inst}(t) dt \quad (2.4)$$

Alternativamente a potência activa pode ainda ser definida como o produto entre a potência aparente e o factor de potência:

$$P_{ac} = |S| * \cos(\varphi) \quad (2.5)$$

$$P_{ac} = V_{ef} * I_{ef} * \cos(\varphi) \quad (2.6)$$

Potência Reactiva

A potência reactiva não produz trabalho útil, mas circula entre o gerador e a carga, exigindo do gerador e do sistema de distribuição uma corrente adicional. A sua unidade de medição é o Volt-Ampere-Reactivo (VAR).

A potência reactiva pode ser obtida através da seguinte equação:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_{ac}^2} \quad (2.7)$$

2.2 - Técnicas de Medição de Energia

Nesta secção serão abordados as várias formas de medição de energia, bem como um estudo comparativo entre elas. As técnicas que serão abordadas referem-se à medição da

energia activa, visto ser aquela que é efectivamente facturada pelas empresas de distribuição de energia aos clientes residenciais. Esta etapa permitirá analisar qual o melhor método para a futura implementação do sistema.

2.2.1 - Medidor de energia convencional

Este tipo de medidor de energia, também conhecido por contador *Ferraris* ou medidor de indução, foi o primeiro contador de energia eléctrica a existir no mercado.



Figura 2.2 - Medidor de energia electromecânico

O seu princípio de funcionamento baseia-se na teoria de Galileo Ferraris [3], onde é possível criar um campo magnético girante a partir de dois campos magnéticos alternados criados por duas bobinas em quadratura quando são percorridas por duas correntes.

Assim, uma das bobinas é colocada em série com a carga designando-se por bobina de corrente, e a outra é colocada em paralelo com a carga, a bobina de tensão. A interacção entre os dois campos magnéticos gerados irá produzir um binário no disco de alumínio (Figura 2.3).

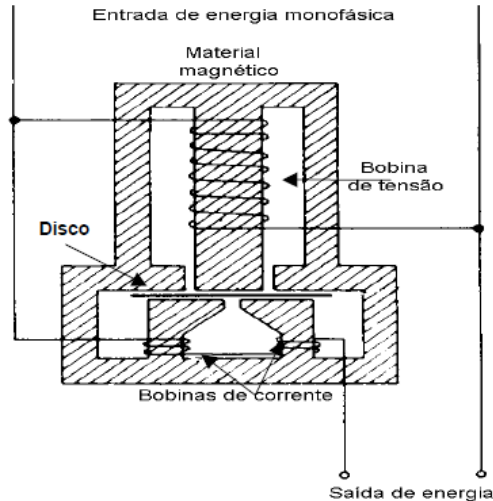


Figura 2.3 - Esquema do medidor electromecânico [4]

O binário do resultante no disco de alumínio é proporcional ao produto entre a tensão e corrente, como é demonstrado em (2.8) [5]. Por sua vez, o número de rotações efectuadas durante um intervalo de tempo é proporcional à quantidade de energia eléctrica fornecida à carga.

$$T = K[V_s I_L \cos \varphi + V_s I_L \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (2.8)$$

Contudo, a utilização deste tipo de medidores de energia tem algumas desvantagens, como é o caso da baixa precisão conseguida e a necessidade de deslocação de uma pessoa para efectuar a leitura da energia consumida.

2.2.2 - Medidor de energia electrónico

Cada vez mais se tem investido no desenvolvimento de medidores de energia eléctrica de forma electrónica, devido à maior precisão obtida nas medições, mas também devido à sua possibilidade de integração com outros sistemas, permitindo o desenvolvimento de medidores inteligentes e autónomos.

São várias as vantagens da utilização deste tipo de medidores, menor custo de funcionamento, poupança energética ao nível de clientes residenciais, maior fiabilidade no fornecimento de energia e mais fácil detecção de fraude. [6]

Em Portugal existem já inúmeras situações em que os consumidores de energia eléctrica possuem contadores de electricidade digitais, um bom exemplo é o projecto InoGrid [7] da EDP, que pretende, que em 2020 metade das habitações possuam medidores de energia inteligentes.



Figura 2.4 - Contadores de electricidade utilizados no projecto InovGrid[8]

O contador apresentado na figura 2.4 permite o acesso à informação detalhada sobre o consumo, através de um LCD, possibilitando ao consumidor conhecer as horas do dia em que mais consome e aquelas em que pode usufruir da electricidade a um preço mais favorável. Este contador, trata-se de um contador inteligente que comunica os seus consumos através do protocolo de comunicações *Power Line Communication*, não necessitando assim de recursos humanos para efectuar as leituras.

Relativamente às técnicas de medição de energia de forma electrónica é possível distinguir duas técnicas principais, utilizando circuitos integrados que realizam todos os cálculos ou através de cálculo digital da energia utilizando um microprocessador. Em qualquer uma das metodologias, a medição de energia envolve a aquisição dos sinais de tensão e corrente para que através deles se possam efectuar os cálculos anteriormente mencionados.

No caso do cálculo digital da energia [9], é necessário efectuar uma discretização dos sinais de tensão e corrente adquiridos. Assim, é necessário realizar uma amostragem destes sinais ao longo do tempo com uma frequência F_s . Desta forma as amostras de tensão e corrente são digitalizadas ao longo do tempo: $v(kT_s)$ e $i(kT_s)$, onde k é uma constante inteira positiva. A energia eléctrica consumida pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$E = \sum_{k=0}^n (v(kT_s) \times i(kT_s)) * \Delta t, \text{ para } T_s > 0 \quad (2.9)$$

A utilização desta técnica de medição de energia tem como desvantagem uma maior necessidade de processamento, uma vez que a frequência de amostragem, F_s , tem de ser relativamente elevada, na ordem dos kHz, de modo a obter uma amostragem das formas de onda minimamente plausível.

Circuitos integrados para a medida do consumo de energia

Com desenvolvimento de circuitos integrados capazes de efectuar a medição de energia eléctrica, esta tarefa tornou-se mais simples. Um bom exemplo destes dispositivos é o ADE7753 da *Analog Devices* [10], que se trata de um medidor de energia eléctrica para circuitos monofásicos.



Figura 2.5 - ADE7753

O problema da utilização deste tipo de tecnologia está relacionado com o facto de por vezes as formas de ondas de tensão e corrente não serem perfeitamente sinusoidais, levando a que em alguns casos a energia eléctrica não seja correctamente medida [11, 12]. Estas formas de onda não sinusoidais aparecem como consequência da existência de cargas não lineares na rede. Essas cargas possuem uma relação não linear entre a forma de onda de tensão e corrente, e.g., fontes comutadas, introduzindo harmónicos na rede eléctrica originando uma distorção das formas de onda de tensão e corrente.

Contudo, no que diz respeito ao ADE7753, este apresenta um comportamento bastante bom na medição da energia activa e aparente, quando as formas de onda assumem formas não sinusoidais [13].

No caso particular do ADE7753, a energia activa é calculada com base no produto entre os sinais de corrente e tensão, obtendo assim, o valor da potência instantânea. Em seguida, este valor passa num filtro passa-baixo de modo a determinar o seu valor médio. Por fim são necessárias operações de calibração, que se realizam através da alteração do valor de alguns registos internos do integrado:

- APOS – Correção de offset;
- WGAIN – Correção do ganho;
- WDIV – Definição da resolução da medição;

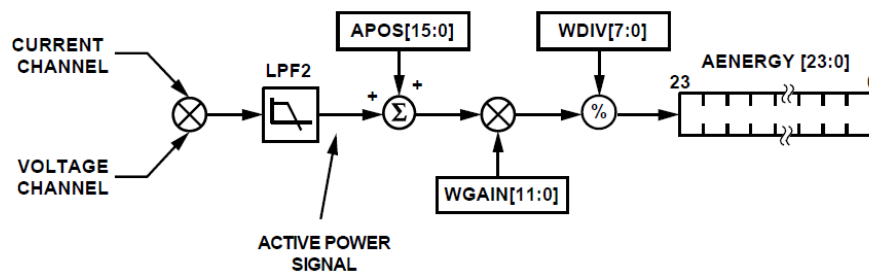


Figura 2.6 - Cálculo da energia activa no ADE7753

No que diz respeito medição da energia aparente, esta é determinada através do produto entre o valor eficaz da corrente pelo valor eficaz da tensão. A única calibração desta energia é realizada através do registo VAGAIN que define o respectivo ganho.

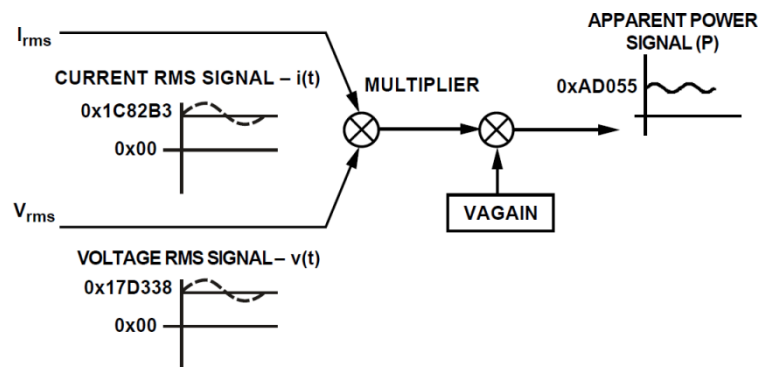


Figura 2.7 - Cálculo da energia aparente no ADE7753

Este tipo de dispositivos possui ainda uma interface de comunicação série que permite a leitura dos valores de energia medidos facilmente.

Desta forma pode-se concluir que a utilização de métodos electrónicos para a medição de energia é bastante mais vantajosa, uma vez que para além de efectuar medições mais rigorosas, consegue-se obter um custo de funcionamento quase nulo e ainda permite a interligação a outros sistemas como os que serão detalhados nos capítulos seguintes. No que diz respeito às técnicas de medição electrónicas, a utilização de dispositivos capazes de fazer a monitorização da energia simplifica bastante esta tarefa, contudo por vezes é difícil garantir que as formas de onda de tensão e corrente são adequadas para a sua utilização.

2.3 - Projectos relacionados

Nesta secção será efectuado um estudo sobre os principais projectos, desenvolvidos e em desenvolvimento, que utilizam os métodos enunciados anteriormente para efectuar a cobrança da energia eléctrica de forma pré-paga.

2.3.1 - Design and implementation of low cost electronic prepaid energy meter [14]

Este foi um projecto desenvolvido no Paquistão e os seus objectivos foram desenvolver um medidor de energia eléctrica fiável e de baixo custo, bem como a integração de um sistema de facturação pré-pago.

Assim, o projecto pode ser dividido em dois subsistemas:

- Medição de energia;
- Facturação.

Trata-se de um medidor fiável, uma vez que determina a energia eléctrica através de métodos electrónicos, não possuindo assim partes móveis. Para além disso permite ao cliente visualizar o consumo energético num LCD e efectua a facturação da energia consumida através da utilização de um *Smart Card*.

No que diz respeito à medição de energia, esta é calculada realizando uma amostragem dos sinais de tensão e corrente utilizando dois ADCs. Um processador digital de sinal (DSP), calcula continuamente o produto dos sinais adquirido, de forma a obter a potência instantânea. Este medidor de energia apresenta resultados com uma percentagem de erro que ronda os 9%.

Por sua vez, um microcontrolador trata das tarefas de comunicação e de visualização dos dados no LCD.

Possui ainda um mecanismo de detecção de falhas, que consiste na monitorização da corrente de entrada e de saída de modo a detectar quando existe uma grande diferença entre elas. Quando se verifica uma diferença superior a 12.5%, o sistema de facturação utiliza o maior valor registado.

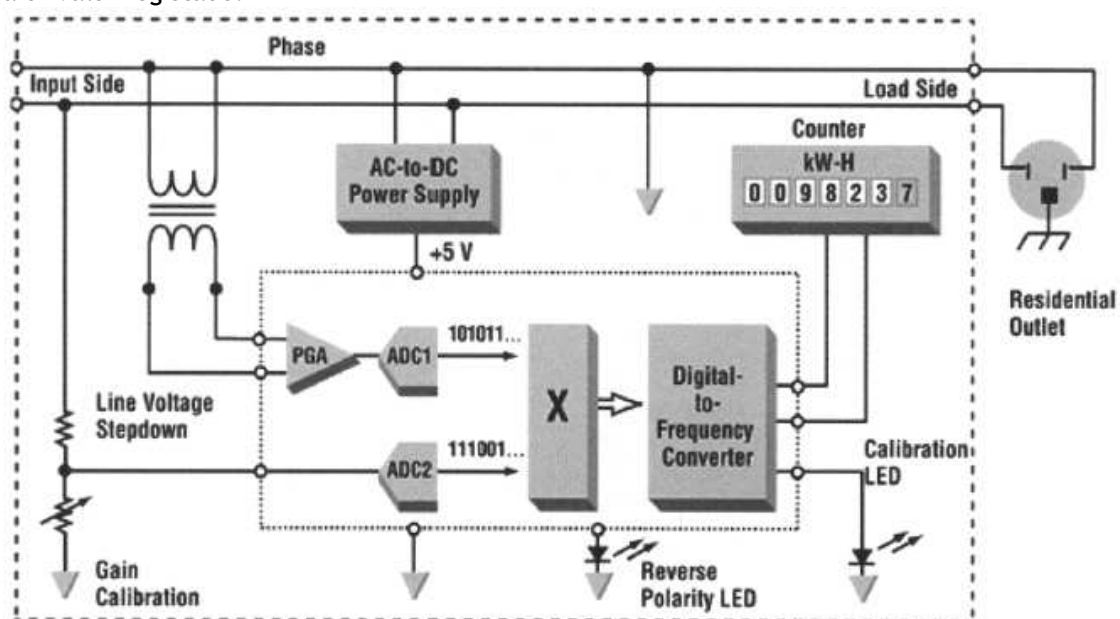


Figura 2.8- Diagrama de blocos do medidor [14]

Relativamente ao sistema de facturação, tal como referido anteriormente, este é baseado na utilização de *Smart Cards*. O medidor possui um leitor de cartões que verifica o saldo do cliente, e disponibiliza-o no LCD. Uma vez consumido 75% do saldo existente é disponibilizado um alerta para que o cliente possa recarregar o seu saldo. Assim que este saldo se esgota o fornecimento de energia eléctrica é desligado através da actuação de um relé. Para prevenir o uso não autorizado de energia, todos os dados guardados no cartão são encriptados utilizando o algoritmo de encriptação de dados RSA.

2.3.2 - Embedded energy meter - A new concept to measure the energy consumed by a consumer and to pay the bill [15]

Este projecto consiste no desenvolvimento de um medidor de energia que incorpora técnicas que facilitam a facturação e o pagamento da energia consumida. São propostas duas técnicas para efectuar a facturação, através de códigos de barras ou *Smart Cards*.

O conceito do código de barras consiste na utilização de dois códigos de barras adquiridos exclusivamente no distribuidor de energia. O primeiro código de barras é utilizado por questões de segurança e serve para autenticar o cartão. Após a autenticação do cartão ser bem-sucedida o segundo código de barras é inserido e indicará ao medidor o saldo do cliente. Após a leitura dos dois cartões estar realizada o medidor activará o fornecimento de energia.

O conceito da utilização de *Smart Cards* é semelhante aos códigos de barras, pelo que o cartão servirá para efeitos de autenticação bem como facturação da energia consumida. A utilização destes cartões tem a desvantagem de se tratar de uma técnica mais dispendiosa, contudo os cartões podem ser reutilizados através do seu recarregamento. É utilizado também neste projecto, um algoritmo de encriptação de dados.

No que diz respeito ao medidor de energia, propriamente dito, trata-se de um medidor electromecânico que possui um par de sensores optoelectrónicos para monitorizar o movimento do disco (OS e OR na figura 2.9).

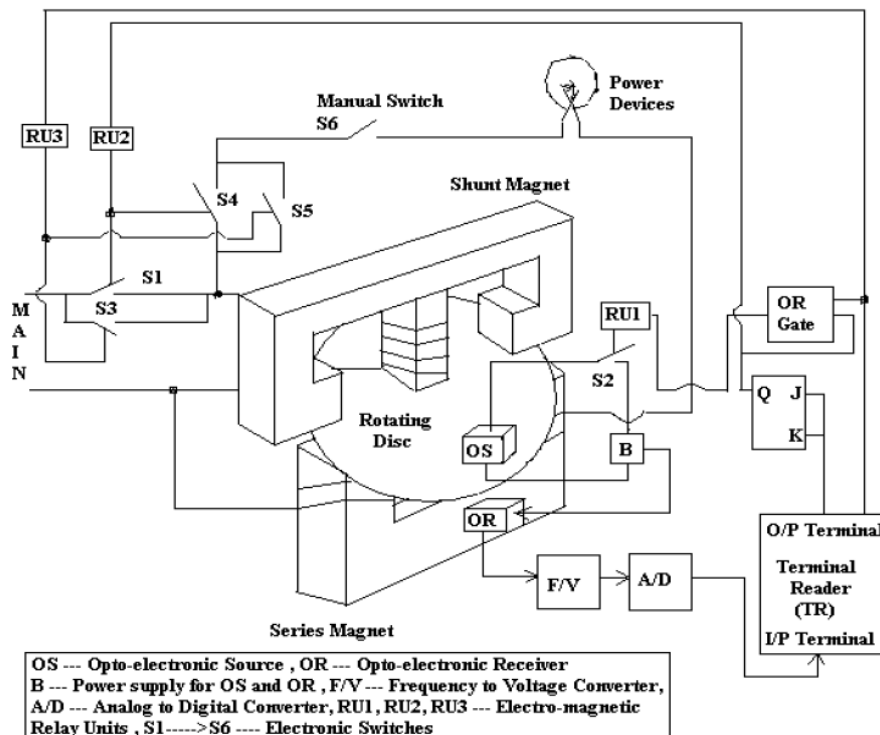


Figura 2.9 - Esquema do medidor de energia [15]

Este medidor de energia, tal como o anterior, efectua o corte da energia assim que o saldo do cliente se esgota. Para além disso permite ao cliente efectuar, ele próprio, o corte da energia, bastando para isso apenas retirar o cartão.

2.3.3 - Automatic power meter reading system using GSM network [16]

Este projecto não implementa um mecanismo de pré-pagamento da energia eléctrica, no entanto, trata-se de um projecto bastante interessante tendo em conta os objectivos desta dissertação, uma vez que pretende criar um sistema de medição de energia autónomo.

O projecto consiste no desenvolvimento de um medidor de energia eléctrica, que utiliza a rede GSM para enviar os consumos de energia de volta para a empresa distribuidora de energia, utilizando mensagens de texto (SMS).

Do lado do distribuidor de energia existe um sistema electrónico de facturação, que é utilizado para gerir todas as mensagens recebidas, calcular os custos e publicar a factura para cada cliente.

A imagem seguinte representa a organização de todo o sistema de medição e facturação de energia, desde os medidores instalados em cada cliente até aos sistema de facturação implementados.

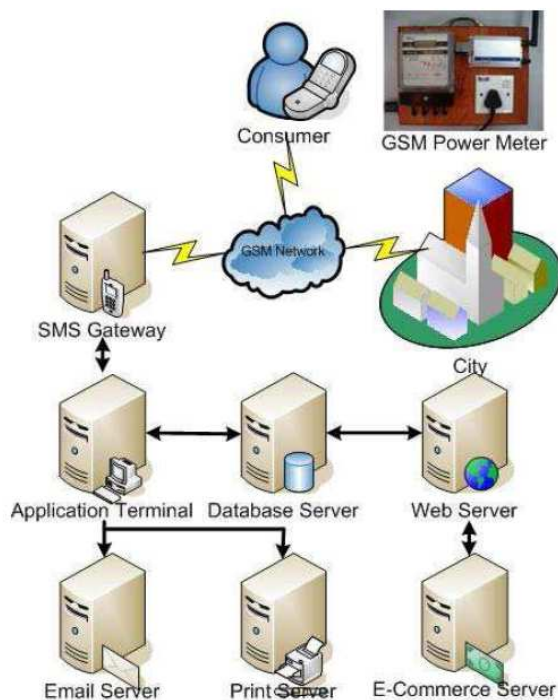


Figura 2.10 - Organização do sistema de medição de energia [16]

Assim que o distribuidor de energia recebe os consumos registados por todos os medidores procede à respectiva facturação e conseqüente notificação do cliente.

O cliente pode também consultar os consumos energéticos, bastando para isso enviar uma mensagem de texto para o medidor. Este responderá com o respectivo consumo eléctrico.

Por fim pode-se concluir que vários estudos têm sido realizados no sentido de desenvolver equipamentos e técnicas mais eficazes para realização de tarefa de medição e facturação da energia consumida em clientes residenciais.

2.4 - Sumário

Ao longo do presente capítulo foram abordados os aspectos de maior relevância que conduzirão à definição do sistema e sua posterior implementação. Foram abordados conceitos relativos à medição de energia, técnicas para a medição de energia e por fim foram demonstradas algumas implementações de projectos de carácter semelhante ao que se pretende desenvolver nesta dissertação.

Capítulo 3

Solução Proposta

Neste capítulo será realizada uma análise dos requisitos do Sistema de medição e facturação de energia. Assim sendo, será apresentada uma perspectiva geral do sistema, quais as suas principais funcionalidades, quais serão os utilizadores do sistema, assim como uma noção de quais as restrições que limitam o projecto. Por fim, serão listados todos os requisitos que permitirão a qualquer engenheiro construir o sistema pretendido com o mínimo de ambiguidade.

Como culminar deste estudo apresentar-se-á a solução proposta para o sistema, onde se definirá a sua arquitectura, que levará à posterior implementação.

3.1- Perspectiva geral do sistema

O sistema em questão encontra-se estruturado em dois subsistemas distintos, um que será o medidor propriamente dito e será instalado em todos os clientes e outro que dirá respeito à empresa de distribuição de energia e será responsável pela gestão dos clientes. Cada um destes subsistemas desempenha um conjunto de funcionalidades distintas que visam alcançar o objectivo para o qual o sistema foi desenhado.

3.1.1 - Medidores locais

Este será o principal elemento de todo o sistema e é aquele que é pretendido desenvolver ao longo desta dissertação.

Trata-se de um subsistema capaz de efectuar uma correcta medição da energia eléctrica consumida por clientes residenciais, bem como efectuar a respectiva facturação de forma pré-paga. Para efectuar a facturação da energia consumida de forma pré-paga cada medidor

terá de armazenar localmente o saldo de cada cliente. O saldo do cliente será enviado utilizando comunicações sem fios através da rede GSM disponível no local. Sempre que o saldo do cliente termina, este fica inabilitado ao consumo de energia eléctrica.

Este subsistema será dotado de sensores e actuadores. Os sensores a utilizar neste subsistema deverão medir a energia consumida. Os actuadores terão como tarefa permitir ou não o consumo de energia.

Cada medidor deverá ainda possuir um interface Homem-Máquina que permita ao cliente consultar os dados relativos aos seus consumos.

3.1.2 - Empresa distribuidora de energia

Para além dos medidores propriamente ditos, existirá também um pequeno subsistema para simular as trocas de mensagens entre cada medidor e a empresa distribuidora de energia. Este subsistema encontra-se fora dos objectivos principais desta dissertação, contudo de modo a validar toda a solução também constituirá um elemento de desenvolvimento.

Este subsistema tratar-se-á de uma interface que permitirá testar o envio de todas as mensagens suportadas pelos medidores.

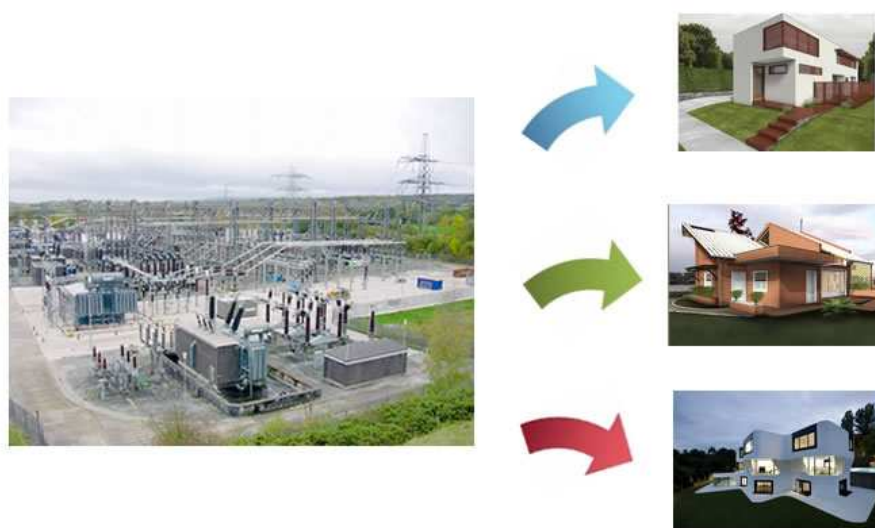


Figura 3.1- Elementos do sistema de medição de energia

3.2 - Funcionalidades do sistema

As capacidades presentes num sistema avaliam-se pelas funções que executam. Este sistema resulta num melhoramento do actual sistema de gestão de energia, tendo como principal função medir a energia consumida e efectuar a sua facturação automaticamente. Desta forma, as principais funcionalidades do sistema são:

- I. Medição dos consumos de energia activa em clientes residenciais em circuitos monofásicos;
- II. Garantia de integridade dos dados adquiridos;
- III. Facturação da energia consumida de forma autónoma e pré-paga;
- IV. Cada medidor armazena localmente o saldo restante;
- V. Permissão de utilização de energia apenas enquanto o cliente possui um saldo positivo;
- VI. Disponibilização dos dados relativos aos clientes: saldo restante em € e em Kwh;
- VII. Incorporação de mecanismos que impossibilitem as tentativas de fraude e falsificação de medições;
- VIII. Utilização da rede GSM para a troca de mensagens;
- IX. Garantia de interoperabilidade entre as operadoras móveis;

3.3 - Restrições

O sistema possui restrições de dois tipos: internas e externas.

As primeiras prendem-se com limitações impostas pela própria equipa de trabalho, relativamente ao trabalho a desenvolver. As restrições de natureza externa prendem-se com factores alheios à equipa, como é o caso do local onde será desenvolvido o protótipo e tecnologias utilizadas no seu desenvolvimento. Deste modo, o sistema estará sujeito às seguintes restrições:

- O sistema deve ser de baixo custo;
- Baixo consumo;
- Alimentação de todo o circuito de medição através da rede;
- Protótipo desenvolvido para efectuar medições de energia em circuitos de corrente alternada, monofásicos, cuja tensão nominal é 230V e frequência nominal é 50Hz;

- Protótipo será desenvolvido utilizando as redes GSM disponíveis em Portugal;
- Robustez e fiabilidade do sistema;
- Dimensões reduzidas para o sistema.

Trata-se de um sistema destinado a clientes particulares, para aplicação em habitações, uma vez que a flexibilidade para aplicação em ambientes diferentes está condicionada. Sendo o sistema projectado para habitações, torna-se difícil a adaptação deste a ambientes industriais por diversas razões:

- Não estar adaptado a cargas trifásicas;
- Não estar preparado para suportar vibrações, temperaturas adversas ou ruído electromagnético elevado;
- Não estar preparado para efectuar medições com potências muito elevadas.

3.4 - Utilizadores

O sistema de medição de energia, tal como projectado, agrega um conjunto de pessoas que interagem directamente com ele, quer os técnicos que asseguram a sua manutenção, quer todos os utilizadores que irão explorar o sistema, após a sua implementação.

3.4.1 - Empresa distribuidora de energia

Utilizador que irá usufruir da utilização do sistema e que irá, conseqüentemente, pagar pelo sistema desenvolvido.

3.4.2 - Cliente

Utilizador que irá consumir energia eléctrica e que será responsável pelo recarregamento do saldo do seu medidor. Este utilizador poderá consultar os dados relativamente aos seus consumos.

3.4.3 - Técnico

Funcionário vocacionado para a instalação, manutenção e desmantelamento do sistema. Necessidade de conhecimentos não área da instalação de equipamento electrónico e de instalações eléctricas.

3.4.4 - Engenheiro Responsável

Gestor do projecto, com conhecimento de todo o funcionamento do sistema. A este compete chefiar uma equipa de manutenção, nomeadamente, avaliar o estado do sistema e

realizar testes de simulação periodicamente, com vista a assegurar que todo o equipamento está a funcionar correctamente.

Necessidade de conhecimentos avançados de engenharia de sistemas e electrónica.

3.5 - Requisitos

Com base nos aspectos descritos anteriormente é possível elaborar um conjunto claro e sucinto de requisitos de engenharia, que serão o ponto de alavanca para uma implementação do sistema bem-sucedida. Estes serão identificados ao longo desta secção.

3.5.1 - Lista de Requisitos

Na tabela seguinte estão listados todos os requisitos relativos ao desenvolvimento do subsistema dos medidores locais.

Tabela 3.1- Lista de requisitos dos medidores locais

Tipo	Código	Definição	Prioridade
Requisitos Funcionais	RML 1	O consumo energético deve ser reduzido	Alta
	RML 2	Sistema deve ser de baixo custo	Média
	RML 3	Medição da energia activa consumida em circuitos monofásicos (230V, 50Hz)	Alta
	RML 4	O sistema deve ser capaz de medir o consumo energético de um cliente residencial	Alta
	RML 5	O sistema de possuir autonomia para funcionar 24/7	Média
	RML 6	O sistema deve ser minimamente evasivo	Baixa
	RML 7	O sistema deve minimizar a o número de mensagens trocadas	Baixa
	RML 8	O sistema deve guardar o saldo localmente	Alta
	RML 8	O saldo do cliente deve ser actualizado em tempo-real	Alta
	RML 10	O sistema deve possuir uma interface com o utilizador	Alta

	RML 11	O sistema deve disponibilizar o saldo do cliente quer em €, quer em kWh	Média
	RML 12	O cliente poderá consultar o saldo em tempo-real	Alta
	RML 13	Todas as comunicações devem ser realizadas com recurso à rede GSM	Alta
	RML 14	O sistema deve possuir um sistema de segurança para garantir a integridade e autenticidade das mensagens enviadas	Média
Requisitos de Engenharia	RML 15	Capacidade de operação de forma autónoma	Alta
	RML 16	O sistema deve possuir um mecanismo de corte de energia	Alta
	RML 17	O sistema deve possuir mecanismos de detecção e prevenção de fraude e violação	Baixa
	RML 18	O sistema deve estar protegido contra tentativas de alteração do saldo, nomeadamente ataques de replicação de mensagens, alteração de mensagens e criação de novas mensagens.	

Seguidamente apresenta-se a lista de requisitos relativos ao desenvolvimento subsistema para empresa distribuidora de energia.

Tipo	Código	Definição	Prioridade
Requisitos Funcionais	REN 1	A aplicação deve ser capaz de enviar mensagens de texto utilizando um <i>modem</i> GSM.	Alta
	REN 2	A aplicação deve interagir com a base de dados, permitindo: <ul style="list-style-type: none"> • Consultar os dados dos clientes e mensagens; • Inserir novos clientes na base de dados; • Inserir todas as mensagens enviadas na base de dados; 	

	REN 3	A interface deve ser apelativa e intuitiva	Média
Requisitos de Engenharia	REN 4	A aplicação deve ser capaz de comunicar via RS232.	Alta
	REN 5	Deve ser criada uma base de dados onde constam as informações relativas a todos os clientes e todas as mensagens enviadas.	Média

3.6 - Apresentação da Solução

Como explicado anteriormente, esta dissertação tem como objectivo o desenvolvimento de um medidor de energia autónomo e pré-pago. Este sistema terá que ser capaz de efectuar uma medição de energia activa de forma bastante precisa, utilizar a rede GSM para troca de mensagens entre os seus diferentes módulos, efectuar o corte do fornecimento de energia caso o saldo do cliente se esgote e ainda disponibilizar informações ao utilizador sobre os respectivos consumos.

Em seguida serão apresentadas as possíveis formas para efectuar a facturação da energia consumida e por será apresentada a arquitectura da solução proposta onde serão definidos todos os aspectos relativos à futura implementação do sistema.

3.6.1 - Métodos para realizar a facturação da energia consumida

Inicialmente foram identificadas três possíveis formas de efectuar a facturação, são elas:

- Utilizar o saldo disponível no cartão SIM utilizado nas comunicações sem fios;
- Armazenar o saldo em *Smart Cards*;
- Através de pagamentos via multibanco.

Facturação de energia baseada no saldo do cartão SIM

Neste tipo de facturação é pretendido implementar um sistema semelhante ao serviço de internet móvel, disponibilizado pelas operadoras móveis, onde o tarifário é pré-pago. Desta forma, o saldo do cartão SIM seria decrementado mediante o consumo de energia eléctrica do cliente.

Os dados do saldo do cartão SIM não podem ser alterados de forma fácil, pelo que apenas as operadoras o podem realizar. Desta forma, para proceder ao débito do saldo do cartão SIM é necessário criar uma parceria com a operadora para que esta decemente o saldo. Para além disso, é necessário possuir um contrato com a operadora móvel para que esta disponibilize a maior parte do saldo debitado à empresa distribuidora da energia eléctrica.

Após o contacto das várias operadoras móveis existentes em Portugal verificou-se que existem duas alternativas para a implementação deste serviço. Na primeira, os consumos seriam transmitidos para a operadora móvel via TCP/IP. A segunda alternativa é baseada na utilização do serviço de *Short Code*, disponibilizado pelas operadoras.

Comunicação dos consumos via TCP/IP

Relativamente à comunicação dos consumos via TCP/IP, esta técnica impõe que todos os medidores possuam uma ligação à internet para comunicar o valor da energia consumida. Este tipo de parceria com a operadora móvel permite que a empresa fornecedora de energia tenha maior controlo sobre os custos associados aos seus serviços, na medida em que para alterar o custo de fornecimento de energia apenas necessita de informar a operadora móvel para efectuar a rectificação. Esta técnica permite a implementação de um serviço de cobrança pré-pago, assim como pós-pago.

As comunicações de consumos à operadora móvel podem ser efectuados utilizando um protocolo de comunicação seguro, como é o caso do HTTPS, garantindo a confidencialidade dos dados trocados entre os medidores e a operadora.

Short Code

Short codes são números de telefone especiais, mais curtos que um número de telefone normal, tipicamente têm cinco dígitos para ser mais fácil de memorizar, mas podem variar entre um e vinte.

Esta técnica é normalmente utilizada para implementar serviços de valor acrescentado, como é o caso da votação em concursos televisivos, doações de caridade, entre outros. Existe também a possibilidade de associar um telefone a um serviço periódico de valor acrescentado, isto é, o cliente recebe periodicamente os conteúdos desejados sem que necessite de efectuar qualquer pedido. [17]

As operadoras móveis podem disponibilizar dois tipos de *Short Codes*: [18]

- *Destination Short Codes* - A requisição de um serviço via mensagem de texto é direccionado de acordo com o endereço de destino da mensagem original;
- *Embedded Short Codes* - É utilizado apenas um *Short Code* para aceder a todas as aplicações. A aplicação destino é identificada com base no corpo da mensagem de texto.

O acesso, a partir do estrangeiro, a este serviço não é fácil de conseguir, uma vez que exige um acordo entre as várias operadoras para disponibilizarem um número que direccionará o pedido para o número local. Ainda mais difícil de conseguir é que esse número se mantenha fora do país em questão.

No âmbito do sistema de medição de energia, esta tecnologia poderia ser utilizada para facturação da seguinte forma: quando o cliente atingisse um determinado consumo de energia eléctrica, o medidor enviaria uma mensagem de texto para um destes números, que estaria associado à empresa distribuidora de energia, controlando assim o saldo disponível no cartão SIM.

No entanto, as técnicas de facturação enunciadas anteriormente possuem a desvantagem das altas taxas cobradas pelas operadoras móveis, que, no caso do serviço de *short code*, assumem valores na ordem dos 50%. Estas elevadas taxas, de certa forma, inviabilizam a utilização destes serviços para a facturação de energia.

Facturação de energia utilizando *Smart Cards*

Um *Smart Card* trata-se de um cartão de plástico, semelhante a um cartão de crédito que possui um circuito integrado e é capaz de armazenar e/ou processar dados. Os níveis de segurança obtidos são muito superiores aos cartões de banda magnética.

Os *Smart Cards*, hoje em dia, são utilizados para inúmeras aplicações, tais como, identificação, realização transacções bancárias, operações telefónicas e controlo de acesso.

Várias são as vantagens associadas à utilização deste tipo de cartões:[19]

- Podem armazenar até 32 KB de dados;
- Dados podem ser protegidos contra visualizações não autorizadas;
- Um único cartão pode alojar diversas aplicações;
- Têm um tempo de vida significativamente maior do que um cartão de banda magnética;
- Não podem ser facilmente replicados.

Os *Smart Cards* podem ser classificados de acordo com vários factores, pelos seus componentes, pelas suas interfaces ou pelo sistema operativo que possuem.

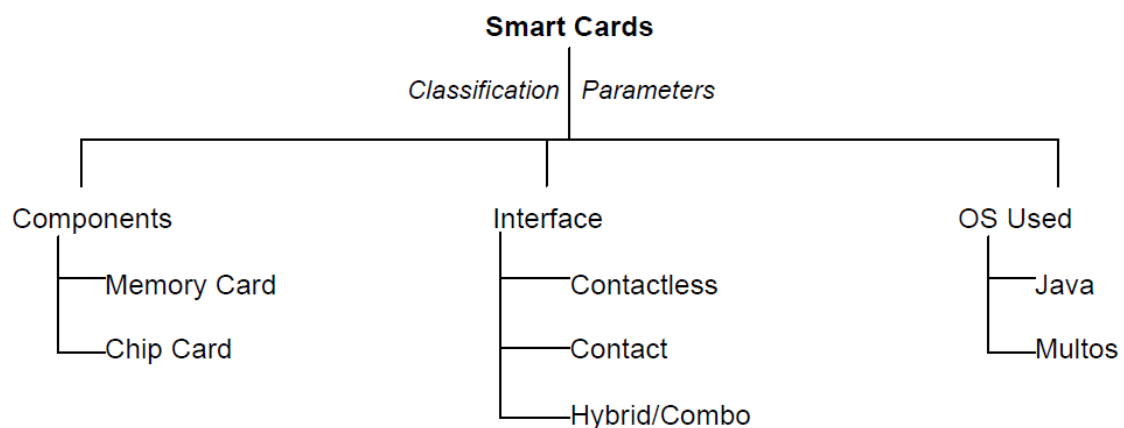


Figura 3.2 - Classificação dos Smart Cards [19]

No que diz respeito à classificação dos cartões com base nos componentes, podem-se distinguir dois tipos:

- **Cartões de memória** - são os mais comuns e possuem um menor custo. São utilizados apenas para guardar dados. Possuem dois tipos de memória, uma EEPROM utilizada para fins gerais, onde as aplicações guardam os dados, e uma ROM que guarda os dados relativos ao cartão.
- **Cartões inteligentes** - Possuem um custo bastante superior, contudo garantem maior segurança, permitindo a confidencialidade dos dados através da utilização de métodos de encriptação. São constituídos por um processador e três tipos de memória, uma ROM, que guarda o sistema operativo, uma EEPROM que é utilizada para as aplicações guardarem os dados e uma RAM utilizadas pelo processador nas suas operações.

Relativamente à classificação com base nas interfaces, estas podem ser realizadas através de contactos físicos, sem fios, onde na realização das operações de leitura e escrita apenas é necessário aproximar o cartão de um transmissor, ou ainda uma combinação dos dois permitindo a utilização de qualquer um dos métodos anteriores.

Estes cartões podem também ser classificados com base no sistema operativo que possuem. Existem vários sistemas operativos para *Smart Cards*, e.g., MultOS, JavaCard, MFC, entre outros. [19]



Figura 3.3 - Smart Card [20]

Após a análise dos *Smart Cards*, verifica-se que são uma alternativa viável para a implementação no sistema de medição de energia pré-pago, uma vez que podem conter os dados sobre o saldo do cliente e facilmente se pode proceder ao seu débito.

No entanto, surge o problema do carregamento da conta do cliente já que seria necessário criar todas as infra-estruturas necessárias que o cliente possa realizar o carregamento da sua conta energética. A criação destas infra-estruturas representa um

elemento verdadeiramente dispendioso, uma vez que seria necessária a criação de um sistema de recarregamento de modo a garantir que todos os utilizadores do sistema têm facilmente acesso a ele.

Facturação de energia baseada em pagamentos via multibanco

A SIBS - Forward Payment Solutions, fundada em 1983, é a empresa responsável pelo desenvolvimento de soluções de pagamento seguras, sendo actualmente um dos maiores processadores de pagamentos da Europa.[21] Entre as soluções desenvolvidas incluem-se as redes de Multibanco, bem como a prevenção de fraude numa vasta gama de transacções internacionalmente reconhecidas.

“O Grupo SIBS processou em 2010 mais de 2.3 mil milhões de transacções e mais de 8 biliões de euros.” [22]

A SIBS trata das transacções que têm origem em diversos canais de comunicação, como é o caso das caixas automáticas (ATM), terminais de pagamento (POS), internet, telemóveis, entre outros. Para além disso, a SIBS gere todos os instrumentos de pagamento, assim como a respectiva compensação interbancária como é visível na figura 3.4.

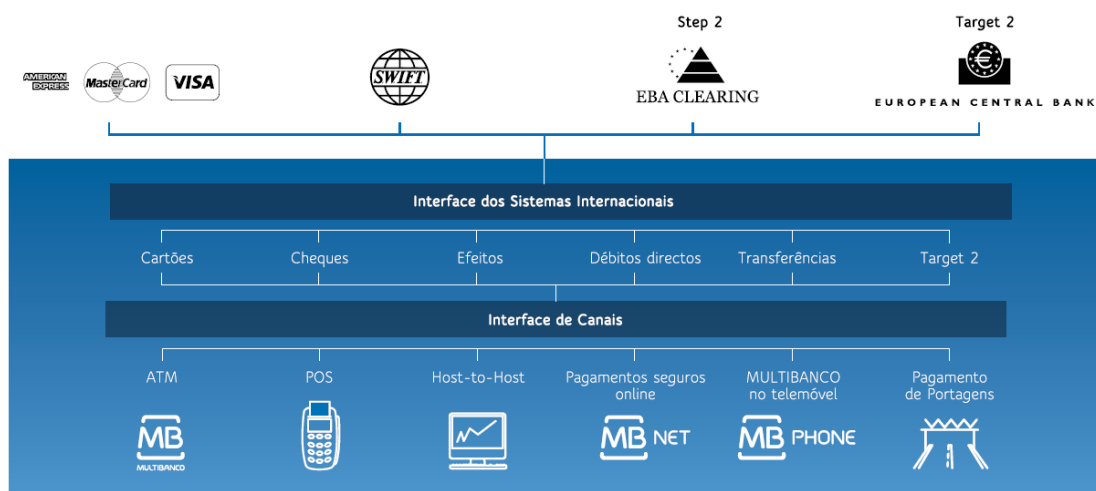


Figura 3.4 - Sistema gerido pela SIBS

A SIBS desenvolve mecanismos de segurança e detecção de fraude. *“Segundo fontes oficiais (tais como as da VISA e da EAST) Portugal apresenta níveis de fraude 4 vezes menores que o resto da Europa e até 10 vezes menos que países Europeus com maiores níveis de fraude, como são o Reino Unido e a Alemanha.” [23]*

A utilização de um sistema de cobranças por Multibanco tem várias vantagens, quer para a empresa fornecedora do serviço, assim como para o cliente:[24]

- Maior facilidade de pagamento para o cliente;
- O pagamento pode ser efectuado em qualquer Multibanco;
- Possibilidade de pagamento 24 horas por dia;
- Meio de pagamento seguro e fiável;
- Permite a diminuição dos prazos de pagamento;
- Diminuição dos custos e trabalho administrativo de cobrança.

Assim, neste tipo de serviço, o cliente tem ao seu dispor uma entidade, referência e montante para efectuar o recarregamento do seu saldo.

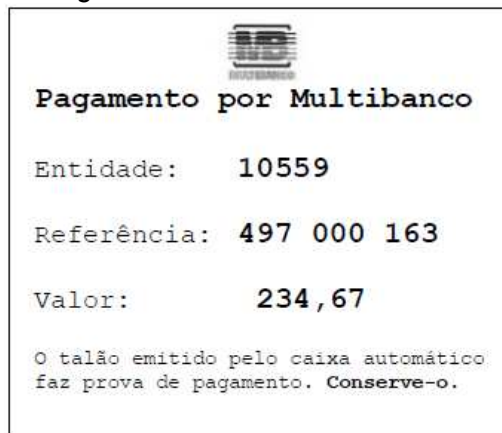


Figura 3.5 - Talão para pagamento por Multibanco

Os campos citados anteriormente são facilmente obtidos através da utilização de um software, disponibilizado pela empresa que fornece o serviço de multibanco. Este software não tem qualquer custo. O único custo associado a este tipo de serviço é uma pequena taxa por cada pagamento efectuado, no valor de 0.85€.

O campo entidade é um número de cinco dígitos e serve para identificar a entidade credora. A referência está associada ao cliente e serve para informar a empresa fornecedora do serviço qual o cliente efectuou o pagamento.

Por fim, pode-se concluir que se trata de um serviço de fácil implementação e com um baixo custo, contudo, a existência de terminais de pagamento é ainda um pouco limitada em alguns países Africanos e no médio Oriente. [25]

3.6.2 - Definição da arquitectura da solução proposta

Para a implementação do sistema de medição e facturação de energia eléctrica é necessário definir o método que se utilizará para efectuar a medição de energia e também como se realizará a facturação da mesma.

No que diz respeito à medição da energia, esta será realizada através de métodos completamente electrónicos, de modo a eliminar os erros introduzidos pela utilização de

componentes móveis. O seu cálculo será efectuado utilizando um circuito integrado que apresenta resultados de acordo com o que é pretendido para o projecto. A utilização deste tipo de tecnologia simplifica o projecto, quer ao nível do hardware, quer do software, garantindo, o mesmo nível de rigor nas medições.

Relativamente à facturação da energia, o método preferencial seria a utilização do saldo do cartão SIM, contudo as altas taxas cobradas pelas operadoras móveis e o elevado tráfego de mensagens exigido, inviabilizam a utilização deste tipo de serviço.

O serviço de facturação baseado em *Smart Cards* trata-se também de um método simples de implementar e garante segurança dos dados, contudo tem a desvantagem de implicar a criação de uma infra-estrutura para realizar o recarregamento do saldo dos clientes.

A utilização de um serviço de pagamento via multibanco é um método conveniente para a implementação do mecanismo de facturação de energia, uma vez que se trata de um método de fácil implementação e tem custos relativamente reduzidos.

Assim, no desenvolvimento do protótipo do sistema optar-se-á pela utilização do sistema de pagamentos por multibanco, na qual cada medidor receberá os dados relativos ao pagamento de cada cliente através de uma mensagem de texto. Para a implementação do protótipo optou-se pela utilização das mensagens de texto para efectuar a troca de dados entre os vários elementos do sistema, contudo as redes GSM disponibilizam também o serviço de GPRS que poderia também ser utilizado para efectuar a comunicação via TCP/IP. No entanto, os tarifários existentes actualmente dificultam a sua utilização pelo que requerem uma assinatura mensal, tornando este serviço mais dispendioso que as mensagens de texto.

A utilização das redes GSM tem como consequência a necessidade de utilização de um *modem* GSM em cada medidor, introduzindo assim um custo acrescido ao projecto. Contudo todas as infra-estruturas necessárias para a utilização das redes GSM já se encontram desenvolvidas e implementadas em praticamente todo o mundo. Desta forma a utilização destas redes apresentam uma maior flexibilidade relativamente à utilização dos *Smart Cards*. No entanto, para a utilização de *Smart Cards*, reduzidas alterações seriam necessárias no sistema de medição de energia.

Tendo em consideração os requisitos definidos anteriormente, é possível definir a arquitectura da solução a implementar. Assim, o sistema será capaz de comunicar com a empresa distribuidora de energia utilizando de mensagens de texto para a trocas de todos os dados necessários, bem como possuir algumas funcionalidades fundamentais para o seu bom funcionamento, entre elas, detecção de falhas ou fraude do sistema e garantir segurança na troca de mensagem (Figura 3.6).

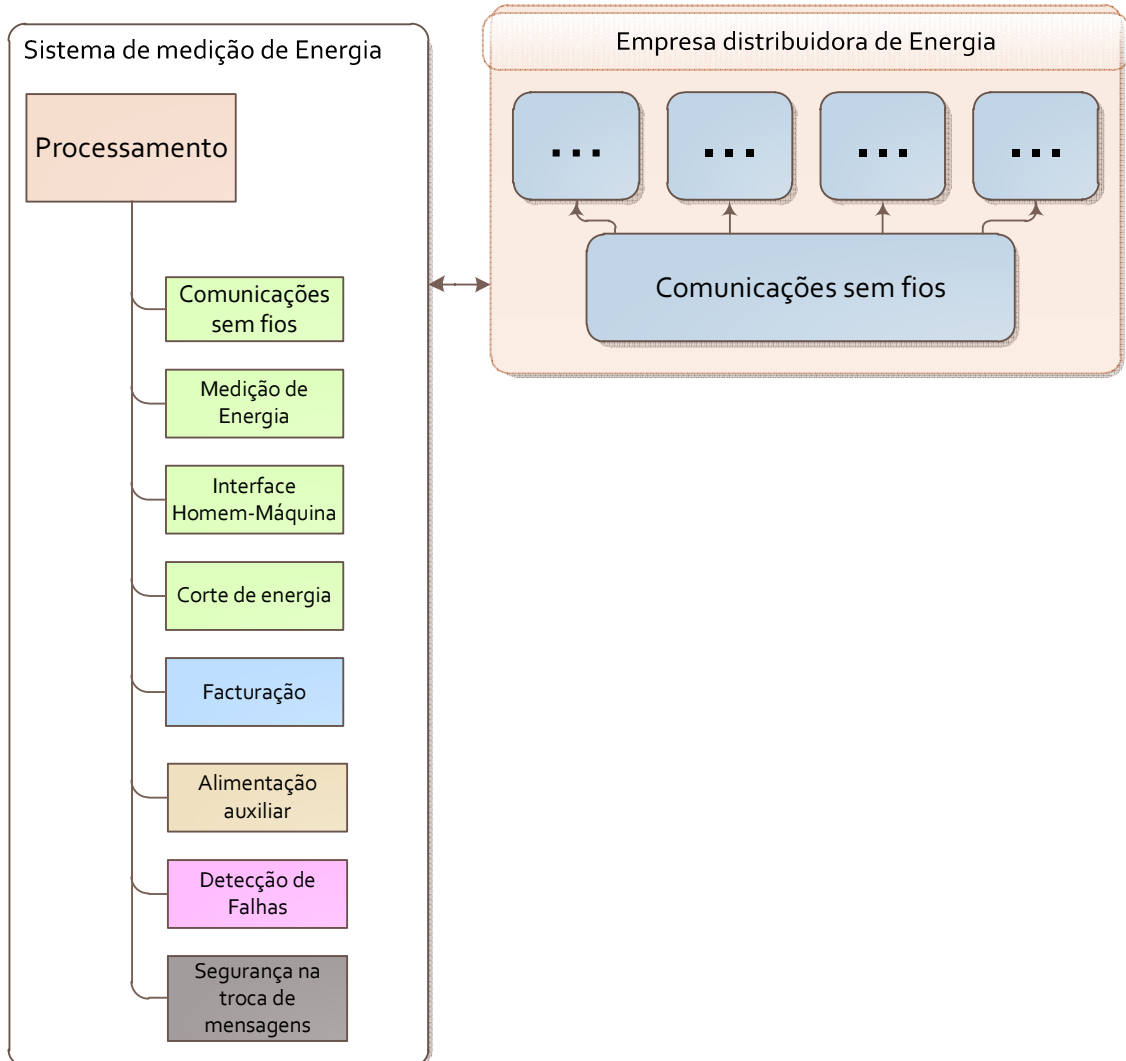


Figura 3.6 - Arquitectura funcional do sistema de medição de energia

Ao nível do hardware o sistema de medição de energia pode ser constituído por sete elementos fundamentais, são eles:

- Alimentação do sistema, será um simples conversor AC/DC que permitirá a alimentação de todo o sistema de medição de energia a partir da rede eléctrica;
- Microprocessador, que para além de todo o processamento exigido para controlar todo o hardware envolvido, implementará as funcionalidades de facturação, detecção de falhas e segurança na troca de mensagens;
- Medidor de energia, que, como explicado anteriormente será o elemento responsável pela aquisição dos sinais de tensão e corrente e proceder ao cálculo da energia;
- Modem GSM, para comunicar com a companhia eléctrica, enviando e recebendo todos os dados necessários;

- Interface Homem-Máquina de modo a permitir ao cliente a consulta dos seus consumos em tempo-real;
- Relé, que efectuará o corte da energia sempre que o saldo do cliente se esgote;
- Alimentação auxiliar, funcionará como meio de prevenção caso a alimentação principal falhe.

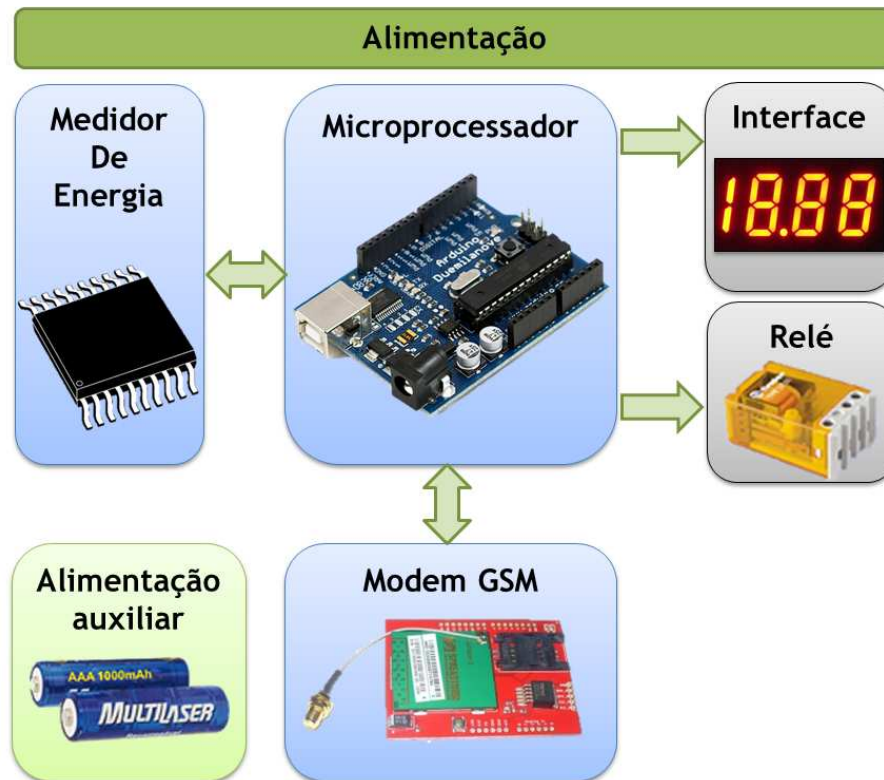


Figura 3.7 - Esquema do *hardware* necessário para o sistema

Cada medidor de energia será constituído pelo *hardware* descrito anteriormente. Contudo, outra alternativa à implementação do sistema e visto que o módulo das comunicações sem fios representa um dos componentes mais dispendiosos do sistema, seria utilizar apenas um *modem* GSM para receber as mensagens de um determinado número de medidores. Assim, nesta solução todos os medidores estariam interligados por uma rede onde seriam transmitidos os dados provenientes das mensagens de texto.

Relativamente à interface Homem-Máquina optou-se pela utilização de *displays* de 7 segmentos para disponibilizar as informações relativas a cada cliente. Contudo a utilização destes *displays* introduz um consumo de energia relativamente elevado, pelo que a utilização de um LCD poderia eliminar este problema. No entanto, como será explicado posteriormente, o facto dos consumos de energia dos *displays* serem relativamente superiores não tem um grande impacto, uma vez que os *displays* não estarão continuamente ligados mas sim apenas pelo tempo estritamente necessário para a consulta das informações.

Por fim, o corte de energia trata-se de uma funcionalidade que deve ser negociada com o cliente, uma vez que o seu corte pode causar graves problemas para o utilizador. Assim, deverá existir um mecanismo de alerta de fim de saldo, bem como um período de tolerância após o término do saldo.

3.7 - Sumário

Em síntese, este capítulo, como resultado de um processo de análise de requisitos, permitiu determinar quais as funcionalidades que o sistema deve possuir, quais os seus ambientes de operacionalidade e por último as suas características funcionais.

Deste modo, constituirá um elemento de referência durante todo o projecto, já que nele são definidos e especificados requisitos, funcionalidades, restrições e utilizadores envolvidos no projecto do sistema.

Por fim é apresentada a solução proposta onde são definidos todos os pormenores para a futura implementação do sistema de medição e facturação de energia.

Capítulo 4

Implementação do Sistema - Hardware

Ao longo deste capítulo serão abordados todos os pormenores relativos à implementação do sistema de medição e facturação de energia no que diz respeito aos elementos de *hardware* identificados anteriormente.

Na figura 4.1 apresenta-se representado o esquema de todo o *hardware* presente no sistema de medição de energia e as respectivas ligações e interfaces entre os vários componentes.

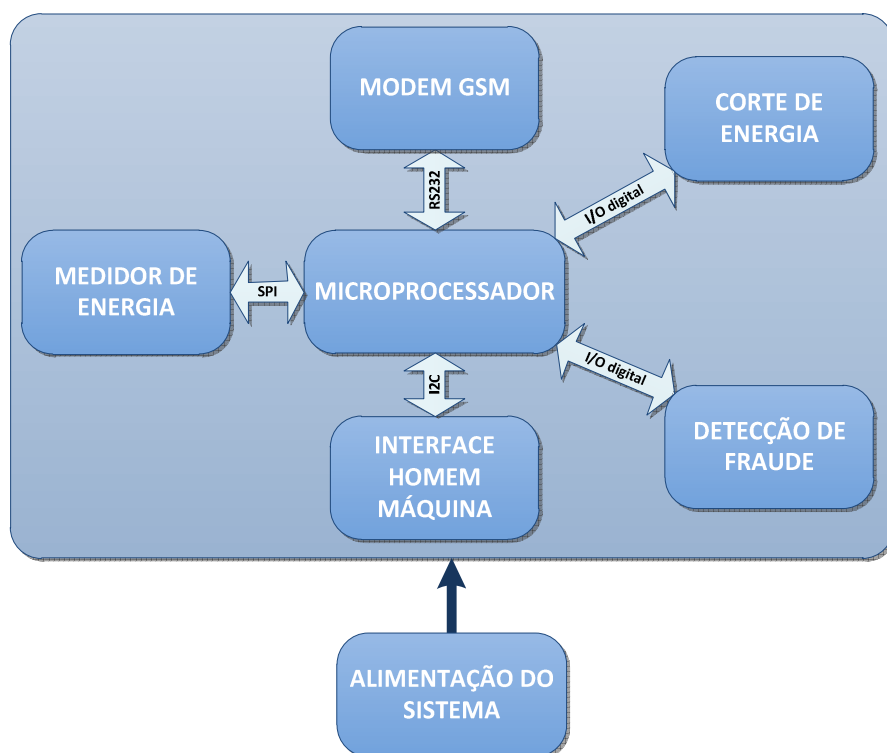


Figura 4.1- Esquema de ligações e interfaces entre os vários componentes de hardware

4.1 - Microprocessador

Este é o elemento principal do sistema de medição de energia, visto ser aquele que será responsável pelo controlo de todos os dispositivos utilizados no sistema de medição de energia, assim como pelo controlo dos consumos do cliente. Será da responsabilidade do microprocessador comunicar com o medidor de energia de modo a adquirir o valor da energia eléctrica consumida e proceder à respectiva taxação, assim como, efectuar todas as comunicações necessárias com o modem GSM, disponibilizar informações ao cliente e proceder ao corte da energia sempre que necessário.

Para a implementação deste elemento no protótipo utilizar-se-á a plataforma de desenvolvimento *Arduino* [26]. O *Arduino* consiste numa placa de desenvolvimento *open source* que possui um microcontrolador atmega328P e uma interface série através da porta USB.

A escolha desta plataforma de desenvolvimento prendeu-se com o facto de esta possuir todos os componentes necessários para o funcionamento do microprocessador incorporados, assim como facilitar as operações de *debug* de todo o software produzido. Contudo, esta plataforma será utilizada apenas no desenvolvimento do protótipo, visto que para uma futura implementação em larga escala utilizar-se-ia apenas um simples microcontrolador, de modo a reduzir os custos do equipamento. Este facto, não causa qualquer problema uma vez que todo o código fonte desenvolvido pode ser facilmente utilizado num microprocessador da mesma família.

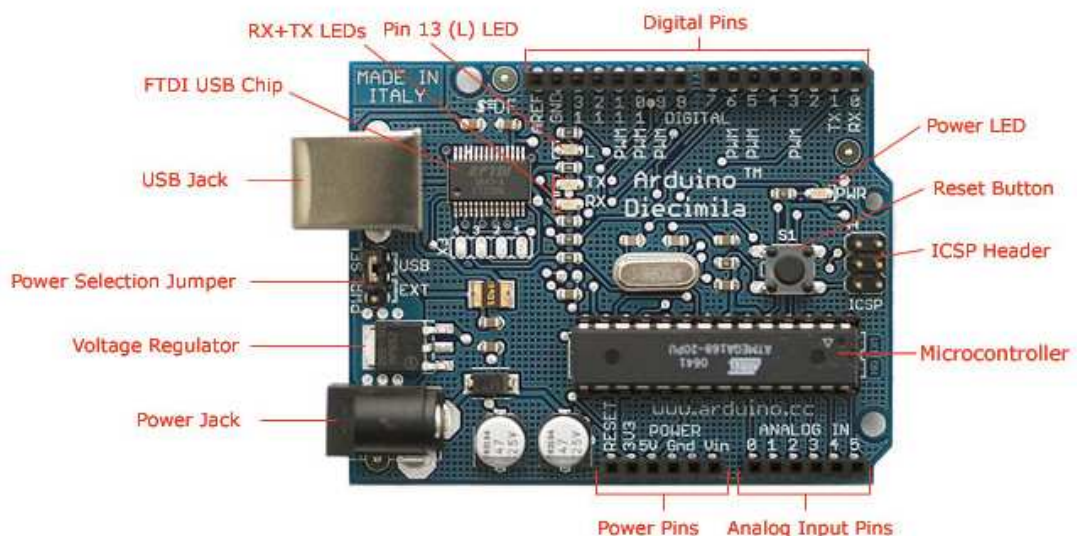


Figura 4.2 - Arduino

Como é visível na figura 4.2, o *Arduino* possui 14 pinos acessíveis para entradas ou saídas digitais (onde 6 podem ser utilizados para gerar PWM) e 6 pinos para entradas analógicas que estão directamente ligados aos ADC's do microprocessador. Esta plataforma utiliza ainda um cristal de 16 MHz para geração do relógio do microprocessador e permite a sua alimentação através de um conector USB ou através de uma fonte externa (por exemplo conversor AC/DC ou bateria). A fonte de alimentação é seleccionada automaticamente.

Na tabela 4.1 estão representadas as principais características do *Arduino*.

Tabela 4.1- Características do *Arduino*

Microcontrolador	ATmega328
Tensão de funcionamento	5V
Tensão de alimentação	6-20V
Entradas/saídas digitais	14 (em que 6 permitem gerar PWM)
Entradas analógicas	6
Corrente DC fornecida por pino	40 mA
Memória Flash	32 KB em que 2 KB são usados pelo bootloader
Memória SRAM	2 KB
Memória EEPROM	4 KB
Frequência de relógio	16 MHz

No que diz respeito aos pinos de entrada e saídas digitais, alguns deles estão especializados para determinadas funções:

- Porta Série: Estes pinos são utilizados para transmitir (TX) e receber (RX) dados através da porta série. Estes pinos encontram-se conectados ao conversor RS232/USB.
- Interrupções Externas: Podem se configurados para gerar uma interrupção aquando de uma mudança de valor, valor lógico negativo ou flanco positivo ou negativo.
- Geração de PWM.
- Comunicações SPI. Este protocolo de comunicações será explicado com maior detalhe posteriormente.
- I2C. Este barramento de comunicações será explicado no capítulo seguinte.

O *arduino* possui ainda 6 pinos para entradas analógicas. Cada um destes pinos encontra-se ligado a um dos ADC's do microcontrolador, apresentando uma resolução de 10 bits.

Uma característica bastante interessante do *arduino* é o facto de possuir um mecanismo de *Reset* automático enquanto este se encontra ligado ao computador. Este mecanismo é especialmente útil quando se pretende programá-lo, no sentido em que não exige ao programador que o *Reset* seja feito manualmente. Esta característica foi implementada através da ligação de um dos sinais de controlo de fluxo da porta série (DTR) ao sinal de

Reset do microcontrolador. Assim, o software de programação do *arduino* permite a transferência do código para o microprocessador clicando apenas do botão de *upload*.

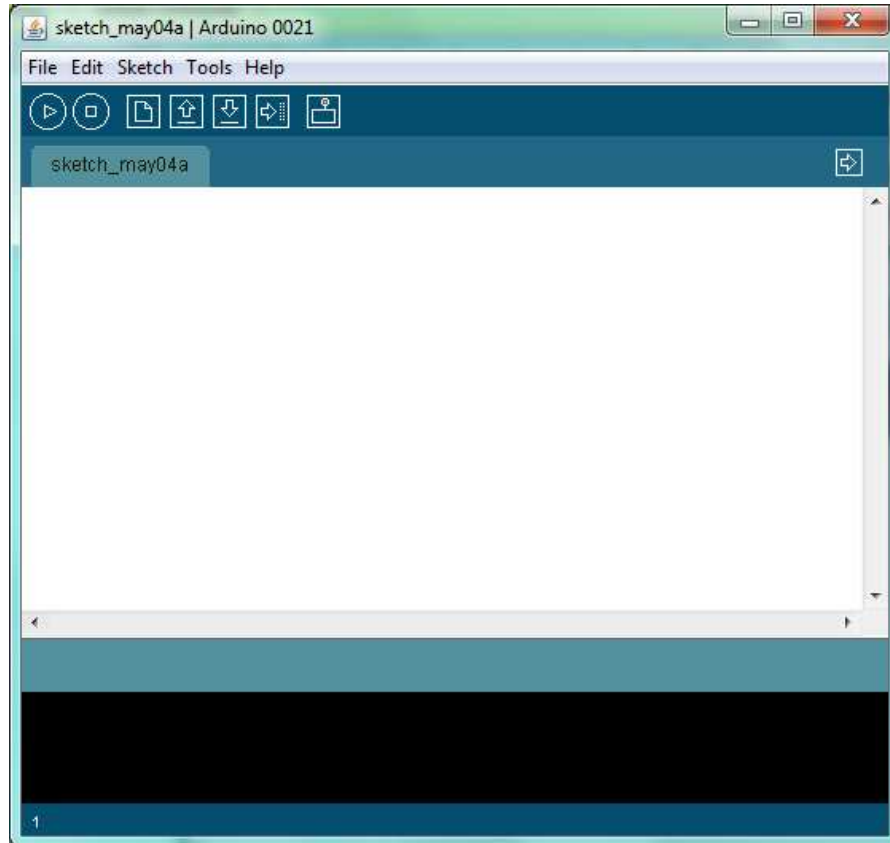


Figura 4.3 - Ambiente de desenvolvimento do *Arduino*

Para além das características enunciadas anteriormente, um fusível ajustável protege a porta USB do computador contra possíveis sobre-correntes ou possíveis curtos-circuitos.

Todas as características explicadas anteriormente tornam o *arduino* numa ótima ferramenta para o desenvolvimento do protótipo do sistema de medição e facturação de energia.

4.2 - Medição de energia

Como foi dito anteriormente a tarefa de medição dos consumos energéticos será realizada recorrendo a métodos completamente electrónicos. Assim, a medição da energia consumida será da responsabilidade de um circuito integrado. Este integrado estará continuamente a monitorizar a energia consumida. Para a realização desta tarefa optou-se pela utilização do

ADE7753 [10] pois apresenta resultados bastante satisfatórios no que diz respeito à medição de energia activa e aparente [13] e um conjunto de características que o tornam na escolha ideal para a implementação deste sistema.

O ADE7753 trata-se de um circuito integrado para medição de energia com uma elevada precisão (menos de 0.1% de erro na medição da energia activa). Este circuito permite efectuar calibrações de ganho, offset, fase e valor eficaz utilizando comunicação série SPI (Serial Peripheral Interface Bus) e possui ainda uma saída em onda quadrada com frequência programável e variável com o valor da potência que se está a medir.

Este circuito integrado incorpora 2 ADC's $\Sigma\text{-}\Delta$ (*sigma-delta*) de segunda ordem com uma resolução de 16 bits, um integrador digital no ADC de corrente e todo o processamento de sinal necessário para o cálculo da energia, como é o caso da medição do período e valores eficazes dos sinais de tensão e corrente, que serão detalhados com maior pormenor em seguida.

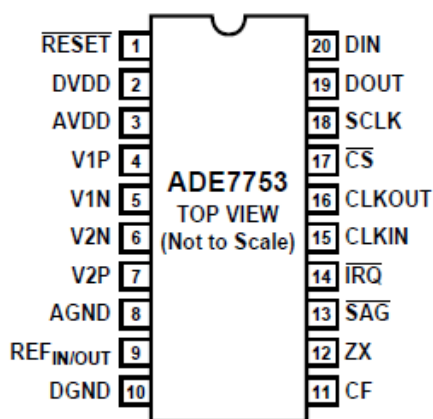


Figura 4.4 - ADE7753

4.2.1 - Características de funcionamento [10]

Modo de funcionamento

O ADE7753 possui dois pares de entradas diferenciais de tensão V1 e V2 (figura 4.4), para aquisição dos sinais de corrente e tensão, respectivamente. Cada um destes pares de entradas diferenciais está limitado a sinais que assumam no máximo 0.5V e no mínimo -0.5V.

Cada entrada analógica possui um amplificador de ganho programável (PGA) que pode assumir os valores 1, 2, 4, 8 e 16. Esta selecção de ganho é efectuada através da escrita num registo interno do circuito integrado.

É também possível ajustar o erro de offset em cada um dos canais numa gama de $\pm 20\text{mV}$ a $\pm 50\text{mV}$ (dependendo do ganho seleccionado).

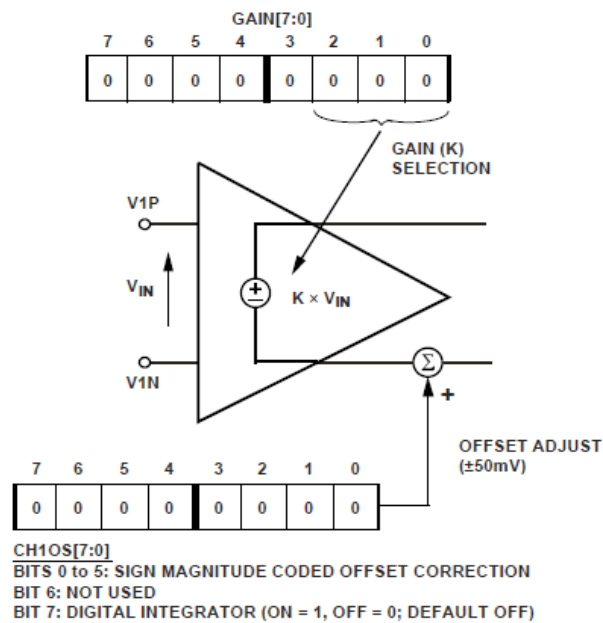


Figura 4.5 - Esquema de circuito de aquisição dos sinais[10]

Além destas características o canal 1 (aquisição do sinal de corrente) permite definir a gama de aquisição do sinal para o ADC. Assim, em vez dos valores máximos admitidos serem na gama de $\pm 0.5V$ é possível definir gamas de $\pm 0.25V$ ou $\pm 0.125V$.

Na tabela 4.2 é apresentada a relação entre o ganho e a gama de valores escolhida.

Tabela 4.2 - Relação entre o ganho e a gama de valores escolhida[10]

Max Signal Channel 1	ADC Input Range Selection		
	0.5 V	0.25 V	0.125 V
0.5 V	Gain = 1	–	–
0.25 V	Gain = 2	Gain = 1	–
0.125 V	Gain = 4	Gain = 2	Gain = 1
0.0625 V	Gain = 8	Gain = 4	Gain = 2
0.0313 V	Gain = 16	Gain = 8	Gain = 4
0.0156 V	–	Gain = 16	Gain = 8
0.00781 V	–	–	Gain = 16

Detecção do cruzamento em zero

O ADE7753 possui um mecanismo de detecção dos cruzamentos em zero do canal 2 (canal de aquisição do sinal de tensão), para assim determinar o período da onda em questão. Este mecanismo produz um sinal externo, ZX, que pode ser utilizado para efeitos de calibração. O sinal ZX assume o valor lógico positivo durante as arcadas positivas da onda de tensão e um valor lógico negativo durante as arcadas negativas. Contudo este sinal passa por um filtro

passa-baixo que possui um pólo nos 140Hz, introduzindo assim um pequeno atraso entre o sinal de entrada do ADC e o sinal na saída do filtro.

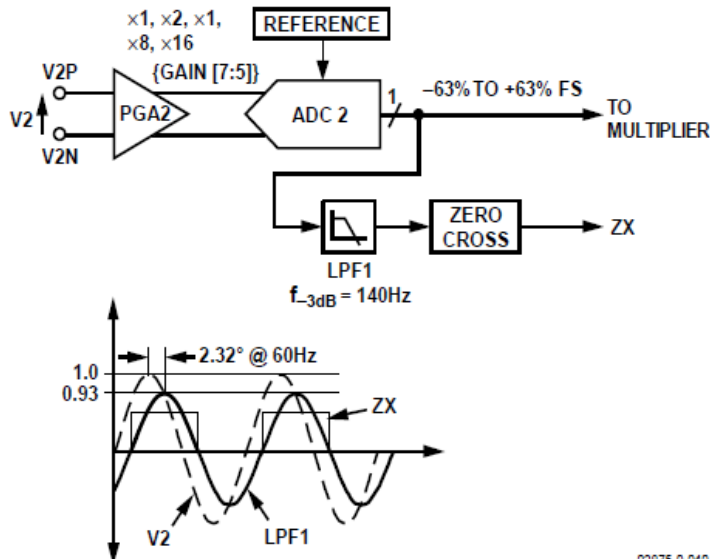


Figura 4.6- Detecção do cruzamento em zero do sinal de tensão[10]

A detecção do cruzamento em zero possui também um *timeout* associado, que se trata de um registo de 12 bits que é decrementado a cada $128/CLKIN$ s ($\approx 35\mu s$). Este registo é reprogramado com o seu valor máximo em cada detecção efectuada. Sempre que este registo atinge o valor 0 o pino \overline{SAG} toma o valor lógico negativo indicando a ocorrência do *timeout*, no entanto o ADE7753 pode ser configurado para gerar uma interrupção no pino \overline{IRQ} .

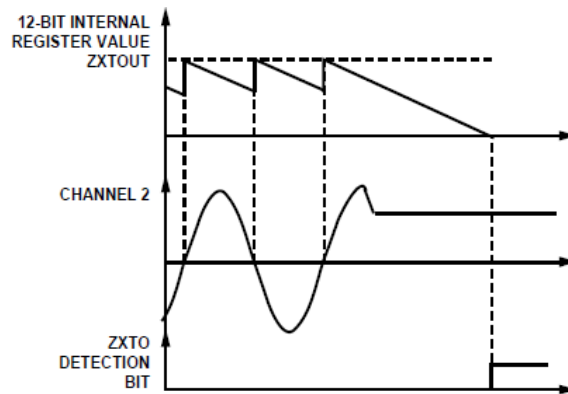
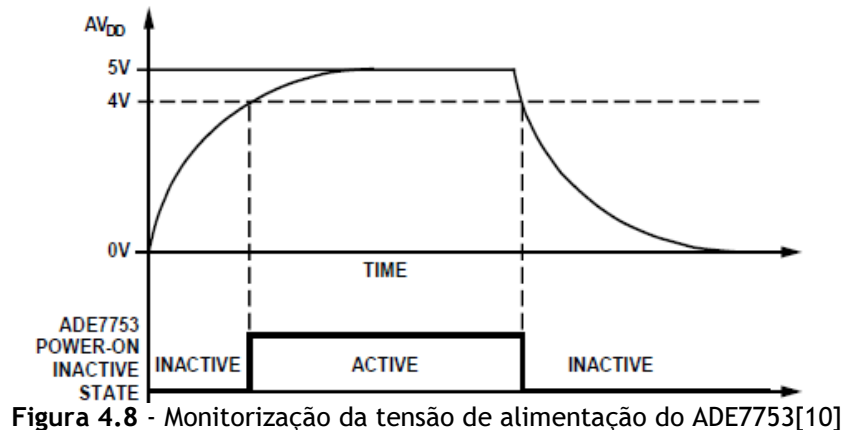


Figura 4.7 - Timeout da detecção do cruzamento em zero[10]

A medição do período é acumulada num registo de 16 bits e é actualizada em cada período. Este registo possui uma resolução de $2.2\mu s/LSB$.

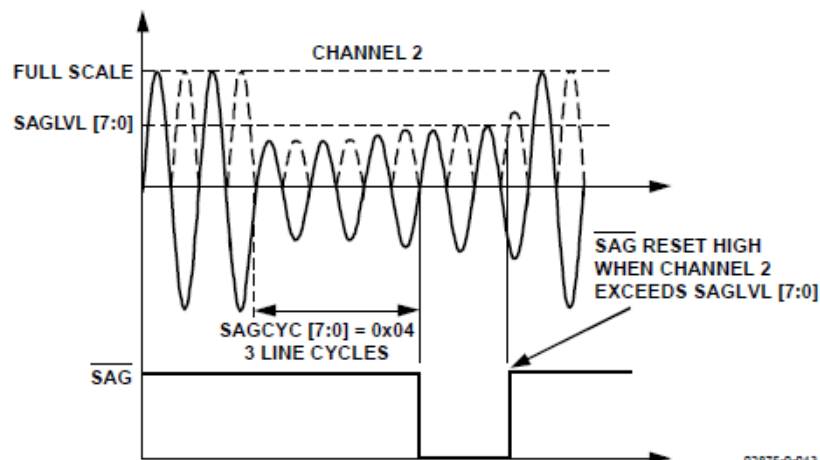
Monitorização da tensão de alimentação

O ADE7753 possui também um mecanismo de monitorização da tensão de alimentação. Desta forma, a tensão de alimentação (AV_{DD}) está continuamente a ser monitorizada e se esta baixar abaixo de 4V o circuito integrado vai para um estado inactivo, onde não é efectuada a medição de energia. Este mecanismo é bastante útil para garantir o bom funcionamento quando é ligado ou desligado. Este mecanismo possui ainda um sistema de histerese e um filtro para garantir imunidade contra ruído que possa existir na alimentação.



Monitorização da tensão e corrente na linha monofásica

O ADE7753 possui técnicas para a detecção da perda do sinal da rede. Além do *timeout* existente no mecanismo de detecção do cruzamento em zero, o ADE7753 pode ser programado para detectar quando a tensão diminui abaixo de determinado valor durante um número predeterminado de períodos, como é visível na figura 4.9.



Como é visível na figura 4.9, o valor da tensão diminui abaixo do limite definido (SAG_{LVL}) durante três ciclos, e à semelhança do que acontece no mecanismo de detecção do cruzamento em zero também neste mecanismo é gerada uma sinalização externa no pino \overline{SAG} , podendo também o ADE7753 ser programado para gerar uma interrupção no pino \overline{IRQ} . O pino \overline{SAG} volta a assumir o valor lógico positivo assim que o valor da tensão volte a ser superior ao limite que havia sido definido, indicando que o valor da tensão se encontra de novo dentro dos limites desejados.

O ADE7753 pode ainda ser programado para monitorizar os valores de pico da forma de onda da tensão ou corrente de modo a detectar quando estes sinais assumem valores superiores aos valores pretendidos. Um processo semelhante ao explicado anteriormente é executado sempre que os sinais que estão a ser monitorizados assumem valores acima dos definidos.

Geração de interrupções pelo ADE7753

No ADE7753 as interrupções são geridas pelo registo de estado das interrupções (*interrupt status register*) e pelo registo de activação de interrupções (*interrupt enable register*). Sempre que uma interrupção ocorre, o bit correspondente no registo de estado é colocado com o valor 1 e o pino \overline{IRQ} é colocado como o valor lógico 0 se a interrupção estiver activa no registo de activação de interrupções.

Para determinar qual a interrupção que ocorreu, sempre que o microcontrolador recebe um sinal de interrupção externa deve efectuar uma leitura do registo de estado das interrupções com *reset* e assim determinar a interrupção que foi despoletada. Assim que é realizada uma leitura deste registo todos os bits relativos às interrupções do ADE7753 são repostos no seu valor original (valor lógico 0) e o pino \overline{IRQ} assume de novo o valor lógico positivo.

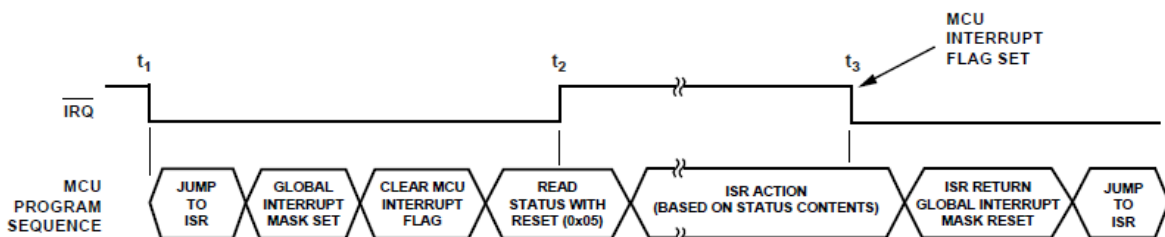


Figura 4.10 - Rotina de atendimento às interrupções[10]

A figura 4.10 mostra o diagrama com a implementação sugerida para a gestão das interrupções geradas pelo ADE7753 no microcontrolador. No instante t_1 é sinalizada a ocorrência de uma interrupção através da colocação do sinal \overline{IRQ} com o valor lógico negativo. Assim que detecta a sinalização de uma interrupção o microcontrolador deve executar a sua rotina de atendimento à interrupção. À entrada na rotina de atendimento à

interrupção, o microcontrolador deve desactivar momentaneamente todas as interrupções através da manipulação do bit de activação global das interrupções. Nesta altura a flag de interrupção externa deve também ser reposta e proceder à leitura do registo de estado das interrupções com *reset* para assim determinar a causa da interrupção. Em seguida procede-se à execução das tarefas resultantes da interrupção e por fim retorna-se da rotina de atendimento à interrupção repondo o valor no bit de activação global das interrupções.

Conversão de sinais analógicos para digital

Como foi dito anteriormente o ADE7753 possui dois ADC's Σ - Δ de segunda ordem. Por questões de simplicidade na figura 4.11 é apresentado o diagrama de blocos de um ADC Σ - Δ de primeira ordem.

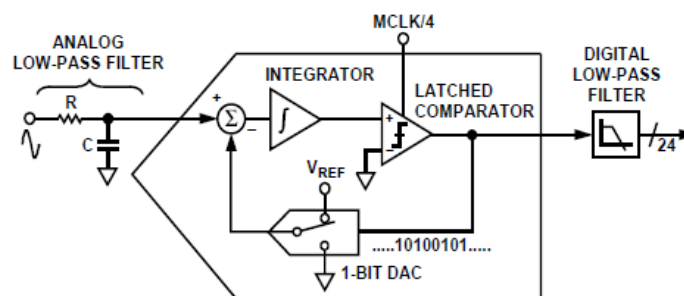


Figura 4.11 - Diagrama de blocos de um ADC Σ - Δ [10]

Um ADC Σ - Δ converte um sinal continuamente numa sequência de 1 e 0 à frequência determinada pelo relógio de entrada ($CLKIN/4 \approx 894$ kHz). Este tipo de ADC possui uma malha de realimentação com um DAC (conversor digital para analógico) de 1 bit accionado pela sequência de bits gerados. Se a malha de realimentação possuir um ganho suficientemente elevado o valor médio do sinal gerado pelo DAC aproximar-se-á do valor do sinal de entrada e consequentemente a sequência de bits gerados.

Assim, o valor resultante de uma única conversão é insignificante, sendo que apenas a média de um número elevado de amostras se trata de um resultado significativo. A média é realizada no filtro passa-baixas situado na saída do conversor. Através da média de um grande número de bits o filtro é capaz de gerar 24 bits de dados que são proporcionais ao valor do sinal de entrada.

Os conversores Σ - Δ utilizam duas técnicas para alcançar altas resoluções visto que no fundo se trata de um conversor de 1 bit. A primeira trata-se de realizar uma sobre amostragem, isto é, é realizada uma aquisição do sinal com uma frequência várias vezes superior à frequência do sinal de entrada. Por exemplo, no caso do ADE7753 é realizada uma amostragem à frequência de $CLKIN/4$ que corresponde a aproximadamente 894kHz, sendo

que a frequência desejada para o sinal de entrada pode variar desde os 40Hz até 2kHz. A sobre-amostragem realizada conduz também à diminuição do ruído introduzido no processo de quantização.

Contudo, esta sobre amostragem não é suficiente para reduzir os erros de quantização, pelo que para uma amostragem a uma frequência 4 vezes superior à frequência do sinal se obtém uma atenuação do ruído de quantização de apenas 6 dB (1 bit). Assim, para manter a frequência de amostragem em valores aceitáveis é possível modelar o ruído de quantização para que este se situe em frequências elevadas.

Para além destes aspectos no processo de conversão existe um filtro passa-baixo para prevenir o efeito de *aliasing*. *Aliasing* significa que as componentes de frequência superior a metade da frequência de amostragem do ADE7753, presentes no sinal de entrada do ADC, aparecem no sinal amostrado, com frequência inferior a metade da frequência de amostragem causando uma distorção do sinal. Este efeito acontece em todos os conversores analógicos para digital independentemente da sua arquitectura e é apresentado na figura 4.12.

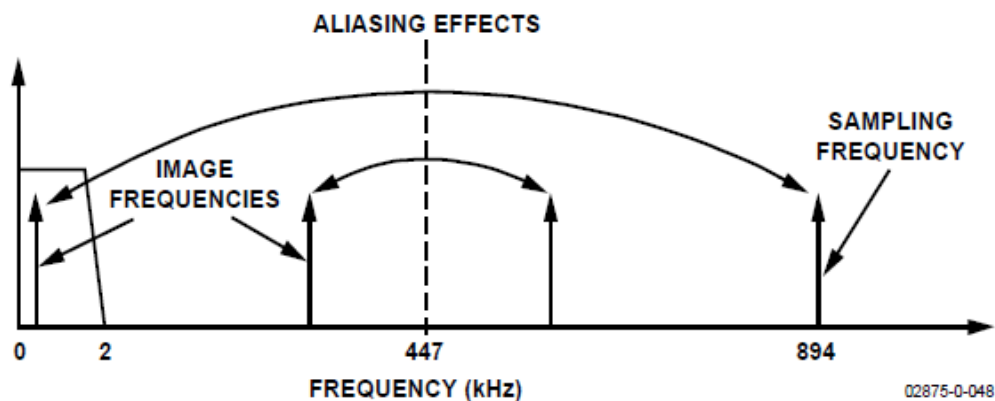


Figura 4.12- Efeito de *aliasing*[10]

Para reduzir este efeito o ADE7753 possui um filtro passa-baixo com um único pólo à frequência de 10kHz, produzindo uma atenuação de aproximadamente 40 dB na frequência de 894 kHz.

Através dos sinais digitais adquiridos o ADE7753 calcula os valores eficazes de ambos os sinais adquiridos, corrente e tensão, permitindo no primeiro caso efectuar compensação de *offset* deste valor. No caso da aquisição do sinal de tensão é possível efectuar uma compensação do valor de *offset* no cálculo do seu valor eficaz, bem como uma compensação de fase permitindo a calibração do sinal contra possíveis erros introduzidos pela cadeia de medição.

Cálculo da potência activa

Como foi explicado no capítulo 2 (figura 2.6) a potência activa é calculada através da multiplicação entre os sinais de tensão e corrente obtendo assim o sinal da potência instantânea. Seguidamente o sinal de potência instantânea passa por um filtro passa baixo para obter o seu valor médio, obtendo assim o valor da potência activa. Seguem-se também algumas operações de calibração.

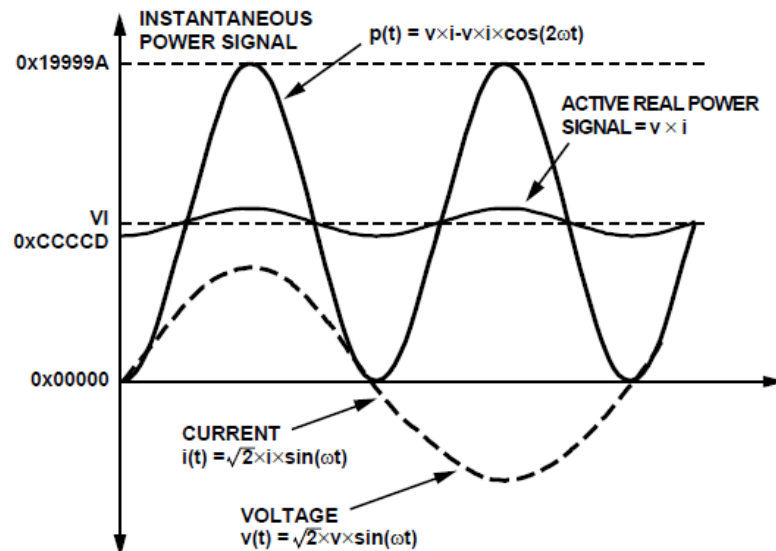


Figura 4.13 - Cálculo da potência activa[10]

Uma vez que a resposta em frequência do filtro passa-baixo não se trata de uma forma de onda em degrau, sendo o sinal atenuado cada vez mais à medida que a frequência aumenta, o valor da potência activa possui um pequeno *ripple* sinusoidal devido à forma de onda da potência instantânea.

Para contrariar este efeito o ADE7753 possui um modo “*Line Cycle Accumulation*”, que permite a acumulação da energia sincronizada com o sinal da tensão (detecção do cruzamento em zero). Assim a energia é acumulada ao longo de um pré-determinado número de períodos da tensão. A vantagem desta acumulação é que a componente sinusoidal presente na potência activa é reduzida para 0, eliminando assim qualquer *ripple* presente. Desta forma, sempre que esta acumulação atinge o número de ciclos definidos é gerada uma interrupção que informa o microcontrolador para efectuar a leitura da energia activa.

4.2.2 - Interface com a rede eléctrica

Associado ao processo de medição da energia está também associada a necessidade de implementar dois circuitos distintos: um de condicionamento do sinal de tensão e um outro

de condicionamento de sinal de corrente. Esta necessidade resulta do facto do ADE 7753 apenas admitir valores nas suas entradas na gama de -0.5V a 0.5V.

No que diz respeito ao circuito de condicionamento de tensão, utilizou-se um transformador com uma relação de transformação de 230:12 V, com o objectivo de, por um lado garantir o isolamento galvânico e por outro reduzir o valor da tensão para um valor relativamente baixo. Após esta conversão dos valores utilizou-se um divisor resistivo para colocar os valores da tensão entre os limites impostos (figura 4.18).

Já no que diz respeito à forma de onda da corrente utilizou-se o sensor de corrente LEM LTS-15NP (Figura 4.16). Trata-se de um sensor com um custo relativamente reduzido e que adquire o sinal de corrente por efeito de *Hall*, isto é, gera um sinal na saída que é proporcional ao campo magnético de um fio condutor que se encontra no seu interior. Por sua vez o campo magnético gerado pelo condutor é proporcional ao valor da corrente que o percorre. É um sensor com uma relação de linearidade bastante boa, excelente precisão e alta imunidade a interferência externa. O LEM LTS15-NP permite a medição de correntes positivas e negativas, contudo como possui uma alimentação entre 0 e 5V apresenta a sua saída centrada em 2,5V.

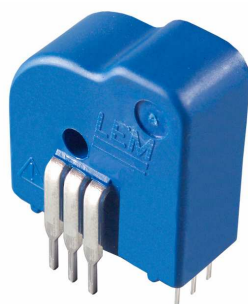


Figura 4.14 - LEM LTS15-NP[27]

Este sensor exigiu um circuito de condicionamento de sinal para remover a componente DC do sinal e colocá-lo nos valores pretendidos como é visível na figura 4.17.

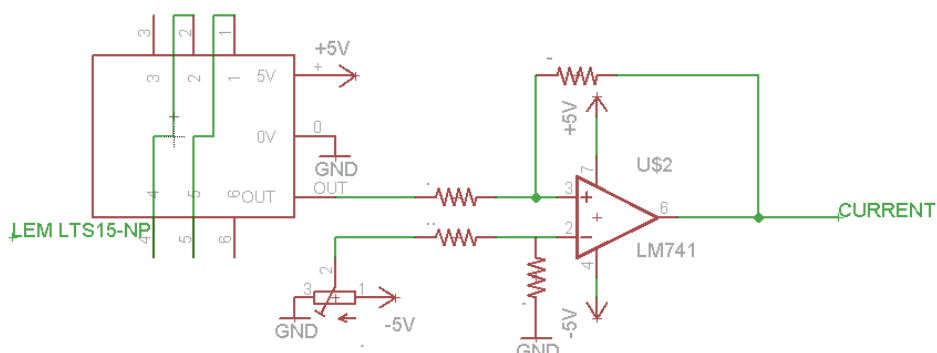


Figura 4.15 - Circuito de condicionamento de sinal para o sensor de corrente

Na figura 4.18 é apresentado o esquema de ligações da montagem de hardware realizada para aquisição do consumo de energia.

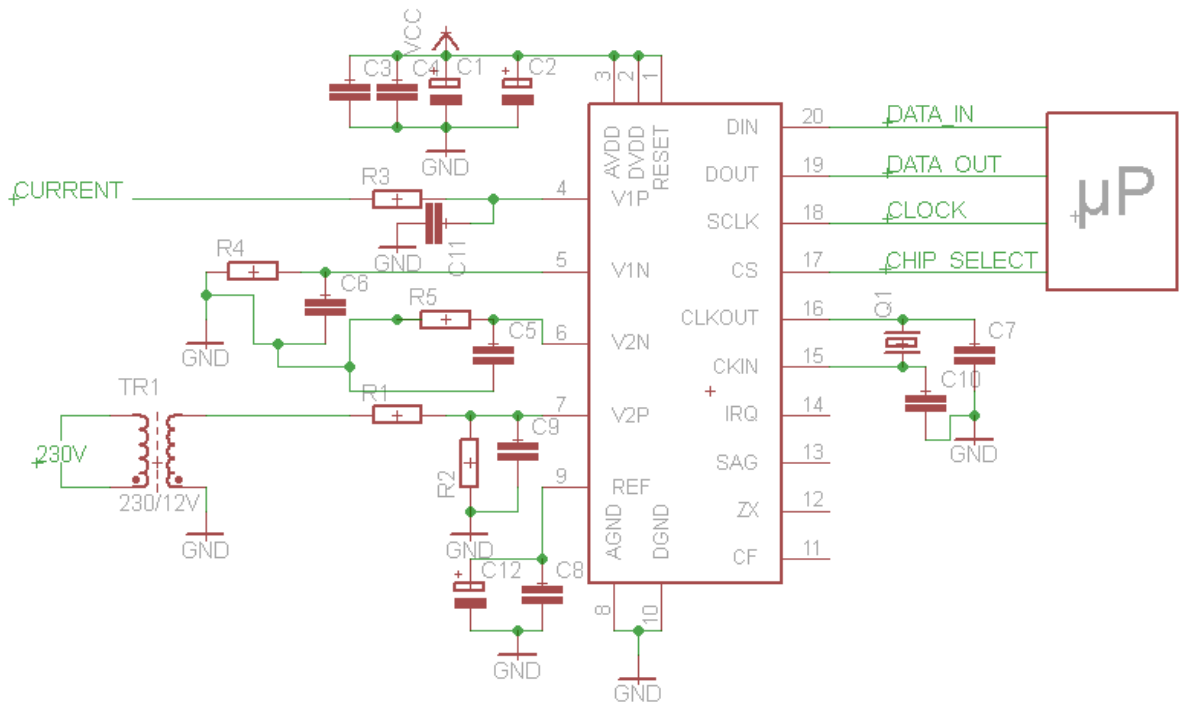


Figura 4.16 - Esquemático das ligações do sistema de medição de energia

Com vista à optimização dos custos pensou-se em construir os transformadores quer para a aquisição da tensão como da corrente. Assim, foram efectuados alguns testes para a construção de um transformador de tensão. O transformador pretendido teria uma razão de transformação de 230:12V, contudo devido ao elevado número de espiras necessários construiu-se um transformador com uma razão de transformação de 10:5V, apenas para verificar a exequibilidade desta tarefa, sendo que os resultados foram positivos.

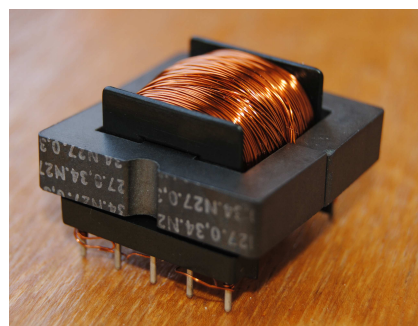


Figura 4.17- Transformador desenvolvido

Um processo análogo poderia ser feito para a construção de um transformador de corrente, contudo devido ao difícil processo de construir os enrolamentos numa ferrite toroidal este não foi efectuado.

4.3 - Comunicações sem fios

As comunicações sem fios são um elemento muito importante para o bom funcionamento do sistema. Utilizando a rede GSM serão trocadas todas as mensagens necessárias, como é o caso das configurações dos medidores e recarregamento do saldo.

Assim, para a implementação desta troca de mensagens são necessários dois *modems* GSM, um deles estará situado no medidor de energia e outro que estará ligado a um computador para simular as mensagens enviadas da empresa distribuidora de energia.

No que diz respeito ao medidor de energia utilizou-se uma placa de desenvolvimento com um modem GSM, que permite uma fácil interligação com a unidade de processamento, a “*Cellular Shield with SM5100B*” [28].



Figura 4.18 -Cellular Shield with SM5100B [37]

Esta placa de desenvolvimento inclui todos os componentes necessários para realizar a ligação entre o *arduino* e o modem GSM, SM5100B [29]. A utilização deste componente permite implementar facilmente o envio e recepção de mensagens de texto, fazer chamadas e utilizar a rede GPRS para criar ligações TCP/IP, necessitando apenas de um cartão SIM e uma antena GSM/GPRS.

O SM5100B é um *modem* GSM quad-band, permitindo assim, a comunicação com qualquer rede GSM em quase todo o mundo (GSM 850 / EGSM 900 / DCS 1800 / PCS 1900).

Este módulo possui duas portas série, interface SPI, dois ADC's de 10 bits e permite a ligação a um LCD, microfone e auscultadores.

Tabela 4.3 - Características eléctricas do *modem* SM5100B

Tensão de funcionamento	3.3 a 4.2V
Corrente consumida (Off mode)	<100 μ A
Corrente consumida (Sleep mode)	<2 mA
Corrente consumida (Idle mode)	<7 mA
Corrente consumida (Comunicação)	350 mA
Bandas de Frequência	EGSM900 / GSM850 / DCS1800 / PCS1900
Potência de Transmissão	Class 4 (2W) para EGSM900/GSM850
	Class 1 (1W) para DCS1800/PCS1900

Este *modem* funciona, como havia sido referido no capítulo 2, através de comandos AT, enviados por RS232. O esquema de ligações presentes na placa de desenvolvimento utilizada encontra-se na figura 4.21.

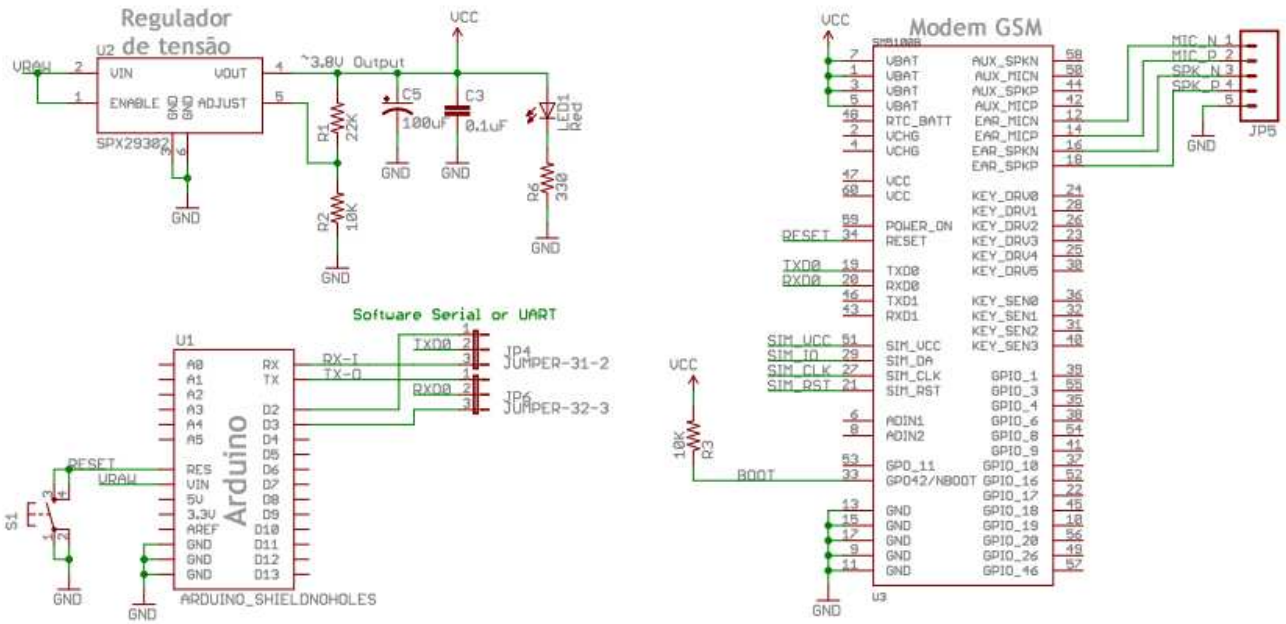


Figura 4.19- Esquema de ligações da placa de desenvolvimento: "Celular shield with SM5100B"

4.4 - Interface Homem-Máquina

A interface homem-máquina será o elemento que permitirá ao utilizador consultar os dados relativos aos seus consumos. Este elemento será implementado, como referido anteriormente, utilizando *displays* de 7 segmentos.

Para realizar o controlo dos *displays* utilizou-se um circuito integrado que comunica com o microprocessador por I2C, que será detalhado no capítulo seguinte, e efectua o controlo de vários displays em simultâneo. Este circuito integrado foi o AS1115.

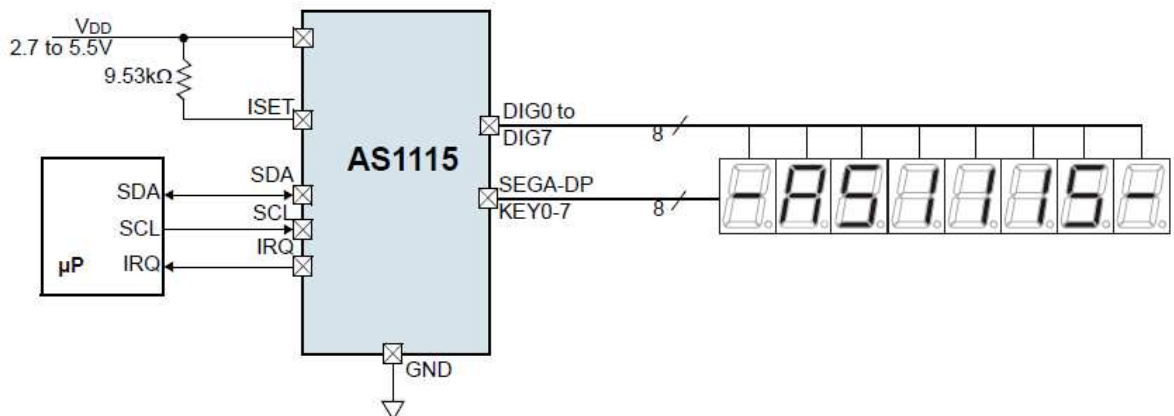


Figura 4.20- Esquema de ligações entre o AS1115 e os *displays* de 7 segmentos [30]

4.4.1 - Características gerais do AS1115

O AS1115 trata-se de um controlador de leds, capaz de controlar até 64 leds individuais ou até 8 *displays* de 7 segmentos. Cada segmento pode ser controlado separadamente. O AS1115 apenas necessita de uma resistência para definir o valor máximo de corrente em cada segmento, sendo também possível controlar o brilho dos displays por software.

Este dispositivo inclui um decodificador BCD para decimal ou hexadecimal e uma memória interna de 64 bits que é utilizada para armazenar os valores de cada display.

Este controlador possui ainda uma funcionalidade de diagnostico que permite testar todos os displays e apresenta um consumo muito reduzido, 200nA quando se encontra desactivado e 350 μ A quando se encontra activo.

4.4.2 - Implementação da interface Homem-Máquina

Para a implementação da interface além do controlador descrito anteriormente utilizaram-se *displays* de 7 segmentos. Foram utilizados 5 displays de 7 segmentos de cátodo comum.

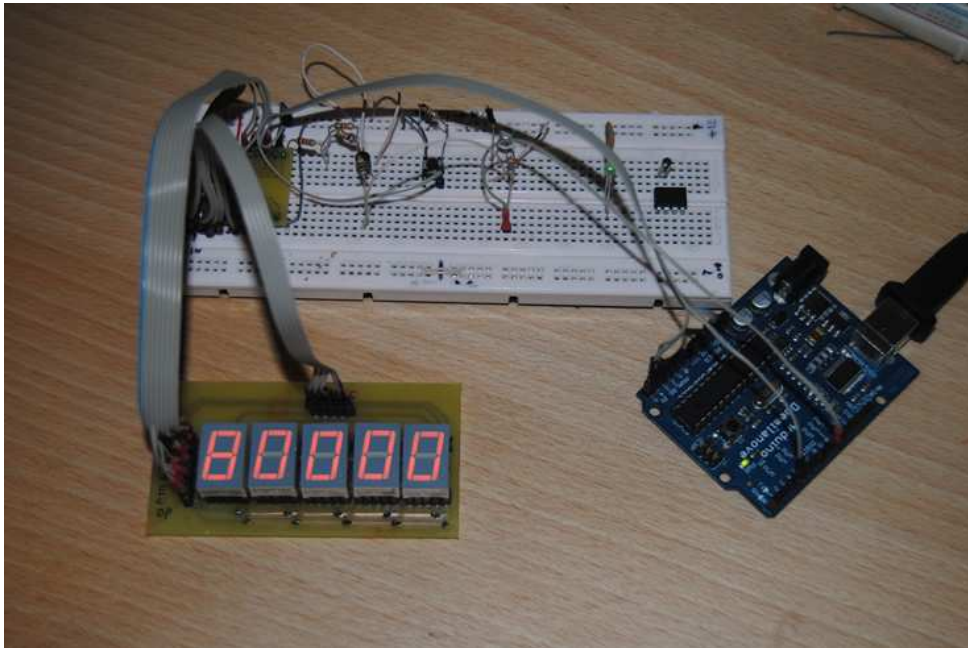


Figura 4.21 - Interface Homem-Máquina

Estes displays apresentam um consumo relativamente reduzido, cerca de 30mA e as ligações ao controlador foram representadas na figura 4.22.

4.5 - Corte da energia

Sempre que o saldo de um cliente se esgota, este será impedido de consumir energia eléctrica. Esta funcionalidade será implementada utilizando um relé de potência com contactos normalmente abertos.

Na implementação do protótipo foi utilizado um relé existe no laboratório, OMRON G6B. Não se trata de um relé para um elevada potência (5A -230V), contudo a única diferença ao nível da solução final seria substituir o relé por um mais adequado. O circuito de ligação do relé apresenta-se na figura 4.25.

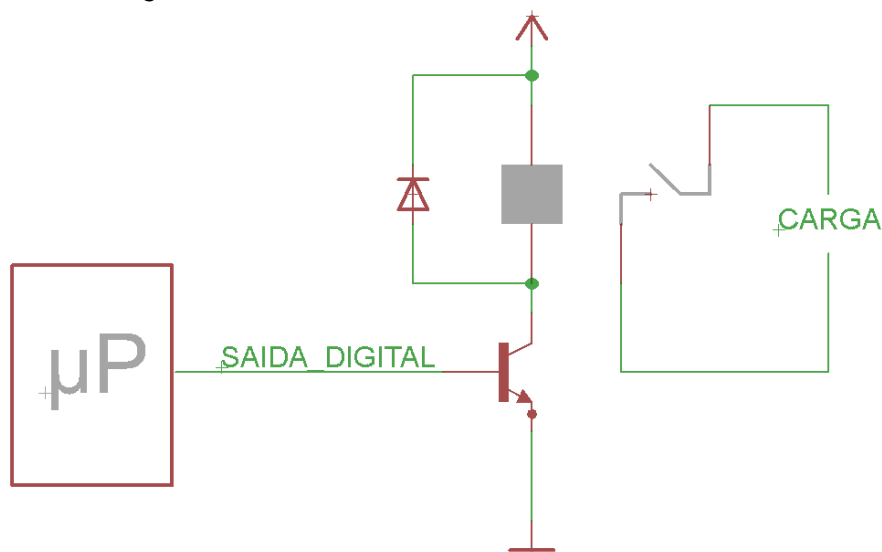


Figura 4.22 - Esquema de ligações para o subsistema de corte de energia

Como é visível na figura 4.25 para a activação ou desactivação do relé é necessário apenas a utilização de uma saída digital do microprocessador que actua sobre o transistor efectuando a sua abertura ou fecho.

4.6 - Alimentação do sistema e alimentação auxiliar

A alimentação do sistema de medição de energia é constituída por dois elementos:

- Alimentação principal, que será aquela que alimentará de facto todos os componentes do sistema de medição. A alimentação principal é realizada a partir da rede eléctrica;

- Alimentação auxiliar, Que apenas entrará em funcionamento apenas em caso de falha da alimentação principal de modo a garantir que o sistema não fica inoperacional.

O esquema de ligações entre as duas fontes de alimentação encontra-se representado na figura 4.26.

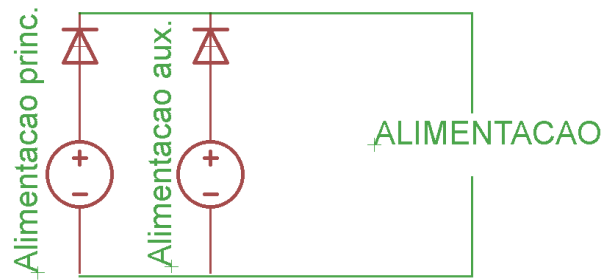


Figura 4.23 - Esquema de ligações da alimentação do sistema

De seguida serão explicados detalhadamente estes dois tipos de alimentação implementados.

4.6.1 - Alimentação principal

A alimentação do sistema consiste num simples conversor AC-DC 230V/±5V. A tensão diferencial (±5V) é necessária devido ao condicionamento do sinal de corrente.

Apesar de estudado e detalhado, este subsistema não foi implementado devido aos custos acrescidos que introduziria à dissertação. Contudo todo o dimensionamento dos componentes será explicado de seguida.

Na figura 4.27 é apresentado o circuito do conversor AC/DC 230/5V.

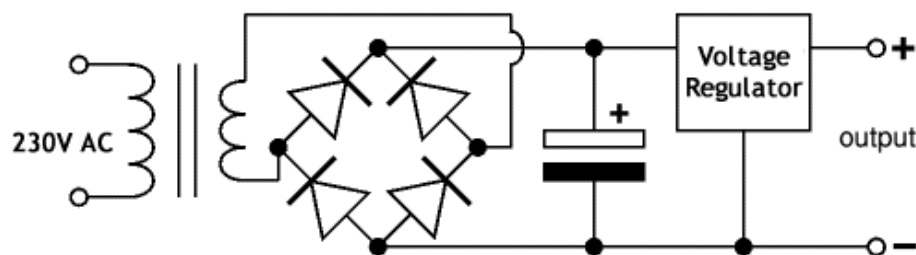


Figura 4.24 - Conversor AC/DC[31]

Trata-se de um transformador com uma razão de transformação de 230/12V, de modo a garantir o isolamento galvânico e reduzir os níveis de tensão para valores mais reduzidos de modo a facilitar a conversão para DC.

Para aumentar a eficiência do conversor, o regulador de tensão utilizado é do tipo comutado, PT5041A da *Texas Instruments*, cuja eficiência pode atingir os 85%.

A forma de onda pretendida na saída da ponte rectificadora será a seguinte:

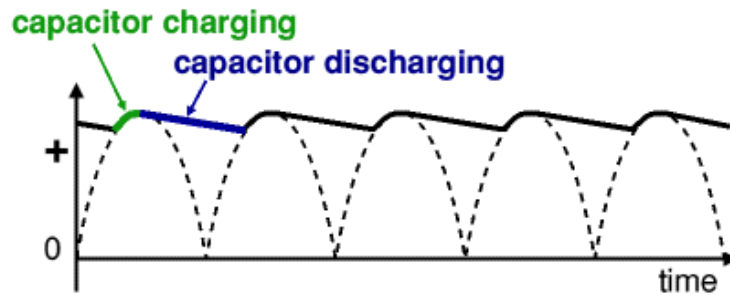


Figura 4.25 - Forma de onda da tensão rectificadora[31]

Dimensionamento do condensador sendo $I=200\text{mA}$ e $V_r = 3\text{V}$

$$I = 200\text{mA}$$

$$V = V_{\text{max}} \cos(2\pi * 50t)$$

$$12\sqrt{2} - V_r = 12\sqrt{2} \cos(2\pi * 50t)$$

$$t = 13.9\text{ms}$$

$$\Delta t = 8.9\text{ms}$$

$$I_c = C \frac{dV}{dt}$$

$$200\text{mA} = C \frac{3}{8.9\text{ms}}$$

$$C = 593\mu\text{F}$$

Na figura 4.29 encontram-se as formas de onda obtidas na simulação do conversor projectado, sendo que a primeira forma de onda corresponde à tensão após o rectificador, a segunda trata-se da tensão de saída e por fim na última encontra-se a corrente quando a carga é puramente resistiva com o valor de 200mA.

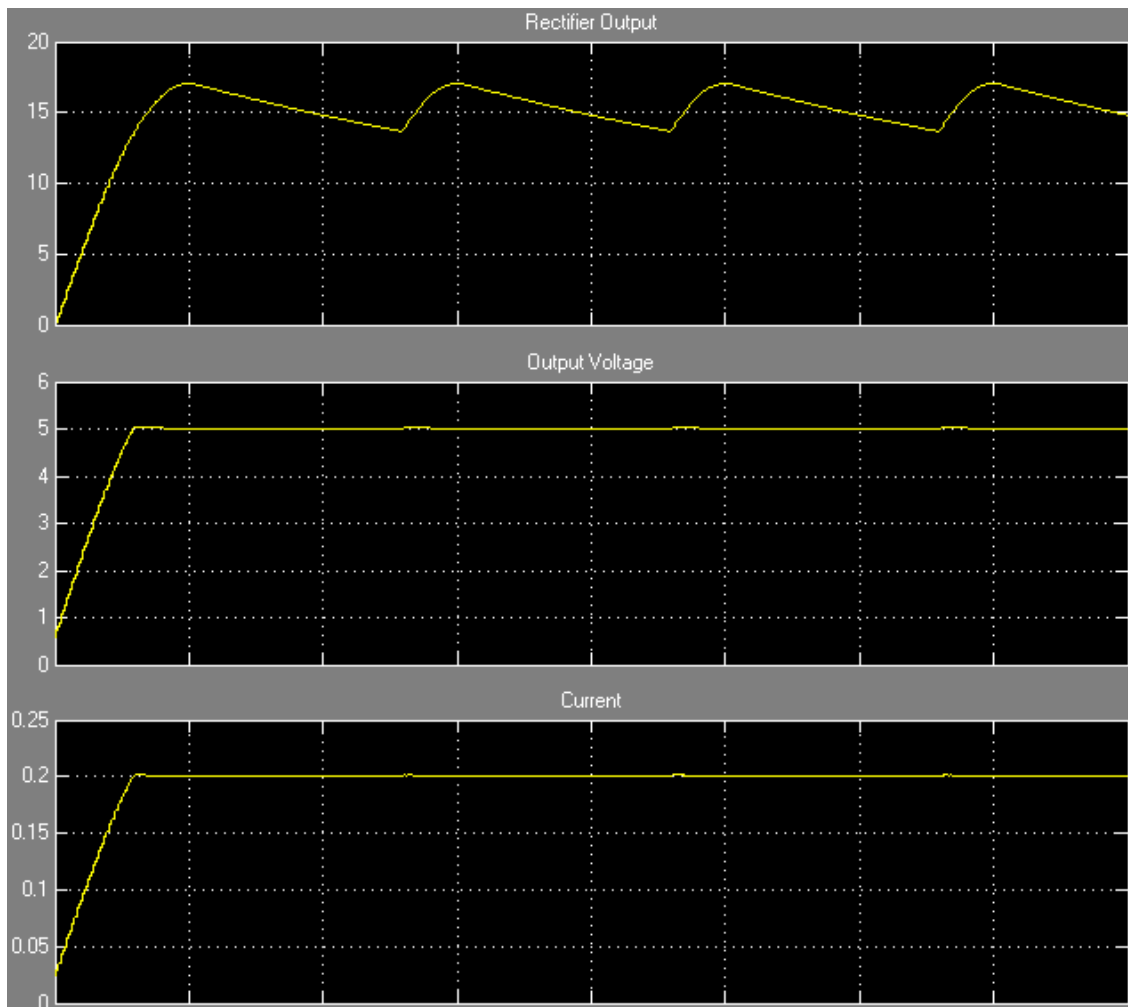


Figura 4.26 - Formas de onda obtidas na simulação do conversor

No que diz respeito aos -5V, de modo a manter os níveis de eficiência utilizar-se-ia um inversor de corrente contínua, visto a corrente exigida ser bastante reduzida. Assim o inversor utilizado seria o LM2611AMF da National Semiconductor cuja eficiência ronda os 80%.

4.6.2 - Alimentação auxiliar

Relativamente à alimentação auxiliar, a ideia consiste na utilização de quatro baterias recarregáveis do tipo NiMH de 2400 mAh. Estas baterias possuem uma tensão nominal de 1.2V sendo que a sua série teria uma tensão nominal de 4.8V.



Figura 4.27 - Baterias auxiliares [32]

Assim, as baterias estariam permanentemente ligadas através de um díodo ao barramento de 5V, assumindo a alimentação do sistema quando a energia falhasse.

Poderia ainda ser implementada uma funcionalidade extra. Esta funcionalidade consiste em alertar a empresa distribuidora de energia através do envio de uma mensagem de texto todas as vezes que a tensão de alimentação falha.

4.7 - Detecção de fraude

Para a implementação do subsistema de detecção de fraude foram definidos três mecanismos que garantem a impedem a violação dos medidores. O primeiro é a utilização dos habituais selos de chumbo que garante que o medidor não foi aberto. Contudo para este mecanismo ser eficaz é necessária a deslocação de uma pessoa para verificar a integridade de todos os selos, pelo que os restantes mecanismos permitem a detecção em tempo real e actuar de imediato sobre o sistema.



Figura 4.28 - Selos de chumbo

Os restantes mecanismos destinam-se a detectar quando o medidor é aberto ou arrombado, são eles: utilização de vários botões de pressão no interior da caixa, que detectam sempre que a caixa é aberta e utilização de um fio condutor no interior da parte superior da caixa detectando se esta se partir.

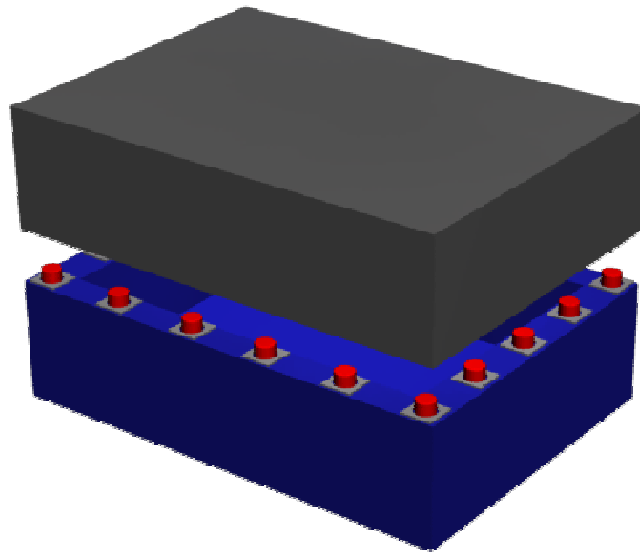


Figura 4.29 - Mecanismo de detecção de fraude através da utilização de botões de pressão

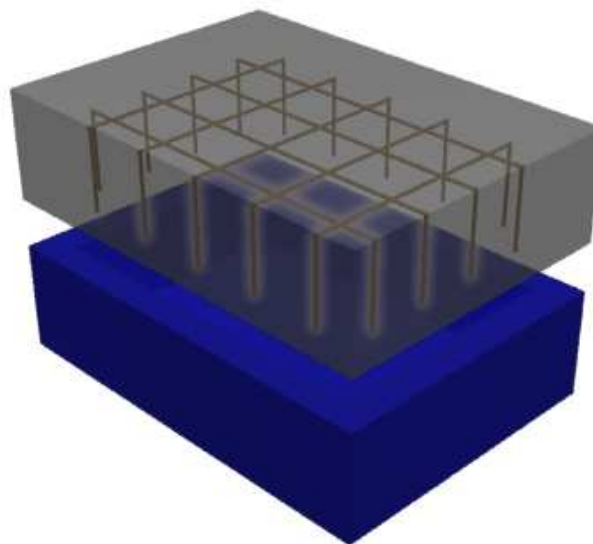


Figura 4.30 - Mecanismo de detecção de fraude utilizando um fio condutor na tampa da caixa

Este subsistema também não foi implementado devido aos custos acrescidos que traria ao projecto.

Sempre que o sistema detectasse que um dos mecanismos de segurança falhou procederia de imediato ao corte da energia, bem como ao envio de uma mensagem de texto para a empresa de energia informando da anomalia.

4.8 - Testes e validação da solução

Todos os componentes de hardware foram sujeitos a testes com vista a efectuar a sua validação sendo que o subsistema de medição de energia foi aquele que foi sujeito a testes mais exaustivos.

No que diz respeito ao microprocessador os testes efectuados consistiram apenas em verificar que este era programado correctamente e efectua as tarefas pretendidas.

Para o correcto funcionamento do subsistema de medição de energia primeiramente foi necessário realizar todas as operações de calibração da cadeia de medição de energia. Para a calibração de todo o sistema de medição de energia utilizaram-se dois multímetros *True RMS* para realizar a leitura dos sinais de corrente e tensão. Assim, os multímetros adquiriam os valores eficazes na tensão e corrente que circulava numa carga puramente resistiva. Sendo a carga puramente resistiva obtém-se um factor de potência com o valor 0 e consequentemente a energia activa é igual à energia aparente, podendo-se simplesmente efectuar a multiplicação entre o valor eficaz da corrente pelo valor eficaz da tensão para obter a energia activa.



Figura 4.31 - Multímetro *True RMS* utilizado

Estes multímetros possuem ainda a capacidade de comunicar com um computador através da porta série. Desta forma, desenvolveu-se uma aplicação, visível na figura 4.35, para adquirir os valores medidos de ambos os multímetro e calcular a energia consumida naquele intervalo de tempo.



Figura 4.32 - Aplicação desenvolvida para calibração do medidor de energia

A aplicação desenvolvida para além de permitir comunicar com os multímetros recebe também os valores registados pelo medidor de energia de modo a comparar ambos. Para que o cálculo da potência esteja correcto foi necessário garantir o sincronismo entre o medidor de energia e os dois multímetros. Este sincronismo é conseguido, uma vez que aplicação apenas recebe os dados provenientes dos multímetros no intervalo de tempo entre duas medições consecutivas do medidor desenvolvido.

Relativamente ao subsistema de medição de energia, este foi sujeito a dois tipos de testes, com vista a comprovar a correcta medição da energia consumida. O primeiro consistiu em utilizar a aplicação desenvolvida para o calibrar para efectuar testes pontuais com várias cargas. Em todos os testes efectuados o valor medido correspondia ao valor calculado pelos multímetros *True RMS*, obtendo-se um erro inferior a 1%.

Em seguida foi feito um teste mais exaustivo. Este teste consistiu em deixar o medidor a funcionar durante vários dias com uma carga constante. Simultaneamente, foi colocado um contador de energia comercial a verificar a energia que se estava a consumir. No final dos testes ambos os valores foram comparados. Os valores registados encontram-se na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Teste ao medidor de energia

Tempo (h)	Energia do contador (kWh)	Energia do medidor (Wh)
0	0	0
22	1.8	1800
49	3.9	3905
121	9.6	9643

Como se pode observar pela tabela 4.4, as medições efectuadas pelo medidor coincidem com as medições efectuadas pelo medidor comercial provando que a medição dos consumos de energia está a ser efectuada correctamente.

Os restantes 3 subsistemas foram submetidos aos mesmos testes, uma vez que se pretendia provar que estes nunca falhavam. Assim, os testes consistiram em verificar se funcionavam correctamente inúmeras vezes ao longo de várias semanas após a sua finalização. Os resultados obtidos foram sempre positivos, não se registando qualquer falha dos componentes.

4.9 - Sumário

Ao longo deste capítulo foram demonstrados todos os componentes de *hardware* necessários para a implementação do sistema de medição de energia baseado em tecnologia GSM. Assim, foram abordados os aspectos desde o microprocessador, medição de energia, comunicações sem fios, interface Homem-Máquina, alimentação do sistema, detecção de fraude e por fim são apresentados os testes para a validação da solução proposta.

Capítulo 5

Implementação do Sistema - Software

Neste capítulo explicar-se-ão todos os algoritmos desenvolvidos para a implementação do sistema de medição de energia. Assim, foram identificados quatro elementos de *software* principais, três deles desenvolvidos na implementação do medidor propriamente dito: medição, facturação e corte da energia, comunicações sem fios e interface HMI. O restante encontra-se fora dos objectivos pretendidos nesta dissertação e diz respeito à aplicação de simulação de envio de mensagens.

No que diz respeito ao medidor de energia o software desenvolvido está organizado de forma a que o módulo das comunicações sem fios execute continuamente em ciclo, para identificar quando é recebida uma mensagem de texto. Os restantes dois elementos de *software* (medição, facturação e corte de energia e interface HMI) executam por interrupções.

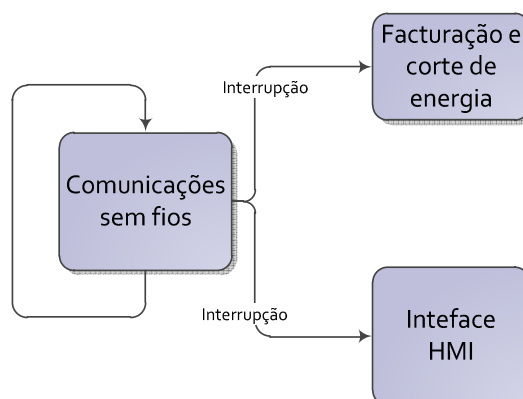


Figura 5.1- Organização do software desenvolvido para o medidor de energia

5.1 - Medição, facturação e corte da energia

O principal elemento desta secção é a medição de energia. Como foi referido anteriormente para efectuar a medição de energia utilizou-se um integrado que através dos sinais de corrente e tensão calcula a energia consumida, o ADE7753.

5.1.1 - Comunicação com o ADE7753

Todas as funcionalidades do ADE7753 estão acessíveis através de vários registos internos. Os conteúdos destes registos podem ser actualizados ou lidos através da sua interface série por SPI.

Assim que o ADE7753 é colocado em modo de comunicação, este espera a escrita de um valor no seu registo de comunicações. Este valor determina se a operação seguinte será uma operação de escrita ou leitura. Desta forma, todas as operações com o ADE7753 devem começar com uma operação de escrita.

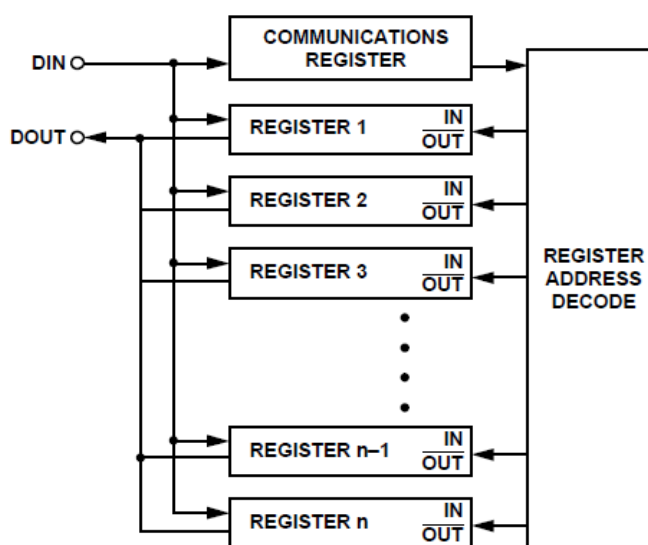


Figura 5.2 - Organização dos registos utilizados no ADE7753 [10]

O registo de comunicações trata-se de um registo de 8 bits. O bit mais significativo deste registo indica se a operação seguinte se trata de uma operação de escrita ou de leitura e os 6 bits menos significativos indicam o endereço do registo que vai ser utilizado.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram os sinais gerados no caso de uma operação de escrita e numa operação de leitura, respectivamente.

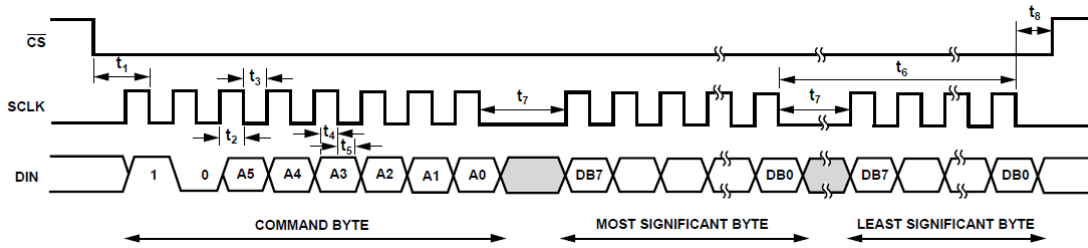


Figura 5.3 - Operação de escrita utilizando o protocolo SPI[10]

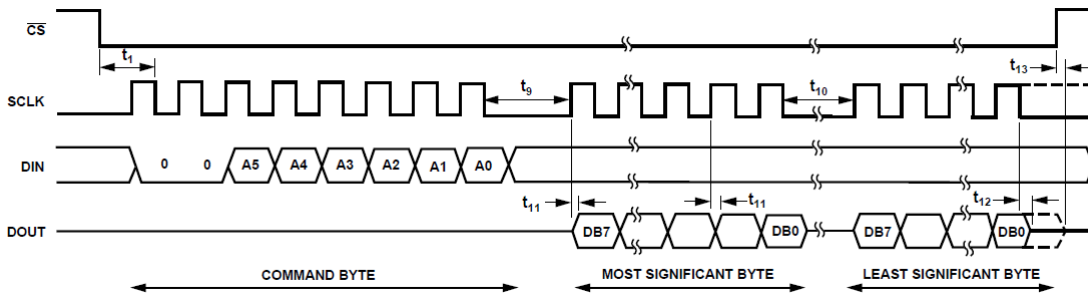


Figura 5.4 - Operação de leitura utilizando o protocolo SPI[10]

5.2.2 - Software para comunicação com ADE7753

Para a implementação das comunicações SPI utilizou-se uma biblioteca que implementa o protocolo SPI enviando apenas 1 Byte, tendo sido apenas necessário o desenvolvimento de duas funções que se encarregam da escrita e leitura de um número variável de Bytes.

Após o protocolo SPI estar implementado o ADE7753 foi configurado para gerar uma interrupção a cada 10 seg, tempo durante o qual se encarrega de fazer a acumulação de energia consumida. Em cada interrupção gerada, o microprocessador lê o valor da energia consumida durante o intervalo de tempo, efectua a facturação da mesma e procede ao corte de energia caso seja necessário. A facturação da energia é realizada através da diminuição de uma variável global que possui o saldo do medidor. Na figura 5.5 encontra-se o fluxograma das tarefas executadas em cada interrupção gerada.

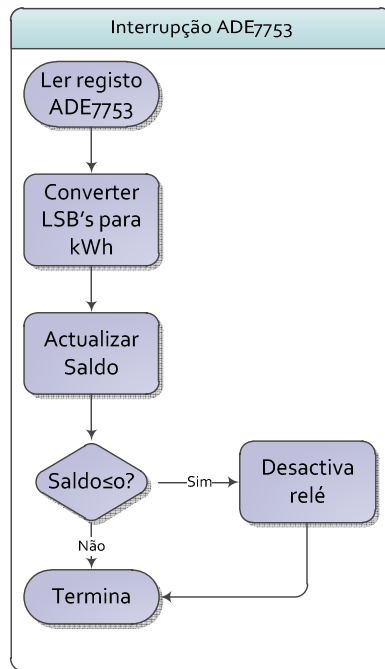


Figura 5.5 - Leitura da energia consumida

5.2 - Comunicações sem fios

No que diz respeito as comunicações sem fios, várias eram as tarefas exigidas. Em primeiro lugar, era necessário inserir o código PIN para desbloquear o cartão SIM. Em segundo, detectar as inicializações do *modem* GSM e esperar que estas terminem. Por fim, o microprocessador espera a recepção de uma mensagem de texto, interpretando-a e reagindo de acordo com o seu conteúdo.

Todas as mensagens de texto possuem um mecanismo de segurança de modo a garantir a autenticidade da mensagem e a integridade do seu conteúdo. Este mecanismo, que será explicado de seguida, impede que mensagens fraudulentas sejam enviadas.

Todos os dados provenientes do *modem* GSM, desde as inicializações às mensagens de texto são recebidos pelo microprocessador através da porta série. Uma vez que o microprocessador utilizado apenas possui uma porta série e esta é frequentemente utilizada para *debug*, as comunicações com o *modem* GSM dão-se utilizando uma porta série simulada em dois pinos digitais do microprocessador. Para tal, foi utilizada uma biblioteca que implementa uma porta série por *software*.

5.2.1 - Inicialização do *modem* GSM

Assim que o *modem* GSM é alimentado, este envia mensagens pela porta série indicando o seu estado. O código PIN é inserido assim que seja recebida a mensagem: +SIND: 7. Este é inserido através do comando AT: AT+CPIN=XXXX, onde XXXX corresponde ao código.

Após inserido o código PIN O *modem* GSM envia novas mensagens informando as inicializações que estão a ocorrer, como se pode observar na figura 5.6.

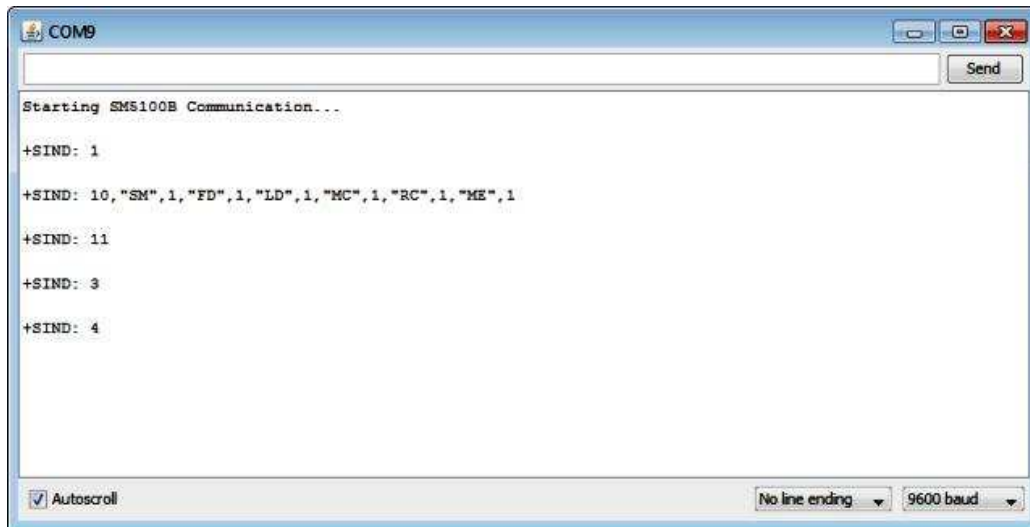


Figura 5.6 - Mensagens de inicialização do *modem* GSM

Cada uma das mensagens recebidas corresponde a uma inicialização, pelo que cada uma possui um significado diferente:

- +SIND: 1 significa que o cartão SIM se encontra correctamente inserido;
- A linha iniciada por +SIND: 10 mostra o estado de todos os componentes do cartão SIM, pelo que todos eles devem ter o valor 1;
- +SIND: 11 significa que o dispositivo se encontra registado na rede GSM;
- +SIND: 3 significa que o equipamento está parcialmente inicializado;
- +SIND: 4 significa que o equipamento se encontra preparado para comunicar.

A ordem com que estes dados são recebidos é irrelevante. Indispensável é que todos eles sejam obtidos para que o *modem* possa comunicar correctamente. Assim foi necessário desenvolver *software* que detectasse as inicializações e verificasse quando estas terminam. O fluxograma representado na imagem seguinte demonstra como este *software* foi desenvolvido.

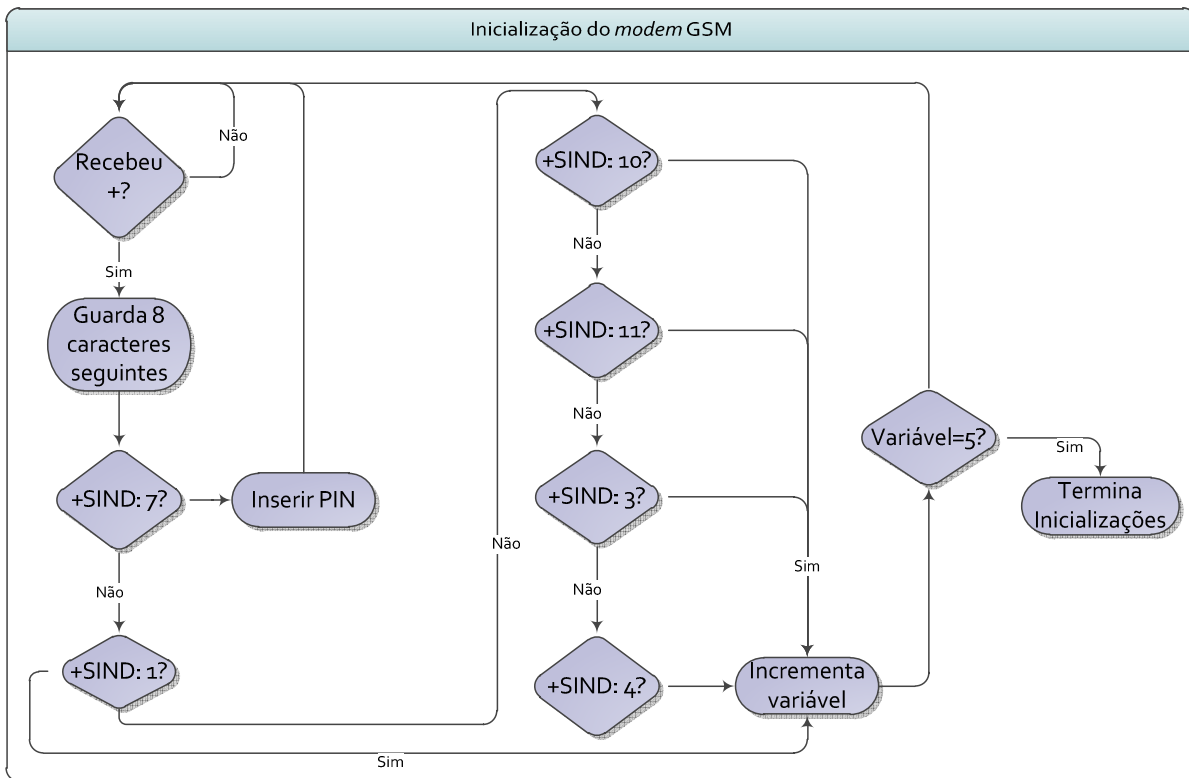


Figura 5.7 - Detecção das inicializações do *modem* GSM

Finalizadas as inicializações do *modem* GSM, este encontra-se apto para comunicar com outros módulos. Assim, este fica num estado em que aguarda a recepção de mensagens de texto.

5.2.2 - Definição das mensagens de texto

Para normalizar as mensagens enviadas foi definido um protocolo que as mensagens deviam respeitar. Este protocolo contém os seguintes campos:

- ID - Serve para evitar ataques de replicação. O ID das mensagens tem de ser sequencial;
- TIPO - Indica a função que deve ser executada em cada mensagem recebida;
- PARAMETRO - Se a função exigir parâmetros, serão enviados neste campo;
- ASSINATURA - Identifica o autor e o conteúdo da mensagem.

%:	ID	#	TIPO	#	PARAMETRO	#	ASSINATURA	&
2B	3B	1B	5B	1B	8B	1B	48B	1B

Figura 5.8 - Trama definida para as mensagens

Importante é referir que todos os dados são enviados em ASCII de forma a que cada byte da trama da mensagem corresponde a um caractere.

Foram definidas algumas mensagens que foram implementadas no protótipo, como se pode ver na tabela 5.3, contudo facilmente podem ser implementadas novas mensagens de modo a permitir a criação de novas funcionalidades, bastando apenas que a mensagem respeite a trama definida.

Tabela 5.1 - Mensagens implementadas no protótipo

TIPO	FUNÇÃO	RESPOSTA
sald+	Incrementa o saldo do medidor	_____
sald-	Decrementa o saldo do medidor	_____
corta	Desactiva o fornecimento de energia mesmo que o saldo seja positivo	_____
autor	Activa o fornecimento de energia se o saldo for positivo	_____
cfgpt	Define a máxima potência que o cliente pode consumir	_____
diagn	Diagnóstico do sistema	Envia uma mensagem de texto para um número predeterminado indicando o estado do medidor o saldo e a potência que está a ser consumida

5.2.3 - Segurança nas comunicações

Segurança nas redes GSM

Nos antigos sistemas analógicos a interceptação das chamadas era uma tarefa relativamente fácil bastando possuir apenas um *scanner* de rádio.

Com o surgimento das redes GSM, esta tarefa tornou-se mais complicada já que as mesmas eram enviadas moduladas digitalmente e multiplexadas por tempo. Porém ainda assim é possível capturar os dados, descodifica-los e interceptar as informações.

O GSM usa três tipos de algoritmos chamados A3, A5 e A8, para garantir a segurança dos dados enviados. [33] Normalmente A3 e A8 são utilizados simultaneamente (conhecido como

A3/A8). Os algoritmos A3/A8 são implementados no cartão SIM e nas redes GSM. Estes são usados para autenticar os assinantes e gerar uma chave criptográfica dos dados e voz.

O algoritmo A5, por sua vez é utilizado com o intuito de alterar a voz e os dados dos usuários de modo a aumentar a privacidade.

As redes GSM autenticam a identidade do assinante através de um mecanismo de desafio e resposta. Desta forma a estação envia um número aleatório de 128 bits para o telemóvel. Por sua vez o cartão SIM utiliza esse número e a chave gerada pelo algoritmo A3/A8 para gerar um número de 32 bits que será a resposta ao desafio. Uma vez que o cartão SIM possui uma reduzida capacidade de processamento impede que a chave possa ser um número grande tornando o sistema relativamente frágil.

Nas redes GSM, após a autenticação, todas as mensagens são encriptadas utilizando um algoritmo simétrico (o A5). O A5 possui quatro versões: [33]

- A5/2 - utilizada geralmente pelo GSM (excepto quem usa A5/1).
- A5/1 - utilizada nos EUA e Europa e é mais robusta do que o A5/2.
- A5/0 - utilizada por países sob sanções da ONU e não utiliza criptografia.
- A5/3 - uma nova versão do A5, baseada no algoritmo *Kasumi* (que também é usada em 3G).

Contudo, os mecanismos de segurança presentes na rede GSM já foram quebrados, significando isto, que se os dados forem interceptados podem ser descriptados e consegue-se o acesso às informações contidas nesses dados. [34]

Segurança nas mensagens enviadas

No que diz respeito às mensagens de texto, foi necessário desenvolver um mecanismo de segurança, de modo a garantir a autenticidade e integridade do conteúdo das mensagens. Este tem a função de impedir tentativas de fraude ao nível das mensagens de texto. O mecanismo implementado consiste num mecanismo semelhante a assinatura digital.

A assinatura digital envolve dois processos criptográficos: a *hash* e a encriptação dessa *hash*. A encriptação da *hash* é o mecanismo que permite garantir a autenticidade das mensagens.

A *hash* trata-se de um resumo da mensagem, isto é, a mensagem é submetida a uma série de cálculos algébricos que retornam um resultado sempre com o mesmo tamanho. Uma função de *hash* deve apresentar determinadas características[35]:

- Deve ser impossível encontrar a mensagem original a partir da *hash*;
- O *hash* deve parecer uma mensagem aleatória mesmo que o algoritmo seja conhecido, isto é, uma pequena mudança no conteúdo da mensagem deve produzir um resultado completamente diferente;

- Deve ser impossível encontrar duas mensagens diferentes que levam a um mesmo *hash*.

A última característica não é possível verificar-se sempre, uma vez que se podem criar mensagens de tamanho infinito e a *hash* terá sempre o mesmo tamanho. Porém, para comprometer a assinatura digital seria necessário obter uma mensagem adulterada que tenha o mesmo *hash* que uma mensagem original, o que teoricamente é impossível com os algoritmos existentes actualmente.

Após a geração do *hash*, este deve ser encriptado utilizando um algoritmo criptográfico de chave pública de modo a garantir maiores níveis de autenticidade, contudo devido a diversos aspectos, que serão referidos posteriormente, na implementação deste sistema de segurança utilizou-se um algoritmo de chave simétrica.

O algoritmo de *hash* escolhido para a implementação do sistema de medição de energia foi o SHA-1. Este algoritmo é utilizado numa grande variedade de protocolos de segurança, entre eles, TLS, SSL, PGP, SSH. Os algoritmos SHA (*Secure Hash Algorithm*) foram projectados como um padrão do governo Norte-Americano. [36]

Assim, o algoritmo produz um resultado de 160 bits, através da execução de operações lógicas entre os bits das mensagens.

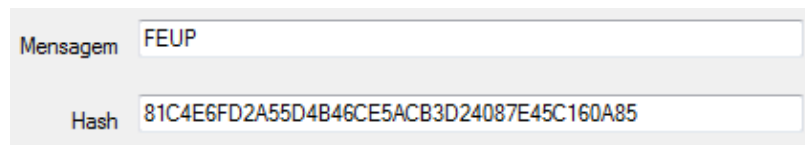


Figura 5.9 - Exemplo de cálculo de uma *hash*

No que diz respeito ao algoritmo de encriptação, foram escolhidos dois algoritmos, um de chave pública e um de chave simétrica de modo a analisar qual o melhor para a implementação no sistema de medição de energia. Ambos foram implementados em C/C++ num computador de modo a analisar os tempos de execução e a complexidade do algoritmo.

O algoritmo de chave pública escolhido foi o RSA, trata-se da mais bem-sucedida implementação de sistemas de chaves assimétricas e fundamenta-se em teorias clássicas dos números. É considerado dos algoritmos mais seguros.[37]

O algoritmo RSA utiliza duas chaves, uma privada que deve ser mantida em sigilo e uma pública que pode ser conhecida por todos. Quando se pretende enviar uma mensagem encriptada utilizando este algoritmo a mensagem é encriptada com a chave pública e desencriptada com a chave privada, garantindo que apenas quem possui a chave privada tem acesso ao conteúdo da mensagem.

Na sua implementação são gerados dois pares de números, as chaves, de tal forma que uma mensagem encriptada com a chave pública apenas pode ser desencriptada pela chave privada. O RSA baseia-se no facto de que apesar de ser fácil encontrar dois números primos

de grandes dimensões, a factorização do produto destes dois números é um problema computacionalmente complexo (o tempo estimado para o conseguir tendo em conta os recursos computacionais existentes actualmente ronda os milhares de anos).[37]

No que diz respeito ao algoritmo de chave simétrica utilizado, foi escolhido o algoritmo GOST. Este algoritmo foi desenvolvido como o *standard* para as comunicações do governo Russo nos anos 70.

Os algoritmos de chave simétrica são algoritmos que utilizam chaves semelhantes nas operações de cifragem e decifragem de dados. As chaves representam um segredo partilhado entre todos os elementos que interagem na comunicação.

O algoritmo GOST utiliza chaves de 256 bits. As operações de encriptação dos dados utilizados neste algoritmo utilizam vectores de dados (S-BOX) que contém 354 bits de informações que podem ser secretas, o que faz aumentar o tamanho da chave até 610 bits. O processo de encriptação é um processo de 32 iterações onde são utilizados os dados da mensagem, as S-BOX e a chave secreta.

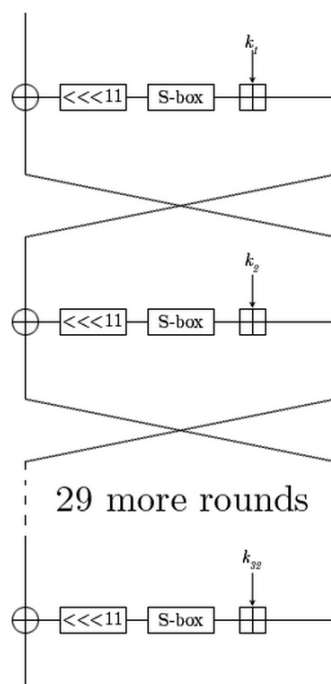


Figura 5.10 Operações envolvidas no processo de encriptação de dados utilizando o algoritmo GOST[38]

As figuras 5.11 e 5.12 apresentam os resultados obtidos na implementação dos algoritmos RSA e GOST, respectivamente. Como se pode observar o conteúdo da mensagem encriptada é muito superior no caso do algoritmo RSA, assim como o tempo de execução que é cerca de 50 vezes superior.

```

ENCRIPTION/DECRYPTION TEST
Preparing to do 1 tests.
Generating keypair... 1.
Encrypting the message... Cipher text is:106782893369896 142936997931154 1755548
64929814 35724753596930 126001131585239 97596202222036 13830792968585 7558150583
7542 76269053864983 164406410918493
done!
Decrypting the message... DeCipher text is:9A167762063DC87B0F548EEF0992B8C79DA81
961
done!

TEST OK!

Encryption/decryption test finished!
Process returned 0 (0x0) execution time : 0.787 s

```

Figura 5.11 resultados obtidos na implementação do algoritmo RSA

```

Cyphered message
Block 00 = b57f5edf 96113b79
Block 01 = b8682f2d 67c7df1a
Block 02 = 379d3357 2e2c15ba
Block 03 = 418e1948 80592993
Block 04 = 418e1948 80592993
Decyphered message
Block 00 = 35018617 47dfa466
Block 01 = a823f45a ed9a678c
Block 02 = 04729859 c0717e9a
Block 03 = 522c1d5e 28bb4c99
Block 04 = 522c1d5e 28bb4c99
Process returned 29 (0x1D) execution time : 0.015 s

```

Figura 5.12 - Resultados obtidos na implementação do algoritmo GOST

A tabela 5.2 é uma tabela comparativa entre os aspectos mais relevantes relativos aos algoritmos explicados anteriormente.

Tabela 5.2 - Avaliação qualitativa dos algoritmos de encriptação seleccionados

	RSA	GOST
Tempo de execução	Muito Elevado	Intermédio
Complexidade do algoritmo	Muito Elevado	Reduzida
Tamanho do resultado	Elevado	Intermédio
Nível de Segurança	Muito Elevada[37]	Reduzida[38]

* Níveis de avaliação: Muito Elevado, Elevado, Intermédio, Reduzido, Muito Reduzido

Como se pode verificar pela tabela anterior o algoritmo RSA oferece níveis de segurança muito superiores ao algoritmo GOST, contudo exige também maior poder computacional tornando de certa forma inviável a implementação do mesmo no microprocessador escolhido. Assim, para a implementação no protótipo do projecto foi utilizado o algoritmo GOST. Outro

factor que torna viável a utilização de um algoritmo de encriptação de chave simétrica é o facto de não ser fácil captar as mensagens enviadas pela rede GSM e a própria rede GSM possuir já um mecanismo de encriptação dos dados.

Segurança da chave utilizada na encriptação

Uma vez que as mensagens serão trocadas apenas entre elementos da empresa de distribuição de energia a chave pode ser mantida em segredo de modo a que se alguém tiver acesso a uma mensagem enviada não a possa descriptar facilmente. Contudo, a chave encontra-se memorizada na memória de programação do microprocessador, levantando o problema do possível acesso ao código hexadecimal e através de engenharia reversa descobrirem a chave utilizada nas comunicações. Este problema é facilmente resolvido através da utilização de um *bootloader* no microprocessador que permite que todo o código de programação esteja encriptado. Este *bootloader* é disponibilizado pela atmel, “AVR230: DES Bootloader”, e encarrega-se de descriptar o código quando o vai executar. [39]

O *AVR230: DES Bootloader* trata-se de um *bootloader* que funciona em todos os microprocessadores da *Atmel* que permitam a utilização de *bootloader*.

A figura 5.13 demonstra um exemplo da forma como um microprocessador pode ser programado utilizando dados encriptado e mais tarde o utilizador procede à actualização do seu *firmware*.

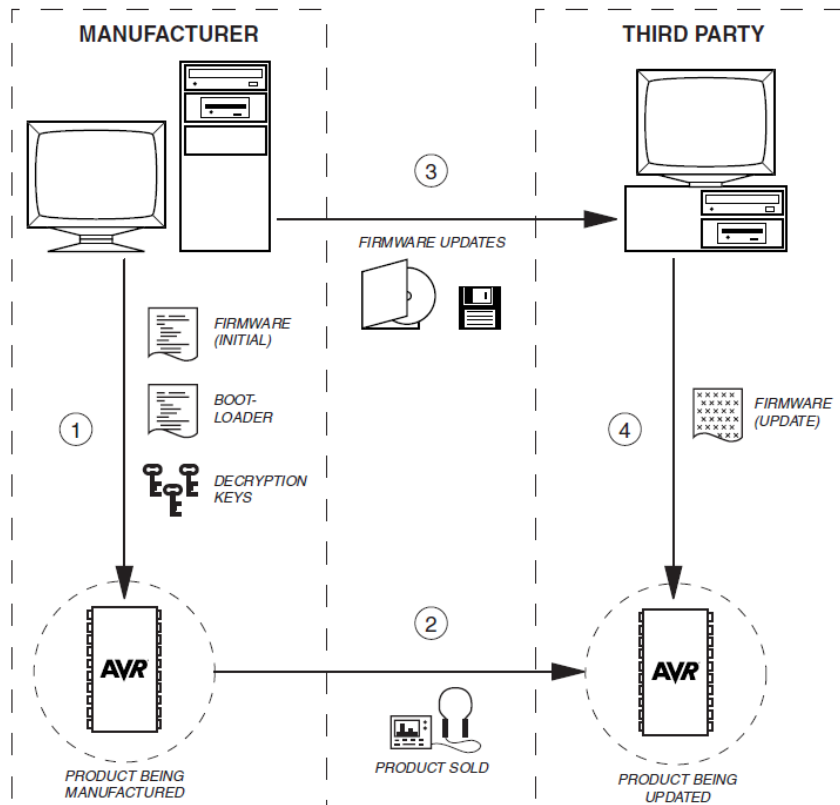


Figura 5.13 - Processos envolvidos na programação de um microprocessador e actualização do seu *firmware* utilizando o *bootloader* AVR230: *DES Bootloader* [39]

Primeiramente o microprocessador é equipado com o *bootloader* e as chaves de descriptação. De seguida o código de programação é enviado para o microprocessador encriptado onde o *bootloader* se encarrega de o descriptar e efectuar a programação do microprocessador. Por fim, se houver necessidade de uma actualização do *firmware* apenas é necessário fornecer o código encriptado. Este código não terá qualquer utilidade sem as chaves de descriptação.

Este mecanismo de segurança não foi implementado, devido ao facto de se estar a utilizar uma plataforma de desenvolvimento que já possui *bootloader* e a sua mudança condicionaria a sua utilização futuramente.

Para conferir maior segurança na troca de mensagens foi proposto a implementação de um mecanismo extra de segurança. Este mecanismo consistia em ter uma lista de chaves e mudar de chave sempre que o medidor recebe uma mensagem. Este mecanismo também não foi implementado devido aos limitados recursos de memória do microprocessador.

5.2.4 - Software desenvolvido para a interpretação das mensagens

Após a definição das várias mensagens que são trocadas entre os vários elementos do sistema de medição de energia, resta a implementação da sua interpretação no microprocessador. O fluxograma seguinte mostra a sequência de operações para envolvidas neste processo.

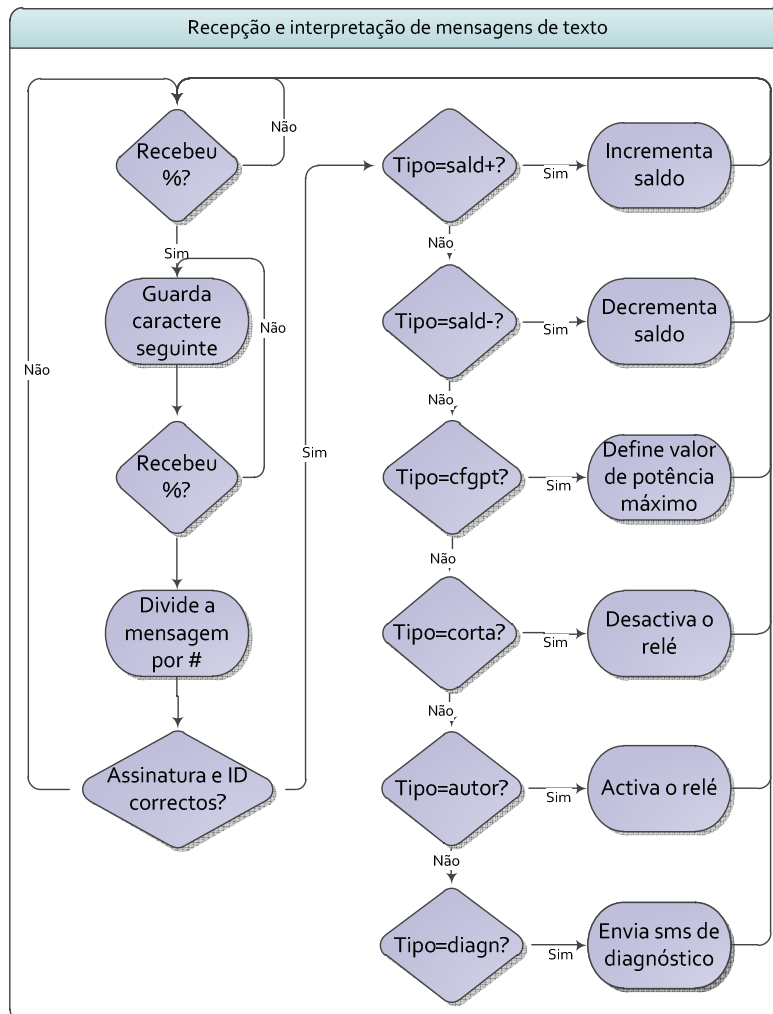


Figura 5.14 - Interpretação das mensagens recebidas

Como é visível na imagem anterior apenas após se verificarem os mecanismos de se verificarem todos os mecanismos de segurança se procede à interpretação da mesma e consequente execução das tarefas.

5.3 - Interface Homem-Máquina

Relativamente à interface Homem-Máquina, como foi referido anteriormente, esta será constituída por 5 *displays* de 7 segmentos. O controlo destes *displays* é efectuado com recurso a um circuito integrado que comunica com o microprocessador através do barramento de comunicações I2C.

Para a implementação do protocolo I2C no microprocessador utilizou-se uma biblioteca própria para o *arduino*.

A interface Homem-Máquina foi construída de forma a minimizar o consumo de energia. Desta forma, para os *displays* ficarem activos é necessário o utilizador pressionar um botão que gera uma interrupção no microprocessador activando os *displays* durante 10 segundos.

Como se desejava disponibilizar várias informações na interface HMI, foi criado um pequeno menu que permite colocar várias informações nos *displays*. Esta ideia consiste em alterar a informação mostrada nos *displays* sempre que o utilizador pressiona o botão. Assim, na interrupção do botão para além de activar os displays por mais dez segundos também selecciona a informação que é disponibilizada.

Para a correcta geração das interrupções foi ainda necessário introduzir um filtro passa-baixo de modo a garantir que sempre que se pressionava o botão apenas uma interrupção era gerada. Este filtro consistiu num simples filtro RC com frequência de corte nos 20 Hz.

As informações disponibilizadas são as seguintes:

- Saldo em €;
- Saldo em kWh;
- Potência Instantânea;
- Previsão do tempo de duração do saldo.

Assim, o primeiro *display* indica qual a informação que se está a observar, podendo variar entre 0 e 3, e os restantes quatro indicam o valor em questão.



Figura 5.15 - Interface desenvolvida

5.4 - Aplicação para simulação da troca de mensagens

Analogamente ao medidor de energia também a aplicação que simula a troca de mensagens necessita de um *modem* GSM. Para este efeito utilizou-se uma “*Pen Banda larga*”, visível na figura 5.15. Este equipamento trata-se de um simples *modem* GSM com uma interface USB.

O seu princípio de funcionamento é muito idêntico ao SM5100B, pelo que também funciona segundo comandos AT enviados através de uma porta série.



Figura 5.16 - “Pen banda larga”

Para o desenvolvimento da aplicação utilizou-se Visual C#. A principal função desta aplicação é permitir simular a troca de mensagens entre os diversos componentes do sistema.

Também nesta aplicação foi necessário a implementação do método de assinatura descrito em 5.2.

Para além destas tarefas a aplicação permite a ligação a uma base de dados que contém todos os dados relativos aos diversos clientes, bem como todas as mensagens enviadas.

A base de dados tem, então, as seguintes entidades:

- Cliente (Nº. identificação, nome, morada);
- Medidor (ID, Nº. telefone);
- Mensagem (ID, ID_SMS, Tipo, Parâmetro).

As associações entre as entidades são:

- Possui (Cliente, Medidor) 1:1
- Recebe (Medidor, Mensagem) 1:N

Na imagem seguinte encontra-se o modelo entidade-associação da base de dados criada.

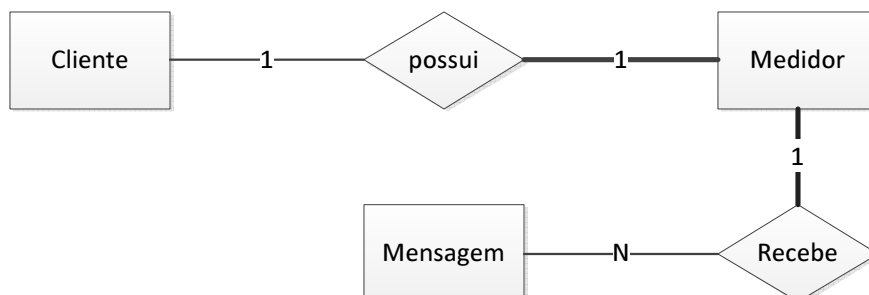


Figura 5.17 - Modelo entidade-associação da base de dados criada

Assim, a aplicação para além de permitir enviar mensagens, permite também adicionar novos clientes e consultar as mensagens enviadas. Importa referir que o número para onde são enviadas as mensagens é lido directamente da base de dados, assim como o ID da mensagem é colocado automaticamente sendo o valor seguinte da ultima mensagem enviada para o medidor em questão.

O resultado final da aplicação encontra-se nas imagens 5.17, 5.18 e 5.19.

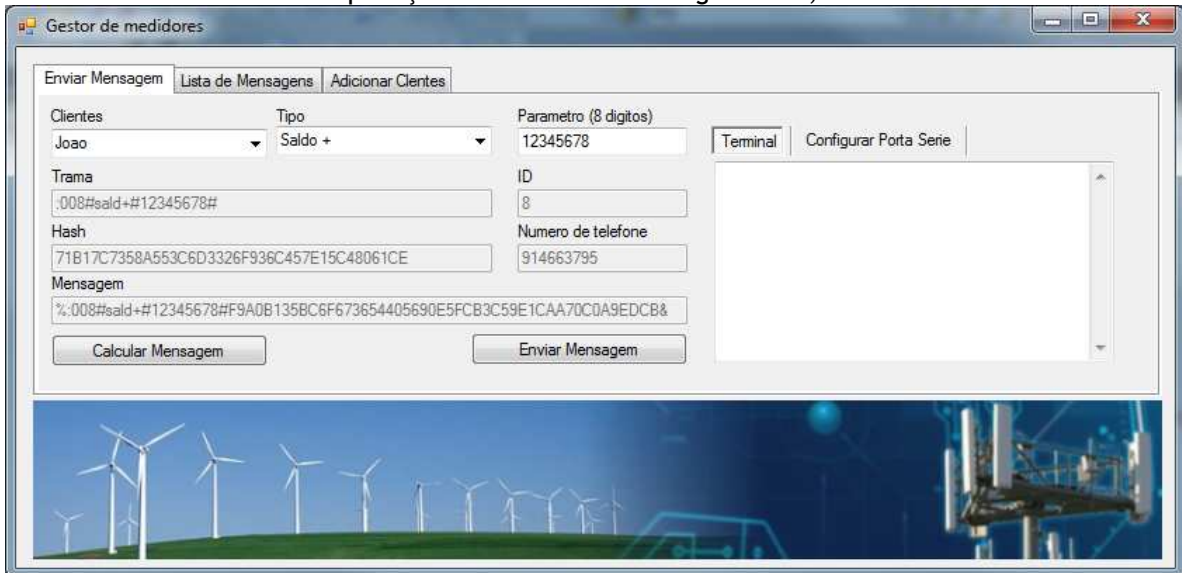


Figura 5.18 - Aplicação para simulação de troca de mensagens (Envio de mensagem)

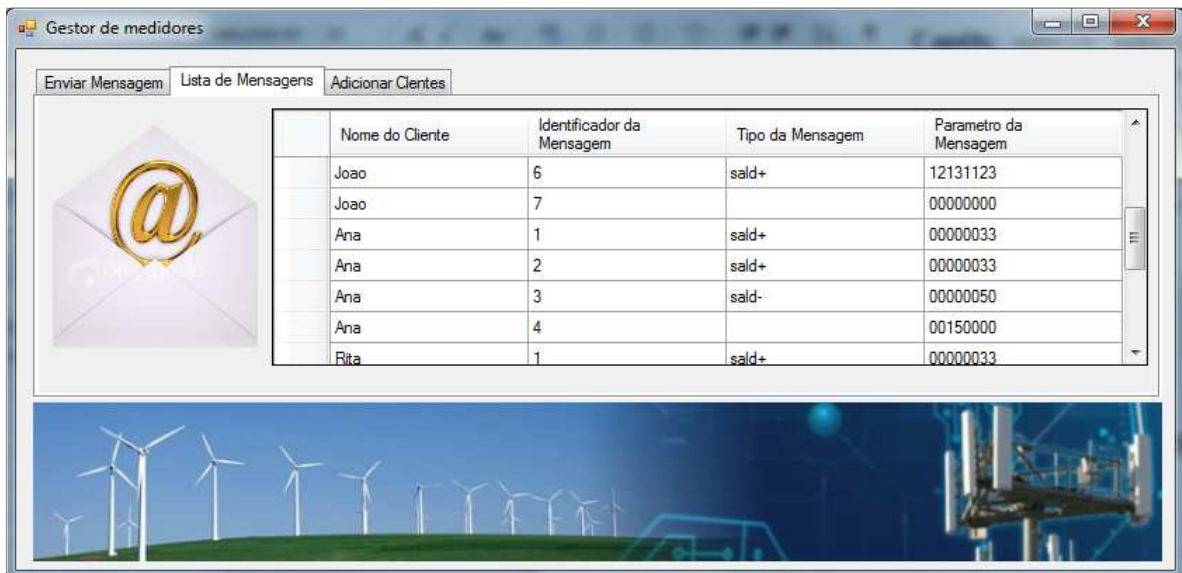


Figura 5.19- Aplicação para simulação de troca de mensagens (Lista de mensagens enviadas)



Figura 5.20 - Aplicação para simulação de troca de mensagens (Adicionar clientes)

5.5 - Testes e validação da solução

Todo o processo de teste e *debug* do *software* desenvolvido foi realizado com recurso à porta série do microprocessador onde se imprimiam mensagens de forma a determinar o estado do sistema.

No que diz respeito à medição de energia os testes efectuados para validar a plataforma de *hardware* serviram ao mesmo tempo para validar todo o *software* desenvolvido nomeadamente as comunicações por SPI com o ADE7753. Este teste permitiu concluir que todas as comunicações foram bem-sucedidas não havendo perda de dados.

O subsistema de comunicações sem fios foi aquele que foi sujeito aos mais rigorosos testes pois é nele que circularão as mensagens que indicam o saldo dos clientes, sendo por isso o serviço que contribui para a geração de valor para a empresa fornecedora de energia.

A aplicação desenvolvida para simular a troca de mensagens foi um elemento fundamental para efectuar os testes do subsistema de comunicações sem fios, na medida em que foi possível efectuar testes com um número elevado de mensagens e analisar a resposta do sistema. Os resultados obtidos no teste das comunicações sem fios foram satisfatórios uma vez que não se registou perda de nenhuma mensagem.

Relativamente à interface Homem-Máquina os testes efectuados para o *hardware* permitiram ao mesmo tempo validar todo o *software* desenvolvido.

Por fim, a aplicação de simulação de envio de mensagens foi validada aquando do envio das mensagens para o medidor e através da verificação que todos os dados eram inseridos na base de dados correctamente.

5.6 - Sumário

Ao longo deste capítulo foram explicados todos os algoritmos desenvolvidos que levaram à implementação do sistema de medição de energia baseado em tecnologia GSM. Para além dos algoritmos desenvolvidos foram explicados todos os conceitos necessários para a implementação de determinados mecanismos como é o caso do SPI, I2C e as questões criptográficas.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

No presente capítulo sumariza-se as principais conclusões e trabalhos futuros no âmbito desta dissertação.

6.1 - Conclusões

O objectivo desta dissertação foi o desenvolvimento de um sistema capaz de efectuar a medição dos consumos de energia eléctrica em clientes residenciais e proceder a sua facturação de forma autónoma e pré-paga.

Esta dissertação reflecte um trabalho de inovação a nível da contabilização da energia eléctrica sob um ponto de vista prático e real.

O trabalho desenvolvido permitiu uma abordagem interdisciplinar, juntando conhecimentos de diversas áreas, culminado no alcance dos objectivos propostos.

No que diz respeito ao erro das medições de energia, tal como referido em 4.8, este sistema de medição apresentou resultados cujo erro foi sempre inferior a 1%, o que comparativamente com os 9% do projecto apresentado em 2.3 (*Design and implementation of low cost electronic prepaid energy meter*) representa um erro bastante reduzido. Relativamente aos contadores electromecânicos, actualmente utilizados nas habitações, estes são frequentemente de classe 2 (erro $\pm 2\%$) [40], o que garante a compatibilidade do sistema desenvolvido com os actuais medidores utilizados.

Os custos envolvidos no projecto prendem-se fundamentalmente com os custos de equipamentos utilizados, sendo que a produção em larga escala pode ser conseguida tendo

um custo entre os 50 e 60€. Trata-se de um custo perfeitamente razoável, visto que a partir da sua instalação não requer qualquer tipo de intervenção.

Ao nível da energia consumida pelo sistema, este possui uma potência de cerca de 0.5W representando um valor relativamente reduzido.

Ao longo deste documento foi mostrado o projecto de um sistema de medição de energia que utiliza a rede GSM para trocar dados com a empresa distribuidora de energia. A utilização do serviço de mensagens de texto demonstrou ser um mecanismo eficaz para realizar a troca de mensagens, uma vez que se trata de uma forma de comunicação assíncrona, onde é sempre garantida a entrega das mensagens enviadas.

Relativamente à interface desenvolvida revelou-se um mecanismo simples e intuitivo para efectuar a consulta das informações relativas aos consumos e saldo disponível.

No projecto deste sistema foi definido que o recarregamento do saldo dos medidores seria realizado através da rede de multibanco, em que o cliente possui uma entidade e referência para efectuar o carregamento. Contudo, nada invalida a existência de uma cadeia de lojas onde se pode realizar o respectivo pagamento (semelhante às *PayShop*).

Para a implementação do mecanismo de segurança na troca de mensagens recorreu-se a um algoritmo criptográfico de chave simétrica. Este mecanismo provou funcionar correctamente cumprindo todos os requisitos pretendidos. Desta forma, pode-se afirmar que este mecanismo implementado garante a integridade, autenticidade e elimina qualquer possibilidade de ataques por replicação das mensagens.

A aplicação desenvolvida para simular a troca de mensagens entre os vários elementos do sistema foi um elemento bastante importante para efectuar todos os testes relativos à troca de mensagens, uma vez que as mensagens eram alteradas e enviadas rapidamente.

Em suma, esta dissertação permitiu validar o conceito da medição e facturação de energia de forma autónoma e pré-paga. Desta forma, pode-se concluir que todos os principais objectivos desta dissertação foram concluídos com sucesso.

6.2 - Trabalho Futuro

Nesta dissertação foi desenvolvido um sistema de medição e facturação de energia eléctrica de forma autónoma e pré-paga. Contudo, o desenvolvimento do sistema para a empresa distribuidora de energia não era um objectivo desta dissertação. Assim para a totalidade deste sistema resta apenas terminar a sua implementação.

Também algumas alterações podem ser feitas no sistema de medição implementado, entre elas:

- Substituir a plataforma de desenvolvimento *arduino* pelo microprocessador a utilizar na solução final;

- Implementação do algoritmo RSA na troca de mensagens;
- Substituir a interface Homem-Máquina por um LCD de caracteres;
- Implementar a alimentação do sistema a partir da rede eléctrica;
- Colocar todo o sistema num invólucro à prova de fraude, bem como utilizar as funcionalidades do ADE7753 para detectar possíveis fraudes;
- Implementação de um mecanismo que permita efectuar um diagnóstico dos vários componentes do sistema.

A2. Funcionamento do SPI

O SPI consiste num barramento de comunicação série síncrona que permite a troca de dados em modo *full-duplex*, isto é, os dados podem ser enviados e recebidos simultaneamente. Assim, a comunicação através de SPI requer a utilização de 4 fios:

- Clock - Sinal de relógio gerado pelo mestre;
- MOSI - Dados enviados pelo mestre;
- MISO - Dados recebidos pelo mestre;
- CS (*Chip Select*) - Linha que selecciona o escravo com o qual se irá dar a comunicação.

Os dispositivos comunicam segundo um modelo de cooperação do tipo mestre-escravo. Desta forma, a comunicação é sempre iniciada pelo mestre. A existência de múltiplos escravos é suportada pelo protocolo, contudo cada um deverá possuir uma linha de *Chip Select* diferente.

O barramento SPI apenas pode operar com um único mestre. Para iniciar a comunicação, primeiramente o mestre configura a frequência do relógio de acordo com as frequências suportadas pelos dispositivos escravos, tipicamente pode assumir valores entre 1 e 70 MHz. De seguida o mestre selecciona o escravo com o qual irá comunicar utilizando a linha de *chip select*.

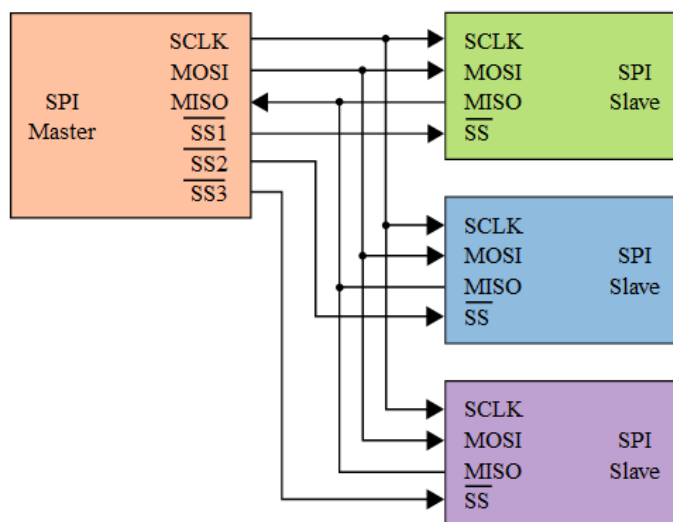


Figura A.2 - Comunicação SPI entre um mestre e vários escravos[41]

Durante cada ciclo de relógio ocorre a comunicação *full duplex*, onde o mestre envia um bit pela linha MOSI que é lido pelo escravo e simultaneamente o escravo envia um bit pela linha MISO que é lido pelo mestre.

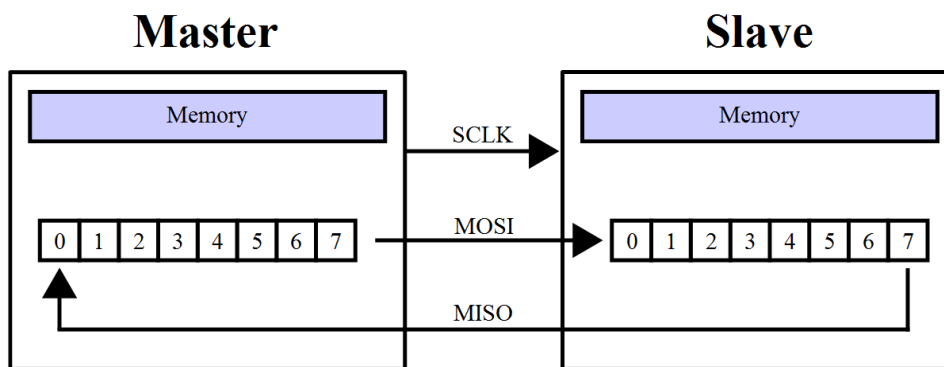


Figura A.3 - Comunicações utilizando SPI[41]

A3. Funcionamento do I2C

O I2C, à semelhança do SPI, trata-se de barramento de comunicações digitais que funciona segundo um modelo de cooperação do tipo mestre-escravo. O I2C utiliza apenas duas linhas para efectuar todas as comunicações, uma linha de dados e uma de relógio. Os escravos são endereçados por software através de um endereço único. Trata-se de uma comunicação série de 8 bits, onde o fluxo de dados é bidireccional permitindo acções de leitura e escrita. Não existe nenhuma limitação relativamente ao número de dispositivos que podem ser conectados ao barramento, contudo a capacidade máxima do barramento não pode exceder os 400pF. O I2C permite ainda a existência de vários mestres no mesmo barramento uma vez que possui mecanismos de arbitragem e selecção de mestre.

A transferência de dados pode ocorrer em três modos:

- *Standard Mode* - 100 kbits/s;
- *Fast Mode* - 400 kbits/s;
- *High Speed Mode* - 3.4 Mbits/s.

Os bits de dados são enviados ao ritmo do sinal de relógio e após 8 bits serem enviados o receptor (escravo se a operação for escrita ou mestre caso a operação seja uma leitura) deve produzir um sinal de *acknowledgement* de forma a informar o receptor que os dados foram recebidos correctamente.

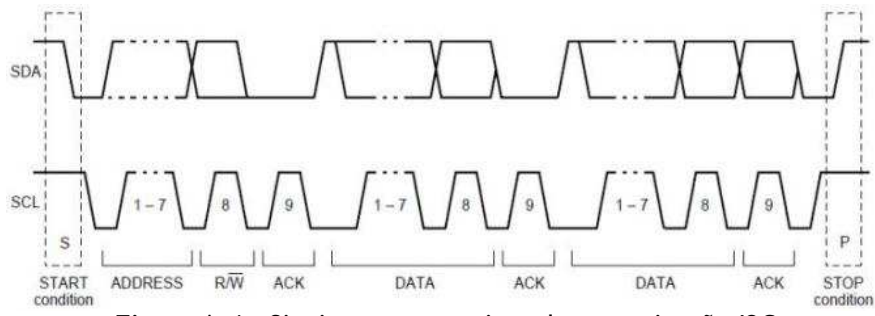


Figura A.4 - Sinais representativos da comunicação I2C

Referências

- [1]. Inforpress/Lusa. ONU: Um terço da população do mundo vive sem energia eléctrica. Disponível em: <http://noticias.sapo.cv/inforpress/artigo/1238.html>. Acesso em: 27 de Novembro de 2010;
- [2] Mbarika, V.W.A. and I. Mbarika, Africa calling [African wireless connection]. Spectrum, IEEE, 2006. 43(5): p. 56-60.
- [3] Guedes, M.V., Galileo Ferraris. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [4] Délcio Basso, J.B.d.R.F., Garrafas de água em contadores residenciais de energia eléctrica: desfazendo um mito. Faculdade de Física, Porto Alegre.
- [5] Sherburne, R.R., Driving Torque Equations for the Watthour Meter Based on the Ferraris Principle. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1971. PAS-90(1): p. 325-330.
- [6] Rob van Gerwen, S.J., Rob Wilhite, Smart Metering. KEMA, The Netherlands, 2006.
- [7] EDP. Projecto InovGrid. Disponível em: <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/InovGrid.aspx>. Acesso em: 3 de Fevereiro de 2011.
- [8] Contadores utilizados no projecto InovGrid. Disponível em: <http://aminhaalegrecasinha.com/2010/04/evora-acolhe-contadores-inteligentes-da.html>. Acesso em: 03 de Fevereiro de 2011;
- [9] Tulcídás, G., Contador de Energia Eléctrica Inteligente. 2010, IST - Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- [10] Devices, A. ADE7753: Single Phase Multifunction Energy Metering IC with di/dt Input (Serial-Port Interface). Disponível em: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADE7753.pdf.
- [11] Durnte, L.G. and P.K. Ghosh, Active power measurement in nonsinusoidal environments. Power Systems, IEEE Transactions on, 2000. 15(3): p. 1142-1147.
- [12] Driesen, J., T. Van Craenenbroeck, and D. Van Dommelen, The registration of harmonic power by analog and digital power meters. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 1998. 47(1): p. 195-198.
- [13] Cuk, V., A. Nikolic, and A. Zigic. A development system for testing integrated circuits used for power and energy measurements. in Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th. 2008.

[14] Ali Zaidi, S.K., et al. Design and implementation of low cost electronic prepaid energy meter. in IEEE INMIC 2008. 12th IEEE International Multitopic Conference, 23-24 Dec. 2008. 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE.

[15] Maitra, S. Embedded energy meter- a new concept to measure the energy consumed by a consumer and to pay the bill. in 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference (POWERCON), 12-15 Oct. 2008. 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE.

[16] Tan, H.G.R., C.H.R. Lee, and V.H. Mok. Automatic power meter reading system using GSM network. in Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International. 2007.

[17] Short Codes. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Short_code. Acesso em: 03 de Janeiro de 2011;

[18] Padronização de Short Codes. Disponível em: http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/soares_figueiredo/sms_short_codes.html. Acesso em: 03 de Fevereiro de 2011;

[19] Dhar, S., ed. Introduction to Smart Cards. Reliance Infocomm.

[20] Computação Ubíqua. Disponível em: <http://tiagoromero.wordpress.com/2008/10/17/computacao-ubiqua/>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2011;

[21] SIBS, Brochura SIBS. 2010.

[22] SIBS. O que é a SIBS. Disponível em: <http://www.sibs.pt/pt/sibs/institucional/>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2011;

[23] SIBS. SIBS - Segurança e Serviços de TI. Disponível em: <http://www.sibs.pt/pt/sibs/prodserv/seguranca/>. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2011;

[24] IfThen. IfMb - Sistema de Cobranças por Multibanco. Acesso em: 04 de Fevereiro de 2011;

[25] Automated teller machine. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Automated_teller_machine. Acesso em: 14 de Fevereiro de 2011;

[26] Arduino. Disponível em: <http://www.arduino.cc/>. Acesso em: 14 de Fevereiro de 2011;

[27] wikipedia. SPI -Serial Peripheral Interface Bus. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus. Acesso em: 25 de Maio de 2011;

[28] LEM. LEM LTS15-NP. Disponível em: http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,90.37.15.000.0/. Acesso em: 26 de Maio de 2011;

- [29] Cellular Shield with SM5100B. Disponível em: <http://www.sparkfun.com/products/9607>. Acesso em: 14 de Fevereiro de 2011;
- [30] SpredTrum. SM5100B-D GSM/GPRS Module Specification. Disponível em: <http://www.sparkfun.com/datasheets/CellularShield/SM5100B%20Datasheet.pdf>. Acesso em: 19 de Maio de 2011;
- [31] Microsystems, A. AS1115 - 64 LEDs, I²C Interfaced LED Driver with Keyscan. 2010 Disponível em: <http://www.austriamicrosystems.com/eng/content/download/18430/343782/15670>. Acesso em: 19 de Maio de 2011;
- [32] Hewes, J. Power Supplies. Disponível em: <http://www.kpsec.freeuk.com/powersup.htm>. Acesso em: 15 de Maio de 2011;
- [33] Energy, A. BATTERY, RECHARGEABLE, AA, 2400MAH. Disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/58585.pdf>.
- [34] Prof. Dr. Omar Branquinho Luis Fernando B Braghetto, S.C.d.S., Marcelo Lotierso Brisqui, Paulo da Costa, Redes GSM e GPRS.
- [35] Tecnológica, I. Quebrada criptografia de celulares GSM. 2003 Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110030915>. Acesso em: 26 de Maio de 2011;
- [36] Wikipedia. Assinatura Digital. 2011 Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Assinatura_digital. Acesso em: 24 de Maio de 2011;
- [37] Wikipedia. SHA-1. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/SHA>. Acesso em: 25 de Maio de 2011;
- [38] Wikipedia. RSA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/RSA>. Acesso em: 25 de Maio de 2011;
- [39] Wikipedia. GOST. Disponível em: [http://en.wikipedia.org/wiki/GOST_\(block_cipher\)](http://en.wikipedia.org/wiki/GOST_(block_cipher)). Acesso em: 28 de Maio de 2011;
- [40] Atmel. AVR230: DES Bootloader. Disponível em: <http://www.gaw.ru/pdf/Atmel/app/avr/AVR230.pdf>. Acesso em: 25 de Maio de 2011;
- [41] Tembu, C.L.E.E.e.R., Medidor inteligente.