



**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**  
Faculdade de Engenharia

**Desenvolvimento de equipamento e aplicação  
para auditoria de consumos energéticos  
Na perspectiva do Smart Metering**

**Sérgio Filipe Reis Baptista**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo

Covilhã, Outubro de 2012



# Agradecimentos

Os primeiros e maiores agradecimentos vão, naturalmente, para os meus pais que me deram e continuam a dar uma formação pessoal, de educação e de valores, que vou transportar com grande orgulho e gratidão por toda a vida. Por isso, e pelo exemplo de resistência e sacrifício, serão sempre uma referência maior. Na formação académica, que agora termina, um grande agradecimento pela confiança no meu critério e pelas privações que tiveram que suportar para que pudesse percorrer este longo caminho.

Agradeço também à família Mourato, que decidiu acarinhar a nossa, fazendo concessões de valor incalculável, e tendo dado um apoio logístico que não poderíamos pedir a ninguém.

Um grande agradecimento ao meu orientador, professor António Espírito Santo, pelo investimento pessoal, o apoio profissional, a visão técnica experiente e inspirada que me guiaram neste trabalho e ainda a disponibilidade extraordinária que permitiram que chegasse a bom porto. Neste campo, agradecer também aos meus colegas do Laboratório de Instrumentação e Medida, pelo companheirismo espirituoso e pelas sempre valiosas dicas. Ainda na Universidade, uma palavra de consideração por alguns docentes, pelo apoio e dedicação nalguns projectos desenvolvidos durante a estadia nesta casa.

Finalmente, aos meus amigos mais próximos, por tudo aquilo que compõe uma amizade completa: a animação, o entusiasmo, a fidelidade, a preocupação, entre tantos outros ingredientes. Têm sido como que pilares, nos bons e nos maus momentos. Não seria justo não destacar o mais empenhado deles, o Amílcar Baptista, com quem somos frequentemente confundidos como irmãos, e é como se fôssemos de facto, e isso diz tudo. Sem ele, provavelmente, esta dissertação não teria esta data.

Por último, contrariando o crescente sentimento geral de apreensão para com o Estado Português, quero deixar também a ele uma palavra de agradecimento. Não fossem as suas estruturas de acção social escolar, que financiaram cerca de metade da minha formação, seria praticamente impossível, se não mesmo, tê-la trazido até este ponto.

# Resumo

Esta dissertação aborda a temática da energia numa perspectiva da introdução de inteligência nas redes eléctricas, que está a dar origem a uma nova geração de redes - as *smart grids*.

A dissertação faz uma caracterização inicial deste contexto em mudança, ao que se segue uma resenha sobre a evolução das teorias de grandezas eléctricas, nomeadamente potências, e ainda um levantamento das tecnologias de comunicação mais empregues neste sector.

O trabalho de desenvolvimento consiste na montagem e programação de um equipamento modular de aquisição de grandezas eléctricas e na elaboração de uma aplicação informática que permita importar estes dados, armazená-los e analisá-los.

Finalmente, são realizados ensaios para validar o funcionamento deste equipamento de medida, particularmente no que diz respeito à potência reactiva, em ambientes com distorção harmónica.

# Palavras-chave

Medições eléctricas, medida digital, auditoria energética, *smart grid*, *smart metering*, rede inteligente, microcontrolador.

# Abstract

This dissertation approaches the issues of energy from the perspective of the introduction of intelligence in the electrical grid, which is giving rise to a new generation of grids - the smart grids.

The dissertation start with a description of this changing context, to which follows a review of the evolution of the theories on electrical quantities, such as powers, and yet a survey of the communication technologies most used at this appliances.

The development work consists in assembling and programing a modular device of acquisition of electrical quantities and developing a computer interface that allows to import this data, store it and analyze it.

Finally, some experiments are performed in order to assess the accuracy of this measurement device, namely concerning the reactive power, in environments containing harmonic distortion.

# Keywords

Electrical measurement, digital measurement, energy audits, smart grid, smart metering, intelligent grid, microcontroller.

# Índice

|  |    |
|--|----|
| 1. Introdução .....  | 1  |
| 1.1. Importância e enquadramento do problema .....             | 2  |
| 1.2. Justificação para a escolha do tema .....                 | 2  |
| 1.3. Objectivos da investigação .....                          | 3  |
| 1.4. Estrutura da dissertação .....                            | 3  |
| 2. Smart Metering .....  | 5  |
| 2.1. Smart Grids .....   | 5  |
| 2.2. Definições de grandezas eléctricas .....                  | 14 |
| 2.2.1. Ambientes sinusoidais .....                             | 14 |
| 2.2.2. Ambientes não sinusoidais .....                         | 15 |
| 2.3. Tecnologias de comunicação .....                          | 21 |
| 3. Equipamento de suporte .....                                | 25 |
| 3.1. Conceito .....  | 25 |
| 3.2. Módulo de alimentação (FA) .....                          | 26 |
| 3.3. Módulo de medida (MCU) .....                              | 34 |
| 4. Serviços a implementar .....                                | 40 |
| 4.1. Grandezas a obter .....                                   | 40 |
| 4.2. Interface com computador .....                            | 40 |
| 4.2.1. Parametrização do <i>smart meter</i> .....              | 41 |
| 4.2.2. Leitura, representação e gestão dos dados medidos ..... | 42 |
| 5. Programação dos módulos .....                               | 45 |
| 5.1. Integração/comunicação dos módulos .....                  | 45 |
| 5.2. Estrutura do programa do Módulo FA .....                  | 45 |
| 5.2.1. Monitorização das tensões de alimentação .....          | 46 |
| 5.2.2. Gestão da energia do barramento .....                   | 47 |
| 5.2.3. Interface com utilizador .....                          | 47 |
| 5.3. Estrutura do programa do Módulo MCU .....                 | 48 |
| 5.3.1. Configurações iniciais .....                            | 50 |
| 5.3.2. Cálculos das grandezas eléctricas .....                 | 53 |
| 5.3.3. Comunicação .....                                       | 55 |
| 6. Ensaios e validação .....                                   | 57 |
| 7. Conclusões e considerações finais .....                     | 61 |
| 7.1. Correções necessárias .....                               | 61 |
| 7.2. Contributo original .....                                 | 62 |
| 7.3. Trabalhos futuros .....                                   | 63 |
| Referências Bibliográficas .....                               | 64 |

# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Fig. 2.1 - Modelo conceptual da Smart Grid                                 | 7  |
| Fig. 3.1 - Conjunto de módulos   | 25 |
| Fig. 3.2 - Representação do protocolo I <sup>2</sup> C                     | 26 |
| Fig. 3.3 - Módulo FA, perspectiva de baixo                                 | 27 |
| Fig. 3.4 - Módulo FA, perspectiva de cima                                  | 28 |
| Fig. 3.5 - Diagrama representativo da orgânica da fonte de alimentação     | 29 |
| Fig. 3.6 - Subcircuito de entrada da rede e abaixamento de tensão          | 29 |
| Fig. 3.7 - Subcircuito de protecção  | 30 |
| Fig. 3.8 - Subcircuito de condicionamento de sinal da rede (parte 1)       | 31 |
| Fig. 3.9 - Subcircuito de condicionamento de sinal da rede (parte 2)       | 31 |
| Fig. 3.10 - Subcircuito de condicionamento de sinal da bateria (nível 1)   | 32 |
| Fig. 3.11 - Subcircuito de condicionamento de sinal da bateria (nível 2)   | 32 |
| Fig. 3.12 - Subcircuito de condicionamento de sinal da bateria (nível 1)   | 32 |
| Fig. 3.13 - Módulo MCU, com acréscimo de cabos para comunicações UART      | 34 |
| Fig. 3.14 - Diagrama representativo da orgânica do módulo de medida        | 35 |
| Fig. 3.15 - Divisores das entradas de tensão                               | 36 |
| Fig. 3.16 - Um dos circuitos de produção de sinal da corrente              | 37 |
| Fig. 3.17 - Organização interna do microcontrolador MSP430F47197           | 38 |
| Fig. 3.18 - Diagrama de blocos do ADC <i>sigma-delta</i>                   | 38 |
| Fig. 4.1 - Vista geral do interface gráfico com o utilizador               | 41 |
| Fig. 4.2 - Secção de parametrização  | 41 |
| Fig. 4.3 - Secção de obtenção de dados                                     | 42 |
| Fig. 4.4 - Secção de gestão de equipamentos                                | 43 |
| Fig. 4.5 - Secção de Gestão e Análise dos Dados                            | 44 |
| Fig. 5.1 - Sequências de operações face à alteração da alimentação da rede | 46 |
| Fig. 5.2 - Ocupação da CPU com os dois processos principais                | 48 |
| Fig. 5.3 - Esquema da pilha FIFO dos valores da corrente                   | 49 |
| Fig. 5.4 - Fluxograma da função geral do módulo MCU                        | 49 |
| Fig. 5.5 - Desempenho temporal com 128 amostras                            | 51 |
| Fig. 5.6 - Desempenho temporal com 64 amostras                             | 52 |

# Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Comparação de parâmetros técnicos entre a rede existente e uma inteligente      | 7  |
| Tabela 2 - Evolução perspectivada e obstáculos previsíveis em cada nível da rede eléctrica | 10 |
| Tabela 3 - Estudo sobre as convicções quando aos <i>smart meters</i>                       | 13 |
| Tabela 4 - Comparação entre normas sem-fios IEEE   | 22 |
| Tabela 5 - Tabela de verdade do <i>power mux</i> TPS2111                                   | 47 |
| Tabela 6 - Conjunto de códigos relativos à parametrização                                  | 55 |
| Tabela 7 - Conjunto de códigos relativos a pedidos de informação                           | 55 |
| Tabela 8 - Dados para o 1º ensaio  | 57 |
| Tabela 9 - Resultados do 1º ensaio   | 57 |
| Tabela 10 - Dados para o 2º ensaio   | 58 |
| Tabela 11 - Resultados do 2º ensaio  | 58 |
| Tabela 12 - Dados para o 3º ensaio   | 59 |
| Tabela 13 - Resultados do 3º ensaio  | 59 |
| Tabela 14 - Dados para o 4º ensaio   | 60 |
| Tabela 15 - Resultados do 4º ensaio  | 60 |

# Lista de Acrónimos

|                  |   |
|------------------|---|
| ADC              | Analog-to-digital Converter                         |
| AMR              | Automated Meter Reading                             |
| BPL              | Broadband over Power Line                           |
| DC               | Direct Current                                      |
| DTC              | Distribution Transformer Controller                 |
| EEPROM           | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| EUA              | Estados Unidos da América                           |
| GRP              | Gabinete de Relações Públicas                       |
| HAN              | Home-Area Network                                   |
| I <sup>2</sup> C | Inter-Integrated Circuit                            |
| IEEE             | Institute of Electrical and Electronics Engineers   |
| JTAG             | Joint Test Action Group                             |
| LAN              | Local-Area Network                                  |
| LED              | Light-Emitting Diode                                |
| PLC              | Power Line Communication ou Carrier                 |
| RAM              | Random-Access Memory                                |
| ROM              | Read-Only Memory                                    |
| TIC              | Tecnologias de Informação e Comunicação             |
| UART             | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter         |
| UBI              | Universidade da Beira Interior                      |
| USB              | Universal Serial Bus                                |
| WAN              | Wide-Area Network                                   |

# Capítulo 1

## 1. Introdução

As questões energéticas estão cada vez mais sob escrutínio. Por um lado, a constatação da enorme disparidade entre a taxa de crescimento da procura em relação à taxa de instalação de produção, a primeira estimada em cerca de 1,7% ao ano [1], coloca aos governos a pressão de decidir as formas mais sustentáveis de dar resposta a essa mesma procura. Por outro lado, intensificam-se também as preocupações ambientais, principalmente focadas nas emissões de CO<sub>2</sub>, pelo que a sugestão apontada vai sempre na direcção das fontes de energia renováveis, vertida, por exemplo, no plano de acção da UE “20-20-20”, que estipula, entre outras mudanças, que as emissões de gases de efeito de estufa deverão ser reduzidas em 20% (em relação a 1990) e as energias renováveis deverão representar 20% do consumo energético total da UE até 2020.

O caminho seguido tem sido, em grande parte, esse mesmo. No entanto, este vem introduzir novas problemáticas: os custos de produção tendo em conta a amortização dos investimentos são acentuados e a qualidade da energia sai degradada.

Mas a resposta não deve ser apenas do lado da produção, importa que se introduzam novos hábitos de consumo, principalmente no sentido de atenuar situações de pico, enquanto majorantes no dimensionamento da capacidade instalada. Para isso, o consumidor tem que ser informado e/ou persuadido a contribuir para esse efeito, nomeadamente com a deslocação de consumos para períodos de menor procura. Existe uma consciência global destes factos, no entanto, só são esperadas reacções dos clientes com ganhos tangíveis em termos de poupança na factura, mensagem que tem que ser veiculada com sucesso pelo distribuidor.

Em todos estes níveis, o processo de decisão está inteiramente dependente da quantidade, qualidade e actualidade da informação disponível, pelo que o pensamento global vai no sentido de tornar as redes mais inteligentes, donde surge o conceito das *smart grids*.

## 1.1. Importância e enquadramento do problema

Numa rede onde a principal informação a veicular são quantidades de energia (ou grandezas baseadas nela), importa que esta seja medida com rigor e disponibilizada com facilidade. As funcionalidades dos equipamentos de medida são, portanto, de natureza fulcral.

Das várias instâncias que se podem considerar na rede eléctrica, toma-se para este trabalho o ambiente doméstico, pelo que o medidor inteligente ou *smart meter* deverá, além das funções intrínsecas de medição, oferecer uma camada de interface com o utilizador.

Há que assumir que o utilizador de um equipamento desta natureza está empenhado em realizar poupanças, pelo que estará disposto a dedicar alguma atenção à informação obtida. Pode esperar-se também, da crescente tendência que se verifica no gosto pela acessibilidade e portabilidade das TIC, que o deseje fazer a partir do máximo de plataformas possíveis (computador, *tablet*, *smartphone*). Porém, há que partir do princípio que não terá conhecimento na matéria de grandezas eléctricas, pelo que a análise dos resultados deve resultar na geração de conclusões claras e objectivas que lhe permitam alcançar poupanças com medidas simples, directas e razoáveis.

## 1.2. Justificação para a escolha do tema

A actualidade do tema da energia é algo que não oferece quaisquer dúvidas. A evolução das TIC, e a sua crescente capacidade de aumentar a visão e intervenção remotas, muito menos.

Tirando proveito disto, os sistemas de energia estão a progredir no sentido de incorporar mais inteligência e, com isso, atingir maiores níveis de eficiência, de fiabilidade e, naturalmente, de economia. Um processo desta natureza opera-se naturalmente, em vários níveis. Para o âmbito deste trabalho escolheu-se o ambiente doméstico, por ser aquele que possui mais “liberdade” na medida em que deixa de existir um operador, logo existe maior abertura à concorrência enquanto mercado.

Contribuiu também para esta decisão o facto de haver trabalho anterior no Laboratório de Instrumentação e Medida, nomeadamente o desenvolvimento de uma aparelhagem de auditoria energética de sistemas eléctricos.

### 1.3. Objectivos da investigação

Esta dissertação pretende, antes de mais, oferecer uma perspectiva geral sobre o contexto em evolução das redes de energia, mais propriamente, no que toca à introdução de inteligência com vista à criação das chamadas *smart grids*.

Quanto à componente de desenvolvimento propriamente dita, visa a estruturação e desenvolvimento de *firmware* para um medidor de energia inteligente - *smart meter* - e de uma aplicação informática de interface com o mesmo. Neste processo, serão perseguidas as características:

- Versatilidade: O medidor deverá ser parametrizável desde o regime de medição à forma como armazena e comunica os dados obtidos.
- Modularidade: Uma preocupação tida na aparelhagem de que este projecto tira proveito foi a estruturação por módulos, mantendo a possibilidade de substituir um deles, caso seja necessário, ou criar novos, expandindo as funcionalidades do conjunto.
- Acessibilidade: Num projecto com vocação para utilização geral doméstica, importa que o modo de operação (ou, pelo menos, parte dele) seja de fácil acesso ao utilizador comum, quer no interface físico local (por botões ou indicadores luminosos), quer no interface informático (com uma organização gráfica *user friendly*, possivelmente com vários níveis, deixando num primeiro informações/indicações mais sintéticas e trabalhadas graficamente, relegando para um segundo a informação “bruta” que provém do medidor).

### 1.4. Estrutura da dissertação

A primeira fase do trabalho consiste, como se referiu no ponto anterior, num estabelecimento do contexto e dos princípios em que se enquadra esta dissertação: primeiramente uma visão geral sobre as *smart grids*, seguidamente uma revisão sobre a evolução dos conceitos de energia eléctrica (principalmente no que toca às definições de potência), e, finalmente, um levantamento comparativo das tecnologias de comunicação mais utilizadas à escala doméstica (referindo, quando justificável, aplicações já existentes no contexto deste trabalho).

O ponto seguinte faz uma caracterização do equipamento de suporte anteriormente desenvolvido no laboratório, citando as principais opções de projecto na altura e tentando,

sempre que possível, identificar e explorar as potencialidades que tem para o projecto em causa.

Com o conhecimento das possibilidades, o capítulo a seguir enumera e descreve os serviços a implementar, quer no *smart meter*, quer na aplicação informática de interface. Estabelecerá as grandezas a medir e os regimes em que são obtidas, definindo as variáveis associadas ao processo (frequência, periodicidade, armazenamento, etc.), e as formas como podem ser acedidas/modificadas. A isto segue-se, naturalmente, a estruturação do interface gráfico, desde a perspectiva interna (principais variáveis, tipologia de comunicação, etc.), à externa/gráfica (organização da informação, ferramentas de tratamento da mesma, etc.).

Passando à prática propriamente dita, o capítulo seguinte faz no início uma breve explicação sobre a forma como os módulos do medidor são integrados e comunicam entre si e com o computador, seguindo-se uma descrição geral do código implementado em cada um deles, sendo descritas as principais funções.

Segue-se um capítulo de ensaios, onde se pretende pôr à prova a fiabilidade do medidor, nomeadamente pela comparação com medições por equipamentos comerciais. Será ainda avaliada a integração da informação recolhida no interface gráfico, tentando retirar conclusões à medida que se acumulam dados provenientes do medidor, em jeito de estatística.

Feito isto, serão tecidas as considerações finais sobre os resultados obtidos, tendo presentes os objectivos definidos, e sobre a pertinência das funcionalidades conseguidas, face ao enquadramento estabelecido. Por fim, deixa-se um apontamento sobre trabalhos futuros que possam corrigir, melhorar ou potencializar o trabalho aqui desenvolvido.

## Capítulo 2

### 2. Smart Metering

#### 2.1. Smart Grids

Sobre as redes eléctricas actuais, com excepção de alguns pontos-chave da produção ou transporte, pode dizer-se que ainda possuem uma natureza predominantemente unidireccional. Para além de algumas formas de produção apresentarem baixos rendimentos, estima-se ainda 8% de perdas nas linhas de transporte, enquanto que 20% da capacidade de produção está implantada apenas para satisfazer necessidades de pico [2]. Ademais, uma rede com uma estrutura hierarquizada, onde as centrais de produção no topo da cadeia asseguram o suprimento das necessidades estimadas de potência dos clientes na base, torna-se vulnerável, podendo cair em situações de falha em cascata, iniciadas por uma única falha a montante.

No entanto, as tendências políticas e ambientais têm ido no sentido de descentralizar a produção, particularmente, com recurso a fontes renováveis, o que vem criando cada vez mais agentes de produção. Além disso, a injeção de energia na rede por vários pequenos produtores pode, em algumas zonas da rede, levar a uma inversão do fluxo energético das mesmas e assim alterar a direcção original do fluxo, que é dos maiores para os menores níveis de tensão [3]. Simultaneamente, há uma grande volatilidade na produção fotovoltaica e eólica. Isto pode conduzir a situações onde a rede eléctrica deixa de ser controlável de forma eficiente, dentro dos limites da infra-estrutura no momento. Por exemplo, em momentos de sobrecarga, a rejeição de carga pode levar a um corte completo com uma turbina eólica, que estava a produzir energia limpa. Em tais momentos, a rede tem que lidar com condições para as quais não foi projectada. Um direccionamento razoável sem a ajuda de tecnologias de informação e comunicação é difícil nesta situação, pelo que importa dotá-la de tais meios.

Paralelamente, a liberalização do mercado de distribuição de electricidade coloca ao operador da rede eléctrica o desafio de lidar com vários distribuidores, cada um com os seus objectivos próprios e com carteiras de clientes algo flutuantes.

Não só no sentido de dar resposta a todos estas necessidades mas também de criar novas oportunidades, uma rede inteligente vem então sendo idealizada. Uma rede que permita aos vários agentes interagir entre eles em transacções, sem que isso implique um envolvimento

activo de regulação, uma rede que seja auto-regulável, portanto. Várias são as características que são desejadas para uma rede assim, o Departamento de Energia dos EUA, por exemplo, define que deve ser [4]:

- Inteligente: Espera-se que se possam encontrar formas eficientes de construir sistemas cognitivos complexos que sejam altamente robustos, adaptativos e tolerantes a falhas em ambientes incertos ou imprevistos.
- Eficiente: Tornando o sistema mais eficiente, podem conseguir-se benefícios significativos sem ter que aumentar infra-estruturas. Por exemplo, estima-se que, com os tipos de controlo e armazenamento apropriados, os parques eólicos poderiam produzir três vezes mais electricidade do que actualmente.
- Adaptativa: Face à incorporação de energia obtida a partir das mais diversas fontes, cada uma com as suas particularidades, espera-se que a rede consiga gerir a integração delas sem discriminação ou reservas.
- Motivante: O fluxo de informação permitirá a implantação de um género de rede social tecnológica, onde, por exemplo, um consumidor, pela informação da procura e, conseqüentemente, da tarifa instantâneas, poderá decidir a melhor altura para fazer determinada actividade.
- Focada na qualidade: Com a expansão da electrónica de potência e de outras cargas não lineares, variantes no tempo, a qualidade da energia vem-se tornando uma questão crítica, com implicações económicas, pelo que importa considera-la no desenvolvimento destas redes.
- Oportunista: O aparecimento de novos agentes nos sistemas de energia, como os veículos eléctricos, assume que a rede possa beneficiar desta funcionalidade *plug-and-play*, incitando o veículo a carregar ou a vender energia à rede, dependendo do preço da energia no momento. Isto criará novas oportunidades tanto como desafios, como sejam a fiabilidade do sistema, gestão da carga, equilíbrio da oferta e procura, etc.
- Resiliente: É do conhecimento geral que a resistência a ciberataques e a desastres naturais é uma qualidade essencial numa rede de energia. Naturalmente, quanto maior e mais profunda for a controlabilidade da rede, maior será o risco, pelo que a melhoria da sua resiliência a vários níveis constitui um aspecto prioritário.
- Verde: Servindo um dos objectivos para o sector energético que é a redução da pegada de carbono, as redes inteligentes promovem a integração de formas de produção distribuída renovável.

Perspectiva-se, portanto, o surgimento de uma panóplia de serviços e o reenquadramento de outros numa cadeia muito mais entrecruzada, como mostra a Fig. 2.1.

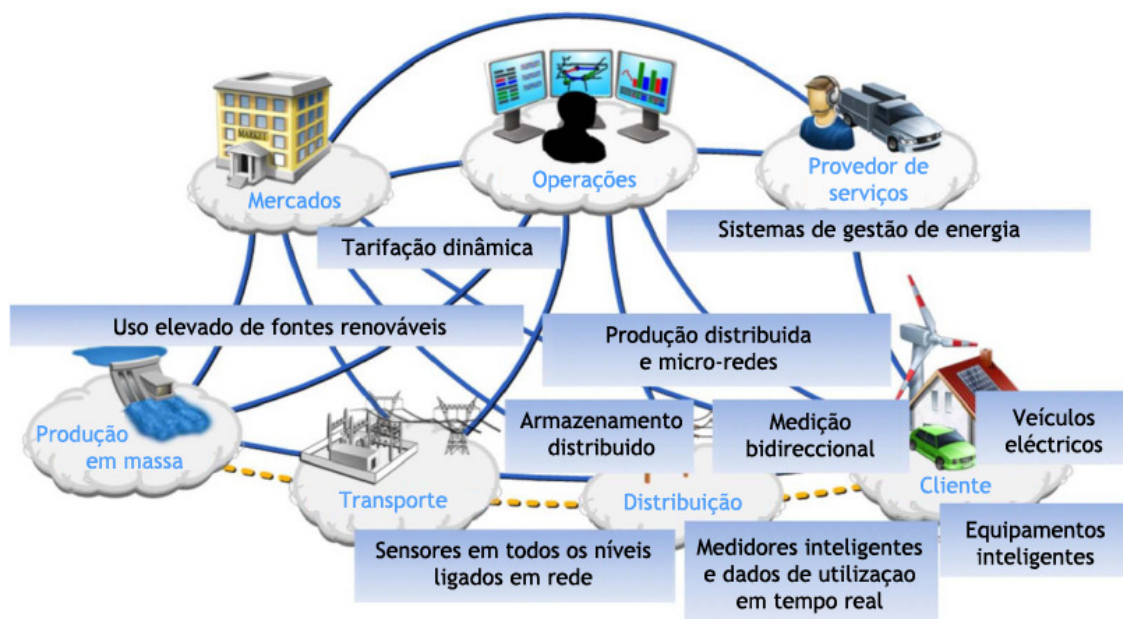


Fig. 2.1 - Modelo conceptual da Smart Grid, adaptado de [5]

Sob um ponto de vista mais técnico, em [2] as diferenças entre a rede existente e a rede inteligente idealizada são sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação de parâmetros técnicos entre a rede existente e uma inteligente

| Rede existente                | Rede inteligente                 |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Electromecânica               | Digital                          |
| Comunicação unidireccional    | Comunicação bidireccional        |
| Produção centralizada         | Produção distribuída             |
| Hierárquica                   | Rede                             |
| Poucos sensores               | Sensores em massa                |
| Cega                          | Auto-monitorizada                |
| Restabelecimento manual       | Auto-reconfigurável              |
| Falhas e apagões              | Adaptação e isolamento           |
| Verificação/teste manual      | Verificação/teste remoto         |
| Controlo limitado             | Controlo penetrante              |
| Poucas escolhas ao consumidor | Múltiplas escolhas ao consumidor |

A migração para estas redes é um objectivo que está inscrito nos programas estratégicos para a energia, tanto nos EUA, no programa Grid 2030 do Departamento de Energia, como na União

Europeia, pela European Technology Platform. Mais recentemente, o IEEE também lançou a iniciativa Smart Grid para coordenar tais esforços globais multidisciplinares tendo em vista esse objectivo energético de longo-prazo [4].

Uma rede inteligente como se vem idealizando deve, na verdade, ser constituída por várias micro-redes, interligadas por “auto-estradas” dedicadas de dados e de energia. Uma tal arquitectura permitirá uma migração/integração faseada, como necessariamente terá que ser, abrindo caminho a que cada uma delas tenha, naturalmente, as suas especificidades.

Naturalmente, já existem alguns níveis de monitorização e automação, mas regra geral estão confinados a um patamar da cadeia (produção, transporte, distribuição ou comercialização), não existindo ou sendo vaga a integração com os outros patamares. Nos EUA, por exemplo, menos de um quarto da rede de distribuição está equipada com sistemas de comunicação e informação [2].

Como foi dito anteriormente, a nível da produção, um dos desafios actuais e futuros será o de adequar a operacionalidade de grandes produtores de energia, como é o caso dos operadores convencionais, com a existência de produtores de energia que recorrem às novas tecnologias de energias renováveis e que funcionam de forma intermitente. Ainda que existam previsões e modelos *online* que prevêm a produção expectável de energia com uma exactidão de 96% para um prognóstico de quatro horas e de 94% para o dia seguinte [3], com o firme crescimento da energia eólica e solar, eventuais desvios ganham mais peso, pelo que se torna necessário introduzir tecnologias de informação e comunicação para melhor integrar estas centrais na rede energética. A existência de uma rede de colecta de informação irá permitir alimentar os modelos de previsão, para que estes devolvam resultados o mais coerentemente possível.

Uma tal integração permitiria, por exemplo, criar centrais eléctricas virtuais. Estas consistem num parque de pequenas unidades de produção que, quando combinadas, tomam a figura de uma grande central [6] [7]. Para a realização de uma central virtual, o cruzamento de comunicações é um aspecto crítico. Somente se cada uma das pequenas centrais estiver ligada de forma fiável a uma unidade de controlo central, e até mesmo entre elas, será este conceito realizável. Para além da transmissão de dados medidos ou comandos, é necessária mais infra-estrutura de comunicação [8] [9]. Tem que haver dispositivos de medida que forneçam informação sobre produção e consumo num determinado instante em tempo real, bem como o estado da rede e, potencialmente, ainda sobre as condições meteorológicas (no caso das fontes renováveis).

Quanto ao transporte e potência de reserva, considere-se o exemplo alemão, em que existem três classes de centrais a providenciar potência de reserva para corrigir desequilíbrios pontuais no diagrama de carga. As centrais que desempenham a reserva primária reagem num

espaço de segundos, de uma forma descentralizada aumentando ou reduzindo a capacidade de produção, as secundárias num espaço de minutos (ainda automaticamente), e as terciárias, já com intervenção humana (por telefone, fax ou e-mail), levam entre 7,5 e 15 minutos a ser activadas [3]. É neste nível que ainda há uma larga margem para melhoria com recurso a tecnologias de medição e comunicação.

Para o sector da distribuição estas tecnologias são particularmente interessantes numa perspectiva de gestão do lado da procura. É de uma importância vital para o operadores de distribuição conhecer o estado actual de carga da rede e reconfigurá-la se a estabilidade estiver ameaçada. Neste âmbito, existem alguns projectos de contagem remota ou telecontagem - *automated meter reading* (AMR) - que enviam ao distribuidor informação dos consumos dos clientes. Uma massificação desta ferramenta permitiria ao distribuidor ajustar a sua capacidade, contudo, continuaria a privá-lo de uma intervenção do lado da procura, no sentido de agir junto do consumidor ou persuadi-lo a agir, por exemplo, por via de uma flexibilização de tarifas [10]. Existem vários níveis de implementação de tais estratégias, com diferentes exigências técnicas e operacionais. Se, por um lado, programas sazonais ou por períodos do dia (tarifários bi-horário, tri-horário) podem ser concebidos através de dados estatísticos e com antecedência, uma estratégia de tarifação em tempo real (*real-time pricing* - RTP) implica uma notificação das tarifas no dia anterior ou mesmo durante o dia da procura, para que os consumidores possam adaptar o seu comportamento em conformidade [11]. A existência de regimes tarifários adaptados quer às especificidades das smart grids, quer às necessidades dos consumidores finais introduz benefícios económicos evidentes. O conceito por detrás da elaboração dos sistemas tarifários tem por base indicadores dos custos de produção, que são desta forma transmitidos aos consumidores. Espera-se assim que estes possam deslocar pelo menos alguma da sua procura dos períodos de pico para os de vazio, contribuindo para o alisamento do diagrama de carga [12].

O interface entre a rede e o consumidor, com as funcionalidades descritas no parágrafo anterior, é materializado por um contador inteligente - *smart meter* - que poderá, além da comunicação bidireccional supracitada, incluir outras funções de interface com o cliente, por exemplo, ligado a um computador pessoal, o próprio cliente ou um prestador de serviços poderão analisar os dados do consumo, que lhe permitirão usar a electricidade de forma mais eficiente. Ademais, poderá constituir uma *gateway* para comandar outros sistemas de automação doméstica, quer por iniciativa do próprio cliente, quer por indicação da rede, em situações onde uma deslocação da carga seja desejável. Um exemplo clássico é o controlo da climatização, que pode ser fornecido através de um termostato inteligente ou um interruptor inteligente que respondam a definições do utilizador (ex. desligar quando ninguém está em casa), do tempo (ex. desligar em tardes de Verão) ou da informação de preços (ex. desligar quando os preços forem altos, isto num programa de gestão da procura) [13] [14].

A nível doméstico, a introdução de inteligência no domínio da gestão da energia depende da automação de certas operações, como o aquecimento ou a iluminação. Aplicações deste género já existem, importa, contudo, garantir a sua compatibilidade em termos de protocolos de comunicação com vista à criação de verdadeiras redes domésticas, com um ponto de controlo central - um servidor ou *gateway* - que, ligado ao contador inteligente, possa trocar com ele informações. É ainda possível com esta tecnologia saber quanto é que cada aparelho está a consumir a cada instante [15]. Assim exista uma estrutura de memorização e esta medida poderá servir para sinalizar situações de pré-manutenção, caso o consumo se desvie muito do habitual [5]. Esta rede doméstica pode ainda estar ligada ao exterior por IP, para que a monitorização e controlo possam ser acessíveis através de qualquer terminal com acesso à internet.

A introdução deste tipo de contadores em todos os estados membros da União Europeia está contemplada na directiva 2009/72/CE a respeito das regras comuns para o mercado da electricidade. Segundo esta, se a introdução dos contadores inteligentes for avaliada favoravelmente, pelo menos 80% dos consumidores devem estar equipados com estes dispositivos até 2020.

Todas estas possibilidades e alguns obstáculos previsíveis são sintetizados na Tabela 2 (estes dizem respeito à realidade alemã, pelo que podem diferir nalguns aspectos da realidade portuguesa):

Tabela 2 - Evolução perspectivada e obstáculos previsíveis em cada nível da rede eléctrica, retirada de [3]

|                                  | Rede actual                                 | Rede inteligente   | Obstáculos   |
|----------------------------------|---|--|--|
| Produção                         | Centrais de produção de grande escala       | Centrais de produção distribuídas e de pequena escala, maioritariamente renováveis<br><br>Centrais virtuais, ligadas por TIC | Inexistência de recompensa para injeção “amiga da rede”<br><br>Elevada fasquia (15 MW) para participar no mercado da potência de reserva |
| Transporte e potência de reserva | Potência terciária requisitada por telefone | Balaceamento internacional de fluxos de energia  | Actual regulação de incentivos pode entrar investimentos em redes inteligentes   |

|                         |  |   |   |
|-------------------------|--|---|---|
| Distribuição            | Injecção segue a procura<br><br>Rede de distribuição é uma “caixa negra” | Procura ajusta-se ao estado de produção<br><br>Melhor conhecimento do estado da rede e potencial localização de energia de baixa qualidade      | Actual regulação de incentivos pode entravar investimentos em redes inteligentes<br><br>Operadores da rede não interessados em promover a tecnologia devido à divisão de incentivos |
| Contadores inteligentes | Contadores não comunicativos   | Comunicação bidireccional<br><br>Permite um leque de novas actividades<br><br>Poupança de energia<br><br><i>Gateway</i> para casas inteligentes | Conhecimento insuficiente ou falta de meios financeiros dos consumidores para as nossas possibilidades via TIC<br><br>Falta de standardização e interoperabilidade                  |
| Casa inteligente        | Controlo manual de equipamentos de aquecimento                           | Controlo inteligente de aquecimento e outros dispositivos   | Conhecimento insuficiente ou falta de meios financeiros dos consumidores para as nossas possibilidades via TIC  |
| Sistema global          | Sem fluxo contínuo de informação da produção para o consumo              | Fluxo contínuo de informação da produção para o consumo<br><br>Acesso permanente a informação relevante   | Inexistência de padrões comuns<br><br>Protecção de dados tem que ser garantida  |

Se a nível da produção tais investimentos implicam um compromisso estatal, que pode não ser tão célere e profundo quanto seria desejável, a nível da distribuição e comercialização têm surgido alguns programas e produtos de monitorização e controlo de consumos, um pouco por todo o mundo.

Nos EUA, por exemplo, a Austin Energy, uma das maiores companhias de serviço de electricidade, começou por instalar 260 000 *smart meters* em clientes domésticos, a *Center-point Energy* terá instalado 2 milhões até ao fim do ano. No cômputo geral, a penetração destes dispositivos nos EUA, que era de cerca de 6% em 2008, espera-se que chegue aos 89% em 2012 [16].

Na Itália, a Enel, o terceiro maior fornecedor de energia na Europa, lançou a instalação de 27 milhões de *smart meters*, o que faz deste o maior projecto do género até ao momento [17].

Há também projectos assinaláveis no Canadá, na Coreia, na Austrália, na Holanda. Em Portugal, estão em curso o Smart Galp (algo incipiente) e o InovGrid da EDP.

Este último visa implementar sensivelmente todas as linhas de acção das smart grids anteriormente descritas, com os vectores “Redes de Energia + Inteligentes”, “Cidades + Inteligentes”, “Microprodução + Inteligente”, “Casas + Inteligentes” e “Mobilidade + Inteligente”. O primeiro equipamento “inteligente” foi instalado num posto de transformação da Rua Camilo Castelo Branco, em Lisboa. Trata-se de um *Distribution Transformer Controller* - DTC - que é responsável pela comunicação com os *smart meters*, controlo da iluminação pública, análise da qualidade da energia e dos níveis de carga, sensorização do posto de transformação e funcionalidades de automação (*smart automation*). Contudo, o projecto-piloto com mais substância foi instalado em Évora em Abril de 2010 - o InovCity (que já está a ser replicado na cidade de Aparecida, em São Paulo, no Brasil). Numa primeira fase, o projecto consistiu em substituir mais de 30 mil contadores tradicionais de energia eléctrica pelos seus novos *smart meters* - edp Boxes - em clientes de baixa tensão (domésticos, pequeno comércio e indústria), abrangendo todo o concelho de Évora. O objectivo é cobrir a totalidade dos 6 milhões de clientes nacionais até 2017 [1]. Estes equipamentos são certificados segundo a norma europeia EC Directive 2004/22/EC, referente a instrumentos de contagem de energia, atestado do seu grau de precisão e fiabilidade. Para além de contarem e comunicarem a energia consumida, podem também contar a energia produzida (aquela que é vendida à rede) e estão dotados da tecnologia necessária para aceder a serviços de telegestão, podendo [18]:

- aceder à informação sobre o consumo, o que permitirá corrigir hábitos menos eficientes e em consequência reduzir a factura de electricidade;
- conhecer as horas do dia de maior consumo, e aquelas em que pode usar a electricidade a um preço mais favorável, passando a conseguir programar os electrodomésticos para funcionarem nesses períodos;
- activar remotamente serviços, como alterações tarifárias e de potência contratada e saber que a EDP Distribuição detecta avarias eléctricas na alimentação a cada ponto de consumo de forma automática.

Em instalações onde exista microgeração, as edp Boxes darão suporte à gestão e controlo da mesma, em função das cargas domésticas e da vizinhança, neste caso, por orientação do DTC [1].

Como se diz em [1], as edp Boxes são “a “face visível” da implementação das Smart Grids para os consumidores, sendo uma peça fundamental para a aceitação e entendimento do real valor das redes inteligentes para os clientes”.

Para perceber a sensibilização do público em geral, foi efectuado um estudo [14] nos EUA sobre a concordância com as convicções das principais potencialidades, de que se apresenta um excerto na Tabela 3.

Tabela 3 - Estudo sobre as convicções quando aos *smart meters*

| Convicção de que os <i>smart meters</i> podem...                  | Concordância (%) com a convicção |          |                           |          |                     |
|---|----------------------------------|----------|---------------------------|----------|---------------------|
|   | Discorda totalmente              | Discorda | Nem concorda nem discorda | Concorda | Concorda totalmente |
| Permitir verificar a exactidão da factura da electricidade        | -                                | 5,0      | 24,0                      | 39,7     | 31,4                |
| Poupar dinheiro   | 2,5                              | 3,3      | 36,1                      | 34,4     | 23,8                |
| Indicar quanta electricidade cada um dos equipamentos está a usar | 3,3                              | 18,3     | 25,0                      | 36,7     | 16,7                |
| Reduzir o risco de apagões  | 10,7                             | 13,1     | 36,1                      | 18,9     | 21,3                |
| Controlar o aquecimento central                                   | 9,9                              | 19,8     | 26,5                      | 28,9     | 14,9                |
| Permitir à companhia controlar o uso da electricidade             | 17,5                             | 28,3     | 27,5                      | 18,3     | 8,3                 |
| Custar caro   | 12,4                             | 26,5     | 47,9                      | 11,6     | 1,7                 |
| Violar a privacidade  | 14,9                             | 27,3     | 41,3                      | 13,2     | 3,3                 |

Verifica-se, então, que a maioria da população já está bem consciente das vantagens em termos de facturação, e não tem reservas significativas quanto às desvantagens como o custo inicial ou a eventual violação de privacidade. Parecem reunidas, portanto, boas condições para a aceitação destes equipamentos.

## 2.2. Definições de grandezas eléctricas

Tendo em vista que a grandeza fundamental para determinar energia é a potência, integrada no tempo, importa abordar as definições de potência. Trata-se de uma matéria em que as definições se sucederam ao longo do último século, nomeadamente no que diz respeito a ambientes não sinusoidais, sendo que cada nova definição proposta soluciona alguns problemas, mas introduz novas inconsistências. No processo têm sido usadas duas análises distintas: no domínio da frequência (com as potências definidas em termos das componentes harmónicas das ondas de tensão e corrente) e no domínio do tempo (baseada na decomposição da corrente em activa e residual) [19].

### 2.2.1. Ambientes sinusoidais

Nestes, onde os sinais da corrente e da tensão se encontram simplesmente desfasados entre si, pode definir-se a potência instantânea como [20] [19]:

$$p = u \cdot i \text{ [W]} \quad (2.1)$$

Onde  $u$  é a tensão instantânea e  $i$  a corrente instantânea. Estabelecem-se como componentes da potência, a parte activa e a parte reactiva.

A potência activa,  $P$ , que representa a transferência de energia útil, define-se como o valor médio da potência instantânea num período de 0 a  $T$ , assim:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \, dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (2.2)$$

Onde  $u$  e  $i$  são sinais com período  $T$ ,  $U$  e  $I$  os seus valores eficazes, respectivamente, e  $\varphi$  o desfasamento entre a tensão e a corrente.

Quanto à potência reactiva,  $Q$ , definida como a potência associada ao fluxo oscilatório de energia entre a fonte e a carga, é então dada por:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ [VAR]} \quad (2.3)$$

Se a carga tiver uma característica indutiva,  $Q$  será positivo. Se for capacitiva,  $Q$  será negativa.

A potência aparente,  $S$ , definida como a potência máxima que se pode transferir, portanto, o produto entre a tensão e a corrente, pode também ser obtida pela soma vectorial das duas potências anteriores, que compõe o chamado triângulo das potências, dando:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} \quad (2.4)$$

Por fim, o factor de potência,  $FP$ , que traduz a razão entre a potência activa e a potência aparente e, assim, um factor de “aproveitamento” da potência disponível, é então dado por:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (2.5)$$

## 2.2.2. Ambientes não sinusoidais

### Definição de potência segundo C. Budeanu

A primeira definição globalmente aceite, desde a ANSI/IEEE à IEC [21], para estes ambientes foi dada por C. Budeanu em 1927 e, no contexto da análise no domínio da frequência, considera as potências anteriormente definidas como somatórios dos vários harmónicos que as compõem [19]. Assim:

$$P = \sum_n P_n = \sum_n U_n I_n \cos \varphi_n \quad (2.6)$$

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.7)$$

Onde  $U_n$  e  $I_n$  são os valores eficazes dos harmónicos de ordem  $n$  da tensão e da corrente, respectivamente, e  $\varphi_n$  o ângulo de desfasamento entre eles.

Assim, a potência aparente fica:

$$S = \sum_n U_n^2 \sum_n I_n^2 \quad (2.8)$$

Dado que estas expressões já não verificam a regra do triângulo das potências, surge então a necessidade de acrescentar uma nova componente da potência, que passará a compor não um triângulo, mas um tetraedro das potências, a que se chamou potência de distorção,  $D$ . O somatório das potências fica então [22]:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.9)$$

D é, então dada por:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.10)$$

### Definição de potência segundo S. Fryze

Ainda que não tenha sido adoptada à escala mundial, mas considerada pela IEC [21], a teoria proposta por S. Fryze em 1932 apresenta vários aspectos interessantes, uma vez que trata de uma decomposição no domínio do tempo, não exigindo a decomposição dos sinais nos seus harmónicos. É então proposta a decomposição da corrente total em duas componentes,  $i_a$ , que corresponde à parte activa da corrente e  $i_r$ , que corresponde à parte reactiva. Assim, tendo  $i_a$  a mesma forma de onda da tensão e sendo G a sua admitância e R a resistência da carga [22]:

$$i_a = G \cdot u = \frac{1}{R} \cdot u \quad (2.11)$$

A corrente restante, reactiva, é então:

$$i_r = i - i_a \quad (2.12)$$

Uma eliminação/compensação desta corrente levaria portanto o sistema a um factor de potência unitário.

Sendo estas componentes ortogonais, é possível exprimir para os valores eficazes:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 \quad (2.13)$$

Desta forma, multiplicando por  $U^2$ , também a potência aparente:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2.14)$$

Esta teoria, pelo aspecto de calcular a corrente activa directamente a partir da condutância (evitando análises em frequência) é vantajosa e, se o objectivo é quantificar o total de energia não activa (supérflua) satisfaz bem essa necessidade. Por outro lado, ao agrupar todos os “distúrbios” numa componente  $i_r$  (ou Q), não permite a análise isolada de cada tipo de fenómeno que para ela contribui, fosse o objectivo compensá-lo ou facturá-lo.

Numa investigação subsequente, N. L. Kusters e W. J. M. Moore, em 1980, viriam a expandir a definição anterior decompondo a corrente residual em duas componentes ortogonais, que variavam caso a natureza da carga fosse predominantemente indutiva ou capacitiva [19].

### Definição de potência segundo Shepherd e Zakikhani

De volta ao domínio da frequência, estes autores, em 1972, definiram [23] que, para uma carga com a corrente:

$$i = \sqrt{2} \sum_n I_n \cdot \cos(n\omega t - \beta_n) \quad (2.15)$$

Fornecida pela tensão:

$$v = \sqrt{2} \sum_n V_n \cdot \cos(n\omega t - \alpha_n) \quad (2.16)$$

A corrente é composta por duas componentes - a resistiva e a reactiva:

$$i_R = \sqrt{2} \sum_n I_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \cos(n\omega t - \alpha_n) \quad (2.17)$$

$$i_r = \sqrt{2} \sum_n I_n \cdot \sin \varphi_n \cdot \sin(n\omega t - \alpha_n) \quad (2.18)$$

Onde  $\varphi_n = \alpha_n - \beta_n$

Como aquelas são ortogonais, os seus valores eficazes satisfazem a relação:

$$I^2 = I_R^2 + I_r^2 \quad (2.19)$$

Multiplicando ambos os membros pelo quadrado do valor eficaz da tensão, tem-se para a potência aparente:

$$S^2 = S_R^2 + S_Q^2 \quad (2.20)$$

Esta solução apresenta-se propícia para uma intervenção do lado da potência reactiva, (pela colocação uma rede LC em paralelo com a carga), mas falha na apresentação de uma potência activa propriamente definida.

Sharon tentou eliminar esta inconveniência [23], separando da potência  $S_R$  uma grandeza que denominou de potência reactiva complementar, dada por:

$$S_C = \sqrt{S_R^2 - P^2} \quad (2.21)$$

Assim, ficando com:

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2 \quad (2.22)$$

### Definição de potência segundo L. S. Czarnecki

Em 1987, este autor assume-se abertamente contra a teoria de Budeanu. A sua motivação era focada numa decomposição dos sinais da corrente que fosse orientada, tanto quanto possível, pelos fenómenos físicos associados. Como se verá adiante, a sua proposta emprega valores de condutâncias (G), susceptâncias (B) e admitâncias (Y) [22] [24].

Então, tomando a definição de potência activa de Fryze,  $i_a$ , o conceito de corrente reactiva de Shepard e Zakikhani,  $i_r$ , introduz uma nova componente  $i_s$ , denominada de dispersa (*scattered*) [23]. Ou seja,

$$i = i_a + i_r + i_s \quad (2.23)$$

Tendo como tensão periódica da fonte (definida em termos de série de Fourier):

$$u = \text{Re}(\sum_n U_n e^{jn\omega_1 t}) \quad (2.24)$$

Onde  $n$  é a ordem do harmónico e  $\omega_1$  a frequência fundamental.

E como admitância da carga:

$$Y_n = G_n + jB_n \quad (2.25)$$

A corrente que percorre essa carga é:

$$i = \text{Re}(\sum_n U_n (G_n + jB_n) e^{jn\omega_1 t}) \quad (2.26)$$

Admitindo que toda a potência é absorvida pela condutância  $G_e$  e recordando a definição de Fryze [19]:

$$G_e = \frac{P}{U^2} \quad (2.27)$$

Considerando que esta carga vai ser alimentada por aquela tensão  $u$ , a corrente activa que a percorrerá será, portanto:

$$i_a = G_e u \quad (2.28)$$

Resta uma corrente residual:

$$i - i_a = \text{Re}(\sum_n U_n (G_n - G_e + jB_n) e^{jn\omega_1 t}) \quad (2.29)$$

Que pode ser dividida em duas outras componentes - dispersa,  $i_s$  (de *scattered*), e reactiva,  $i_r$ :

$$i_s = \text{Re}(\sum_n U_n(G_n - G_e)e^{jn\omega_1 t}) \quad (2.30)$$

$$i_r = \text{Re}(\sum_n U_n j B_n e^{jn\omega_1 t}) \quad (2.31)$$

Sendo todas estas componentes ortogonais, os seus valores eficazes podem ser relacionados:

$$I^2 = I_a^2 + I_s^2 + I_r^2 \quad (2.32)$$

Multiplicando pelo quadrado do valor eficaz da tensão,  $U^2$ , obtém-se para a tensão aparente:

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_r^2 \quad (2.33)$$

### **Definição de potência segundo a norma IEEE 1459-2000**

Esta norma faz uma síntese de vários dos contributos relatados e adiciona algumas perspectivas, nomeadamente recomendações sobre as expressões mais indicadas para empregar em instrumentação de medida, será dessas que se fará aqui compilação [25].

Consideram-se separadamente os harmónicos de ordem fundamental e de ordens superiores quer para a tensão, quer para a corrente:

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (2.34)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (2.35)$$

$$v_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (2.36)$$

$$i_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (2.37)$$

Os respectivos valores eficazes são então dados por:

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (2.38)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (2.39)$$

Sendo  $p$  a potência instantânea ( $v.i$ ), para a potência activa:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt \quad (2.40)$$

Potência reactiva de Budeanu:

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin \theta_n \quad (2.41)$$

Sendo  $\theta_n = \beta_n - \alpha_n$

Potência de distorção de Budeanu:

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \leftrightarrow D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (2.42)$$

Potência aparente:

$$S = V \cdot I \quad (2.43)$$

Factor de potência:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.44)$$

#### Definição de potência segundo a norma IEEE 1459-2010

Nas considerações iniciais, esta norma recupera as equações do anterior - 2.34 a 2.40. É nas definições seguintes que introduz algumas diferenças [26].

A potência reactiva fundamental:

$$Q_1 = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1 [f v_1] dt \quad (2.45)$$

A potência aparente:

$$S = V \cdot I \quad (2.46)$$

Este *standard* deixa de referir a potência reactiva de Budeanu e, naturalmente, também a sua potência de distorção. Define-se agora apenas uma potência não activa:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.47)$$

O factor de potência mantém-se inalterado:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.48)$$

Um dos investigadores pertencentes ao grupo de trabalho que elaborou a norma IEEE 1459-2010, Antonio Cataliotti, desenvolveu um conjunto de estudos com vista a fazer uma análise comparativa do desempenho de medidores de energia reactiva na presença de distorção harmónica.

Os medidores deste tipo de energia baseiam-se num de dois princípios: o desfasamento de 90° entre tensão e corrente (inspirado no medidor electromecânico de energia reactiva) e a decomposição matemática da potência aparente segundo o triângulo das potências (que o obriga à determinação da potência aparente, do ângulo de desfasamento e, finalmente, o cálculo de um seno ou então a determinação da potência activa para extrair aquela pelo teorema de Pitágoras). Observe-se que em condições sinusoidais estes princípios são equivalentes e levam aos mesmos resultados, contudo, com o aumento da poluição harmónica nos sistemas de potência, os medidores de energia são empregues mesmo na presença de tensões e correntes com distorção.

A análise teórica e dos resultados experimentais mostraram que a adopção destes medidores em vez dos tradicionais medidores electromecânicos pode conduzir a diferentes medidas nas mesmas condições de trabalho, com riscos para o cliente, se estiver num regime em que a sua energia reactiva seja taxada. A opinião do autor é que os fabricantes deveriam especificar sempre o princípio sobre o qual os seus medidores são construídos, para que o cliente e o fornecedor pudessem avaliar as características metrológicas de cada equipamento de medição de electricidade [27] [28].

### **2.3. Tecnologias de comunicação**

Um aspecto crítico de qualquer rede reside na forma como os participantes se interligam, na capacidade e mutualidade da linguagem utilizada. No caso particular das *smart grids*, no que à comunicação diz respeito, a maioria dos autores estabelece três níveis (alguns apenas dois), que dizem respeito à dimensão e natureza das sub-redes que as compõem. Assim, definem-se [2]:

- *Wide-Area Network* (WAN), indo da produção, pela transmissão, até à distribuição;
- *Local-Area Network* (LAN), entre os centros de distribuição e cada um dos pontos de entrega;

- *Home-Area Network* (HAN), como o nome indica, é uma rede ao nível doméstico entre os vários pontos de consumo ou produção e interfaces quer com a rede, quer com humanos, por exemplo, *displays*.

Neste subcapítulo dar-se-á particular atenção às possibilidades tecnológicas de comunicação ao nível das HAN, para onde se dirige a principal vocação deste trabalho.

Estas tecnologias podem ser classificadas em três grupos principais: normas sem-fios IEEE 802.x, *Ethernet* por cabo, e *in-building power line communications* [29].

As normas sem-fios IEEE incluem Wi-Fi (IEEE 802.11), WiMAX (IEEE 802.16), ZigBee (IEEE 802.15.4) e Bluetooth (IEEE 802.15.1). Com base em [29], a Tabela 4 faz uma comparação em termos de forças e fraquezas de todos estes, excluindo o WiMAX cujo âmbito (longo alcance) não se enquadra aqui.

Tabela 4 - Comparação entre normas sem-fios IEEE

| Norma IEEE                | Características  | Forças  | Fraquezas   |
|---------------------------|--|---|---|
| Wi-Fi<br>(IEEE 802.11)    | Ondas: 2.4 ou 5 GHz<br>Taxas: Até 54 Mbps (norma g, mais comum) ou 600 Mbps (norma n)<br>Alcance: até 200 m [30] | Fácil instalação<br>Custos em decréscimo  | Requer camadas adicionais de segurança  |
| ZigBee<br>(IEEE 802.15.4) | Onda: 2.4 GHz (global) e outras em particular<br>Taxa: 250 Kbps<br>Alcance: de 10 a 100 m [31]                   | Baixos requisitos de potência<br>Baixos custos de instalação<br>Boa escalabilidade (podem ser conectados muitos dispositivos)<br>Particularmente concebido para automação doméstica e industrial <sup>1</sup> | Alcance limitado<br>Taxas de dados relativamente baixas (ainda que provavelmente suficientes nestes casos)<br>Possivelmente mais seguro que outros <i>standards</i> |

---

<sup>1</sup> Possui inclusivamente uma linha de produtos indicada para as aplicações em estudo, Smart Energy

|                                      |  |   |  |
|--------------------------------------|--|---|--|
| <p>Bluetooth<br/>(IEEE 802.15.1)</p> | <p>Ondas: 2.4 GHz<br/>Taxas: 1, 2 ou 3 Mbps<br/>Alcance: varia muito com a classe (1, 10 ou 100 m), mais comum é 10 m [32]</p> | <p>Mais maduro que o ZigBee<br/>Muitos produtos já disponíveis<br/>Permite taxas de dados mais altas que o ZigBee</p> | <p>Até ao momento, a maioria do equipamento não tem Bluetooth implementado<br/>Limite máximo de dispositivos numa rede<br/>Vulnerabilidades de segurança</p> |
|--------------------------------------|--|---|--|

Quanto à *Ethernet* por cabo, é uma tecnologia madura e dominante. Devido ao seu uso alargado, tem um importante suporte de mercado, existem múltiplos produtos e os custos são relativamente baixos [29]. Tem como desvantagem exigir um suporte físico próprio.

No campo das *in-building power line communications*, ou somente PLC, que consistem na transmissão de dados num condutor já em uso para condução de electricidade, existe uma grande flexibilidade na relação taxa de dados/alcance. Por este motivo existem produtos que vão de dezenas de KHz/quilómetros (sobre IEEE 1901.2, indicados para aplicações para o exterior, ao nível da LAN) a MHz/metros (por IEEE 1901) [33], com taxas de transferência de dados na ordem dos Mbps, onde tomam frequentemente a denominação de BPL (*broadband over power line*). Estas são, naturalmente, as mais apropriadas para as aplicações domésticas em análise.

As duas tecnologias mais dominantes são a HomePlug (que reclama dominar 80% do mercado) e a X10. A primeira, mais recente, provém de uma aliança empresarial patrocinada pela Cisco, a GE, a Intel, a Motorola e a Texas Instruments, entre outras, e fornece equipamentos capazes de oferecer taxas de transferência de dados na ordem das dezenas às centenas de Mbps, pelo que tem aplicação inclusivamente para transmitir vídeo em alta definição. No entanto, no âmbito deste trabalho, enquadra-se uma linha de produtos sob a insígnia “Green”, com reduzidos consumos energéticos (cerca de 75% abaixo dos anteriores), com velocidades de transferência mais baixas, ainda assim com oferta de funcionalidades avançadas de monitorização e programação de actividades [33].

No sentido de alcançar ainda maior universalidade e daí colher sinergias, a HomePlug e a ZigBee já trabalhavam conjuntamente com o objectivo de desenvolverem uma linguagem comum para dispositivos nas HAN. A essa união juntou-se o Electric Power Research Institute, que acredita poder contribuir para esse esforço pois “usando o seu modelo colaborativo, tem a capacidade de trazer múltiplas perspectivas do exterior da aliança para criar um consenso mais alargado para estabelecer *standards*” [34].

Quanto ao X10, data do fim dos anos 70, e assenta na transmissão de dados a 120 kHz, à velocidade de 50 bps (na Europa). Dado a patente ter expirado, é hoje um protocolo aberto,

sendo várias as empresas que comercializam produtos baseados nesta tecnologia. A enorme variedade de módulos e interfaces X10, a utilização da rede eléctrica existente como meio de transmissão, os preços baixos e a facilidade na instalação (a maior parte dos módulos são *Plug&Play*) contribuíram para o rápido sucesso do X10 nos EUA e Europa [35].

Com aplicação em todas as categorias inicialmente estabelecidas e ainda em infravermelhos e em cabo torçado, existe ainda o protocolo KNX, que é o sucessor e a convergência de três *standards* anteriores: o *European Home Systems Protocol* (EHS), o *BatiBUS* e o *European Installation Bus* (EIB). Dependendo do meio de suporte, possui diferentes taxas de transmissão de dados, que podem ser de 9600 bps em cabo torçado, 1200 bps em PLC, 16384 kbps em RF ou ainda por IP, aí dependendo apenas da velocidade desta ligação. Trata-se de um protocolo com certificado de nível global (ISO/IEC 14543-3), mas também particulares na Europa, EUA e China e é subscrito por mais de 200 membros, entre os quais ABB, Bosch, Legrand, Philips, Schneider, Siemens, Toshiba, etc [36].

## Capítulo 3

### 3. Equipamento de suporte

#### 3.1. Conceito

Dentro do espírito de modularidade inicialmente referido, com o desejo claro de versatilidade e expansibilidade, o equipamento que servirá de suporte a este trabalho foi constituído por vários módulos, cada um deles com funções distintas, por agora tomam-se: alimentação, medida, comunicação (USB). Para este último utilizou-se uma solução comercial, um conversor USB-UART produzido pela Prolific PL-2303HX. O conjunto encontra-se na Fig. 3.1.

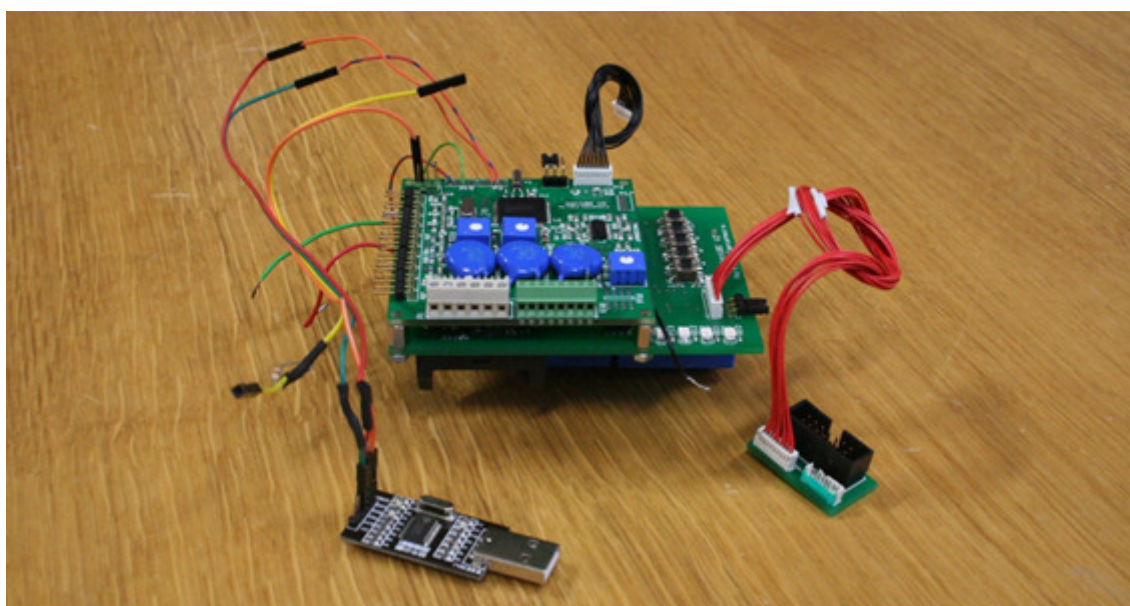


Fig. 3.1 - Conjunto de módulos

A fim de assegurar a integração entre eles, tem que existir um barramento comum, pelo qual, além da alimentação permita também a implementação de um protocolo de comunicação, que deve ser simples e não possuir limitações relativamente à introdução de novos módulos. A solução escolhida foi o protocolo I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*), por ser aquele que necessita menos linhas, dispensando uma linha de *chip select*, como é habitual no sistema SPI (*Serial peripheral interface*).

Neste protocolo, apenas duas linhas, *serial data* (SDA) e *serial clock* (SCL), transportam a informação entre os dispositivos ligados ao barramento. Cada dispositivo é reconhecido por um endereço único (quer seja um microcontrolador, um driver de LCD, uma memória, etc.), e consegue operar quer como transmissor quer como receptor, dependendo da função que lhe foi atribuída. Para além de transmissores e receptores, os dispositivos podem ainda ser considerados como *masters* ou *slaves*, quando procedem à transferências de dados entre si. O *master* é o dispositivo que inicia a transferência de dados no barramento e gera os sinais de *clock* que permitem essa transferência. Nesse instante, qualquer dispositivo endereçado é considerado um *slave*. Terminada a troca de dados, cabe também ao *master* o envio da sequência de paragem [37]. Este protocolo ilustra-se na Fig. 3.2.

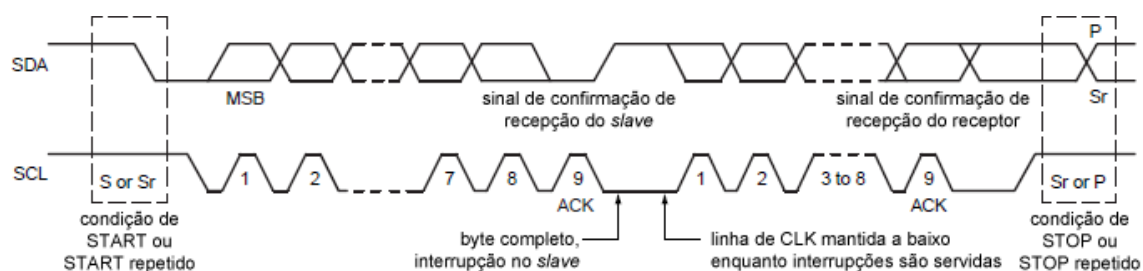


Fig. 3.2 - Representação do protocolo I<sup>2</sup>C

### 3.2. Módulo de alimentação (FA)

Este módulo é responsável, como o nome indica, pela alimentação do conjunto, que, como se verá nos módulos seguintes, pode requerer as tensões de 3.3 V, 5 V e +/-15 V. Por seu turno, aquele pode ser alimentado a partir de duas fontes: rede eléctrica - monofásica (230 V) ou trifásica composta (400 V) - ou bateria (6 V). Esta segunda não permite, contudo, a produção das tensões de +/-15 V, que são requeridas pelo módulo de medida, mais propriamente para a função de medida de corrente. De resto, todas as outras funções se mantêm, pelo que o módulo poderá continuar a medir a tensão ou seguir outro qualquer procedimento que lhe seja atribuído através da programação adequada.

O módulo em questão, e cada um dos blocos funcionais e principais componentes encontram-se retratados nas Fig. 3.3 e 3.4.

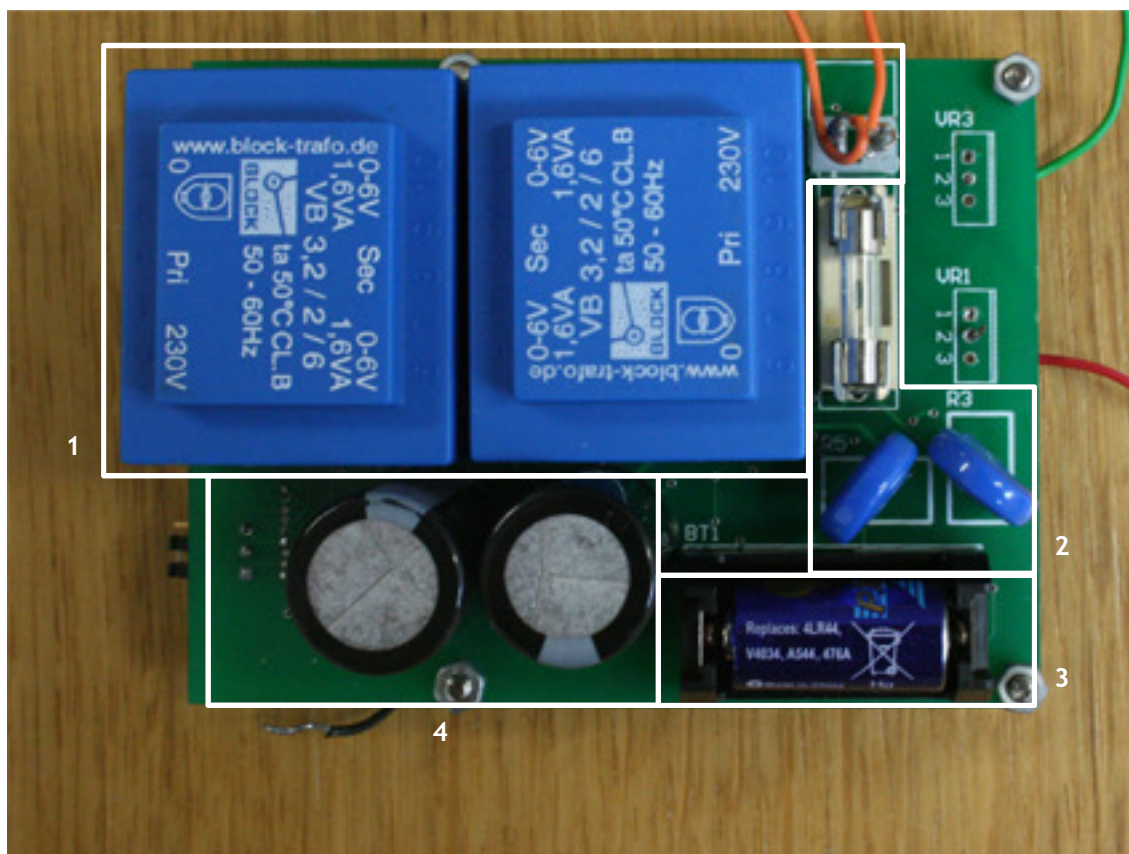


Fig. 3.3 - Módulo FA, perspectiva de baixo

**Legenda:** 1 - Bloco de entrada da rede e abaixamento da tensão, 2 - Bloco de protecção (fusível e varistores), 3 - Bateria, 4 - Condensadores de alisamento

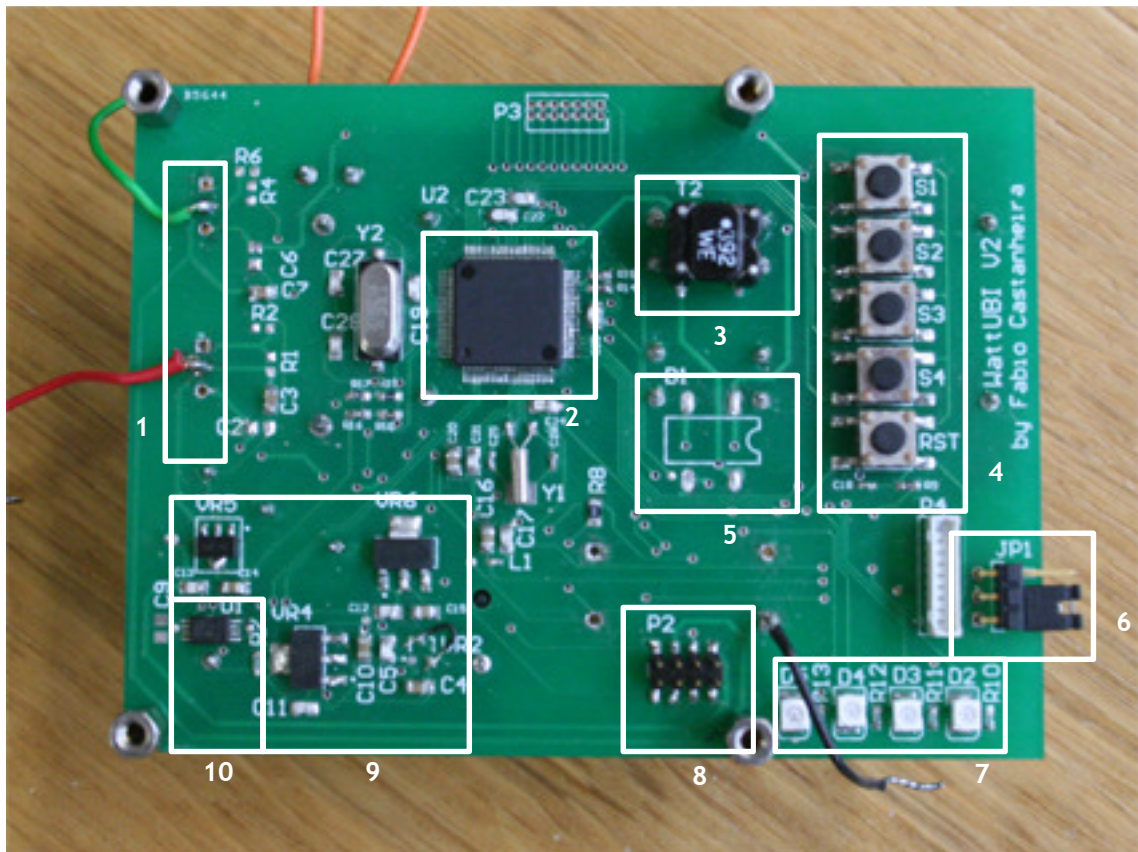


Fig. 3.4 - Módulo FA, perspectiva de cima

**Legenda:** 1 - Reguladores para +/- 15 V, 2 - Microcontrolador, 3 - Filtro rede/regulação, 4 - Botões de pressão, 5 - Ponte rectificadora, 6 - Selector de alimentação da CPU, 7 - LED, 8 - Barramento comum, 9 - Reguladores para 3,3 e 5 V, 10 - Gestor de energia do barramento

Na imagem é possível constatar a ausência do componente 4, que seria a ponte rectificadora, e o acréscimo de dois fios à esquerda e um em baixo (para ligação directa de +/- 15 V e massa, respectivamente), devido a algumas falhas de projecto que se descrevem no capítulo “Considerações finais”.

A orgânica do módulo pode então resumir-se conforme a Fig. 3.5.

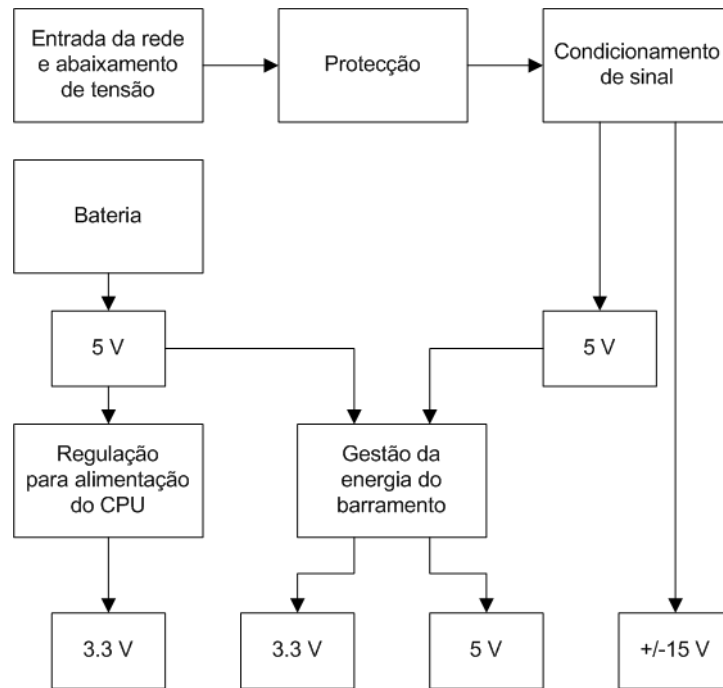


Fig. 3.5 - Diagrama representativo da orgânica da fonte de alimentação

Passaremos, então, a descrever cada um dos blocos em detalhe. Começando pelo bloco de entrada da rede e abaixamento de tensão, cujo circuito se mostra na Fig. 3.6.

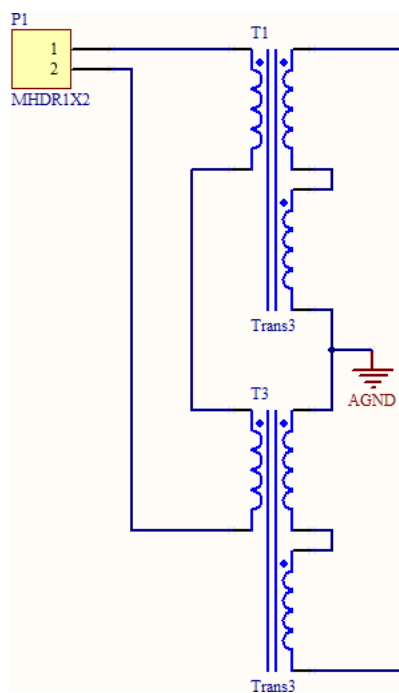


Fig. 3.6 - Subcircuito de entrada da rede e abaixamento de tensão

Os transformadores T1 e T3, com a relação de transformação 230:6 (x2), ligados em série, são responsáveis pelo abaixamento da tensão da rede, no máximo, de 460 para 24 V.

O bloco de protecção é composto por um filtro com a função de impedir a passagem de ruído da rede para o circuito e vice-versa, um fusível e dois varistores em montagem de modo comum, com a finalidade de proteger o circuito contra sobretensões, na medida em que, estando dimensionados para uma determinada tensão, se o valor da mesma for superior (na ocorrência de um fenómeno de sobretensão, por exemplo), fazem com que esse excedente seja dissipado sobre a forma de calor e mantendo a tensão a jusante estável. Este bloco representa-se na Fig. 3.7.

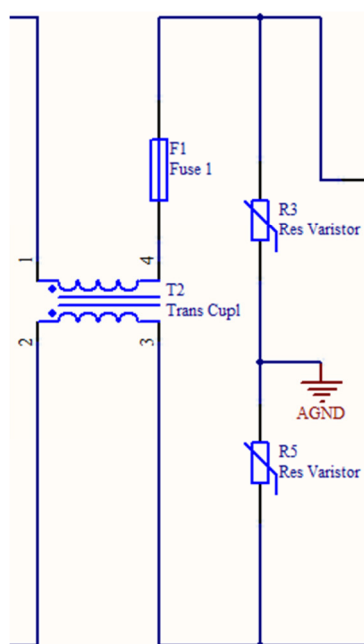


Fig. 3.7 - Subcircuito de protecção

O bloco de regulação da tensão pode dizer-se, na perspectiva do desenho do circuito, composto por duas secções: rectificação e regulação para +/-15 V, e regulação de 15 para 5 V, conforme a Fig. 3.8.

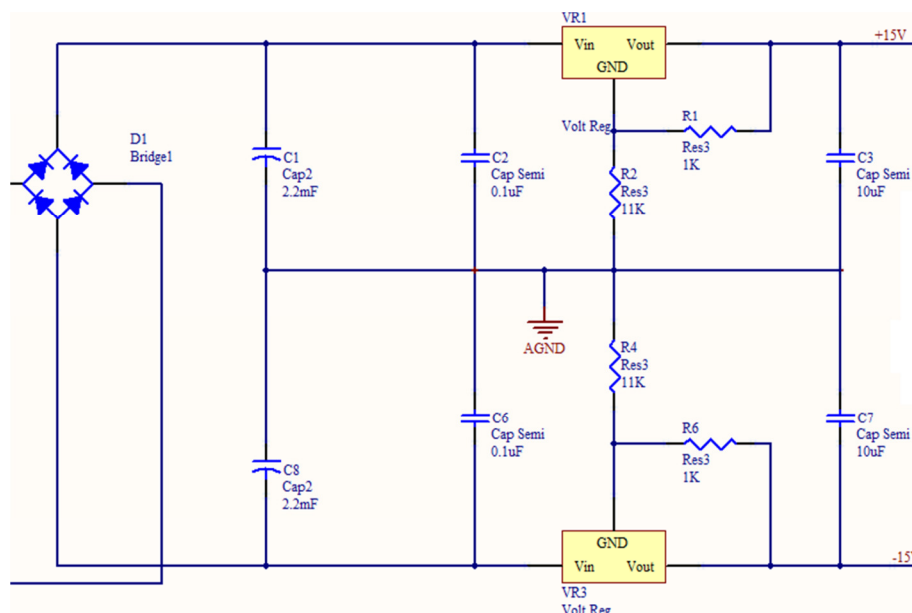


Fig. 3.8 - Subcircuito de regulação de tensão +15V e -15V (parte 1)

Nesta secção encontra-se a ponte rectificadora e os respectivos condensadores de alisamento, seguindo-se dois reguladores de tensão, cuja malha resistiva da vizinhança os configura, respectivamente, para produzirem à saída +/-15 V.

Segue-se, como foi dito, a regulação de 15 para 5 V, na Fig. 3.9.

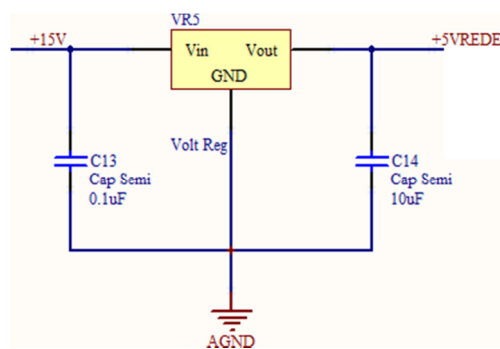


Fig. 3.9 - Subcircuito de regulação de tensão de +15V para +5V (parte 2)

Paralelamente, da parte da bateria, é realizada uma regulação com dois fins distintos, mostrados nas Fig. 3.10 e 3.11.

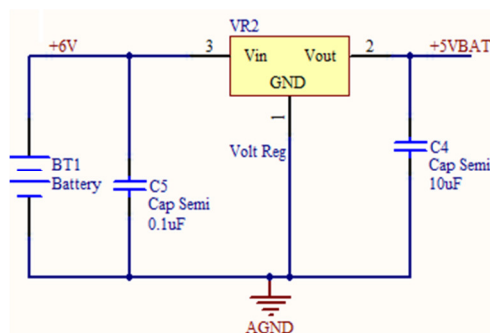


Fig. 3.10 - Subcircuito de regulação da tensão +6V da bateria para +5V (nível 1)

A regulação de 5 V apresenta-se como uma fonte alternativa de alimentação para o gestor de energia do barramento.

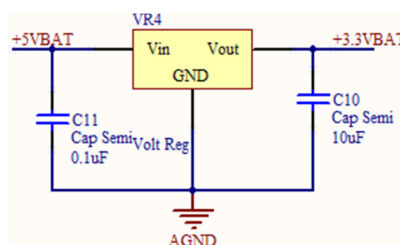


Fig. 3.11 - Subcircuito de regulação da tensão da bateria de +5V para +3,3V (nível 2)

E a subsequente regulação dos 5 V atrás produzidos para 3.3 V, para uso exclusivo da alimentação da CPU deste módulo.

Relativamente à gestão de energia do barramento, representa-se na Fig. 3.12.

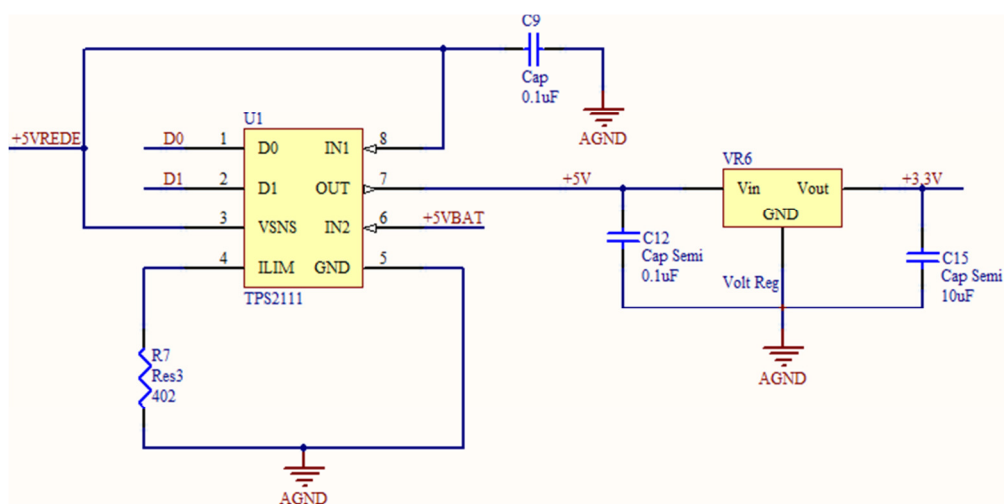


Fig. 3.12 - Subcircuito de gestão de energia do barramento

Esta assenta num *power distribution switch* ou *power mux*, o TPS2111, que, tomando os 5 V provenientes quer da regulação da rede eléctrica, quer da bateria, se a primeira falhar, permite fazer a comutação daquela (preferencial) para a segunda, ligando-a à saída.

Esta saída é, ainda, regulada para 3.3 V. Desta forma, as alimentações de 5 e 3.3 V passadas ao barramento mantêm-se sem interrupção num cenário de falha da rede.

Este módulo inclui ainda, como foi referido, uma CPU que possui em seu redor duas montagens divisoras de tensão, com o objectivo de reduzir os valores disponíveis de alimentação pela rede e pela bateria, para que possam ser adquiridos pelos seus ADC. Estão ainda presentes quatro LED e cinco botões de pressão (sendo um de *reset*). A gestão destas funcionalidades, que assim se disponibilizam, podem ser úteis para implementar funcionalidades de interface, quer com os outros módulos, quer com o utilizador.

### 3.3. Módulo de medida (MCU)

Este módulo é, então, o responsável pela aquisição das grandezas analógicas - tensão e corrente - em que se baseia este projecto. Retrata-se na Fig. 3.13.

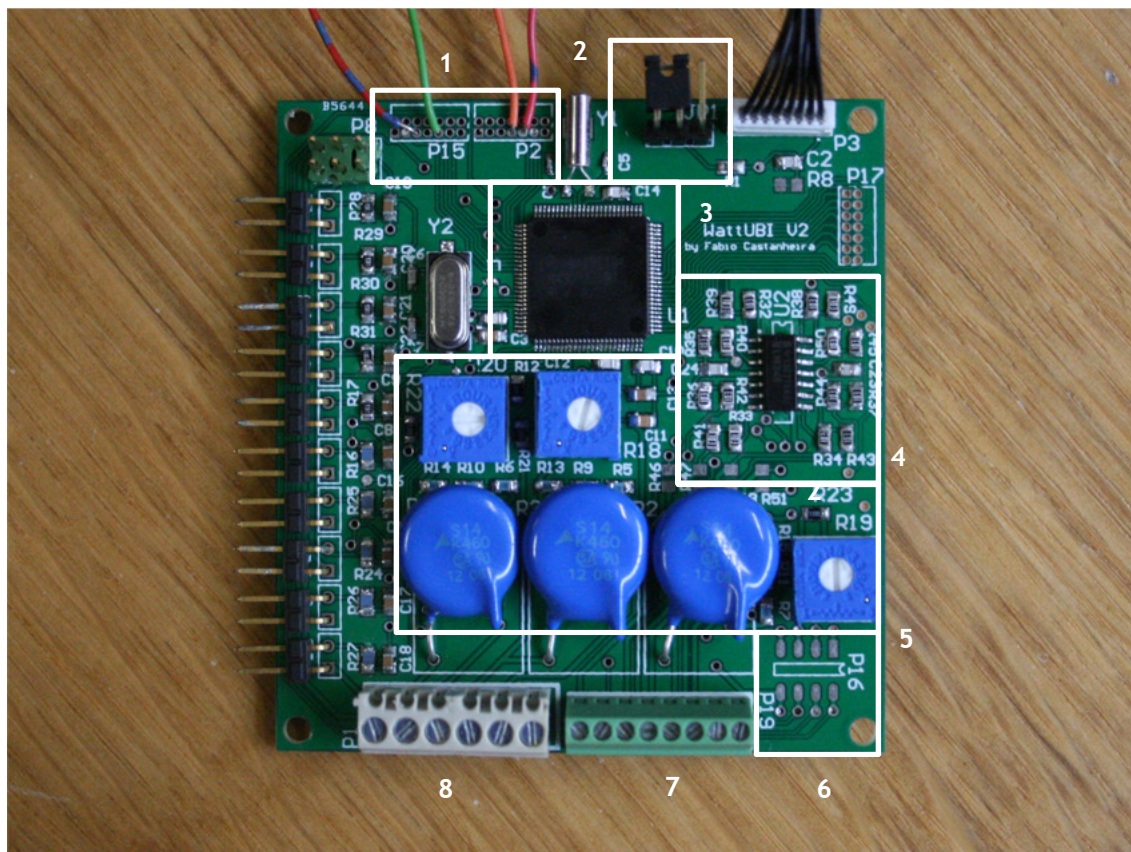


Fig. 3.13 - Módulo MCU, com acréscimo de cabos para comunicações UART (à esquerda)

**Legenda:** 1 - Ligações para UART (fizeram-se duas, mas só foi usada uma), 2 - Selector de alimentação, 3 - Microcontrolador, 4- Malhas de aquisição de correntes (com *ampop* no meio), 5 - Divisores dos sinais de tensão, 6 - Barramento comum, 7 - Bloco de terminais para sinais de corrente, 8 - Bloco de terminais para sinais de tensão

A estrutura deste módulo pode ser representada pelo diagrama na Fig. 3.14.

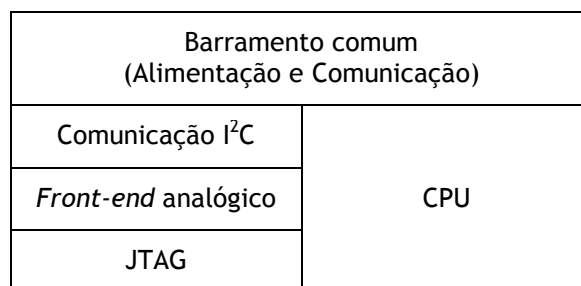


Fig. 3. 14 - Diagrama representativo da orgânica do módulo de medida

No bloco de *front-end* analógico é realizado o condicionamento dos sinais a adquirir, de modo a torna-los compatíveis com os níveis admitidos pelos ADC.

Em relação aos sinais de tensão, que podem ir até 400 V, será necessário atenuar os sinais para +/- 500 mV (sendo que os ADC suportam até +/- 600 mV), a solução utilizada foi um divisor de tensão resistivo. Contudo, dado que os valores reais das impedâncias podem apresentar alguns desvios relativamente aos valores nominais, utilizaram-se potenciômetros para que se possa proceder ao ajuste dos divisores de tensão de modo rigoroso, como se vê na Fig. 3.15.

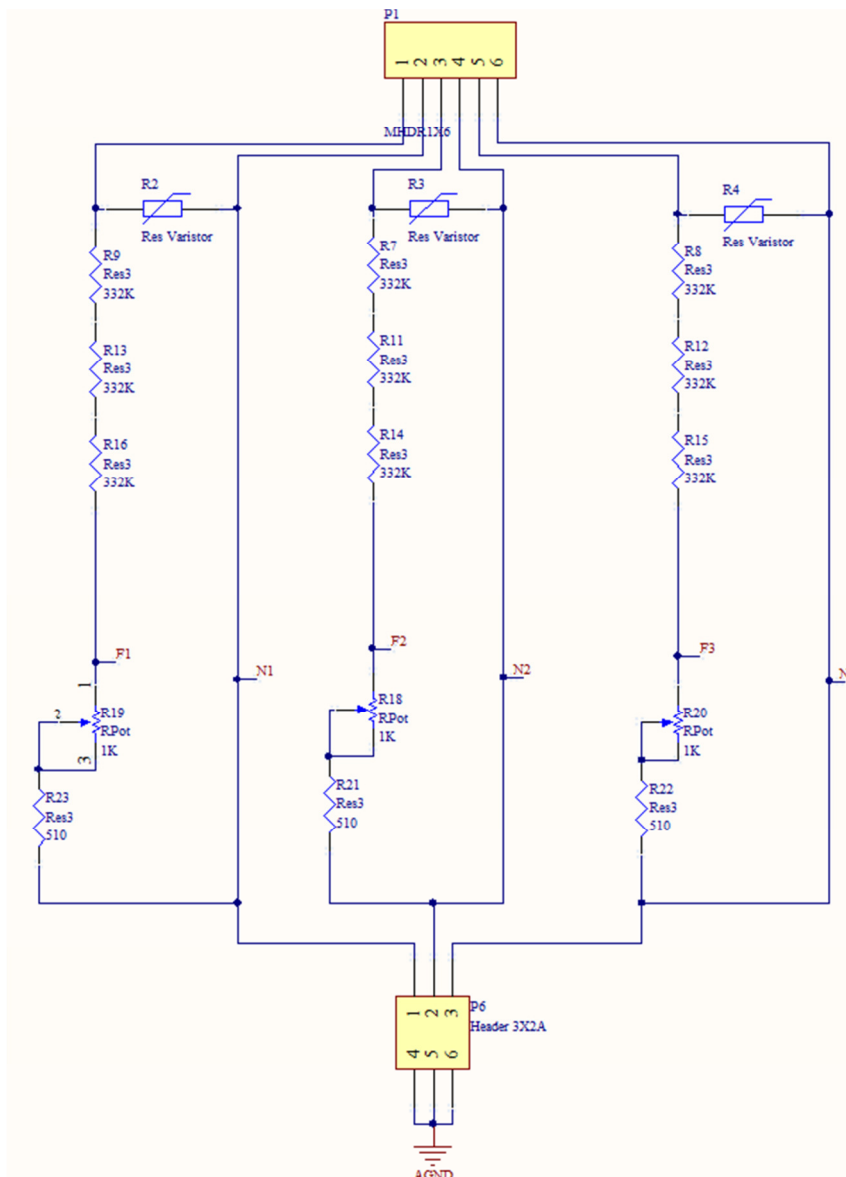


Fig. 3.15 - Divisores das entradas de tensão

Tendo em conta estes divisores de tensão, o factor de escala da tensão fica então:

$$F_u = \frac{1510}{1510+996000} \quad (3.1)$$

Entrando com o factor aplicado nos ADC, considerando a sua resolução e gama de valores aceites (para a configuração com referência própria de 1,2 V), o factor passa a ser:

$$F_u = \frac{1510}{1510+996000} * \frac{32767}{0,600} \quad (3.2)$$

Para a situação de um sistema trifásico equilibrado, foi colocado um *jumper* triplo que permite colocar os três neutros ao mesmo potencial, evitando assim a determinação de cada um deles.

A obtenção dos sinais de corrente passa necessariamente pela sua tradução para sinais de tensão, na medida em que estes são os únicos que o microcontrolador adquire. Assim, em cada canal faz-se passar a corrente por uma resistência (calculada para a corrente máxima de 0,125 A, o que torna necessária a utilização de um transformador de intensidade em situações reais) e adquire-se a queda de tensão nessa mesma resistência através de um *ampop* em montagem seguidora (ganho unitário). Este circuito apresenta-se na Fig. 3.16.

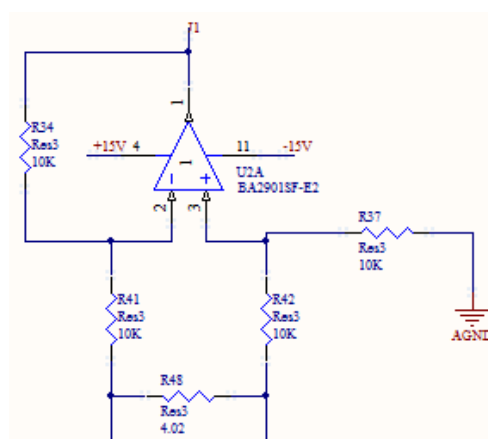


Fig. 3.16 - Um dos circuitos de produção de sinal da corrente

A expressão do factor de escala aplicado aos sinais de corrente, aplicando já o factor relativo à notação do ADC, é então:

$$F_i = 4,02 * \frac{32767}{0,600} \quad (3.3)$$

Por fim, todos estes sinais obtidos (tensões e correntes) passam por um filtro RC passa-baixo, a fim de remover sinais indesejáveis de alta frequência.

Quanto à CPU, consiste num microcontrolador Texas Instruments MSP430F47197, cujo diagrama funcional se apresenta na Fig. 3.17.

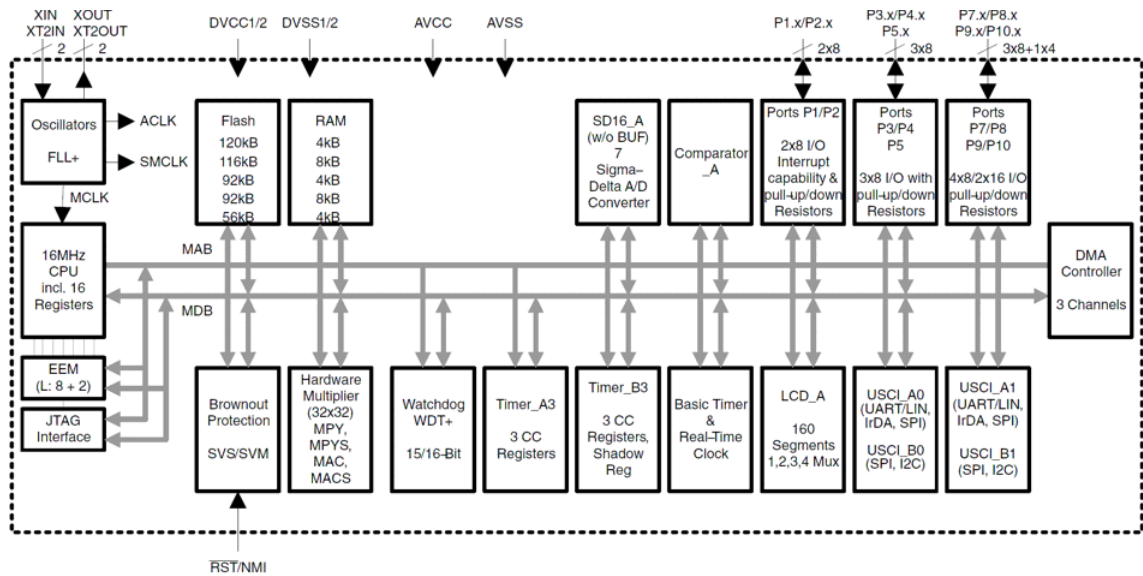


Fig. 3.17 - Organização interna do microcontrolador MSP430F47197

Este microcontrolador foi seleccionado por possuir sete conversores analógico-digital do tipo *sigma-delta* de 16 bits. A estrutura destes conversores é aproximadamente três quartos digital, e um quarto analógico. São ideais para converter sinais analógicos ao longo de um vasto espectro de frequências, de DC a vários MHz. Basicamente, estes conversores consistem num modulador com sobre-amostragem seguido de um filtro digital e de decimação, que juntos produzem uma saída de dados de alta resolução, como se mostra na Fig. 3.18.

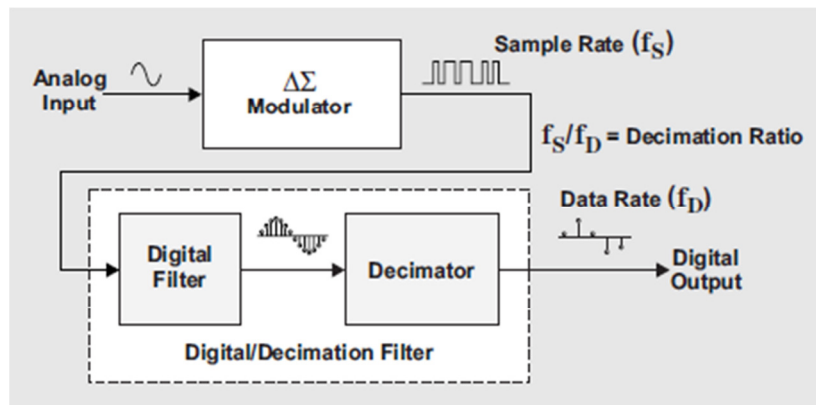


Fig. 3.18 - Diagrama de blocos do ADC *sigma-delta*, retirado de [38]

O modulador mostrado na figura a seguir, grosso modo, amostra o sinal de entrada a uma frequência bastante alta numa transmissão de 1 *bit*. O filtro digital e de decimação toma então esta informação amostrada e converte-a num código digital de alta resolução, mais lento.

Enquanto a maioria dos conversores tem uma única frequência de amostragem, o conversor *sigma-delta* tem duas - a frequência de amostragem de entrada ( $f_s$ ) e a frequência de dados de saída ( $f_D$ ) [38].

## Capítulo 4

### 4. Serviços a implementar

#### 4.1. Grandezas a obter

Tirando proveito do equipamento de medida em desenvolvimento dispor de capacidade para adquirir três tensões e quatro correntes, será possível utilizar este equipamento em diferentes modos de funcionamento. Ainda que a aplicação possa, nesta implementação, não fazer uso de todas as grandezas medidas/calculadas, a fim de que o módulo de medida fique “calibrado” para acomodar o máximo de serviços, em termos de cálculo, optou-se por implementar desde logo o cálculo dos valores eficazes de todas aquelas tensões e correntes, mais três potências activas e três reactivas.

#### 4.2. Interface com computador

O interface com computador, de que se apresenta uma vista geral na Fig. 4.1, foi concebido no *software* Matlab, e engloba as funções de parametrização do *smart meter*, leitura, representação e gestão dos dados e ainda algumas funções simples de cálculo.

Por detrás do interface, existe uma estrutura de vários ficheiros, ora de texto, ora de valores separados por vírgulas (csv), que compõem a base de dados do programa. Graças a ela, é possível catalogar os ensaios por nome de equipamento, enumerá-los e excluí-los (não eliminar), bem como aos próprios equipamentos e, por conseguinte, a todos os ensaios que lhe estão associados. Cada ensaio é guardado no seu ficheiro próprio, denominado na estrutura Neq\_Nen.txt, onde *Neq* é o número do equipamento e *Nen* o número do ensaio.

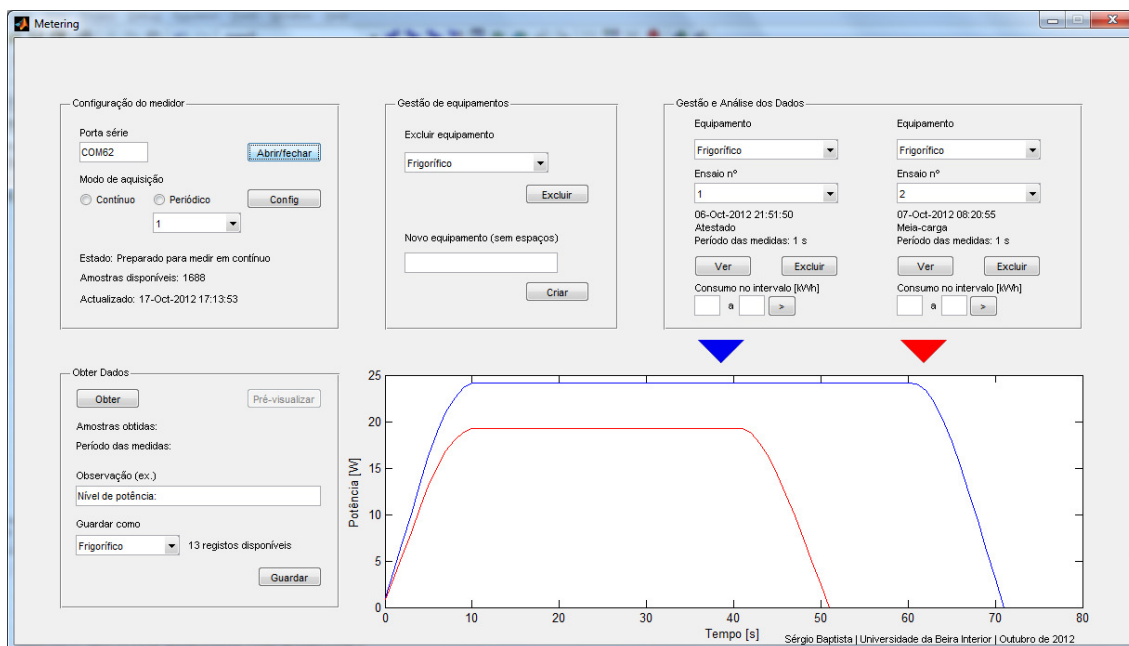


Fig. 4.1 - Vista geral do interface gráfico com o utilizador

#### 4.2.1. Parametrização do smart meter

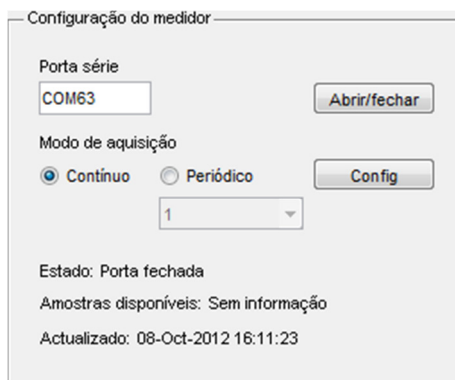


Fig. 4.2 - Secção de parametrização

A secção de parametrização, na Fig. 4.2, principia, naturalmente, por definir a porta série a que o equipamento está ligado. A *Baudrate* é de forma omissa definida para 9600 bps.

Uma vez iniciada a comunicação, é accionado um *timer* com frequência de 1 segundo. A cada interrupção é efectuado um pedido ao medidor que envie informação sobre o seu estado (em medição ou latente), a periodicidade para que está configurado e número de leituras que já registou. Esta informação é imediatamente exibida nos campos próprios. Existe ainda um campo que exhibe o instante da última actualização para dar a certeza ao utilizador que a informação exibida é actual.

Apenas na situação de o medidor estar latente, o interface permite enviar a configuração do modo de aquisição - contínuo ou periódico -, sendo que no segundo modo são disponibilizadas as opções de 1, 10, 30 e 60 segundos. A opção por cada um destes modos está muito relacionada com o tipo de análise que o utilizador queira conduzir. Se, por um lado, estiver à procura de fenómenos rápidos, como transitórios ou sobretensões, a opção mais adequada será, com certeza, a aquisição contínua, ou seja, um registo por cada ciclo de 20 ms. Se, por outro lado, se tratar de uma análise mais energética, baseada na evolução do consumo ao longo de um período de funcionamento de um equipamento, a análise mais adequada será a segunda. Uma aquisição desta forma implica uma perda de informação, mas foi pensada para as situações em que o dispositivo a analisar pelo utilizador tenha uma grande inércia e traz a grande vantagem de aligeirar as necessidades de armazenamento, que podem não parecer uma prioridade à primeira vista, senão vejamos:

O equipamento de medida tem uma memória *flash* de 120 kB. Tendo em conta que cada uma das nossas medidas a armazenar já fique reduzida a 16 bits (ou seja 2 bytes), só nos permitiria armazenar 61440 medidas. Ora, em medição contínua, armazenando apenas uma grandeza (a potência activa, por exemplo), corresponderia a uma capacidade de armazenamento de 20 minutos, o que é relativamente reduzido. O simples aumento da periodicidade de medida para 1 segundo permite aumentar este valor, naturalmente, num factor de cinquenta, ou seja, para mais de 16 horas.

#### 4.2.2. Leitura, representação e gestão dos dados medidos

Obter Dados

Obter Pré-visualizar

Amostras obtidas:

Período das medidas:

Observação (ex.)

Nível de potência:

Guardar como

Frigorífico 6 registos disponíveis

Guardar

Fig. 4.3 - Secção de obtenção de dados

Com o carregamento dos dados a partir do equipamento de medida, vem também a informação do número de amostras e a periodicidade a que foram obtidas (Fig. 4.3). Nesta implementação foi apenas programada a obtenção da potência activa, cujos valores chegam ao interface ainda como produto da tensão e da corrente sem qualquer factor de escala. É,

portanto, necessário dividir esta pelos factores de escala da tensão e da corrente demonstrados de (3.1) a (3.3), calibrados para os valores reais medidos, ficando:

$$F_u = \frac{1517}{1517+994000} * \frac{32767}{0,580} \quad (4.1)$$

$$F_i = 4,02 * \frac{32767}{0,580} \quad (4.2)$$

Após isso, o interface permite pré-visualizar as leituras sem ter que as guardar. Caso o utilizador opte por guardar as mesmas, tem ainda a possibilidade de introduzir algumas observações/comentários que o auxiliem, em consultas posteriores, a identificar aquelas leituras. Esta informação, juntamente com a data e hora no momento são guardadas no cabeçalho do ficheiro do ensaio, para referência futura na secção de gestão e análise.

Para referência rápida do utilizador, foi incluído um campo que actualiza, a cada operação que envolva manipulação de ensaios (registo ou exclusão), o número destes que está disponível, isto é a diferença entre o número total e o número de excluídos.

Quanto ao armazenamento, a estrutura foi pensada numa lógica de o utilizador pretender efectuar vários ensaios de um equipamento com vista a comparar, por exemplo, vários níveis de potência ou de carga. Assim, o primeiro critério para catalogação ou pesquisa de leituras será o equipamento. O interface traz à partida alguns equipamentos como exemplo, mas estão naturalmente disponíveis as funções de exclusão e criação de equipamentos, na secção “Gestão de Equipamentos”, ilustrada na Fig. 4.4.

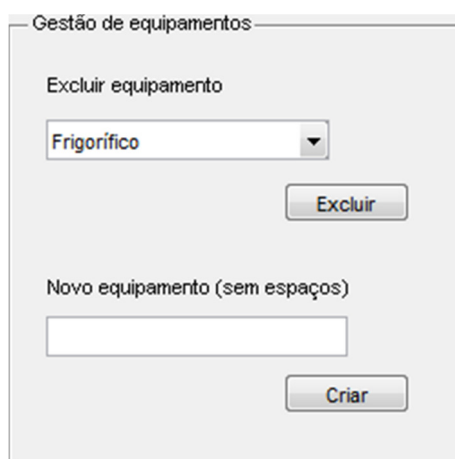


Fig. 4.4 - Secção de gestão de equipamentos

Segue-se a secção de “Gestão e Análise dos Dados”, na Fig. 4.5. Esta possui duas subsecções idênticas com a finalidade de facilitar eventuais comparações entre dois ensaios.

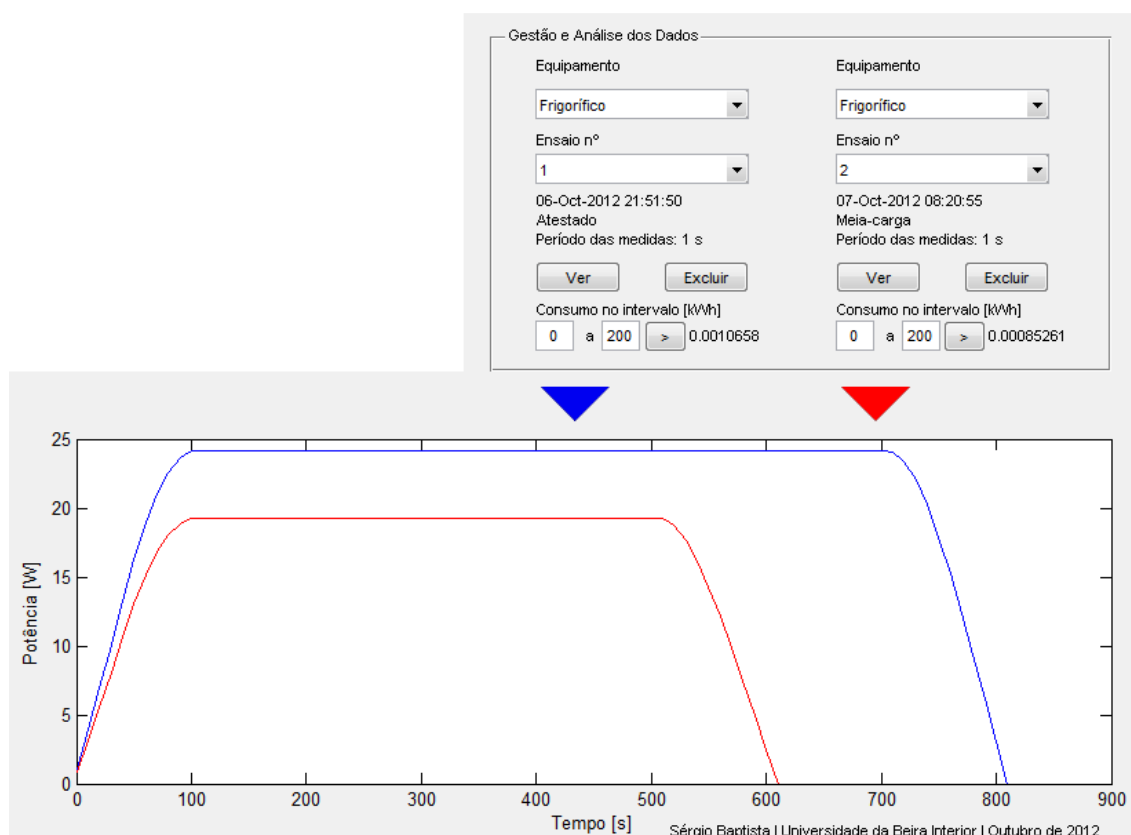


Fig. 4.5 - Secção de Gestão e Análise dos Dados

Como foi dito, a pesquisa por um ensaio começa pela selecção do equipamento, e então a escolha do ensaio. Estão programados avisos no caso de os ficheiros não estarem presentes ou não apresentarem o formato adequado. Cada uma destas listas omite os elementos que foram excluídos para facilitar a utilização, o que, no encaminhamento interno da informação, obrigou à implementação de funções que atribuam o *offset* apropriado a cada um dos índices das listas, a fim de compor o nome correcto do ficheiro a aceder.

A selecção do equipamento gera automaticamente a lista de ensaios e, por sua vez, a selecção do ensaio, corrigidos os índices, acede ao ficheiro respectivo e extrai o cabeçalho atrás referido para a área imediatamente abaixo. Assim, o utilizador recebe uma informação rápida sobre o ensaio, sem necessitar de o exibir na área de gráficos. Uma vez seleccionado o ensaio pretendido, basta-lhe premir o botão "Ver" e o gráfico é gerado com os valores lidos do ficheiro.

Na subsecção que se segue, de cálculo da energia num intervalo, são solicitados ao utilizador os dois instantes delimitadores. A função procura então o índice mais próximo no ficheiro de leituras, se não coincidir, arredondará para o mais próximo, e calcula a média da potência activa nesse intervalo. No cálculo propriamente dito (produto da média pelo intervalo), é tomada aquela média, mas é considerado exactamente o intervalo fornecido.

## Capítulo 5

### 5. Programação dos módulos

#### 5.1. Integração/comunicação dos módulos

Como foi dito anteriormente, estes módulos foram concebidos para serem integrados e comunicarem através do barramento comum, onde estão implementadas as ligações necessárias ao protocolo I<sup>2</sup>C. No entanto, devido a mau funcionamento do microcontrolador da placa de alimentação, não foi possível uma integração propriamente dita.

Esta integração seria de particular importância na situação em que houvesse uma falha na alimentação da rede, em que o módulo de alimentação teria que gerir o funcionamento do conjunto, por forma a economizar a bateria, mas sem perder qualquer informação.

#### 5.2. Estrutura do programa do Módulo FA

Como foi dito, a principal função deste módulo prende-se com a gestão da energia do barramento. De um modo particular, na situação em que houvesse um corte da alimentação da rede, onde emitiria uma mensagem ao(s) outro(s) módulo(s) sinalizando esta situação e pedindo-lhes que lhe enviassem a informação relevante que tivessem em RAM, para que seguidamente pudessem ser desligados, pelo corte da energia no barramento, através da comutação dos *pins* de controlo do gestor de energia do barramento, o TPS2111.

No restabelecimento da alimentação da rede, o módulo de alimentação retornaria aos outros módulos a informação que deles tinha guardado. Este conjunto de operações representa-se na Fig. 5.1.

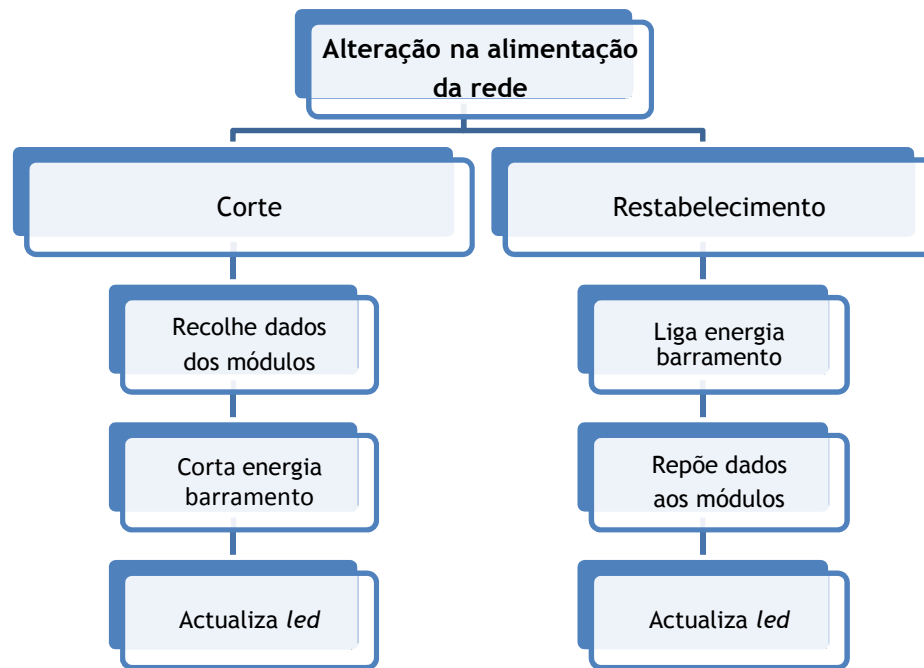


Fig. 5.1 - Sequências de operações face à alteração da alimentação da rede

### 5.2.1. Monitorização das tensões de alimentação

De uma forma geral, as funcionalidades deste módulo que envolvem programação dependem maioritariamente das tensões de alimentação disponíveis (a da rede já convertida para 5 V). Assim, como foi descrito no capítulo sobre os equipamentos de suporte, ambas são colocadas em divisores de tensão resistivos, o da rede com a relação  $6,65/16,55 = 0,4$  e o da bateria (recorde-se, de 6 V) aproximadamente  $5/15 = 0,33$ . Desta forma, ambos apresentarão, no máximo, na perspectiva do ADC, 2 V.

O ADC foi então configurado para funcionar com os dois canais agrupados, tomando como referência a tensão de alimentação (3,3 V). O modo de operação é em conversões simples, ordenadas no código da função geral, para evitar que fosse necessário recorrer à hierarquia de interrupções na situação de estarem a ocorrer comunicações.

A cada conversão é, então, despoletada a interrupção associada, tratada no vector de interrupção próprio. Aí os valores contidos nas memórias do ADC são transferidos para variáveis do tipo *float*, a fim de poderem escaladas para os valores “reais” de tensão, com vista a tornarem-se mais inteligíveis para as decisões que dependam dos valores delas. A operação passa, em cada uma delas, por dividi-la pelo valor máximo da resolução do ADC e pelo respectivo rácio, referidos há dois parágrafos, e finalmente multiplicar pela tensão de referência.

### 5.2.2. Gestão da energia do barramento

Em condições normais - com ambas as alimentações disponíveis - a configuração dos *pins* associados ao gestor de energia, de acordo com a Tabela 5, tem que ser [D1,D0] = [0,1].

Tabela 5 - Tabela de verdade do *power mux* TPS2111

| D1 | D0 | $V_I(VSNS) > 0.8V$ | $V_I(IN2) > V_I(IN1)$ | OUT <sup>(1)</sup> |
|----|----|--------------------|-----------------------|--------------------|
| 0  | 0  | X                  | X                     | IN2                |
| 0  | 1  | YES                | X                     | IN1                |
| 0  | 1  | NO                 | NO                    | IN1                |
| 0  | 1  | NO                 | YES                   | IN2                |
| 1  | 0  | X                  | X                     | IN1                |
| 1  | 1  | X                  | X                     | Hi-Z               |

<sup>(1)</sup>The under-voltage lockout circuit causes the output to go Hi-Z if the selected power supply does not exceed the IN1/IN2 UVLO, or if neither of the supplies exceeds the internal  $V_{DD}$  UVLO.

Esta configuração assegura o funcionamento ininterrupto do conjunto, pois se a alimentação da rede falhar, este dispositivo comutará automaticamente para a alimentação pela bateria. No entanto, de acordo com a informação obtida na função descrita no ponto anterior, se a situação fosse de corte da alimentação da rede, a função principal deveria desencadear a operação de recolha dos dados dos módulos *slave* e, feito isto, deveria então passar para [D1,D0] = [1,1], desligando assim a energia do barramento.

Da mesma forma, quando a alimentação da rede voltasse a estar presente, deveria comutar para o primeiro estado referido e, então, restabelecer os dados aos outros módulos.

### 5.2.3. Interface com utilizador

Ainda com base na informação recolhida pelos ADC, e fazendo uso dos *led* disponíveis para fornecer informação visual ao utilizador, associou-se um a cada uma das tensões de alimentação. Assim, quando for superior a 4,5 V - arbitrou-se este valor como sendo admissível para produzir os 3,3 V - o *led* respectivo acenderá, caso contrário é apagado.

### 5.3. Estrutura do programa do Módulo MCU

Passar-se-á a descrever o algoritmo principal deste módulo, que define a forma como se processam e acumulam as medidas e como se calculam as grandezas pretendidas: tensão eficaz, corrente eficaz, potência activa e potência reactiva.

Antes de mais, apresentam-se as fórmulas que serão utilizadas para o cálculo daquelas grandezas:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u^2} \quad (5.1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N i^2} \quad (5.2)$$

$$P = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u \cdot i \quad (5.3)$$

$$Q = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u \cdot i_{-90} \quad (5.4)$$

Onde  $N$  é o número de amostras.

No algoritmo definem-se dois processos: de aquisição-acumulação e de cálculo, este a ocorrer na função geral (que acomoda também o tratamento dos pedidos de comunicações) (Fig. 5.2).

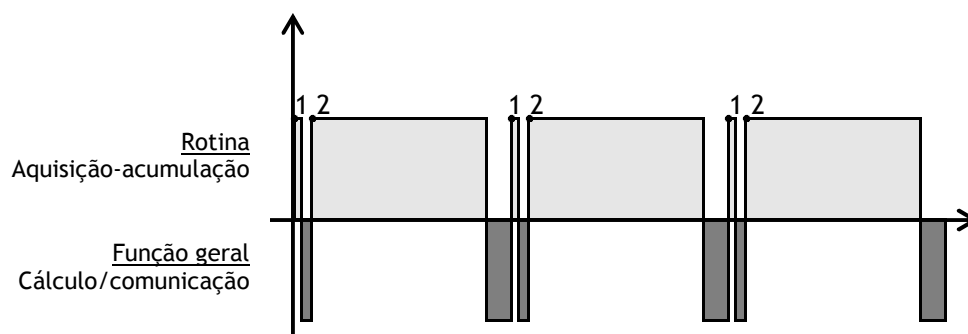


Fig. 5.2 - Ocupação da CPU com os dois processos principais

O primeiro inicia-se em (1) a cada 0,3125 ms (tendo em conta que se vão obter 64 amostras por ciclo, ou seja, à frequência de 3,2 kHz) por uma interrupção de *timer* que ordena o início da conversão do ADC. Enquanto esta decorre, a CPU pode regressar por breves instantes à função geral. Segue-se a interrupção de fim-de-conversão em bloco dos sete canais do ADC (2), a sua transferência para variáveis temporárias, e a multiplicação e acumulação desses

valores (ou de combinações deles, no caso das potências) para ir “construindo” aqueles somatórios. O caso particular da potência reactiva exige a manutenção de uma pilha de valores do tipo FIFO (*First In, First Out*) com os valores da corrente, a fim de, a cada iteração, poder disponibilizar para o acumulador da potência reactiva o valor da corrente há 90° atrás, ou seja, há 16 amostras atrás, como representado na Fig. 5.3. Uma vez chegando à última posição, começa a reescrever-se do início, ficando sempre o valor da corrente pretendida imediatamente a seguir.

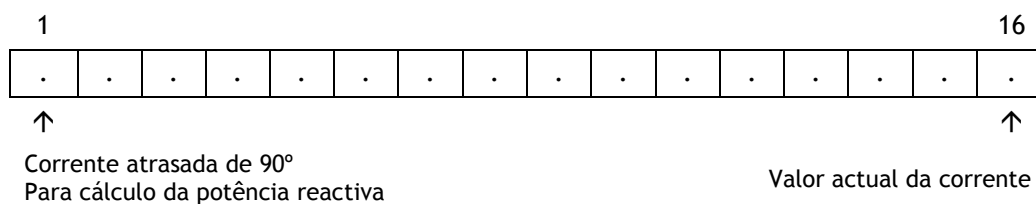


Fig. 5.3 - Esquema da pilha FIFO dos valores da corrente

Os restantes processos ocorrem na função geral, que se representa no fluxograma da Fig. 5.4.

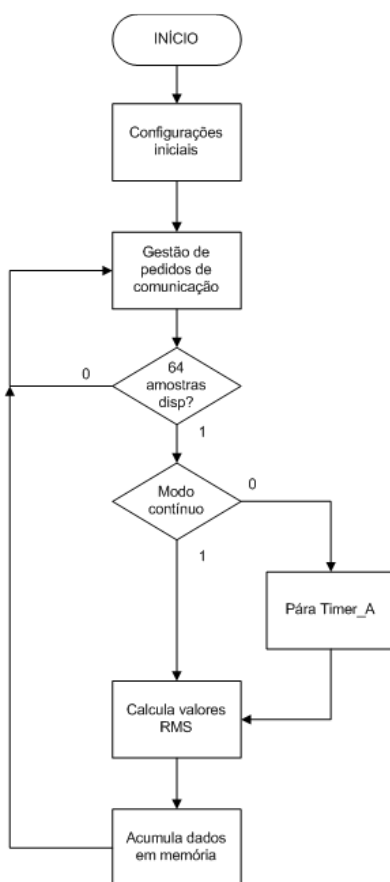


Fig. 5.4 - Fluxograma da função geral do módulo MCU<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Ficaram de parte os processos despoletados pelos *timers* e pela UART, que têm a forma de interrupção, e cujas operações se descrevem no subcapítulo a seguir.

O processo de cálculo, a iniciar-se no fim de um período de medida, i.e., após 64 novas amostras, consiste, primeiro que tudo, na transferência dos somatórios para variáveis “sombra” e reinicialização dos mesmos, uma vez que, em medição contínua, não seria possível efectuar todas as operações necessárias antes de ocorrer a próxima conversão/interrupção, que necessita ter aqueles somatórios a zero.

Passa-se então à divisão de cada um daqueles somatórios pelo número de amostras, que propositadamente se escolheram como uma potência de dois para que a divisão pudesse ser efectuada através de *shifts* à direita, em número igual à potência, poupando assim uma quantidade considerável de ciclos de relógio. Por outro lado, no caso dos valores eficazes de tensão e corrente é ainda necessário calcular a raiz quadrada, operação que requer vários ciclos de máquina para poder ser realizada.

Este processo vai sendo efectuado nos intervalos das rotinas de aquisição-acumulação, tendo apenas que garantir que se completa antes do fim do período de medida actual.

Quanto ao tipo das variáveis, optou-se por manter tudo em inteiros, num factor de escala correspondente à representação do ADC (ou produtos destas). Isto implica naturalmente a utilização de variáveis com uma dimensão considerável, no entanto, minimizam-se os erros. A única operação com vírgula é realizada já no interface gráfico, para converter a potência em valores com unidade de *watt*. Assim, as variáveis são dos seguintes tipos:

- Amostras: *int* (16 bits)
- Somatórios: *long long int* (64 bits)
- Valores eficazes: *long int* (32 bits)

Fica, então, por descrever o protocolo de comunicação, o que será feito em subsecção própria.

### 5.3.1. Configurações iniciais

As primeiras configurações são, pela lógica, as de relógio e *timers*. Como é, aliás, habitual nos códigos desta família de microcontroladores da Texas Instruments, a primeira configuração é parar o *Watchdog Timer*, um *timer* que é vocacionado para realizar uma actividade ao fim de um período, sem interesse neste contexto, portanto. Segue-se a configuração do módulo de relógio *frequency-locked loop* (FLL+), que fornece os sinais de relógio nos dispositivos MSP430x4xx, com vista a obter um *sub-main clock* (SMCLK) de 16 MHz,

o máximo disponível, para tentar tirar o maior partido das capacidades de conversão e processamento de toda a informação que se pretende adquirir e calcular.

Passa-se então à configuração de dois *timers*, com fins distintos: o primeiro - *Timer\_A* - usando como origem de relógio o SMCLK, é definido para produzir interrupções a intervalos de tempo equivalentes a 20 ms/64, isto para produzir 64 amostras a cada ciclo da electricidade portuguesa (50 Hz). Mais adiante explica-se o porquê das 64 amostras. O outro *timer* - *Timer\_B* - usando também o SMCLK como referência, é configurado para contagens de 1 segundo, unidade a partir da qual se estabelecem os modos de aquisição periódica (por oposição à aquisição contínua), pelo que na rotina que serve a interrupção por ele gerado, existe um contador de segundos que determinará a cada *tick* se aqueloutro *timer* deve iniciar para adquirir um ciclo.

Relativamente à configuração do ADC, optou-se por usar a referência própria de 1,2 V e sinal de relógio SMCLK, contudo, verificou-se que, ainda que o manual nada diga contra a utilização do sinal de 16 MHz, as conversões resultavam erráticas e muitas vezes zero. Teve que usar-se, portanto, a opção de divisão do sinal de relógio, neste caso por 2, que foi suficiente para produzir conversões estáveis.

Para analisar o desempenho temporal usou-se uma saída lógica que era levada a alto no início da conversão e a baixo no final das operações de multiplicação e acumulação. Analisando este sinal no osciloscópio torna-se possível visualizar a margem temporal que nos deixava entre o processamento daquelas operações e o início do novo ciclo de conversão. Com 128 amostras o resultado era o exibido na Fig. 5.5, ou seja, as operações de cálculo estavam a demorar significativamente mais do que o período de amostragem.

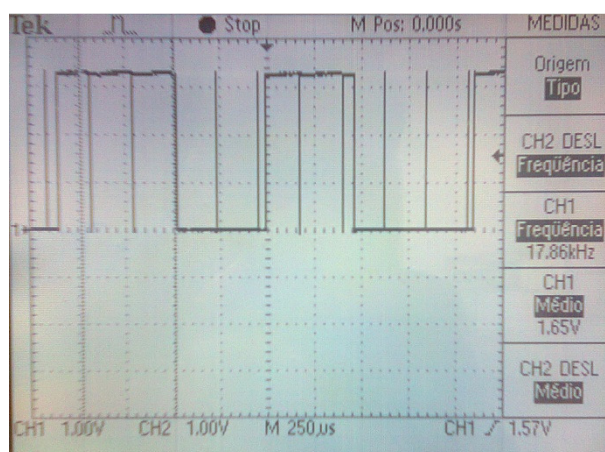


Fig. 5.5 - Desempenho temporal com 128 amostras

Tendo em conta o ideal acima referido de que o número de amostras fosse uma potência de 2 - a fim de tornar as divisões finais pelo número de amostras possível por uma operação de *shift* -, passou-se então para 64 amostras, o que já verifica o desempenho da Fig. 5.6.

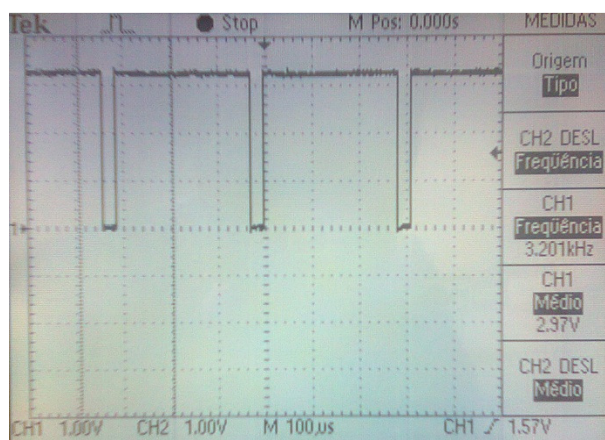


Fig. 5.6 - Desempenho temporal com 64 amostras

Como se vê, já é possível acomodar todas as operações pretendidas num ciclo de 3200 Hz (50 Hz x 64 amostras), ainda que não com muita margem.

Ainda na configuração do ADC optou-se por agrupar os canais, para ter apenas uma interrupção de conversão. Assim tira-se o maior proveito do facto de este periférico obter todos os canais em paralelo e traz a vantagem de assegurar a contemporaneidade de todas as leituras, rigor que é de particular interesse no caso das potências, que se baseiam em leituras de dois canais. Para notação das conversões optou-se pelo complemento para dois, que evita a consideração do *offset* de metade da gama (uma vez que o zero analógico representaria metade da gama). Esta opção viria a revelar-se de particular importância pois, na aplicação de interface, para obter o valor “real” da potência a partir do valor dela enquanto produto da tensão pela corrente nas suas representações do ADC, seria impossível sem ter conhecimento de cada uma delas, e assim basta dividir pelos factores de ambas.

Finalmente, a configuração da *Universal Serial Communication Interface A0 (USCI\_A0)* para o modo UART, com a *Baudrate* de 9600 bps, a fim de poder comunicar via porta série com o dispositivo de interface, neste caso, o computador e o interface gráfico desenvolvido em Matlab.

### 5.3.2. Cálculos das grandezas eléctricas

Como foi dado a entender, as operações de multiplicação e acumulação ocorrem dentro da rotina que serve a interrupção de fim de conversão do ADC.

Dado que se trata de uma operação igual para os treze somatórios que se estão a compor - três tensões, quatro correntes, três potências activas e três potências reactivas - (sendo que no caso das tensões e das correntes é o produto do valor por si próprio), optou-se por criar uma função a que se chamou “mac”, sigla de *multiply-accumulate*. Esta função recebe como argumentos o valor do somatório (ao qual acumular) e os dois valores a multiplicar, e devolve o valor actualizado do somatório. No interior da função, a multiplicação é feita recorrendo ao multiplicador de *hardware* de 32 bits, tirando proveito da sua rapidez. Para obter a função de acumulação, há que carregar o valor anterior nos registos de resultado, que têm a dimensão de *words* (16 bits). Isto obriga à decomposição dos somatórios em três *words*. Bastam três (em vez de quatro), na medida em que, mesmo no cenário em que as 64 amostras viessem com valores máximos, o somatório dos quadrados delas não ultrapassa um valor de 24 bits.

Carregados os dados nos operadores, podem ler-se logo em seguida os valores dos registos de resultado, carregá-los para as *words* auxiliares e recompor estas para o somatório em causa.

Já na função geral, de cálculo dos valores eficazes, surgem dois tipos de cálculo, dependendo das variáveis em questão: para as correntes e tensões - divisão pelo número de amostras e raiz quadrada desse resultado, para potências - apenas a divisão (com sinal) pelo número de amostras. Sendo que estes cálculos são repetidos várias vezes, fizeram-se funções para cada um destes cálculos, tornando o código mais económico e organizado. Na primeira, sabendo que o somatório é positivo, a operação de divisão pelo número de amostras (64) resume-se a um *shift* à direita em seis posições.

Quanto ao cálculo da raiz quadrada, tomaram-se duas abordagens: usar a função oferecida pela biblioteca “math.h” - “sqrt()”, que se sabe não ser propriamente rápida, ou implementar uma função baseada num algoritmo manual, tentando tirar proveito do facto de o argumento e resultado serem inteiros, encontrou-se uma em [39] que assenta num algoritmo dígito-a-dígito que tem inerentes iterações de busca e teste: encontrar um dígito - *e* - que, quando adicionado à direita da solução actual *r*, verifique:

$$(r + e).(r + e) \leq x$$

onde *x* é o valor para o qual se procura a raiz. Expandindo, fica:

$$r.r + 2.r.e + e.e \leq x$$

O valor actual de  $r.r$  - ou, comumente, o resto - pode ser incrementalmente actualizado de forma eficiente quando se trabalha em binário, uma vez que o valor de  $e$  será um simples *bit*, e as operações necessárias para computar  $2.r.e$  e  $e.e$  podem ser substituídas por rápidas operações de *shift*, o que permite uma implementação computacional simples. O código utilizado, adaptado de [39], foi:

```
long int op = 0;
long int res = 0;
long int temp = 0x01;
long int one = temp << 30; // O 2º bit mais significativo fica a 1

// "one" começa na maior potência de quatro <= que o argumento
while (one > op)
{
    one >>= 2;
}

while (one != 0)
{
    if (op >= res + one)
    {
        op = op - (res + one);
        res = res + 2 * one;
    }
    res >>= 1;
    one >>= 2;
}

// Faz o arredondamento aritmético para o inteiro mais próximo
if (op > res)
{
    res++;
}

return res;
```

Seguidamente testou-se em alguns números com sucesso, tendo-se dado por validado.

Para o caso do maior argumento possível ( $32767^2$ ), a primeira demonstrou demorar cerca de 200  $\mu$ s e a segunda 70  $\mu$ s. Optou-se, naturalmente, pela segunda.

No cálculo das potências, note-se que a operação de divisão não se pode limitar à operação de *shift*, pois deve salvaguardar o caso de o somatório ser negativo (caso da potência reactiva), situação em que a operação de *shift* tem que ser seguida de uma reposição dos primeiros 6 bits a 1.

Feitos os cálculos, como nesta implementação apenas se está a importar o valor da potência activa de uma fase para o interface, apenas esse valor vai sendo guardado num *array*.

### 5.3.3. Comunicação

A comunicação com a aplicação de interface foi estabelecida num protocolo que assenta num conjunto de códigos de pedidos.

Ao chegar um código pela porta série, é despoletada a interrupção respectiva. É feito, então, um *switch* do valor lido e “traduzido” para um código novo do programa local segundo as Tabelas 6 e 7:

Tabela 6 - Conjunto de códigos relativos à parametrização

| Código Interface | Significado                     | Código MCU |
|------------------|---------------------------------|------------|
| 201              | Modo de aquisição contínuo      | 0          |
| 202              | Modo de aquisição a 1 segundo   | 1          |
| 203              | Modo de aquisição a 10 segundos | 10         |
| 204              | Modo de aquisição a 30 segundos | 30         |
| 205              | Modo de aquisição a 60 segundos | 60         |

O valor deste código é atribuído à variável “per”, que representa a periodicidade de aquisição e, como tal, vai servir para arbitrar a geração de ordens de conversão na rotina do *TimerB* (de segundo a segundo).

Tabela 7 - Conjunto de códigos relativos a pedidos de informação

| Código Interface | Significado                                    | Código MCU |
|------------------|--|------------|
| 101              | Pedido de envio de informação do pacote        | 1          |
| 102              | Pedido de envio de pacote                      | 2          |
| 110              | Pedido de informação sobre estado <sup>3</sup> | 10         |

Este código é, então, atribuído a uma variável “req” (de *request*). A utilização desta variável visa permitir o tratamento do pedido fora da rotina de interrupção, a fim de poder libertar a CPU para processar outras interrupções, nomeadamente dos *timers* ou do ADC.

---

<sup>3</sup> Em medição ou parado, periodicidade e número de amostras disponíveis.

Na função geral encontra-se então um novo *switch* desta variável, que, para cada caso, vai enviar um conjunto de *bytes* específico. Antes de mais, importa recordar que a comunicação por UART é feita *byte a byte*, ou seja, para enviar variáveis como um *int*, ou um *long int*, há que decompô-las, aplicando-lhes o número de *shifts* apropriado e movendo o resultado para variáveis auxiliares do tipo *byte*. Posto isto, sendo que estas são operações que se repetem várias vezes ao longo do protocolo, foram criadas funções auxiliares para o fazerem: *send\_int* e *send\_long*. A primeira, “parte” um *int* em dois bytes e envia-os, e a segunda um *long int* em quatro *bytes*.

De referir que no fim de todos os pacotes é enviado um *byte* extra com o código 255. Isto fornece à aplicação de interface como que um código de validação, para aumentar a certeza de que a informação recebida é válida. Caso este último *byte* não corresponda a este valor, a aplicação descarta os dados recebidos.

## 6. Ensaios e validação

Obtidos os valores reais das resistências e testando o ADC com valores experimentais de tensão, ajustaram-se, como foi referido em 4.2.2, os factores de escala da tensão e corrente.

Feito isto, os ensaios consistiram em gerar, no programa Microsoft Excel, séries de valores equivalentes às ondas de tensão e corrente dentro dos parâmetros portugueses, e decompõe-se teoricamente a potência aparente segundo o triângulo das potências. Recorde-se que a montagem de aquisição de correntes está dimensionada para uma corrente máxima de 125 mA (sendo que num contexto real teria que se usar um transformador de intensidade), daí virem a ser utilizados valores de corrente tão baixos. Converteram-se estes valores para os que seriam gerados pelo ADC, aplicando os factores de escala respectivos. Carregaram-se esses valores na memória do equipamento de medida em desenvolvimento, a cada interrupção do ADC, foram sendo transferidos para as variáveis temporárias como se daquele tivessem provindo. Fez-se, então, correr dois ciclos, uma vez que no primeiro o cálculo da potência reactiva não é efectuado (pois não existem dados suficientes para poder atrasar a corrente).

### 1º Ensaio - Dados na Tabela 8

Tabela 8 - Dados para o 1º ensaio

| Grandeza               | Valores no 1º harmónico |
|------------------------|-------------------------|
| Tensão eficaz          | 230 V                   |
| Corrente eficaz        | 80 mA                   |
| Potência aparente      | 18,40 W                 |
| Desfasagem da corrente | $\pi/3$ (em avanço)     |

Obtiveram-se, então os resultados da Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do 1º ensaio

|                   | Cálculo teórico      |             | Calculo pelo <i>meter</i> |             | Erro relativo (%)        |
|-------------------|----------------------|-------------|---------------------------|-------------|--------------------------|
|                   | Notação <i>meter</i> | Unidades SI | Notação <i>meter</i>      | Unidades SI |                          |
| Potência activa   | 179873901            | 9,20        | 179873223                 | 9,19997     | $3,76931 \times 10^{-6}$ |
| Potência reactiva | 311550737            | 15,93487    | 311550691                 | 15,93487    | $1,47649 \times 10^{-7}$ |

Repetiu-se o 1º ensaio, mas com a corrente em atraso, e os resultados foram idênticos.

## 2º Ensaio - Dados na Tabela 10

Decidiu-se, então, testar o desempenho do medidor na presença do 3º harmónico, que será o presente em lâmpadas, aparelhos electrónicos, aparelhos de refrigeração, etc. [40]. Os valores arbitrados rondam os máximos admitidos tanto pela norma europeia NE/EN 50160, como pela norma internacional CEI/IEC 61000, citados em [40].

Tabela 10 - Dados para o 2º ensaio

| Grandeza               | Valores no 1º harmónico | Valores no 3º harmónico |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tensão eficaz          | 230 V                   | 11,5 V                  |
| Corrente eficaz        | 70 mA                   | 10 mA                   |
| Potência aparente      | 16,10 W                 | 0,115 W                 |
| Desfasagem da corrente | $\pi/3$ (em avanço)     |                         |

Obtiveram-se, então os resultados da Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do 2º ensaio

|                   | Cálculo teórico      |             | Calculo pelo <i>meter</i> |             | Erro relativo (%)        |
|-------------------|----------------------|-------------|---------------------------|-------------|--------------------------|
|                   | Notação <i>meter</i> | Unidades SI | Notação <i>meter</i>      | Unidades SI |                          |
| Potência activa   | 158513876            | 8,10750     | 158512486                 | 8,107428903 | $8,76895 \times 10^{-6}$ |
| Potência reactiva | 274554087            | 14,04260192 | 270659912                 | 13,84342678 | 0,014183635              |

A grande alteração a assinalar no comportamento do medidor na presença do 3º harmónico é o aumento significativo do erro na potência reactiva, ainda assim, dentro de valores bastante aceitáveis.

### 3º Ensaio - Dados na Tabela 12

Seguiu-se o teste com a adição do 5º harmónico, frequente em aparelhos de aquecimento e motores, novamente com valores a rondar os máximos nas normas referidas. Por uma questão de rigor, não que isso afecte a exactidão do equipamento de medida em desenvolvimento, a corrente foi posta em atraso, dado o tipo de aparelhos que tipicamente verifica este quadro.

Tabela 12 - Dados para o 3º ensaio

| Grandeza               | Valores no 1º harmónico | Valores no 3º harmónico | Valores no 5º harmónico |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tensão eficaz          | 230 V                   | 11,5 V                  | 13,8 V                  |
| Corrente eficaz        | 70 mA                   | 10 mA                   | 7 mA                    |
| Potência aparente      | 16,10 W                 | 0,115 W                 | 0,0966 W                |
| Desfasagem da corrente | $\pi/3$ (em atraso)     |                         |                         |

Os resultados foram os da Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados do 3º ensaio

|                   | Cálculo teórico      |              | Calculo pelo <i>meter</i> |              | Erro relativo (%)        |
|-------------------|----------------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------------------|
|                   | Notação <i>meter</i> | Unidades SI  | Notação <i>meter</i>      | Unidades SI  |                          |
| Potência activa   | 159458214            | 8,15580      | 159458615                 | 8,155820507  | $2,51477 \times 10^{-6}$ |
| Potência reactiva | -276189729           | -14,12625998 | -272295298                | -13,92707177 | 0,014100564              |

Verificou-se que os erros em ambas as potências não só não aumentaram, como ainda reduziram.

Com vista a provar se a predominância do 5º harmónico sobre o 3º tem realmente este efeito, no próximo ensaio reduzem-se os valores do 3º.

#### 4º Ensaio - Dados na Tabela 14

Reduziram-se, então, os valores no 3º harmónico em 20%.

Tabela 14 - Dados para o 4º ensaio

| Grandeza               | Valores no 1º harmónico | Valores no 3º harmónico | Valores no 5º harmónico |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tensão eficaz          | 230 V                   | 9 V                     | 13,8 V                  |
| Corrente eficaz        | 70 mA                   | 8 mA                    | 7 mA                    |
| Potência aparente      | 16,10 W                 | 0,072 W                 | 0,0966 W                |
| Desfasagem da corrente | $\pi/3$ (em atraso)     |                         |                         |

Os resultados foram os da Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados do 4º ensaio

|                   | Cálculo teórico      |              | Calculo pelo <i>meter</i> |              | Erro relativo (%)        |
|-------------------|----------------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------------------|
|                   | Notação <i>meter</i> | Unidades SI  | Notação <i>meter</i>      | Unidades SI  |                          |
| Potência activa   | 159037856            | 8,13430      | 159037636                 | 8,134288719  | $1,38332 \times 10^{-6}$ |
| Potência reactiva | -275461648           | -14,08902088 | -273022626                | -13,96427237 | 0,008854307              |

Verifica-se, efectivamente, uma redução dos erros com a predominância do 5º harmónico sobre o 3º.

## 7. Conclusões e considerações finais

### 7.1. Correções necessárias

Ao longo da montagem e teste do *hardware* dos módulos, foram emergindo algumas falhas de projecto, que tiveram de ir sendo solucionadas, quando possível. Disso se faz aqui um levantamento para referência futura:

#### Módulo FA

- O *footprint* da ponte rectificadora não coincide com o do componente. Há que trocar as pistas do *pin* 1 com o *pin* 4.

- Verifica-se que, para 230 V/ 50 Hz, a tensão à saída da ponte rectificadora é insuficiente para fornecer a cada um dos reguladores a tensão necessária para produzirem +/- 15 V. A solução deverá passar, ou pela utilização de transformadores que produzam uma tensão maior nos secundários, ou pela introdução de uma nova ponte rectificadora, ficando assim uma para cada regulador. Caso se continue a usar apenas uma ponte rectificadora, é necessário que o ponto médio entre os dois transformadores seja ligado à massa, para que a tensão à saída da ponte seja igualmente dividida pelas duas secções.

Uma solução que exigiria uma análise mais alargada prende-se com a consideração se realmente são necessárias tensões tão significativas como +/- 15 V para o amplificador operacional do módulo de medida, quando ele apenas está a lidar com tensões que vão até aos 500 mV. Se efectivamente se chegasse à conclusão que não era o caso, e que bastariam, por exemplo, +/- 5 V, reajustar o circuito de regulação da tensão nem sequer exigiria a substituição dos reguladores, apenas das resistências que os configuram. Assim, a tensão de saída da ponte já seria suficiente.

- O *footprint* do regulador para - 15 V não está correcto, é necessária a troca das pistas do *pin* 2 com o *pin* 3.

#### Módulo MCU

- A *net* +3.3V não devia estar ligada directamente ao pin que traz esta tensão do barramento pois, como está, torna impossível gerir esta ligação. Por seu lado, o *pin* 3 do *jumper* triplo de

selecção de alimentação (que foi denominado de +3.3VBAT, e apenas ligado ao *pin* respectivo do conector do JTAG, sem qualquer outra ligação) é que devia estar ligado àquele *pin*. Só assim se permitirá comutar entre a alimentação pelo barramento e a alimentação pelo JTAG.

## 7.2. Contributo original

Face aos objectivos delineados para este trabalho pode dizer-se que, no essencial, foram cumpridos. Ainda que nem todas as características idealizadas se tenham atingido, nomeadamente a integração entre módulos. Produziu-se um dispositivo com a capacidade de efectuar diversas medidas eléctricas e de calcular grandezas relevantes para o tipo de análise em questão. Igualmente possui a capacidade de comunicar com o exterior através de uma ligação universal, com um protocolo simples.

Quanto ao interface gráfico, produziu-se uma aplicação *user friendly*, acessível ao utilizador comum, e com um conjunto de funcionalidades avançadas de gestão e armazenamento da informação recolhida. Igualmente se disponibiliza uma ferramenta de análise que nesta implementação se ficou pelos consumos, que são, na verdade, o critério mais procurado. No desenvolvimento da aplicação tentou-se sempre ter em conta a falibilidade de certas operações, como a escrita/leitura na porta série, ou a abertura/leitura de um ficheiro, pelo que foi seguida uma lógica de *try/catch*, com a finalidade de comunicar ao utilizador eventuais dificuldades que a aplicação encontre.

Em suma, produziu-se um par de ferramentas que fornece o fundamental para as questões de análise e gestão de consumos energéticos, permitindo, por exemplo, efectuar estudos comparativos de um equipamento, em vários níveis de funcionamento ou de carga e, daí, pela análise das curvas de potência e subsequente cálculo da energia consumida num período, concluir sobre o compromisso mais vantajoso entre a necessidade de utilização e a eficiência energética.

### 7.3. Trabalhos futuros

Para além das correcções apontadas, existe um conjunto de melhoramentos que poderia potencializar este projecto como produto. Apresentam-se, então, algumas.

O meio de comunicação com o protótipo, actualmente através de um conversor USB-UART, levanta algumas limitações físicas de acessibilidade, sendo necessário que o terminal de interface esteja próximo do módulo, ligados por cabo USB. Uma solução ideal seria um sistema sem fios, não necessariamente com grande alcance. Por outro lado, a fim de garantir a universalidade com terminais que se pretendia, nomeadamente *smartphones* ou *tablets*, a solução mais natural será o Bluetooth.

Ainda sobre a universalidade do interface, o actual foi desenvolvido no *software* Matlab, que se trata de uma plataforma comercial dispendiosa e com funcionalidades muito para além do necessário a uma aplicação desta natureza, pelo que uma solução de mercado teria que passar por uma plataforma mais económica ou mesmo gratuita como Java ou Android, no caso dos dispositivos móveis.

Sob o ponto de vista das funcionalidades embebidas no próprio aparelho, seria particularmente interessante que pudesse fazer algum tipo de interpretação básica e até alguma intervenção. Por exemplo, ao ser acoplado a um equipamento, ser-lhe introduzida a informação da potência/corrente máxima do mesmo. Assim, se ao longo da medição, os valores ultrapassassem uma margem considerada admissível, o aparelho deveria emitir um alarme e, eventualmente, por segurança, cortar a alimentação do equipamento, por exemplo, através de um relé.

## Referências Bibliográficas

- [1] M. J. L. V. R. d. Silva, *Smart Grids em Portugal - Plano de Negócio para Serviço de Planeamento e Gestão Remota de Consumos Eléctricos*, Lisboa, 2011.
- [2] H. Farhangi, "The Path of the Smart Grid," *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 18-28, Janeiro/Fevereiro 2010.
- [3] M. Wissner, "The Smart Grid - A saucerful of secrets," *Applied Energy*, pp. 2509-2518, 2011.
- [4] H. He, "Toward a Smart Grid: Integration of Computational Intelligence into Power Grid," em *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Barcelona, 2010.
- [5] G. W. Arnold, "Challenges and Opportunities in Smart Grid: A Position Article," *Proceedings of the IEEE*, pp. 922-927, Junho 2011.
- [6] T. G. Werner e R. Remberg, "Technical, Economical and Regulatory Aspects of Virtual Power Plants," Nanjing China, 2008.
- [7] E. Mashhour e S. Moghaddas-Tafreshi, "A Review on Operation of Micro Grids and Virtual Power Plants in the Power Markets," em *2nd International Conference on Adaptive Science & Technology*, 2009.
- [8] G. Liang, "Comprehensive Information Integration of Power Plants in WAN Based on Web Services," em *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*, 2008.
- [9] L. Geng, "A Kind of Web-based Remote Supervisory and Control System for Power Plants in WAN," em *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, 2007.
- [10] F. Rahimi e A. Ipakchi, *Overview of Demand Response under the Smart Grid and Market Paradigms*, IEEE, 2010.
- [11] D. Houseman, "Smart metering - The holy grail of demand-side energy management?," *reFOCUS*, pp. 50-51, Setembro/Outubro 2005.
- [12] R. Yu, W. Yang e S. Rahardja, "Optimal Real-Time Price Based on a Statistical Demand Elasticity Model of Electricity," em *IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS)*, 2011.
- [13] T. T. Kim e H. V. Poor, "Scheduling Power Consumption With Price Uncertainty," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 519-527, 2011.
- [14] T. Krishnamurti, D. Schwartz, A. Davis, B. Fischhoff, W. B. d. Bruin, L. Lave e J. Wang, "Preparing for smart grid technologies: A behavioral decision research approach to understanding consumer expectations about smart meters," *Energy Policy*, vol. 41, pp.

790-797, 2011.

- [15] Y.-X. Lai, Y.-M. Huang e S. C. Mukhopadhyay, *Interconnecting Communication for Recognition and Automation services on Home Grid*, IEEE, 2012.
- [16] S. S. S. R. Depuru, L. Wang e V. Devabhaktuni, “Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 2736-2742, 2011.
- [17] “Smart Meters - Climate Lab,” Climate Lab, [Online]. Available: [http://climatelab.org/Smart\\_Meters](http://climatelab.org/Smart_Meters). [Acedido em 13 07 2012].
- [18] “InovGrid,” EDP Energias de Portugal, [Online]. Available: <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/InovGrid.aspx>. [Acedido em 06 07 2012].
- [19] A. E. V. d. E. Santo, *Instrumentação Digital para Medida e Processamento de Grandezas Eléctricas*, Coimbra, 2001.
- [20] F. M. Castanheira, *Desenvolvimento de uma aparelhagem de auditoria energética de sistemas eléctricos*, Covilhã, 2010.
- [21] A. E. Emanuel, “Powers in Nonsinusoidal Situations - A Review of Definitions and Physical Meaning,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, pp. 1377-1389, 1990.
- [22] S. M. Deckmann e J. A. Pomilio, “Teorias de Potência Eléctrica,” 2009. [Online]. Available: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it741/cap6.pdf>. [Acedido em 25 07 2012].
- [23] R. Strzelecki e G. Benysek, *Networks, Power Electronics In Smart Electrical Energy*, Londres: Springer, 2008.
- [24] L. S. Czarnecki e A. Lasicz, “Active, Reactive, and Scattered Current in Circuits with Nonperiodic Voltage of a Finite Energy,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 37, pp. 398-402, 1988.
- [25] IEEE, *IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, Nova Iorque: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000.
- [26] IEEE, *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, Nova Iorque: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010.
- [27] A. Cataliotti, V. Cosentino e S. Nuccio, “The Measurement of Reactive Energy in Polluted Distribution Power Systems: An Analysis of the Performance of Commercial Static Meters,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 1296-1301, 2008.
- [28] A. Cataliotti, V. Cosentino, A. Lipari e S. Nuccio, “Metrological Characterization and Operating Principle Identification of Static Meters for Reactive Energy: An Experimental Approach Under Nonsinusoidal Test Conditions,” *IEEE Transactions on Instrumentation*

- and Measurement*, vol. 58, pp. 1427-1435, 2009.
- [29] V. Weber e G. Vickery, “Smart Sensor Networks: Technologies and Applications for Green Growth,” OECD, 2009.
- [30] Wi-Fi Alliance, “Discover and Learn,” Wi-Fi Alliance, [Online]. Available: <http://www.wi-fi.org/discover-and-learn>. [Acedido em 26 07 2012].
- [31] ZigBee Alliance, “ZigBee Specification FAQ,” ZigBee Alliance, [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/FAQ.aspx>. [Acedido em 26 07 2012].
- [32] Bluetooth SIG, *Specification of the Bluetooth System - Vol. 0*, 2010.
- [33] HomePlug Powerline Alliance, “HomePlug Alliance,” [Online]. Available: <https://www.homeplug.org>. [Acedido em 26 07 2012].
- [34] ZigBee Alliance, *EPRI collaborates with ZigBee and HomePlug to define Smart Energy standard for consumer applications*, Press Release, 2009.
- [35] “EuroX10,” CentralCasa, [Online]. Available: <http://www.eurox10.com>. [Acedido em 27 07 2012].
- [36] KNX, “KNX Association,” [Online]. Available: <http://www.knx.org>. [Acedido em 27 07 2012].
- [37] NXP B.V., *UM10204 - I2C-bus specification and user manual*, NXP B.V., 2012.
- [38] B. Baker, *How delta-sigma ADCs work*, Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2011.
- [39] “stackoverflow,” stack exchange inc, [Online]. Available: <http://stackoverflow.com/questions/1100090/looking-for-an-efficient-integer-square-root-algorithm-for-arm-thumb2>. [Acedido em 12 10 2012].
- [40] I. A. Pires, *Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica*, Belo Horizonte, 2006.
- [41] Texas Instruments, *MSP430x4xx Family User’s Guide*, Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2010.
- [42] Texas Instruments, *MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User’s Guide*, Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2012.