



## **EQUIPAMENTO DE TELEMETRIA DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**JOSÉ CÉSAR PINTO DIAS**

novembro de 2016

# EQUIPAMENTO DE TELEMETRIA DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

José César Pinto Dias



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2016**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: José César Pinto Dias, Nº 1940246, 1940246@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professor Doutor José Teixeira Puga, jtp@isep.ipp.pt

Co-orientação científica: Professora Doutora Maria Judite Ferreira, mju@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2016**



Às minhas mulheres: Lisete e Beatriz



## *Agradecimentos*

Devo expressar os meus agradecimentos aos Professores Doutores Ricardo Puga e Judite Ferreira pela orientação, motivação e incentivo na realização deste projeto, estando sempre disponíveis para qualquer questão.

Ao colega Emmanuel Lomba pela disponibilidade no acesso a alguns equipamentos de precisão e cargas resistivas de potência existentes nos laboratórios nos quais dá apoio.

A minha família em especial à minha esposa, pelas constantes palavras de apoio e incentivo naquelas alturas em que o trabalho parecia não estar a correr como devia.

E finalmente à minha filha Beatriz, que embora com apenas 2 anos de idade, certamente terá sentido a falta do pai que nem sempre esteve tão disponível quanto desejaria para poder desenvolver o projeto aqui apresentado.



## *Resumo*

Este relatório apresenta o projeto realizado no âmbito da unidade curricular de dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores – área de especialização em automação e sistemas.

O trabalho realizado consiste no desenvolvimento de um sistema inteligente de telemetria para medição do consumo de energia elétrica, bem como a monitorização de outros parâmetros relevantes dessa mesma energia na instalação onde está inserido.

Sendo um dispositivo inteligente com capacidade de comunicação, será possível o envio de forma regular dos dados recolhidos para base de dados remota, onde além de obter dados necessários à faturação da energia consumida, poderá ainda ser utilizado para identificar formas de tornar mais eficiente a utilização da energia elétrica nessa instalação e consequente redução de custos.

### *Palavras-Chave*

Redes inteligentes, contador inteligente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, tensão eficaz, corrente eficaz.



## *Abstract*

This report presents the project developed for the dissertation module of the master degree in electrical and computer engineering specialization in automation and systems area.

The produced work consists on the development of a telemetry smart system for electrical energy consumption and monitoring some other important parameters of the energy grid where the device is mounted.

Because this is a smart device, with communication capabilities, it will be possible to send collected data at regular periods of time to a remote database where, besides getting the necessary data for energy consumption billing, it will be also possible to use the collected data in order to identify some ways of using the electrical energy of that installation in more efficient way and consequently reducing costs.

### ***Keywords***

Smart grid, smart meter, active power, reactive power, apparent power, power factor, RMS voltage, RMS current.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.INTRODUÇÃO HISTÓRICA .....	1
1.2.ESTADO DA ARTE .....	4
1.3.OBJETIVOS .....	12
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	13
<b>2. <i>HARDWARE</i></b> .....	<b>14</b>
2.1.CIRCUITO DE CORRENTE .....	16
2.2.CIRCUITO DE TENSÃO.....	21
2.3.PROCESSAMENTO.....	25
2.4.INTERFACE LOCAL (COM UTILIZADOR).....	31
2.5.RELÓGIO .....	33
2.6.MEMÓRIA FLASH .....	35
2.7.INTERFACE SÉRIE COM ISOLAMENTO ÓTICO .....	36
2.8.COMUNICAÇÃO COM SERVIDOR REMOTO .....	38
<b>3. <i>FIRMWARE</i></b> .....	<b>41</b>
3.1.REPRESENTAÇÃO E CALCULO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS .....	44
3.2.PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAL.....	45
3.3.INTERFACE COM UTILIZADOR.....	57
3.4.AJUSTE .....	58
<b>4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>61</b>
4.1.CONCLUSÃO .....	61
4.2.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	62
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>64</b>
<b>ANEXO A – CONDICIONAMENTO DE SINAL, ALIMENTAÇÃO E ISOLAMENTO ÓTICO.</b> 65	

<b>ANEXO B – UNIDADE DE PROCESSAMENTO E COMUNICAÇÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO C – INTERFACE COM UTILIZADOR.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO D – FOTOGRAFIAS DO PRODUTO FINAL.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO E – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE ALGUNS DOS DADOS OBTIDOS .....</b>	<b>73</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1	Diagrama geral de blocos	15
Figura 2	Diagrama de blocos das entradas de corrente	16
Figura 3	Efeito de Hall	16
Figura 4	Diagrama de blocos ACS754	17
Figura 5	Esquema da entrada de corrente	18
Figura 6	Corrente de entrada	19
Figura 7	Tensão de saída do circuito sensor de corrente	19
Figura 8	Resposta em frequência do circuito sensor de corrente	20
Figura 9	Diagrama de blocos das entradas de tensão	21
Figura 10	Esquema da entrada de tensão	22
Figura 11	Tensão de entrada	23
Figura 12	Tensão de saída após circuito sensor de tensão	23
Figura 13	Resposta em frequência do circuito sensor de tensão	24
Figura 14	Circuito do microcontrolador	28
Figura 15	Circuito elétrico do interface homem/máquina	31
Figura 16	Circuito RTC	34
Figura 17	Circuito de armazenamento FLASH	35
Figura 18	Circuito de interface série	37

Figura 19	Módulo IEEE 802.11 b/g/n	38
Figura 20	Fluxograma do programa principal	42
Figura 21	Fluxograma da rotina de interrupção	43

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Tabela comparativo de microcontroladores	27
Tabela 2	Características dos filtros FIR a implementar	47
Tabela 3	Coefficientes obtidos para os filtros necessários	49
Tabela 4	Coefficientes convertidos no formato inteiro de 16 bit	52
Tabela 5	Especificações para corrente e tensão do Fluke 8845A	59
Tabela 6	Dados após calibração da medição de tensão	60
Tabela 7	Dados após calibração da medição de corrente	60



## *Acrónimos*

IEC – International Electrotechnical Commission

RMS – Root Mean Square – (Valor eficaz)

SRAM – Static RAM

PDI – Program and Debug Interface

ICE – In Circuit Emulator

LCD – Liquid Crystal display

RTC – Real Time Clock

$I^2C$  – Inter Integrated Circuit

LED – Light Emitting Diode

GSM - Global System for Mobile communications

IIR – Infinite Impulse Response

FIR – Finite Impulse Response

A/D – Analógico/Digital



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

A necessidade de contabilizar o consumo de energia numa dada instalação elétrica, nasce com os primeiros projetos de produção e distribuição de energia elétrica com fins comerciais.

Em 1872, Samuel Gardiner's cria o primeiro dispositivo que permite taxar um consumidor em função da energia que consome. Este dispositivo apenas contabilizava o tempo que uma ou um conjunto de lâmpadas estava ligado, pois apenas um interruptor era utilizado para a totalidade do circuito.

Com a crescente massificação da produção e consumo da energia elétrica, as instalações do lado do consumidor foram-se tornando cada vez mais complexas, e a crescente ramificação de circuitos no local de consumo fazem com que esta forma de tarifar o consumidor deixe de fazer qualquer sentido.

Em 1881, Thomas Alva Edison patenteia o então chamado medidor elétrico que explorava o efeito eletroquímico da corrente elétrica. Este dispositivo continha uma célula eletrolítica onde era depositado um pequeno condutor de cobre previamente pesado com grande precisão a cada início do período de faturação. A corrente ao passar por essa célula, provocava uma deposição de cobre nesse condutor, que seria novamente pesado a cada final do período de faturação. A diferença desses pesos era depois usada para calcular o valor a pagar pela energia consumida.

Apesar de ser uma forma muito difícil de calcular o consumo de energia, este foi o primeiro dispositivo que permitia tarifar, de forma proporcional, o consumo da energia elétrica independentemente da quantidade ou potência das cargas presentes numa dada instalação.

Seguem-se uma grande quantidade de invenções que permitiam simplificar o fabrico e utilização destes dispositivos, bem como a sua precisão e mais tarde a medição de outras grandezas, tais como a energia reativa.

Com o surgimento dos primeiros circuitos integrados, na década de 1970, a eletrónica começa também a ser usada nestes dispositivos. Inicialmente de uma forma híbrida, onde uma parte ainda eletromecânica coexiste, com uma parte eletrónica que permite a adição de algumas funcionalidades que de outra forma não seria possível.

As primeiras tentativas de contagem remota, surgem ainda na década de 1960, através de envio de impulsos por unidade de energia medida. No entanto é com a entrada dos primeiros dispositivos híbridos da década de 1970, que essas contagens passam a ter uma forma mais eficiente através da criação e implementação de novos protocolos e meios de comunicação.

A eletrónica foi entrando de forma gradual nestes dispositivos e, atualmente uma grande parte dos equipamentos instalados são inteiramente construídos com recurso apenas a componentes eletrónicos, abandonando-se completamente a parte eletromecânica.

Atualmente estes equipamentos são muito mais que meros dispositivos que permitem contar energia consumida para faturação. Fornecem uma grande quantidade de informação útil para a operadora, que a qualquer momento pode ter acesso a dados do consumo, e qualidade da energia, que lhe permite melhorar o serviço e otimizar as suas infraestruturas de forma muito mais eficiente com custos inferiores.

A informação disponibilizada por estes dispositivos, é também de grande importância ao consumidor, por lhe permitir acesso a informação instantânea sobre os seus consumos, permitindo-lhe perceber as suas reais necessidades e ajustar o contrato de fornecimento de energia as suas reais necessidades. Permite-lhe ainda tirar maior partido das tarifas bi/tri-horárias, deslocando consumos para horários mais económicos. Permite-lhe também otimizar custos com projetos locais de produção de energia elétrica para auto-consumo dimensionando-os para as reais necessidades da instalação.

A sua utilização dos dispositivos inteligentes de contagem é ainda de grande importância na otimização energética dos recentes projetos de edifícios inteligentes, devido a informação em tempo real por eles fornecida, onde se pretende obter o maior nível de conforto possível, com o menor custo energético possível. Por exemplo, escalonando temporalmente a utilização de equipamentos em função da potência medida num determinado momento.

Certamente muitas outras aplicações beneficiam e muitas mais virão a beneficiar com este tipo de dispositivo que irá também ser o objeto deste projeto.

Durante este projeto irá ser desenvolvido um contador de energia inteligente, que permita obter uma grande quantidade de informação a um custo reduzido, não comprometendo de forma alguma a qualidade da mesma.

Para isso, irá ser desenvolvido um equipamento cujas principais características estão descritas no capítulo 1.3

## 1.2. ESTADO DA ARTE

Existe já no mercado uma grande quantidade de soluções semelhantes, mas poucas combinam um baixo custo com grande quantidade de informação disponível na forma de comunicação sem fio, simples de integrar com terminais móveis, como telemóvel, ou computador portátil. Após um estudo do que existe no mercado e, tendo em conta as condicionantes a cima referidas, foram identificados alguns equipamentos com características próximas ao pretendido.

Aparentemente, dispositivos com interface “*wireless*” de baixo custo, estão associados à monitorização à distância de unidades de produção de energia elétrica para auto-consumo. Não tendo sido encontrada informação detalhada quanto aos parâmetros monitorizados, e raramente é indicada qualquer referência quanto a sua classe de precisão.



OWL Intuition

117,00 € + IVA

Não é indicada qualquer classe de precisão.

Comunicação RF em 433Mhz entre o dispositivo sensor e o “gateway” para acesso a internet.

Faz medição da corrente através de transformadores de corrente, mas não faz medição da tensão diretamente. Aparentemente toma o valor de tensão como constante ao longo do tempo com valor igual a 230 Vrms.

Não é indicada qualquer informação sobre os parâmetros medidos, mas pela análise da documentação e imagens do “*software*”, apenas determina corrente eficaz, tensão eficaz, potência ativa e energia ativa.



Elios4you Pro

476,00 € + IVA

Não é indicada qualquer classe de precisão.

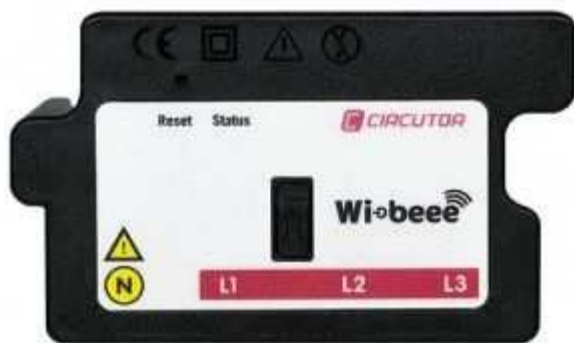
Tem como principal objetivo a monitorização de instalações elétricas onde haja unidades de produção para auto-consumo.

Disponível em 3 modelos, para potências de 15Kw, 30Kw e 50Kw.

Usa transformadores de corrente para medição de corrente e faz medição dos valores de tensão em cada fase, pelo que os parâmetros da rede elétrica obtidos serão de maior precisão, já que entra em consideração com o valor real de tensão na rede.

Quanto aos parâmetros medidos, também aqui a informação é escassa. Pela análise da documentação e imagens do “*software*”, apenas determina corrente eficaz, tensão eficaz, potência ativa e energia ativa.

Possui seis sensores de corrente, que lhe permite determinar a energia consumida na instalação, a energia consumida a partir da rede pública e a energia consumida com origem na unidade local de produção de energia elétrica.



Circutor - WiBeee

190,00 € + IVA

Dispositivo de muito fácil instalação, sem necessidade de interromper fornecimento de energia, nem alterar circuito elétrico, já que se fixa diretamente numa grande variedade de equipamento elétrico já existente no quadro elétrico onde se possa encontrar as linhas de fase e neutro.

Possui capacidade de comunicação “*WiFi*” IEEE 802.11 b/g/n.

Integra um pequeno servidor HTTP, que permite a qualquer dispositivo com acesso “*web*” aceder diretamente à informação da rede elétrica por ele obtida em qualquer momento.

Pode ainda disponibilizar dados em servidor de base de dados e interface “*web*” em “*cloud*”.

A precisão na medição de tensão e corrente é indicada como sendo entre 2% e 3%, sendo esta variação provocada pela posição dos condutores que, ao passarem na zona onde se localizam os sensores de corrente por efeito Hall induzem um campo magnético diferente em função do seu ângulo e distância para um mesmo valor de corrente.

Pela análise da informação fornecida pelo fabricante, este dispositivo determina para cada fase, o valor da tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência aparente, potência reativa, frequência, fator de potência, energia ativa e energia reativa.

No entanto não há qualquer referência à precisão do valor determinado para esses parâmetros.

Quanto a fabricantes de referência, os dispositivos fabricados, que determinem uma grande quantidade de parâmetros da rede elétrica e, que possuam forma de enviar dados para local remoto, baseia-se maioritariamente em redes com condutores, como o RS485. Embora todos possuam algum equipamento nos seus catálogos que adicionado ao sistema, fazem uma conversão entre o RS485 e rede cablada ou “*WiFi*”. No entanto, possuem classes de precisão elevadas para todos os parâmetros calculados.

Seguem-se alguns modelos para medição de energia considerados de baixo custo:

### Schneider PM3250



- Classe 0.5
- Comunicação RS485

317,00 € + IVA

### Hobut C-Tran

- Classe 0.5
- Comunicação RS485



181,00 € + IVA

### Lovato eletric DMG600



- Classe 1
- Comunicação RS485

229,00 € + IVA

### Socomec – DIRIS A10

- Classe 0.5
- Comunicação RS485



198,00 € + IVA

### ABB – M2M



- Classe 0.5
- Comunicação RS485

370,00 € + IVA

### Legrand - EMDX



- Classe 1
- Comunicação RS485

440,00 € + IVA



### 1.3. OBJETIVOS

Pretende-se com este projeto, desenvolver um dispositivo de baixo custo, que combina um contador inteligente de energia elétrica (ativa e reativa) para rede trifásica, com as seguintes características:

- Classe 1.
- $I_b = 10A$ .
- $I_{Max} = 30A$ .
- $U_n = 230/400VAC$ .

É um dispositivo de monitorização da qualidade de energia no local onde é instalado. Esta monitorização incide em alguns parâmetros importantes:

- $V_{Max}, V_{Min}, V_{Med}, V_{RMS}$  em cada fase.
- $I_{Max}, I_{Min}, I_{Med}, I_{RMS}$  em cada fase.
- Valor mínimo, máximo e atual da frequência da rede.
- Potência ativa, reativa e aparente em cada fase.
- Fator de potência máximo mínimo e médio de cada fase.
- Análise de harmónicos

Todos os dados recolhidos deverão ser periodicamente enviados para local remoto através de ligação “Wi-fi”, GSM ou outra, para posterior processamento e análise dos dados recolhidos, com o objetivo de otimizar a instalação e consumos no local em causa.

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

Capítulo 1, Introdução e objetivos do projeto.

Capítulo 2, será apresentado o “*hardware*” deste dispositivo, assim como uma descrição do seu funcionamento.

Capítulo 3, serão abordados os algoritmos implementados no microcontrolador do dispositivo desenvolvido.

Capítulo 4, apresenta-se um conjunto de conclusões sobre o trabalho realizado, bem como indicação de alguns caminhos a seguir em futuras versões do dispositivo aqui desenvolvido.

## 2. *HARDWARE*

De forma a simplificar o desenvolvimento do dispositivo proposto neste relatório, foi criado um diagrama de blocos, onde se poderão identificar mais facilmente as funções de cada bloco de “*hardware*” a desenvolver.

Esse diagrama é apresentado na figura 1, onde se podem identificar três áreas distintas:

1. Rede elétrica (a verde).
2. Medição e condicionamento de sinais de corrente e tensão (a laranja e amarelo).
3. Área digital do dispositivo (a azul):
  - Processamento de sinais e cálculo das grandezas desejadas.
  - Interface com o utilizador.
  - Armazenamento de dados.
  - Comunicações com o exterior.

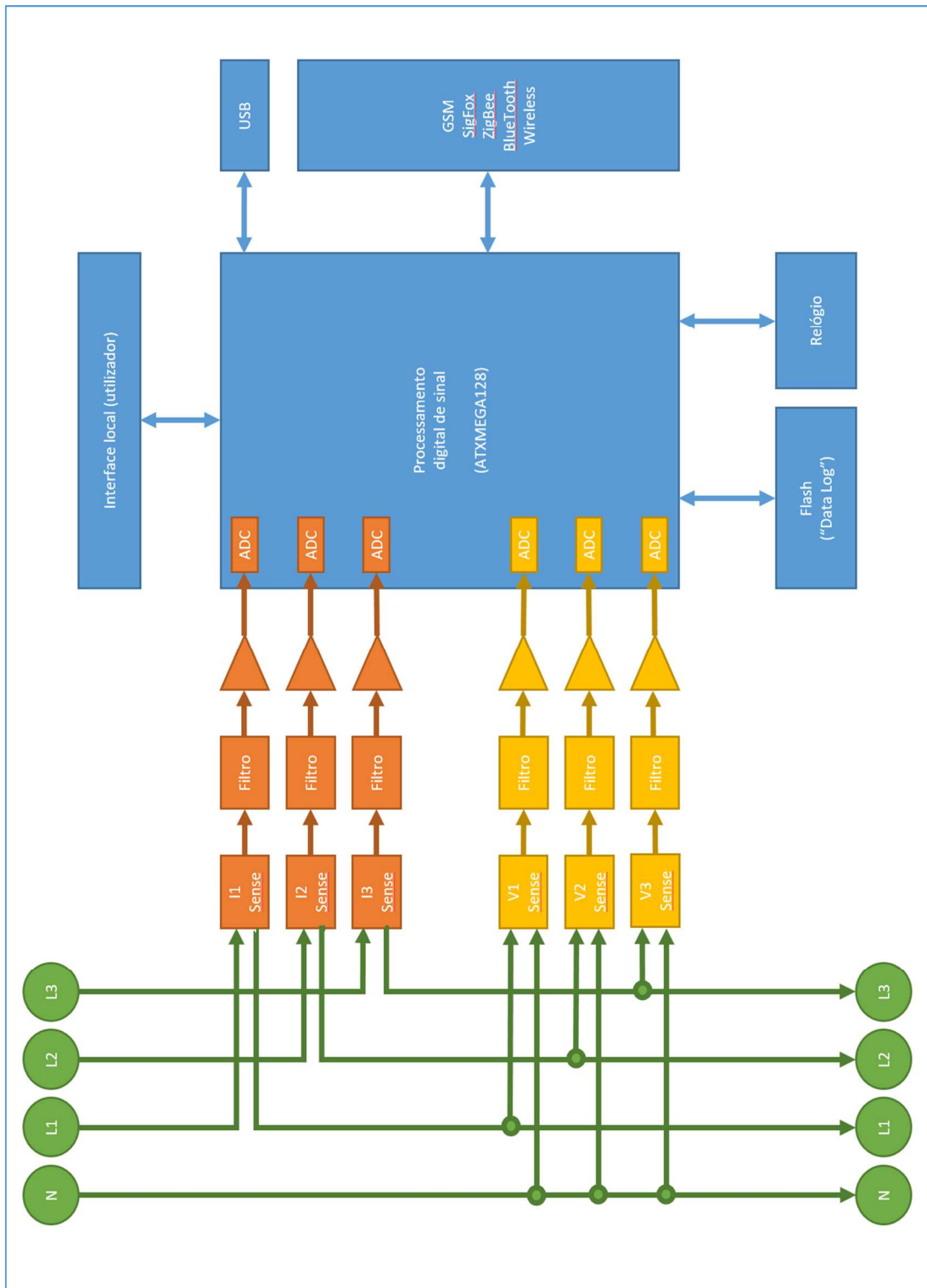


Figura 1 Diagrama geral de blocos

## 2.1. CIRCUITO DE CORRENTE

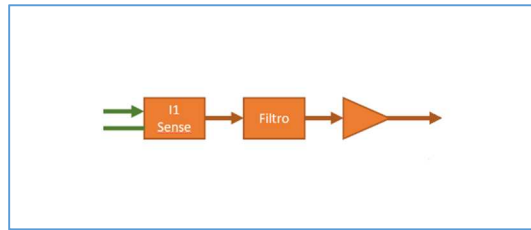


Figura 2 Diagrama de blocos das entradas de corrente

Para que este circuito cumpra a sua função, necessita de algum tipo de sensor capaz de converter uma corrente numa tensão proporcional a essa mesma corrente.

Existem vários tipos de sensor de corrente que poderiam ser utilizados, no entanto optou-se por utilizar um sensor de efeito de Hall, pelo seu baixo custo e razoável precisão.

Em 1889, Edwin Hall identificou uma propriedade em condutores elétricos que, sendo submetidos a um campo magnético e atravessados por uma corrente elétrica, é gerada uma tensão perpendicular ao campo magnético a que está submetido e a corrente que o atravessa. Esta tensão é ainda proporcional a intensidade do campo magnético, tal como representado na figura 3.

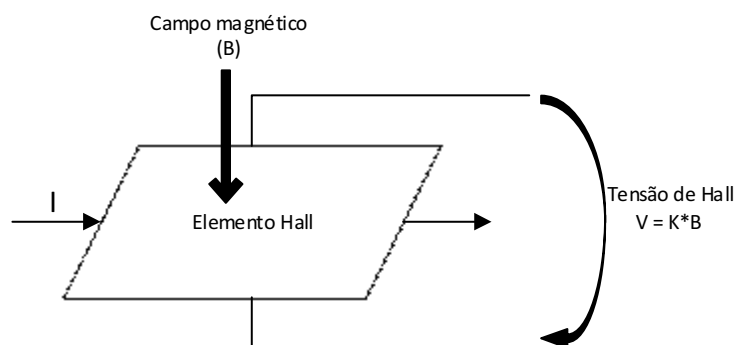
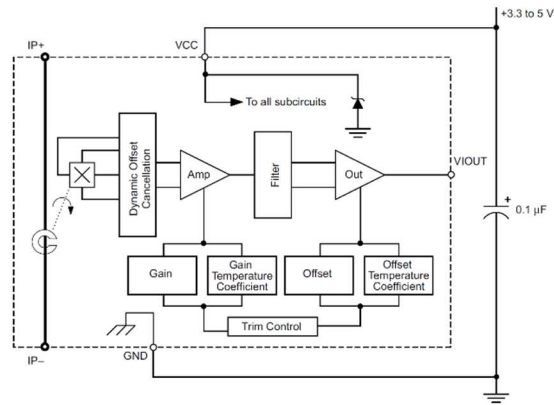


Figura 3 Efeito de Hall

Este efeito tem várias aplicações práticas, sendo uma delas permitir a medição de correntes elétricas sem necessidade de contacto ou interrupção do circuito elétrico.

Estes sensores usam o campo elétrico gerado pela passagem da corrente elétrica num condutor para gerar a tensão de Hall no sensor, essa tensão é depois amplificada, filtrada e disponibilizada na sua saída, tal como pode ser verificado na figura 4 representativa do sensor de corrente ACS754, fabricado pela Allegro e usado neste projeto.



**Figura 4 Diagrama de blocos ACS754**

Para cumprir as especificações relativas a corrente máxima (30A RMS), deverá ser utilizado um sensor de corrente alternada que permita uma corrente máxima igual superior a 42A ( $30\sqrt{2}$ ). Optou-se por um sensor de efeito de Hall do tipo ACS754, devido ao seu baixo custo, mantendo um nível de ruído aceitáveis para as especificações do projeto, sendo que este parâmetro poderá ainda ser substancialmente melhorado através de algoritmos de processamento digital de sinal, tal como filtragem digital centrada em todas as frequências necessárias a uma correta medição.

Assim, e sendo aplicada uma corrente alternada no sensor entre -50A e + 50A , será obtido um valor de tensão a variar entre 0,0V e 5,0V. Atendendo ainda às características do conversor A/D existente no microcontrolador deste projeto, esta amplitude terá ainda que ser condicionada ao intervalo 0,0V a 1,00V. Para isso, bastará apenas um circuito resistivo divisor de tensão composto por R1, R25 e R22 na figura 5, onde a sua função de transferência é representada pela equação 1.

$$v_o = \frac{R22}{R1 + R25} * V_i \Leftrightarrow \frac{V_o}{V_i} = 0.219$$

**Equação 1**

De forma a cumprir a norma internacional IEC62053 [1], que obriga a que dispositivos de medição de energia, sejam capazes de considerar todos os harmônicos até ao 20º (50Hz a 1.000Hz), foi ainda adicionada uma pré-filtragem ao sinal de saída, na forma de um filtro passa baixo de primeira ordem, sendo para isso adicionado o condensador C2, que em conjunto com R1, R25 e R22 do anterior divisor de tensão, resulta num filtro passa baixo com frequência superior de corte nos 1100Hz para uma atenuação de -3dB.

Após modelização do sensor de corrente utilizado e aplicando esse circuito em simulador, obtêm-se os resultados apresentados nas figuras 6 e 7. Onde se pode verificar que o sinal de saída resultante está dentro do intervalo 0 a 1V, para uma corrente de entrada compreendida entre -50A a +50A.

Na figura 8 pode-se verificar a resposta em frequência do circuito de condicionamento, onde se obteve uma frequência superior de corte localizada nos 1140 Hz para uma atenuação de 3dB do sinal de entrada.

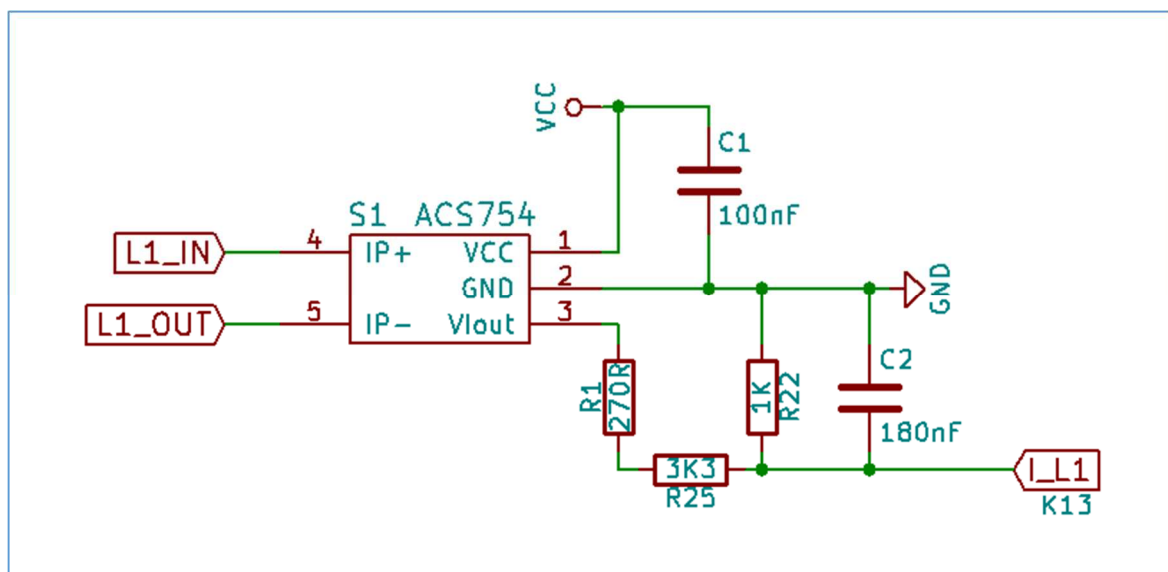
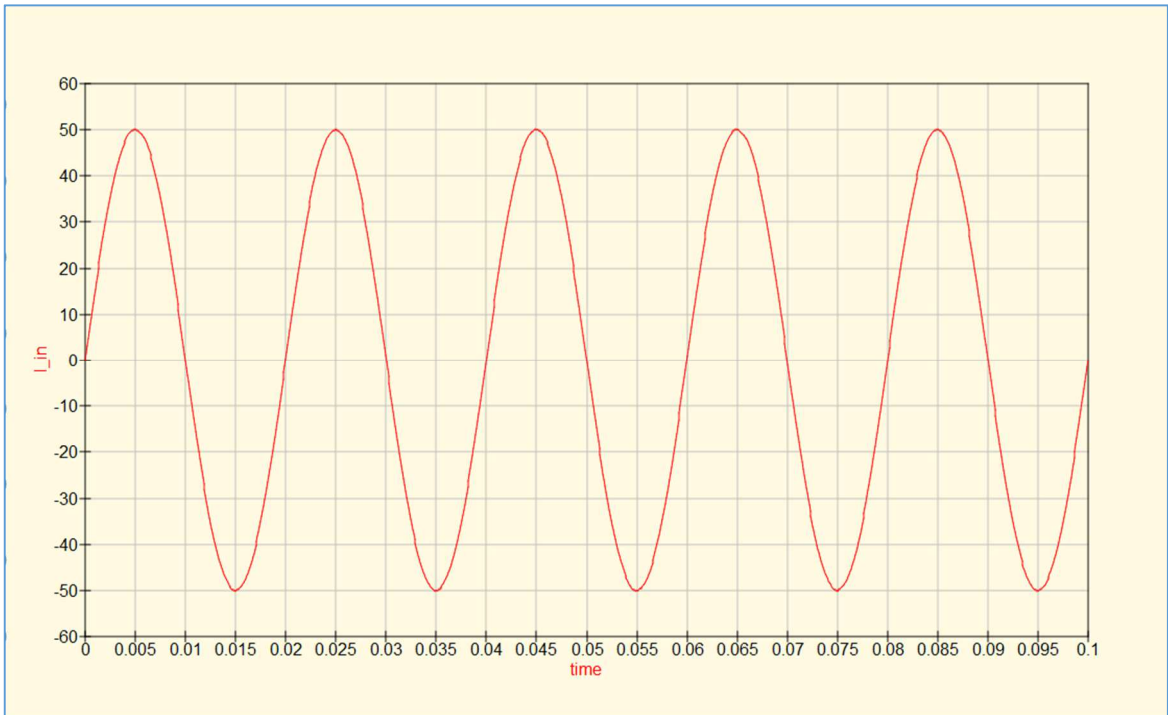
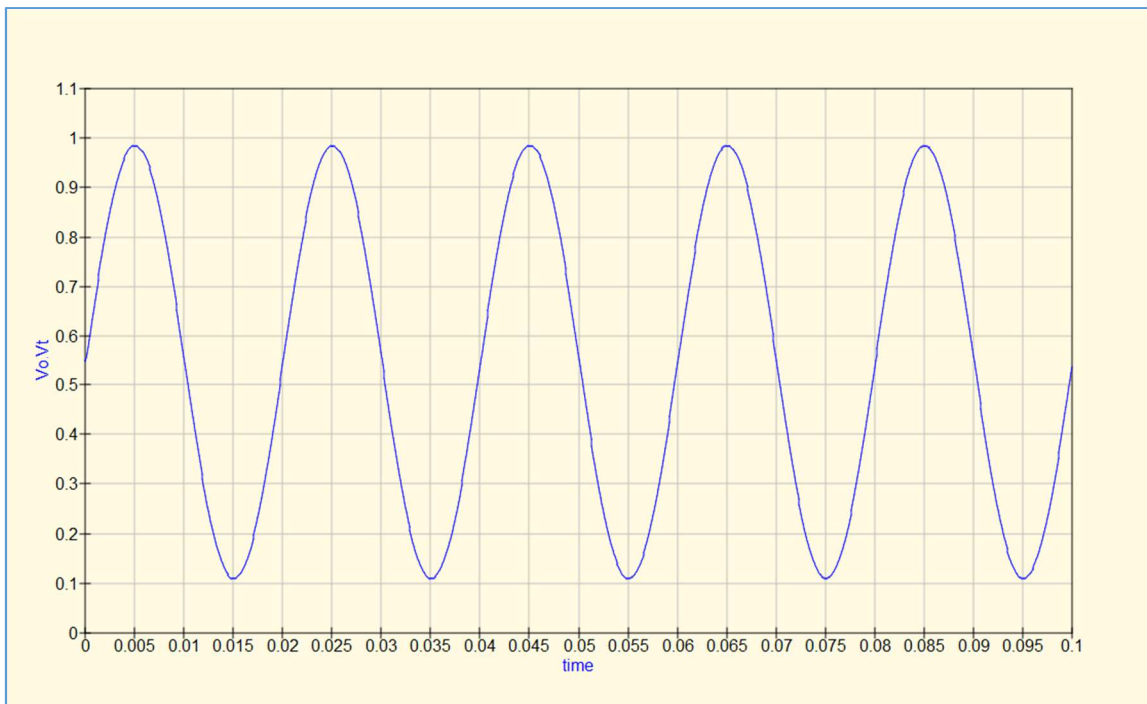


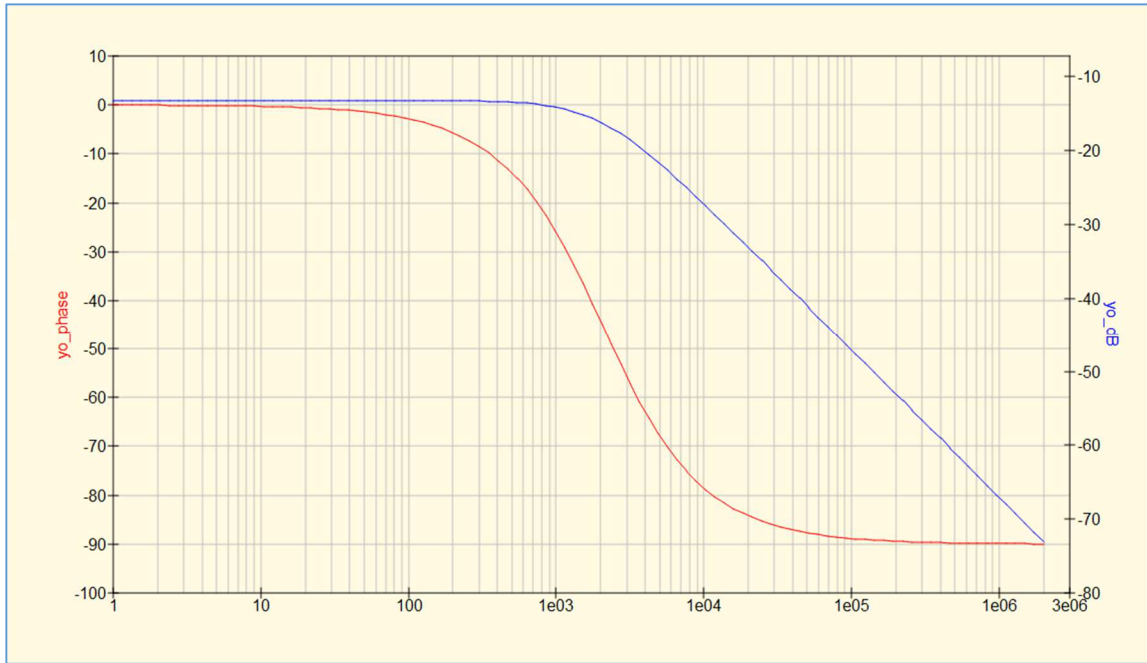
Figura 5 Esquema da entrada de corrente



**Figura 6 Corrente de entrada**



**Figura 7 Tensão de saída do circuito sensor de corrente**



**Figura 8** Resposta em frequência do circuito sensor de corrente

## 2.2. CIRCUITO DE TENSÃO

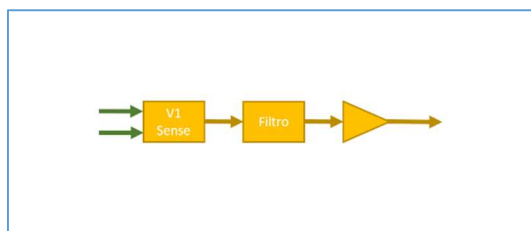


Figura 9 Diagrama de blocos das entradas de tensão

Sendo este dispositivo desenvolvido para funcionamento em rede elétrica trifásica, e os valores de tensão a medir entre cada fase e neutro terem valor de 230V Rms, existe a necessidade de condicionar estes valores às condições dos conversores A/D existentes no microcontrolador. Sendo que a amplitude de tensão máxima deverá oscilar entre 0,0V e 1,0V para valores de entrada entre -325V ( $-230\sqrt{2}$ ) e +325V ( $230\sqrt{2}$ ). Além disso, deveremos ter alguma margem de segurança para ser possível a medição desta tensão corretamente, mesmo em situações de sobretensão de 110%. Assim sendo, deve ser possível a tensão de entrada variar entre -360V e +360V, que deverá ser condicionada para valores a variar entre 0,0V e 1,0V.

Para esta operação, foi utilizado um circuito divisor resistivo de tensão composto por R4, R5 e R6 no circuito da figura 10, de forma a limitar a tensão de entrada entre valores -0.5V e +0.5V, ao que se adicionou R18 e R28 que permitirá somar 0.5V ao valor anterior, resultando num sinal a variar entre 0,0V e 1,0V.

Este circuito tem a sua função de transferência apresentado na equação 2

$$V_o = \frac{8.3}{6425.3} * V_i + 0.537$$

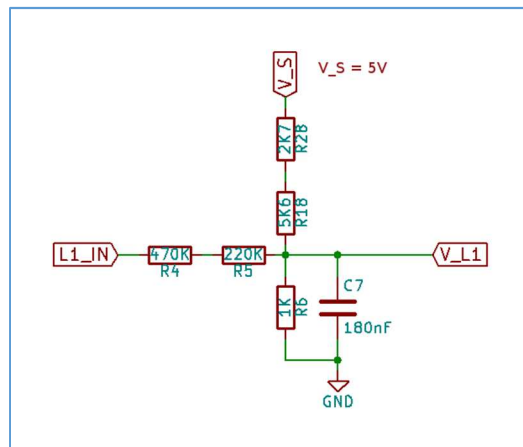
Equação 2

Além disso, e de forma a cumprir os requisitos da norma internacional IEC62053 [1], que obriga a leituras corretas até ao 20º harmónico, foi adicionado um filtro passa-baixo de primeira ordem com frequência superior de corte em 1.100Hz para uma atenuação de -3dB.

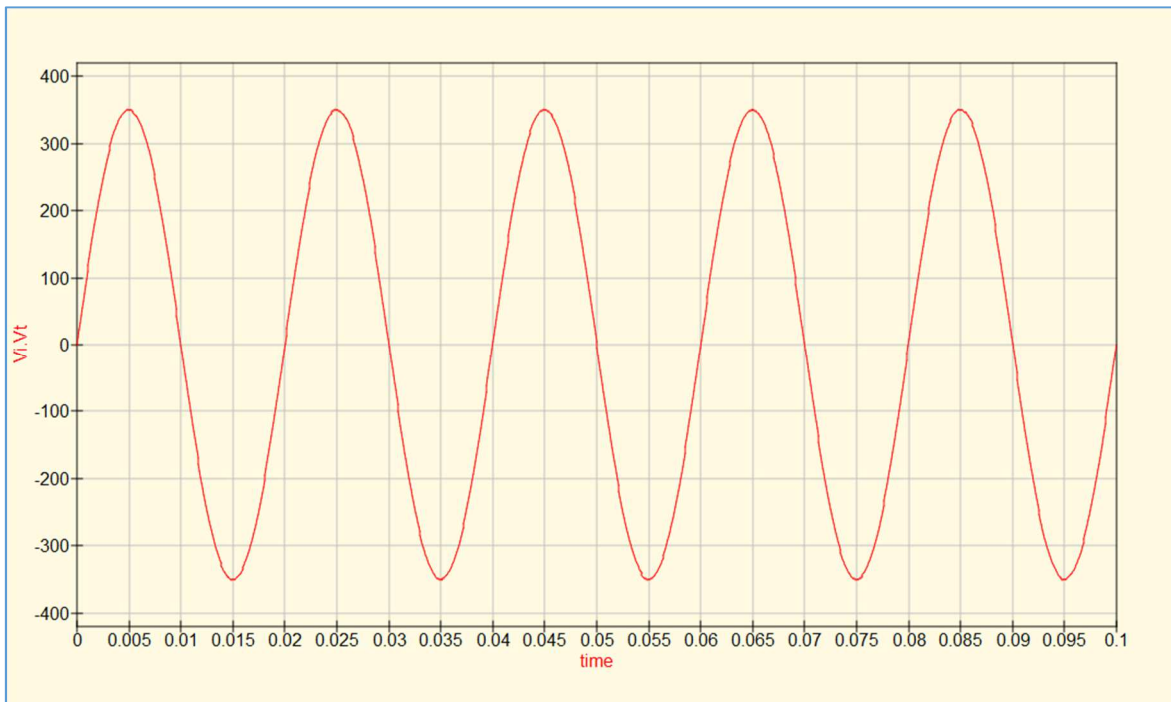
Atendendo ao circuito anterior composto por R4, R5, R6, R18 e R28, foi calculado em simulador o valor para C7 obtendo a frequência superior de corte referida anteriormente.

Fazendo a simulação do circuito completo, obtemos um sinal de saída da figura 12, quando é aplicado na sua entrada um sinal de tensão apresentado na figura 11.

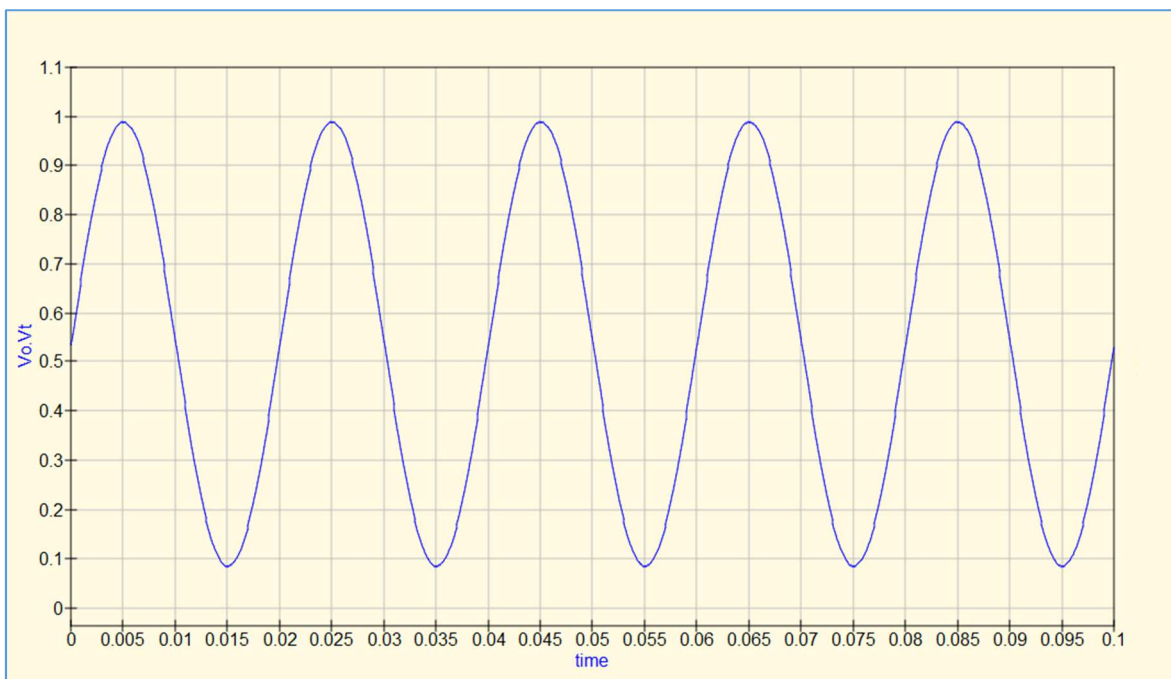
Ainda no mesmo simulador, a resposta em frequência representada na figura 13, onde se verifica uma frequência superior de corte de 1080 Hz para uma atenuação de -3dB.



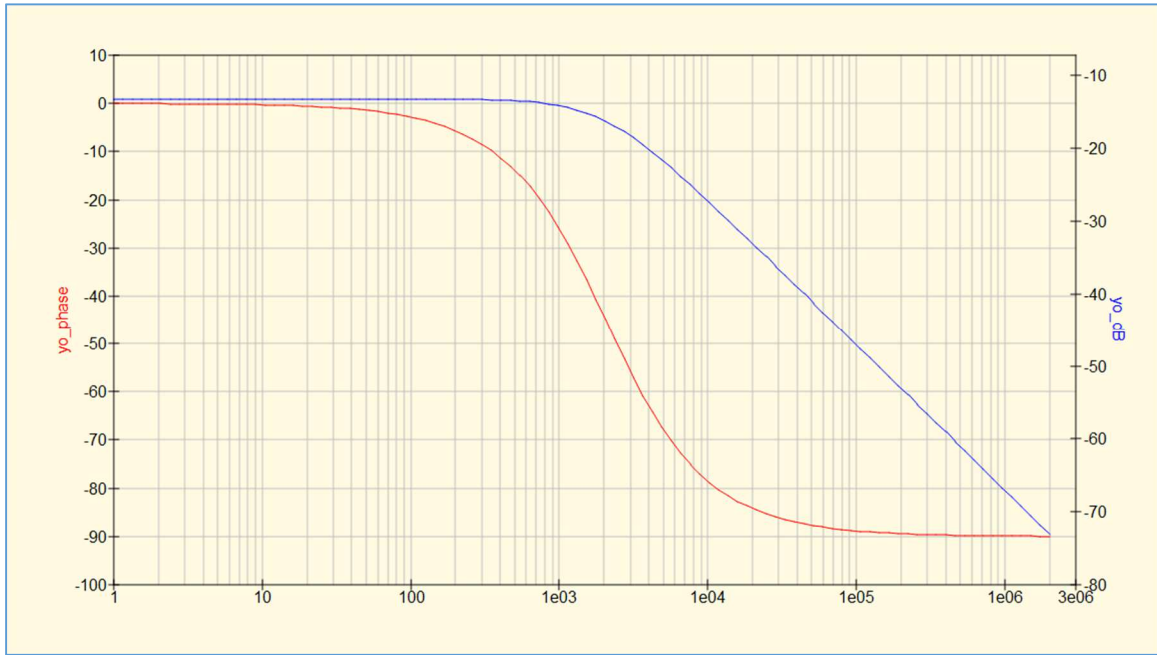
**Figura 10 Esquema da entrada de tensão**



**Figura 11 Tensão de entrada**



**Figura 12 Tensão de saída após circuito sensor de tensão**



**Figura 13 Resposta em frequência do circuito sensor de tensão**

### 2.3. PROCESSAMENTO

Para o processamento dos dados recolhidos pelos sensores de corrente e tensão, poder-se-ia recorrer a componentes dedicados a esta função. No entanto, esta opção iria introduzir um conjunto extra de componentes, assim como um custo associado superior.

A utilização desse componente não iria eliminar de qualquer forma a necessidade do uso de um microcontrolador para o tratamento, armazenamento e envio de dados.

Assim, optou-se por integrar todas essas funções num microcontrolador, reduzindo assim o número de componentes no circuito, e custo associado.

O microcontrolador deverá cumprir um conjunto de requisitos apresentados a seguir:

- Possuir pelo menos 6 entradas analógicas para a digitalização dos sinais de entrada (3 tensões e 3 correntes).
- Ter capacidade de processamento suficiente para digitalização e processamento dos sinais anteriormente referidos entre cada amostragem ( $T=0,5\text{ms}$  para  $F_s = 2\text{Khz}$ ).
- A existência de multiplicação/divisão por “*hardware*” será de grande importância para a capacidade de processamento necessária.
- Para o processamento referido anteriormente, será necessária a existência de memória de dados suficiente para implementar um conjunto de “*buffers*”, necessários aos cálculos que irão ser implementados.
- A quantidade de memória de código, deverá ser suficiente para conter todos os algoritmos necessários, assim como algumas tabelas de razoável dimensão que poderão ser necessárias.
- A implementação dos algoritmos necessários, é muito simplificada se for utilizada uma linguagem de programação de alto nível, tal como “C”, pelo que a existência de ferramentas de edição e compilação nesta linguagem e de forma gratuita, será de enorme importância.

- As ferramentas de “*hardware*” necessárias ao desenvolvimento e programação deverão ser de baixo custo ou preferencialmente gratuitas.

Atendendo a disponibilidade de microcontroladores no nosso instituto (AVR ou PIC) e ao conjunto de condicionantes referidos anteriormente. Existe uma condição, que exclui definitivamente a opção pela arquitetura PIC. Esta não possui compiladores “C” sem qualquer limitação e de forma gratuita, pelo que resta seguir pela opção AVR, onde o ambiente de desenvolvimento oficial inclui gratuitamente esse mesmo compilador sem qualquer limitação.

Uma vez seleccionada a arquitetura, e ainda entre as disponibilidades existentes, optou-se pela utilização da família XMEGA, de onde é possível seleccionar o ATxmega64A3U, ATxmega128A3U e ATxmega256A3U, cujas principais diferenças importantes para o projeto a desenvolver, são listadas na tabela 1.

	ATXMEGA64A3U	ATXMEGA128A3U	ATXMEGA256A3U
Memória de programa	64 Kbyte	128 Kbyte	256 Kbyte
Memória de dados	4 Kbyte	8 Kbyte	16 Kbyte
Memória EEPROM	2 Kbyte	2 Kbyte	4 Kbyte
ADCs	2 ADC de 12bit e 16 canais	2 ADC de 12bit e 16 canais	2 ADC de 12bit e 16 canais
Resolução dos ADCs	12 bit com ou sem sinal	12 bit com ou sem sinal	12 bit com ou sem sinal
Frequência de amostragem máxima dos ADCs	2 Msps	2 Msps	2 Msps

Frequência máxima de funcionamento	32 Mhz	32 Mhz	32 Mhz
$I^2C$	Sim	Sim	Sim
SPI	Sim	Sim	Sim
UART	Sim	Sim	Sim
Multiplicação/divisão por hardware	Sim	Sim	Sim
ICSP de baixo custo	Sim (Atmel ICE)	Sim (Atmel ICE)	Sim (Atmel ICE)

**Tabela 1 Tabela comparativo de microcontroladores**

Tendo acesso a qualquer um dos três microcontroladores apresentado, tendo em consideração a quantidade de memória SRAM disponível em cada um deles e de forma a ter margem de segurança quanto ao uso da mesma à medida que as funcionalidades são implementadas, optou-se pelo que possuía a maior capacidade.

Atendendo as funcionalidades disponíveis nos pinos de entrada e saída do microcontrolador selecionado, procedeu-se ao desenho do esquemático apresentado na figura 14.

Tendo este dispositivo capacidade de programação e depuração local, basta a adição de um conector de 6 pinos (K1) de forma a ter uma forma rápida e simples de programação e depuração do “*firmware*” que irá ser desenvolvido.

Este interface é denominado pelo fabricante por PDI (Program and Debug Interface) e necessita para além da tensão de alimentação, de acesso ao sinal de RESET (pino 57) e PDI\_DATA (pino 56).

A presença de R1, é necessária para o correto controlo do interface PDI, por parte do programador utilizado (ATMEL ICE). Complementou-se o circuito de RESET com um pequeno “jumper”, que permitirá ativar este pino de forma manual, se necessário.

Este sistema de RESET é apenas acessível durante o desenvolvimento do sistema e está localizado em local inacessível ao utilizador após fecho da caixa que integra todo o dispositivo. Não apresentando assim qualquer risco de utilização final do dispositivo.

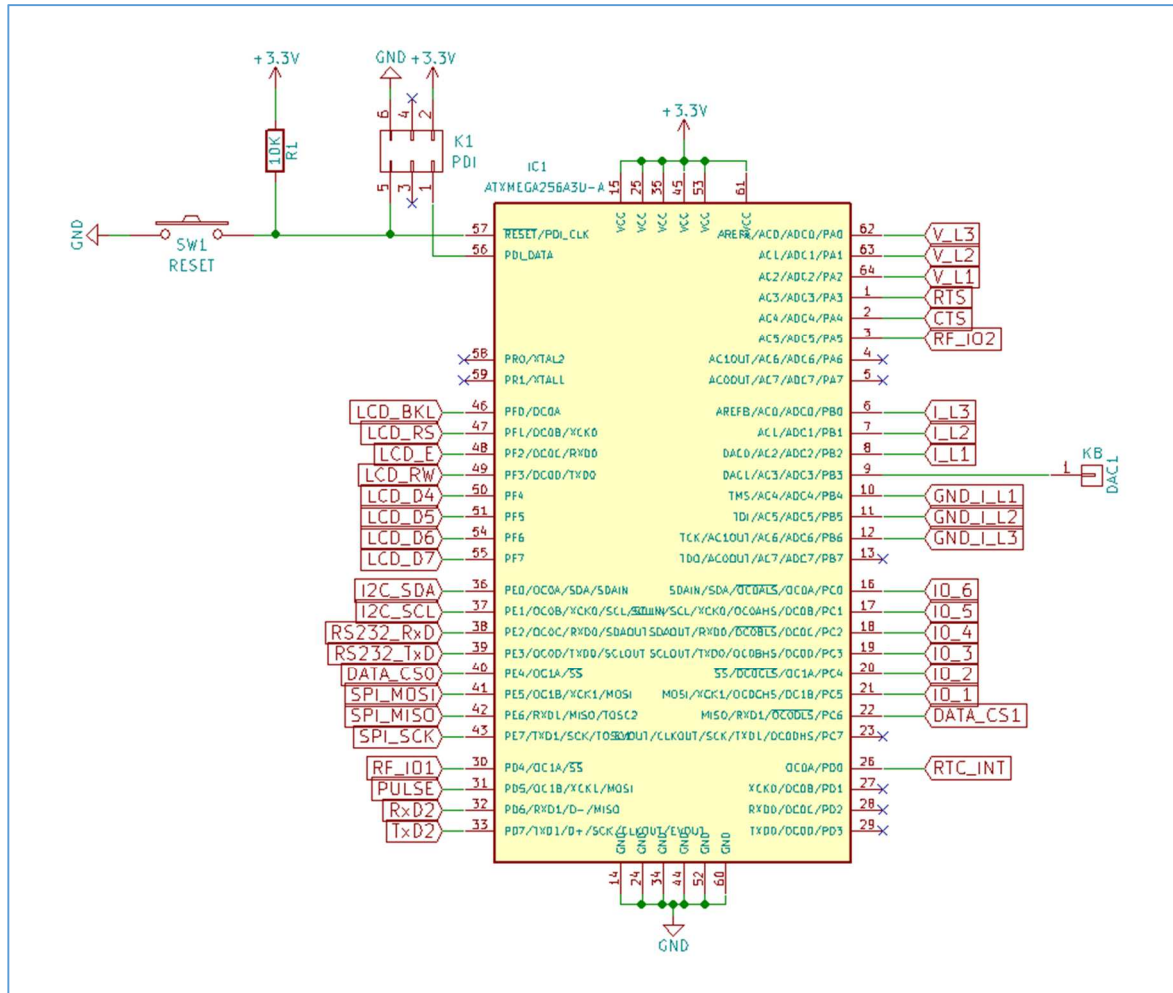


Figura 14 Circuito do microcontrolador

O dispositivo desenvolvido neste projeto, necessita digitalizar as seis variáveis fundamentais, de forma a poder calcular todos os restantes parâmetros listados nos objetivos. Assim, tendo o presente microcontrolador dois conversores A/D com várias entradas multiplexadas, foi atribuída a digitalização das três tensões num conversor e as três correntes no outro. Pelo que as tensões das fases 1, 2 e 3 digitalizadas através dos pinos de entrada e

saída PA2, PA1 e PA0 respetivamente. Sendo as correntes digitalizadas através de PB2, PB1 e PB0 para as fases 1, 2 e 3.

Tendo em consideração a complexidade dos cálculos que irão ser efetuados com cada um dos seis sinais referidos anteriormente e, estando disponível um pino de entrada e saída associado a um conversor digital/analógico interno (PB3), foi-lhe conectado um ponto de teste de forma a ser possível a depuração de rotinas que operam nos sinais digitalizados, enviando os resultados parciais ou finais para esta saída para análise com osciloscópio.

Será necessário o uso de um relógio de tempo real com interface  $I^2C$ , sendo os sinais necessários ao interface (SCL e SDA) serão atribuídos aos pinos de entrada e saída PE1 e PE0. Este relógio possui ainda uma saída (INT), que poderá ser utilizada para implementar rotinas periódicas por interrupção, pelo que foi ligada ao pino PD0.

Será necessário um interface SPI de forma a permitir a leitura e escrita de duas memórias FLASH de grande capacidade, pelo que os necessários sinais de controlo (MOSI, MISO e SCK) serão controlados pelos pinos PE5, PE6 e PE7. Sendo que os sinais de seleção da memória a usar na operação de leitura e escrita nessas memórias, serão controlados por PE4 e PC6.

Está prevista uma comunicação série assíncrona com o exterior, mas estando todo o circuito principal ligado a partes ativas da rede elétrica, é necessário isolar óticamente os sinais necessários a essa comunicação. Assim, os sinais TxD (em PE3) e RxD (em PE2) vão passar por um circuito de isolamento ótico antes de serem disponibilizados exteriormente.

Para o interface local, foi prevista a colocação de um display alfanumérico de 2 linhas por 16 caracteres cada, mais um conjunto de 5 teclas.

O LCD a usar possui dois modos de funcionamento, um em que os dados são enviados no formato de 8 bit de uma só vez em cada operação e outro em que os dados são enviados em duas operações de 4 bit cada. Esta segunda opção permite reduzir o número de pinos de entrada e saída necessários para o seu total controlo, pelo que se optou por esta segunda forma.

Para além dos quatro bit, atribuídos aos pinos PF4, PF5, PF6 e PF7, são necessários o sinal de ativação (E), atribuído ao pino de entrada e saída PF2. O sinal de leitura ou escrita no

LCD (RW), atribuído ao pino PF3. O sinal que permite seleção de registos (RS), atribuído ao pino PF1. Finalmente o sinal de controlo da retro-iluminação do display (BKL), foi atribuído ao pino de entrada e saída PF0.

De forma a permitir vários meios de envio de dados, foi previsto um interface que possua os sinais de controlo que poderão ser necessários a todos esses meios. Assim, para além da linha de transmissão (TxD) e outra de receção de dados (RxD) de forma assíncrona, necessárias à troca de dados e, como existe uma quantidade de pinos de entrada e saída do microcontrolador livres, adicionaram-se mais quatro sinais aquelas duas linhas iniciais. Foram-lhes atribuídos os nomes CTS, RTS, RF\_IO1 e RF\_IO2.

Temos então os sinais TxD, RxD, CTS, RTS, RF\_IO1 e RF\_IO2 controlados pelos pinos de entrada e saída do microcontrolador PD7, PD6, PA4, PA3, PD4 e PA5 respetivamente.

## 2.4. INTERFACE LOCAL (COM UTILIZADOR)

Este bloco poderá existir ou não no produto final, pelo que será um módulo amovível. A sua necessidade dependerá das necessidades de utilização e local onde for instalado o dispositivo.

Tem como único objetivo a fácil leitura local dos dados obtidos e, será composto por um display LCD alfanumérico de 2 linhas, 16 caracteres por linha e 5 teclas.

Por questões de segurança e integridade dos dados recolhidos pelo dispositivo, não será possível através deste interface alterar qualquer parâmetro interno.

Para o circuito display LCD foi tomada em consideração as diferentes formas de ligação de displays semelhantes de vários fabricantes. Daí a existência LCD1 e LCD2 no esquema da figura 15, que permitirá usar dois tipos mais comuns de LCD existentes no mercado e, que apesar de serem controlados de forma idêntica, têm forma de ligação elétrica diferente.

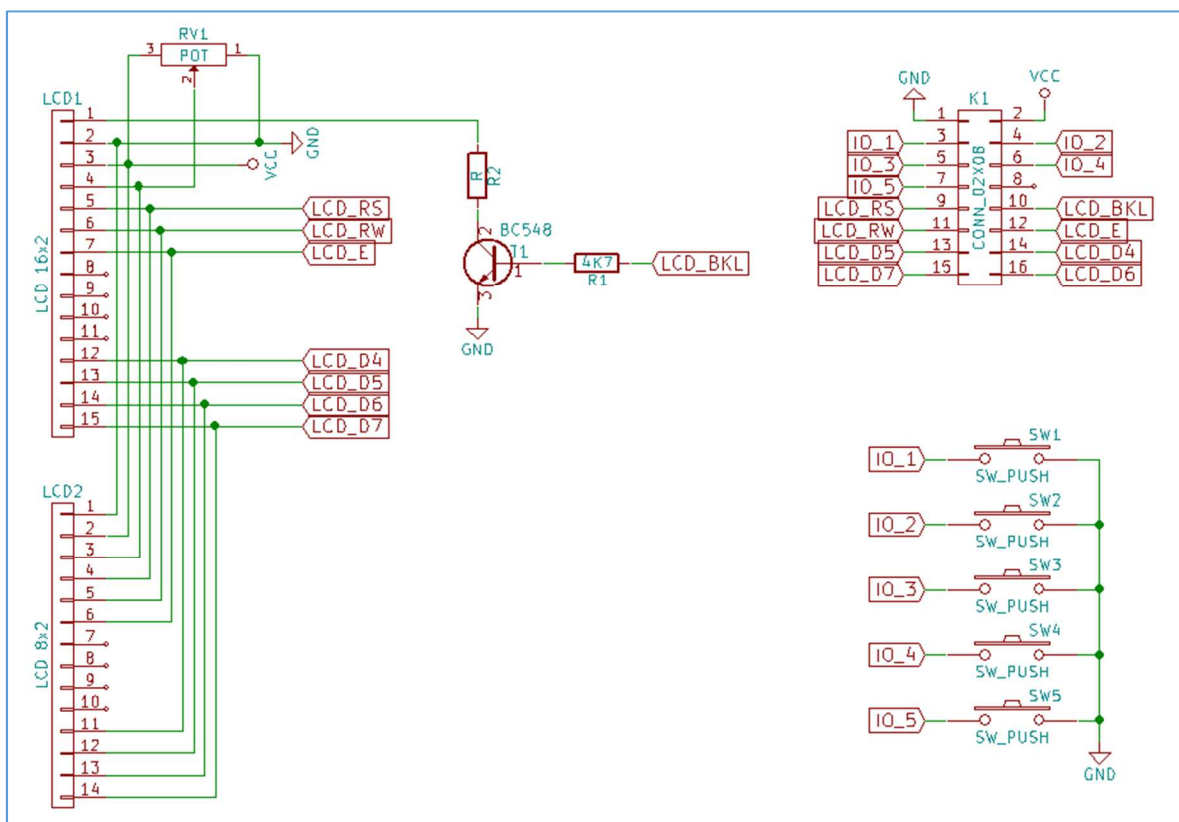


Figura 15 Circuito elétrico do interface homem/máquina

Este circuito está colocado numa placa de circuito impresso independente do restante hardware do projeto. Dependendo da aplicação final do dispositivo, poderá não ser necessária a sua existência, pelo que desta forma será simples a construção do equipamento contendo ou não esta opção.

A placa de circuito impresso que o irá conter, será conectada as restantes através do conector K1, onde estão presentes todas as linhas de controlo necessárias, bem como a tensão de alimentação.

As 5 teclas locais serão assim controladas pelos sinais IO\_1, IO\_2, IO\_3, IO\_4 e IO\_5, sendo os restantes sinais destinados ao controlo do display LCD.

O display LCD por sua vez, terá duas formas de ligação em função do modelo ou fabricante, pelo que será soldado em LCD1 ou LCD2.

As necessidades de corrente para a retro-iluminação do LCD (40mA) são superiores a capacidade dos pinos de entrada e saída do microcontrolador (25mA), pelo que é necessário adicionar T1, R1 e R2 de forma a que sempre que o sinal LCD\_BKL vai ao nível lógico “1”, o transistor entra em condução e fecha o circuito de retro-iluminação, sendo a corrente que o atravessa limitada pelo valor de R2.

Neste circuito existe ainda um potenciometro (RV1) montado em forma de divisor de tensão, que irá permitir um ajuste do contraste no display.

## 2.5. RELÓGIO

O relógio de tempo real (RTC), tem como objetivo fornecer ao dispositivo uma fonte precisa para a data e hora, necessários ao armazenamento e envio de dados obtidos, sendo o esquema elétrico apresentado na figura 16.

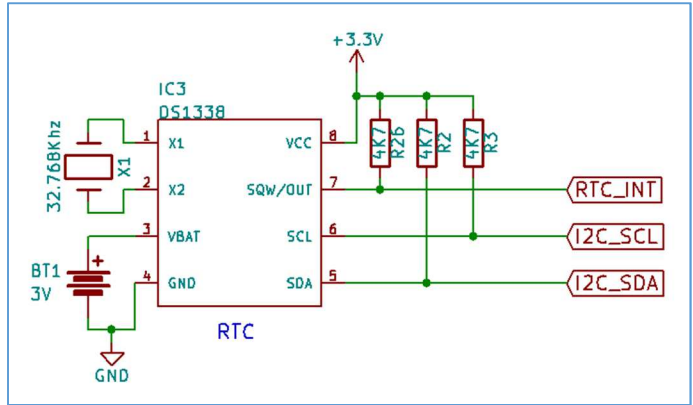
Este componente, será baseado no circuito integrado DS1338 (IC3) do fabricante MAXIM Integrated™ e contará com uma pilha de lítio do tipo CR2032 (BT1) para o manter em funcionamento em caso de falha de tensão da rede elétrica. Segundo o fabricante deste componente eletrônico, uma pilha deste tipo, será suficiente para manter o circuito integrado em funcionamento correto durante vários anos.

Este componente é necessário para fornecer de forma exata informação de data e hora sempre que necessário. Mesmo que exista um corte de energia, essa mesma informação manter-se-a correta pelo recurso a energia fornecida pela pilha de lítio para funcionamento do relógio presente em IC3.

Para completar o circuito, é necessário ainda o uso de um cristal de 32.768Khz, que será internamente usado como fonte precisa para contagem do tempo. As resistências R26, R2 e R3 garantem o valor de tensão para o nível lógico “1” em 3.3V nos os sinais SCL, SDA e INT.

Através de uma comunicação série síncrona do tipo  $I^2C$  com a unidade central de processamento, estará sempre disponível a seguinte informação sobre data e hora em qualquer momento :

- Data
  - Ano
  - Mês
  - Dia do mês
- Hora
  - Hora
  - Minutos
  - Segundos



**Figura 16 Circuito RTC**

## 2.6. MEMÓRIA FLASH

Bloco local de armazenamento de grande capacidade, onde serão armazenadas todas as variáveis obtidas periodicamente por este dispositivo ao longo de um período alargado de tempo, sendo o seu circuito apresentado na figura 17.

Aqui serão armazenados periodicamente os dados recolhidos pelo contador. O período com que estes dados são calculados e armazenados, irão definir qual a capacidade temporal possível manter em qualquer momento.

No final de cada período de leituras, serão armazenados nesta memória os seguintes dados:

- Data e hora da atualização.
- Frequência máxima, mínima e média.
- Tensão máxima, mínima e média em cada fase.
- Corrente máxima, mínima e média em cada fase.
- Fator de potência máximo, mínimo e médio em cada fase.
- Energia ativa e reativa medidas até ao momento da atualização em cada fase.

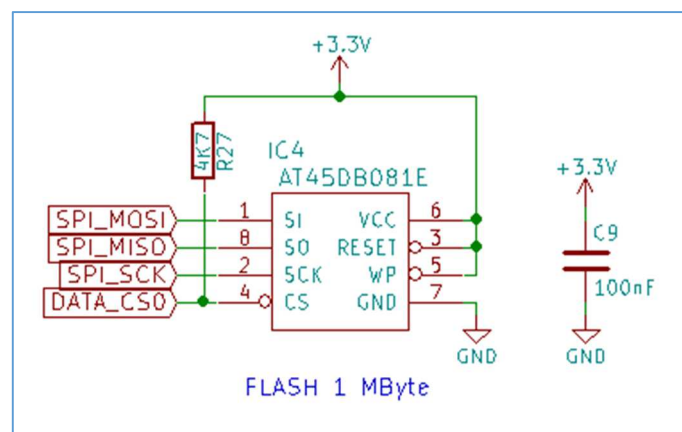


Figura 17 Circuito de armazenamento FLASH

## **2.7. INTERFACE SÉRIE COM ISOLAMENTO ÓTICO**

Interface com isolamento ótico, que permitirá as comunicações de forma bi-direcional entre este dispositivo e um computador para calibração, configuração e acesso aos dados recolhidos pelo dispositivo.

Uma vez que o equipamento aqui desenvolvido, opera ligado diretamente à rede elétrica, é necessário garantir um isolamento elétrico entre o equipamento e qualquer dispositivo que seja ligado ao conector K8 para executar alguma das operações indicadas anteriormente.

Sendo esta comunicação assíncrona, simplificará o circuito de isolamento ótico, bastando associar um otoacoplador a cada uma das linhas de comunicação (TxD e RxD).

Assim, o sinal proveniente do microcontrolador TxD é aplicado ao LED emissor existente no interior do otoacoplador U2, sendo a corrente nesse LED limitada por R14. A cadência de sinais em TxD irá ser traduzida por uma cadência de LED ligado ou desligado, que será detetado pelo foto-transistor existente no mesmo componente, convertendo de novo a sequencia de LED ligado e desligado em novo sinal elétrico semelhante ao que saiu do microcontrolador, sendo agora disponibilizado no conector K8.

O mesmo irá acontecer com o sinal RxD, mas agora em sentido contrário, de K8 para o microcontrolador.

Como se pode verificar o oto-acoplador possui uma saída em coletor aberto, pelo que é necessário adicionar uma resistência entre cada uma dessas saídas e a tensão que representa o nível lógico “1” em cada lado do circuito.

Utilizando este tipo de componente, garante um bom isolamento elétrico entre ambos os circuitos, pois apenas a luz é utilizada para converter os sinais entre ambos.

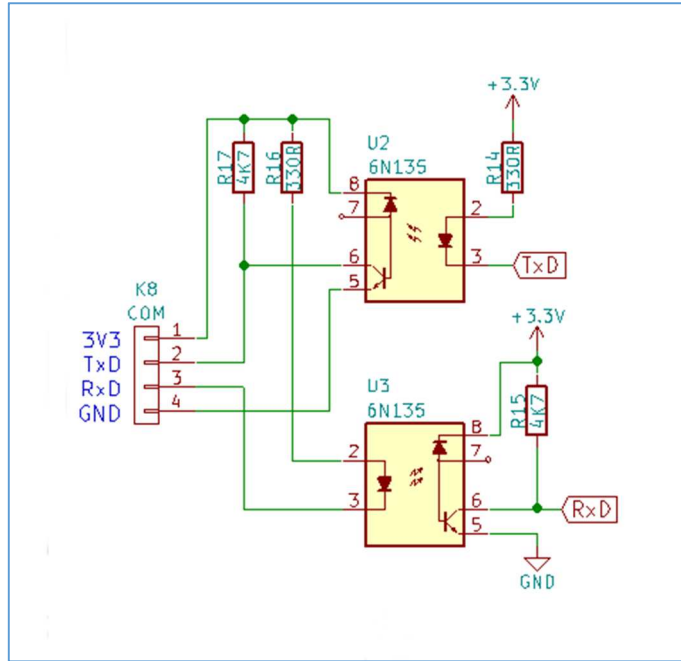


Figura 18 Circuito de interface série

## 2.8. COMUNICAÇÃO COM SERVIDOR REMOTO

Trata-se de um módulo independente que poderá existir ou não, e que permitirá ao dispositivo enviar os dados recolhidos por várias formas de comunicação sem fio.

No decorrer deste projeto, foi apenas criado o módulo de comunicação IEEE 802.11 b/g/n (“WiFi”), que permitirá ao dispositivo utilizar o acesso a internet existente na grande maioria das instalações domésticas para enviar os dados recolhidos para um servidor remoto.

O módulo usado para implementar esta forma de comunicação entre o microcontrolador central e a internet, é baseado no ESP8266, que neste módulo (ESP-12) está associado a uma memória SPI de grande capacidade e a restantes componentes que lhe permitem construir um transceiver “wireless” de acesso a internet pela norma IEEE 802.11 b/g/n.

O “firmware” existente neste módulo contém todas as funções necessárias para ligação e acesso a internet, disponibilizando um conjunto de comandos AT, que permitem de forma muito simplificada a qualquer dispositivo com uma simples comunicação assíncrona, enviar e receber dados via internet.

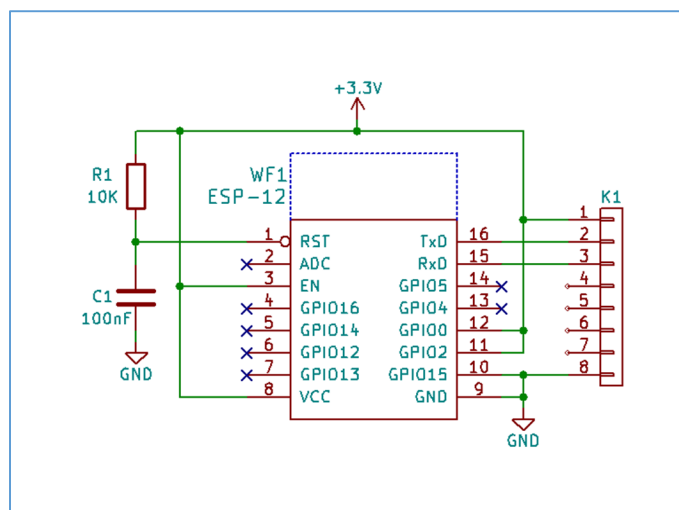


Figura 19 Módulo IEEE 802.11 b/g/n





### 3. *FIRMWARE*

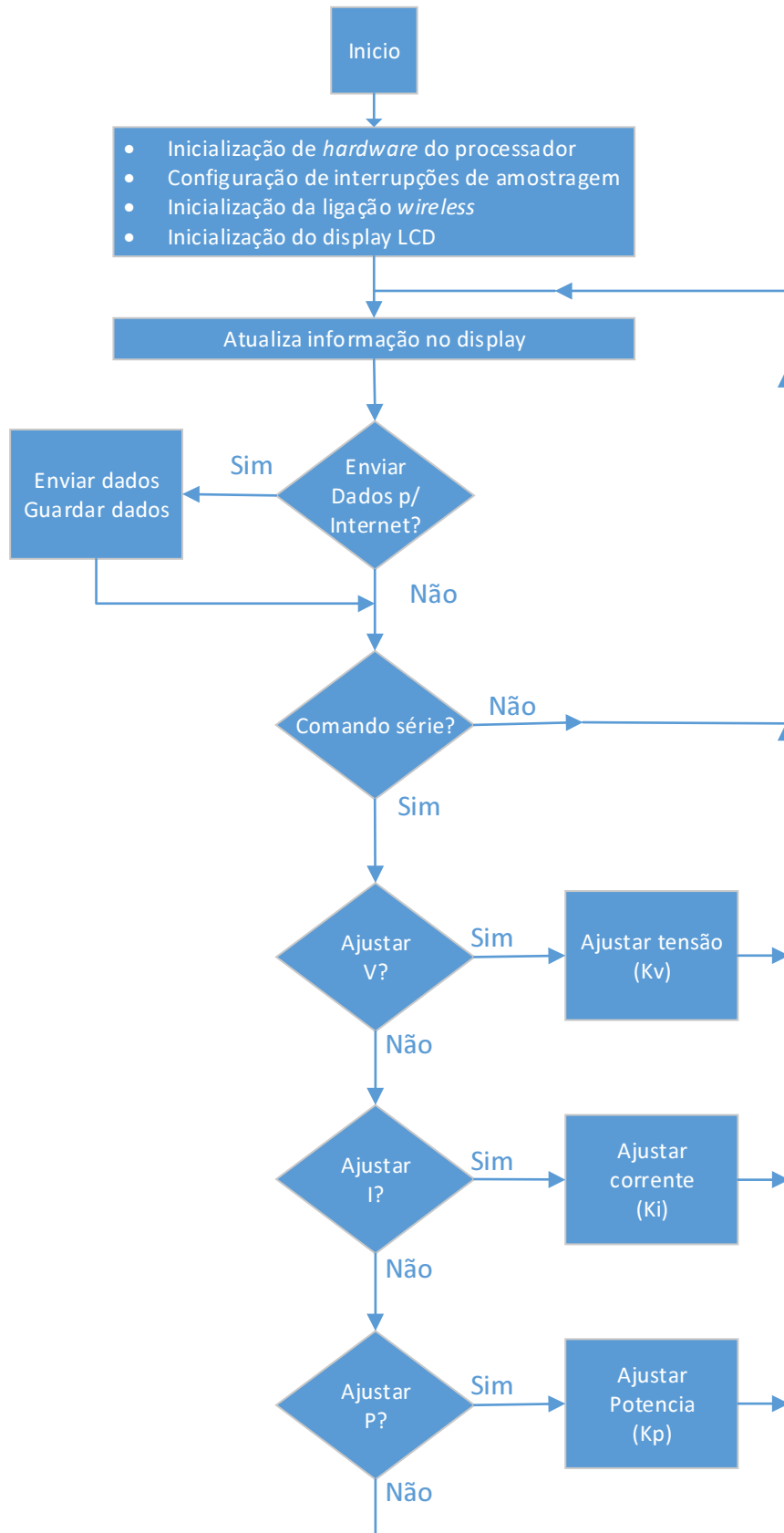
Um componente importante, será o programa que irá estar constantemente a ser executado pelo microcontrolador existente no dispositivo.

Este “*firmware*” será responsável pelo controlo de todo o “*hardware*” existente, bem como pelo processamento das seis variáveis de entrada (três tensões e três correntes), de forma a obter todas as grandezas desejadas.

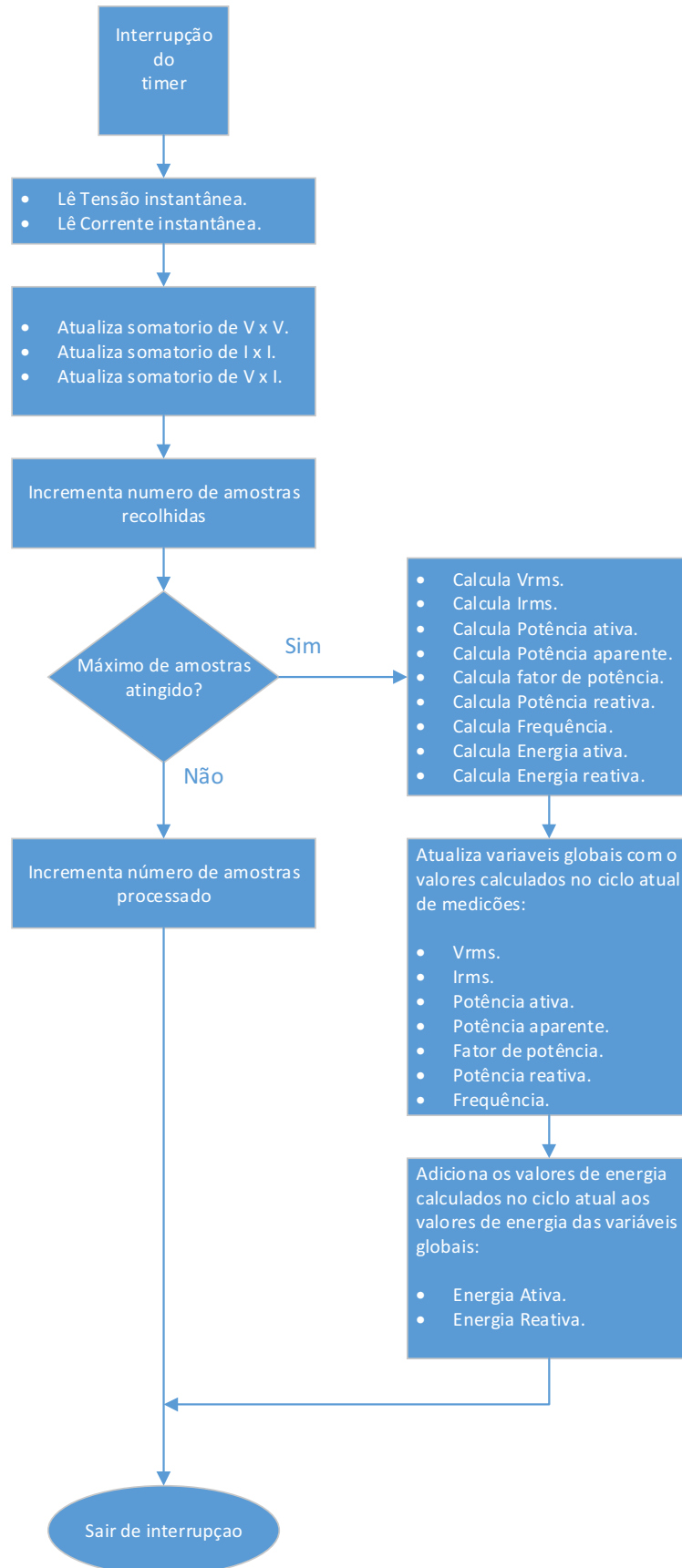
Para simplificação do desenvolvimento do “*firmware*”, foram criados dois fluxogramas que representam de forma simplificada o funcionamento do “*firmware*” desenvolvido para este dispositivo.

O primeiro fluxograma, apresentado na figura 20, representa o programa principal, responsável por todo o interface com display, comunicação “wireless” e interface com computador local.

O segundo fluxograma, apresentado na figura 21, representa de forma simplificada a parte do programa que é executado periodicamente a uma frequência de 2050 Hz para amostragem de correntes e tensões e cálculo das grandezas necessárias ao projeto.



**Figura 20 Fluxograma do programa principal**



**Figura 21 Fluxograma da rotina de interrupção**

### 3.1. REPRESENTAÇÃO E CÁLCULO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

Não é possível com este microcontrolador, executar cálculos com recurso a unidade de vírgula flutuante, pelo que é necessário recorrer a uma mudança de escala de todas as grandezas necessárias, de forma a obter as suas representações em valores inteiros de 16, 32 ou 64 bit, reduzindo assim muito significativamente o tempo de execução de cada operação aritmética.

Seria no entanto possível utilizar representação e cálculo com recurso a bibliotecas que implementam as operações necessárias em vírgula flutuante sem que exista essa unidade em “*hardware*”. No entanto, sendo que essas operações são implementadas na forma de *software*, traduzem-se em longos tempos de execução, o que não é compatível com a quantidade de cálculos necessários ao funcionamento deste dispositivo em intervalos de tempo muito curtos.

Tomemos um exemplo hipotético de cálculo de uma potência aparente  $S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$ , onde  $V_{RMS} = 231.5V$  e  $I_{RMS} = 2.5A$ , resulta em  $S = 578.75 VA$ .

Recorrendo a vírgula flutuante implementada em “*software*”, seriam usados os operandos 231.5 e 2.5, resultando no valor 578.75 após 12.5  $\mu s$ .

Recorrendo a representação em valores inteiros, podemos representar a tensão eficaz como 2315 e a corrente eficaz como 25. Ambos representáveis em valores inteiros de 16 bit, resultando no valor 57875, também este representável em valor inteiro de 16 bit.

Uma operação de multiplicação de dois valores inteiros de 16bit com resultado em 16 bit demora apenas 62.5 ns. Obtendo assim ganho em velocidade na ordem de 20 vezes.

Tendo esta forma de cálculo em consideração, os valores adquiridos periodicamente dos conversores A/D são utilizados sem que seja feita qualquer conversão para os valores reais das grandezas por eles representados. Sendo esta digitalização feita a uma frequência de amostragem de 2050 Hz e uma resolução de 12 bit.

### 3.2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAL

Numa primeira fase de processamento das variáveis de entrada de tensão e corrente, os valores obtidos nos conversores A/D deveriam passar por várias filtros digitais, de forma a obter as componentes de corrente e tensão na frequência fundamental, assim como nos 19 harmônicos seguintes. Eliminando assim uma grande parte do ruído que possa existir e que poderia de alguma forma afetar os resultados a alcançar.

Existem dois grandes grupos de filtros digitais que se poderiam utilizar para o fim em causa. Sendo eles não recursivos FIR ou recursivos IIR.

A primeira hipótese resultaria em cálculos simples mas usando uma considerável quantidade de memória e de coeficientes/operações de forma a obter filtros com as características desejadas o que os tornaria impraticável a sua aplicação neste projeto, mas que teria a sua representação na forma da equação 3.

$$Y(n) = \sum_{i=0}^N b_i * X(n - i)$$

**Equação 3**

A segunda hipótese e por se tratar de um filtro recursivo, tem matematicamente uma forma aparentemente mais complexa, mas resulta num conjunto de coeficientes/operações bem mais pequeno e conseqüentemente de cálculo muito mais rápido e recorrendo a menor quantidade de memória de dados por utilizar “*buffers*” bem mais pequenos. Este tipo de filtro, pode ser representado pela equação 4.

$$Y(n) = \frac{1}{a_0} * \left( \sum_{i=0}^N a_i * X(n - i) - \sum_{j=1}^M b_j * Y(n - j) \right)$$

**Equação 4**

Após a seleção do tipo de filtro, é necessário definir as suas características e proceder ao seu cálculo.

Para o cálculo dos coeficientes necessários, foi utilizada uma ferramenta gratuita, “IIR Filter Design Tool”, onde foram introduzidos os dados referentes aos 20 filtros necessários.

Os filtros digitais a utilizar, serão Chebishev tipo 2, de quarta ordem, sendo as principais características listadas na tabela 2.

<b>Filtro</b>	<b>Frequência inferior de corte com atenuação de -30dB</b>	<b>Frequência central</b>	<b>Frequência superior de corte com atenuação de -30dB</b>	<b>Frequência de amostragem</b>
1	45 Hz	50 Hz	55 Hz	2050 Hz
2	95 Hz	100 Hz	105 Hz	2050 Hz
3	145 Hz	150 Hz	155 Hz	2050 Hz
4	195 Hz	200 Hz	205 Hz	2050 Hz
5	245 Hz	250 Hz	255 Hz	2050 Hz
6	295 Hz	300 Hz	305 Hz	2050 Hz
7	345 Hz	350 Hz	355 Hz	2050 Hz
8	395 Hz	400 Hz	405 Hz	2050 Hz
9	445 Hz	450 Hz	455 Hz	2050 Hz
10	495 Hz	500 Hz	505 Hz	2050 Hz
11	545 Hz	550 Hz	555 Hz	2050 Hz
12	595 Hz	600 Hz	605 Hz	2050 Hz
13	645 Hz	650 Hz	655 Hz	2050 Hz
14	695 Hz	700 Hz	705 Hz	2050 Hz
15	745 Hz	750 Hz	755 Hz	2050 Hz

16	795 Hz	800 Hz	805 Hz	2050 Hz
17	845 Hz	850 Hz	855 Hz	2050 Hz
18	895 Hz	900 Hz	905 Hz	2050 Hz
19	945 Hz	950 Hz	955 Hz	2050 Hz
20	995 Hz	1000 Hz	1005 Hz	2050 Hz

**Tabela 2 Características dos filtros FIR a implementar**

Tendo-se obtido os coeficientes apresentados na tabela 3, para a implementação dos respectivos filtros digitais.

<b>Filtro</b>	<b>Coefficientes</b>	
1	a[n]	[0.03084 -0.2436 0.845 -1.681 2.097 -1.681 0.845 -0.2436 0.03084]
	b[n]	[1 -7.854 27.08 -53.52 66.34 -52.8 26.35 -7.541 0.9473]
2	a[n]	[0.03084 -0.235 0.7949 -1.558 1.934 -1.558 0.7949 -0.235 0.03084]
	b[n]	[1 -7.576 25.47 -49.61 61.19 -48.94 24.79 -7.275 0.9473]
3	a[n]	[0.03084 -0.2209 0.7167 -1.371 1.689 -1.371 0.7167 -0.2209 0.03084]
	b[n]	[1 -7.122 22.97 -43.65 53.42 -43.07 22.35 -6.839 0.9473]
4	a[n]	[0.03084 -0.2016 0.6176 -1.143 1.393 -1.143 0.6176 -0.2016 0.03084]
	b[n]	[1 -6.5 19.79 -36.4 44.07 -35.91 19.26 -6.242 0.9473]
5	a[n]	[0.03084 -0.1776 0.5068 -0.9007 1.084 -0.9007 0.5068 -0.1776 0.03084]

	b[n]	[1 -5.726 16.24 -28.68 34.3 -28.29 15.81 -5.498 0.9473]
6	a[n]	[0.03084 -0.1494 0.3947 -0.6672 0.794 -0.6672 0.3947 -0.1494 0.03084]
	b[n]	[1 -4.818 12.65 -21.25 25.12 -20.96 12.31 -4.626 0.9473]
7	a[n]	[0.03084 -0.1178 0.2918 -0.4602 0.5474 -0.4602 0.2918 - 0.1178 0.03084]
	b[n]	[1 -3.796 9.351 -14.66 17.31 -14.46 9.101 -3.645 0.9473]
8	a[n]	[0.03084 -0.08332 0.2076 -0.2877 0.3598 -0.2877 0.2076 - 0.08332 0.03084]
	b[n]	[1 -2.686 6.652 -9.161 11.38 -9.038 6.474 -2.579 0.9473]
9	a[n]	[0.03084 -0.04693 0.1499 -0.1474 0.2388 -0.1474 0.1499 - 0.04693 0.03084]
	b[n]	[1 -1.513 4.804 -4.694 7.553 -4.631 4.676 -1.453 0.9473]
10	a[n]	[0.03084 -0.009441 0.1242 -0.02834 0.1867 -0.02834 0.1242 - 0.009441 0.03084]
	b[n]	[1 -0.3044 3.981 -0.9026 5.908 -0.8905 3.874 -0.2923 0.9473]
11	a[n]	[0.03084 0.02827 0.1328 0.08619 0.2041 0.08619 0.1328 0.02827 0.03084]
	b[n]	[1 0.9114 4.257 2.745 6.456 2.708 4.144 0.8751 0.9473]
12	a[n]	[0.03084 0.06532 0.175 0.214 0.2907 0.214 0.175 0.06532 0.03084]
	b[n]	[1 2.106 5.609 6.816 9.197 6.724 5.459 2.022 0.9473]
13	a[n]	[0.03084 0.1008 0.2468 0.3696 0.4456 0.3696 0.2468 0.1008 0.03084]
	b[n]	[1 3.251 7.909 11.77 14.09 11.61 7.698 3.122 0.9473]
14	a[n]	[0.03084 0.134 0.3415 0.5597 0.6641 0.5597 0.3415 0.134 0.03084]

	b[n]	[1 4.32 10.94 17.82 21.01 17.58 10.65 4.148 0.9473]
15	a[n]	[0.03084 0.164 0.4503 0.7815 0.935 0.7815 0.4503 0.164 0.03084]
	b[n]	[1 5.287 14.43 24.89 29.58 24.55 14.04 5.077 0.9473]
16	a[n]	[0.03084 0.1902 0.563 1.022 1.238 1.022 0.563 0.1902 0.03084]
	b[n]	[1 6.131 18.04 32.55 39.17 32.11 17.56 5.887 0.9473]
17	a[n]	[0.03084 0.2119 0.6692 1.261 1.545 1.261 0.6692 0.2119 0.03084]
	b[n]	[1 6.831 21.44 40.14 48.87 39.6 20.87 6.559 0.9473]
18	a[n]	[0.03084 0.2286 0.7589 1.471 1.82 1.471 0.7589 0.2286 0.03084]
	b[n]	[1 7.371 24.32 46.84 57.57 46.21 23.67 7.078 0.9473]
19	a[n]	[0.03084 0.24 0.8238 1.629 2.028 1.629 0.8238 0.24 0.03084]
	b[n]	[1 7.738 26.4 51.86 64.14 51.16 25.69 7.43 0.9473]
20	a[n]	[0.03084 0.2458 0.8579 1.713 2.14 1.713 0.8579 0.2458 0.03084]
	b[n]	[1 7.924 27.49 54.54 67.69 53.81 26.76 7.608 0.9473]

**Tabela 3 Coeficientes obtidos para os filtros necessários**

De forma a evitar o recurso a cálculos em vírgula flutuante, é necessária a conversão dos valores obtidos anteriormente para valores inteiros de 16 bit com sinal, o significa obrigatoriamente a multiplicação de todos os coeficientes a[n] e b[n] por duas constantes, tais que o valor máximo e mínimo obtido não ultrapasse o valor máximo e mínimo deste tipo de variável.

Designando  $K_a$  ao valor a multiplicar pelos coeficientes a[n]

$$Ka * \text{Max}(\text{ABS}(a[n])) < 32767 \Leftrightarrow Ka < \frac{32767}{\text{Max}(\text{ABS}(a[n]))} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Ka < \frac{32767}{2.028} \Leftrightarrow Ka < 16157.298 \Rightarrow Ka = 16157$$

E Kb ao valor a multiplicar por pelos coeficientes b[n].

$$Kb * \text{Max}(\text{ABS}(b[n])) < 32767 \Leftrightarrow Kb < \frac{32767}{\text{Max}(\text{ABS}(b[n]))} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Kb < \frac{32767}{67.69} \Leftrightarrow Kb < 487.074 \Rightarrow Ka = 487$$

Obteremos assim um novo conjunto de coeficientes listados na tabela 4.

<b>Filtro</b>	<b>Coeficientes</b>	
1	a[n]	[498 -3936 13653 -27160 33881 -27160 13653 -3936 498]
	b[n]	[487 -3825 13188 -26064 32308 -25714 12832 -3672 461]
2	a[n]	[498 -3797 12843 -25173 31248 -25173 12843 -3797 498]
	b[n]	[487 -3690 12404 -24160 29800 -23834 12073 -3543 461]
3	a[n]	[498 -3569 11580 -22151 27289 -22151 11580 -3569 498]
	b[n]	[487 -3468 11186 -21258 26016 -20975 10884 -3331 461]
4	a[n]	[498 -3257 9979 -18467 22507 -18467 9979 -3257 498]
	b[n]	[487 -3166 9638 -17727 21462 -17488 9380 -3040 461]
5	a[n]	[498 -2869 8188 -14553 17514 -14553 8188 -2869 498]

	b[n]	[487 -2789 7909 -13967 16704 -13777 7699 -2678 461]
6	a[n]	[498 -2414 6377 -10780 12829 -10780 6377 -2414 498]
	b[n]	[487 -2346 6161 -10349 12233 -10208 5995 -2253 461]
7	a[n]	[498 -1903 4715 -7435 8844 -7435 4715 -1903 498]
	b[n]	[487 -1849 4554 -7139 8430 -7042 4432 -1775 461]
8	a[n]	[498 -1346 3354 -4648 5813 -4648 3354 -1346 498]
	b[n]	[487 -1308 3240 -4461 5542 -4402 3153 -1256 461]
9	a[n]	[498 -758 2422 -2382 3858 -2382 2422 -758 498]
	b[n]	[487 -737 2340 -2286 3678 -2255 2277 -708 461]
10	a[n]	[498 -153 2007 -458 3017 -458 2007 -153 498]
	b[n]	[487 -148 1939 -440 2877 -434 1887 -142 461]
11	a[n]	[498 457 2146 1393 3298 1393 2146 457 498]
	b[n]	[487 444 2073 1337 3144 1319 2018 426 461]
12	a[n]	[498 1055 2827 3458 4697 3458 2827 1055 498]
	b[n]	[487 1026 2732 3319 4479 3275 2659 985 461]
13	a[n]	[498 1629 3988 5972 7200 5972 3988 1629 498]
	b[n]	[487 1583 3852 5732 6862 5654 3749 1520 461]
14	a[n]	[498 2165 5518 9043 10730 9043 5518 2165 498]
	b[n]	[487 2104 5328 8678 10232 8561 5187 2020 461]
15	a[n]	[498 2650 7275 12627 15107 12627 7275 2650 498]
	b[n]	[487 2575 7027 12121 14405 11956 6837 2472 461]
16	a[n]	[498 3073 9096 16512 20002 16512 9096 3073 498]
	b[n]	[487 2986 8785 15852 19076 15638 8552 2867 461]

17	a[n]	[498 3424 10812 20374 24963 20374 10812 3424 498]
	b[n]	[487 3327 10441 19548 23800 19285 10164 3194 461]
18	a[n]	[498 3693 12262 23767 29406 23767 12262 3693 498]
	b[n]	[487 3590 11844 22811 28037 22504 11527 3447 461]
19	a[n]	[498 3878 13310 26320 32766 26320 13310 3878 498]
	b[n]	[487 3768 12857 25256 31236 24915 12511 3618 461]
20	a[n]	[498 3971 13861 27677 34576 27677 13861 3971 498]
	b[n]	[487 3859 13388 26561 32965 26205 13032 3705 461]

**Tabela 4 Coeficientes convertidos no formato inteiro de 16 bit**

Sendo que agora com as mudanças de escala referidas, será necessário proceder à alteração da função que define o filtro a implementar representado pela equação 4, de forma a que o resultado seja independente destas mudanças de escala, obtendo assim a equação 5.

$$Y(n) = \frac{Ka}{a_0} * \left( \frac{1}{Ka} \sum_{i=0}^N a_i * X(n-i) - \frac{1}{Kb} \sum_{j=1}^M b_j * Y(n-j) \right)$$

**Equação 5**

Uma vez obtidas todas as componentes de corrente e tensão na sua frequência fundamental, mais os 19 harmónicos seguintes, pode-se agora proceder ao cálculo das grandezas necessárias ao projeto. Sendo necessário executar os cálculos apresentados a seguir para todas as 20 componentes de tensão e corrente.

Durante a implementação dos filtros digitais referidos anteriormente foram encontradas algumas falhas nas rotinas que as implementariam, e que até ao momento de escrita deste relatório, não foram corretamente identificadas e corrigidas, o que obrigou a tomar a decisão

de não implementar estes filtros e usar os valores de corrente e tensão, tal como são digitalizados pelos conversores A/D.

A opção por esta via inviabiliza logo a partida a possibilidade de certificação de aparelho de contagem de energia segundo a norma IEC 62052, que obriga a que dispositivos deste tipo, tenham em consideração os 20 primeiros harmónicos da rede eléctrica.

Além disso, o facto de não haver lugar a qualquer tipo de filtragem digital, irá introduzir algum erro no cálculo de todas as grandezas, uma vez que os valores usados, possuem uma componente de ruído relativamente elevada com origem nos sensores de corrente, quando comparado com os mesmos valores que tivessem sido previamente filtrados.

No entanto, o tempo começava a ser curto para a conclusão do projeto, pelo que avançamos para a etapa seguinte, estando ciente da qualidade inferior nos resultados obtidos com esta decisão.

Assim, foram utilizados os valores de corrente e tensão provenientes dos conversores A/D, o que significa trabalhar apenas com a componente da frequência fundamental da rede.

### 3.2.1. TENSÃO E CORRENTE

O valor eficaz de uma grandeza é definido como sendo a raiz quadrada de uma média do quadrado de valores instantâneos ao longo de um período de tempo, e que no domínio discreto, a tensão eficaz pode ser calculada pela equação 6 e a corrente eficaz pela equação 7. Sendo  $V[n]$  e  $I[n]$  os valores instantâneos de tensão e corrente e  $N$  o número de amostras a considerar.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (V[n] * V[n])}{N}}$$

Equação 6

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (I[n] \cdot I[n])}{N}}$$

Equação 7

### 3.2.2. POTÊNCIA APARENTE

A potência aparente pode ser calculada através da tensão e corrente eficaz, tal como indicado na equação 8.

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

Equação 8

### 3.2.3. POTÊNCIA MÉDIA

A potência média pode ser calculada pela média do produto dos valores de corrente e tensão instantâneos ao longo de um período de tempo, e que no domínio discreto poderá ser calculada pela equação 9. Sendo  $V[n]$  e  $I[n]$  os valores instantâneos de tensão e corrente e  $N$  o número de amostras a considerar.

$$P_{med} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (V[n] * I[n])}{N}$$

**Equação 9**

#### **3.2.4. FATOR DE POTÊNCIA**

O fator de potência, relaciona o desfasamento existente entre a tensão e corrente e é necessário para o cálculo da potência reativa. Este parâmetro, pode ser calculado pela equação 10.

$$FP = \frac{P_{Med}}{S}$$

**Equação 10**

#### **3.2.5. POTÊNCIA ATIVA**

A potência que realmente produz trabalho, é uma relação entre a potência aparente e o desfasamento entre a tensão e corrente, e pode ser calculada pela equação 11.

$$P = S * FP$$

**Equação 11**

#### **3.2.6. POTÊNCIA REATIVA**

A potência reativa não produz qualquer trabalho, mas é criada por cargas capacitivas e indutivas, provocando um desfasamento entre tensão e corrente, e pode ser calculada pela equação 12.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

**Equação 12**

### **3.2.7. ENERGIA ATIVA**

Sendo N o número de amostras ao longo de um período temporal, e  $F_s$ , a frequência com que essas amostras foram recolhidas, então, a energia poderá ser calculada multiplicando  $N/F_s$  pela potência média, tal como representado pela equação 13.

$$E_A = \frac{P_{Med}}{F_s}$$

**Equação 13**

### **3.2.8. ENERGIA REATIVA**

Do mesmo modo, a energia reativa poderá ser calculada pelo método anterior substituindo o fator  $P_{Med}$  por  $Q$ .

$$E_R = \frac{Q}{F_s}$$

**Equação 14**

### **3.3. INTERFACE COM UTILIZADOR**

O interface local com utilizador, e de forma a manter a integridade dos dados recolhidos e calculados, resume-se apenas a apresentação de dados.

O dispositivo possui localmente um display alfanumérico de 2 linhas com 16 caracteres cada, onde de forma periódica vai alternando a apresentação de informação considerada relevante:

- Valor médio das 3 tensões em relação ao neutro.
- Soma das 3 correntes.
- Frequência da rede.
- Hora atual.
- Soma da potência ativa das 3 fases.
- Soma da potência reativa das 3 fases.
- Fator de potência.
- Total de energia ativa.
- Total de energia reativa.

Todas as restantes formas de interação com o dispositivo deverá ser através da sua ligação série.

Apenas estabelecendo esta ligação com o dispositivo através de computador a correr software apropriado, será possível configurar vários parâmetros, bem como a calibração do dispositivo.

### 3.4. AJUSTE

Após construção e programação deste dispositivo, será necessária o seu ajuste, de forma a obter dados o mais exatos possível, para isso, foram criadas algumas rotinas que irão simplificar essa tarefa.

Este ajuste resume-se simplesmente à definição de vários coeficientes que foram introduzidos no cálculo de várias grandezas e que funcionam como um ajuste dos valores calculados.

Tomemos como exemplo o cálculo da tensão eficaz, tal como está definido na equação 6.

De forma a compensar qualquer desvio nos componentes eletrônicos que compõem os andares de condicionamento de sinal, este dispositivo multiplica o cálculo representado pela equação 6 por um coeficiente de calibração, tal como é indicado na equação 15.

$$V_{RMS} = Kv * \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (V[n] * V[n])}{N}}$$

**Equação 15**

O mesmo acontece com o cálculo da corrente eficaz e potência média, que passa a ter a forma da equação 16 e 17 respetivamente.

$$I_{RMS} = Ki * \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} (I[n] * I[n])}{N}}$$

**Equação 16**

$$P_{med} = Kp * \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (V[n] * I[n])}{N}$$

**Equação 17**

Este ajuste é feito por comparação das leituras de tensão e corrente com um multímetro de bancada de precisão, da marca Fluke modelo 8845A, que segundo o seu manual apresenta as características apresentadas na tabela 5, em medição de tensão e corrente.

	Tensão alternada	Corrente alternada
Intervalo de medição	100 mV a 750 V	100 mA a 10 A
Resolução máxima	100 nV	10 nA
Precisão	0.06 + 0.03 (% measurement + % of range)	0.10 + 0.04 (% measurement + % of range)
Frequência	3 Hz a 300 Khz	3 Hz a 10 Khz

**Tabela 5 Especificações para corrente e tensão do Fluke 8845A**

Foi criada uma rotina de ajuste para tensão e outra para corrente, que faz várias leituras de tensão e corrente, calculando a sua média e em seguida é feito o pedido para introdução do valor lido pelo multímetro de precisão. Tendo estes dois valores, é feito internamente o cálculo dos coeficientes  $K_v$  e  $K_i$  presentes nas equações 15 e 16, respetivamente.

Foi ainda criada uma rotina semelhante para a determinação do coeficiente  $K_p$ , sendo que o valor teórico para este coeficiente será  $K_v * K_i$ , no entanto, e como os cálculos efetuados pelo dispositivo são feitos com recurso a números inteiros e não em vírgula flutuante, poderá existir algum desvio devido a arredondamentos. Pelo que  $K_p$  poderá não ser exatamente o mesmo valor de  $K_v * K_i$ . Para ajuste deste coeficiente, é necessário um watímetro de precisão e proceder à calibração de  $K_p$  de forma semelhante a  $K_v$  e  $K_i$ .

Sempre que é determinado um novo valor de  $K_v$  ou  $K_p$ , é atualizado o valor de  $K_p$ , como sendo  $K_v * K_i$ . Sendo necessário ajustar este coeficiente, esta ajuste deverá ser feita apenas após ajuste de  $K_v$  e  $K_i$ .

Após ajuste, o dispositivo desenvolvido neste projeto apresentava desvios máximos que podem ser visualizados na tabela 6 e 7, onde se pode verificar um máximo de 0,3% no valor da tensão e 0,49% a 2,15% no valor da corrente no intervalo de corrente entre 9,820A e 0,650A.

Pode-se observar um aumento do desvio, com a diminuição do valor da corrente a medir, devido essencialmente ao nível de ruído gerado nos sensores de corrente e ausência de filtragem nos valores digitalizados a partir deles.

Valor medido pelo Fluke 8845A  (V RMS)	Valor medido pelo Contador  (V RMS)	Desvio  (V RMS)	Desvio  (%)
232,28	231,64	-0,64	-0,30%

**Tabela 6** Dados após calibração da medição de tensão

Valor medido pelo Fluke 8845A  (A RMS)	Valor medido pelo Contador  (A RMS)	Desvio  (A RMS)	Desvio  (%)
0,649	0,635	- 0,014	2,15 %
1,026	1,006	- 0,020	1,95 %
1,673	1,655	- 0,018	1,08 %
3,403	3,375	- 0,028	0,82 %
5,120	5,145	+ 0,025	0,49 %
6,813	6,854	+ 0,041	0,60 %
8,475	8,539	+ 0,064	0,76 %
9,820	9,895	+ 0,075	0,76 %

**Tabela 7** Dados após calibração da medição de corrente

# 4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

## 4.1. CONCLUSÃO

No final deste projeto pode-se concluir ser perfeitamente possível o desenvolvimento de um produto que consiga atingir um baixo custo e simultaneamente um conjunto de características e funcionalidades semelhantes ou superiores a produtos de valor mais elevado.

O baixo custo consegue-se essencialmente através:

- Tipo de sensor de corrente selecionado.
- Integrar todos os cálculos no microcontrolador existente.
- Integrar a componente de comunicação “*wireless*” no próprio equipamento contribui para uma redução do custo final significativa, se comparada com outras soluções, em que essa funcionalidade existe apenas adquirindo um segundo módulo que será conectado ao dispositivo de medição de energia.

Os resultados obtidos por meio desta aproximação, são muito promissores, se atendermos ao facto do dispositivo aqui desenvolvido ainda ter muitas possibilidades de melhoria, quer na precisão dos dados fornecidos, quer na eficiência com que esses dados são calculados, ou até mesmo a adição de novas funcionalidades, que não passam pela necessidade de adição de mais componentes ao circuito, sendo alguma delas listadas no sub-capítulo seguinte deste relatório.

## **4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

O trabalho aqui desenvolvido cumpre a grande maioria dos objetivos inicialmente propostos, mas ainda assim é um projeto que pode ir muito além desses objetivos iniciais. Desta forma, pode-se dividir trabalho futuro em dois grandes grupos:

### 1. Melhorar trabalho atualmente desenvolvido:

- As rotinas desenvolvidas apesar de cumprirem as suas funções, podem ser substancialmente otimizadas. Permitindo assim a libertação de recursos, sejam eles memória de código, memória de dados ou tempo de processador, que podem ser usadas para implementar outras funcionalidades ou melhorar a precisão de cálculos atualmente efetuados.
- Identificar a origem e corrigir o problema na filtragem digital, permitindo assim melhorar a qualidade dos dados obtidos, bem como tornar possível um estudo das componentes harmónicas existentes na rede eléctrica.
- Estudar o sinal de ruído introduzido pelos sensores de corrente por efeito de hall utilizados, de forma a reduzir ou anular o seu efeito nos resultados de corrente obtidos.

### 2. Adicionar novas funcionalidades:

- Durante este projeto, foi demonstrado o envio dos dados recolhidos para base de dados remota, via internet “*wireless*” para servido remoto, no entanto todo o “*hardware*” foi desenvolvido tendo em mente a possibilidade de utilizar outras formas de comunicação, sendo necessário apenas a criação de um

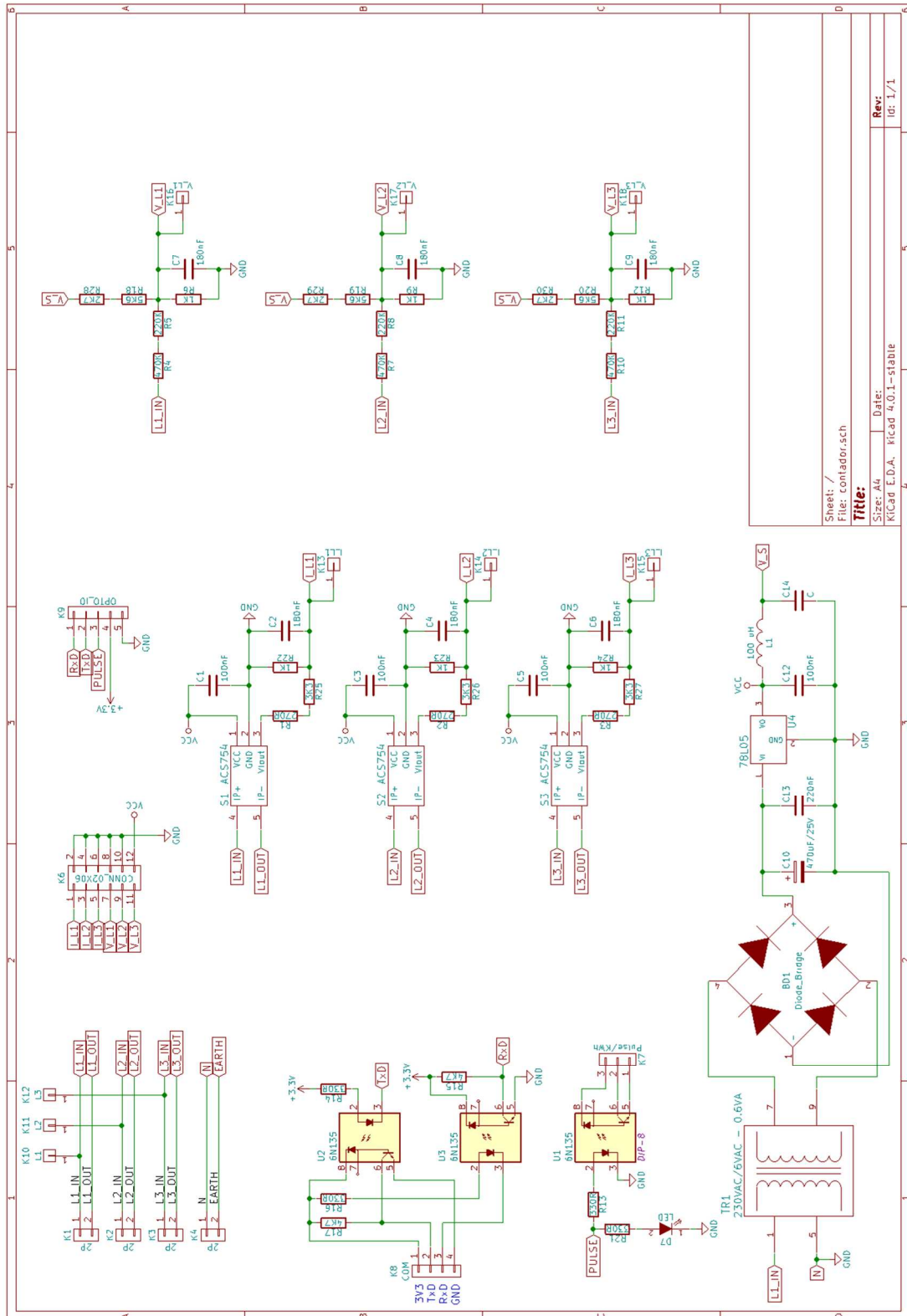
módulo de “*hardware*” e respetivo “*firmware*” de forma a adicionar suporte para Bluetooth, ZigBee, SigFox, GSM, etc...

- Com a crescente instalação de sistemas de produção de energia elétrica para auto-consumo, é de grande importância identificar o sentido em que a energia elétrica está a circular, de forma a identificar evitar a injeção de energia na rede elétrica pela via de otimização do consumo local.
- Implementar formas de aviso/alarme por mensagem GSM, correio eletrónico ou outras formas para o caso de serem detetados eventos definidos pelo utilizador. Tais como sobretensões, fator de potência fora dos limites definidos, potência na rede superior a um determinado valor, energia produzida localmente superior a energia consumida, etc.

## *Referências Documentais*

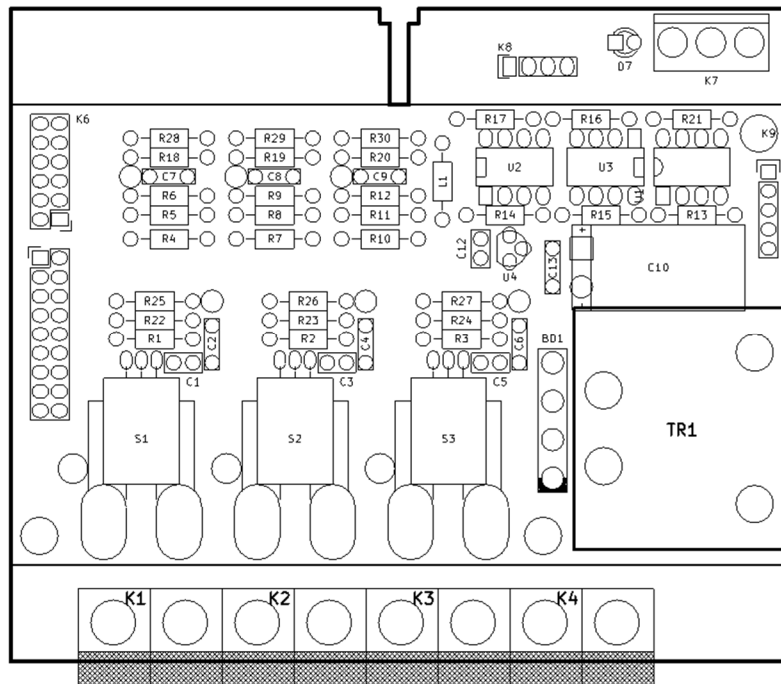
- [1] IEC — IEC62053-21 – Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements – Static meters for active energy (Classes 1 and 2)
- [2] The history of energy meter – Metering and Smart Energy International
- [3] ACS754 Datasheet – Allegro Microsystems
- [4] 6N137 Datasheet – Vishay
- [5] LM7805 Datasheet – Fairchild
- [6] LM1086 Datasheet – Texas Instruments
- [7] DS1338 Datasheet – Maxim Integrated
- [8] ATxmega256A3U/192A3U/128A3U/ATxmega64A3U Datasheet – Atmel
- [9] AVR XMEGA AU Manual – Atmel
- [10] BC1602K LCD display Datasheet – Bolymin
- [11] BC1608B LCD display Datasheet – Bolymin

# Anexo A – Condicionamento de sinal, alimentação e isolamento ótico.

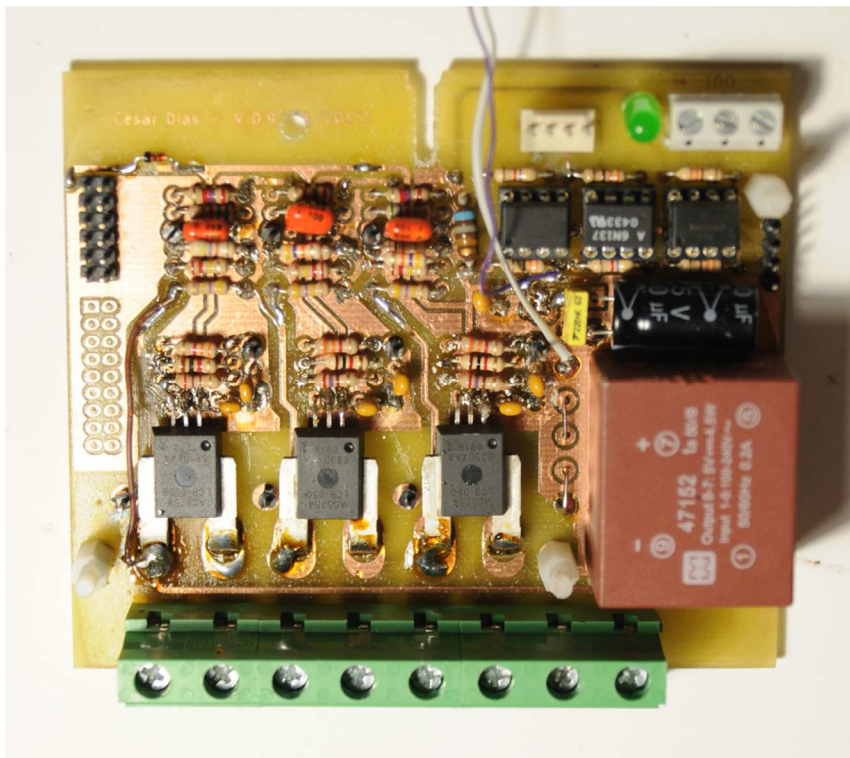


Sheet: /  
 File: conlador.sch  
**Title:**  
 Size: A4  
 Date:  
 KICad E.D.A. KICad 4.0.1-stable  
 ID: 1/1

Circuito elétrico

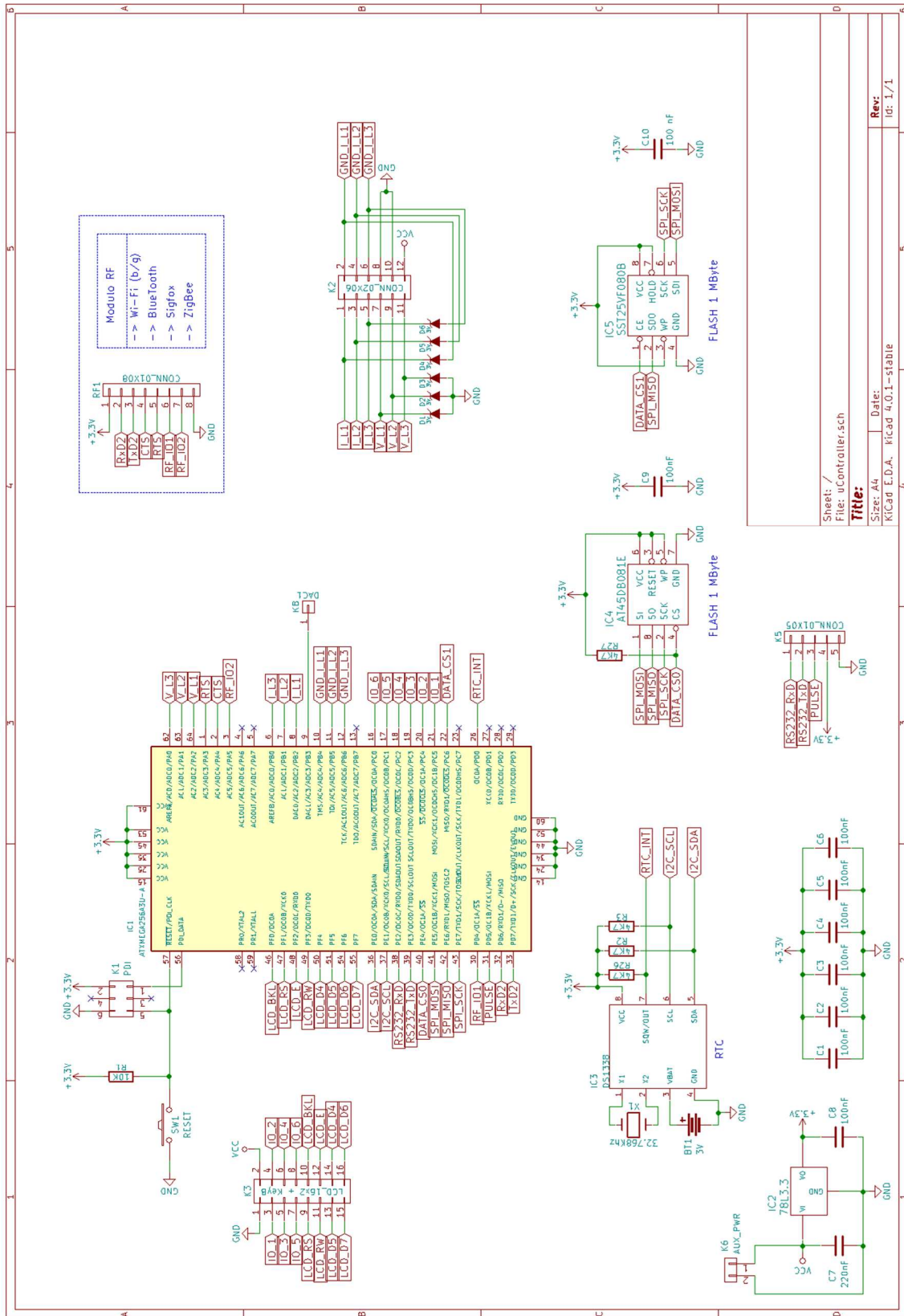


“Layout” da placa de circuito impresso



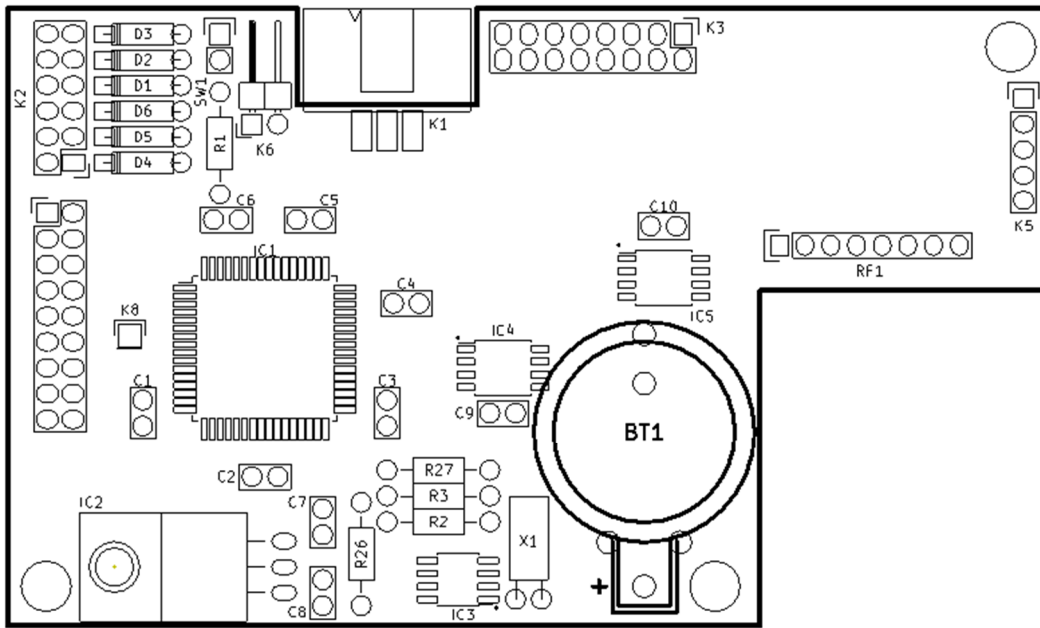
Fotografia da placa de circuito impresso

# Anexo B – Unidade de processamento e comunicações

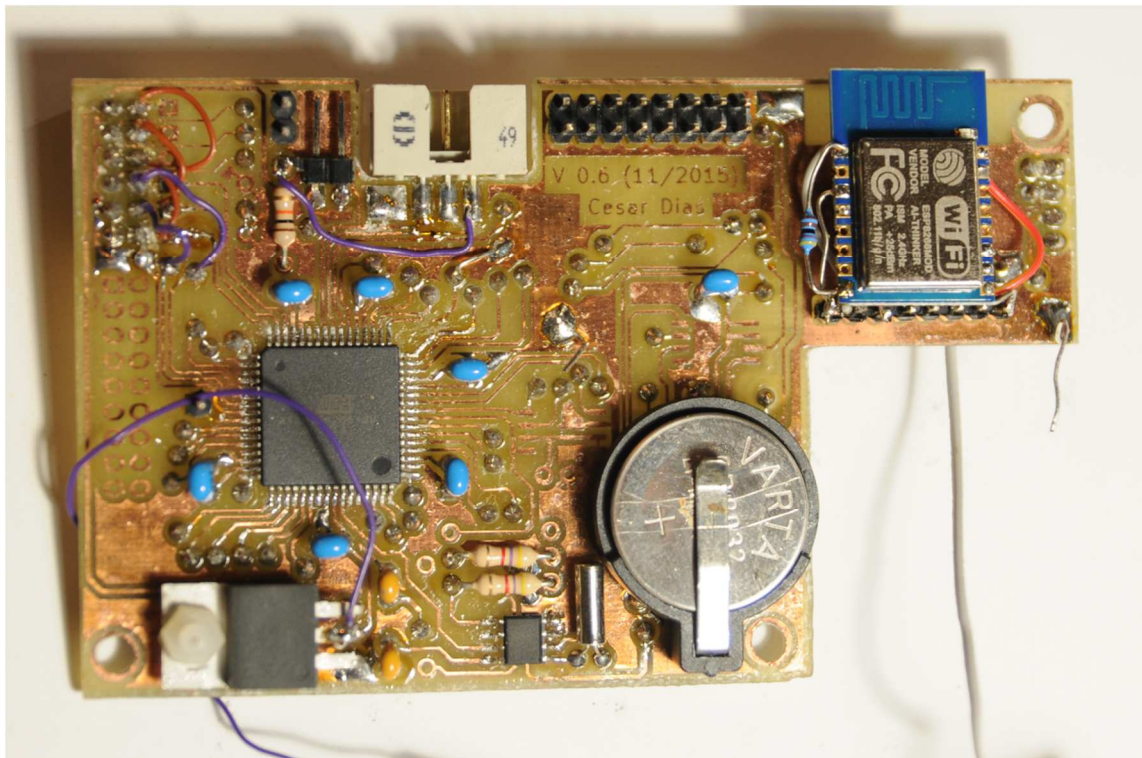


Sheet: /  
 File: uController.sch  
**Title:**  
 Size: A4 Date:  
 Kicad E.D.A. Kicad 4.0.1-stable  
 Rev: 1/1  
 Id: 1/1

Circuito elétrico

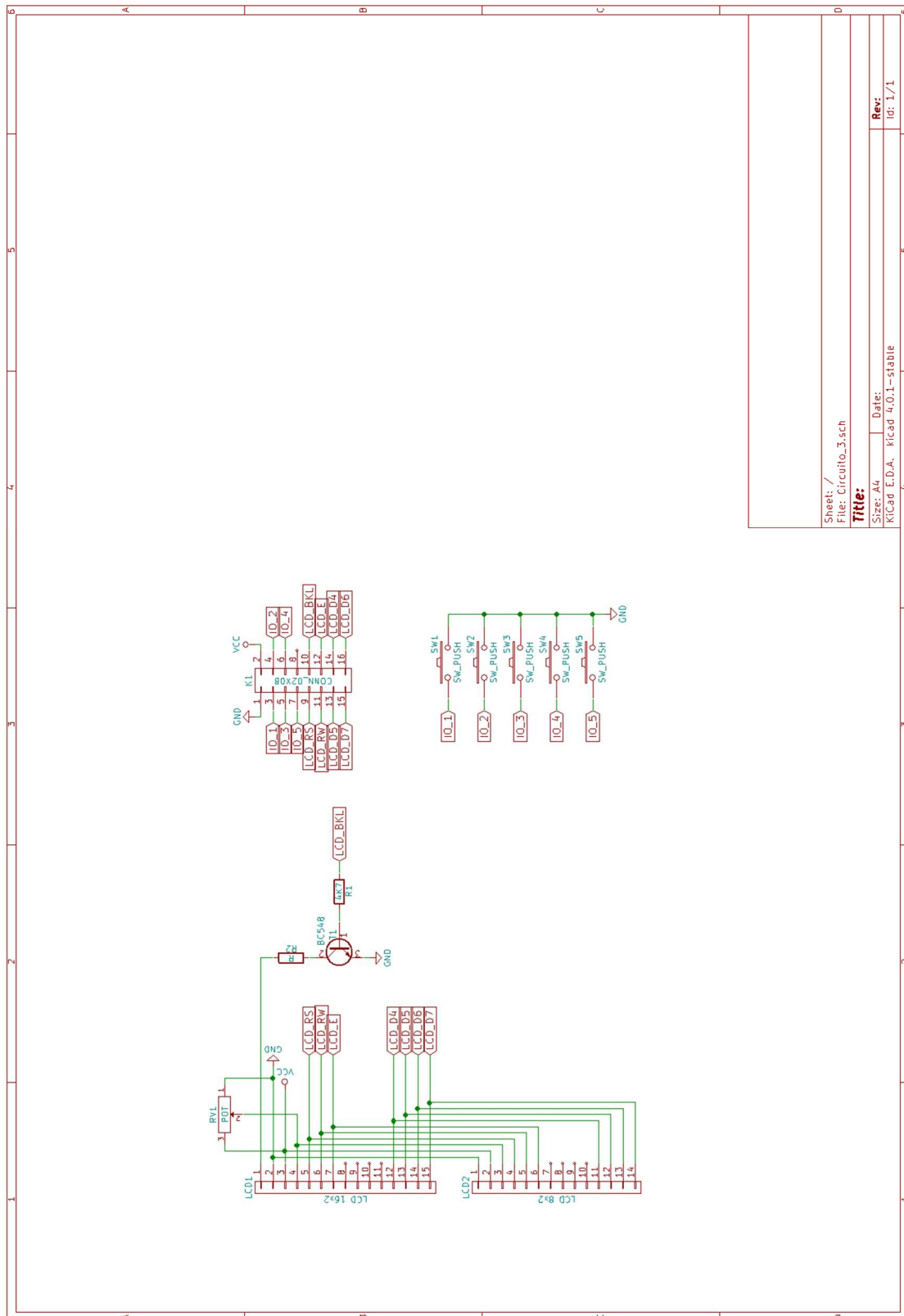


“Layout” da placa de circuito impresso



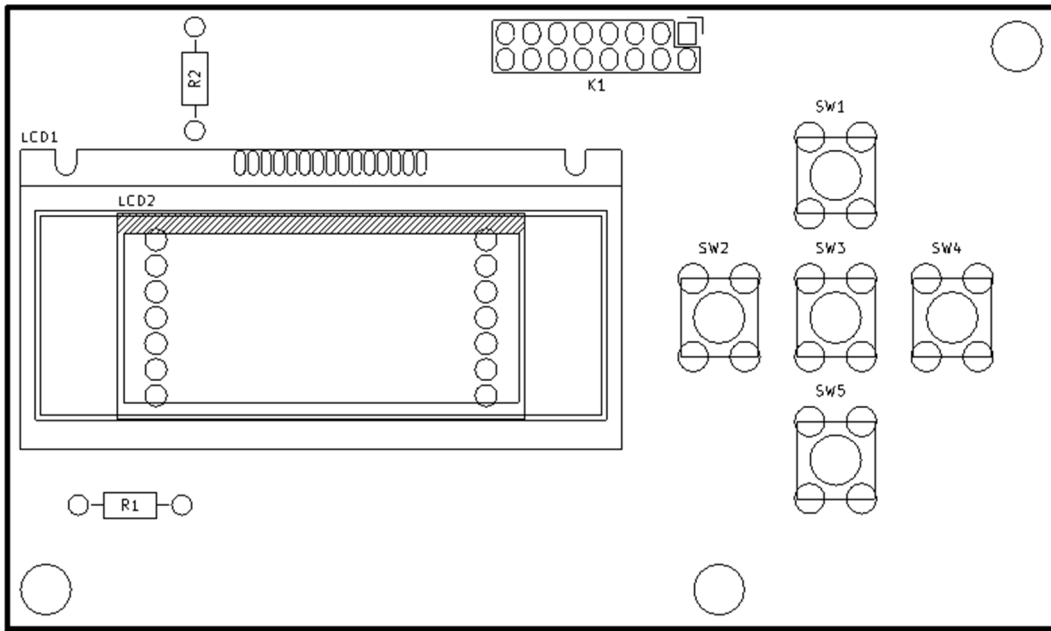
Fotografia da placa de circuito impresso

# Anexo C – Interface com utilizador

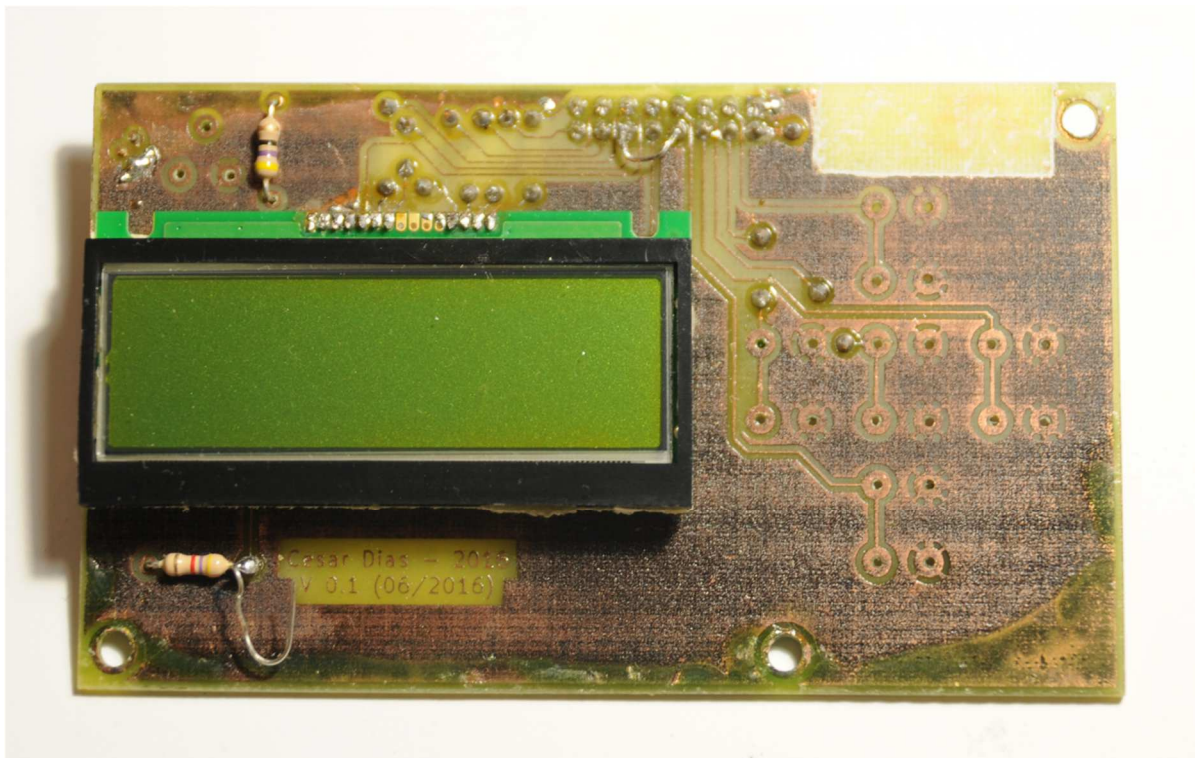


Sheet: /	File: Circuito_3.sch
<b>Title:</b>	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A.	KiCad 4.0.1-stable
Rev: 1/1	Id: 1/1

Circuito eléctrico

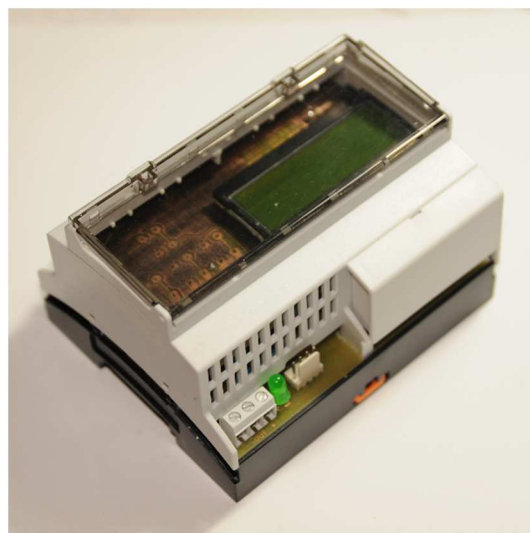
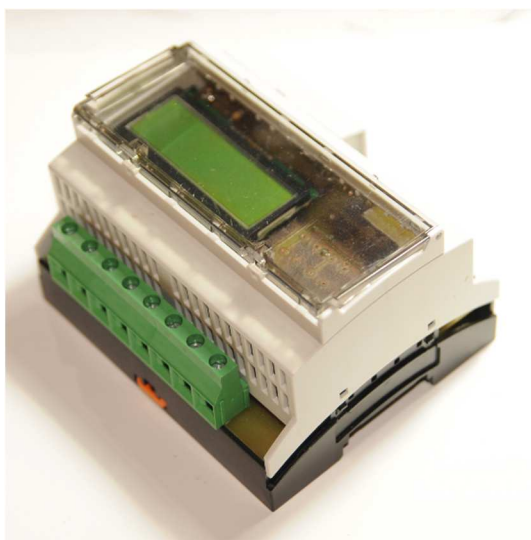


“Layout” da placa de circuito impresso



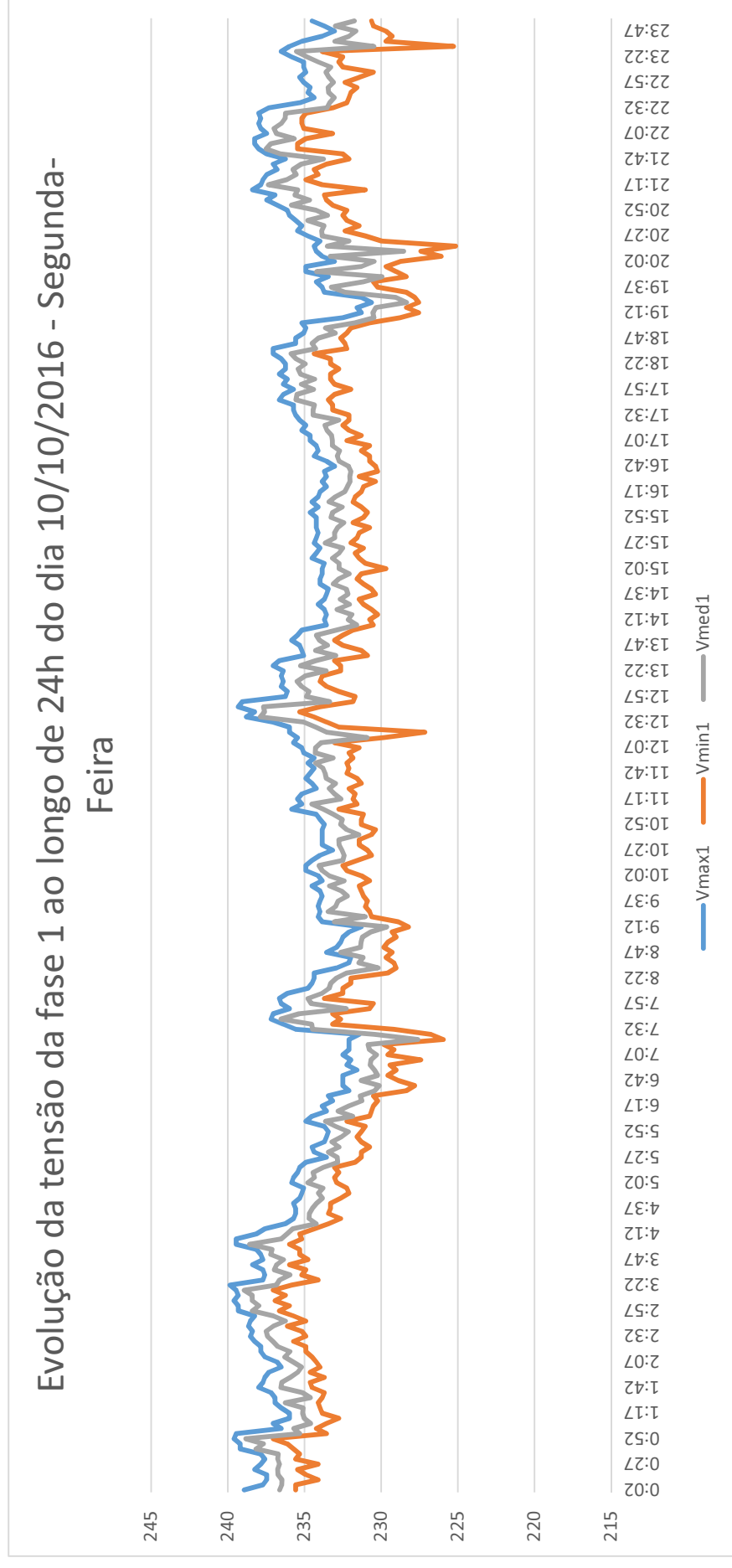
Fotografia da placa de circuito impresso

## Anexo D – Fotografias do produto final



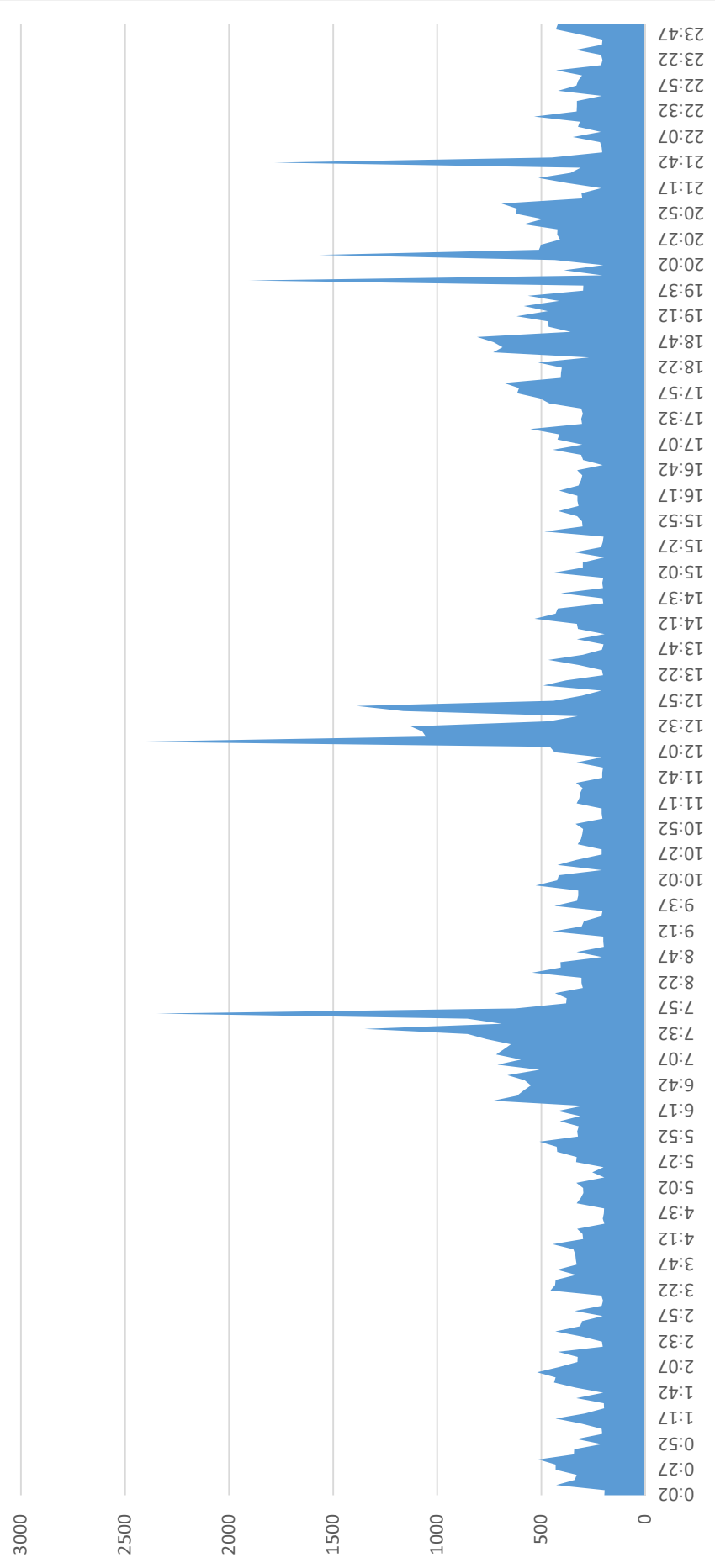


## Anexo E – Representação gráfica de alguns dados obtidos





Evolução da potência ao longo de 24h do dia 10/10/2016 (Segunda-Feira)





Consumo de energia ao longo de 24h do dia 10/10/2016 (Segunda-Feira - em Wh)

