



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Concepção Modular de Dispositivos Electrónicos

Rafael Gamanho Cardoso

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

Orientador: Prof. Doutor António Vitória do Espírito Santo

Covilhã, Junho de 2015

Dedicatória

Aos meus Pais e Irmão.

Paula, Augusto e Luís.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Paula e Augusto pelo seu apoio. Agradeço ao meu irmão Luís pelo seu apoio e pelos comentários que apenas alguém com conhecimentos na área da electrónica pode realizar. As suas sugestões bem fundamentadas são sempre uma boa fonte de soluções de problemas ou alternativas na forma de realizar uma determinada tarefa.

Agradeço igualmente ao meu orientador Professor Doutor António Vitória do Espírito Santo pela orientação providenciada durante os meses necessários para a realização deste trabalho.

Agradeço também à empresa CWJ e aos seus colaboradores pelo auxílio prestado durante a realização deste trabalho.

Por fim agradeço aos elementos da comunidade *mbed* pelo conteúdo útil que disponibilizam, o que inclui exemplos de código, bibliotecas dedicadas e material de referência excepcional.

Resumo

Ao longo deste trabalho são abordados temas relacionados com a concepção modular de dispositivos electrónicos. Esta temática tem sido alvo de diversos trabalhos de investigação a nível mundial, mas grande parte das conclusões são ainda muito dependentes do ponto de vista pessoal dos investigadores. Assim, numa primeira abordagem, são apresentadas algumas das classificações e características da concepção modular de produtos e as principais vantagens e desvantagens desta metodologia relativamente à concepção integral de produtos, isto do ponto de vista geral dos produtos e não restrito aos dispositivos electrónicos, apesar de estes serem usados regularmente nos exemplos devido à temática deste trabalho.

Posteriormente é referida uma possível implementação de um dispositivo electrónico modular composto por três módulos diferentes, nomeadamente uma fonte de alimentação comutável, uma interface com o utilizador e um sistema de comunicação sem fios. Estes módulos são dimensionados e caracterizados de forma a serem algo genéricos na sua implementação, sendo igualmente destacadas temáticas de investigação relacionadas com as tecnologias utilizadas em cada um dos módulos ou os seus sistemas concorrentes. Algumas das funções possíveis dos dois últimos módulos são ainda demonstradas recorrendo a dispositivos de prototipagem rápida que incluem a plataforma *mbed* NXP LPC1768.

Palavras-chave

Concepção Modular, Concepção Integral, Fonte de Alimentação Comutável, Interface Homem-Máquina, Comunicações Sem Fios.

Abstract

Throughout this work themes related to the modular design of electronic devices are addressed. This theme has been the subject of several worldwide researches, but most of the findings are still very dependent on the personal standpoint of each researcher. In a first approach, some of the classifications and characteristics of the modular design of products and the main advantages and disadvantages of this method relative to the integral design of products are presented, although initially through a general view of products and not a view restricted to electronic devices, even though these are regularly used in the examples due to the theme of this work.

Subsequently it is referred a possible implementation of a modular electronic device composed of three different modules, including a switch mode power supply, a user interface and a wireless communication system. These modules are designed and characterized in order to be something generic in its implementation and some research related with the technology in use in the modules or its competitors is presented in the correspondent chapters. Some possible functions of the last two modules are further demonstrated using rapid prototyping devices that include the *mbed* NXP LPC1768 platform.

Keywords

Modular Design, Integral Design, Switch Mode Power Supply, Human to Machine Interface, Wireless Communication.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Produção Modular de Produtos	3
2.1 Introdução	3
2.2 Estrutura Específica/Integral	5
2.2.1 Vantagens	7
2.2.2 Desvantagens	7
2.3 Estrutura Modular	7
2.3.1 Vantagens	7
2.3.2 Desvantagens	7
2.3.3 Estrutura Modular com Interfaces Específicas	7
2.3.4 Estrutura Modular com Elemento Central	8
2.3.5 Estrutura Modular Seccional	9
2.4 Conclusão	10
Capítulo 3 - Fonte de Alimentação Comutável	13
3.1 Introdução	13
3.2 Descrição Geral do Módulo de Potência	14
3.3 Dimensionamento do Módulo de Potência	17
3.3.1 Dimensionamento dos componentes externos para o conversor <i>Flyback</i>	17
3.3.2 Dimensionamento dos componentes externos para o conversor <i>Buck</i>	22
3.3.3 Dimensionamento dos componentes para os reguladores de tensão	26
3.3.4 Dimensionamento dos elementos de protecção	27
3.3.5 Supressão de ruído ou distorções harmónicas	28
3.4 Conclusão	28
Capítulo 4 - Interface Homem-Máquina	31
4.1 Introdução	31
4.2 Descrição Geral da Interface Homem-Máquina	33
4.2.1 Dimensionamento dos componentes para os reguladores de tensão	35
4.2.2 Supressão de ruído	36
4.3 Demonstração de conceitos	37
4.3.1 Interfaces capacitivas	38
4.3.2 Controlo de luminosidade	42
4.3.3 Ecrã LCD	44

4.4 Conclusão	46
Capítulo 5 - Comunicações sem Fios	47
5.1 Introdução	47
5.2 Descrição Geral do Módulo de Comunicações	50
5.2.1 Supressão de ruído	52
5.3 Demonstração de conceitos	52
5.3.1 Comunicação através de I ² C	52
5.3.2 Comunicação sem fios	55
5.4 Conclusão	57
Capítulo 6 - Conclusões	59
Bibliografia	61
Anexo A1	65
Anexo A2	73
Anexo A3	83
Anexo A4	85

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diferentes estruturas para um atrelado automóvel [1]	8
Figura 2.2: Relação não unívoca entre função e componente numa estrutura integral [1]	11
Figura 2.3: Relação unívoca entre função e componente numa estrutura modular [1]	11
Figura 3.1: Diagrama representativo do Módulo de Potência	15
Figura 3.2: Entrada do módulo e conversor <i>Flyback</i> em maior detalhe	15
Figura 3.3: Detalhe do conversor <i>Buck</i> usado no segundo patamar do módulo	17
Figura 3.4: Filtro de entrada do conversor	19
Figura 3.5: Filtros de interferência electromagnética	20
Figura 3.6: Controlador <i>Flyback</i> , realimentação da saída e detecção de sobretensão ou subtensão	20
Figura 3.7: Conversor <i>Buck</i> e respectivos componentes externos	22
Figura 4.1: Diagrama funcional do Módulo de Interface Homem-Máquina	33
Figura 5.1: Diagrama representativo das acções realizadas após a recepção de dados pelo <i>transceiver</i>	51
Figura 5.2: Diagrama representativo das acções realizadas após a recepção de dados através de I ² C	52
Figura A1.1: Filtro de entrada da Fonte Comutável	66
Figura A1.2: Conversor <i>Flyback</i> e realimentação da saída	67
Figura A1.3: Transformador e saídas do conversor <i>Flyback</i>	68
Figura A1.4: Conversor <i>Buck</i>	69
Figura A1.5: Reguladores de tensão e pinos de ligação externa	70
Figura A1.6: Micro-processador que controla o conversor <i>Buck</i>	71
Figura A1.7: Amplificadores operacionais e ligações externas	72
Figura A2.1: Reguladores de tensão e ligações externas	74
Figura A2.2: Primeiro sensor de infra-vermelhos e micro-processador dedicado	75
Figura A2.3: Segundo sensor de infra-vermelhos e micro-processador dedicado	76
Figura A2.4: Ligações à interface com o utilizador	77
Figura A2.5: Memória externa usada pelo controlador gráfico	78
Figura A2.6: Controlador gráfico	79
Figura A2.7: Micro-processador principal	80
Figura A2.8: Ligações externas do módulo	81
Figura A3.1: Esquemático do Módulo de Comunicações Sem Fios	83

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Comparação da versatilidade dos Produtos consoante a arquitectura [1]	5
Tabela 2.2: Procedimento para desenvolvimento de produtos [1]	6
Tabela 2.3: Comparação resumida entre os diferentes tipos de estrutura [1]	9
Tabela 2.4: Comparação dos benefícios da concepção modular e da concepção integral [8]	12
Tabela 3.1: Características gerais do conversor <i>Flyback</i>	18
Tabela 3.2: Valor da resistência usando VCC e valor do DAC para cada tensão de saída desejada	24
Tabela 3.3: Razão entre as resistências para diferentes valores de Vout pretendidos	25
Tabela 3.4: Valores de resistência consoante a tensão de saída desejada	27
Tabela 4.1: Valores de resistência consoante a tensão de saída desejada	36

Lista de Acrónimos

ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
ZVT	<i>Zero Voltage Transition</i>
LC	<i>Filtro Inductivo-Capacitivo</i>
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>
ARM	<i>Acorn RISC Machine</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
DC	<i>Direct Current</i>
AC	<i>Alternated Current</i>

Capítulo 1

Introdução

A concepção modular de produtos tem evoluído de forma significativa nos últimos anos, substituindo em diversas áreas a concepção integral ou pelo menos competindo com o domínio da concepção integral. Em nenhuma área esta transformação tem sido tão evidente como na concepção de dispositivos electrónicos. A pressão dos curtos períodos de tempo para o mercado e consequentes períodos reduzidos de desenvolvimento do produto fazem com que a complexidade de um sistema integral tenha de ser preterida a favor de um sistema modular em que as tarefas de desenvolvimento podem decorrer de forma independente e paralelamente no tempo, reduzindo de forma significativa os requisitos temporais necessários para criar um dispositivo electrónico de complexidade elevada, pelo menos no que se refere à soma das partes. Apesar de ser utilizada regularmente, a concepção modular de produtos encontra-se ainda muito pouco documentada, uma vez que cada empresa desenvolve o seu próprio sistema e por razões óbvias esse sistema não é publicamente documentado. Além da pouca documentação desta metodologia de trabalho, é de notar que a própria definição de modular depende do contexto e, mesmo em contextos semelhantes, diferentes autores defendem definições diferentes.

Ao longo do capítulo 2 serão referidas algumas das características da concepção modular de produtos de uma forma genérica, ou seja sem restringir o conceito à concepção de dispositivos electrónicos, sendo realizadas diversas comparações com sistemas integrais e distinguidos diversos tipos de sistemas modulares, consoante as interfaces entre módulos e outras características dos sistemas. De notar que apesar de as definições de módulos e concepção modular ainda não seguirem um padrão aceite por todos, a grande maioria dos investigadores atribui características semelhantes aos sistemas modulares. Isto significa que apesar de não existir um consenso total, existem já situações de convergência na caracterização deste tipo de sistemas e métodos de concepção.

O capítulo 3 indica algumas das principais características das fontes de alimentação comutáveis, referindo de forma sucinta algumas das tipologias que podem ser encontradas na literatura. Além disso, é dimensionada uma fonte de alimentação comutável baseada num conversor *Flyback* com um transformador de múltiplas saídas no secundário, que permite a obtenção de diversas tensões de amplitude constante, sendo utilizado um conversor *Buck* para proporcionar uma tensão de amplitude ajustável por software, através da modificação do valor de uma resistência digital no percurso de realimentação do conversor *Buck*. Esta tensão de amplitude ajustável permite que este módulo forneça tensões entre os 3V e os 18V de forma extremamente simples e relativamente eficiente, até porque o micro-processador

que controla o valor da resistência digital pode ser programado para ajustar o valor da resistência de acordo com o valor que mede na saída do conversor *Buck*, obtendo assim a tensão desejada mesmo em situações em que a variabilidade entre componentes possa afectar o valor obtido na saída do conversor, uma vez que as características do conversor integrado e da resistência geralmente variam de componente para componente, mesmo que seja de forma pouco significativa.

De seguida são apresentadas diversas tecnologias referentes a interfaces com o utilizador no capítulo 4, sendo indicadas algumas das formas de o utilizador ser detectado ou ser capaz de interagir com dispositivos electrónicos. Neste mesmo capítulo são referidas as características de uma interface com o utilizador capaz de detectar movimentos simples, detentora de uma interface de toque e capaz de providenciar informação visualmente num ecrã. Recorrendo a dispositivos de prototipagem rápida são ainda demonstradas algumas das funcionalidades expectáveis de uma simples interface capacitiva de toque e que utiliza um pequeno ecrã para apresentar informação útil ao utilizador.

Ao longo do capítulo 5 são indicados alguns dos protocolos sem fios mais utilizados actualmente e referidas de forma sucinta algumas das principais vantagens e desvantagens dos mesmos, sendo dado especial destaque ao protocolo *ZigBee* e ao *Wi-Fi*. Após estes dados provenientes da literatura é descrito o módulo de comunicações sem fios conceptualizado durante a realização deste trabalho. Por fim são referidas algumas das funcionalidades básicas de um módulo de comunicação sem fios, recorrendo a dispositivos de prototipagem rápida.

Após a apresentação desta informação referente à temática da concepção de dispositivos electrónicos modulares são retiradas algumas conclusões referentes à realização deste trabalho e providenciados em anexo os esquemáticos de cada módulo, juntamente com um exemplo mais completo de uma interacção entre um módulo de interface com o utilizador e um módulo de comunicação sem fios.

Capítulo 2

Produção Modular de Produtos

2.1 Introdução

Ao longo da História a necessidade de criar diversos produtos ou engenhos motivou várias correntes de pensamento que pretendiam obter as melhores formas de os produzir. Duas das principais formas de produzir engenhos de alta qualidade consistem na produção integral e na produção modular. Enquanto a produção integral ou num conjunto de peças integrais produz peças com um propósito bem definido, baseadas numa estrutura otimizada para a função específica que terá que desempenhar, a produção modular cria peças com base em módulos individuais que podem ter propósitos menos restritos e, por isso mesmo, podem servir de base à criação de diversos engenhos, tal como evidenciado por Ulrich [1] e Dahmus *et al* [2].

Tomemos como exemplo de uma construção integral um simples guarda-chuva. Um guarda-chuva comum é constituído por diversas peças, no entanto estas foram criadas com o propósito de serem colocadas num guarda-chuva com uma certa dimensão e um certo aspecto exterior. As partes individuais não têm qualquer utilidade a não ser na criação de outro guarda-chuva semelhante. Este exemplo é do domínio mecânico, no entanto exemplos de produção deste tipo existem igualmente noutras áreas, incluindo a área da electrónica. Circuitos baseados em ASIC (*Application Specific Integrated Circuit* ou Circuito Integrado para Aplicação Específica) como o nome indica, servem apenas para fins específicos e a sua concepção é baseada na análise de necessidades específicas de controlo ou funcionalidade, realizando apenas as funções que foram consideradas adequadas durante a sua fase conceptual. Estes circuitos têm geralmente um rendimento mais elevado que os seus equivalentes modulares enquanto trabalham nas condições para os quais foram desenvolvidos, sendo no entanto muito menos versáteis.

Como exemplo de uma estrutura modular temos, ao nível mecânico, um sistema de engrenagens que sendo composto por um número maior ou menor de rodas dentadas, eixos e outros componentes, pode ser desmembrado em diversos conjuntos de rodas dentadas que podem ser usadas noutras estruturas com um propósito diferente. Se esta versatilidade no mundo da mecânica existe, no que toca a componentes electrónicos é ainda mais comum. A título de exemplo, consideremos um circuito de controlo que necessita de comunicar através de tecnologia sem fios com outro circuito colocado a uma certa distância. Este circuito pode ser realizado através do uso de um ASIC concebido para o efeito, o que permitiria uma grande miniaturização, no entanto poderia ser muito mais adequado usar um módulo principal de controlo com um comum micro-controlador ou micro-processador, respectivos periféricos e electrónica externa necessária ao seu funcionamento correcto, ligado a um módulo composto

por um circuito emissor-receptor com um alcance e frequência de funcionamento adequados à situação. No primeiro caso (ASIC) teríamos de criar um circuito específico para o circuito de controlo e outro para o circuito a ser controlado, enquanto no segundo caso teríamos de criar os circuitos de condicionamento de sinal e de interligação para três módulos diferentes. Num sistema com estas características pode parecer mais adequado criar ASIC's que são em menor número, no entanto a sua complexidade pode tornar os três módulos mais atractivos para a equipa de desenvolvimento. A estrutura modular tornar-se-ia mais atractiva quanto maior fosse a variedade de circuitos que tivessem de interagir no sistema, tornando-se mais simples usar um único módulo de comunicações que seguisse um determinado padrão de comunicação, do que incorporar uma estrutura de comunicação integrada em cada um dos circuitos desenvolvidos. Além disso, numa estrutura modular o *transceiver* usado para comunicar poderia ser substituído sem requerer modificações noutros módulos para além do módulo de comunicações, enquanto num sistema feito com base em ASIC's, todos os circuitos teriam de ser modificados, o que acarreta custos superiores e aumenta a complexidade da realização de actualizações aos sistemas.

Com o intuito de apresentar algumas das principais vantagens e desvantagens de optar por uma estrutura modular ou uma estrutura específica para a aplicação, consideremos o seguinte exemplo: duas empresas fornecem figuras colecionáveis relacionadas com um tema específico (um jogo, um universo retratado em livros ou outros temas) que podem ser pintadas pelo próprio cliente de acordo com as suas preferências pessoais. A empresa "A" cria figuras específicas tendo um conjunto base de cinco figuras diferentes. O seu método de produção permite-lhes criar figuras de alta qualidade, sendo no entanto o preço algo elevado para novas figuras que sejam produzidas. A empresa "B" tem um grupo base igualmente de cinco figuras, no entanto as figuras não são compostas por uma única peça, mas sim por diversas peças modulares que podem ser usadas pelo cliente para criar variações dos modelos base (imaginemos que cada figura tinha cabeça, tronco, dois braços e duas pernas, o que daria um conjunto de seis módulos diferentes). Cada parte modular poderia ter uma qualidade semelhante à das figuras da empresa "A", no entanto a necessidade de interligar os módulos poderia levar a algumas imperfeições da figura não presentes nas da empresa "A". O método de concepção de figuras significa que quaisquer novas figuras a ser produzidas tenham um custo mais baixo, uma vez que cada módulo pode ser concebido independentemente, o que representa uma menor complexidade na concepção e produção do produto final.

Tabela 2.1: Comparação da versatilidade dos Produtos consoante a arquitectura [1]

Arquitectura do Produto	Modular	<p>Variedade alcançada através da montagem combinatória de um número reduzido de tipos de componentes.</p> <p>Produção por encomenda pode ser feita através dos componentes armazenados.</p> <p>Tempo de disponibilização após encomenda ditado pelo tempo necessário para a montagem final.</p>	<p>Pode produzir componentes por encomenda ou montar por encomenda.</p> <p>Pode optar pela criação de inventários de componentes para minimizar o tempo de entrega ao cliente.</p> <p>Variedade quase infinita pode ser obtida quando os componentes são feitos por encomenda.</p>
	Integral	<p>Grande variedade não é economicamente viável, pois requer elevados custos fixos, custos de inicialização, tempos de entrega ao cliente e custos com armazenamento de partes.</p>	<p>Variedade pode ser obtida sem custos elevados através da produção dos componentes por encomenda.</p> <p>Os tempos mínimos de entrega ao cliente são determinados pelo tempo de produção dos componentes e o tempo de montagem final.</p> <p>Variedade quase infinita pode ser obtida.</p>
		Baixo	Elevado
Flexibilidade no Processamento do Componente			

2.2 Estrutura específica/integral

O desenvolvimento de produtos de acordo com uma estrutura específica implica, de um modo geral, que o objectivo da equipa de desenvolvimento consista em obter produtos com uma função bem definida e com condições operacionais bem conhecidas, que possa ter um rendimento elevado e cujo número de variantes desejadas seja reduzido, sendo cada variante produzida com um valor médio ou elevado de unidades em mente, por forma a reduzir o custo de cada unidade individual e rentabilizar o desenvolvimento com base numa estrutura que, apesar da possibilidade de possuir uma eficiência elevada, é geralmente complexa e pouco versátil, o que reduz de forma notória a possibilidade de realizar pequenas actualizações ao produto desenvolvido após a sua colocação no mercado.

Tabela 2.2: Procedimento para desenvolvimento de produtos [1]

Desenvolvimento do Conceito	Decisões ao nível do sistema	Decisões ao nível dos pormenores	Teste do produto e realização de ajustes
	Arquitectura Modular		
	Equipa deve ser liderada por alguém com experiência em arquitectura de sistemas	Desenvolvimento dos componentes realizado em paralelo	Foco na verificação de interfaces e interacções não previstas
Escolha dos princípios de funcionamento	Interligar elementos funcionais a componentes	Monitorização dos componentes em relação a padrões de interface e desempenho desejados	Possíveis optimizações de desempenho podem ser realizadas em apenas alguns dos componentes
Definição dos objectivos de desempenho	Definir os padrões ao nível de interfaces e protocolos	Divisão das tarefas por especialistas em cada área	Testes dos componentes podem ser realizados independentemente
	Arquitectura Integral		
Definição das características e a variabilidade desejadas	Equipa deve ser liderada por alguém com experiência em integração de sistemas	Interacção constante é necessária para avaliar o desempenho e as repercussões de mudanças durante o desenvolvimento	Foco no ajuste do sistema de forma geral
Escolha da arquitectura	Ênfase no desempenho geral do sistema	Os criadores dos componentes encontram-se todos na equipa central do desenvolvimento	Possíveis optimizações de desempenho propagam-se a muitos componentes
	Divisão do produto num pequeno número de subsistemas integrados	Atribuição de subsistemas a equipas multidisciplinares	Testes dos componentes têm de ser realizados em simultâneo

2.2.1 Vantagens

- Grande qualidade do produto final (a função e características são bem definidas);
- Para pequenos conjuntos base os custos de produção são algo reduzidos (pequena variedade nos métodos de produção);

2.2.2 Desvantagens

- Novas variantes são dispendiosas de produzir porque adicionam novos métodos de produção;
- Apenas é sustentável produzir um número reduzido de variantes, principalmente se o número de unidades por variante for baixo;

2.3 Estrutura modular

2.3.1 Vantagens

- Grande qualidade do módulo é fácil de obter;
- A complexidade reduzida de cada módulo facilita a produção, sendo menos dispendioso criar variantes, especialmente se as características das variantes do módulo permitirem que um mesmo processo de fabrico seja usado sem diferenças significativas para as diferentes variantes;

2.3.2 Desvantagens

- Qualidade da interligação entre módulos é geralmente mais reduzida que a qualidade de cada módulo, efectivamente reduzindo a qualidade do conjunto dos módulos (exemplo: perdas eléctricas na comunicação entre módulos que podem reduzir o rendimento comparativamente a uma estrutura específica);
- Para números reduzidos de variantes os custos de produção poderão ser mais elevados que uma estrutura específica para a aplicação ou, pelo menos, ter uma relação custo/qualidade final mais alta que a da estrutura não modular;

As estruturas modulares podem ser divididas em três categorias diferentes segundo Ulrich [1]. Essas categorias consistem numa divisão dos principais métodos de interligação da função desejada e o componente/módulo necessário para realizar a função ou ao nível da interligação entre módulos. Essas categorias são então: Estrutura Modular com Interfaces Específicas, Estrutura Modular com Elemento Central e Estrutura Modular Seccional.

2.3.3 Estrutura Modular com Interfaces Específicas

Neste tipo de estrutura modular, cada um dos módulos do sistema tem uma interface própria que difere da utilizada por outros módulos. Um exemplo deste tipo de estrutura modular são os automóveis, que apesar de terem estruturas modulares, possuem interfaces físicas e electrónicas específicas para o rádio, computador de bordo, entre outros elementos, que

apesar de poderem ser removidos e substituídos como em qualquer estrutura modular, considerando por exemplo o rádio, este tem um lugar reservado e não pode ser colocado de nenhuma outra forma sem alterar a estrutura do carro. Outro exemplo de uma estrutura modular com interfaces específicas é o sistema de engrenagens referido anteriormente, uma vez que uma simples roda dentada tem uma interface interior (o orifício que poderá existir para a ligação a um veio) e uma interface dentada no exterior que permite a interacção com outras rodas dentadas ou outras peças mecânicas. A roda dentada tem uma única função bem definida que é a transmissão de energia mecânica entre dois ou mais pontos. O posicionamento relativo das rodas dentadas e o seu número não tem qualquer influência na função associada à roda dentada, modificando apenas o propósito do sistema de engrenagens de forma geral. Isto significa que existe uma relação unívoca entre uma função e um componente, tal como o esperado numa estrutura modular.

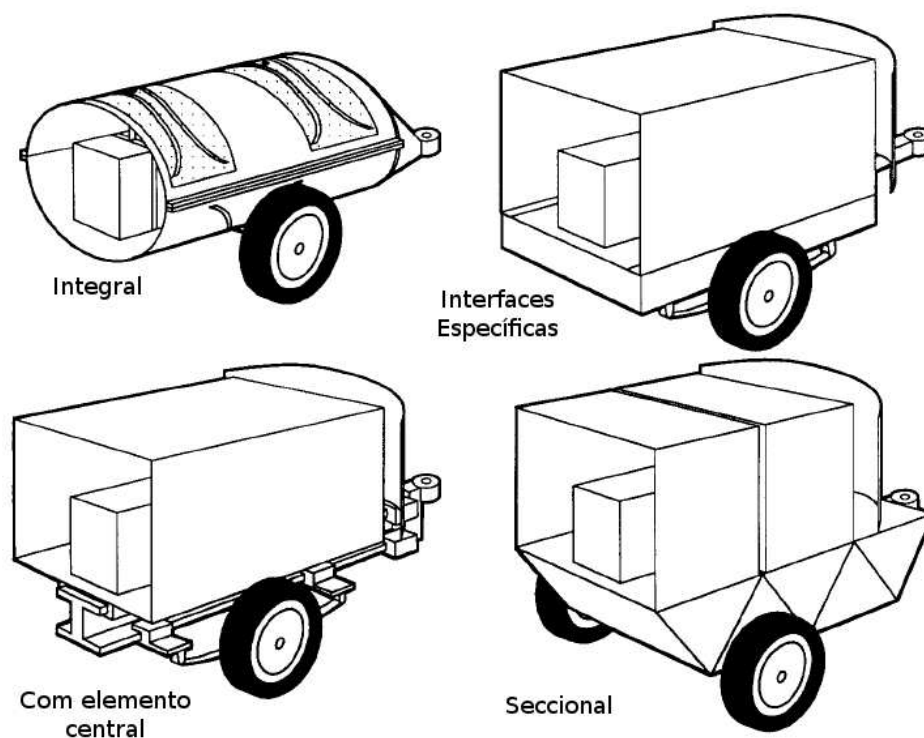


Figura 2.1: Diferentes estruturas para um atrelado automóvel [1]

2.3.4 Estrutura Modular com Elemento Central

A Estrutura Modular com Elemento Central, como o nome indica, possui um módulo central que realiza a interligação entre todos os elementos do sistema. Este elemento central pode ser um elemento mecânico vital num sistema, como uma viga mestra que interligue todos os componentes mecânicos do sistema, ou um elemento electrónico central que realize a interligação e gestão dos restantes módulos. Um circuito electrónico com um barramento que interligue diversos módulos é um claro exemplo deste tipo de estrutura modular.

2.3.5 Estrutura Modular Seccional

Numa Estrutura Modular Seccional os elementos do sistema encontram-se interligados através de interfaces genéricas semelhantes entre si. Este tipo de estrutura modular tem uma grande aplicação ao nível do mobiliário e dispositivos electrónicos com periféricos com uma interface genérica que permita adicionar ou remover secções de forma simples.

Tabela 2.3: Comparação resumida entre os diferentes tipos de estrutura [1]

	Estrutura Integral	Estrutura Modular com Interfaces Específicas	Estrutura Modular com Elemento Central	Estrutura Modular Seccional
Definição	Relação complexa entre elementos funcionais e componentes;	Relação directa entre elementos funcionais e componentes; Interfaces entre elementos não se encontram acopladas;		
	Interfaces acopladas entre componentes podem ser utilizadas;	Interfaces entre componentes são todas diferentes;	Interfaces entre componentes são todas iguais;	
			Um único elemento liga todos os outros componentes;	
Modificações ao Produto	Qualquer mudança em termos de funcionalidade requer modificações em vários elementos;	Alterações funcionais podem ser realizadas com o produto mesmo após a sua aplicação prática; Os fabricantes podem mudar as funcionalidades do modelo em gerações seguintes através da mudança de um único componente;		
Variabilidade do Produto	Variabilidade não exequível sem processos de produção flexíveis de componentes;	Os produtos podem ser montados de forma combinatória a partir de um número reduzido de componentes diferentes para criar variabilidade;		
		Variabilidade possível mesmo sem processos de produção flexíveis;		Variabilidade limitada à escolha de componentes numa estrutura de produto predefinida;
Componentes Padrão		Componentes podem seguir um padrão numa linha de produtos; Firmas podem usar componentes padrão disponibilizados pelos fornecedores; Interfaces podem obedecer a um padrão da indústria;		
Desempenho do Produto	O desempenho do produto em termos gerais pode ser mais elevado;	Pode melhorar o desempenho local; Interfaces de desacoplamento podem requerer massa e dimensão adicionais; Relação directa entre elementos funcionais e componentes impede o uso de múltiplas funções por componente, podendo levar a		

		redundância física;		
			Interfaces padrão podem introduzir redundância adicional e excesso de partes físicas;	
Gestão do Desenvolvimento de Produto	Requer uma coordenação rigorosa das tarefas de desenvolvimento;	Tarefas de desenvolvimento podem ser separadas facilmente, permitindo a realização paralela de tarefas; Especialização e divisão de trabalho possíveis; Inovação em termos de arquitectura pode ser difícil; Requer a criação de uma arquitectura global do produto numa topologia que parte da visão geral para os detalhes;		
Exemplos	Corpo de um automóvel;	Corpo e estrutura de um camião;		
	Sinal Néon/iluminação;	Candeeiro de mesa com lâmpada e cobertura;	Iluminação de vias;	
			Prateleiras com suportes e viga de ligação;	Caixas de arrumação que podem ser empilhadas;

2.4 Conclusão

Como é possível perceber pelos exemplos anteriores e as vantagens/desvantagens referidas, ambas as estruturas têm áreas de aplicação preferencial e apesar de poderem ser usadas nas mesmas situações, cada tipo de estrutura tem o seu domínio. No entanto, num mundo em que a personalização e a criação de diversas variantes de um mesmo produto é uma das melhores maneiras de criar produtos diferenciados e capazes de atrair diferentes segmentos de mercado, torna-se importante adoptar estruturas modulares. Por exemplo, diversos computadores portáteis usam processadores ou módulos de comunicação sem fios iguais, tendo no entanto os mesmos diferentes placas gráficas ou aspecto exterior. Os custos de produzir esses portáteis seria astronómico se em vez de serem usados diversos módulos, uma estrutura específica fosse criada com base em partes não modulares, no entanto com a sua estrutura modular, os preços de produção são quase insignificantes quando comparados ao preço de venda ao público. Marshall *et al* [3] vê a modularização de um produto como uma forma de simplificar os processos industriais de desenvolvimento e produção de um produto de complexidade elevada a partir da divisão em módulos mais simples. Kusiak [4] vê a produção modular como uma resposta à pressão dos mercados de rápida mudança e aos curtos prazos para a disponibilização de produtos aos clientes.

Na prática, a concepção modular de um produto pode ser entendida como um planeamento da atribuição de funções a componentes físicos de uma forma injectiva, isto é, a cada função pretendida corresponde um componente físico (cada função pode possuir sub funções, uma vez que um módulo pode fazer mais do que uma operação ou tipo de operação), enquanto a concepção integral tem uma interligação não única entre funções a desempenhar e os respectivos componentes físicos, o que significa que os restantes elementos físicos têm de ser considerados desde o início da concepção, devido às relações de interdependência.

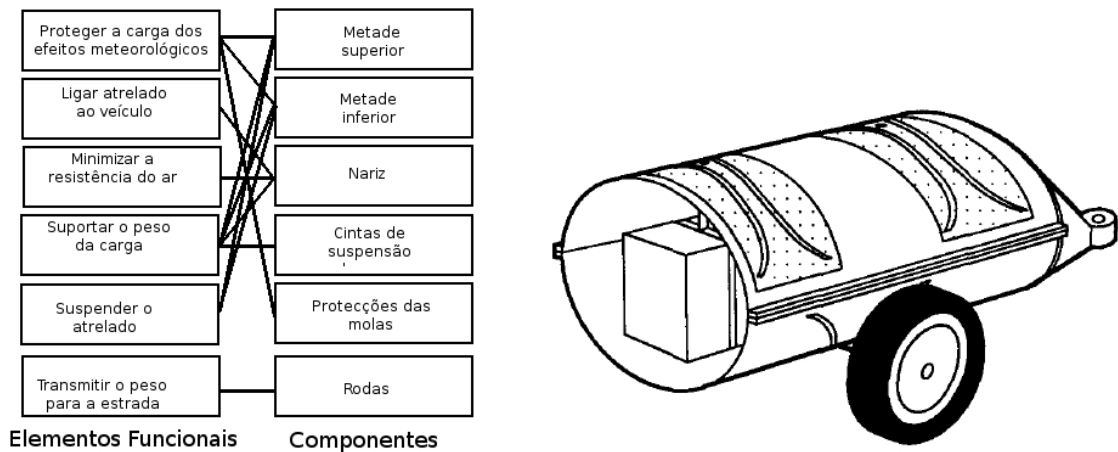


Figura 2.2: Relação não unívoca entre função e componente numa estrutura integral [1]

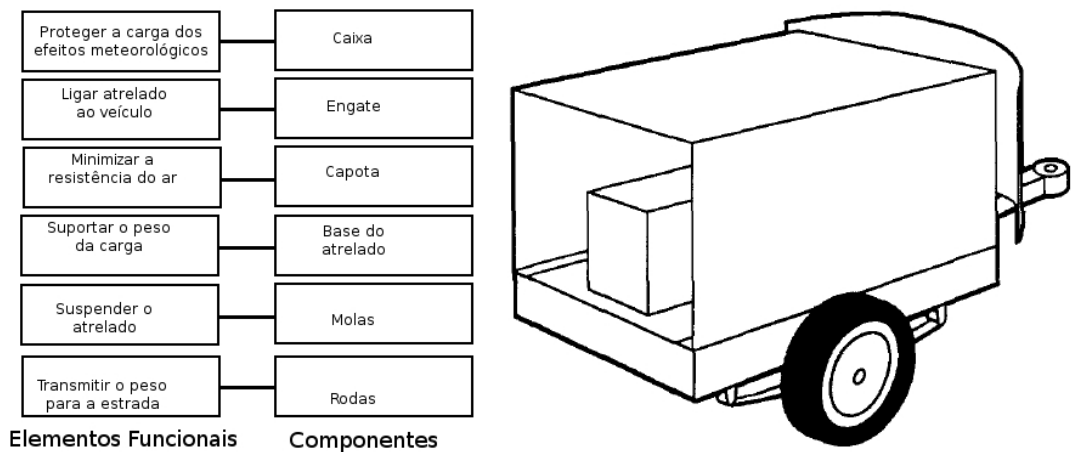


Figura 2.3: Relação unívoca entre função e componente numa estrutura modular [1]

Os conceitos de concepção modular actuais não se encontram ainda normalizados, pelo que diversos autores defendem diversas definições, dependendo a definição maioritariamente do campo de aplicação (mecânica, electrónica, informática, entre outras áreas), Sanchez e Mahoney [5], Gershenson *et al* [6] e [7] apresentam alguns exemplos destas diferentes

definições e algumas definições mais abrangentes. No entanto algumas características são semelhantes e muitas comparações com a concepção integral existem, tal como a apresentada na tabela seguinte.

Tabela 2.4: Comparação dos benefícios da concepção modular e da concepção integral [8]

<i>Concepção Modular</i>	<i>Concepção Integral</i>
Especialização de tarefas por módulo	Aprendizagem interactiva
Maior número de variantes do produto	Elevada optimização do produto
Facilita as economias de escala através do uso de componentes comuns	Inovações sistemáticas
Redução de custos em inventário e logística	Maior acesso a informação
Reduzidos custos associados ao ciclo de vida devido a uma manutenção fácil	Protecção contra inovação por imitação
Ciclos de vida mais curtos através de actualizações, adições e adaptações	Fortes barreiras a novas entradas de fornecedores de componentes e módulos
Reutilização flexível de componentes	
Sistemas fiáveis devido ao elevado volume de produção e a uma curva de aprendizagem mais acessível	
Montagem mais rápida e menor tempo de produção	
Possível adiar a diferenciação do produto para responder de forma mais rápida às necessidades do mercado	
Fabrico paralelo dos módulos	
Desenvolvimento rápido dos produtos	
Exemplos: Computadores, brinquedos, canetas...	Exemplos: DVD, satélites, carros de alta competição...

Capítulo 3

Fonte de Alimentação Comutável

3.1 Introdução

As fontes de alimentação dos dispositivos electrónicos têm sofrido grandes mudanças nas últimas décadas, especialmente no que se refere à miniaturização, eficiência e custos. Existem diversas topologias no que se refere a fontes comutadas nomeadamente *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*, *Flyback*, *Forward*, *Push-Pull*, *Half-Bridge* e *Full-Bridge*, para referir as mais comuns. Cada tipologia tem uma aplicação típica sendo a escolha geralmente associada à potência desejada na saída do conversor, corrente de pico máxima, custo, complexidade, entre outros factores. Por exemplo, um conversor de tipologia *Flyback* é geralmente utilizado para aplicações de potência baixa devido a um custo reduzido quando comparado a outras topologias pois o número de componentes que o compõem é mais reduzido, sendo a corrente de pico geralmente mais alta o que faz com que outras topologias sejam mais adequadas para potências médias ou altas. Singh *et al* apresenta em [9] uma revisão de topologias de fontes de alimentação comutadas que descreve de forma sucinta a maioria das topologias aqui referidas, entre outras variantes com aplicações mais específicas.

O facto de as fontes de alimentação comutadas, devido à sua natureza, terem necessidades ao nível de filtros de interferência electromagnética, filtros de distorção harmónica e da correcção dinâmica do factor de potência, para funcionarem da forma mais eficiente possível e com a mínima perturbação da rede, leva a que vários andares de conversão sejam geralmente necessários para permitir o cumprimento de todos os requisitos. A existência de vários andares de conversão significa obviamente que as fontes de alimentação têm custos mais significativos devido ao aumento do número de componentes, relativamente a uma fonte sem estas características, além de representar perdas de comutação maiores nos interruptores devido ao seu maior número, algo que reduz o rendimento máximo da fonte, além de possuírem uma complexidade mais elevada que dificulta a análise e a realização de ajustes nas fontes concebidas.

Com o intuito de colmatar os problemas originados pela complexidade, o custo elevado de um maior número de componentes e as perdas de comutação originadas por um maior número de interruptores, surgiram diversas topologias que visam combinar a correcção do factor de potência, filtros, entre outras funções num único andar de conversão, obviamente com compromissos ao nível de eficiência, versatilidade e outros factores, uma vez que é impossível que uma fonte com um único andar de conversão seja eficaz em todas as tarefas que tem de realizar, pois numa topologia com diversos andares cada andar pode ser optimizado para obter os melhores resultados num determinado parâmetro sem afectar de

forma significativa os restantes, enquanto numa topologia com um único andar a optimização de um parâmetro prejudica os resultados de outros parâmetros, sendo necessário chegar a um compromisso adequado à aplicação. As referências [10] a [24] demonstram a variedade de topologias de fontes de alimentação comutadas com um único andar que é possível encontrar na literatura. Este tópico tem sido alvo de diversas investigações e publicações a nível mundial nos últimos dez a quinze anos e as referências referidas são apenas um pequeno número de exemplos numa maré de publicações, que poderão não cobrir todos os temas no que toca a fontes de alimentação comutadas com um único andar, mas representam a maioria dos temas principais nesta área, o tipo de compromissos necessários entre parâmetros, entre outras informações com uma maior abrangência ou maior especificidade.

As referências [25] a [28] referem algumas considerações ao nível da determinação de parâmetros, como a frequência de comutação ideal para um conversor e formas de controlo utilizadas, desde algumas mais comuns até algumas mais exóticas. Georgakas *et al* [25] refere a combinação de diferentes técnicas de comutação e a determinação da frequência de comutação ideal como forma de otimizar a eficiência de um conversor AC-DC e simultaneamente o factor de potência. Chang *et al* [26] apresenta um conversor sem bobina após o estágio de rectificação, sendo um dos enrolamentos do primário do transformador responsável por esta acção de filtro da distorção harmónica na corrente, o que de acordo com os autores permite reduzir a dimensão e peso do conversor, entre outras vantagens. Lázaro *et al* [27] descreve uma metodologia de concepção de conversores AC-DC que permite reduzir a dimensão do condensador de armazenamento através da colocação de um elemento indutivo em série com o condensador no secundário do transformador, o que reduz a tensão aos terminais do condensador e consequentemente permite a selecção de um condensador para uma tensão mais reduzida, o que geralmente reduz de forma muito significativa o tamanho do condensador e reduz o risco de falha do conversor devido a uma menor probabilidade de o condensador ultrapassar o limite máximo de tensão. Genc *et al* [28] apresenta um conversor AC-DC composto por duas células, que possui um circuito auxiliar capaz de reduzir as perdas de comutação dos interruptores principais recorrendo a uma técnica habitualmente referida como ZVT (*Zero Voltage Transition*, ou seja transição a tensão nula), sendo a comutação do circuito auxiliar feita de acordo com técnicas de comutação suave, com o intuito de reduzir as perdas de comutação neste circuito que deve ter perdas reduzidas comparadas com a redução de perdas no circuito principal.

3.2 Descrição Geral do Módulo de Potência

A conversão AC para DC com qualidade é algo muito importante para qualquer dispositivo electrónico, uma vez que a grande maioria dos equipamentos electrónicos trabalha com uma alimentação interna DC mas o transporte de energia na rede é feito em AC. Por essa razão, o Módulo de Potência é um módulo fundamental para qualquer dispositivo electrónico, sendo

necessária uma concepção cuidadosa para criar um módulo capaz de fornecer uma alimentação DC fiável.

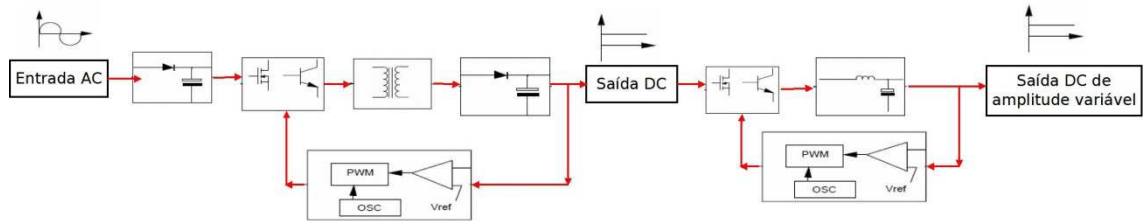


Figura 3.1: Diagrama representativo do Módulo de Potência

Com o intuito de obter uma alimentação DC fiável, o Módulo de Potência possui um primeiro andar com um conversor *Flyback* com uma saída principal e três saídas secundárias que proporcionam tensões DC de amplitude constante. A entrada no conversor é feita através de um filtro LC de modo comum que tem como objectivo reduzir os efeitos dos harmónicos de alta frequência criados pela comutação a alta frequência do interruptor do conversor *Flyback* na rede eléctrica que fornece energia ao circuito. Após o filtro de modo comum é realizada a rectificação inicial da tensão proveniente da rede sendo esta posteriormente filtrada por um filtro capacitivo (1) com o intuito de reduzir o *ripple* para um valor adequado. Um interruptor *Mosfet* (2) é usado numa implementação que combina o interruptor com a electrónica de controlo (5) num único circuito integrado, uma solução muito comum para conversores de baixa potência como os *Flyback*.

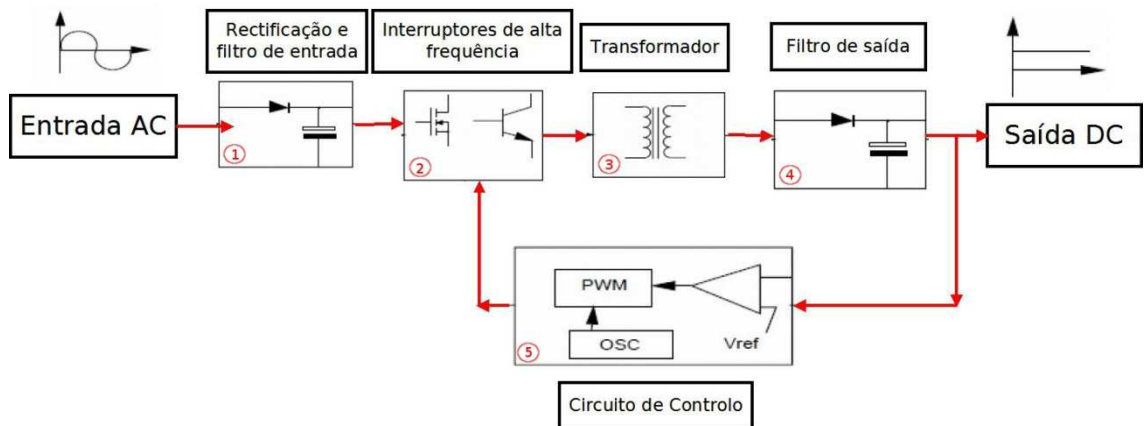


Figura 3.2: Entrada do módulo e conversor *Flyback* em maior detalhe

Um transformador (3) adequado para utilização em circuitos de alta frequência converte então a tensão de entrada no valor desejado para a tensão de saída do conversor *Flyback*, devendo rondar os 24V durante o funcionamento normal do conversor. Este elemento fornece algum isolamento galvânico, reduzindo alguns dos efeitos nefastos que a energia a circular na rede poderia exercer se aplicada directamente no circuito rectificador, além de reduzir o

valor da tensão máxima no secundário para valores mais adequados ao funcionamento dos andares seguintes do módulo. Ligações intermédias no enrolamento principal do secundário e um enrolamento adicional permitem a utilização de três tensões de amplitude fixa, nomeadamente 18V e 5V das ligações intermédias (aproximadamente) e cerca de 15V no enrolamento adicional, que permitem o uso de tensões mais baixas para fins distintos. Estas três tensões não são realimentadas para o conversor *Flyback* e por isso mesmo não são reguladas, podendo a tensão variar em amplitude, especialmente em situações de elevada potência de saída. Por isso mesmo, não é aconselhável usar directamente estas tensões para fornecer potência a circuitos que tenham limites de operacionalidade muito restritos.

A seguir ao transformador encontra-se a rectificação final e um filtro capacitivo (4) que reduz o *ripple* da tensão na saída do conversor *Flyback* para permitir a sua utilização nos circuitos a montante de forma relativamente estável. Este filtro é semelhante em todas as saídas do transformador, proporcionando valores percentuais de *ripple* semelhantes.

A saída do enrolamento adicional (15V) é usada para alimentar a electrónica de baixo consumo através de reguladores de tensão que fornecem o valor de tensão adequado (3V, 3.3V e 5V). Estes reguladores garantem uma tensão estável, algo que colmata o facto de a saída do transformador poder variar ao longo do tempo, consoante os consumos de potência nos enrolamentos adicional e principal do secundário. A alimentação da electrónica está sempre ligada desde que o conversor *Flyback* esteja ligado a alimentação externa, que se encontra dentro dos limites habitualmente referidos para alimentação universal, ou seja, 90V a 270V (valores eficazes da tensão AC). O controlador do conversor implementa um sistema de detecção de tensão reduzida (que impossibilita a obtenção do valor desejado de tensão/corrente na saída) e de detecção de tensão excessiva (que pode potencialmente danificar o interruptor ou outros elementos do circuito), através da medição da corrente proveniente de resistências dimensionadas consoante os limites inferiores e superiores da tensão adequada ao funcionamento do conversor, colocando o interruptor num estado de baixo consumo de energia até que as condições de funcionamento normal sejam restabelecidas.

A alimentação de potência proveniente do conversor *Flyback* passa então por um conversor *Buck* (6 e 8) com tensão de saída regulável através de um potenciómetro digital na malha de realimentação do conversor. O valor do potenciómetro digital pode ser modificado pelo microprocessador (8), permitindo ajustar a tensão de saída do conversor em tempo real, reduzindo os efeitos causados pelo calor e outros factores que possam causar a variação do valor da resistência da malha de realimentação durante o funcionamento do conversor. O conversor *Buck* adapta-se a variações da alimentação proveniente do andar anterior através de uma conversão a frequência constante e *duty cycle* variável. Isto significa que pequenas quedas do valor de tensão no conversor *Flyback* ou pequenos picos não terão um efeito significativo na saída de amplitude variável do módulo de potência, mesmo que essas quedas

ou picos não tenham sido completamente suprimidas pelo filtro do rectificador. A saída do conversor *Buck* possui um filtro LC (7) que permite filtrar os efeitos da comutação a frequência elevada realizada no interior do conversor, garantindo assim um *ripple* reduzido na tensão e corrente de saída e a supressão de harmónicos a elevada frequência que possam aparecer na saída do conversor.

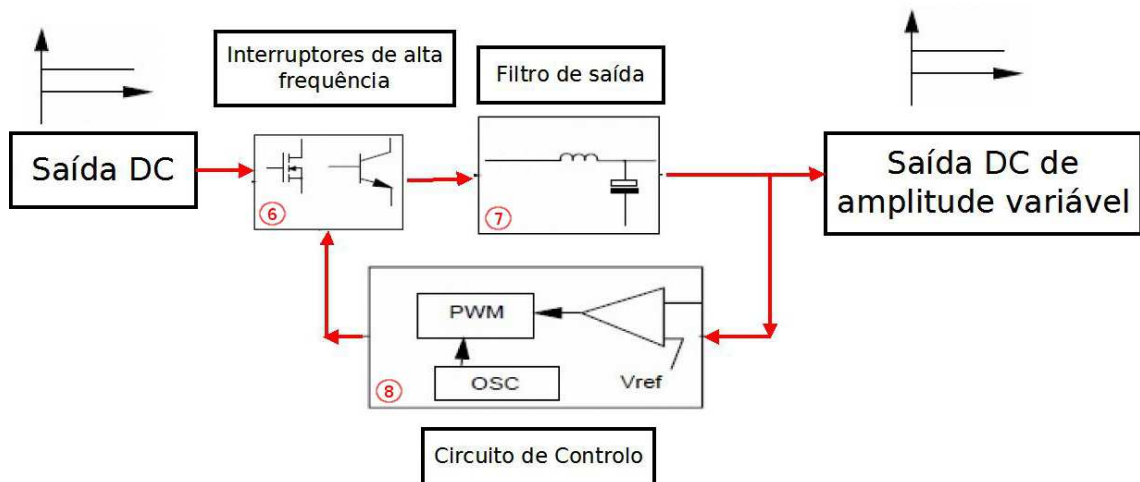


Figura 3.3: Detalhe do conversor *Buck* usado no segundo patamar do módulo

Em situações em que os elementos de potência alimentados pelo conversor *Buck* não necessitem de estar ligados (dispositivo encontra-se em *standby*), com os sensores necessários à detecção de um novo período activo a estarem ligados à alimentação de baixa potência, o conversor pode ser colocado num estado de *standby* com consumo mais reduzido ou completamente desligado, fazendo com que os consumos em *standby* correspondam unicamente aos consumos da electrónica de baixa potência.

As diversas tensões DC de amplitude constante provenientes do conversor *Flyback*, a tensão DC de amplitude ajustável do conversor *Buck* e as tensões DC que permitem fornecer energia à electrónica de baixa potência encontram-se acessíveis a partir do exterior do módulo, permitindo assim alimentar outros módulos ou dispositivos com uma ou várias das tensões disponíveis no módulo.

3.3 Dimensionamento do módulo de potência

3.3.1 Dimensionamento dos componentes externos para o conversor

Flyback

O dimensionamento dos componentes para conceber o conversor *Flyback* utilizado no primeiro andar da conversão de potência pressupõe diversas características desejadas, sendo estas apresentadas de forma sucinta na tabela seguinte.

Tabela 3.1: Características gerais do conversor *Flyback*

Tensão de Entrada (V tensão eficaz)	90 a 270
Frequência da rede (Hz)	50 ou 60
Potência na saída (W)	60
Tensão de saída (V)	24
Corrente de saída (A)	2.5
Eficiência mínima esperada (%)	80
Potência na entrada expectável (W)	75

A corrente média de entrada num conversor *Flyback* depende da tensão de entrada, o que significa que os valores extremos para esta grandeza serão obtidos quando a tensão de entrada for 90Vrms (corrente média máxima) e 270Vrms (corrente média mínima). A corrente média de entrada pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$I_{IN_{AV}} = \frac{P_{IN}}{V_{IN_{RMS}} \times \sqrt{2}} \quad (3.1)$$

Assim, quando o valor da tensão de entrada é mínimo, a corrente média é de aproximadamente 0.59A, enquanto para o valor máximo da tensão de entrada corresponde a cerca de 0.20A. O valor máximo da corrente média é de especial importância por indicar a corrente de valor máximo que pode circular de forma contínua nos elementos a montante do primário do transformador do conversor, influenciando o comportamento a longo prazo do conversor. Obviamente que o valor de 0.59A não é o valor mais elevado de corrente que pode aparecer no circuito e em termos de parâmetros de selecção de componentes e de protecções para elementos do circuito a corrente de pico é muito mais importante e uma maior fonte de possíveis danos durante o funcionamento do circuito. Num conversor *Flyback* o cálculo da corrente de pico é na realidade uma das características mais importantes para um bom dimensionamento, uma vez que uma corrente de pico elevada, comparativamente à corrente média, é um dos problemas da topologia *Flyback* e a razão de a maioria dos conversores *Flyback* serem utilizados para fornecer potências inferiores a 150W. A topologia *Flyback* é utilizada em fontes de alimentação de baixa potência apesar da sua corrente de pico elevada pelo simples facto de que necessita de menos componentes e por isso é geralmente menos dispendiosa que outras topologias, além de ser mais simples de implementar. A corrente de pico pode então ser calculada de forma aproximada através da seguinte equação empírica:

$$I_{peak} = \frac{k_{flyback} \times P_{OUT}}{V_{IN_{min}} \times \sqrt{2}} \quad (3.2)$$

Para uma potência de saída de 60W e uma constante $k_{flyback}$ de 5.5, a corrente de pico corresponde a cerca de 2.59A, ou seja quatro vezes superior ao valor máximo da corrente média.

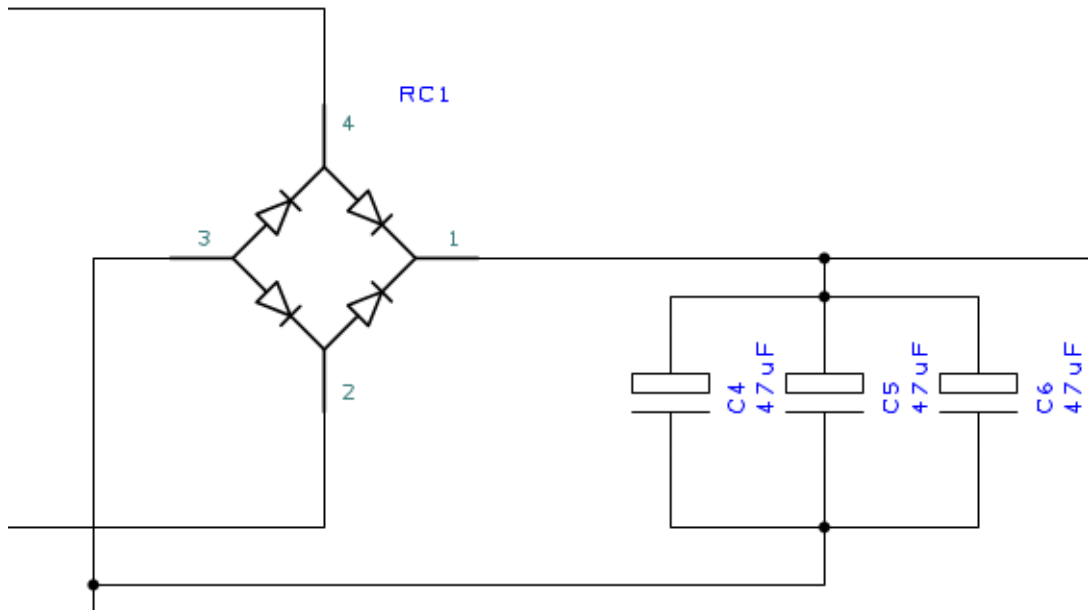


Figura 3.4: Filtro de entrada do conversor

O filtro capacitivo colocado após a ponte rectificadora junto à entrada do conversor tem como objectivo reduzir o *ripple* da tensão para valores aceitáveis para os componentes a jusante do filtro. Este filtro é geralmente composto por um ou vários condensadores de valor relativamente elevado (obviamente dependendo do contexto) devido à necessidade de armazenar grandes quantidades de energia para reduzir os efeitos que as variações súbitas da corrente no circuito têm no valor instantâneo da tensão, efectivamente impedindo a tensão de subir ou descer de forma significativa num curto período temporal. O *datasheet* do controlador usado durante o dimensionamento do conversor *Flyback* sugere a colocação de condensadores no filtro de entrada com um valor total superior a $2\mu\text{F}$ por cada 1W de potência de saída do conversor, o que indica neste caso a necessidade de ter um filtro de entrada com $C_{IN} > 120\mu\text{F}$. Ainda na entrada do circuito, um condensador de valor mais reduzido é desejável para reduzir os efeitos da interferência electromagnética, sendo um valor de cerca de 100nF escolhido para esta aplicação.

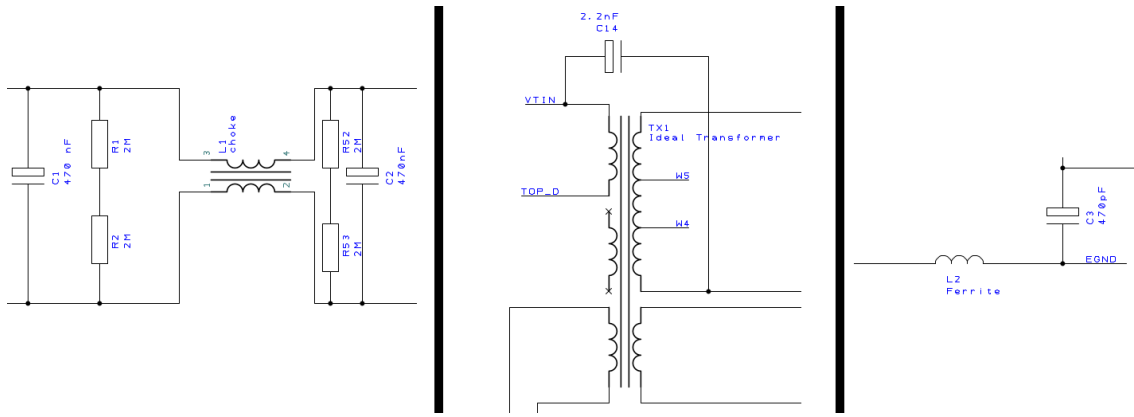


Figura 3.5: Filtros de interferência electromagnética

Quanto à interferência electromagnética, são utilizados dois condensadores de 470nF e um componente indutivo vulgarmente conhecido como *choke*, que é geralmente constituído por duas bobinas isoladas (devido à anulação de alguns efeitos relativos à indução de correntes devido ao campo magnético de cada bobina) ou por uma bobina isolada. Os componentes referidos formam um filtro para as interferências de modo comum, no entanto numa fonte comutada as interferências de modo diferencial podem ser significativas e por isso mesmo um filtro para o efeito foi criado. O filtro para as interferências de modo diferencial é constituído por uma conta de ferrite no caminho de retorno ao terminal de ligação à terra de protecção e um condensador de 2.2nF entre o terminal positivo do primário e o terminal de retorno do secundário.

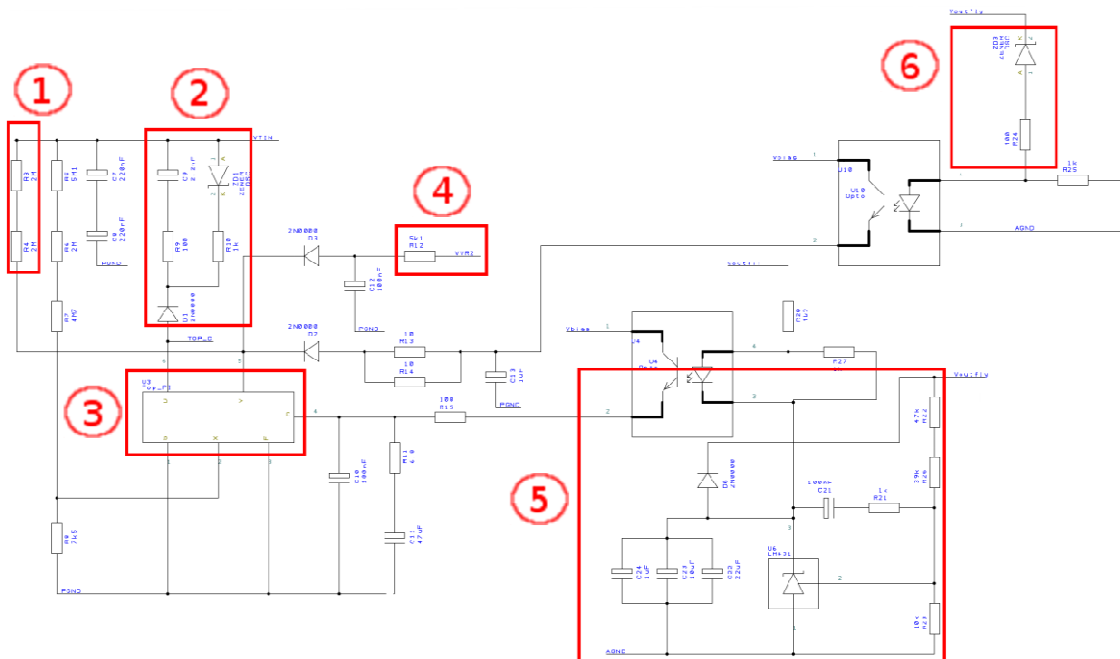


Figura 3.6: Controlador *Flyback*, realimentação da saída e detecção de sobretensão ou subtensão

Um *snubber* (2) composto por um ramo Condensador - Resistência - Díodo e um ramo *Zener* - Resistência é utilizado para dissipar parte da corrente de fuga do primário do transformador utilizado. Isto permite reduzir as perdas do transformador durante o funcionamento normal sem no entanto aumentar o consumo em *standby* ou em casos de cargas de baixa potência (como por exemplo em situações em que apenas a electrónica de controlo se encontre ligada nos restantes módulos), tal como aconteceria com um *snubber* apenas com o primeiro ramo. Os valores para este *snubber* são geralmente seleccionados de forma empírica, por forma a otimizar o resultado consoante a aplicação prática.

O filtro de saída do conversor *Flyback* é capacitivo tal como o de entrada, reduzindo o *ripple* da tensão na saída para que os reguladores de tensão que alimentam a electrónica de baixo consumo, o conversor *Buck* que fornece energia a elementos de potência mais elevada e quaisquer outros dispositivos ligados a qualquer uma das saídas do transformador do conversor possam funcionar com tensões e correntes relativamente estáveis. Este filtro é constituído por dois condensadores de valor relativamente elevado ($470\mu\text{F}$) em paralelo para reduzir os efeitos da resistência equivalente destes componentes (ESR), o que reduz as perdas nestes elementos do circuito. Uma conta de ferrite e um condensador de valor ainda algo elevado ($47\mu\text{F}$) são usados para reduzir o ruído causado pela comutação a frequência elevada. Este filtro é igual em cada uma das saídas do transformador, proporcionando valores percentuais de *ripple* semelhantes em todas as saídas.

O controlador utilizado para o conversor *Flyback* é um TOP258YN da *Power Integrations* (3), que permite implementar detecção de tensão muito reduzida ou muito elevada através da detecção da corrente que passa através de uma resistência (1) colocada entre a saída do filtro capacitivo após a ponte rectificadora do conversor e o pino de monitorização de tensão do controlador. Com uma resistência de $4\text{M}\Omega$, o limite inferior para funcionamento do conversor é de cerca de 100V após o filtro (tensão proveniente da rede encontra-se algo abaixo dos 90V em termos de valor eficaz), enquanto o valor do limite superior é cerca de 450V (tensão proveniente da rede ultrapassou os 300V em termos de valor eficaz). Obviamente em condições de funcionamento normal do conversor, o limite superior seria dificilmente obtido devido às protecções de entrada e à acção do filtro capacitivo, no entanto em caso de falha nessas protecções, o controlador seria ainda capaz de se proteger e ao circuito a montante, o que adiciona mais alguma segurança ao módulo, desta forma evitando que quaisquer danos provocados por condições anormais de picos da tensão ou corrente da rede se propaguem aos módulos alimentados por este.

A realimentação da tensão de saída do conversor *Flyback* (5) é feita através do uso de um divisor de tensão resistivo ligado à saída de 24V do conversor e de uma referência de tensão TL431QDBZR (tensão de 2.5V). Para o valor de tensão desejado, o divisor de tensão é composto por uma resistência de $10\text{k}\Omega$ e uma resistência dependente da tensão desejada na

saída do conversor. O valor da resistência $R_{feedback}$ pode ser obtido através da seguinte equação:

$$R_{feedback} = \frac{U_{flyback}^{-2.5}}{2.5} \times 10 \times 10^3 \quad (3.3)$$

Para uma tensão de 24V na saída do conversor, um valor de 86kΩ seria adequado para $R_{feedback}$. Além da comum realimentação para ajuste da tensão de saída existem dois sub-circuitos de detecção de tensão elevada no secundário, que permitem que o controlador deixe de comutar a tensão no primário até que o valor de tensão baixe para limites aceitáveis. Uma das formas de detecção consiste na realimentação da tensão do enrolamento de *bias* (cerca de 15V) através de de um diodo de *Zener* de tensão nominal de 18V (4), sendo este um método indirecto de detecção de tensões elevadas na saída e implementado como forma de permitir ao circuito funcionar mesmo que algum problema ocorra na realimentação da tensão de saída. A outra forma de detecção consiste na utilização de um diodo de *Zener* com uma tensão nominal de 30V (6) ligado à saída de 24V do conversor e de um elemento opto-isolador.

3.3.2 Dimensionamento dos componentes externos para o conversor *Buck*

O dimensionamento dos componentes externos necessários para implementação do conversor *Buck* foi realizado de acordo com as precauções e sugestões de dimensionamento evidenciadas no exemplo de aplicação providenciado pelo fabricante no *datasheet* do conversor.

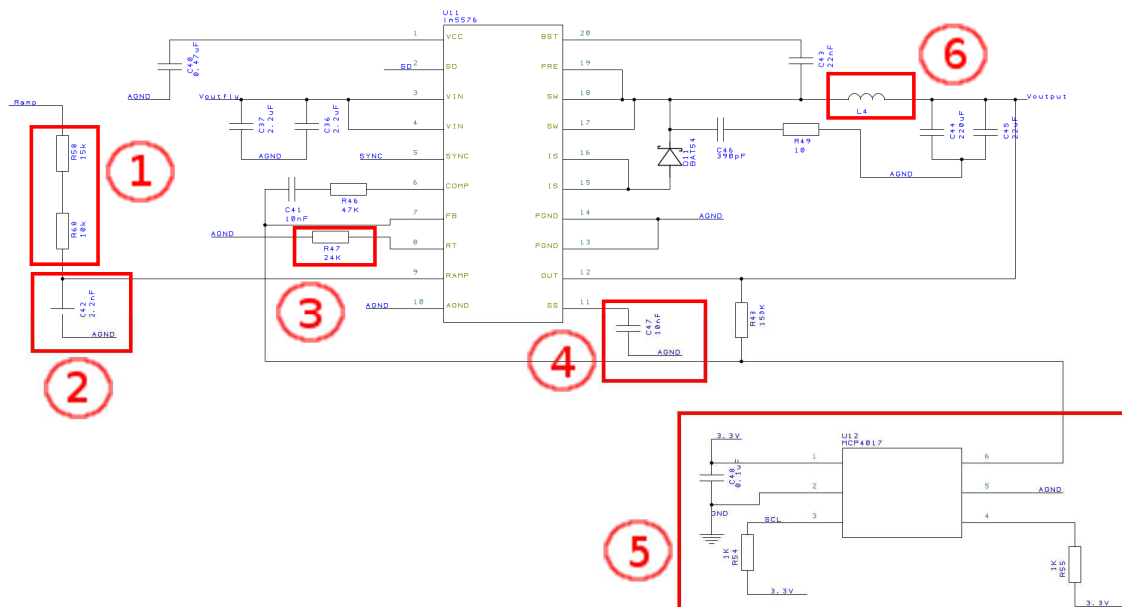


Figura 3.7: Conversor Buck e respectivos componentes externos

Um dos parâmetros mais importantes para a escolha dos componentes prende-se com a frequência de comutação escolhida para a conversão DC-DC no interior do conversor, sendo possível utilizar uma frequência de comutação entre 50kHz e 500kHz. Uma frequência de 250kHz foi escolhida como um compromisso entre eficiência elevada, componentes externos de dimensão relativamente reduzida e uma tensão de entrada mínima necessária para obter a tensão máxima de saída baixa o suficiente para existir uma margem entre os limites previstos para as tensões de entrada e os limites que podem ser utilizados sem afectar o circuito a jusante do conversor. A frequência de comutação é definida através do uso de uma resistência (3) que serve como entrada para o oscilador interno do conversor.

O valor da resistência necessária para uma determinada frequência de comutação obedece à seguinte equação:

$$R_T = \frac{\frac{1}{f_s} - 580 \times 10^{-9}}{135 \times 10^{-12}} \quad (3.4)$$

Para uma frequência de comutação de 250kHz, a equação anterior indica um valor para R_T de aproximadamente 25kΩ.

A saída do conversor necessita de uma bobina como parte do filtro LC que permite reduzir o ripple na tensão e na corrente proveniente do conversor, servindo para reduzir os efeitos da distorção harmónica habitualmente presentes em aplicações que requerem comutação a elevada frequência. O valor recomendado para a bobina (6) pode ser obtido através da seguinte equação:

$$L = \frac{V_{out} \times (V_{inmax} - V_{out})}{I_{ripple} \times f_s \times V_{inmax}} \quad (3.5)$$

Com o objectivo de utilizar uma bobina que possa ser implementada para qualquer uma das tensões de saída pretendidas, esta foi dimensionada para a tensão máxima de entrada esperada e a tensão de saída mais elevada. Para a frequência de comutação escolhida e para um *ripple* máximo da corrente de 0.5Ap-p, com uma tensão máxima de saída de 18V e uma tensão máxima de entrada de 40V, obtém-se um valor para a bobina de aproximadamente 80μH.

O conversor *Buck* necessita de um condensador (2) para a criação de uma rampa usada para controlar o sinal PWM. O valor deste condensador depende do valor escolhido para a bobina, sendo determinado através da seguinte expressão:

$$C_{ramp} = L \times 10^{-5} \quad (3.6)$$

Isto significa que o valor do condensador neste caso deverá ter um valor superior a 0.80nF, dependendo do valor final da bobina utilizada no filtro de saída do conversor *Buck*. Para

valores da tensão de saída superiores a 7.5V uma resistência R_{ramp} adicional é necessária entre o pino VCC e RAMP que fornece uma extensão adicional à rampa de controlo, que é necessária para realizar a conversão da forma desejada. Esta resistência é usada para fornecer uma corrente no pino RAMP superior aos 25 μ A fornecidos internamente ao pino. Com o intuito de permitir a calibração desta corrente consoante a tensão de saída desejada, uma resistência de valor fixo (1) foi ligada entre o pino de saída do DAC do microprocessador utilizado e o pino Ramp do conversor *Buck*. Isto simula a colocação de resistências de diferentes valores entre o pino VCC e o pino RAMP, dando maior versatilidade ao módulo e facilitando quaisquer operações de calibração necessárias devido à variabilidade de características de componentes como o circuito integrado do conversor *Buck* e a resistência (a variabilidade entre peças é uma das principais razões para o funcionamento distinto de circuitos criados com componentes semelhantes e pode causar graves problemas se ignorada).

Tabela 3.2: Valor da resistência usando VCC e valor do DAC para cada tensão de saída desejada

V_{OUT} (V)	I_{OS} (μ A)	R_{RAMP_VCC} (k Ω)	R_{RAMP_DAC} (k Ω)	R_{RAMP_FINAL} (k Ω)	V_{DAC} (V)	n_{DAC}
12	60	200	55	25	1.50	116
15	75	140	44		1.88	145
18	90	108	37		2.25	175
24	120	74	28		3.00	233

Na tabela anterior é possível observar qual o valor da resistência R_{RAMP} necessária para uma rampa adequada para cada uma das tensões de saída superiores a 7.5V implementadas, consoante a corrente I_{OS} recomendada pelo fabricante do conversor *Buck*. É também apresentado o valor da resistência máxima que permite obter a corrente I_{OS} com uma tensão de referência de 3.3V para o DAC, tendo sido escolhida uma resistência de 25k Ω para manter uma resolução próxima da máxima possível, sem no entanto abdicar de alguma margem relativamente aos 3.3V para eventual calibração. Por fim são apresentadas as tensões fornecidas pelo DAC para cada valor de tensão de saída desejada e qual o valor correspondente num DAC de 8 bits.

O conversor *Buck* seleccionado permite regular o período associado ao *Soft-Start* do dispositivo através do uso de um condensador (4). O tempo de *Soft-Start* pode ser obtido da seguinte forma:

$$t_{SS} = \frac{C_{SS} \times 1.225}{10 \times 10^{-6}} \quad (3.7)$$

O valor do condensador pode assim ser determinado através da expressão seguinte para um determinado t_{SS} :

$$C_{SS} = \frac{t_{SS} \times 10 \times 10^{-6}}{1.225} \quad (3.8)$$

Com um tempo de *Soft-Start* de 1ms, obtemos um valor para o condensador de aproximadamente 8nF.

Um divisor de tensão resistivo na malha de realimentação do conversor permite definir qual a tensão de saída desejada. A razão entre as resistências é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{R_{feedback}}{R_{ref}} = \frac{V_{out}}{1.225} - 1 \quad (3.9)$$

Por exemplo para as diversas tensões desejadas à saída do conversor *Buck* a razão entre as resistências é apresentada na tabela 2.

Tabela 3.3: Razão entre as resistências para diferentes valores de V_{out} pretendidos

Tensão de saída (V)	Razão entre as resistências
3.0	1.5
3.3	1.7
5.0	3.1
6.0	3.9
7.5	5.1
12.0	8.8
15.0	11.2
18.0	13.7

Para permitir a obtenção das diferentes razões entre resistências de forma autónoma no módulo, a utilização de uma resistência digital (ou potenciómetro digital) (5) como elemento de controlo da tensão de saída foi ponderada, uma vez que este tipo de resistência pode variar o seu valor de acordo com registos internos que podem ser acedidos e modificados por microprocessadores, permitindo ao módulo de potência a configuração do conversor de acordo com as necessidades do dispositivo ou de acordo com configurações predefinidas para esse dispositivo electrónico.

Os restantes componentes externos utilizados correspondem a valores recomendados pelo fabricante ou requerem uma adequação empírica durante a fase de implementação prática do módulo e por conseguinte o seu valor actual é apenas de referência.

3.3.3 Dimensionamento dos componentes para os reguladores de tensão

Quando se utilizam reguladores de tensão lineares existem sempre componentes externos que devem ser colocados com o intuito de proporcionar uma tensão estável na saída e melhorar o funcionamento deste componente a diversos níveis. Obviamente reguladores de tensão que permitem ajustar a tensão de saída não são excepção e por isso mesmo ao trabalhar com um regulador LM317 foram seguidas as indicações do fabricante com o objectivo de obter um desempenho adequado.

Começando pelos condensadores, um condensador de 100nF é geralmente recomendado no pino de entrada do regulador como forma de filtrar algum *ripple* que possa existir na alimentação ou ruído que possa aparecer devido a perturbações entre o local de onde provém a tensão de entrada e a localização do regulador. Na saída, um condensador de 1μF ajuda a filtrar a saída do regulador e melhora a resposta a transições repentinas na tensão. Finalmente, um condensador de 10 μF ligado ao pino de ajuste do regulador ajuda a melhorar a rejeição do *ripple*, reduzindo a amplificação do mesmo entre a entrada e a saída do regulador.

Durante falhas que causem um curto-circuito entre a tensão de entrada e o *ground*, o uso de díodos de protecção ajuda a proteger o regulador de eventuais descargas dos condensadores de forma potencialmente danosa para os circuitos internos do mesmo.

Para ajustar a tensão de saída do regulador é possível utilizar um divisor de tensão. Uma resistência de valor fixo R_{ADJ} é colocada entre o pino de saída e o pino de ajuste, enquanto uma resistência R_{VAR} de valor dependente da tensão desejada é colocada entre o pino de ajuste e o *ground*. O valor R_{VAR} pode ser obtido a partir da equação:

$$R_{VAR} = \frac{V_{out} - V_{ref}}{\frac{V_{ref}}{R_{ADJ}} + I_{ADJ}} \quad (3.10)$$

No entanto, como I_{ADJ} é geralmente cerca de 50μA, a seguinte equação pode ser usada para obter o valor aproximado de R_{VAR} :

$$R_{VAR} = R_{ADJ} \times \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

Para um valor de R_{ADJ} de 240Ω, V_{ref} de 1.25V e uma corrente I_{ADJ} de 50μA, os valores de R_{VAR} são apresentados na tabela seguinte para cada uma das três tensões utilizadas para alimentar electrónica de baixa potência.

Tabela 3.4: Valores de resistência consoante a tensão de saída desejada

V_{out}/V	R_{VAR}/Ω		
	Aproximação	Valor exacto	Componente real
3.0	336	333	330
3.3	394	390	390
5.0	720	713	720 (330+390)

Como é possível verificar na tabela anterior a equação aproximada e a equação exacta para obter R_{VAR} indicam valores muito semelhantes para a resistência a utilizar, o que indica que pelo menos para tensões de saída entre 3V e 5V o factor referente à corrente proveniente do pino de ajuste é de facto desprezável, uma vez que ambas as equações indicam valores reais de componentes muito semelhantes e a exactidão adicional do resultado exacto pode facilmente ser reduzida devido à variabilidade de parâmetros entre reguladores de tensão na prática (I_{ADJ} pode facilmente variar de forma ligeira entre componentes reduzindo a exactidão dos cálculos teóricos).

3.3.4 Dimensionamento dos elementos de protecção

A protecção dos elementos do circuito é algo extremamente importante para garantir que o módulo de potência seja capaz de suportar picos de tensão/corrente provenientes da rede sem sofrer danos significativos e que permitam ao módulo continuar a funcionar sem a necessidade de substituir componentes electrónicos.

O filtro capacitivo do rectificador reduz significativamente os efeitos de picos de tensão ao impedir variações rápidas de tensão no circuito, no entanto estes componentes, tal como a ponte rectificadora apenas podem suportar uma tensão nominal máxima que dependerá do componente, sendo no entanto óbvio que componentes capazes de suportar tensões ou correntes mais elevadas são igualmente mais dispendiosos e sobre dimensionar os elementos de um circuito para suportar situações raras de picos elevados é significativamente mais dispendioso que utilizar elementos protectores apropriados para este tipo de problema.

Uma das protecções mais comuns para proteger circuitos contra picos de tensão/corrente é o varistor, um componente electrónico com uma impedância variável não linear que permite dissipar a energia presente no circuito devido a picos provenientes da rede.

A protecção dos componentes do módulo de potência será feita com base na utilização de dois varistores colocados em pontos estratégicos do circuito. Um varistor com uma tensão nominal de 320V será colocado ao longo dos terminais de ligação à rede eléctrica, limitando de forma significativa os picos provenientes da rede, enquanto um segundo varistor será colocado após o filtro LC de modo comum e antes da ponte rectificadora, reduzindo ainda

mais os efeitos causados por picos de tensão/corrente, garantindo que a ponte rectificadora e os componentes do filtro capacitivo continuam a operar dentro dos seus limites seguros.

3.3.5 Supressão de ruído ou distorções harmónicas

A alimentação da electrónica de baixa potência deve, de forma geral, ser o mais estável e livre de ruído ou distorções harmónicas que seja possível na prática, uma vez que a grande maioria dos micro-processadores, amplificadores operacionais, sensores, entre outros, podem funcionar de forma imprevisível ou sofrer danos devido à presença de ruído na tensão de alimentação. Por isso mesmo, os fabricantes deste tipo de componentes sugerem a utilização de filtros capacitivos nas proximidades dos pinos de alimentação dos mesmos. Obviamente os condensadores sugeridos dependem das características internas do componente que requer o filtro, no entanto filtros com condensadores de 100nF são comuns para providenciar desacoplamento entre a alimentação positiva e o *ground* e reduzir o ruído de alta frequência que possa encontrar-se na ligação eléctrica ao pino. É também comum a utilização de condensadores da ordem de 1 μ F a 50 μ F para reduzir os efeitos causados por transições repentinas na alimentação e filtrar ruído de baixa frequência, servindo efectivamente para estabilizar de forma suave qualquer *ripple* que possa existir a montante do condensador.

No que se refere a este módulo, os elementos que necessitam deste tipo de cuidados são dois amplificadores operacionais e o micro-processador do módulo. A documentação técnica dos amplificadores sugere apenas a colocação de um condensador de 100nF nas proximidades do componente, entre o pino em que está ligada a referência positiva e o pino em que está ligada a referência negativa que neste caso corresponde ao *ground*. O micro-processador necessita igualmente de um filtro para a alimentação, sendo sugerida a colocação de um condensador de 22 μ F e um de 100nF.

3.4 Conclusão

As fontes de alimentação dos dispositivos electrónicos têm sofrido avanços significativos nos últimos anos, sendo facilmente perceptível a miniaturização destes elementos conversores de potência. Apesar de a miniaturização ser talvez a mudança mais perceptível para o utilizador comum, com os adaptadores de portáteis e carregadores de telemóveis a ficarem cada vez mais pequenos e fáceis de transportar, áreas como a eficiência das fontes de alimentação, redução da introdução de distorção harmónica na rede e correcção do factor de potência têm observado melhorias significativas nos últimos anos, o que potencializa a implementação de dispositivos electrónicos de baixo consumo energético, reduz as perdas energéticas na rede eléctrica e diminui os riscos para os dispositivos ligados à mesma. Isto deve-se ao facto de as distorções harmónicas não filtradas causarem oscilações na rede, que provocam maiores perdas energéticas, além de aumentarem o risco de danos para os dispositivos ligados à rede.

A fonte de alimentação dimensionada ao longo deste capítulo providencia uma alimentação versátil ao possuir diversas tensões de saída fixas e uma saída de amplitude estipulada através de *software*, de acordo com as necessidades do circuito a jusante da fonte. Como é óbvio a falta de filtros activos de distorções harmónicas e de correcção do factor de potência fazem com que o desempenho da fonte dimensionada não seja dos melhores, mas manter uma fonte versátil é algo que não se coaduna bem com o dimensionamento de secções activas de melhoria do desempenho, uma vez que estas regiões activas geralmente são dimensionadas de acordo com extenso conhecimento *a priori* das características normais de funcionamento da saída do conversor de potência.

Apesar de tudo, os filtros passivos dimensionados para o circuito da fonte de alimentação comutável minimizam obviamente a amplitude das distorções harmónicas que se propagam para os circuitos a jusante e para a rede eléctrica, evitando assim influenciar de forma extremamente negativa o desempenho de outros dispositivos nas proximidades. No entanto, sendo esta fonte uma primeira iteração no desenvolvimento de um conversor de potência, como trabalho futuro seria desejável realizar testes práticos que tenham em vista a optimização do dimensionamento e a identificação e resolução de possíveis problemas que possam apenas ser conhecidos de forma empírica.

Capítulo 4

Interface Homem-Máquina

4.1 Introdução

As Interfaces de interacção entre os utilizadores e os dispositivos electrónicos têm sofrido avanços significativos nos últimos anos, especialmente no que toca à interacção física com os dispositivos. Enquanto antes se carregava em botões/interruptores predominantemente mecânicos para interagir com os equipamentos electrónicos, actualmente aplicações tácteis e sem contacto físico são cada vez mais comuns. Isto significa que anteriormente o desgaste mecânico era um dos principais factores que limitavam o tempo de vida útil das interfaces homem-máquina, por exemplo com botões que utilizavam pequenas peças de silicone como elemento deformável para permitir ou evitar o contacto que fechava/abria o circuito eléctrico, era comum substituir a peça de silicone de um botão muito utilizado pela de um botão pouco utilizado para expandir o tempo de vida útil, no entanto nas interfaces actuais o desgaste mecânico praticamente não tem qualquer influência no tempo de vida útil.

Actualmente as principais formas de interagir com dispositivos baseiam-se na utilização de interfaces tácteis ou detecção de movimentos ou uma combinação de ambos os tipos de tecnologia. No que toca às interfaces tácteis existem interfaces resistivas e capacitivas com suporte a toque simples ou multi-toque. As interfaces resistivas são cada vez menos utilizadas quando comparadas com as capacitivas, algo que ocorre devido à maior versatilidade das interfaces capacitivas e a possibilidade de estas terem consumos energéticos mais reduzidos. Sample *et al* [29] e Ruan *et al* [30] abordam diferentes tipos de interfaces capacitivas, sendo que [30] aborda uma interface multi-toque, uma das áreas em maior desenvolvimento no que se refere a interfaces capacitivas, pelo facto de permitir um nível de interacção significativamente maior. A maioria das interfaces multi-toque actuais são capazes de detectar dois ou três toques distintos, o que é geralmente suficiente em *touchpads* de portáteis, ecrãs tácteis de telemóveis e outros dispositivos com interfaces tácteis de pequena dimensão, no entanto interfaces puramente capacitivas capazes de detectar um número de múltiplos toques significativo são ainda algo longe da realidade.

A detecção de movimentos pode ser realizada através de diversos procedimentos, como por exemplo a detecção através de sensores de infravermelhos, sensores de ultra-sons e o uso de câmaras combinado com processamento de imagem. No que se refere aos sensores de infravermelhos, estes são maioritariamente utilizados em sistemas de segurança como o exemplo providenciado por Song *et al* em [31], mas também para detecção de movimentos para gestão de sistemas de iluminação de forma eficiente. Os sensores de infravermelhos podem ser usados individualmente ou como parte de uma rede, sendo uma rede de sensores

extremamente importante quando se pretende caracterizar de forma consideravelmente completa o movimento de uma ou mais pessoas no interior de edifícios, tal como evidenciado por Zappi *et al* em [32].

Sistemas de detecção baseados em ultra-sons são utilizados para detecção de movimentos tal como os sistemas baseados em infravermelhos, no entanto o seu custo mais elevado faz com que estes sejam usados apenas em situações em que as suas vantagens relativamente aos sistemas de infravermelhos suplantem os custos e as desvantagens relativas ao meio de transmissão e detecção dos sensores de ultra-sons. Ward *et al* descrevem em [33] um sistema de detecção da posição num edifício de escritórios, com base na utilização de ultra-sons que poderia ser conjugado com um sistema de crachás activos para permitir a realização de tarefas em diversas partes do edifício (como o uso de impressoras ou o atendimento de chamadas no telefone mais próximo) de acordo com a posição actual do funcionário. Stiefmeier *et al* descrevem em [34] um sistema baseado em detecção ultra-sónica de movimentos que permite distinguir diferentes acções físicas do utilizador, como por exemplo acções de manutenção de uma bicicleta, com o objectivo de aplicar esta tecnologia em sistemas de interacção com o utilizador que permitam que acções em tempo real sejam realizadas em ambientes de realidade aumentada ou outras aplicações em que gestos a três dimensões possam ser necessários ou desejados.

O uso de câmaras e processamento de imagem permite aplicações ao nível da detecção de tipos de movimentos realizados pelo utilizador ou por outras pessoas ou objectos em redor do sistema de detecção. Uma das aplicações possíveis deste tipo de sistemas consiste na detecção de peões que estejam a atravessar a rua, por forma a permitir aos automóveis imobilizarem-se com o intuito de evitar o atropelamento de peões, especialmente à noite, quando a detecção de peões por parte do condutor pode ser dificultada pela reduzida visibilidade. Esta aplicação é descrita por Fardi *et al* em [35] com base na utilização de câmaras de infravermelhos e detecção de formas na imagem resultante que correspondam a peões.

Sistemas que combinam a detecção de movimentos com interfaces de toque, reconhecimento de comandos por voz e outras tecnologias são cada vez mais comuns, sendo o objectivo a criação de interfaces versáteis que permitam o acesso rápido e adequado a conteúdos, em ambientes tão diversos como a realidade aumentada ou a realidade virtual. Turunen *et al* [36] e Coffey *et al* [37] referem sistemas de interface com o utilizador que combinam diversas tecnologias para permitir a interacção com dispositivos de uma forma versátil, se bem que eventualmente mais complexa. Obviamente este tipo de interfaces é actualmente mais adequado para sistemas de gestão de conteúdos de uma dimensão relativamente grande, no entanto a miniaturização de sensores significa que eventualmente pequenos dispositivos como telemóveis possam realizar interacções a este nível.

4.2 Descrição Geral da Interface Homem-Máquina

Actualmente a necessidade de interagir com os equipamentos electrónicos ao nosso redor motiva a criação de interfaces cada vez mais intuitivas, com o objectivo de reduzir o período de adaptação dos utilizadores às novas tecnologias. Um dispositivo electrónico modular seria algo incompleto se não incluísse um módulo dedicado à interacção com utilizadores, dado que a natureza da interface depende da aplicação desejada para o dispositivo e, por isso mesmo, a individualização desta porção de um dispositivo electrónico permite desenvolver interfaces que possam ser utilizadas em diversos dispositivos ou a utilização de diferentes interfaces num mesmo dispositivo consoante a área de aplicação ou o mercado alvo, por exemplo. Numa concepção modular em que a Interface Homem-Máquina fizesse parte de um módulo mais abrangente (ou até estivesse dividida entre vários módulos), a utilização de diversas interfaces num mesmo dispositivo ou de uma interface em vários dispositivos envolveria tarefas de concepção ou até produção mais complexas que uma situação em que a interface correspondesse a um módulo individualizado.

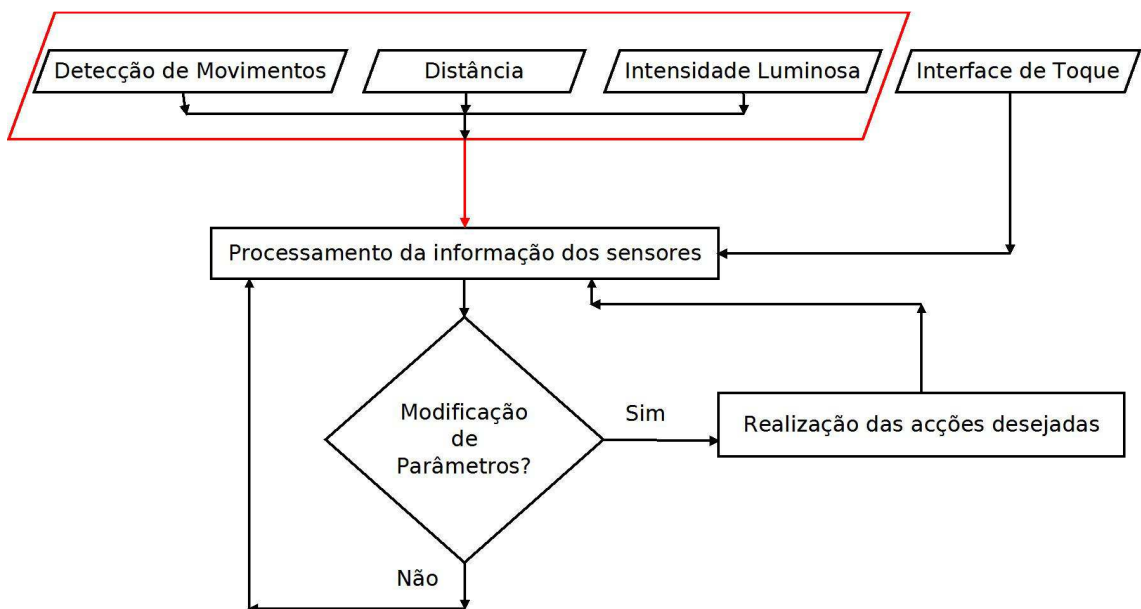


Figura 4.1: Diagrama funcional do Módulo de Interface Homem-Máquina

O Módulo de Interface Homem-Máquina funciona, de uma forma muito simplificada, de acordo com o diagrama apresentado na figura anterior. O princípio básico de funcionamento consiste em verificar os sensores do módulo, processar os dados provenientes dos mesmos e decidir se os parâmetros de funcionamento mudaram ou foram mantidos. Em caso de alteração dos parâmetros, serão realizadas as acções desejadas, voltando depois o módulo para o funcionamento normal, ou seja, a manutenção do estado desejado de funcionamento até que algum evento cause a interrupção do funcionamento contínuo.

A detecção de movimentos, determinação de distância e da intensidade luminosa é realizada por um simples sensor de infravermelhos com um foto-díodo para recepção de radiação infravermelha e um segundo foto-díodo para recepção de radiação visível. Este sensor é utilizado como forma de determinar a intensidade luminosa ambiente para realizar funções como ligar/desligar a retro iluminação de um ecrã táctil consoante a intensidade luminosa no local onde se encontra o dispositivo electrónico. A detecção de movimentos é utilizada para tarefas simples de ligar/desligar o dispositivo, sendo possível utilizar o sensor durante períodos em que o dispositivo se encontra num estado de baixo consumo energético para ligar os elementos de potência utilizados na operação regular do dispositivo. A determinação da distância até ao sensor permite a variação de parâmetros de funcionamento, como a intensidade luminosa de um candeeiro de mesa, sem a necessidade de tocar no dispositivo. Dois sensores são utilizados neste módulo por forma a criar alguma redundância, especialmente no que toca à intensidade luminosa, cujo o valor será obviamente ignorado quando são detectados movimentos sobre o sensor ou variações da distância ao sensor. Se colocados em lados opostos da interface, os sensores podem facilitar o uso do dispositivo por pessoas dexas ou canhotas, o que oferece alguma versatilidade ao módulo e consequentemente ao dispositivo. Microprocessadores dedicados aos sensores comunicam com estes através de um protocolo I²C e processam a informação antes que esta seja enviada para um microprocessador principal que lida com o ecrã táctil do módulo. Os microprocessadores dedicados aos sensores determinam quando é que os sensores fornecem informação relevante ao funcionamento do módulo/dispositivo, funcionando mesmo durante períodos de baixo consumo energético e podendo “acordar” o resto do módulo/dispositivo quando este for necessário.

Um ecrã táctil permite a interacção com o dispositivo através de um sistema de menus adequados à aplicação desejada. Esta interface de toque permitirá a modificação de parâmetros de funcionamento do dispositivo, incluindo parâmetros que podem ser modificados pelos sensores de infravermelhos, fornecendo ao utilizador acesso a tudo o que possa ser necessário durante a utilização do dispositivo, desde menus de configuração (ligar retro iluminação por x segundos após o toque inicial no ecrã) aos básicos menus de operação (ligar/desligar dispositivo, realizar acção X...). O ecrã táctil encontra-se ligado à alimentação principal e não à alimentação para a electrónica de baixo consumo, o que significa que quando o módulo/dispositivo se encontra num modo de baixo consumo energético, o ecrã táctil está desligado e por isso qualquer tentativa de interacção com o módulo através da interface não terá qualquer efeito na permanência no estado de baixo consumo energético. Isto permite que o estado de baixo consumo energético forneça apenas a energia necessária para os processos necessários ao retomar do estado normal de operação, sem no entanto provocar consumos significativos quando o módulo/dispositivo se encontrar por longos períodos de tempo neste estado de baixo consumo.

Considerando uma potência média associada a um estado de baixo consumo energético de cerca de 100mW, o consumo energético anual devido apenas a este estado de *standby* seria cerca de 1kWh se o módulo/dispositivo se encontrasse em *standby* 24 horas por dia, 365 dias por ano. Pode não parecer muito com os tarifários actuais da electricidade a rondarem os 0.15€ a 0.16€ para a potência instalada numa habitação comum, mas se considerarmos que uma habitação comum pode ter dezenas ou até mesmo centenas de dispositivos electrónicos em *standby* percebe-se a importância da minimização do consumo energético médio durante um estado de baixo consumo energético. Isto torna-se ainda mais óbvio se considerarmos que o consumo de 1kWh se deveu a acções que não têm qualquer interesse para o utilizador comum: operações de rotina dos microprocessadores, medições com sensores para verificar se o dispositivo deve deixar o estado de *standby*, entre outras acções que embora necessárias ao rápido retomar do estado normal de operação, não podem ser completamente justificadas durante longos períodos de espera. Como é óbvio dispositivos que se encontrem muito mais tempo em *standby* do que em operação normal devem ser desligados da alimentação da habitação durante os períodos em que não são necessários, pois a pequena diferença de potencial entre uma ponta de um cabo de alimentação e a ligação à tomada é geralmente a origem de pequenos consumos “fantasma” que são algumas ordens de grandeza mais reduzidos que os comuns consumos *standby*, mas consistem igualmente num uso de energia sem qualquer utilidade prática. Apesar de pequenos, os consumos “fantasma” podem carregar/descarregar pequenos condensadores que geralmente são utilizados como parte de filtros, reduzindo o tempo de vida útil destes componentes mesmo quando estes não estão a fazer nada de útil. Apesar de idealmente dispositivos raramente utilizados serem desligados da alimentação da rede, a comodidade de utilizar dispositivos que se encontram em *standby* faz com que os consumos neste modo de operação não possam ser negligenciados quando se desenvolvem dispositivos electrónicos que pretendem ser eficientes em termos energéticos.

Com apenas os microprocessadores (geralmente capazes de realizar consumos energéticos muito reduzidos mesmo sem recorrer a estados de *sleep*) e os sensores infravermelhos para detecção de movimento, os consumos em *standby* podem ser extremamente pequenos. Os sensores de infravermelhos podem ter consumos energéticos reduzidos à custa da precisão de medição, o que não é importante durante o período de *standby*, uma vez que interessa apenas que existe um movimento por parte do utilizador e não a distância a que foi feito, além de que a periodicidade das medições poder ser reduzida para evitar que mesmo os consumos máximos dos sensores ocorram durante breves períodos de tempo ao longo de um grande período de *standby*.

4.2.1 Dimensionamento dos componentes para os reguladores de tensão

No módulo de Interface Homem-Máquina existem três tensões que podem ser fornecidas externamente ou reguladas no interior do módulo a partir de tensões externas de amplitude superior. Estas tensões consistem na alimentação a 20V dos LED's que providenciam a

iluminação do ecrã táctil, a alimentação a 3.3V dos componentes electrónicos que não são alimentados durante os períodos de *standby* e a alimentação a 2.5V requerida pelo controlador gráfico utilizado para interagir com o ecrã táctil.

Uma vez que os reguladores de tensão são os mesmos que os usados no módulo de potência, os condensadores utilizados são os mesmos, nomeadamente um condensador 100nF junto ao pino de entrada do regulador, um condensador de 1 μ F na saída do regulador e um condensador de 10 μ F ligado ao pino de ajuste do regulador.

Durante falhas que causem um curto-circuito entre a tensão de entrada e o *ground*, o uso de díodos de protecção ajuda a proteger o regulador de eventuais descargas dos condensadores de forma potencialmente danosa para os circuitos internos do mesmo.

Usando as mesmas equações que no caso do módulo de potência é possível determinar o valor da resistência R_{VAR} necessária para cada tensão de saída. Para um valor de R_{ADJ} de 240 Ω , V_{ref} de 1.25V e uma corrente I_{ADJ} de 50 μ A, os valores de R_{VAR} são apresentados na tabela seguinte para cada uma das três tensões utilizadas neste módulo.

Tabela 4.1: Valores de resistência consoante a tensão de saída desejada

V_{out}/V	R_{VAR}/Ω		
	Aproximação	Valor exacto	Componente real
2.5	240	238	240
3.3	394	390	390
20.0	3600	3566	3630 (330+3300)

4.2.2 Supressão de ruído

No que se refere a este módulo, os elementos que necessitam deste tipo de cuidados são os dois sensores infravermelhos, os três micro-processadores do módulo, o ecrã táctil, o controlador do ecrã táctil e a memória RAM que este controlador necessita. A documentação técnica dos sensores infravermelhos sugere a colocação de um condensador de 22 μ F e outro de 100nF nas proximidades do ânodo do emissor, além de um condensador de 10 μ F e um de 100nF junto ao pino VDD do componente. Os micro-processadores necessitam igualmente de um filtro para a alimentação, sendo utilizado um condensador de 22 μ F próximo de cada um dos micro-processadores, um condensador de 100nF junto a cada pino VDD ou AVDD e um condensador de 10 μ F junto ao pino V_{CAP} de cada micro-processador. No que se refere ao ecrã táctil, ao seu controlador e à memória RAM, um condensador de 22 μ F foi colocado próximo de cada um dos componentes, sendo colocados condensadores de 100nF junto de todos os pinos alimentados a 3.3V ou 2.5V com o intuito de garantir uma alimentação de confiança para estes componentes.

4.3 Demonstração de conceitos

A utilização de dispositivos electrónicos para prototipagem rápida e análise comportamental de conceitos tem vindo a tornar-se mais importante nos últimos anos, uma vez que os curtos períodos de tempo disponíveis para o desenvolvimento de um dispositivo electrónico requerem a confirmação da funcionalidade de um conceito o mais rapidamente possível, por forma a detectar limitações práticas do que se pretende para evitar construir um dispositivo apoiado em pressupostos falsos. O *mbed* é um dos dispositivos mais utilizados actualmente para prototipagem rápida, devido ao seu processador ARM que é equivalente à grande maioria dos micro-processadores ARM usados actualmente, o facto de possuir os periféricos mais comuns (Ethernet, USB, I²C, SPI, UART, PWM, CAN, entre outros), os baixos requisitos em termos de ferramentas (compilador online suportado pela maioria dos *browsers* e que não impõe restrições no que toca ao sistema operativo do utilizador) e o reduzido tempo de aprendizagem necessário para começar a trabalhar com o hardware.

Além das plataformas com micro-processadores (como o *mbed* NXP LPC1768), existem diversos componentes de vários fabricantes que permitem uma fácil implementação em combinação com o *mbed*, existindo bibliotecas dedicadas e exemplos de código que podem acelerar o processo de prototipagem de um conceito. Estes componentes estão listados no *site* do *mbed* e caso exista informação detalhada, bibliotecas e exemplos de código, essas informações estão disponíveis numa página dedicada ao componente específico. Desde actuadores a sensores, passando por ecrãs LCD e *transceivers*, existem diversos componentes documentados e que permitem criar protótipos funcionais em poucos minutos ou poucas horas, dependendo da complexidade da aplicação ou dos componentes utilizados.

Tendo em conta estas características, é óbvio concluir que utilizar sistemas como o *mbed* na fase inicial de desenvolvimento de um dispositivo electrónico pode ajudar na tomada de decisões que não possam ser avaliadas de forma correcta apenas com base em dados teóricos, por exemplo em aplicações que utilizem *transceivers* é extremamente difícil obter dados teóricos fiáveis no que se refere a cobertura de rede e outras características, uma vez que qualquer modelo teórico de análise possui um erro que pode ou não ser significativo relativamente à situação real, razão pela qual muitos produtos têm de ser revistos e modificados após a recolha de dados práticos, mesmo quando a fase de desenvolvimento inclui diversas simulações de elevada qualidade. Usando sistemas como o *mbed* é possível seleccionar um conjunto de *transceivers* para implementar num dispositivo electrónico e, usando a simplicidade de programação do *mbed*, criar um pequeno módulo e testá-lo em situações práticas que considerem os melhores e os piores casos esperados para a aplicação típica do dispositivo. Este procedimento evita que o desenvolvimento de um dispositivo electrónico fique dependente de um *transceiver*, que apesar de extremamente eficiente nas suas aplicações típicas, poderá não ser o melhor para a aplicação desejada (a qualidade de ligação pode ser mais importante que a cobertura por exemplo) e assim permitir uma

selecção mais fundamentada dos componentes a utilizar durante o desenvolvimento. De notar que este procedimento de teste poderia ser feito com recurso a comuns micro-processadores utilizados pela empresa que desenvolve o produto, no entanto o processo poderia não ser tão célere como utilizando o *mbed*.

4.3.1 Interfaces capacitivas

As interfaces capacitivas são actualmente uma das formas mais comuns de interagir com dispositivos electrónicos, desde *smartphones* a *tablets*, muitos dos consumidores actuais utilizam este tipo de tecnologia de forma extremamente natural, sendo comuns aplicações com toque simples ou multi-toque.

Recorrendo ao *mbed* NXP LPC1768 e sensores de toque que incorporam *Atmel* AT42QT1010, procedeu-se ao processo de prototipagem rápida de um sistema de interface capacitiva com três sensores de toque simples. Foram atribuídas funções a estes três sensores que os convertem num sistema de três botões simples, sendo que um botão serve para ligar/desligar a interface (que pode ser visto como um botão para bloquear um teclado de um dispositivo), o segundo botão subtrai a um contador e o terceiro adiciona a um contador. Este tipo de atribuição de funções permite criar uma interface em que se realizem tarefas como navegar em menus, modificação de parâmetros de funcionamento (por exemplo modificar o nível de luminosidade de uma lâmpada), entre outras tarefas.

```
#include "mbed.h"

DigitalOut led_1(LED1);
DigitalOut led_2(LED2);
DigitalOut led_3(LED3);
DigitalOut led_4(LED4);

InterruptIn button1(p22);
InterruptIn button2(p23);
InterruptIn button3(p24);

int i=0;
int j=0;
int r=0;
```

O cabeçalho do programa define os tipos de saídas e entradas utilizadas, além das fontes de interrupção necessárias. O texto entre parênteses refere-se aos periféricos utilizados pelo *mbed* para implementar as funções desejadas, enquanto expressões como “*led_1*” correspondem ao nome utilizado no decorrer do programa para fazer referência aos periféricos correspondentes. No cabeçalho foram também definidas e inicializadas as variáveis globais utilizadas pelo programa. “*DigitalOut*” e “*InterruptIn*” são classes definidas na biblioteca “*mbed.h*”, que permitem o acesso a funções específicas associadas aos

periféricos, como por exemplo atribuir um valor alto ou baixo a um pino (ou neste caso particular aos LED's do *mbed*) para que seja colocado na saída, efectivamente tornando o pino numa saída digital. Existem diversas classes definidas na biblioteca "*mbed.h*", possibilitando a utilização dos periféricos do micro-processador sem que exista conhecimento detalhado dos registos a ser alterados, o que facilita a utilização deste tipo de dispositivos de prototipagem rápida por indivíduos que não tenham experiência prévia com este tipo de micro-processadores, desde que saibam quais os parâmetros necessários para utilizar a classe que define saídas digitais ou saídas em PWM, por exemplo.

```
int main() {
//associa a rotina de interrupção designada com o botão de
ligar/desligar
    button3.rise(&flip_3);
    while(1) {
    }
}
```

O primeiro passo de um programa para realizar as funções referidas anteriormente seria activar a interrupção referente ao botão que bloqueia ou desbloqueia a interface, de forma a que através do serviço de interrupção sejam ligados ou desligados os restantes botões da interface. Este programa recorre aos quatro LED's presentes na própria plataforma *mbed* para mostrar de forma visível o valor actual do contador. O LED4 do *mbed* é o *bit* mais significativo e o LED1 é o *bit* menos significativo do contador.

O código executado durante a interrupção associada a este botão utiliza um contador para verificar se a interface está a ser ligada ou se deve ser desligada. Uma variável inicialmente com o valor "0" e que é colocada a "1" após a acção de ligar e novamente colocada a "0" quando se pretendesse desligar a interface poderia realizar a mesma função que a implementada, no entanto em certas situações poderá ser desejável que alguns eventos aconteçam apenas na primeira vez que o código é executado (contador com um reset para um valor diferente do inicial) ou na primeira vez e periodicamente ao longo do tempo, sempre que um certo número de acções de ligar/desligar seja efectuado (contador com um reset para o valor inicial). Assim, com alguns ajustes, o mesmo código base pode ser utilizado para implementar soluções práticas diferentes.

Quando a interface é ligada, os botões com as funções de "mais" e "menos" são associados à interrupção adequada para a situação e que permite contar de 0 até 15 ou 15 até 0 dependendo do botão.

```

//liga ou desliga o sistema do contagem, o estado anterior
//é mantido uma vez que não foi aplicado nenhum reset
void flip_3() {
    j=j+1;
    wait(1);
    if(j%2==0)
    {
        //se tiver sido clicado um número par de vezes,
        //o utilizador está a desligar a interface
        led_1 = 0; //força todos os LED's para o estado desligado
        led_2 = 0;
        led_3 = 0;
        led_4 = 0;
        //põe os botões (+) e (-) num estado inactivo para evitar
        contar +1 ou -1
        button1.rise(&idle);
        button2.rise(&idle);
    }
    else
    {
        //se tiver sido clicado um número ímpar de vezes,
        //o utilizador está a ligar a interface

        //coloca os botões (+) e (-) no estado normal de contagem
        button1.rise(&flip_1);
        button2.rise(&flip_2);
    }
    if(j==10)
    {
        //reset do contador de ligar/desligar para evitar contagens até
        números elevados
        j=0;
    }
}

```

Se a interface for desligada os LED's são forçados para o estado desligado e associa-se aos botões uma interrupção de estado inactivo que força o processador a esperar algum tempo antes de retomar o curso do corpo do programa. Este período de espera evita que o processador seja invadido por múltiplas interrupções da mesma fonte seguidas e poderia ser substituído, numa aplicação prática, pela realização de tarefas associadas ao período inactivo da interface, tornando assim o período de tempo dispendido na interrupção tempo útil e não simples tempo de espera.

```

void idle() {
    wait(0.25);
}

```

O código executado pelas interrupções associadas aos botões “mais” e “menos” durante o período activo da interface são iguais à excepção da condição principal ser “i>0” para o botão “menos” e o facto de o valor de “i” ser subtraído uma unidade e não adicionado.

```
//conta entre 0 e 15 adicionando 1 de cada vez que é executado
void flip_1() {
    if(i < 15)
    {
        i=i+1;

        r=i;
        //obtem a representação binária de 4 bits do valor do contador
        if(i >= 8)
        {
            led_4 = 1; //liga o LED 4 quando o contador é maior ou
            igual que 8
            r=r-8;
        }
        if(r >= 4)
        {
            led_3 = 1; //liga o LED 3 quando o resto é igual ou
            superior a 4
            r=r-4;
        }
        if(r >= 2)
        {
            led_2 = 1; //liga o LED 2 quando o resto é igual ou
            superior a 2
            r=r-2;
        }
        if(r == 1)
        {
            led_1 = 1; //liga o LED 1 quando o resto é 1
        }
        wait(2); //mantém o estado de todos os LED's por algum
        tempo
        led_1 = 0; //força todos os LED's para o estado desligado
        led_2 = 0;
        led_3 = 0;
        led_4 = 0;
    }
}
```

As condições principais “i>0” e “i<15” garantem que o contador não seja decrementado ou incrementado quando o seu valor atingiu o limite superior ou inferior desejado para o contador. As condições secundárias identificam o valor de cada um dos *bits* consoante o valor actual do contador e ligam os LED’s caso a condição correspondente seja satisfeita. Posteriormente, o processador é colocado em espera por algum tempo, mantendo o estado dos LED’s, sendo depois os LED’s forçados para o estado desligado antes do retorno ao corpo do programa.

4.3.2 Controlo de luminosidade

O uso de uma interface capacitiva permite diversas aplicações práticas, tal como foi referido anteriormente. Para demonstrar isso mesmo, o programa anterior foi modificado para permitir a utilização de um PWM de período fixo e *duty cycle* variável como forma de variar a intensidade luminosa de um LED externo ao *mbed*. O programa é muito semelhante ao anterior, pelo que apenas serão apresentadas as porções de código que sofreram alterações.

```
#include "mbed.h"

PwmOut out_led_1(p21);
InterruptIn button1(p22);
InterruptIn button2(p23);
InterruptIn button3(p24);
DigitalOut led_1(LED1);
DigitalOut led_2(LED2);
DigitalOut led_3(LED3);
DigitalOut led_4(LED4);

int i=0;
int j=0;
int r=0;
float k=0.0f;
```

Como é possível verificar o cabeçalho do programa reflecte algumas das modificações introduzidas para realizar as actividades adicionais, nomeadamente a declaração de um pino de saída PWM, saída essa que pode ser direccionada para seis pinos do *mbed* (p21 a p26) ou para os quatro LED's embutidos no próprio *mbed* (LED1 a LED4). Os LED's embutidos mantêm a sua função anterior, possibilitando ao utilizador perceber qual o valor actual de luminosidade numa escala de 0 a 10. Esta escala relativa corresponde a uma variação de *duty cycle* de 0% a 100%, indicando de forma simplista a potência média entregue ao LED externo. A variável "k" representa o valor actual do *duty cycle* numa forma decimal (0.1 corresponde a 10% de *duty cycle*), sendo inicializada para um valor de *duty cycle* de 0% (LED externo completamente desligado).

Outra zona do programa que sofreu alterações corresponde às rotinas executadas quando o botão "mais" e "menos" são utilizados, sendo que o limite máximo foi modificado para 10, uma vez que este é o valor que corresponde ao *duty cycle* máximo definido. É de notar que as variações do *duty cycle* podem ser adaptadas consoante as necessidades da aplicação, através da modificação de apenas alguns parâmetros, nomeadamente o limite máximo dos contadores (ou o limite mínimo em casos em que valores negativos tenham interesse), as variações associadas ao contador em ordem crescente e as variações associadas ao contador em ordem decrescente.

Com o intuito de manter alguma versatilidade de código, a variável que faz a contagem é independente da variável que altera o *duty cycle* do PWM, permitindo que funcionalidades associadas a um contador não sejam afectadas pelo valor do contador associado ao PWM. Após a sequência de condições, já presente no exemplo anterior, determinar quais os LED's necessários para indicar o valor actual do contador "i" são actualizados os parâmetros do PWM. Até que uma das rotinas associadas aos botões "mais" e "menos" seja executada, o PWM não se encontra em uso, uma vez que este não é parametrizado em nenhuma outra parte do programa a não ser essas duas rotinas. O período é definido como um valor constante, neste caso de 1 milissegundo, enquanto o *duty cycle* é definido como o valor actual de "k" obtido no início da rotina. O PWM continua a ser disponibilizado com estas características no pino p21 até que os seus parâmetros sejam modificados novamente. O botão que bloqueia os botões "mais" e "menos" não influencia o funcionamento do PWM, exemplificando um dispositivo em que um botão tranca e destranca o teclado sem afectar as funções principais, como a iluminação de uma área no caso do LED.

A rotina associada ao botão "menos" é semelhante à apresentada para o botão "mais", exceptuando o facto de a condição principal ser "i>0" e os contadores subtraírem em vez de adicionarem (i=i-1 e k=k-0.1f).

```
void flip_1() {
  if(i < 10)
  {
    i=i+1;
    k=k+0.1f; //adiciona 10% ao duty cycle actual

    r=i;
    if(i >= 8)
    {
      led_4 = 1;
      r=r-8;
    }
    if(r >= 4)
    {
      led_3 = 1;
      r=r-4;
    }
    if(r >= 2)
    {
      led_2 = 1;
      r=r-2;
    }
    if(r == 1)
    {
      led_1 = 1;
    }

    wait(2);
    led_1 = 0;
    led_2 = 0;
    led_3 = 0;
    led_4 = 0;
  }
}
```

```
//actualiza os parâmetros para criação do PWM
    out_led_1.period(0.001f); // período de 1 milissegundo
    out_led_1.write(k); // duty cycle (k=1=>100%;k=0.01=>1%)
    wait(0.2);
}
```

4.3.3 Ecrã LCD

A grande maioria dos dispositivos electrónicos da actualidade que requerem um certo nível de interacção com o utilizador recorre a ecrãs de maior ou menor dimensão, como uma forma de providenciar informação de forma visual. As dimensões e as funções associadas a estes componentes variam de acordo com a aplicação, podendo ser um ecrã simples, ecrã táctil resistivo ou capacitivo.

Utilizando o *mbed* e um ecrã LCD da *Nokia* adaptado para funcionar com plataformas de prototipagem rápida como o *mbed*, disponível na *Sparkfun*, foi implementado um pequeno exemplo do que pode ser criado com este tipo de componentes. O programa utiliza funcionalidades disponíveis na biblioteca "*NokiaLCD.h*" criada por Simon Ford e disponível na página relativa ao ecrã LCD da *Nokia* no *site* do *mbed*.

```
#include "mbed.h"
#include "NokiaLCD.h"

NokiaLCD lcd(p5, p7, p8, p9, NokiaLCD::PCF8833); // mosi, sclk, cs,
rst, type
```

O cabeçalho do programa define os pinos utilizados para comunicar com o LCD e qual o tipo de LCD utilizado, uma vez que a biblioteca suporta três tipos diferentes de placas relacionadas com o LCD da *Nokia* e para que funcione de forma adequada tem de ser identificado o tipo de placa usada.

```
int main()
{
    lcd.background(0x0000FF); // definição da cor de fundo

    lcd.cls(); // limpar o ecrã e localizar o ponto (0,0)

    // criação de uma grelha no ecrã com a cor especificada

    // preenchimento de linhas horizontais de largura 128
    // e altura de 2 com início na posição (2,y)
    lcd.fill(2, 10, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 20, 128, 2, 0x00FF00);
}
```

```

    lcd.fill(2, 30, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 40, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 50, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 60, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 70, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 80, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 90, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 100, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 110, 128, 2, 0x00FF00);
    lcd.fill(2, 120, 128, 2, 0x00FF00);

// preenchimento de linhas verticais de largura 2
// e altura de 128 com início na posição (x,2)
    lcd.fill(10, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(20, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(30, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(40, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(50, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(60, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(70, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(80, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(90, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(100, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(110, 2, 2, 128, 0x00FF00);
    lcd.fill(120, 2, 2, 128, 0x00FF00);

// localiza o ponto correspondente às coordenadas especificadas
    lcd.locate(0,3);

// escreve a expressão desejada no ecrã (16 caracteres de largura)
    lcd.printf("Welcome!          ");
    lcd.printf("Choose an option");
    lcd.printf("1-Brightness    ");
    lcd.printf("2-Schedule      ");
    lcd.printf("3-Check mail   ");
}

```

O corpo do programa define o que irá aparecer no ecrã, começando por definir a cor de fundo do ecrã que será utilizada a partir desse momento. De seguida limpa-se o ecrã e define-se a posição inicial como o ponto (0,0) antes de se começar a colocar o conteúdo desejado no mesmo.

Utilizar o comando *fill* permite preencher linhas de pixéis quando são fornecidos os parâmetros necessários, apresentados da seguinte forma: (“posição inicial horizontal”, “posição inicial vertical”, “distância horizontal a preencher”, “distância vertical a preencher”, “cor utilizada para preencher”). Neste exemplo de implementação, a função foi utilizada para criar uma sequência de linhas horizontais e verticais de dimensão semelhante, formando uma grelha que ocupa grande parte do ecrã.

Após a criação da grelha é localizado o ponto (0,3) para iniciar a escrita de algumas linhas de texto no ecrã LCD. Cada linha no ecrã permite escrever cerca de 16 caracteres, sendo que o comando *printf* escreve no ecrã de forma contínua os caracteres desejados, mudando de

linha caso o texto ultrapasse o limite de caracteres por linha. O texto apresentado neste exemplo demonstra o que poderia ser um menu típico de uma aplicação que combinasse um ecrã com uma interface capacitiva ou outros sistemas que permitam a interacção com os dispositivos electrónicos.

4.4 Conclusão

As interfaces dos dispositivos electrónicos têm sofrido avanços significativos nos últimos anos, com muita da actual investigação tecnológica focada na área da detecção de movimentos a duas ou três dimensões e a demonstração dos resultados dessas interacções igualmente a duas ou três dimensões.

Apesar de em anos futuros ser expectável que as interfaces sejam cada vez mais versáteis e reconheçam comandos cada vez mais avançados, baseados em movimentos realizados pelo utilizador, quer estes sejam baseados em acções naturais (por exemplo virar uma página num livro digital de maneira semelhante ao que se faria na realidade) ou movimentos artificiais que sejam requeridos pelo dispositivo para executar uma determinada função, actualmente a grande maioria dos utilizadores começa a dominar o uso de interfaces com pequenos ecrãs (tácteis ou simples) combinados com sensores de toque e outras tecnologias semelhantes.

Por isso mesmo, ao longo deste capítulo foram referidas as características de um módulo de Interface Homem-Máquina capaz de executar as mais diversas tarefas associadas a dispositivos electrónicos, como a navegação em menus, parametrização do dispositivo, entre outras, além de terem sido demonstradas algumas das funcionalidades básicas que podem ser implementadas, recorrendo a dispositivos de prototipagem rápida. As funcionalidades referidas ao longo do capítulo foram construídas de forma razoavelmente simples e modular, possibilitando a utilização do mesmo código em situações distintas com apenas alguns ajustes dependentes da aplicação pretendida. É de realçar a importância do uso de funcionalidades de *debug* do código, especialmente nas fases iniciais da prototipagem rápida, seja através do envio de comandos para a consola usando comunicação série com o computador ou através da utilização de hardware como os LED's de sinalização, que fornecem informação visual de forma simples e eficaz. A combinação de ambos os métodos de análise do funcionamento do código é a opção ideal, com a informação visual a ser complementada por informação detalhada na consola.

Capítulo 5

Comunicação Sem Fios

5.1 Introdução

Actualmente a necessidade de os utilizadores comunicarem com dispositivos electrónicos ou os dispositivos electrónicos comunicarem entre si, levou à criação de diversos protocolos de comunicação sem fios que permitem a comunicação em espaços interiores ou exteriores, mas que geralmente têm um alcance extremamente limitado, especialmente no que se refere a comunicações em espaços interiores. Entre os protocolos mais comuns para este tipo de comunicações estão protocolos como o *Bluetooth*, *UWB (Ultra Wide Band)*, *ZigBee* e *Wi-Fi*. Os dois primeiros protocolos referidos são geralmente úteis para comunicar em espaços de pequena dimensão (no interior de um veículo por exemplo), onde existam poucos obstáculos entre o(s) emissor(es) e o(s) receptor(es). Os protocolos *ZigBee* e *Wi-Fi* são utilizados maioritariamente para comunicações em espaços interiores ou exteriores de dimensão menos restrita que no caso do *Bluetooth* e *UWB*, mas ainda muito dependente da existência de percursos para as ondas relativamente desimpedidos. Os *routers* utilizados na grande maioria das habitações conseguem fornecer uma cobertura de sinal que abrange a maioria da área habitacional, quando existem percursos directos ou indirectos (a partir da reflexão de ondas por exemplo) sem obstáculos de dimensão significativa. Como é óbvio, edifícios com múltiplos pisos, materiais com grande capacidade de absorção de ondas e geometrias de construção que impossibilitem a comunicação mesmo através de percursos indirectos, são actualmente algumas das dificuldades da implementação deste tipo de tecnologias, sendo geralmente necessário utilizar um grande número de repetidores de sinal ou uma combinação de redes com fios e repetidores/emissores de sinal sem fios. Um dos maiores desafios na actualidade nesta área de aplicação prende-se precisamente com a redução de custos a um mínimo, especialmente no que se refere aos custos de adequação de edifícios às redes de comunicação entre dispositivos, redes com fios requerem geralmente obras em edifícios em que a sua implementação não tenha sido considerada durante a construção, mas também a diminuição dos custos através da redução de elementos repetidores, sem no entanto recorrer a soluções com fios na maior parte das situações.

No que se refere à domótica, sistemas que recorrem a protocolos *ZigBee* são actualmente comuns, tal como é evidenciado pelas referências [39] a [41], particularmente devido aos baixos consumos energéticos e custos financeiros de muitos dos módulos de comunicações que implementam este protocolo. Blumenthal *et al* apresenta em [42] um método de determinação aproximada da posição de elementos numa rede a partir do uso de diversas características intrínsecas ao protocolo *Zigbee*, algo que é de extrema importância em

aplicações como o redireccionamento dinâmico de chamadas numa empresa ou a determinação da vizinhança mais próxima em redes de sensores distribuídas de forma aleatória ou cujos elementos possam variar à medida que alguns dispositivos acordam para substituir elementos que tenham estado previamente activos, entre outras aplicações. No entanto, à medida que as informações trocadas entre diferentes dispositivos aumentarem devido a um maior controlo dos dispositivos sobre o seu ambiente, a baixa taxa máxima de transmissão do protocolo *ZigBee* irá provavelmente reduzir a sua aplicação prática face a protocolos concorrentes com maiores taxas máximas de transmissão e que estão actualmente a melhorar a sua eficiência energética, como por exemplo o protocolo *Wi-Fi*. O ideal seria assim implementar um módulo de comunicações capaz de utilizar o protocolo *ZigBee*, uma vez que actualmente está disseminado na área da comunicação entre dispositivos electrónicos, no entanto permitindo a implementação posterior do protocolo *Wi-Fi*, caso a mudança de protocolos se verifique e a indústria dite adaptação ou morte.

Obviamente na actualidade o protocolo *ZigBee* é utilizado em redes de sensores e em aplicações de domótica devido a diversos factores: o pequeno *overhead* associado ao protocolo, o que faz com que o envio de comandos curtos e frequentes como ligar ou desligar um candeeiro numa habitação seja uma actividade realizada de forma eficiente e sem quantidades excessivas de informação relacionada apenas com o protocolo em si; os consumos energéticos reduzidos, que tornam este tipo de dispositivos apelativos para aplicações com baterias; o facto de existirem diversas implementações versáteis deste protocolo em módulos prontos a utilizar, que muitas vezes permitem que os dispositivos electrónicos finais tenham certificação internacional, no que se refere ao respeito de limites de interferência noutros dispositivos, devido à utilização de módulos sem fios que foram aprovados para implementação directa nos dispositivos sem necessidade de nova certificação, desde que sejam cumpridos certos requisitos na implementação do módulo no dispositivo electrónico final. Esta pré-certificação de dispositivos electrónicos obedece a regras distintas em diferentes partes do mundo, maioritariamente devido ao facto de existirem diferentes agências reguladoras na Europa, nos Estados Unidos, Canadá, entre outros, sendo no entanto extremamente útil para o desenvolvimento rápido de aplicações de domótica (por exemplo) ao eliminar períodos de certificação na área das telecomunicações.

Apesar de todas as suas vantagens, o protocolo *ZigBee*, poderá eventualmente perder o seu domínio na área da domótica devido às recentes melhorias em termos de eficiência protocolar e energética de dispositivos que utilizam o protocolo *Wi-Fi* em redes locais. Apesar da sua superior taxa de transmissão de dados, o protocolo *Wi-Fi* tem sido preterido a favor do protocolo *ZigBee* em aplicações de domótica por diversos factores: elevado *overhead* nas comunicações entre dispositivos, algo que obviamente dificulta o envio de mensagens simples como ligar ou desligar um candeeiro, uma vez que a maioria do conteúdo da mensagem enviada consistiria apenas em blocos relacionados com o protocolo e não informação útil para

o dispositivo electrónico receptor; o consumo energético mais elevado quando comparado com dispositivos que recorrem a outros protocolos como o *Bluetooth* ou o *ZigBee*, apesar de ser por vezes errado considerar apenas os consumos directos de dispositivos que usem um destes protocolos. É verdade que dispositivos que utilizam o protocolo *Wi-Fi* têm um consumo mais elevado que um dispositivo que implemente o protocolo *ZigBee*, em grande parte devido ao *overhead* protocolar adicional, no entanto o consumo médio por *bit* transmitido é significativamente inferior, de acordo com o que é descrito por Lee *et al* em [43].

Isto significa que em redes de sensores em que pouca informação é partilhada e o consumo energético directo é o mais preocupante devido ao uso de baterias como forma de fornecer energia aos dispositivos da rede, o protocolo *ZigBee* continuará a ser escolha mais adequada. No entanto, em redes relacionadas com a domótica em que os dispositivos poderão trocar maiores quantidades de informação o protocolo *Wi-Fi* deverá começar a ganhar terreno. As redes *Wi-Fi* já são comuns na maioria das habitações e edifícios comerciais, pelo que muitas redes de domótica recorrem a sistemas de interface entre a rede interna e a rede providenciada pelos *routers*, que possui uma ligação por cabo à *internet* e por isso possibilita a parametrização de elementos da rede de domótica a partir do exterior do edifício. Em muitos casos, a aplicabilidade de redes baseadas em *Wi-Fi* em vez de *ZigBee* em aplicações de domótica, passa pela identificação de situações que apesar de menos eficientes, permitam a atenuação de desperdícios através da gestão dos dispositivos da rede.

Afinal de contas a grande maioria dos dispositivos numa rede de domótica estaria ligada à rede eléctrica, a maior parte dos dispositivos que podem ser úteis numa rede de domótica geralmente correspondem a electrodomésticos ou outros dispositivos que incluem electrónica diversa ou até elementos electromecânicos, que obviamente não podem ser alimentados por baterias de reduzida dimensão, pelo que os módulos sem fios não teriam tantas limitações ao nível de consumos energéticos como numa rede de sensores alimentada a baterias. Isto porque a maioria dos dispositivos de uma rede domótica substitui um dispositivo do mesmo género ou pode substituir algo que se torna obsoleto com o sistema inteligente. Por exemplo um frigorífico ligado a uma rede de domótica ocuparia a posição que qualquer outro frigorífico ocuparia numa casa, enquanto interfaces de controlo poderiam facilmente substituir interruptores comuns, ao fornecerem as funcionalidades do interruptor básico e outras funcionalidades mais avançadas. Existem excepções ao nível de sensores e outros dispositivos que possam não poder substituir dispositivos previamente existentes, mas geralmente estes dispositivos não influenciariam a decisão de utilizar um determinado protocolo de comunicação.

Apesar de tudo, situações como mandar uma mensagem enorme para desligar um candeeiro continuariam a existir e grande parte dos desperdícios energéticos viriam destes casos em que são necessárias baixas taxas de informação comunicada. O efeito deste tipo de situações poderia ser mitigado numa habitação, principalmente pelo facto de alguns destes dispositivos

poderem servir de repetidores de sinal (candeeiros de tecto geralmente têm linhas de comunicação desimpedidas com outros dispositivos na mesma divisão), enviando e recebendo muito mais informação do que aquela que necessita, podendo a informação destinada a estes dispositivos ser incluída numa mensagem maior, a qual seria depois reencaminhada com a excepção da informação destinada ao dispositivo. Assim, as mensagens de pequena dimensão comparativamente ao *overhead* protocolar ocorreriam de forma muito menos frequente o que permitiria tornar mais eficientes as transmissões entre dispositivos electrónicos numa mesma rede. Este tipo de procedimento evitaria a colocação de dispositivos cuja função consista exclusivamente em reencaminhamento de dados, como no caso dos repetidores de sinal.

O uso de *Bluetooth* em ambientes interiores tem sido ponderado no que se refere a protocolos com baixo consumo energético capazes de taxas de transmissão máximas mais elevadas. Apesar de as taxas de transmissão serem mais altas que no protocolo *ZigBee*, são mesmo assim mais baixas que em protocolos como o UWB ou *Wi-Fi*, o que considerando o reduzido alcance dos módulos que utilizam o protocolo *Bluetooth* e a fraca escalabilidade deste protocolo só tem utilidade em aplicações muito específicas que utilizem distâncias de transmissão pequenas e um pequeno número de elementos na rede. Como pensar em casos particulares muito específicos é inadequado quando se pretende conceber dispositivos electrónicos de forma modular, é óbvio que o uso do protocolo *Bluetooth* não seja a escolha adequada para implementar o módulo de comunicações do dispositivo electrónico descrito neste trabalho. Baker refere em [44] algumas das principais vantagens e desvantagens da aplicação de *ZigBee* e de *Bluetooth* em aplicações industriais diversas, sendo bastante visíveis as diferenças ao nível de taxas de transmissão máximas, mas também ao nível da escalabilidade das redes que podem ser implementadas com cada tipo de protocolo. Para uma comparação mais aprofundada de alguns dos protocolos referidos, o estudo comparativo de Lee *et al* em [43] providencia uma comparação geral dos protocolos o *Bluetooth*, UWB (*Ultra Wide Band*), *ZigBee* e *Wi-Fi*.

5.2 Descrição Geral do Módulo de Comunicações

Na actualidade, a capacidade de um dispositivo ser capaz de comunicar com outros dispositivos electrónicos na mesma rede é algo essencial em áreas como a domótica ou a automatização de processos num ambiente industrial, entres outras aplicações. Conceitos como a “internet das coisas”, redes em que dispositivos electrónicos comunicam com outros dispositivos localmente ou através da *internet*, de forma directa ou utilizando dispositivos intermediários (como um nó que interliga uma rede local com a *internet*), aumentam o apelo da implementação de tecnologias de comunicação sem fios em todos os tipos de equipamentos electrónicos utilizados no nosso dia-a-dia, seja em aplicações associadas ao lazer ou profissionais. O objectivo é geralmente a criação de uma rede de dispositivos que recolhem e partilham informação, tomando decisões e influenciando o seu ambiente consoante os dados disponíveis, sem qualquer influência humana ou com o mínimo de

influência possível. Áreas como a climatização doméstica ou industrial utilizam este tipo de tecnologia em sistemas em que o utilizador apenas selecciona os parâmetros desejados de temperatura, humidade, entres outros parâmetros, sendo que uma rede de sensores ligados, através de redes sem fios ou redes com fios, a dispositivos de controlo que tomam as decisões necessárias ao funcionamento do sistema e ordenam aos actuadores que influenciem o ambiente da forma mais adequada para alcançar e manter os parâmetros introduzidos pelo utilizador no interior da zona de influência do sistema de climatização.

O funcionamento do módulo de comunicações é apresentado de forma simplificada nos diagramas das figuras 5.1 e 5.2. O *transceiver* recebe dados enviados por outros dispositivos equipados com emissores adequados e envia essa informação para o micro-controlador do módulo. O micro-controlador avalia então a informação recebida e caso esta seja relevante envia-a através do protocolo I²C para outros módulos inseridos no mesmo dispositivo, ficando depois à espera de nova comunicação. Caso a informação seja irrelevante ou destinada exclusivamente ao módulo de comunicações, o micro-controlador simplesmente fica à espera de uma nova comunicação. De forma semelhante, as informações recebidas por I²C são analisadas e caso sejam informações que devem ser enviadas para outros dispositivos da rede, o micro-controlador comunica com o *transceiver* para que este realize a transmissão da informação para o exterior.

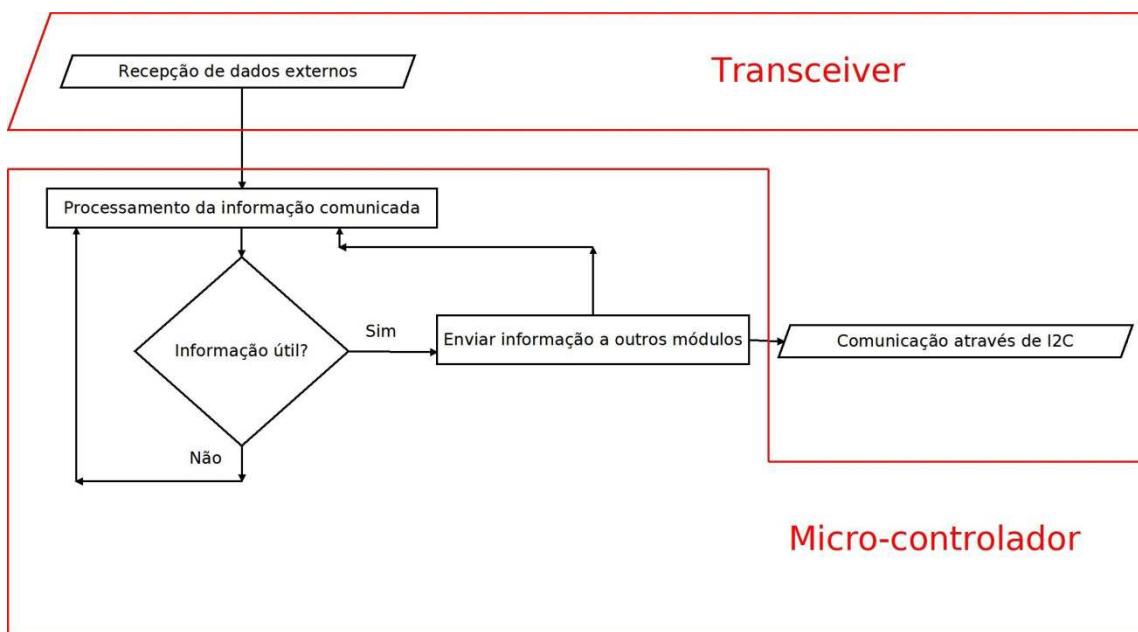


Figura 5.1: Diagrama representativo das ações realizadas após a recepção de dados pelo *transceiver*

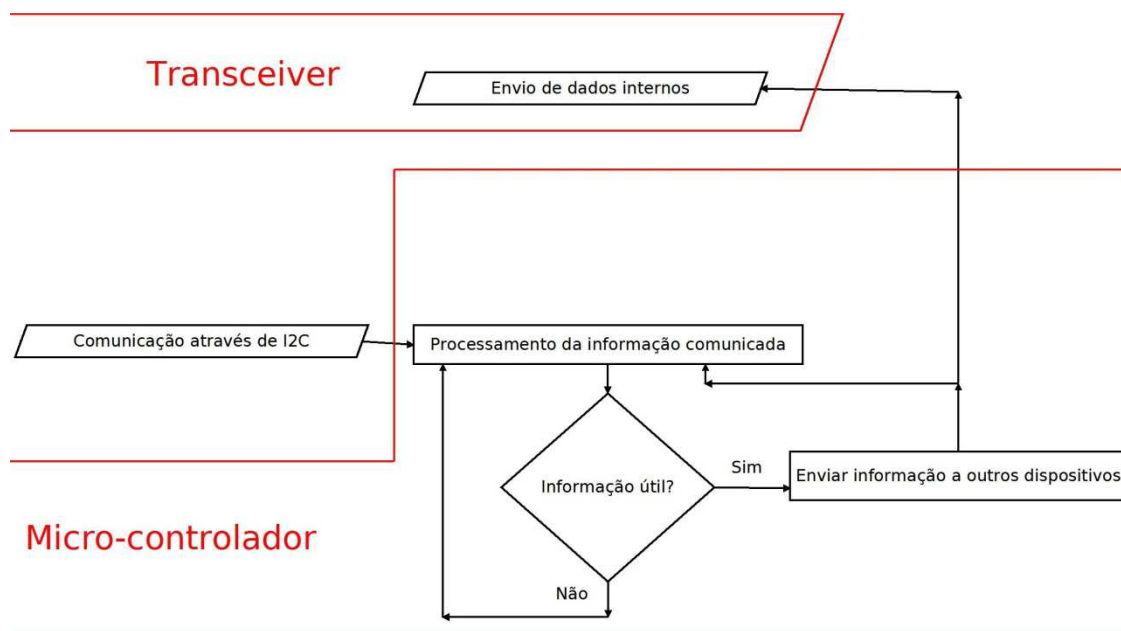


Figura 5.2: Diagrama representativo das acções realizadas após a recepção de dados através de I²C

5.2.1 Supressão de ruído

No que se refere a este módulo, os elementos que necessitam deste tipo de cuidados são o micro-processador do módulo e o *transceiver*. O micro-processador necessita igualmente de um filtro para a alimentação, sendo utilizado um condensador de 22µF próximo de um dos pinos VDD do micro-processador, um condensador de 100nF junto a cada pino VDD ou AVDD e um condensador de 10µF junto ao pino V_{CAP} do micro-processador. No que se refere ao *transceiver*, um condensador de 22µF foi colocado próximo do componente, sendo colocado um condensador de 100nF junto do pino de alimentação a 3.3V.

5.3 Demonstração de conceitos

Tal como acontece com os conceitos relacionados com Interfaces Homem-Máquina, também na área da comunicação sem fios pode ser extremamente útil recorrer a métodos de prototipagem rápida. Apesar de não corresponderem a comunicação sem fios, também a comunicação entre módulos através de I²C será referida ao longo desta secção.

5.3.1 Comunicação através de I²C

O protocolo I²C é um protocolo de comunicação com fios desenvolvido pela *Philips*, que permite estabelecer ligações entre dispositivos mestre e dispositivos escravos. A comunicação é realizada através do uso de duas ligações: SCL e SDA. SCL é o relógio associado à comunicação e corresponde a uma linha controlada apenas pelo dispositivo mestre durante todos os processos de comunicação. SDA é a linha de dados, inicialmente controlada pelo mestre, mas que pode ser controlada pelo dispositivo escravo durante os períodos em que

este envia dados ao mestre ou faz o reconhecimento da recepção de dados provenientes do mestre. Ambas as ligações requerem resistências *pull-up* na ordem de 1kΩ a 10kΩ, dependendo este valor de características como a impedância das linhas ou a sua dimensão total. O nível alto associado a estas resistências ronda normalmente os 3V a 5V, dependendo dos dispositivos que estabelecem a ligação, sendo no entanto necessário que quaisquer resistências *pull-up* numa mesma linha estejam ligadas a uma tensão de referência do mesmo valor e que esta referência seja estável ao longo do tempo, para evitar a influência do valor dos *bits* transmitidos.

```
#include "mbed.h"

I2C i2c(p28, p27);

DigitalOut led_4(LED4);

const int addr = 0xA0;

int main() {
    char cmd[2];
    while (1) {
        cmd[0] = 0x10;
        cmd[1] = 0x00;
        i2c.write(addr, cmd, 2); // mestre escreve para o escravo de
        endereço addr
        led_4 = 1; // LED sinaliza o envio da mensagem para o
        escravo
        wait(2);
        led_4 = 0;

        wait(0.5);
    }
}
```

Utilizando dois *mbed's* e resistências *pull-up* de 2.2kΩ, foram criados dois programas para permitir a comunicação entre os dois dispositivos. O programa apresentado acima permite implementar um dispositivo mestre capaz de enviar mensagens pré-definidas para um escravo de endereço previamente definido. Para o *mbed* os endereços de 7 *bits* usados no protocolo I²C devem ser deslocados para esquerda e adicionado um 0 no *bit* mais à direita. Isto é importante, uma vez que as funções definidas na biblioteca "*mbed.h*" pressupõem o uso do formato de 8 *bits* em que o *bit* mais à direita é automaticamente alterado consoante a operação é de escrita ou leitura. O comando "*i2c.write*" usa como parâmetros o endereço do escravo de destino, a variável a transmitir e a dimensão da variável a transmitir. Um dos quatro LED's do próprio *mbed* foi utilizado para sinalizar o envio de informação para o escravo de uma forma claramente visível.

```

#include <mbed.h>

I2CSlave slave(p9, p10);

DigitalOut led_1(LED1);
DigitalOut led_2(LED2);
DigitalOut led_3(LED3);
DigitalOut led_4(LED4);

int main() {
    char buf[10];
    char msg[] = "Slave!";

    slave.address(0xA0);
    while (1) {
        int i = slave.receive();
        led_1 = 1;    // LED sinaliza o estado do programa
        wait(2);
        led_1 = 0;
        switch (i) {
            case I2CSlave::ReadAddressed:
                slave.write(msg, strlen(msg) + 1); // escravo envia
mensagem de resposta
                led_2 = 1;    // LED sinaliza o estado do programa
                wait(2);
                led_2 = 0;
                break;
            case I2CSlave::WriteGeneral:
                slave.read(buf, 10);    // escravo lê o que foi
enviado e coloca-o em buf
                printf("Read G: %s\n", buf);    // envia o que
foi recebido para a consola
                led_3 = 1;    // LED sinaliza o estado do programa
                wait(2);
                led_3 = 0;
                break;
            case I2CSlave::WriteAddressed:
                slave.read(buf, 10);    // escravo lê o que foi
enviado e coloca-o em buf
                printf("Read A: %s\n", buf); // envia o que foi
recebido para a consola
                led_4 = 1;    // LED sinaliza o estado do programa
                wait(2);
                led_4 = 0;
                break;
        }
        for(int i = 0; i < 10; i++) buf[i] = 0;    // Clear buffer
    }
}

```

De forma semelhante, o dispositivo escravo pode ser programado para enviar respostas ao mestre ou guardar em memória o que lhe foi enviado, consoante a forma como o mestre interage com este. Três situações distintas são consideradas neste programa: o escravo é endereçado numa operação de leitura (o mestre quer ler dados do escravo); todos os escravos interagem com o mestre numa operação de escrita global, o endereço reservado para a

chamada global não é suportado por todos os dispositivos escravos no mercado, pelo que esta opção nem sempre será válida; o escravo é endereçado numa operação de escrita (o escravo escreve em memória uma mensagem proveniente do mestre). Novamente são utilizados os LED's do próprio mbed para sinalizar diferentes situações, como a recepção de uma mensagem do mestre e o tipo de resposta a essa mensagem. De acordo com o programa do mestre o comportamento esperado do escravo seria acender os LED's 1 e 4 de forma sequencial, indicando uma operação de escrita endereçada.

5.3.2 Comunicação sem fios

Com o intuito de realizar alguns testes relacionados com a comunicação sem fios através do protocolo *Wi-Fi*, utilizou-se um módulo *Wifly* e um *mbed*. A configuração do *Wifly* pode ser feita de forma célere e simples através do uso da biblioteca "*WiflyInterface.h*", através da definição dos pinos de ligação mínimos e das características da rede a que se pretende ligar o dispositivo. Este programa simples liga o *Wifly* à rede pretendida, envia para a consola o IP que lhe foi atribuído e por fim desliga-se da rede. Os LED's do próprio *mbed* foram utilizados para sinalizar o decorrer normal do programa, pelo facto de nem sempre ser possível ligar com sucesso à rede.

```
#include "mbed.h"
#include "WiflyInterface.h"

DigitalOut led_1(LED1);
DigitalOut led_2(LED2);
DigitalOut led_3(LED3);
DigitalOut led_4(LED4);

Serial pc(USBTX, USBRX);

/* objectos relacionados com o wifly, onde:
 *   - p13 e p14 servem para a comunicação série
 *   - p22 é para o pino de reset
 *   - p21 fornece informação sobre o estado de ligação
 *   - "mbed" é a ssid da rede
 *   - "password" é a palavra-passe da rede
 *   - WPA é o tipo de segurança
 */
WiflyInterface wifly(p13, p14, p22, p21, "mbed", "password", WPA);

int main() {
    wifly.init(); // use DHCP
    led_1 = 1;
    wait(0.25);
    led_1 = 0;

    while (!wifly.connect()); // efectua a ligação à rede
    led_2 = 1;
    wait(0.25);
    led_2 = 0;

    printf("IP Address is %s\n\r", wifly.getIPAddress()); // envia o
    IP obtido para a consola
```

```

    led_3 = 1;
    wait(0.25);
    led_3 = 0;

    wifly.disconnect();
    led_4 = 1;
    wait(0.25);
    led_4 = 0;
}

```

Simplesmente ligar um módulo *Wi-Fi* não tem grande interesse prático, pelo que uma variante deste programa foi testada para realizar uma tarefa mais adequada. A base do programa é a mesma do anterior, mas neste caso o módulo liga-se à rede (tem de ser uma rede com acesso à *internet* neste caso particular) e acede à página indicada no programa, lendo o seu conteúdo e enviando-o para a consola. Este tipo de funcionalidade pode ser utilizado para parametrizar dispositivos recorrendo a páginas de configuração disponíveis através da rede sem fios, a que o dispositivo possa aceder com regularidade para verificar se os seus parâmetros de funcionamento estão actualizados.

```

#include "mbed.h"
#include "WiflyInterface.h"
#include "HTTPClient.h"

DigitalOut led_1(LED1);
DigitalOut led_2(LED2);
DigitalOut led_3(LED3);
DigitalOut led_4(LED4);

Serial pc(USBTX, USBRX);

WiflyInterface wifly(p13,p14,p22,p21, "mbed", "password", WPA);

HTTPClient http;
char str[512];
int i=0;

int main() {
    wifly.init(); // use DHCP

    led_1 = 1;
    wait(0.25);
    led_1 = 0;

    while (!wifly.connect()); // join the network

    led_2 = 1;
    wait(0.25);
    led_2 = 0;

    pc.printf("IP Address is %s\n\r", wifly.getIPAddress());

    led_3 = 1;

```

```

wait(0.25);
led_3 = 0;

for (i=0; i<10; i=i+1)
{
pc.printf("Trying to fetch page...\n");
// acede à página definida
int ret =
http.get("http://developer.mbed.org/media/uploads/donatien/hello.txt",
str, 512);
// se for bem sucedido lê o texto da página e envia-o para a
consola
// caso contrário indica a mensagem de erro
if (!ret) {
pc.printf("Page fetched successfully - read %d characters\n",
strlen(str));
pc.printf("Result: %s\n", str);
}
else {
pc.printf("Error - ret = %d - HTTP return code = %d\n", ret,
http.getHTTPResponseCode());
}
}

wifly.disconnect();

led_4 = 1;
wait(0.25);
led_4 = 0;
}

```

5.4 Conclusão

As redes sem fios têm sido cada vez mais aplicadas em dispositivos electrónicos, especialmente no que se refere a dispositivos relacionados com aplicações na área da domótica. Isto deve-se principalmente ao facto de a implementação de redes com fios na grande maioria das habitações e edifícios comerciais ou empresariais, como forma de suportar aplicações inteligentes ao nível de automatização de processos e outras áreas relacionadas com a domótica, ser extremamente dispendiosa por requerer um grande nível de remodelações e intervenções em edifícios pré-existentes. As redes sem fios, apesar dos problemas de cobertura de sinal, taxas de transmissão de dados geralmente mais reduzidas e uma maior probabilidade de corrupção de dados por colisão, requerem intervenções menos invasivas, alguns dispositivos de domótica são simplesmente ligados à tomada sem qualquer necessidade de realização de obras, podem ser expandidos com novos dispositivos ao longo do tempo à medida que mais funcionalidades são adicionadas à rede, sem adicionar novas ligações físicas entre dispositivos e de forma geral providenciam um ambiente mais apelativo visualmente, onde não existem inúmeros cabos de rede a interligar os dispositivos de forma muito pouco estética e potencialmente perigosa, mesmo com os cabos de rede a circularem

pelas paredes as ligações ao exterior podem ser causa de quedas, especialmente em aplicações feitas de forma algo descuidada.

Ao longo deste capítulo foram referidas as características de um simples módulo de comunicação sem fios que utiliza um componente com o protocolo *ZigBee* implementado, tendo no entanto as ligações externas necessárias para implementar um transmissor com o protocolo *Wi-Fi*. A prototipagem rápida apresentada no capítulo foi realizada com o *Wifly RN-XV-171* que corresponde ao dispositivo cujas ligações externas mínimas estão previstas no módulo de comunicação sem fios, tendo sido escolhido pela sua simplicidade de implementação.

No que se refere à prototipagem rápida foram referidos alguns exemplos relacionados com a ligação a redes previamente estabelecidas e o acesso a páginas *Web* com o intuito de obter informações, algo que pode servir numa aplicação prática para permitir configurações à distância e actualizações automáticas de parâmetros dos dispositivos electrónicos. O uso de um módulo *Wi-Fi* durante os testes de prototipagem rápida deveu-se principalmente ao facto de testar dispositivos numa rede requerer sempre um mínimo de dois dispositivos correctamente configurados, algo que no caso das redes *Wi-Fi* é extremamente simples de obter através do uso de um *router* ou outro dispositivo capaz de criar uma rede local (como um portátil) como o segundo elemento da rede, reduzindo assim as dificuldades ao nível do *debug* de código, pelo facto de apenas um dos dispositivos ter sido configurado durante os testes.

Capítulo 6

Conclusões

A concepção modular de dispositivos electrónicos é algo que tem vindo a tornar-se mais comum nos últimos anos. Com a grande especialização de tarefas que grande parte das empresas da actualidade apresenta, seria impossível continuar a produzir dispositivos de forma integral. Noutras áreas, sistemas integrais continuam a ser essenciais, mas no que se refere à electrónica a aposta tem sido na certificação de pequenos módulos prontos a usar, especialmente no que se refere aos módulos de comunicação sem fios. Num mercado cada vez mais competitivo e com períodos de desenvolvimento extremamente reduzidos a divisão das tarefas de concepção em quantidades mais pequenas e mais perto da indivisibilidade, existe obviamente um limite máximo de divisões lógicas que podem ser definidas durante o desenvolvimento de um dispositivo electrónico, o que obviamente facilita a interpretação do que está a ser feito, facilita os testes (menos variáveis a ter em conta) e permite aproveitar a especialização natural das pessoas que se encontram a trabalhar no desenvolvimento do dispositivo, facilitando ainda a rapidez de aprendizagem de novos membros da equipa de desenvolvimento, o que reduz os requisitos de conhecimento ou experiência prévios.

Ao longo deste trabalho foram referidas algumas das principais diferenças entre concepção modular de sistemas e a concepção integral, evidenciando as vantagens e desvantagens de cada um, assim como fornecendo diversos exemplos de cada tipo de sistema. Foram ainda distinguidos vários tipos de sistemas modulares, consoante características como o tipo de interface ou de interligação dos módulos do sistema.

Igualmente foi dimensionada uma fonte de alimentação comutável baseada num conversor *Flyback* que fornece de forma directa diversas tensões de amplitude fixa através de um transformador com múltiplas ligações no secundário e de reguladores de tensão que fornecem a alimentação dedicada aos dispositivos electrónicos de baixa potência. Além das tensões de amplitude fixa, esta fonte comutável pode fornecer uma tensão de amplitude ajustável às necessidades do circuito a jusante, através da calibração por *software* de uma resistência digital colocada na realimentação de um conversor *Buck* integrado. Considerando o facto de os módulos poderem comunicar entre si através do protocolo I²C, a tensão ajustável poderia até ser modificada consoante necessidades específicas dos restantes módulos que estariam gravadas na memória dos micro-processadores e seriam indicadas durante a fase inicial de funcionamento do dispositivo.

De seguida foram referidas as características de um módulo de Interface Homem-Máquina genérico que faz uso de um ecrã de dimensão adequada à aplicação e uma interface táctil,

que pode ou não estar incluída no *hardware* do próprio ecrã. Através de dispositivos de prototipagem rápida foram demonstradas de forma sucinta algumas das funcionalidades espectáveis de uma interface com o utilizador simples, sendo fornecidos excertos de código funcionais que podem ser implementados de forma simples através da adequação de parâmetros. Obviamente, o uso de funcionalidades de bibliotecas exclusivas ao *mbed* dificultaria a portabilidade do código para outros micro-processadores, mas na maior parte dos casos o mesmo raciocínio poderia ser aplicado, desde que existisse conhecimento aprofundado do micro-processador de destino e o raciocínio por trás do código foi apresentado sucintamente em forma textual no capítulo correspondente.

Finalmente foram referidas as características do módulo de comunicação sem fios e apresentados alguns exemplos de aplicação de um módulo capaz de comunicar através do protocolo *Wi-Fi*. O módulo *Wifly* utilizado nos testes de prototipagem rápida é uma solução simples de implementar e as ligações mínimas necessárias ao seu funcionamento permitem a sua utilização em conjunto com micro-processadores dos mais variados tipos. Além disso, o módulo em si foi feito para utilizar um *footprint* durante a concepção do PCB que é compatível com grande parte dos módulos *ZigBee* actualmente disponíveis, apesar de este não ser um padrão oficial, a tentativa de fazer os módulos de comunicação sem fios compatíveis entre si, para permitir a troca de fabricantes do mesmo sem mudança de *hardware*, fez com que aquele esquema de colocação no PCB seja quase padrão. Existem obviamente excepções a este padrão e o módulo da *Microchip* usado no esquemático do módulo de comunicações sem fios é um exemplo dos módulos *ZigBee* que não usam esse “padrão”.

Em anexo são providenciados os esquemáticos de cada módulo, assim como um exemplo mais completo de aplicação de um sistema com uma interface com o utilizador e um módulo de comunicações sem fios.

Bibliografia

Produção Modular de Produtos

- [1] Ulrich, Karl. "The role of product architecture in the manufacturing firm." *Research policy* 24.3 (1995): 419-440.
- [2] Dahmus, Jeffrey B., Javier P. Gonzalez-Zugasti, and Kevin N. Otto. "Modular product architecture." *Design studies* 22.5 (2001): 409-424.
- [3] Marshall, Russell, P. G. Leaney, and P. Botterell. "Enhanced product realisation through modular design: an example of product/process integration." (1998).
- [4] Kusiak, Andrew. "Integrated product and process design: a modularity perspective." *Journal of Engineering Design* 13.3 (2002): 223-231.
- [5] Sanchez, Ron, and Joseph T. Mahoney. "Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design." *Strategic management journal* 17.S2 (1996): 63-76.
- [6] Gershenson, J. K., G. J. Prasad, and Y. Zhang. "Product modularity: definitions and benefits." *Journal of Engineering design* 14.3 (2003): 295-313.
- [7] Gershenson, John K., G. Jagannath Prasad, and Srikanth Allamneni. "Modular Product Design: A Life-Cycle View." *Transactions of the SDPS* 3.4 (1999): 13-26.
- [8] Jose, Alberto, and Michel Tollenaere. "Modular and platform methods for product family design: literature analysis." *Journal of Intelligent manufacturing* 16.3 (2005): 371-390.

Fonte de Alimentação Comutável

- [9] Singh, Bhim, et al. "A review of single-phase improved power quality AC-DC converters." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 50.5 (2003): 962-981.
- [10] Lu, DD-C., HH-C. lu, and Velibor Pjevalica. "A single-stage AC/DC converter with high power factor, regulated bus voltage, and output voltage." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 23.1 (2008): 218-228.
- [11] Kim, Myung-Bok, Ki-Bum Park, and Myung-Joong Youn. "A novel single-stage AC-DC converter with quasi-resonant zero-voltage-switching for high power factor and high efficient applications." *International Journal of Circuit Theory and Applications* 39.7 (2011): 733-749.

- [12] Moschopoulos, Gerry, and Praveen Jain. "Single-phase single-stage power-factor-corrected converter topologies." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 52.1 (2005): 23-35.
- [13] Lee, Jun-Young. "Single-stage AC/DC converter with input-current dead-zone control for wide input voltage ranges." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 54.2 (2007): 724-732.
- [14] Liu, Yen-Ming, and Lon-Kou Chang. "Single-stage soft-switching AC-DC converter with input-current shaping for universal line applications." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56.2 (2009): 467-479.
- [15] Lu, DD-C., HH-C. lu, and Velibor Pjevalica. "Single-stage AC/DC boost-forward converter with high power factor and regulated bus and output voltages." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56.6 (2009): 2128-2132.
- [16] Ki, Shu-Kong, and DD-C. Lu. "Implementation of an efficient transformerless single-stage single-switch AC/DC converter." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.12 (2010): 4095-4105.
- [17] Cheng, Hung-Liang, Yao Ching Hsieh, and Chi H. Lin. "A novel single-stage high-power-factor AC/DC converter featuring high circuit efficiency." *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009.
- [18] Ribeiro, Hugo Santos, and Beatriz Vieira Borges. "New optimized full-bridge single-stage ac/dc converters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58.6 (2011): 2397-2409.
- [19] Choi, Woo-Young, and Jae-Yeon Choi. "A novel single-stage AC-DC converter to supply sustain power for plasma display panels." *Journal of Display Technology* 7.9 (2011): 494-502.
- [20] Narimani, Mehdi, and Gerry Moschopoulos. "A New Single-Phase Single-Stage Three-Level Power-Factor-Correction AC-DC Converter With Phase-Shift Modulation." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 60.9 (2013): 3731-3735
- [21] Li, Yan-Cun, and Chern-Lin Chen. "A novel primary-side regulation scheme for single-stage high-power-factor AC-DC LED driving circuit." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 60.11 (2013): 4978-4986.
- [22] Kim, Myung-Bok, and Myung-Joong Youn. "A novel single-stage isolated ac/dc converter with quasi-resonant zero-voltage-switching with a modified forward converter adopting capacitive output filter." *International Journal of Electronics* 97.7 (2010): 827-845.

- [23] Alonso, J. Marcos, Marco A. Dalla Costa, and Carlos Ordiz. "Integrated buck-flyback converter as a high-power-factor off-line power supply." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.3 (2008): 1090-1100.
- [24] Athab, Hussain S., DD-C. Lu, and Krishnathevar Ramar. "A single-switch AC/DC flyback converter using a CCM/DCM quasi-active power factor correction front-end." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 59.3 (2012): 1517-1526
- [25] Georgakas, Konstantinos, and Athanasios Safacas. "Switching frequency determination of a bidirectional AC-DC converter to improve both power factor and efficiency." *Electric Power Systems Research* 81.7 (2011): 1572-1582.
- [26] Chang, Lon-Kou, and Hsing-Fu Liu. "A novel forward AC/DC converter with input current shaping and fast output voltage regulation via reset winding." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 52.1 (2005): 125-131.
- [27] Lázaro, Antonio, et al. "New power factor correction AC-DC converter with reduced storage capacitor voltage." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 54.1 (2007): 384-397.
- [28] Genc, Naci, and Ires Iskender. "An improved soft switched PWM interleaved boost AC-DC converter." *Energy Conversion and Management* 52.1 (2011): 403-413.

Interface Homem-Máquina

- [29] Sample, Alanson P., Daniel J. Yeager, and Joshua R. Smith. "A capacitive touch interface for passive RFID tags." *RFID, 2009 IEEE International Conference on*. IEEE, 2009.
- [30] Ruan, Juan-Yao, PC-P. Chao, and Wei-Dar Chen. "A multi-touch interface circuit for a large-sized capacitive touch panel." *Sensors, 2010 IEEE*. IEEE, 2010.
- [31] Song, Byunghun, Haksoo Choi, and Hyung Su Lee. "Surveillance tracking system using passive infrared motion sensors in wireless sensor network." *Information Networking, 2008. ICOIN 2008. International Conference on*. IEEE, 2008.
- [32] Zappi, Piero, Elisabetta Farella, and Luca Benini. "Tracking motion direction and distance with pyroelectric IR sensors." *Sensors Journal, IEEE* 10.9 (2010): 1486-1494.
- [33] Ward, Andy, Alan Jones, and Andy Hopper. "A new location technique for the active office." *Personal Communications, IEEE* 4.5 (1997): 42-47.
- [34] Stiefmeier, Thomas, et al. "Combining motion sensors and ultrasonic hands tracking for continuous activity recognition in a maintenance scenario." *Wearable Computers, 2006 10th IEEE International Symposium on*. IEEE, 2006.

[35] Fardi, Basel, Ullrich Schuenert, and Gerd Wanielik. "Shape and motion-based pedestrian detection in infrared images: a multi sensor approach." *Intelligent Vehicles Symposium, 2005. Proceedings. IEEE*. IEEE, 2005.

[36] Turunen, Markku, et al. "Multimodal interaction with speech and physical touch interface in a media center application." *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*. ACM, 2009.

[37] Coffey, Dane, et al. "Slice WIM: a multi-surface, multi-touch interface for overview+detail exploration of volume datasets in virtual reality." *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. ACM, 2011.

Comunicação sem fios

[38] Baronti, Paolo, et al. "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards." *Computer communications* 30.7 (2007): 1655-1695.

[39] Wheeler, Andrew. "Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee." *Communications Magazine, IEEE* 45.4 (2007): 70-77.

[40] Gill, Khusvinder, et al. "A zigbee-based home automation system." *Consumer Electronics, IEEE Transactions on* 55.2 (2009): 422-430.

[41] Egan, David. "The Emergence of ZigBee in building automation and industrial controls." *Computing and Control Engineering* 16.2 (2005): 14-19.

[42] Blumenthal, Jan, et al. "Weighted centroid localization in zigbee-based sensor networks." *Intelligent Signal Processing, 2007. WISP 2007. IEEE International Symposium on*. IEEE, 2007.

[43] Lee, Jin-Shyan, Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen. "A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi." *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2007.

[44] Baker, Nick. "ZigBee and Bluetooth: Strengths and weaknesses for industrial applications." *Computing and Control Engineering* 16.2 (2005): 20-25.

Anexo A1

Ao longo das páginas seguintes são apresentadas as porções do esquemático da Fonte de Alimentação Comutável.

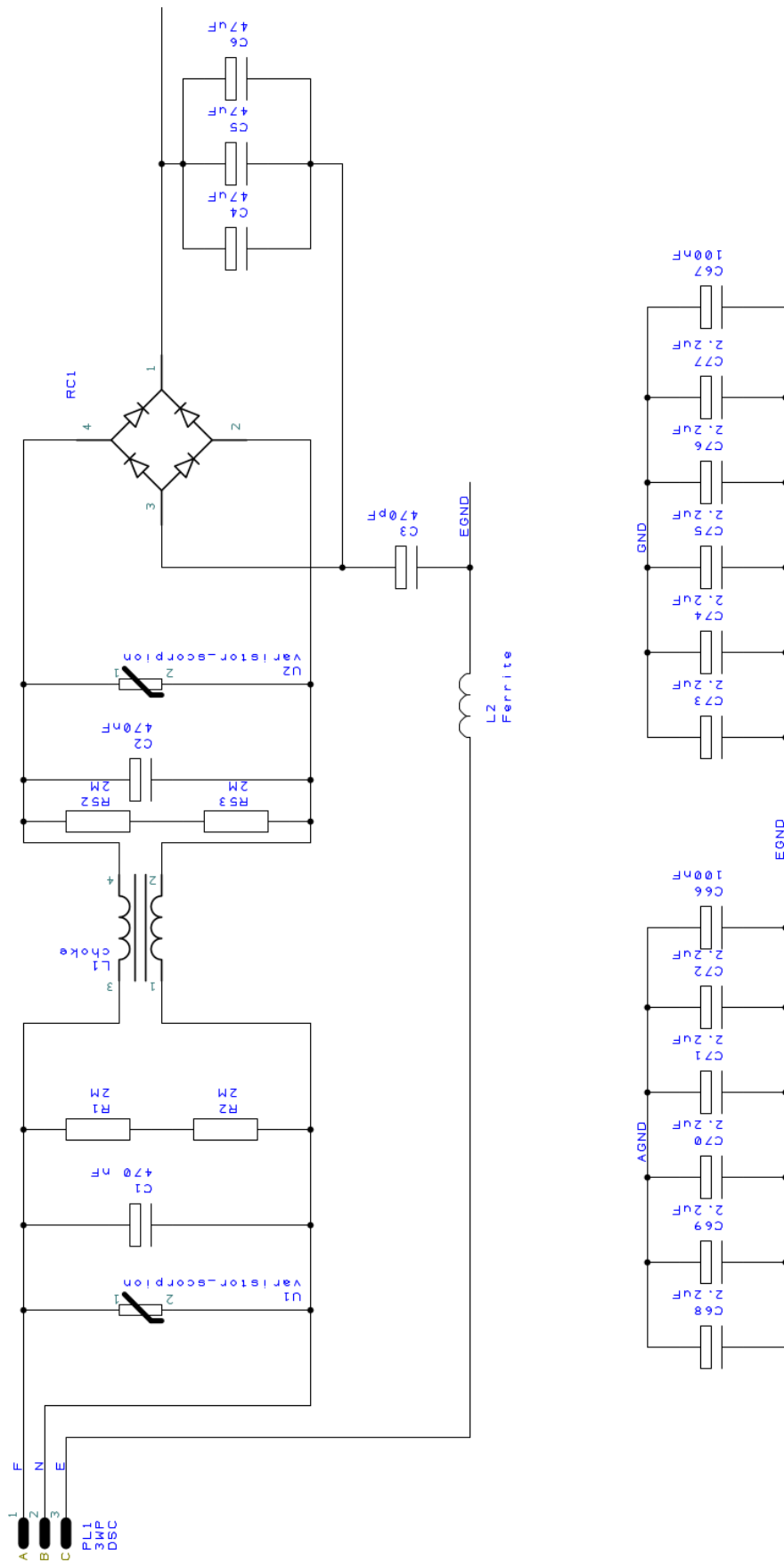


Figura A1.1: Filtro de entrada da Fonte Comutável

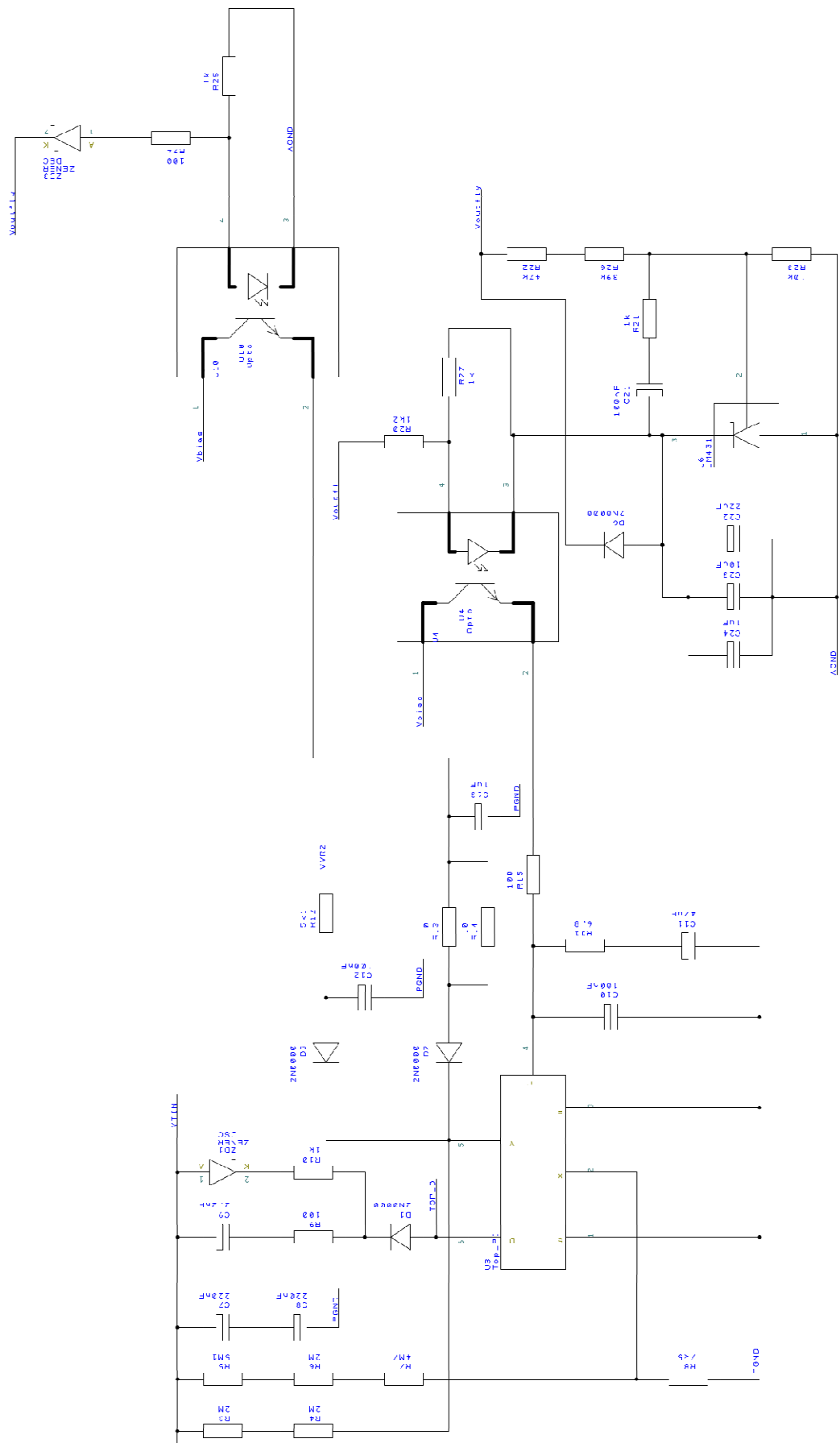


Figura A1.2: Conversor *Flyback* e realimentação da saída

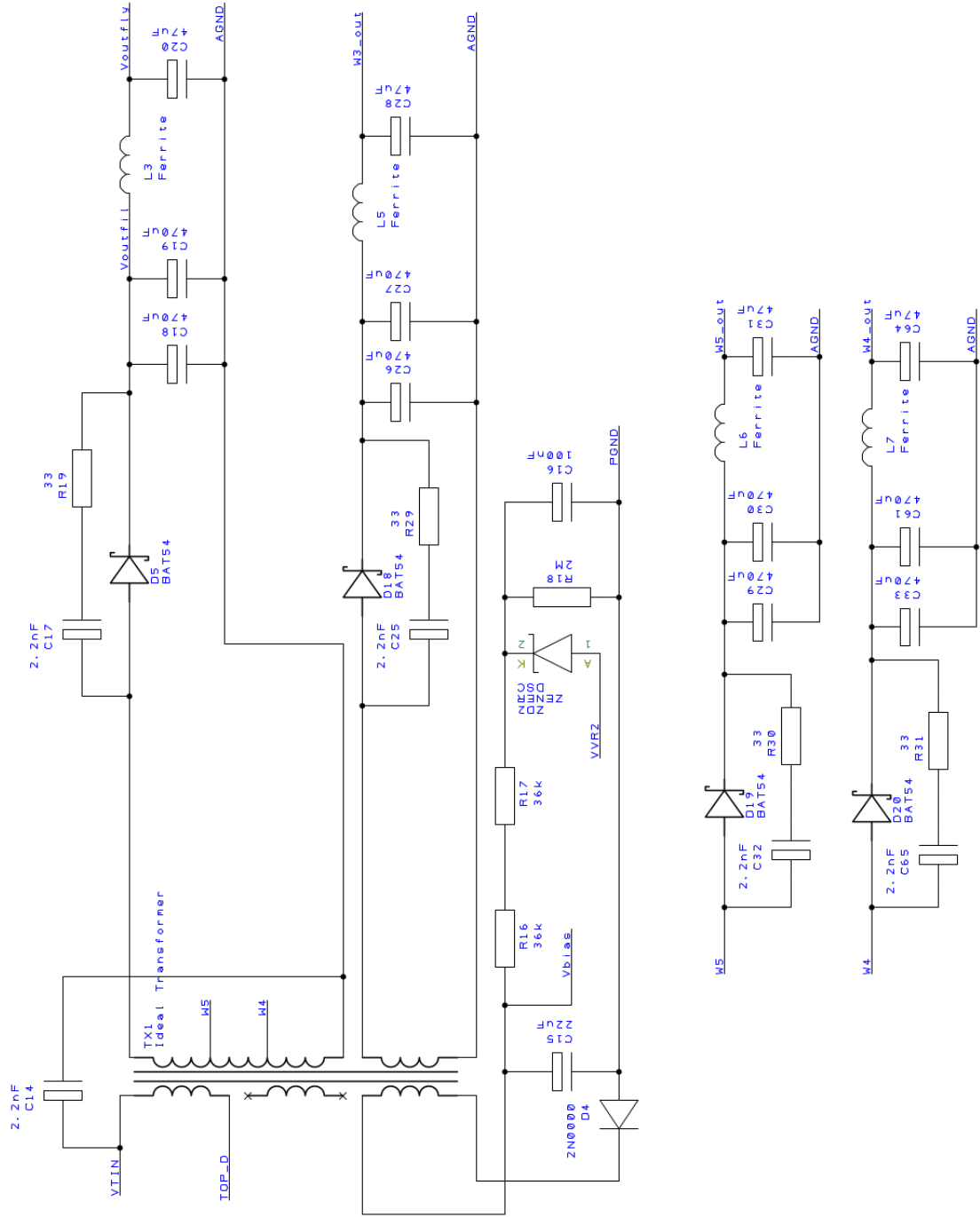


Figura A1.3: Transformador e saídas do conversor *Flyback*

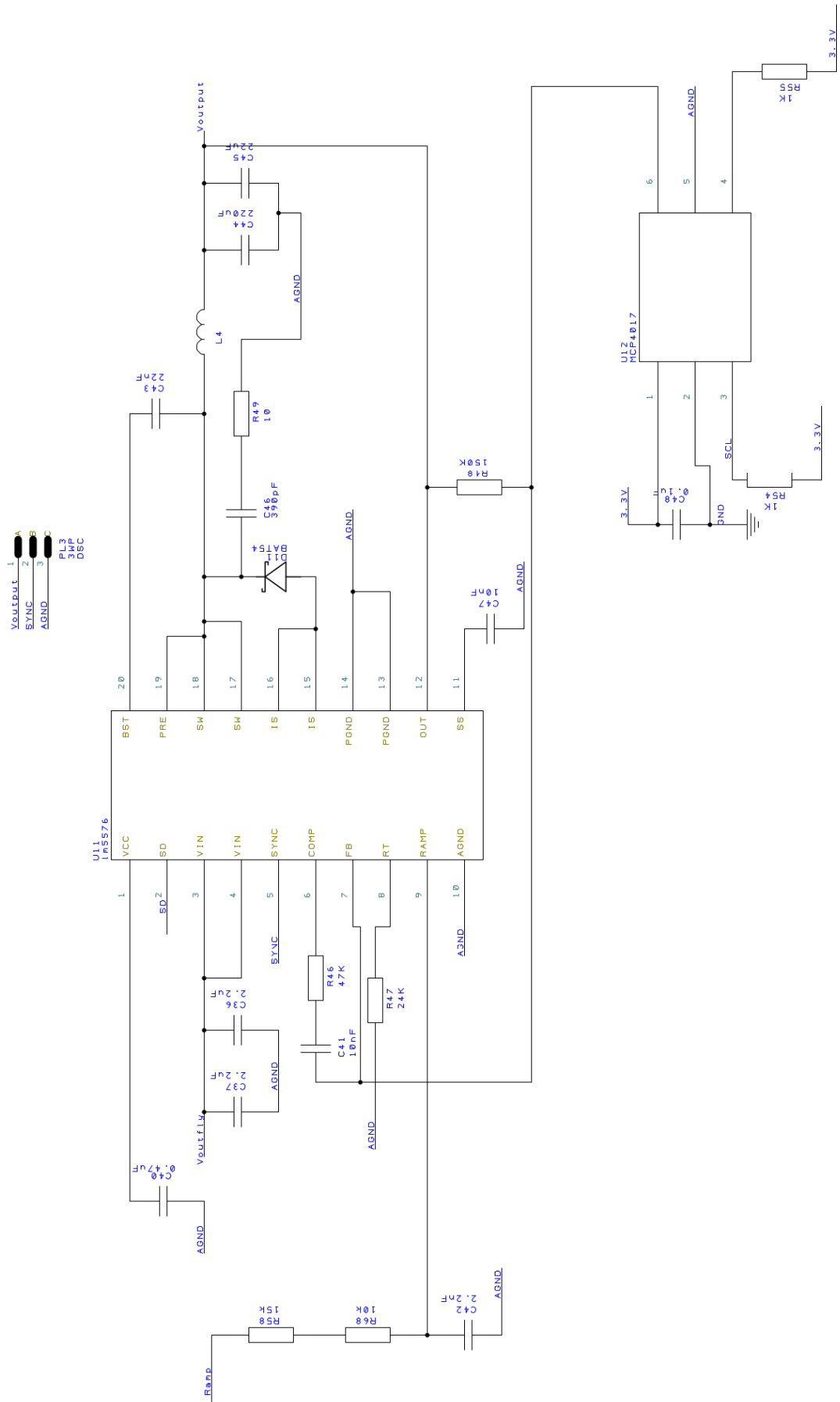


Figura A1.4: Conversor Buck

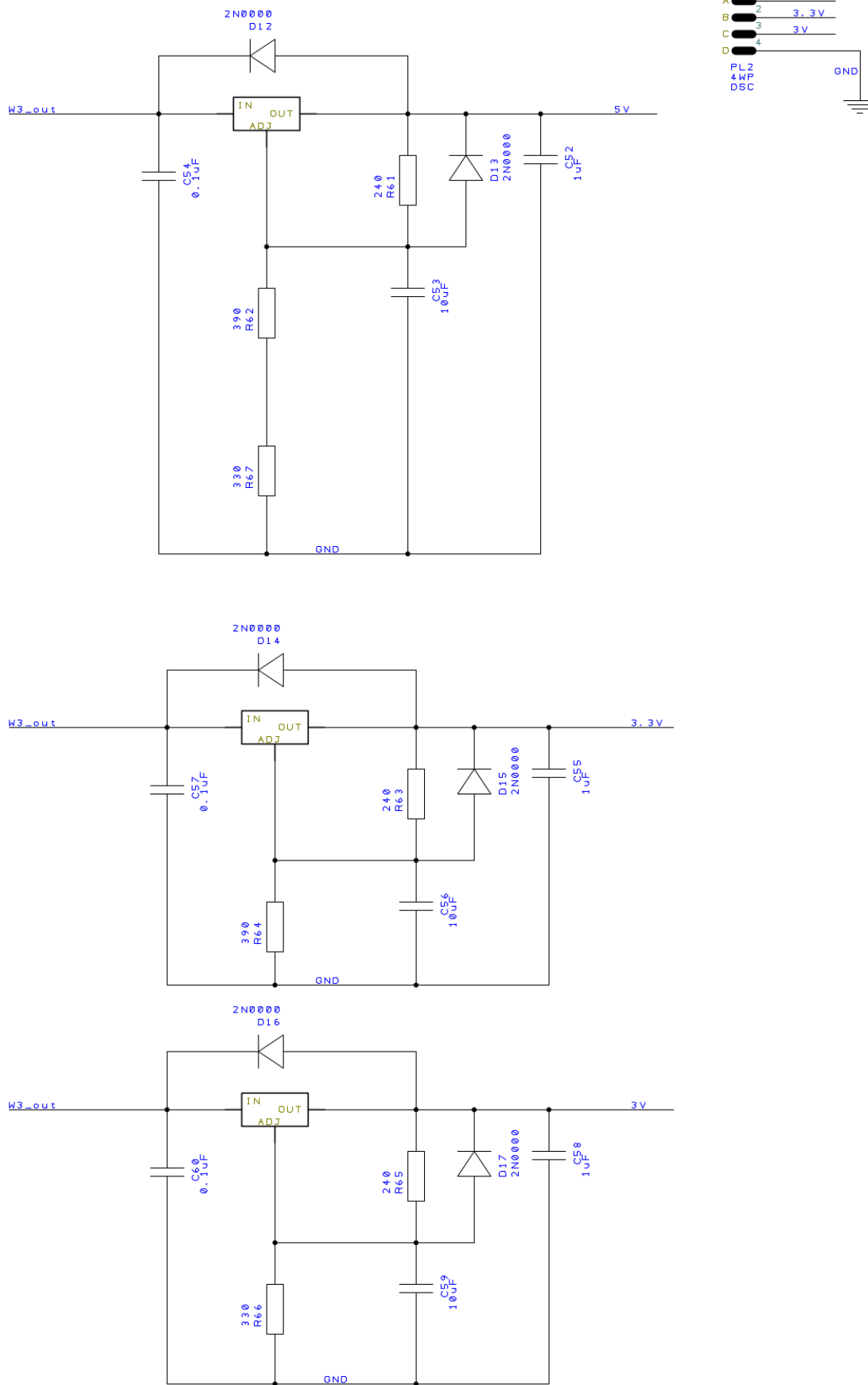


Figura A1.5: Reguladores de tensão e pinos de ligação externa

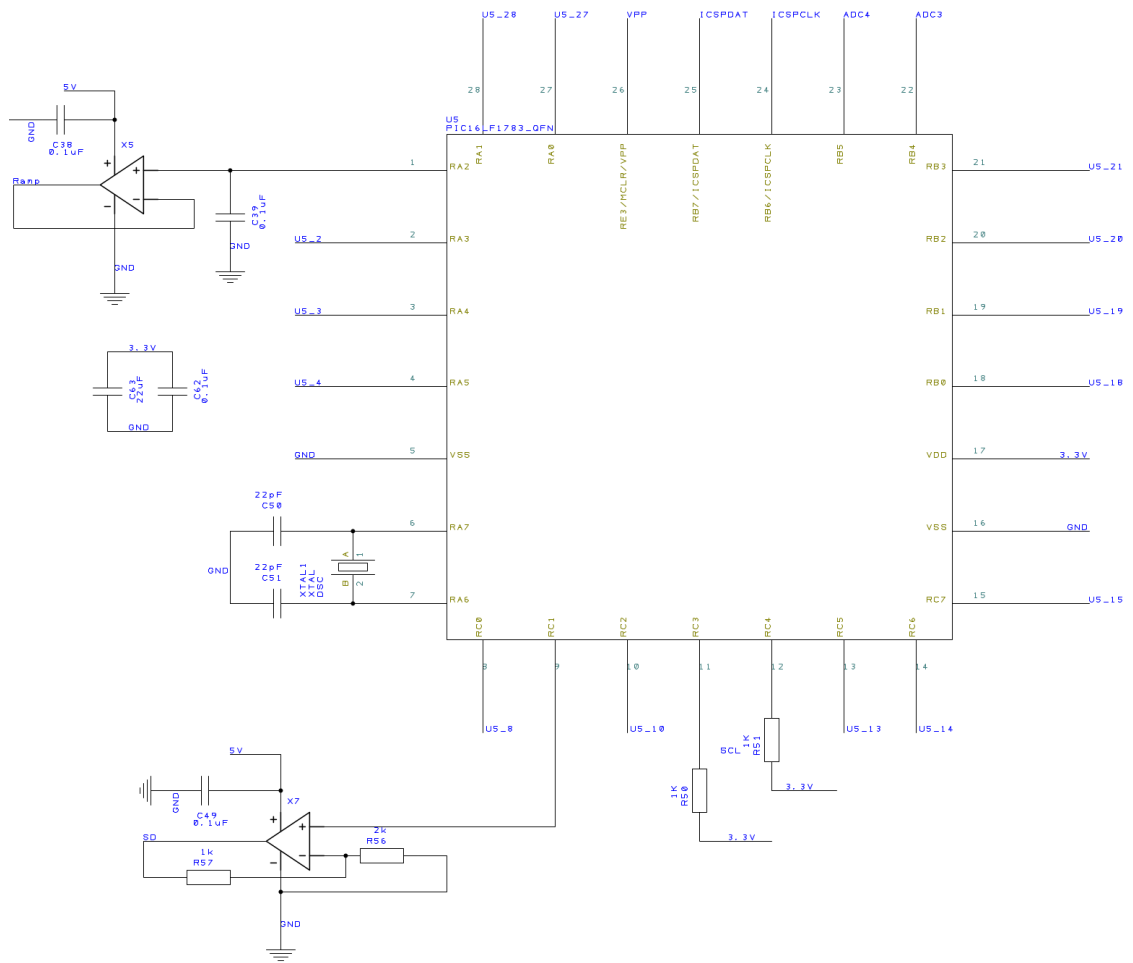


Figura A1.6: Micro-processador que controla o conversor *Buck*

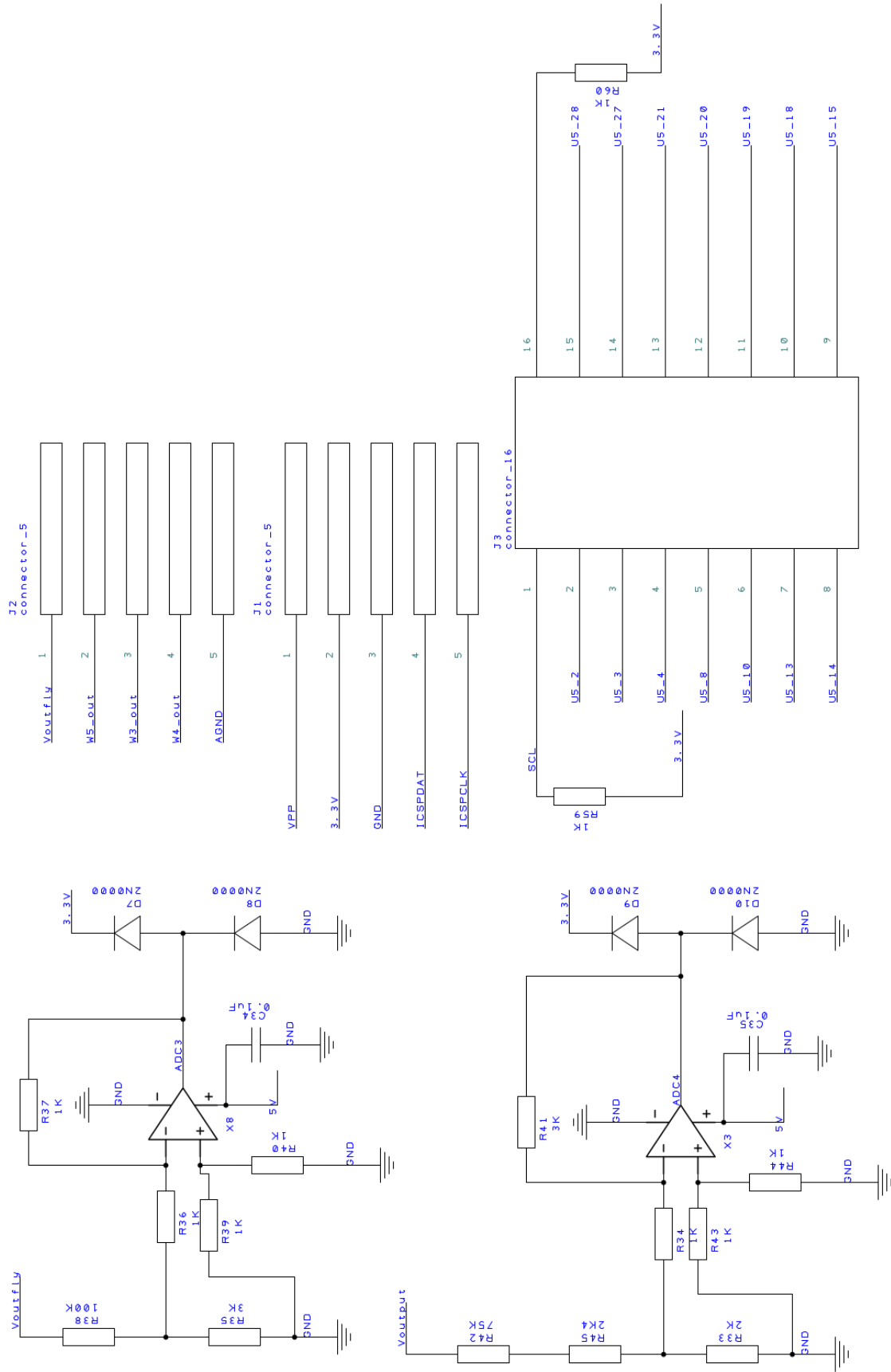


Figura A1.7: Amplificadores operacionais e ligações externas

Anexo A2

Ao longo das páginas seguintes são apresentadas as porções do esquemático da Interface Homem-Máquina.

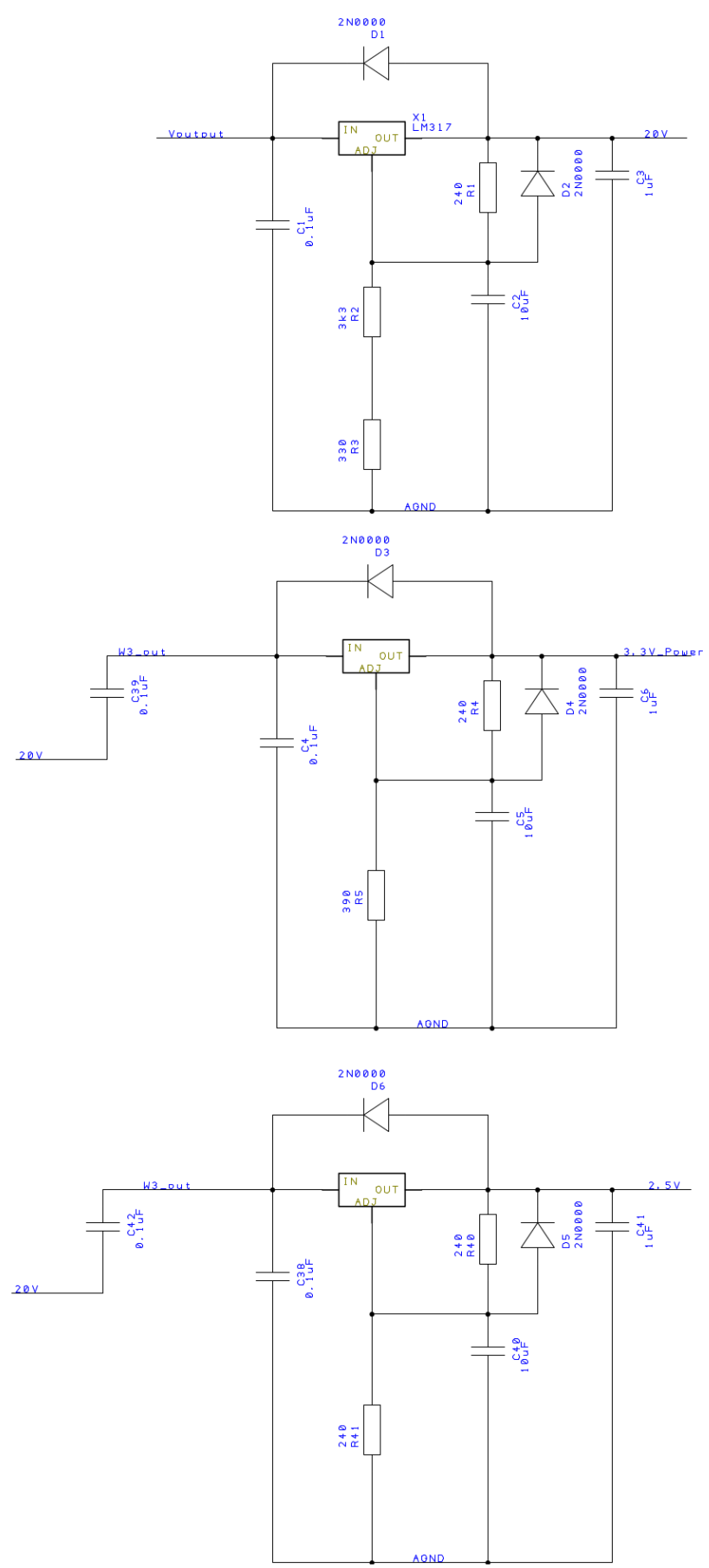
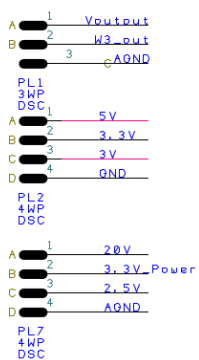


Figura A2.1: Reguladores de tensão e ligações externas

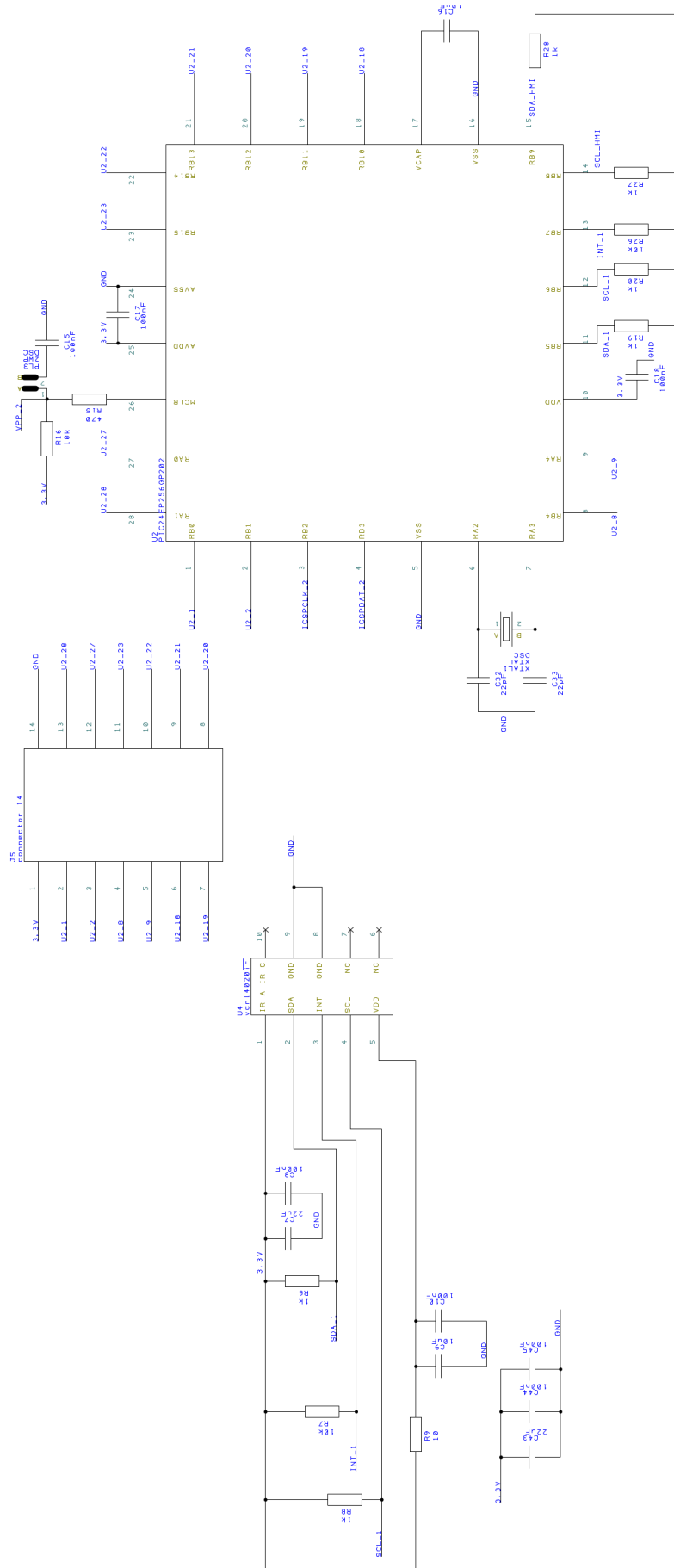


Figura A2.2: Primeiro sensor de infra-vermelhos e micro-processador dedicado

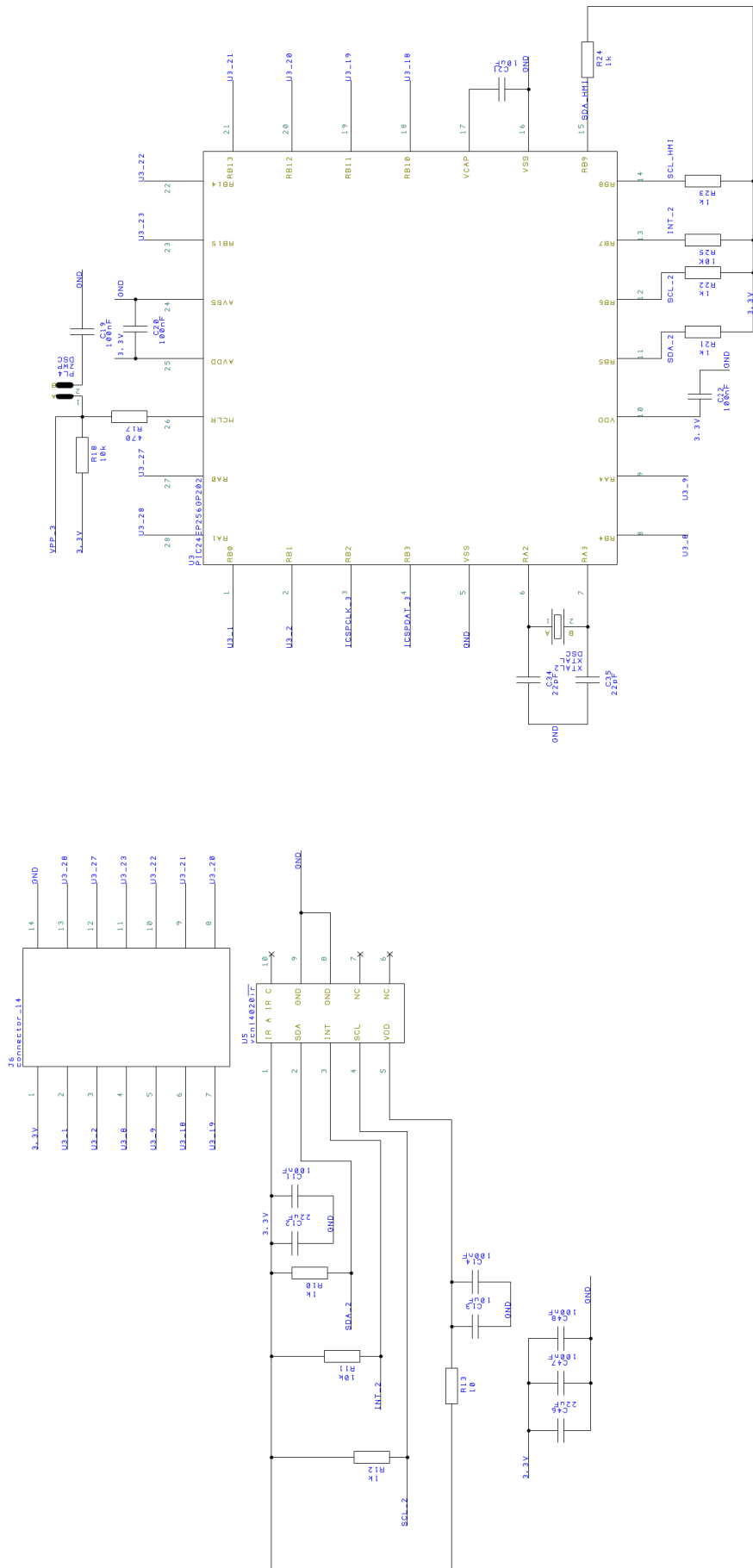


Figura A2.3: Segundo sensor de infra-vermelhos e micro-processador dedicado

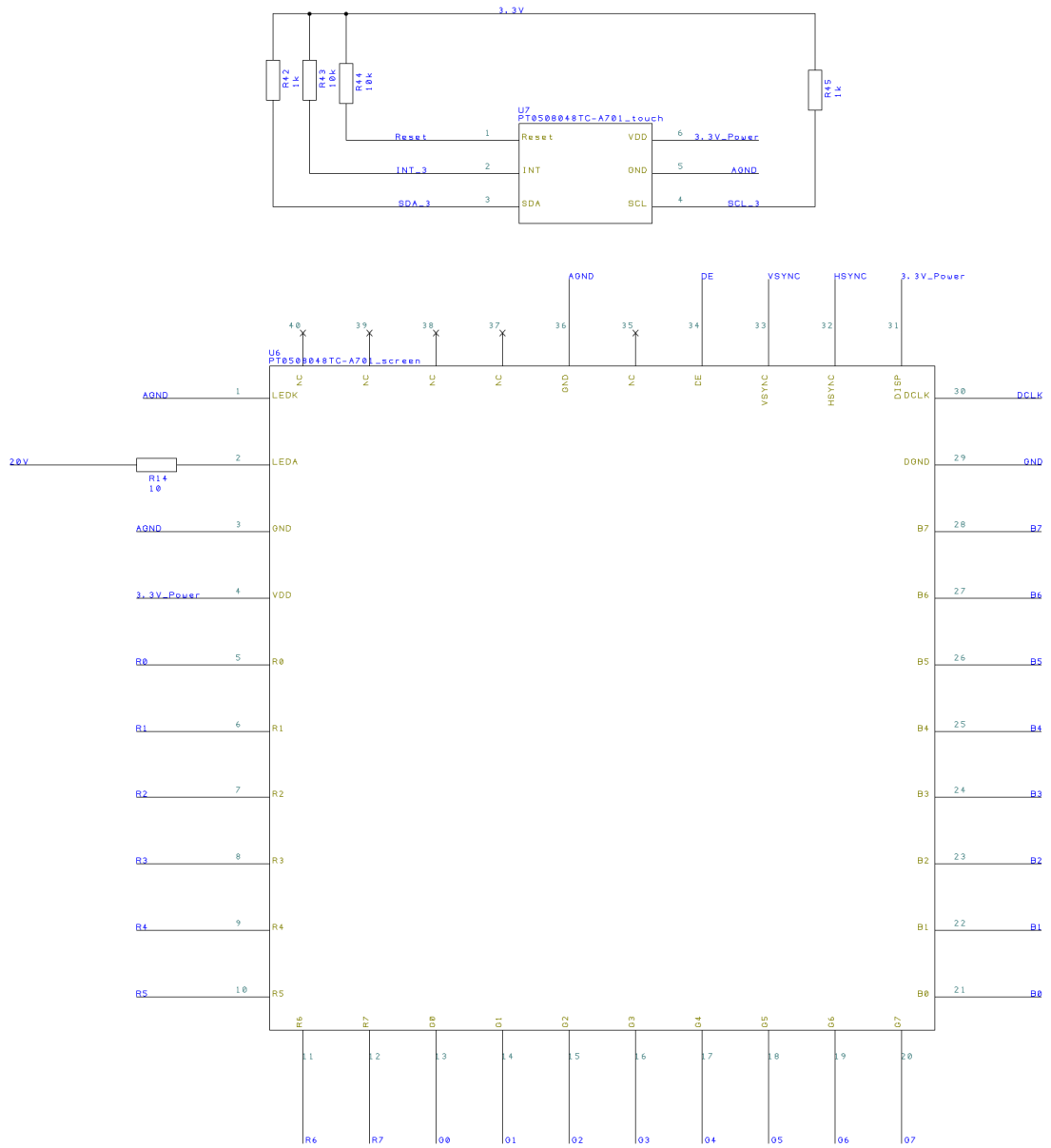


Figura A2.4: Ligações à interface com o utilizador

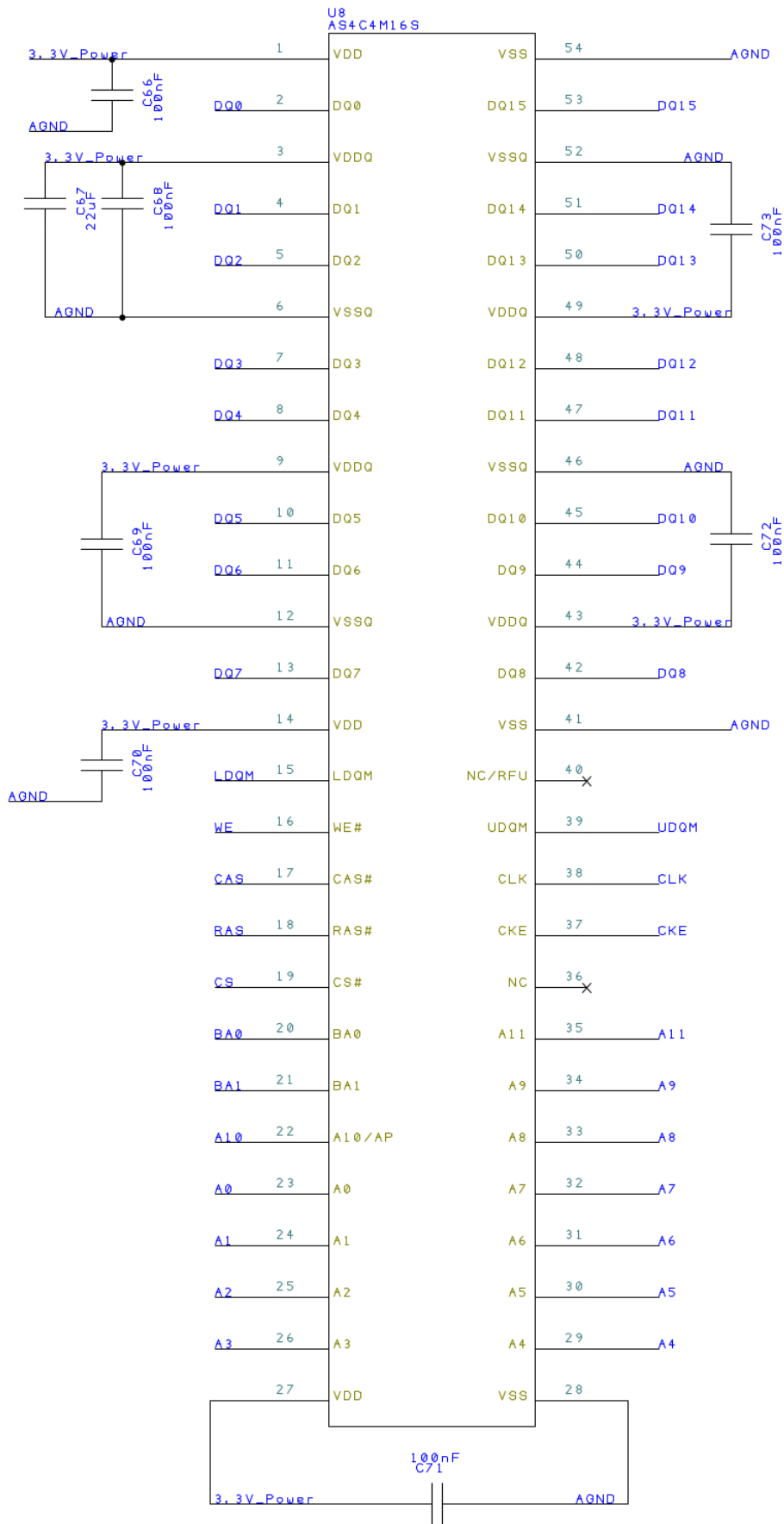


Figura A2.5: Memória externa usada pelo controlador gráfico

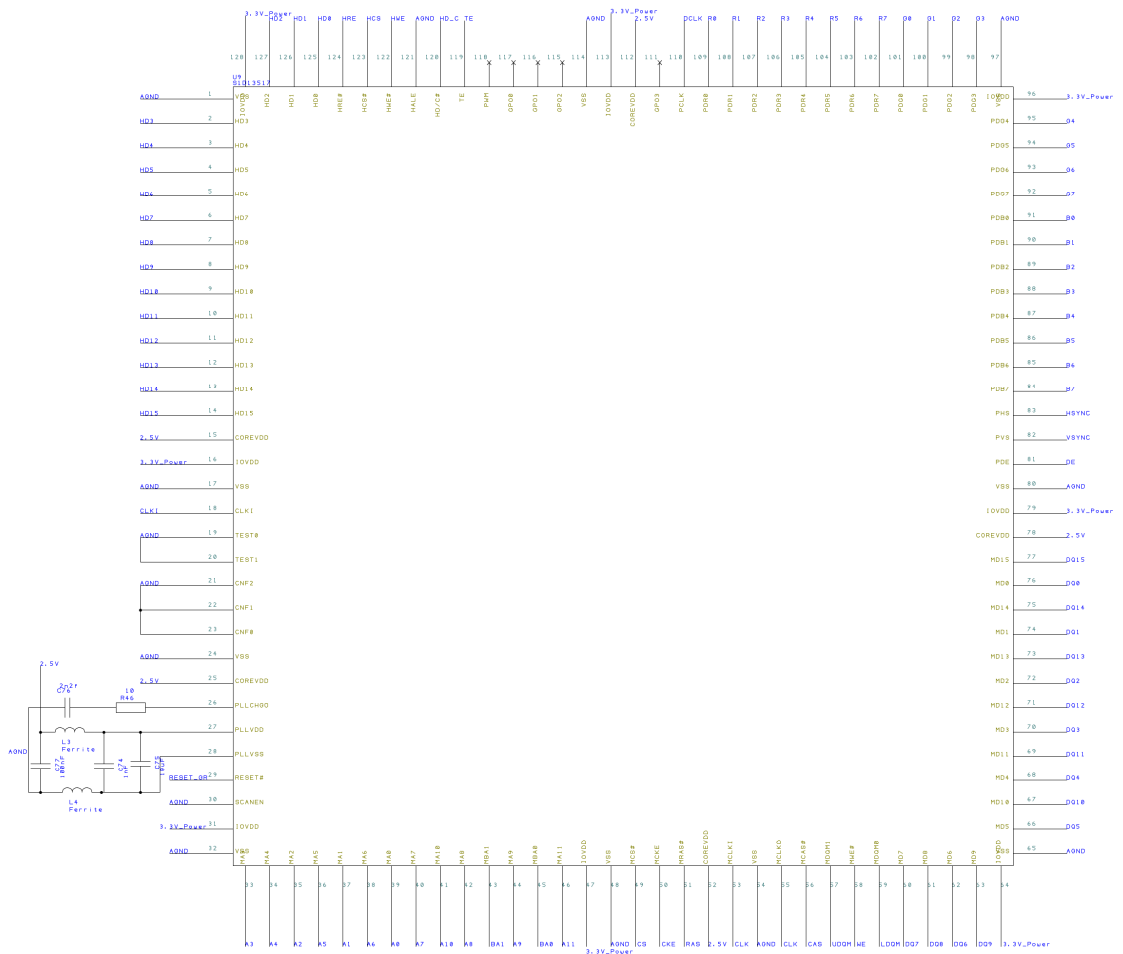


Figura A2.6: Controlador gráfico

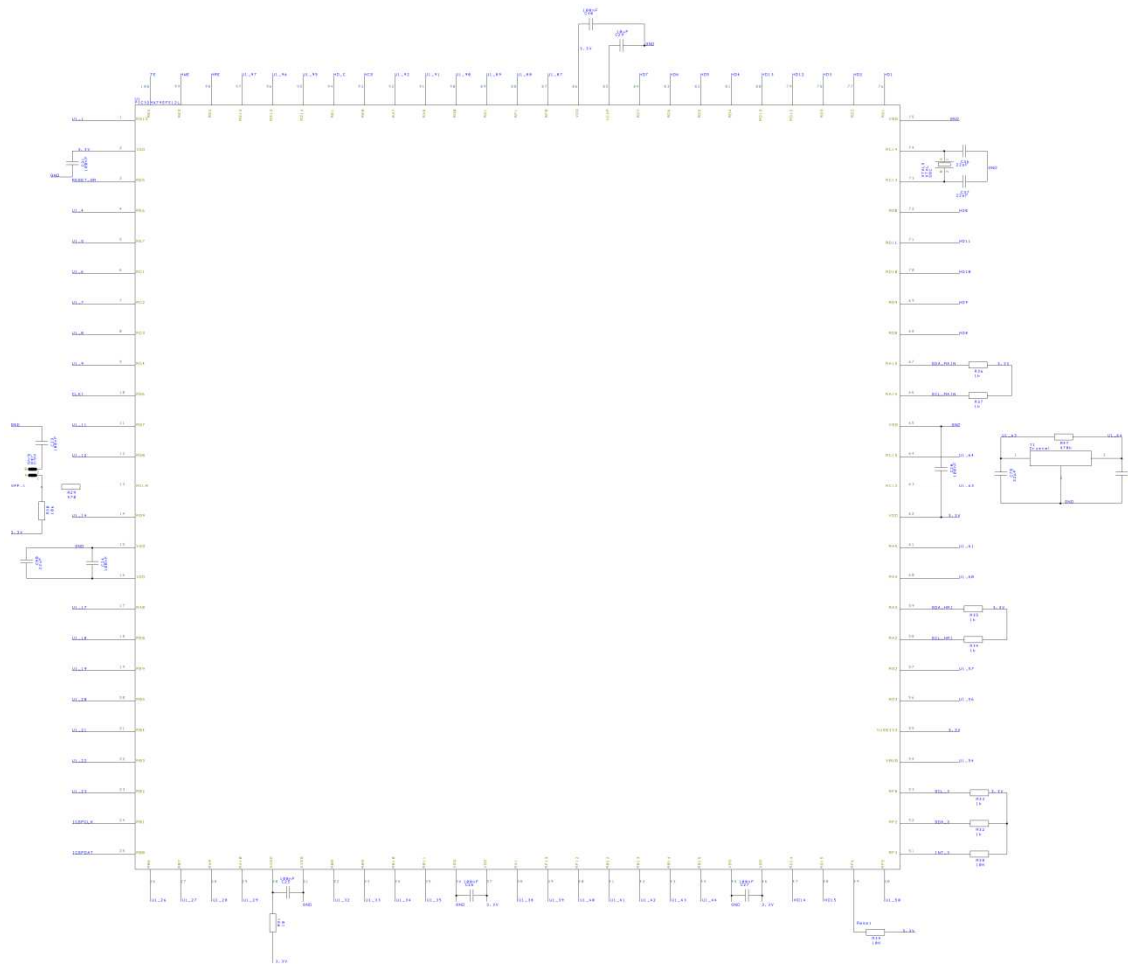


Figura A2.7: Micro-processor principal

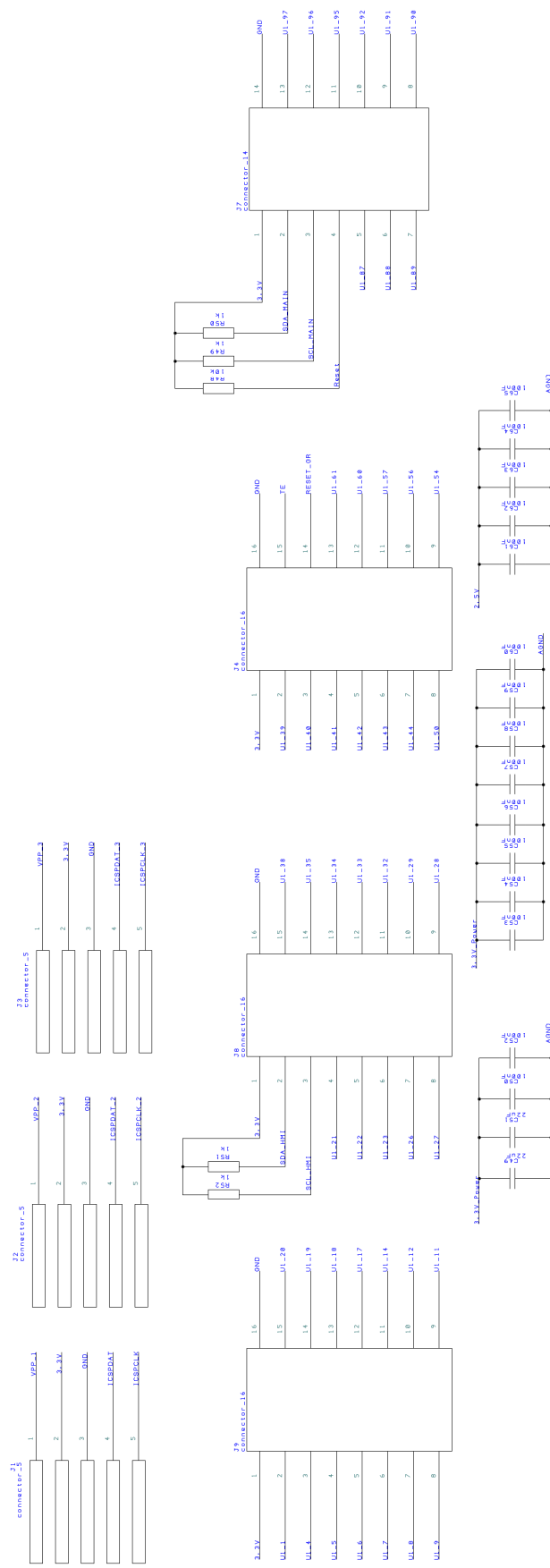


Figura A2.8: Ligações externas do módulo

Anexo A3

Nesta página é apresentado o esquemático do Módulo de Comunicações Sem Fios.

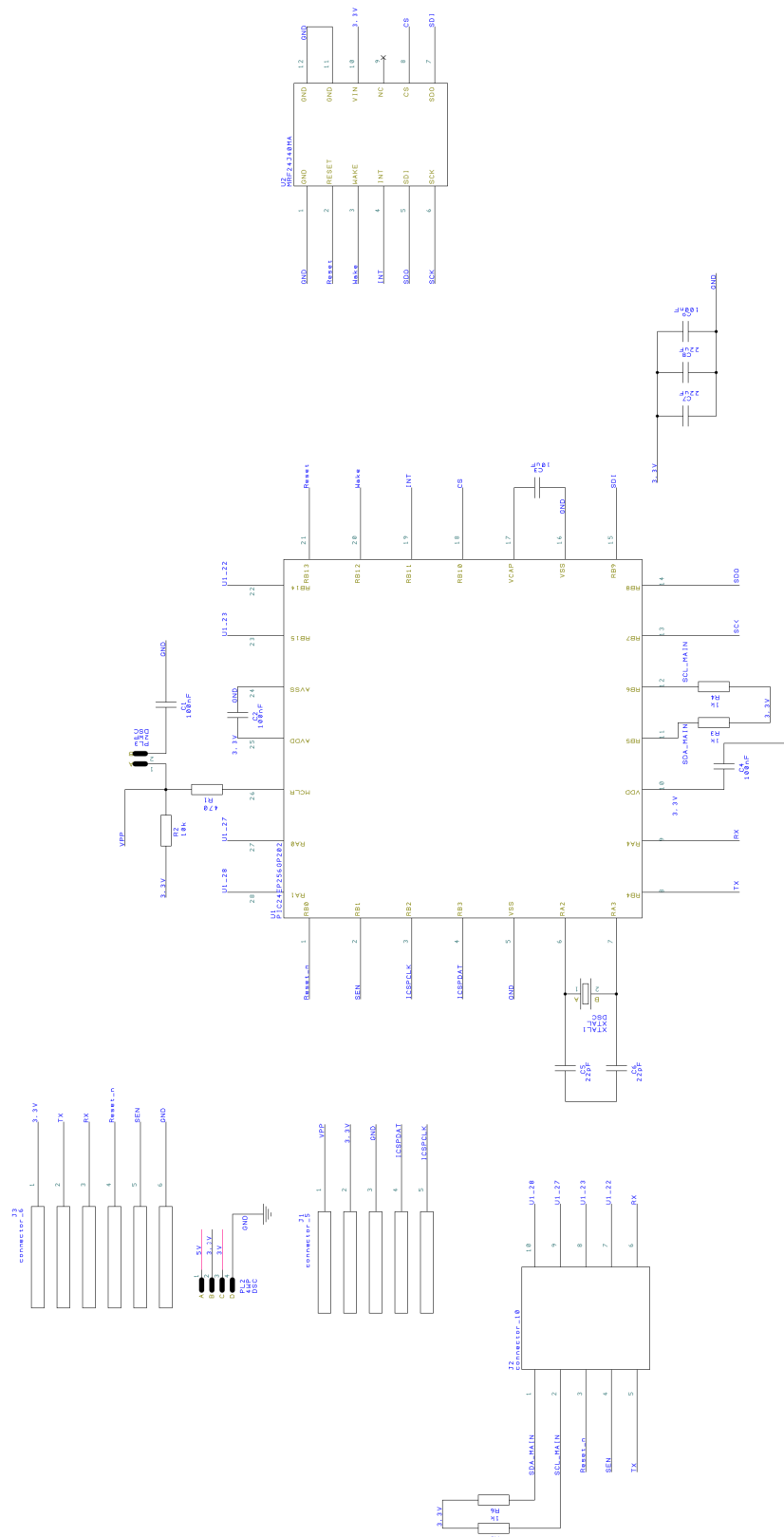


Figura A3.1: Esquemático do Módulo de Comunicações Sem Fios

Anexo A4

Neste anexo é apresentado um exemplo mais completo de um programa que controla um módulo de comunicação sem fios e outro que controla um módulo de interface com o utilizador e que comunicam entre si.

```
#include "mbed.h"
#include "WiflyInterface.h"
#include "HTTPClient.h"

DigitalOut led_1(LED1);
DigitalOut led_2(LED2);
DigitalOut led_3(LED3);
DigitalOut led_4(LED4);
DigitalOut pin_1(p23);

I2C i2c(p28, p27);

Serial pc(USBTX, USBRX);

WiflyInterface wifly(p13,p14,p22,p21, "mbed", "password", WPA);

HTTPClient http;
char str[512];
int i=0;

int main() {
    while(1){
        wifly.init(); // use DHCP

        led_1 = 1;
        wait(0.25);
        led_1 = 0;

        while (!wifly.connect()); // liga-se à rede

        led_2 = 1;
        wait(0.25);
        led_2 = 0;

        pc.printf("IP Address is %s\n\r", wifly.getIPAddress());

        led_3 = 1;
        wait(0.25);
        led_3 = 0;

        for (i=0; i<10; i=i+1)
        {
            pc.printf("Trying to fetch page...\n");
            int ret =
http.get("http://developer.mbed.org/media/uploads/donatien/hello.txt",
str, 512);

            if (!ret) {
                pc.printf("Page fetched successfully - read %d characters\n",
strlen(str));
                pc.printf("Result: %s\n", str);
            }
        }
    }
}
```

```

    const int addr = 0xA0;
    pin_1 = 1;

    i2c.write(addr, str, 512);
    led_4 = 1;
    wait(2);
    led_4 = 0;

    pin_1 = 0;
  }
  else {
    pc.printf("Error - ret = %d - HTTP return code = %d\n", ret,
http.getHTTPResponseCode());
  }
}

wifly.disconnect();

led_4 = 1;
wait(0.25);
led_4 = 0;
}
}

```

Este programa simplesmente liga o *Wifly* à rede sem fios definida, acede à página estipulada, neste caso uma página com “*Hello World!*” e se for bem sucedida a ligação à página, lê o seu conteúdo e envia-o por I²C para o outro módulo. “*pin_1*” é usado para causar uma interrupção no outro módulo que activa uma interrupção com o código necessário à recepção da mensagem através de I²C.

O código do módulo escravo implementa uma interface de controlo de luminosidade de um LED como referido no capítulo 4, adicionando a essa funcionalidade a recepção de uma mensagem através de I²C e o envio do conteúdo da mensagem para o ecrã LCD. A maioria do código presente neste exemplo será familiar a quem tiver consultado os capítulos 4 e 5, sendo os comentários referentes a essas porções válidos nesta implementação.

```

#include "mbed.h"
#include "NokiaLCD.h"

I2CSlave slave(p28, p27);

NokiaLCD lcd(p5, p7, p8, p9, NokiaLCD::PCF8833); // mosi, sclk, cs,
rst, type

DigitalOut led_1(LED1);
DigitalOut led_2(LED2);
DigitalOut led_3(LED3);
DigitalOut led_4(LED4);
PwmOut out_led_1(p21);
InterruptIn button1(p22);
InterruptIn button2(p23);

```



```

InterruptIn button3(p24);

InterruptIn pin_1(p25);

int i=0;
int j=0;
int r=0;
float k=0.0f;

void idle() {
    wait(0.25);
}

void display_1() {
    char str[512];
    char msg[] = "Slave!";

    slave.address(0xA0);
    while (1) {
        int l = slave.receive();
        led_1 = 1;
        wait(2);
        led_1 = 0;
        switch (l) {
            case I2CSlave::ReadAddressed:
                slave.write(msg, strlen(msg) + 1);
                led_2 = 1;
                wait(2);
                led_2 = 0;
                break;
            case I2CSlave::WriteGeneral:
                slave.read(str, 512);
                printf("Read G: %s\n", str);
                led_3 = 1;
                wait(2);
                led_3 = 0;
                break;
            case I2CSlave::WriteAddressed:
                slave.read(str, 512);
                printf("Read A: %s\n", str);
                led_4 = 1;
                wait(2);
                led_4 = 0;
                lcd.background(0x0000FF);

                lcd.cls();

                lcd.locate(0,3);

                lcd.printf("%s", str);
                wait(20);
                break;
        }
        for(int l = 0; l < 512; l++) str[l] = 0;    // Limpar buffer
    }
}

void flip_1() {
    if(i < 10)
    {
        i=i+1;
    }
}

```

```

        k=k+0.1f;    //adiciona 10% ao duty cycle actual

        r=i;
    if(i >= 8)
    {
        led_4 = 1;
        r=r-8;
    }
    if(r >= 4)
    {
        led_3 = 1;
        r=r-4;
    }
    if(r >= 2)
    {
        led_2 = 1;
        r=r-2;
    }
    if(r == 1)
    {
        led_1 = 1;
    }
    wait(2);
    led_1 = 0;
    led_2 = 0;
    led_3 = 0;
    led_4 = 0;
}

//actualiza os parâmetros para criação do PWM
out_led_1.period(0.001f); // período de 1 milissegundo
out_led_1.write(k); // duty cycle (k=1=>100%;k=0.01=>1%)
wait(0.2);
}

void flip_2() {
    if(i > 0)
    {
        i=i-1;
        k=k-0.1f;

        r=i;
    if(i >= 8)
    {
        led_4 = 1;
        r=r-8;
    }
    if(r >= 4)
    {
        led_3 = 1;
        r=r-4;
    }
    if(r >= 2)
    {
        led_2 = 1;
        r=r-2;
    }
    if(r == 1)
    {
        led_1 = 1;
    }
    wait(2);
}

```

```

        led_1 = 0;
        led_2 = 0;
        led_3 = 0;
        led_4 = 0;

    }

    //actualiza os parâmetros para criação do PWM
    out_led_1.period(0.001f); // período de 1 milissegundo
    out_led_1.write(k); // duty cycle (k=1=>100%;K0.01=>1%)
    wait(0.2);
}

void flip_3() {
    j=j+1;
    wait(1);
    if(j%2==0)
    {
        led_1 = 0;
        led_2 = 0;
        led_3 = 0;
        led_4 = 0;
        button1.rise(&idle);
        button2.rise(&idle);
    }
    else
    {
        button1.rise(&flip_1);
        button2.rise(&flip_2);
    }
    if(j==10)
    {
        j=0;
    }
}

int main() {
    pin_1.rise(&display_1);
    button3.rise(&flip_3);
    while(1) {
        wait(0.2);
    }
}

```