

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO
PORTO**



Desenvolvimento de um Sistema para Recolha de Informação em Cilindros de Rotogravura

Francisco Manuel Pinto Vieira

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Armando Luís Sousa Araújo

21 de Setembro de 2020

Resumo

A crescente necessidade de recolher informação e a preocupação com a performance dos cilindros usados em rotogravura leva à necessidade de um sistema de recolha de informação que seja capaz de armazenar a mesma por longos períodos de tempo e em tempo real. Juntamente com este sistema seria interessante ter um subsistema capaz de recolher e armazenar energia a partir do movimento rotativo do cilindro.

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar a monitorização dos cilindros, de modo a obter dados quantitativos e qualitativos que permitem caracterizar a sua utilização tendo por base o tempo de utilização, a velocidade média, o número de rotações e as quedas que este poderá sofrer. A monitorização destes parâmetros deve ser feita utilizando um sistema embutido no cilindro, sendo que este tem de ser desenvolvido de forma a minimizar a sua dimensão e o seu consumo energético. Como é pretendida uma longa autonomia para todo o sistema, pode ser necessário uma forma de carregar a bateria a partir do movimento rotacional do cilindro, posto isto será feita uma análise da possibilidade de implementação de um sistema de *energy harvesting*.

De modo a ser possível atingir os objetivos pretendidos foi desenvolvido um sistema de monitorização, que através de diferentes sensores consegue obter diferentes tipos de dados acerca do sistema. No caso do *energy harvesting* foi escolhido e implementado um sistema baseado num artigo e após terem sido realizadas algumas experiências, foi também estudada a hipótese de apenas serem utilizadas baterias para alimentar o sistema de monitorização.

Os resultados obtidos permitiram confirmar que o sistema de monitorização desenvolvido tem a capacidade de diferenciar os movimentos do cilindro entre quedas e o seu funcionamento normal. Durante este funcionamento normal o sistema regista a velocidade média de rotação, o tempo de funcionamento e o número de voltas. Todos estes valores lidos são registados num cartão de memória para mais tarde poderem ser analisados. A implementação do sistema de recolha de energia revelou ser possível carregar uma bateria de iões de lítio a partir do movimento rotacional de um cilindro de rotogravura. Contudo verificou-se que em certas situações, dependendo do espaço disponível e da autonomia pretendida, poderá vir a ser preferível utilizar apenas baterias.

Conclui-se que o sistema de monitorização, apesar de demonstrar bons resultados nos testes realizados, ainda será necessário realizar testes aplicando-o em situações reais e com testes de maior duração de modo a confirmar de forma mais rigorosa o seu funcionamento. No futuro seria também interessante o estudo de uma melhor forma para ser implementado num cilindro o *energy harvesting*.

Abstract

The growing need to collect information and the concern about the performance of rotogravure cylinders leads to the need for an information collection system that is capable of storing it for long periods and in real-time. Together with this system, it would be interesting to have a subsystem capable of collecting and storing energy from the rotating movement of the cylinder.

This dissertation has as main objective the development of a system capable of carrying out the monitoring of the cylinders, to obtain quantitative and qualitative data that allow characterizing the use based on the time of use, the average speed, the number of rotations and the falls it may experience. Monitoring these parameters should be done using a system embedded in the cylinder, which has to be developed in such a way as to minimise its size and energy consumption. As a long autonomy is intended for the whole system, it may be necessary to charge the battery from the rotational movement of the cylinder, this being said it will be analyzed the possibility of implementing a system of energy harvesting.

To be able to achieve the intended objectives, a monitoring system has been developed, which through different sensors can obtain different types of data about the system. In the case of Energy harvesting, a system based on an article was chosen and implemented, and after some experiments were carried out, the hypothesis of only using batteries to power the monitoring system was also studied.

The results obtained confirmed that the monitoring system developed can differentiate the movements of the cylinder between falls and its normal work. During this normal operation, the system records the average rotational speed, running time and number of revolutions. All these read values are recorded on a memory card so that they can be analyzed later. The implementation of the power collection system revealed that it is possible to charge a lithium-ion battery from the rotational movement of a rotogravure cylinder. However, it has been found that in certain situations, depending on the space available and the desired range, it may be preferable to use only batteries.

The conclusion is that the monitoring system, despite showing good results in the tests carried out, there still will be necessary to carry out tests applying it in real situations and with longer duration tests to confirm more rigorously its behaviour. In the future, it would also be interesting to study a better way to be implemented in a cylinder the energy harvesting.

Agradecimentos

Começo por expressar o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Armando Luís Sousa Araújo, por toda a sua ajuda e disponibilidade ao longo da minha dissertação. Agradeço também todo o apoio fornecido pelo INEGI e os seus colaboradores, a sua presença no percurso que percorri foi fulcral à realização desta dissertação.

Agradeço de seguida à minha família, à minha Mãe por sempre acreditar e me apoiar nos meus sonhos, por todo o seu amor e por toda a sua confiança em mim; Ao meu irmão por ser sem dúvida o melhor amigo que alguém pode querer e por sempre ajudar em tudo o que podia, principalmente a aliviar o stress ao longo destes 5 anos; Ao meu Avô materno pelos seus conhecimentos e por me ter ensinado a querer saber sempre mais e a querer descobrir como as coisas funcionam; À minha Avó materna por todo seu amor e carinho; E ao Manuel Francisco por sempre estar presente e por toda a sua disponibilidade e apoio.

Aos grandes amigos que fiz neste curso e nesta faculdade e aqueles que já me acompanhavam há mais tempo, agradeço todo o apoio, companheirismo, confiança, por todos os momentos vividos e por todas as memórias que tornaram estes 5 anos inesquecíveis.

A todos aqueles que de algum modo fizeram parte da minha vida no decorrer destes 5 anos.

Obrigado a todos!

Francisco Vieira

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do projeto com a referência **POCI-01-0247-FEDER-045186 – TEcH-Gravure.: Traceable, Ecological and High-Quality Gravure**, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

*“Everybody’s got their problems,
Everybody says the same thing to you.
It’s just a matter how you solve them,
And knowing how to change the things you’ve been through.”*

Deryck Whibley, SUM 41

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Energy Harvesting	5
2.2	Baterias	12
2.2.1	Baterias chumbo e ácido	12
2.2.2	Baterias a base de Níquel	13
2.2.3	Baterias a base de Lítio	15
2.2.4	Comparação dos diferentes tipos de baterias	17
2.3	Sensores, Microprocessador e Armazenamento	19
2.3.1	Sensores	19
2.3.2	Microprocessador	20
2.3.3	Armazenamento	20
3	Sistema de Monitorização	21
3.1	Escolha de componentes	21
3.1.1	Microprocessador	22
3.1.2	Unidade de medida inercial - IMU	23
3.1.3	Relógio de tempo real - RTC	25
3.1.4	Cartão de memória	27
3.1.5	Regulador de tensão	27
3.1.6	Programador	28
3.2	Software desenvolvido	28
3.2.1	RTC	29
3.2.2	IMU	31
3.2.3	Cartão de Memória	32
3.2.4	Configuração dos consumos energéticos	33
3.2.5	Ciclo principal de funcionamento	35
3.3	Esquemático e Placa	36
3.4	Testes e Resultados	37
3.5	Conclusões	41

4	<i>Energy Harvesting</i>	43
4.1	Escolha do sistema a ser implementado	43
4.2	Implementação do sistema de recolha de energia	45
4.3	Configurações das bobines	47
4.3.1	Primeira Configuração	48
4.3.2	Segunda Configuração	48
4.3.3	Terceira Configuração	49
4.3.4	Comparação das configurações	49
4.4	Testes e Resultados	51
4.5	Baterias	54
4.6	Conclusões	58
5	Conclusões e Trabalho futuro	59
A	Código desenvolvido	63
B	Esquemático	67
	Referências	69

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de um processo de rotogravura	2
2.1	Figura obtida do artigo [1] em que são comparadas as diferentes formas de recolha de energia	7
2.2	Motor DC com uma massa acoplada	8
2.3	Montagem experimental	9
2.4	Esquema do circuito final obtido	9
2.5	Prototipo do sistema desenvolvido [2]	10
2.6	Prototipo do rotor e do estator [3]	11
2.7	Prototipo final [3]	11
2.8	a) Características de carga e b) de descarga [4]	16
2.9	a) Curvas de tensão dos diferentes tipos de baterias de Li-Ion [4] e b) Comparação das características dos diferentes tipos baterias de Li-Ion [4]	17
2.10	Comparação de propriedades dos diferentes tipos baterias de Li-Ion [4]	18
2.12	Comparação gravimétrica e volumétrica da densidade energetica das baterias abordadas [4]	18
2.11	Comparação das características das baterias abordadas [4]	19
3.1	a) Esquemático para o M41T83 e b) Placa para o M41T83	26
3.2	Ciclo de inicialização fornecido na <i>Application note AN3060</i>	30
3.3	a) Código utilizado para a leitura da data e hora b) Informação obtida a partir do RTC a quando da leitura	31
3.4	Função desenvolvida para conversão dos registos do RTC	31
3.5	Modificação realizada no ficheiro "fatfs_sd.c"	32
3.6	Exemplo de escrita de um ficheiro no cartão de memória.	33
3.7	Parte da tabela 5 da <i>datasheet</i> do microprocessador STM32L073	34
3.8	Maquina de estados do ciclo principal	35
3.9	Montagem final realizada com as placas de desenvolvimento	36
3.10	a) Desenho da placa utilizando o EAGLE b) Placa final completamente montada	37
3.11	a) Modelo 3D do suporte b) Suporte imprimido e aplicado	38
3.12	Registos do cartão de memória relativos a quedas	40
3.13	Sistema de monitorização montado num rolo de rotogravura	40
4.1	a) Distribuição utilizada - Halbach Array [2] e b) Modelo 3D realizado para criação do conjunto de ímanes	46

4.2	Modelo 3D realizado para a criação do conjunto das bobines	47
4.3	Gráfico da variação potência obtida na primeira configuração	50
4.4	Gráfico da variação potencia obtida na segunda configuração	50
4.5	Gráfico da variação potência obtida na terceira configuração	51
4.6	Bobines e circuito utilizado para o controlo da recolha de energia	52
4.7	Medição registada durante o carregamento de uma bateria de iões de lítio utilizando o <i>energy harvesting</i>	53
4.8	Montagem final do sistema de <i>energy harvesting</i>	53
4.9	a) RJD3555, b) MIKROE-1120 e c) INR18650MJ1	55
A.1	Código desenvolvido para inicialização do RTC	63
A.2	Configuração da IMU	64
A.5	Função utilizada para a configuração do modo funcionamento normal . . .	64
A.3	Função utilizada para a configuração do modo <i>Low Power Run</i>	65
A.4	Função utilizada para a configuração do relógio para o modo <i>Low Power Run</i>	65
B.1	Montagem final realizada com as placas de desenvolvimento	68

Lista de Tabelas

3.1	Características de diferentes IMU	25
3.2	Consumos medidos do sistema desenvolvido	37
3.3	Testes realizados com recurso a um berbequim	39
3.4	Testes realizados com o sistema acoplado a um rolo de rotogravura numa maquina de rotação constante	40
4.1	Resistência das bobines utilizadas	48
4.2	Resultados obtidos utilizando diferentes cargas resistivas na primeira con- figuração	49
4.3	Resultados obtidos utilizando diferentes cargas resistivas na segunda con- figuração	50
4.4	Resultados obtidos utilizando diferentes cargas resistivas na terceira con- figuração	51
4.5	Capacidades necessárias em mAh para diferentes autonomias do sistema .	54
4.6	Comparação de possíveis baterias para o exemplo proposto	56

Abreviaturas e Símbolos

MEMS	<i>Micro-electro-mechanical Systems</i>
RPM	Rotações Por Minuto
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LDO	<i>Low-Dropout regulator</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
EMF	<i>Electromagnetic Field</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A rotogravura é um processo de impressão por entalhe em que o papel é pressionado entre dois cilindros, contendo um deles as ranhuras correspondentes à imagem que se pretende imprimir.

O processo de impressão é bastante rápido e cíclico. Durante este processo o cilindro gravado é parcialmente imerso na bandeja de tinta, onde são preenchidas as ranhuras do mesmo. O excesso de tinta é expelido para a superfície à medida que este gira, e ainda com a ajuda de um lâmina que limpa o mesmo antes de entrar em contacto com o papel. Deste modo, restam só as ranhuras com a quantidade necessária de tinta.

Em seguida, o substrato (material no qual se pretende imprimir, geralmente papel ou derivados) fica prensado entre o rolo de impressão e o cilindro de rotogravura, nesta fase a tinta é transferida das ranhuras para o papel. O objetivo do rolo de impressão é aplicar força, garantindo que todo o substrato entra em contacto com o cilindro de rotogravura, o que, por sua vez, garante uma cobertura uniforme. Na Figura 1.1 é possível observar um exemplo de um processo de rotogravura.

Por fim, o substrato com tinta passa por um secador, pois tem de estar completamente seco antes de passar para a próxima unidade de cor onde será depositada outra camada de tinta. Uma impressora de rotogravura possui uma unidade de impressão que depende da cor, geralmente CMYK que equivale a ciano, magenta, amarelo e preto (denominado por key nestas unidades), o número de unidades varia de acordo com as cores necessárias para produzir a imagem final.

Os cilindros de rotogravura são geralmente feitos de aço e revestidos com cobre, podendo também ser utilizados outros materiais, como por exemplo cerâmica. O padrão desejado pode ser obtido por gravação via laser, através de uma ferramenta de diamante

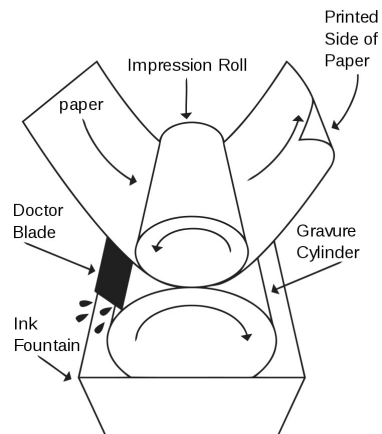


Figura 1.1: Exemplo de um processo de rotogravura

ou por gravação química. Após este processo o cilindro é testado, retrabalhado se necessário, e depois cromado.

Nos dias de hoje, o processo de rotogravura é usado para impressão comercial, de embalagens de papel, entre outros produtos. Normalmente é usado em impressões de grandes quantidades, pois trata-se de um processo dispendioso. Para cada impressão é necessário serem gravados vários cilindros para as diversas cores da imagem. O facto destes serem dispendiosos e muito específicos leva a que as empresas que os fabricam tenham de dar garantia de que o cilindro irá efetuar a sua função perfeitamente em milhões de cópias. No entanto para esta garantia ser válida este tem de ser corretamente usado e não pode ser danificado por quem o adquiriu.

As empresas produtoras de cilindros de rotogravura pretendem ter uma forma de os monitorizar, de modo a ser possível determinar se este terá sido devidamente utilizado e dentro dos conformes pela empresa estipulados.

1.2 Motivação

A crescente necessidade de recolher informação e a preocupação com a performance dos cilindros usados em rotogravura levou a que seja essencial desenvolver um sistema de recolha de informação que seja capaz de armazenar a informação por longos períodos de tempo, superiores a 5 anos, e em tempo real.

Juntamente com este sistema surge o interesse em ser também implementado um sub-sistema capaz de recolher e armazenar energia a partir do movimento rotativo do cilindro, ou seja, *energy harvesting*.

Por fim todo o sistema terá de ser desenvolvido de forma a minimizar o consumo de energia e a sua dimensão.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é conseguir a monitorização dos cilindros, de modo a obter dados quantitativos e qualitativos que permitam caracterizar a sua utilização, sendo estes:

- Tempo de utilização;
- Velocidade média;
- Numero de rotações;
- Quedas.

A monitorização destes parâmetros será feita utilizando sensores embutidos nos cilindros, que terão de ser escolhidos de modo a ser possível obter todas as medições pretendidas, tendo em consideração as suas características, para no fim obter um sistema eficiente. Para ser possível analisar, processar e guardar os dados obtidos a partir destes sensores, será necessário utilizar um microprocessador. A escolha deste será feita em função da sua capacidade de processamento, consumo energético e capacidade de comunicação com os sensores.

A informação obtida pelos sensores tem de ser guardada durante longos períodos de tempo e de forma segura, para que seja possível ser feita uma análise dos seus valores. Todo este circuito terá de ser alimentado, para tal será utilizada uma bateria. Como é pretendida uma longa autonomia para todo o sistema, é necessária uma forma de carregar a bateria a partir do movimento rotacional do cilindro, posto isto será feita uma análise da possibilidade de implementação de um sistema de *Energy Harvesting*.

Desta forma, esta dissertação tem como objetivo o estudo, projeto, desenvolvimento, montagem e teste de um sistema capaz de superar estes desafios.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre sistemas de *energy harvesting*, tipos de baterias e também dos componentes necessários ao desenvolvimento do sistema de monitorização. No Capítulo 3 é apresentado o sistema de monitorização, sendo que é realizada a especificação

do *hardware* escolhido e a análise do *software* desenvolvido, por fim são expostos os resultados obtidos. No Capítulo 4 é descrito o *Energy Harvesting*, escolhida a metodologia a utilizar, nomeadamente, o seu dimensionamento, construção e resultados, é ainda realizada uma análise das baterias que podem vir a ser utilizadas em diferentes situações. Por fim é apresentado o Capítulo 5 onde são tiradas conclusões relativamente ao trabalho realizado e são deixadas sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Energy Harvesting

Ao longo dos anos, tem-se vindo a verificar um aumento do carregamento de baterias para sensores wireless através da utilização de diferentes métodos de energy harvesting. Este tema atrai cada vez mais a atenção dos investigadores e, atualmente, há cada vez mais situações em que a utilização de energy harvesting é essencial. Por norma movimentos, vibrações e diferenças de temperatura são suficientes para serem usados como fontes de energia e como tal foram desenvolvidos diversos dispositivos para os explorar. [1]

Em 2005, Joseph Paradiso e Thad Starner, abordaram diversas formas de recolher energia utilizando múltiplos métodos [1]. Sendo que se destacam os seguintes:

- **Conversão termoeétrica:**

Objetos ou ambientes a diferentes temperaturas oferecem a oportunidade para recolher energia através da transferência de calor. Os gradientes de temperatura limitam a quantidade de energia que pode ser obtida por este método, tal que geradores termo-elétricos conseguem gerar uma quantidade significativa de energia a partir de fontes de alta temperatura. No entanto fica muito mais limitado quando os gradientes são menores.

Este género de conversão tem como aplicação por exemplo o relógio Seiko Thermic wristwatch no qual 10 módulos termo-elétricos são usados para gerar micro-watts com base no gradiente entre o corpo e o meio ambiente [5]. Estes sistemas tipicamente são dimensionados com uma bateria para armazenar a energia extra gerada em períodos de maior gradiente térmico [6].

- **Vibrações:**

Existem há muitos anos sistemas capazes de obter energia a partir da oscilação de uma massa devidamente calibrada para uma determinada frequência e amplitude de vibração. Uma aplicação muito usada, baseada neste método, são os relógios auto-alimentados, nos quais os movimentos do dia-a-dia fazem uma massa, presente no seu interior, vibrar e gerar energia.

De forma semelhante, existem também as lanternas alimentadas por agitação, em que uma massa magnética ao ser agitada atravessa uma bobine, o que permite carregar uma bateria que armazena energia para o sistema [7].

Nos últimos anos tem se vindo a verificar um aumento no desenvolvimento destes geradores à escala dos sistemas micro eletromecânicos (MEMS), estes tendem a explorar as vibrações no intervalo de 50 Hz a 5 kHz, que induzem normalmente oscilações mecânicas de 0,5 mm a 1 mm, produzindo desde décimas de micro-watts ate miliwatts (sendo este o caso das estruturas maiores) [8].

Outra forma de obter energia a partir das vibrações é através da utilização de geradores baseados em materiais piezoelétricos. Quando acoplados a estruturas como pontes, edifícios, aviões, etc. conseguem energia suficiente para alimentar sistemas de monitorização, isto é possível devido ao facto destas estruturas terem vibrações de grande amplitude comparativamente às anteriores referidas [9].

- **Energia gerada a partir da interação humana**

A utilização da contribuição direta do utilizador para gerar energia para o dispositivo que pretende usar é das formas mais simples de recolha de energia. Por exemplo, nos casos em que se tem de dar a manivela, agitar, apertar, girar, empurrar, bombear ou puxar alguma parte do dispositivo para gerar energia. Geradores magnéticos de manivela para alimentar lanternas e rádios já é algo proveniente do século XX [10].

Outra forma é recolher energia a partir da caminhada de uma pessoa. Diversas formas já foram desenvolvidas inicialmente utilizando geradores mecânicos, posteriormente piezoelétricos [11] e numa tentativa mais recente utilizando propriedades elásticas de uma membrana aplicada no calcanhar [12]. O principal foco do desenvolvimento de sapatos capazes de gerar energia é possibilitar a alimentação de órgãos artificiais [13].

Na figura 2.1 é possível observar a comparação dos diferentes métodos de recolha de energia abordados em [1].

Energy-harvesting opportunities and demonstrated capabilities.		
Energy source	Performance ^A	Notes
Ambient radio frequency	< 1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Unless near a transmitter ³
Ambient light	100 mW/cm^2 (directed toward bright sun) 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (illuminated office)	Common polycrystalline solar cells are 16%–17% efficient, while standard monocrystalline cells approach 20%. Although the numbers at left could vary widely with a given environment's light level, they're typical for the garden-variety solar cell Radio Shack sells (part 276-124).
Thermoelectric	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Quoted for a Thermo Life generator at $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ ^B ; typical thermoelectric generators $\leq 1\%$ efficient for $\Delta T < 40^\circ\text{C}$. ⁶
Vibrational microgenerators	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (human motion—Hz) 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (machines—kHz)	Predictions for 1 cm^3 generators. ⁹ Highly dependent on excitation (power tends to be proportional to ω^3 and y_0^2 , where ω is the driving frequency and y_0 is the input displacement), and larger structures can achieve higher power densities. The shake-driven flashlight of Figure 3, for example, delivers 2 mW/cm^3 at 3 Hz.
Ambient airflow	1 mW/cm^2	Demonstrated in microelectromechanical turbine at 30 liters/min. ²⁹
Push buttons	50 $\mu\text{J}/\text{N}$	Quoted at 3 V DC for the MIT Media Lab Device. ²⁰
Hand generators	30 W/kg	Quoted for Nissho Engineering's Tug Power (vs. 1.3 W/kg for a shake-driven flashlight). ²
Heel strike	7 W potentially available (1 cm deflection at 70 kg per 1 Hz walk)	Demonstrated systems: 800 mW with dielectric elastomer heel, ²⁶ 250–700 mW with hydraulic piezoelectric actuator shoes, ²⁴ 10 mW with piezoelectric insole. ²⁵

^AThese numbers depend heavily on the ambient excitation and harvesting technologies. By comparison, lithium-ion batteries can yield up to 0.52 W-hr./cm³ (0.18 W-hr./g), and the Toshiba DMFC (direct methanol mini fuel cell) achieves 0.27 W-hr./cm³. The theoretical energy available from methanol is 4.8 W-hr./cm³ (6.1 W-hr./g).

^BQuoted by Ingo Stark of Applied Digital Solutions' Thermo Life Energy Corp.

Figura 2.1: Figura obtida do artigo [1] em que são comparadas as diferentes formas de recolha de energia

A maioria dos dispositivos de recolha de energia a partir do movimento são inerciais, isto é, obtém energia a partir da oscilação relativa entre um peso e a estrutura em que este está colocado. A energia pode ser obtida utilizando bobines e ímanes ou através da utilização de um mecanismo de transdução, normalmente piezoelétrico, que amortece o movimento do peso interno extraindo assim energia. Existem também dispositivos que usam o movimento rotacional de uma massa que já foi demonstrado serem funcionais, mas que também dependem das oscilações da fonte do movimento. [8]

Todos estes dispositivos são dependentes de acelerações obtidas a partir de oscilações e vibrações ou de uma inércia linear ou rotacional para obter forças internas que possibilitam gerar energia. Sendo este tipo de geradores classificados como inerciais.

No entanto, para aplicações como sensores de pressão dos pneus e monitorização do estado de certos tipos de maquinaria em que a estrutura está em rotação contínua, os coletores de energia referidos anteriormente não são suficientemente eficientes. O caso proposto nesta dissertação encontra-se incluído nesta última situação sendo que o movimento presente nos rolos é rotacional e idealmente não deveriam existir nenhuma vibrações significativas nos mesmos.

Nas situações em que apenas é possível utilizar um movimento contínuo, cuja aceleração tem baixa variação, existe a possibilidade de utilizar a aceleração gravitacional para aplicar uma contra força em vez de ser usada a inércia. Em 2007, Tsern Toh, Paul Mitcheson e Eric Yeatman abordam e demonstram este conceito [14, 15]. A demonstração é baseada na utilização de um motor DC como gerador, para tal começam por fazer um modelo em que o motor é uma fonte DC com uma certa resistência interna e uma carga acoplada. Aplicando as leis de Kirchhoff chegam à conclusão que, para ser obtida a máxima potência elétrica, é necessário que a resistência da carga seja igual à resistência interna do motor.

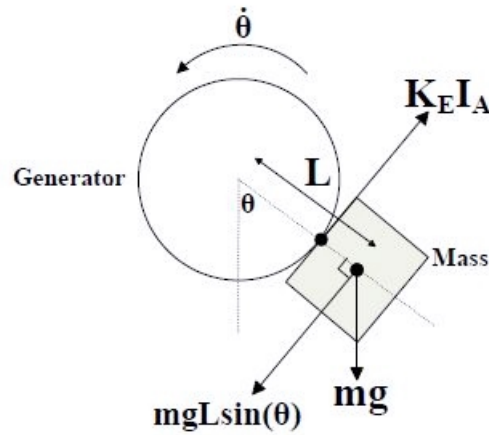


Figura 2.2: Motor DC com uma massa acoplada

O binário gerado pelo motor é $T_{gen} = K_E \cdot I_A$. Convencionalmente, o contra binário é obtido segurando o corpo do gerador a uma estrutura fixa, enquanto que o rotor do gerador é acoplado a uma fonte de rotação caso contrário ele gira sobre si mesmo. No entanto, a solução proposta para gerar um contra binário é acoplado uma massa ao corpo do motor, assim é possível obter binário gravitacional, tal que $T_m = m \cdot g \cdot L \cdot \sin(\theta)$ em que m é a respetiva massa do contrapeso, g a aceleração gravítica e θ o ângulo de deflexão. Isto leva a seguinte expressão do net torque:

$$Net\ Torque = I_M \cdot \theta'' = K_E \cdot I_A - m \cdot g \cdot L \cdot \sin(\theta)$$

Sendo I_M o momento de inércia do gerador, o net torque determina se a massa irá continuar a mover-se até um ponto em que θ ultrapassa os 90° o que equivale ao gerador rodar sobre si mesmo. Se for conseguido manter θ numa posição de equilíbrio de 90° , será possível gerar a máxima corrente I_A , o que permite extrair a máxima potência a partir do gerador.

Utilizando a montagem experimental da Figura 2.3, testaram o conceito proposto anteriormente e concluiu-se que de facto a potência é máxima quando a resistência de carga

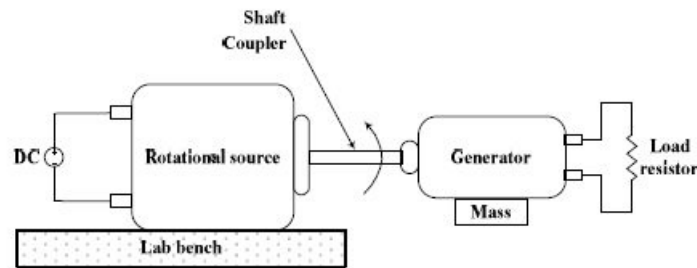


Figura 2.3: Montagem experimental

é igual à resistência interna do motor. Concluíram também que a partir de uma certa velocidade rotação, para essa mesma resistência, não se consegue obter a máxima potência pois leva o motor a rodar sobre si mesmo.

Por fim, foi utilizado um conversor SMPS boost para se conseguir ter a resistência ideal aos terminais do gerador, isto é possível variando o duty cycle com base na tensão de entrada do conversor e na corrente de saída necessária de modo a obter a resistência de entrada do conversor pretendida. Para obter uma tensão estável 5 V foi utilizado um condensador e um conversor buck na saída do boost. Na Figura 2.4 pode ser observado o circuito final. Utilizando o SPICE os resultados obtidos foram satisfatórios.

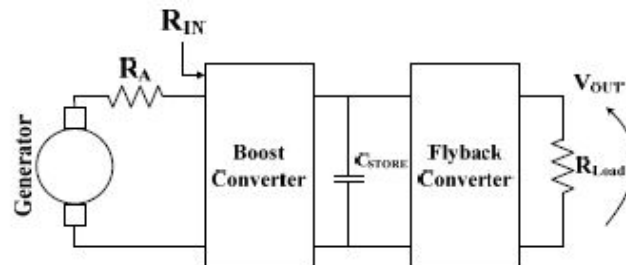


Figura 2.4: Esquema do circuito final obtido

No segundo trabalho referido [15], as principais diferenças são a utilização de um conversor Flyback em vez do conversor buck e a análise da performance do gerador quando colocado fora de eixo.

As principais desvantagens do gerador ser colocado fora de eixo são:

- A potência tende a diminuir à medida que a distância ao centro aumenta;
- A velocidade de rotação, a partir da qual a potência começa a diminuir, diminui com o aumento da distância ao centro;
- O sistema pode atingir o desequilíbrio muito mais rapidamente do que é esperado comparativamente a situação em que o motor está alinhado com o eixo de rotação.

A potencia máxima obtida nas simulações foi de cerca de 1 watt, sendo a velocidade de rotação cerca de 3000 RPM.

Em 2012, Yu-Jen Wang, Sheng-Chih Shen and Chung-De Chen desenvolveram um novo método de recolha de energia orientado a sensorização da pressão dos pneus dos automóveis [2].

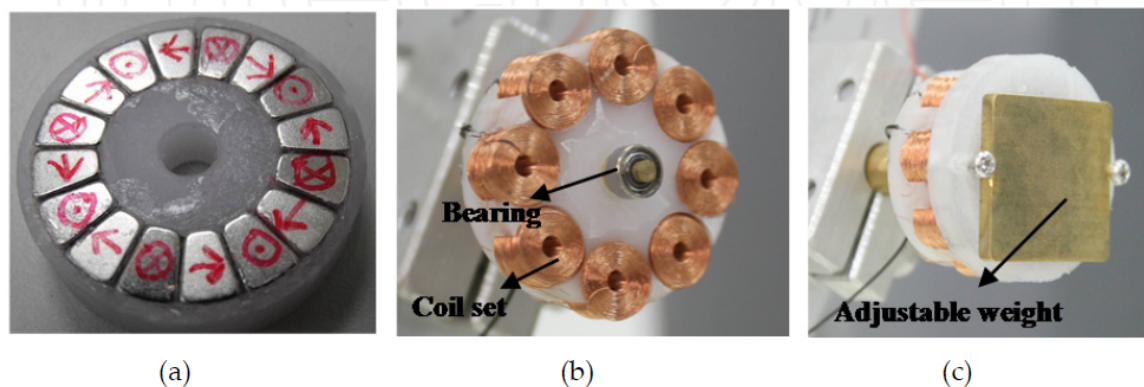
A procura de novos métodos de recolha de energia para a monitorização da pressão dos pneus tem crescido nos últimos anos, sobretudo porque a utilização de baterias tem a sua limitação e é pretendido diminuir o seu uso.

A necessidade de ser usado um sistema de recolha de energia com frequência ajustável é devido ao facto das rodas dos veículos não rodarem sempre a mesma velocidade. O principio de funcionamento deste sistema é baseado num pêndulo devidamente calibrado para a sua frequência de oscilação ser ajustada consoante a velocidade de rotação do pneu.

O movimento gerado pelo pêndulo, que está acoplado a um conjunto de ímanes, faz variar o campo magnético que permite induzir uma tensão num conjunto de bobinas que estão colocadas paralelamente aos ímanes.

Para ser aumentado o fluxo magnético gerado pelos ímanes estes foram colocados numa configuração circular Halbach, este aumento do fluxo magnético resulta numa maior potencia a partir do sistema.

Utilizando uma resistência externa calculada, para ser obtida a máxima potencia, foi conseguido obter 300-550 micro-Watts com 200-500 RPM. O que no caso dos sensores de pressão de pneus é o suficiente.



Prototype of the energy harvester. (a) Rear view of the rotor with the circular Halbach array magnetic disk. (b) Front view of the stator. (c) The energy harvester mounted on the rotation plate.

Figura 2.5: Prototipo do sistema desenvolvido [2]

Em 2015, Dragan Dinulovic, Michael Brooks, Martin Haug e Tomislav Petrovic desenvolveram um sistema inovador de recolha de energia a partir do movimento rotacional [3]. Todo o sistema de recolha de energia é modular e constituído por 3 módulos sendo

estes o mecanismo de conversão de movimento, a parte eletromagnética de recolha de energia e o sistema de controlo da potencia com transmissão RF. O objetivo final consistia em ter um botão que, ao ser pressionado, faria girar um conjunto magnético sobre uma bobine e desta forma seria induzida uma tensão na mesma que por sua vez é regulada pelo sistema de controlo.

O sistema de recolha de energia é composto por duas partes: o rotor e o estator. O rotor consiste em oito ímanes multipolares, de NdFeB, montados sobre um metal magnético (liga de cobalto) que permite uma alta saturação do fluxo magnético. O estator é constituído por uma bobine dividida em oito enrolamentos de duas fases embutidos numa PCB de dez camadas. Ambas as partes foram montadas no mesmo eixo com um pequeno espaço entre elas.

Os ímanes tinham um diâmetro externo de 40mm e um diâmetro interno de 15mm, da mesma forma para ser obtida a máxima performance as bobines foram desenhadas na PCB para ocupar a mesma área que os ímanes.



(a)



(b)

Magnetic system: Coil system - stator (a) and rotor (back iron with PM segments) (b)

Figura 2.6: Prototipo do rotor e do estator [3]

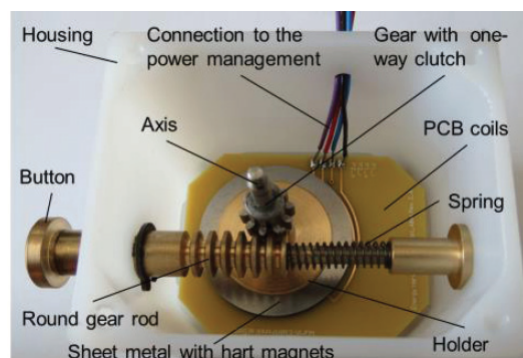


Figura 2.7: Prototipo final [3]

Nas Figuras 2.6 e 2.7 podemos observar o protótipo desenvolvido. Os resultados obtidos mostraram um pico tensão de 2 V com duração de 1 segundo em circuito aberto e a corrente máxima de pico foi de 800mA com duração de 600ms em circuito fechado.

Como este sistema foi desenhado para funcionar com impulsos mecânicos em vez de um movimento contínuo de rotação, não é possível ter uma boa noção da potência gerada pelo mesmo num movimento contínuo, mas é referido que o protótipo é capaz de gerar 4mJ de energia.

2.2 Baterias

Uma bateria é um dispositivo que transforma a energia resultante de uma reação química em corrente elétrica, podendo ser composta por uma ou mais células. Cada bateria tem um terminal positivo, o cátodo, e um negativo, o ânodo, este ultimo é a fonte de eletrões que fluem pelo circuito elétrico até ao terminal positivo. Estes eletrões são provenientes da reação química de oxidação e redução que ocorre entre os diferentes componentes químicos da bateria [16].

Existem dois géneros principais de baterias: as primárias, ou descartáveis, e as secundárias, ou recarregáveis. As primárias são aquelas cujos materiais que as compõem são modificados de maneira irreversível durante o processo de descarregamento da bateria, a bateria alcalina é um exemplo comum e é vendida em diferentes formatos standardizados para o público geral. Por outro lado, as baterias secundárias podem ser carregadas e descarregadas múltiplas vezes, pois aplicando uma corrente inversa é possível repor a composição original dos seus eletrões. Este género de baterias pode ser encontrado em diferentes dispositivos do nosso dia-a-dia tais como, nos telemóveis, portáteis, veículos (não só elétricos mas também de combustão), relógios, etc.

As baterias recarregáveis são as que revelam um maior interesse para a nossa aplicação. Dentro destas existem diversos tipos que podem ser aplicadas tais como as de chumbo-ácido, Níquel e Lítio. Para a escolha de uma bateria tem que se ter em consideração sete fatores importantes: longevidade, segurança, densidade de potencia(W/Kg), custo, densidade energética(Wh/Kg), capacidade energética (Ah) e tensão por célula [17].

2.2.1 Baterias chumbo e ácido

As baterias de chumbo e ácido foram das primeiras as surgir, possuem uma densidade energética de 30-50 Wh/KG e uma tensão por célula de 2 volts e são normalmente usadas para ligar e alimentar sistemas de controlo de motores de combustão interna e também em UPS - Uninterrupted Power Supply. Tem uma classificação máxima para a corrente

de descarga de 3 C, sendo que C corresponde a capacidade em Ah da bateria. Apresentam como vantagens a baixa auto-descarga, a alta tolerância a variações de temperatura durante a carga e descarga e o baixo custo. Por outro lado têm como desvantagens a baixa densidade energética, o tempo de vida limitado e a duração elevada de carregamento [17].

2.2.1.1 Método de carregamento

O carregamento mais comum deste tipo de baterias é realizado em 3 estágios diferentes, primeiro é aplicada uma corrente constante, cerca de 10-30% da capacidade da bateria, com isto a tensão da bateria sobe até a um valor predeterminado, este estágio dura cerca de 5 horas e carrega até cerca de 70% da sua capacidade. No segundo estágio é carregada com uma tensão constante e a corrente vai diminuindo até atingir cerca de 3% da sua capacidade. dando-se este estágio como concluído, sendo que a sua duração de cerca de 5 horas e é muito importante para a manutenção do bom funcionamento da bateria. O ultimo estágio é usado para compensar pelo o auto descarregamento e tende a manter a tensão por célula a cerca de 2,25 V.

Para ser verificado o estado da carga da bateria esta tem que estar em repouso 4 a 8 horas após o carregamento, depois disto basta medir a tensão aos terminais em circuito aberto, num caso mais comum por exemplo se a bateria de um carro apresentar uma tensão de 12,65 V significa que está completamente carregada, por outro lado uma tensão inferior a 11,89 V significa que está descarregada [18].

2.2.2 Baterias a base de Níquel

As baterias de Nickel-Metal hydride (NiMH) têm vindo a ser usadas em diversas aplicações desde os anos 2000 por serem seguras e monetariamente acessíveis. No entanto, apresentam algumas desvantagens comparativamente a novas tecnologias pois possuem uma elevada taxa de auto descarregamento, baixa tensão por célula e efeito de memória. Este efeito que também pode ser observado nas baterias nickel cadmium (NiCd) é causado por uma má utilização da bateria, tanto em termos de descarga como carga, o que leva a bateria a diminuir a sua capacidade. As baterias NiMH tem um tempo de carga rápido de 1-2 horas e um tempo de carga lento de até 15 horas. Apresentam uma taxa máxima de descarregamento de 10 C.

As baterias NiCd apesar de apresentarem menor custo por ciclo e também um maior ciclo de vida (cerca de 2000 ciclos) que as NiMH têm grandes desvantagens como a necessidade de um processo de reciclagem complexo e um maior efeito de memória. Estas desvantagens levaram a que as baterias de NiCd fossem substituídas por NiMH ou por outras à base de lítio [17].

Comparando as NiMH com as NiCd, as primeiras apresentam cerca de 30 a 40% maior capacidade no entanto apresentam um algoritmo de carga mais complexo [18].

2.2.2.1 Método de carregamento

A longevidade deste tipo de baterias é muito dependente da qualidade do carregador isto porque, durante o processo de carregamento não podem ser atingidas altas temperaturas pois corre o risco de diminuir a sua vida útil. Existem vários tipos de carregadores com tempos de carga que vão desde apenas uma hora até cerca de quinze horas. Por norma os mais lentos são projetados para aplicações de menor importância e para consumíveis comuns, enquanto que os mais rápidos são aplicados em ambientes industriais, instrumentos médicos e ferramentas portáteis.

Nickel-Cadmium

Nos primeiros 70% de carga, a bateria tende a manter-se fria, sendo capaz de aceitar toda a carga fornecida, assim é possível utilizar uma corrente mais elevada. Carregadores rápidos utilizam este fenómeno para carregar a bateria até aos 70% o mais rápido possível, a partir deste ponto a passa a ser mais difícil fornecer carga devido ao facto da pressão e da temperatura no seu interior aumentar. Desta forma passa-se a usar uma corrente de carga menor e tem de ser aplicada com intervalos de descanso para a deixar baixar a temperatura. No final do carregamento, a bateria é mantida num estado de carga lento para combater o seu auto-consumo, esta compensação é feita utilizando um carregamento de 0.05 C a 0.1 C. Com a queda de tensão, a taxa de aumento de temperatura e a temperatura total é possível saber se esta se encontra totalmente carregada. [18]

Nickel-Metal-Hydride

Os carregadores para este tipo de baterias tendem a ser mais complexos, isto devido a estas terem uma pequena queda de tensão quando completamente carregadas e também porque não existe uma variação negativa da tensão quando carregadas para correntes de carga inferiores a 0.5C e temperaturas elevadas. Todos estes fatores fazem com que detetar a carga completa seja difícil.

Posto isto, tem que ser usado um carregador rápido e, devido à fraca absorção de sobrecarga no estágio de carregamento final, deve ser usada uma corrente de, geralmente, 0,05 C. Aplicar carregadores lentos nesta situação é relativamente difícil de implementar pois as variações de tensão e temperatura são difíceis de detetar e, para fazer face a este problema, normalmente estes carregadores são baseados em temporizadores. No entanto esta solução não se revela muito vantajosa pois caso seja colocada à carga uma bateria que não se encontra totalmente descarregada, esta irá ser sujeita a um ciclo de carga demasiado longo, o que poderá levar a danificação da mesma.

Um carregador bem desenhado é um dispositivo complexo e a utilização de carregadores menos sofisticados pode levar a rápida danificação das baterias sendo que os complexos apesar de mais dispendiosos compensam pelo dano que não provocam às baterias [18].

2.2.3 Baterias a base de Lítio

Baterias de iões de lítio, também conhecidas como Li-Ion, são constituídas por dois eléctrodos o ânodo e o cátodo, entre estes encontra-se um separador com um eletrólito onde os iões de lítio se movem do cátodo para o ânodo durante o carregamento e vice-versa durante o descarregamento. Comparando com as baterias não recarregáveis de lítio, que contêm lítio metálico, as baterias recarregáveis de li-ion utilizam um composto à base de lítio [19].

Ao contrário das baterias de ácido e chumbo que são muito pesadas, as baterias de li-ion tem vindo a ser cada vez mais usadas em dispositivos portáteis pois tem uma alta densidade energética e são consideravelmente mais leves. [20]

Apesar das baterias de li-ion terem as melhores propriedades, estas necessitam de elevadas condições para teste e proteção durante o processo de fabrico e uso devido ao facto de o eletrólito ser inflamável.[4]

2.2.3.1 Características das baterias Li-Ion

Os aspetos positivos deste tipo de baterias são a sua alta densidade energética (230 Wh/Kg), a densidade de potencia(12 KW/Kg), quantidade de ciclos de vida (500-2000), grande capacidade por célula e processos de carga e descarga eficientes.

Os aspetos negativos mais comuns são a necessidade de circuitos protetores para monitorizar a bateria durante a sua carga e descarga, emissões nocivas durante o processo de fabrico, as dificuldades na sua reciclagem e o facto de, em caso de má utilização ou falha circuitos de proteção, estas poderem inflamar e libertar gases nocivos [21, 22]. Em termos de carga e descarga as baterias de Li-Ion apresentam também boas características como é possível observar na Figura 2.8.

Durante o processo de carregamento, a carga da bateria aumenta gradualmente consoante vai aumentando a tensão mantendo uma corrente constante. Quando a tensão atinge o seu máximo, a corrente diminui exponencialmente. Por outro lado, durante o processo de descarregamento a tensão e a corrente são mantidas constantes durante quase todo o processo, até que chega um ponto em que a tensão diminui ligeiramente e há um aumento ligeiro na corrente fornecida que se mantém até a bateria atingir o seu mínimo aceitável, que é definido pelo fabricante com uma tensão mínima possível para a bateria. [4]

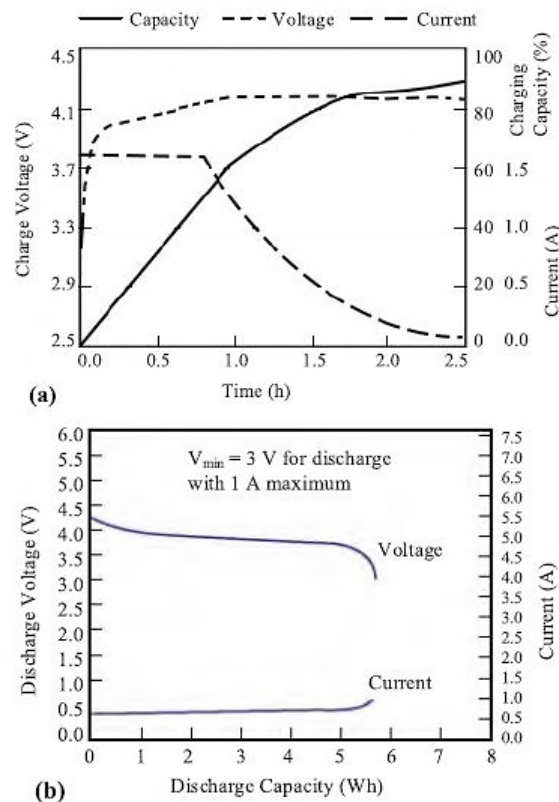


Figura 2.8: a) Características de carga e b) de descarga [4]

2.2.3.2 Tipos de baterias Li-Ion

Por norma, a principal fonte de íões de lítio numa bateria é o elétrodo positivo ou cátodo e, para isso ser possível, grandes quantidades de lítio estão embutidas. De notar que também o material eletrolítico é composto por íões de lítio para haver uma condutividade e boa eficiência.

O material que compõe o cátodo, para além de lítio, também tem na sua composição diferentes materiais que permitem ter diferentes baterias com diferentes características. [23]

Os principais tipos de baterias de lítio são:

- lithium cobalt oxide (LiCoO_2);
- lithium manganese oxide (LiMn_2O_4);
- lithium iron phosphate (LiFePO_4);
- lithium nickel-manganese-cobalt oxide (LiNiMnCoO_2);
- lithium nickel cobalt aluminium oxide (LiNiCoAlO_2);

- lithium titanate ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$).

Como podemos observar na Figura 2.9.a), para diferentes materiais usados nos elétrodos são obtidas diferentes tensões de operação. [24] Na Figura 2.9.b)   possível verificar a comparação das vantagens, desvantagens e aplicações dos diferentes tipos de baterias de Li-Ion. Na Figura 2.10 as mesmas são comparadas em termos de densidade energética, densidade da potência, segurança, performance, tempo de vida/ciclos, custo, energia e potência específica.

De uma forma muito superficial pode ser concluído que a bateria lithium titanate é a melhor em termos de segurança, performance e ciclos de vida mas é pobre em termos de capacidade e potência. A lithium nickel manganese/cobalt tem propriedades moderadas e as restantes têm características m dias a baixas comparativamente [4].

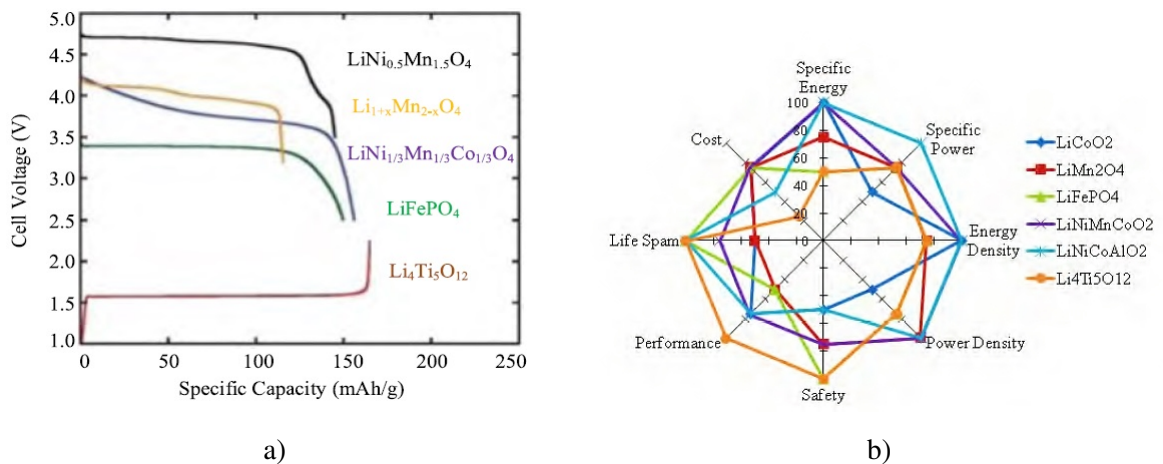


Figura 2.9: a) Curvas de tensão dos diferentes tipos de baterias de Li-Ion [4] e b) Compar  o das características dos diferentes tipos baterias de Li-Ion [4]

2.2.4 Comparação dos diferentes tipos de baterias

Analisando a Figura 2.11 e 2.12 conclui-se que as baterias Li-Ion são superiores em termos de eficiência energética e densidade de potência o que permite serem obtidas baterias mais pequenas e mais leves. Outras vantagens são a operação num grande leque de temperaturas, capacidade de carregamento rápido, longos ciclos de vida e baixo auto-consumo. Devido a terem estas características lucrativas e ao facto desta tecnologia estar em constante inovação, as baterias Li-Ion tem vindo a dominar o mercado e tem sido aplicadas em todo o espectro da indústria. [25] [4]

Types of Li-ion Batteries	Advantage	Disadvantage	Applications
LiCoO ₂	High specific energy	Short life span and limited load capacity, and safety.	Cell phones; laptops and digital cameras
LiMn ₂ O ₄	Specific power, safety and life span	Moderate in overall performance.	EVs, HEVs, medical.
LiFePO ₄	Good thermal stability, tolerant to abuse, high current rating, excellent safety and long life span;	Moderate specific energy; lower voltage than other lithium-based batteries; cold temperature reduces performance	EVs; power tools and portable devices.
LiNiMnCoO ₂	Good overall performance and excels on specific energy	High Cost	Power tools, electric vehicles and energy storages.
LiNiCoAlO ₂	High energy and power densities, good life span	High cost and marginal safety	Electric vehicles and power trains.
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Temperature range (-30-55°C) and recharge efficiency 98%, life cycles: > 3000-7000 cycles, high safety and stability, quicker to charge, charged at rate > 10 ⁰ C.	Small voltage (2.4V/cell), low energy density, difficult to manufacture	Advanced nano-technology applications.

Figura 2.10: Comparação de propriedades dos diferentes tipos baterias de Li-Ion [4]

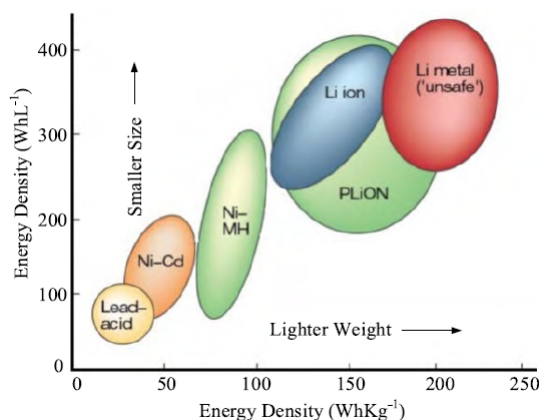


Figura 2.12: Comparação gravimétrica e volumétrica da densidade energetica das baterias abordadas [4]

Tendo em conta o estudo feito e as comparações obtidas conclui-se que as baterias à base de iões de lítio são as que demonstram melhores características para a aplicação pretendida, sendo que se pretende ter um sistema com um grande tempo de utilização e que a bateria seja carregada com base num sistema de recolha de energia que não é capaz

Battery Type	Lead-acid	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Energy Density(Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Power Density	180	150	250-1000	1800
Nominal Voltage	2V	1.25V	1.25V	3.6V
Operating Temperature	-20-60°C	-40-60°C	-20-60°C	-20-60°C
Cycle Live	200-300	1500	300-500	500-1000
Charge Efficiency %	79	-	-	100
Energy Efficiency %	70	60-90	75	80
Voltage Efficiency %	-	-	-	-
Overcharge Tolerance	High	Moderate	Low	Very low
Self-discharge	Low	Moderate	High	Very low
Thermal Stability	Least Stable	Least Stable	Least Stable	Most Stable

Figura 2.11: Comparação das características das baterias abordadas [4]

de fornecer grandes correntes, utilizando este tipo de bateria temos a possibilidade de a carregar com uma determinada tensão lentamente com uma corrente baixa.

Para a aplicação pretendida é de maior importância a segurança, a capacidade e a quantidade de ciclos que a bateria é capaz. De entre os diferentes tipos de baterias de íões de lítio será futuramente escolhida a que melhor se enquadrar no problema.

2.3 Sensores, Microprocessador e Armazenamento

2.3.1 Sensores

Na detecção de vibrações e quedas é possível usar um acelerómetro de múltiplos eixos, pois um acelerómetro é um dispositivo capaz de medir acelerações, isto é, a taxa de variação da velocidade de um objeto. Este fornece medidas em metros por segundo ao quadrado ou em força G, sendo que no nosso planeta em média $1\text{ G} = 9.8$ metros por segundo ao quadrado. Hoje em dia os acelerómetros são dispositivos MEMS com uma enorme sensibilidade sendo capazes de detetar forças estáticas, por exemplo a gravidade, e dinâmicas como vibrações e movimentos.

O mais comum é estes sensores serem digitais, com os quais podemos comunicar com um microprocessador usando protocolos de comunicação I2C ou SPI, são ainda dispositivos de baixo consumo apenas necessitando de uma fonte capaz de fornecer uma corrente

na ordem dos microamperes a miliamperes [26].

Relativamente à velocidade de rotação o sensor de aplicação mais direta seria um giroscópio, porque são sensores com capacidade de medir a velocidade angular, em que por norma estas medidas são obtidas em graus por segundo ou rotações por segundo.

Atualmente existem giroscópios baseados na tecnologia MEMS que permite obter sensores de pequenas dimensões e custos bastante reduzidos. Analogamente, como os acelerómetros estes tendem a ser digitais o que permite obter toda a informação pretendida usando os protocolos referidos. Na sua essência estes sensores são analógicos mas são incluídos conversores ADC (conversores de analógico para digital) e uma interface nos dispositivos que permitem comunicar digitalmente. Por norma necessitam de uma fonte capaz de fornecer uma corrente na ordem dos miliamperes [27].

Para a medição do tempo será necessário utilizar um Real Time Clock, RTC, trata-se de um dispositivo programável capaz de registar o tempo presente e é possível aceder ao mesmo utilizando um microprocessador. Por norma tem a sua própria bateria com uma grande durabilidade.

2.3.2 Microprocessador

Em termos de processamento será necessário ter um microprocessador de 32 bits, capaz de comunicar por I2C e SPI, de baixo consumo energético, que possua modo sleeping, que permite reduzir ainda mais o consumo energético, e com pinos que permitam interrupções externas no código.

O IMU (Inertial Measurement Unit) é um dispositivo que contém acelerómetro, giroscópio e magnetómetro e irá estar em modo de baixo consumo gerando um sinal quando sentir um movimento de uma determinada intensidade, este sinal será usado para gerar uma interrupção no microprocessador fazendo com que este saia do seu modo adormecido e comece a processar as medidas do IMU.

2.3.3 Armazenamento

Partindo do princípio que o sistema a ser desenvolvido será completamente independente e que toda a informação por ele obtido não pode ser transmitida então terá de ser armazenada. O armazenamento destes dados pode ser feito através dum cartão de memória, tratando-se de um dispositivo bastante comum e acessível, pois hoje em dia existem cartões de memória de reduzidas dimensões e com capacidades de armazenamento até 256 Gigabytes. Tendo em conta estes fatores será uma das formas mais viáveis a ser implementada.

Capítulo 3

Sistema de Monitorização

Neste capítulo é apresentado o trabalho desenvolvido para a elaboração do sistema de monitorização a ser aplicado em rolos de rotogravura. Na primeira secção são apresentados os componentes necessários para serem atingidos os objetivos pretendidos. Em seguida, é descrito todo o software desenvolvido relativo ao RTC, à IMU, ao cartão de memória, aos consumos energéticos e ao ciclo principal de funcionamento. Na terceira secção está presente o trabalho realizado relativamente ao esquemático de todo o sistema e à respectiva placa obtida no final. Na quarta secção são apresentados os testes e resultados obtidos e por fim na quinta secção são retiradas algumas conclusões relativas a todo o trabalho desenvolvido.

3.1 Escolha de componentes

Após terem sido definidos os requisitos para o sistema de monitorização foi necessário determinar quais os componentes que iriam permitir obter um sistema capaz de os satisfazer.

Para tal, com base nas medidas necessárias a serem obtidas com este sistema foi concluído que seria necessário escolher um microprocessador, uma unidade de medida inercial composta por acelerómetro e giroscópio, um RTC, um cartão de memória e um regulador de tensão. Foi também necessário ser escolhido um programador para o microprocessador da placa que será desenvolvida para o sistema de monitorização.

O sistema será alimentado por uma bateria de iões de lítio. Pela análise realizada na revisão bibliográfica este tipo de bateria apresenta, por norma, um intervalo de tensões entre 3 V a 4,2 V. Desta forma, a melhor tensão de alimentação para todo o sistema será de 3,3V. A escolha deste valor é motivado pelo facto de ser facilmente obtido a partir

da bateria utilizando um regulador e ser um valor estipulado na indústria para muitos componentes, facilitando a integração de todo o sistema.

3.1.1 Microprocessador

A escolha do microprocessador foi baseada na linha de produtos disponíveis da ST-Microelectronics. As razões que levaram à escolha deste fabricante foram:

- O suporte existente por parte do fabricante, pois fornece múltiplos documentos que ajudam ao desenvolvimento de projetos onde são aplicados os seus microprocessadores;
- A existência de muitos utilizadores dos seus produtos que geram um grande suporte por parte da comunidade presente na Internet proveniente de todo o mundo.
- A oferta de múltiplas placas de desenvolvimento que independentemente da gama escolhida permitem, numa fase inicial, experimentar diferentes configurações e fazer testes;
- Os programas disponibilizados pelo produtor como o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE - *Integrated Development Environment*) que permitem uma rápida configuração das entradas e saídas do sistema e *Debugging* instantâneo.

De entre as diversas gamas existentes foi escolhida a gama STM32L0 pois foi a que apresentou ter os menores consumos no modo utilização ativa, múltiplos modos de poupança de energia e um rápido tempo de recuperação destes modos, isto é, o tempo necessário para o microprocessador recuperar as suas funcionalidades quando sai de um modo de poupança.

Inicialmente, com base nas placas de desenvolvimento disponíveis, foi escolhido o microprocessador STM32L031K6 que se encontra incluído na placa NUCLEO-L031K6 pois era o que apresentava o menor consumo no modo de utilização ativa. Mas após terem sido testados alguns programas, este revelou que a sua memória não seria suficiente para suportar um programa no qual estivesse tudo integrado, isto porque dos 32 Kbytes disponíveis foram utilizados cerca de 27 Kbytes apenas nestes teste iniciais, onde ainda não estavam a ser utilizados o RTC e o cartão de memória.

Portanto, tendo em consideração esta situação, foi escolhido a posteriori um outro microprocessador com uma maior capacidade de memória e capaz de obter consumos energéticos semelhantes ao anterior. Assim, foi escolhido o STM32L073RZ [28] incluído na placa NUCLEO-L073RZ[29] para o desenvolvimento inicial.

O STM32L073RZ apresentou diversas características benéficas para o desenvolvimento do sistema pretendido, tais como:

- Consumo mínimo em modo ativo de 93 uA/Mhz;
- Memória para programas de 192 Kbytes e 20 Kbytes de RAM;
- Diferentes pinos específicos para comunicações, por exemplo 3 conjuntos para I2C e até 6 para SPI;
- Múltiplos relógios internos de baixo consumo que permitem poupar em componentes e no consumo energético.

3.1.2 Unidade de medida inercial - IMU

Uma unidade de medida inercial é um dispositivo constituído por um acelerómetro e um giroscópio, por vezes também contém um magnetómetro, que para a aplicação pretendida não se revela útil.

Tendo em conta a informação fornecida pela empresa produtora dos cilindros sabemos que em média a velocidade de rotação é 411 RPM. Sabendo isto, o giroscópio deverá ter um alcance de medição que permita registar corretamente a velocidade de rotação, sendo que normalmente este valor é referido nas fichas técnicas em graus por segundo (*degree per second* - dps). Desta forma, convertendo RPM para dps sabemos que o giroscópio deve ser capaz medir valores superiores a 2466 dps. Como as gamas destes sensores são estipuladas pelos fabricantes terá de ser utilizado um giroscópio com alcance até 4000 dps, pois a gama inferior a esta só tem alcance até 2000 dps. Relativamente ao acelerómetro, após uma pesquisa de mercado conclui-se que normalmente tem capacidade de medir 16 G de força em todos os eixos o que em princípio será suficiente para o objetivo pretendido. Para além destas características era também pretendida a capacidade de comunicação pelos protocolos de I2C ou SPI.

Após uma análise das unidades de medida inerciais presentes no mercado conclui-se que os principais fabricantes destes sensores são a Bosch - Sensortec, TDK - Invensense e a ST. Sendo possível observar na Tabela 3.1 a comparação de diferentes IMU relativamente ao alcance, consumo, comunicação e resolução dos conversores analógicos para digitais.

	Alcance (°/s)	Alcance (g)	Consumo	Comunicação	ADC (bits)
InvenSense MPU-6050	+/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	3.8mA	I ² C	16
InvenSense MPU-9250	+/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	3.4mA	I ² C SPI	16
Bosch BMX055	+/- 125 +/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	5mA	I ² C SPI	16
Bosch BMX160	+/- 125 +/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	1.58mA	I ² C SPI	16
Bosch BMI270	+/- 125 +/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	0.685mA	I ² C SPI	16
InvenSense ICM-20948	+/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	3.11mA	I ² C SPI	16
InvenSense ICM-20601	+/- 500 +/- 1000 +/- 2000 +/- 4000	+/- 4 +/- 8 +/- 16 +/- 32	1.9mA	I ² C SPI	16

InvenSense ICM-20649	+/- 500 +/- 1000 +/- 2000 +/- 4000	+/- 4 +/- 8 +/- 16 +/- 30	1.27mA	I ² C SPI	16
ST LSM6DSL	+/- 125 +/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	0.65mA	I ² C SPI	16
ST LSM6DSR	+/- 125 +/- 250 +/- 500 +/- 1000 +/- 2000 +/- 4000	+/- 2 +/- 4 +/- 8 +/- 16	0.7mA	I ² C SPI	16

Tabela 3.1: Características de diferentes IMU

Analisando a tabela é possível verificar que a TDK e a ST produzem IMU capazes de realizar medidas superiores a 2000dps, o que não se verifica nos produzidos pela Bosch. Entre todos os sensores apresentados foi escolhido o LSM6DSR [30] da ST pois apresenta o menor consumo de todos os dispositivos capazes de satisfazer todos os critérios pretendidos. O facto de ser da mesma marca que o microprocessador possibilita uma melhor comunicação entre este e o sensor.

Para testes iniciais foi escolhida a placa STEVAL-MKI194V1 [31] de forma a permitir rápidas ligações entre o IMU e o microprocessador. Devido ao facto do *package* do IMU não permitir este ser soldado nas instalações da FEUP, será utilizada esta mesma placa como um adaptador, sendo esta soldada na placa final a ser desenvolvida.

3.1.3 Relógio de tempo real - RTC

A utilização de um relógio de tempo real será essencial para que os acontecimentos fiquem registados com a data e hora exata do acontecimento. Seria possível obter estes valores utilizando o relógio do microprocessador mas isso implicaria perda da informação da hora e data caso o sistema ficasse sem bateria.

Alguns RTC são capazes de utilizar duas fontes de alimentação, ou seja, é possível ter a bateria de todo o sistema como fonte principal e uma pequena pilha auxiliar como fonte

secundária, que só é usada caso o sistema fique sem bateria evitando desta forma a perda de informação.

Para a escolha deste componente foram tidas em consideração características tais como: tensão de alimentação, o formato do componente de forma a ser possível soldar na placa, a inclusão do cristal no circuito integrado, comunicação por I2C e o consumo energético.

Após uma pesquisa de mercado foi escolhido o M41T83ZMY6F [32], fabricado pela ST e que preenche todos os requisitos pretendidos. O facto de ser do mesmo fabricante que o microprocessador escolhido, pode vir a permitir uma melhor integração no sistema. Para além deste RTC já ter o seu próprio cristal calibrado pelo fabricante, que torna o componente mais preciso, também apresenta ter diferentes configurações automáticas que permitem uma mais fácil configuração, por exemplo na compensação automática do ano bissexto, e uma configuração simples dos registos de data e hora que permite uma leitura direta a partir da informação obtida pelo I2C, ao contrário de outros RTC em que é necessário realizar cálculos posteriores para a determinação destes valores.

Como será necessário ter uma fonte secundária foi escolhido o suporte S8201-46R que permite a utilização de uma pilha-botão de tamanho 1225 (12 mm diâmetro por 2,5 mm altura). Foram escolhidas estas dimensões pois é pretendido no final obter uma placa o mais pequena possível e este tamanho de pilha apresenta uma capacidade energética média de 30 mA o que possibilita uma autonomia de 7 anos visto que o RTC consome uma corrente máxima de 450nA quando esta a utilizar bateria.

Para realizar testes iniciais foi desenhada uma placa na qual será soldado um RTC e o suporte da pilha e terá pinos para ligar ao microprocessador. Esta placa foi desenhada recorrendo ao programa EAGLE [33] da Autodesk.

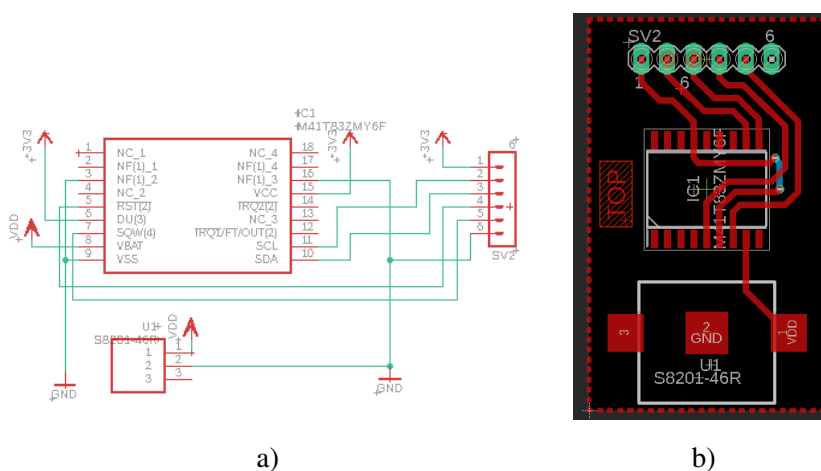


Figura 3.1: a) Esquemático para o M41T83 e b) Placa para o M41T83

3.1.4 Cartão de memória

Devido à necessidade de armazenar os dados obtidos pelo sistema concluiu-se que era necessário recorrer à utilização de um cartão de memória. O padrão escolhido foi o *microSD*, que é um cartão cuja memória é baseada no tipo *flash*. As razões que levaram a escolha deste tipo de armazenamento de informação foram:

- Trata-se de um dos formatos mais usados globalmente;
- As suas reduzidas dimensões, tendo uma largura de 11 mm e um comprimento de 15 mm;
- A sua leitura é suportada pela maioria dos computadores;
- A sua capacidade varia de 128 MB ate 1024 GB permitindo assim uma escolha versátil de um cartão adequado ao problema.
- Este tipo de memória pode ser alimentado utilizando 3,3 V.

A classe escolhida para o cartão foi a 10, pois permite velocidades mínimas de gravação de 10MB/s, que é importante para o sistema a ser desenvolvido pois pretende-se que consuma o mínimo de energia possível. Desta forma, quanto mais rápida for a gravação menor será a energia consumida e menor será a probabilidade de existir perda informação neste processo.

Numa fase inicial foi usado um adaptador para *breadboard* de forma a ser possível fazer as devidas ligações ao microprocessador e poder testar a leitura e escrita no cartão de memória, o adaptador usado foi o BOB-00544 [34] da Sparkfun. Posteriormente foi desenvolvida uma placa no estágio final do desenvolvimento de todo o sistema em que foi usado o conector DM3D-SF [35] soldado à placa, permitindo facilmente conectar e desconectar o cartão de memória.

3.1.5 Regulador de tensão

A regulação de tensão pode ser conseguida utilizando diferentes tecnologias existentes e já bem desenvolvidas. Idealmente seria usado um conversor *Buck* devido ao facto de permitir um elevado rendimento no processo de regulação, diminuindo assim as perdas de todo o sistema. No entanto, para a correta utilização deste tipo de conversor é necessário conhecer os limites mínimos e máximos de corrente necessária para que a conversão seja eficiente. O mau dimensionamento de um conversor deste género faz com que se diminua a eficiência do sistema e pode ainda tornar a regulação instável.

Devido ao facto de não serem conhecidas os limites de corrente do sistema foi decidido utilizar um regulador com queda de tensão baixa também conhecido como LDO (*low-dropout regulator*). Apesar das correntes não serem conhecidas esperam-se valores na ordem dos miliamperes, assim este tipo de regulador irá revelar uma boa eficiência (mais baixa comparativamente ao outro regulador) independente da corrente consumida. Outro fator importante é o facto de estes reguladores poderem ser escolhidos dentro de um determinado intervalo de valores de tensão de entrada, permitindo assim escolher um regulador adaptado aos níveis de tensão das baterias.

O modelo escolhido foi o LD3985M33R [36] por apresentar múltiplas características benéficas para o sistema a ser desenvolvido, nomeadamente:

- Regulador de tensão de ultra baixa queda e de baixo ruído;
- Intervalo de tensões de entrada de 2,5 V a 6 V;
- Queda de tensão de 0.4 mV com uma carga de 1 mA;
- Consumo máximo de 170 uA com uma carga de 150 mA;
- *Package* pequena mas possível de ser soldada na FEUP.
- Utilizado pela STMicroelectronics em boa parte das placas desenvolvimento sendo uma garantia da sua aplicação e funcionamento.

3.1.6 Programador

Como a STMicroelectronics não permite o uso do circuito presente nas placas de desenvolvimento para programar microprocessadores de placas não desenvolvidas pelo fabricante implica utilização de um programador externo. Estes programadores são também comercializados por esta marca que apresenta um vasta gama adequada a diferentes fins: orientados a estudantes ou desenvolvimento individual e também orientados para a indústria. Como se espera que o resultado desta dissertação seja aplicado em produtos desenvolvidos para a indústria escolheu-se um programador orientado para tal. O modelo selecionado foi o STLINK-V3 [37] que possui também a função de *debugger* e consegue programar através de diferentes protocolos de comunicação.

3.2 Software desenvolvido

O desenvolvimento do *software* do sistema de monitorização foi realizado em múltiplas etapas. Numa fase inicial desenvolveu-se o software para cada componente, tornando

possível comprovar o funcionamento de cada um. De seguida juntou-se o funcionamento da IMU com o cartão de memória permitindo a gravação dos valores lidos pelos sensores. Para obter um *timestamp* para cada leitura acrescentou-se o RTC. No final integraram-se estas funcionalidades numa máquina de estados.

O ambiente de desenvolvimento utilizado, STM32CubeIDE [38], possui uma interface que permite configurar os pinos do microprocessador como entradas ou saídas e a *middleware* do cartão de memória e gera automaticamente o código relativo a esta configuração.

3.2.1 RTC

A inicialização do RTC foi realizada segundo a informação fornecida pela *datasheet* [32] e pela *Application note AN3060* [39] da ST. Na Figura 3.2 é possível observar a forma como é feita a inicialização do RTC, em que é necessário realizar uma sequência de passos que permite obter um relógio calibrado e funcional. Os passos realizados foram:

- Desativação do gerador de onda quadrada;
- Colocação do bit HT a 0;
- Registo da hora e data pretendida;
- Ativação do OTP que é a calibração analógica de fábrica do cristal para o correto funcionamento do relógio;
- Esperar 4 segundos e depois colocar o bit OF a 0 e verificar que ficou a 0.

Para realizar estes passos utilizou-se o código presente na Figura A.1. Esta configuração só necessita de ser realizada uma vez, desde que a pilha não seja retirada ou fique sem carga, caso isto aconteça terá que se repetir o procedimento. No entanto, cada vez que o RTC deixa de ser alimentado pela bateria é necessário recolocar o bit HT a 0 para se conseguir aceder aos valores de data e hora. Portanto no código do sistema de monitorização poderá ser observado que as primeiras linhas de código realizam esta operação.

A leitura da data e hora é simples e pode ser feita diretamente a partir dos valores dos registos de I2C, sem necessitar de qualquer cálculo auxiliar. A configuração dos registos de data e hora está feita para que em cada um deles seja possível obter o valor desejado. Por exemplo no registo referente ao dia do mês, 0x05, os 4 bits menos significativos são referentes às unidades do dia e os restantes 4 são as dezenas. Assim, o dia 23 em binário é guardado como 00100011. Imprimindo os valores dos registos do RTC em hexadecimal é possível obter a data e hora.

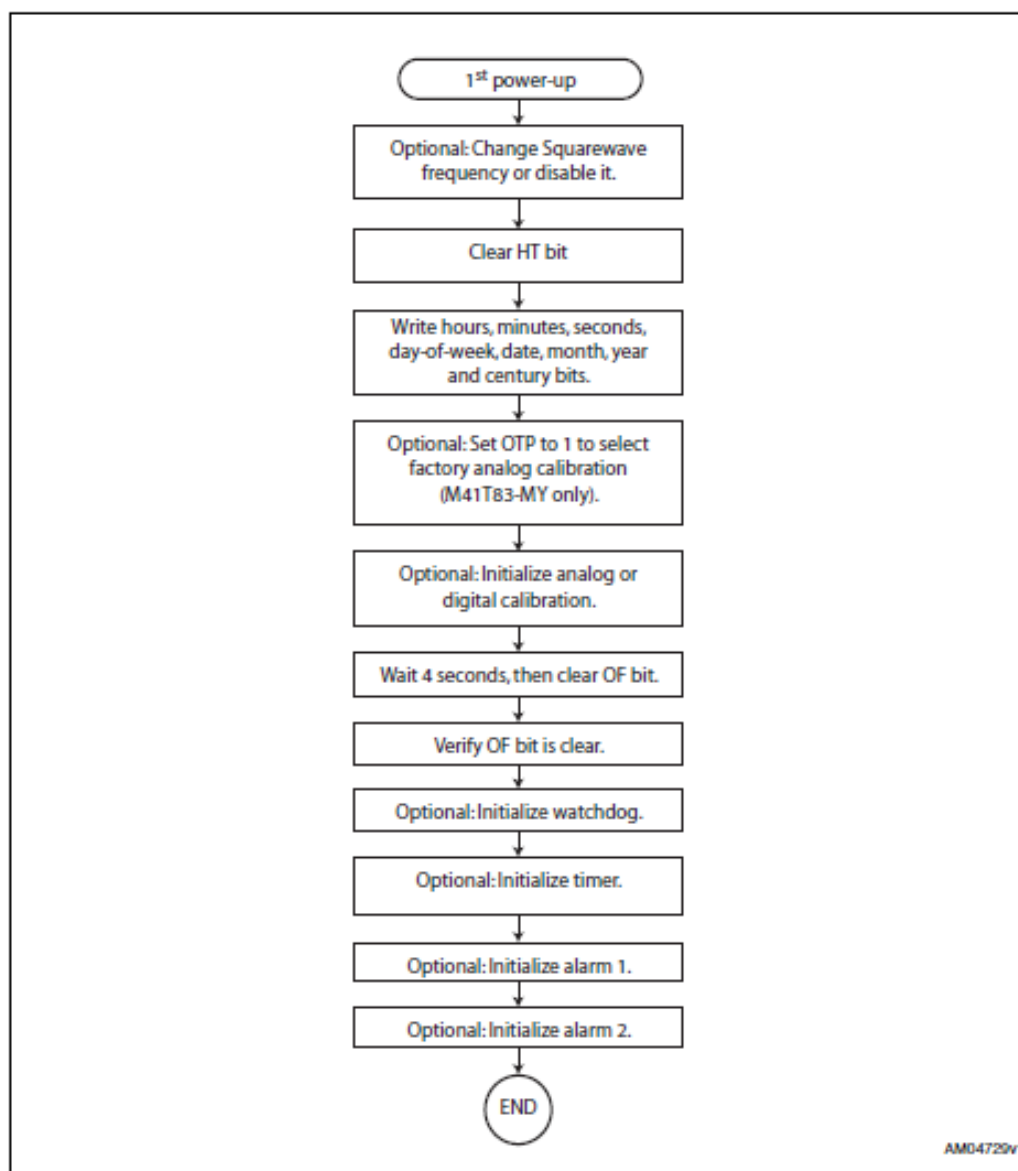


Figura 3.2: Ciclo de inicialização fornecido na *Application note AN3060*

Na Figura 3.3 é possível observar o código utilizado para realizar a leitura da data e hora do RTC. Para ser possível realizar cálculos com o tempo obtido a partir do RTC foi necessário ser desenvolvida uma função capaz de separar os 4 bits mais significativos dos menos significativos de modo a ser calculado o valor proveniente do registo, isto porque apesar da leitura do hexadecimal permitir ler a data/hora diretamente mas a conversão de hexadecimal para decimal não seria direta para os cálculos. A função usa os 4 bits mais significativos, converte para base decimal e multiplica por dez o seu valor e soma o valor decimal correspondente aos 4 bits menos significativos. Esta função está presente na Figura 3.4.

```

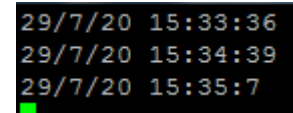
//ativar a leitura do RTC
i2cbuf[0] = 0x0C;
i2cbuf[1] = 0b00000000;
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c3, rtc, i2cbuf, 2, 10);

//leitura da data e hora
tempo[0] = 0x01;
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c3, rtc, tempo, 1, 10);
HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c3, rtc, &tempo[1], 7, 10);

//impressao por uart da data e hora
sprintf((char*) buffer, "%x/%x/%x %X:%x:%x\r\n", tempo[5], tempo[6],
tempo[7], tempo[3], tempo[2], tempo[1]);
HAL_UART_Transmit(&huart2, buffer, strlen((char const*) buffer), 10);

```

a)



```

29/7/20 15:33:36
29/7/20 15:34:39
29/7/20 15:35:7

```

b)

Figura 3.3: a) Código utilizado para a leitura da data e hora b) Informação obtida a partir do RTC a quando da leitura

```

float bin2dec(uint8_t value) {
    return (((value >> 4) & 0xF) * 10 + (value & 0xF));
}

```

Figura 3.4: Função desenvolvida para conversão dos registos do RTC

3.2.2 IMU

Para a configuração e utilização da unidade LSM6DSR foi utilizada a *datasheet* [30] e uma biblioteca fornecida pela ST [40]. A biblioteca utilizada, com ajuda da *datasheet*, é bastante intuitiva e os exemplos fornecidos permitiram a configuração de diferentes aspetos, tais como o alcance dos sensores, a frequência de leitura dos mesmos, o modo de operação e das interrupções.

Inicialmente foi configurada a frequência de medição do acelerómetro e giroscópio, esta configuração influencia não só o número de medidas obtidas por segundo mas também o consumo energético sendo que este aumenta com a frequência. De seguida foram configurados os alcances destes sensores, isto é, o valor máximo de medida. No entanto é necessário ter em conta que o aumento deste valor implica uma redução na resolução. Ambos os sensores foram configurados para ser possível medir até ao valor máximo que suportam, 16 G para o acelerómetro e 4000 dps para o giroscópio, e para ter o mínimo consumo possível, sendo para isso colocados no modo de potência que consome menos energia.

A IMU tem a função de informar o microprocessador quando é que deve alternar entre modo ativo e modo poupança de energia. Esta informação é dada através de interrupções geradas pela IMU e que são lidas pelo microprocessador, desta forma sabe-se quando não

existe qualquer movimento e que se trata de uma situação em que se deve entrar em modo de poupança energética.

Estas interrupções são configuradas através de parâmetros que dependem do alcance e da frequência de leitura e tornam possível ajustar a sensibilidade das interrupções. Os parâmetros ajustáveis são: o *threshold* de movimento, isto é, a força mínima em mG que é necessário exercer sobre a IMU para que esta considere que está a ocorrer movimento; o tempo necessário para confirmar que foi ultrapassado o *threshold*; o tempo para ser confirmada a inatividade; definição das ações a executar quando se entra no modo inativo, o giroscópio é desligado e o acelerómetro passa a funcionar em baixo consumo com uma frequência de medida de 12,5Hz.

Por fim foram configurados os pinos *int1* e *int2* da IMU, de modo a que, ao ser detetado um movimento que exerceu uma força superior ao *threshold* estipulado anteriormente, seja ativado o pino *int1*. Quando não é detetado movimento ao fim de um determinado tempo é ativado o pino *int2*. Estas configurações foram obtidas através do código presente na Figura A.2.

3.2.3 Cartão de Memória

A configuração do cartão de memória foi feita com recurso a um guião e a uma biblioteca [41]. A comunicação é feita por SPI e tanto o IDE como a biblioteca utilizada asseguram a correta comunicação entre o microprocessador e o cartão de memória. Após ser feita a configuração é necessário modificar o ficheiro "fatfs_sd.c" da biblioteca onde é definido o pino do microprocessador responsável pelo CS (Chip Select), isto é, o pino usado para ativar a comunicação entre o microprocessador e o cartão, e é também definido o conjunto de pinos de SPI que estão a ser utilizados. As alterações realizadas no ficheiro são visíveis na Figura 3.5.

```
/* defines for the CS PIN */
#define SD_CS_GPIO_Port GPIOA
#define SD_CS_Pin GPIO_PIN_4

/* manage your SPI handler below */
extern SPI_HandleTypeDef hspi1;
```

Figura 3.5: Modificação realizada no ficheiro "fatfs_sd.c"

No código principal foi necessário definir algumas variáveis para ser possível ler e escrever ficheiros no cartão de memória. Cada vez que é pretendido ler ou escrever um ficheiro é necessário ativar a comunicação com o cartão, pois caso esteja sempre conectado

consome mais energia. Deste modo garante-se também que os ficheiros não são corrompidos pois sempre que se acaba uma modificação no cartão a comunicação é terminada. Durante a comunicação é escolhido o ficheiro e a tarefa que se pretende realizar, isto é, escrever, ler ou ambos. Todas estas ações são feitas utilizando as funções da biblioteca o que possibilita uma organização das instruções de forma compacta no que diz respeito a linhas de código, como pode ser observado no exemplo da Figura 3.6.

```
fresult = f_mount(&fs, "/", 1);  
fresult = f_open(&fil, "data.txt", FA_OPEN_EXISTING | FA_READ | FA_WRITE);  
fresult = f_lseek(&fil, f_size(&fil));  
fresult = f_puts((char*) tx_buffer, &fil);  
fresult = f_close(&fil);  
fresult = f_mount(NULL, "/", 1);
```

Figura 3.6: Exemplo de escrita de um ficheiro no cartão de memória.

3.2.4 Configuração dos consumos energéticos

Um dos aspetos mais fulcrais do sistema é o consumo energético. Como já foi referido, foi escolhido um microprocessador que apresenta diversas opções para a regulação da frequência de funcionamento, que permitem regular o consumo no modo normal, e ainda cinco modos de baixo consumo configuráveis.

Na Figura 3.7 são apresentados os diferentes modos de baixo consumo, nomeadamente as suas vantagens e desvantagens. Assim, foi necessário comparar os diferentes modos de forma a concluir qual o que se adequa melhor a esta aplicação. Os termos de comparação utilizados foram o desempenho, o consumo energético, o tempo de ativação e a forma de ativação.

Com base na *datasheet* e numa comparação realizada por Matt Mielke [42], o modo de poupança escolhido foi o *Low Power Run*. A partir da tabela é possível concluir que apresenta o melhor desempenho, tem o segundo melhor tempo de ativação, apresenta a maior quantidade de formas de ativação mas por outro lado não apresenta a melhor poupança energética.

Apesar deste último fator este modo foi escolhido pois, após alguns testes, revelou possibilitar a recuperação do modo de poupança recorrendo ao *software*, pois neste modo o sistema continua a correr o código presente na flash, com uma frequência bastante reduzida, mas com opção de escolha dos periféricos que são desligados, e facilmente se recupera o modo ativo do microprocessador. Apesar do consumo energético ser fundamental, a rapidez com que é feita a recuperação permite diminuir a probabilidade de perda

IPs	Run/Active	Sleep	Low-power run	Low-power sleep	Stop		Standby	
					Wakeup capability		Wakeup capability	
DAC	O	O	O	O	O		--	
Temperature sensor	O	O	O	O	O		--	
Comparators	O	O	O	O	O	O	--	
16-bit timers	O	O	O	O	--		--	
LPTIMER	O	O	O	O	O	O		
IWDG	O	O	O	O	O	O	O	O
WWDG	O	O	O	O	--		--	
Touch sensing controller (TSC)	O	O	--	--	--		--	
SysTick Timer	O	O	O	O			--	
GPIOs	O	O	O	O	O	O		2 pins
Wakeup time to Run mode	0 μ s	0.36 μ s	3 μ s	32 μ s	3.5 μ s		50 μ s	
Consumption $V_{DD}=1.8$ to 3.6 V (Typ)	Down to 140 μ A/MHz (from Flash memory)	Down to 37 μ A/MHz (from Flash memory)	Down to 8 μ A	Down to 4.5 μ A	0.4 μ A (No RTC) $V_{DD}=1.8$ V		0.28 μ A (No RTC) $V_{DD}=1.8$ V	
					0.8 μ A (with RTC) $V_{DD}=1.8$ V		0.65 μ A (with RTC) $V_{DD}=1.8$ V	
					0.4 μ A (No RTC) $V_{DD}=3.0$ V		0.29 μ A (No RTC) $V_{DD}=3.0$ V	
					1 μ A (with RTC) $V_{DD}=3.0$ V		0.85 μ A (with RTC) $V_{DD}=3.0$ V	

1. Legend:
 "Y" = Yes (enable).
 "O" = Optional can be enabled/disabled by software
 "--" = Not available

Figura 3.7: Parte da tabela 5 da *datasheet* do microprocessador STM32L073

de informação entre o sinal de ativação e a ativação definitiva do sistema. Tendo em consideração estes fatores a modificação do modo de potência do microprocessador é feita no ciclo principal, realizando as devidas modificações, e com recurso às interrupções geradas pela IMU.

Na Figura A.3 está presente o código relativo à função onde se dá a configuração do modo *Low Power Run*. Foram feitas duas modificações, uma para que não exista nenhuma reinicialização de periféricos, pois não se revelou necessário para o correto funcionamento do sistema, e outra no relógio de modo a ser utilizada a frequência mais baixa possível, 65 KHz. Esta configuração relativa ao relógio é apresentada na Figura A.4.

Na Figura A.5 encontra-se o código utilizado para recuperar o funcionamento do microprocessador, sendo que é restabelecida a frequência do relógio para 2,1 MHz, é colocado o regulador de tensão no modo normal e são reiniciados todos os periféricos necessários.

3.2.5 Ciclo principal de funcionamento

O ciclo principal de funcionamento tem como objetivo alternar entre o modo de poupança de energia e o modo normal, de acordo com a detecção de quedas e rotações, e pode ser resumido utilizando a maquina de estados presente na Figura 3.8 e que é composta pelos seguintes estados:

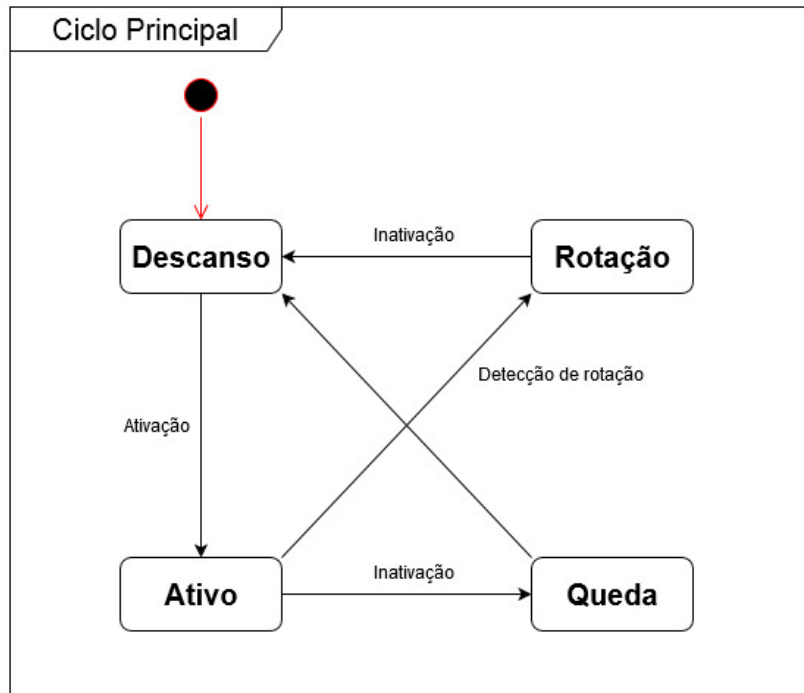


Figura 3.8: Máquina de estados do ciclo principal

- **Descanso** Neste estado o sistema encontra-se em repouso, em baixo consumo energético, à espera que seja detetado movimento que resulte na interrupção 1 gerada pela IMU de modo a sair deste estado. Quando é detetada esta interrupção, o sistema é colocado no modo de funcionamento normal e é registada a data e hora do acontecimento;
- **Ativo** A leitura dos valores do giroscópio e acelerómetro é continua em que os valores máximos e mínimos do acelerómetro estão sempre a ser atualizados, assim como a média de velocidade angular obtida a partir do giroscópio. Se a velocidade angular ultrapassar um certo valor, que é definido de acordo a velocidade de rotação estimada para o rolo, é mudado para o estado designado como Rotação. Caso seja detetada inatividade pela IMU e seja gerada a interrupção 2 então a maquina muda para o estado Queda.

- **Queda** Quando é ativado este estado significa que ocorreu uma queda e portanto é registado num ficheiro o acontecimento, com a data, a hora e os máximos e mínimos do acelerómetro.
- **Rotação** Neste estado continua a ser verificada a velocidade média de rotação e, caso haja uma desaceleração significativa que mostre que a máquina está a parar, então deixa de ser verificada de modo a não ser influenciada por valores nulos. Quando é detetada a inatividade do sistema a partir da interrupção 2 da IMU é atualizada a velocidade média medida, é registado o número de voltas dadas pelo rolo e o tempo de funcionamento do mesmo.

3.3 Esquemático e Placa

O desenvolvimento do esquemático do sistema de monitorização só foi possível após terem sido realizados vários testes e configurações para a confirmação da funcionalidade do *hardware* adquirido e do software desenvolvido. Foi possível realizar estes testes utilizando placas de desenvolvimento conectadas numa *breadboard*, sendo possível observar a montagem final obtida na Figura 3.9. Com base no sistema obtido foi possível desenhar um esquemático utilizando o EAGLE. Na Figura B.1 está presente o esquemático obtido.

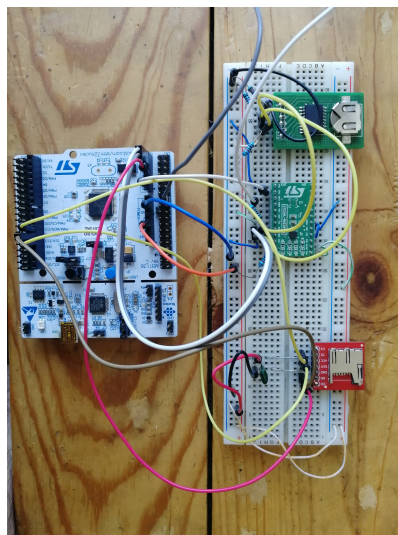


Figura 3.9: Montagem final realizada com as placas de desenvolvimento

A partir do esquemático foi possível desenhar a placa para o sistema de monitorização, com recurso ao EAGLE e também com a ajuda do suporte técnico da FEUP. Devido ao facto da placa ser montada nas instalações da FEUP foi necessário escolher componentes possíveis de soldar nas condições disponíveis, um bom exemplo deste compromisso foi

a necessidade de adaptar a placa de desenvolvimento da IMU na placa desenvolvida. A placa final obtida após realizada a correta montagem está presente na Figura 3.10.

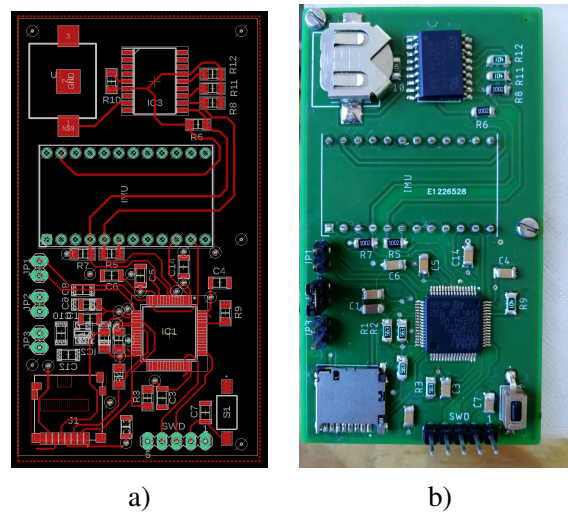


Figura 3.10: a) Desenho da placa utilizando o EAGLE b) Placa final completamente montada

3.4 Testes e Resultados

Numa fase inicial verificou-se a tensão obtida na saída do regulador de tensão, sendo obtido o valor de 3,3 V. Em seguida foi configurado o RTC e verificado o seu funcionamento, ou seja, se era possível obter a data e hora corretamente. Foi utilizado o *software* desenvolvido na placa final e obtiveram-se os mesmos resultados que no sistema em *breadboard*. Com isto é possível acoplar a placa a um rolo de rotogravura de forma a ser possível verificar a leitura da velocidade de rotação e a detecção de quedas.

Para verificar os consumos energéticos recorreu-se a uma fonte de alimentação regulada para 3,7 V, a tensão nominal de uma bateria Li-ion. Foram realizadas medidas da corrente consumida na entrada e saída do regulador de tensão, no modo ativo e inativo. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3.2.

Consumos	Ativo	Inativo
Corrente entrada do regulador	1,75	0,27
Corrente saída do regulador	1,60	0,173

Tabela 3.2: Consumos medidos do sistema desenvolvido

Com base nos valores obtidos é possível calcular o rendimento do regulador de tensão no modo ativo e inativo, tendo sido obtidos os valores 81,54 % e 51,15 %, respetivamente.

De modo a testar o sistema em rotação foi necessário desenvolver um suporte com recurso a impressão 3D, capaz de fixar a placa e a bateria. O suporte foi desenhado tendo em mente a colocação de um parafuso, desempenhando a função de veio. Para efetuar este desenho recorreu-se ao FUSION 360 [43] da Autodesk, o modelo e respetiva impressão são apresentados na Figura 3.11.

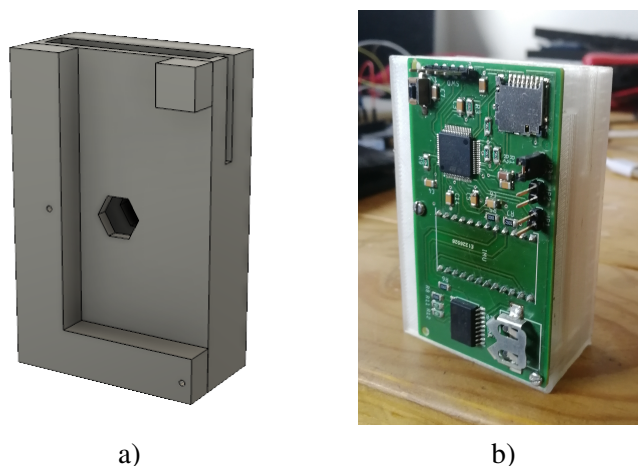


Figura 3.11: a) Modelo 3D do suporte b) Suporte imprimido e aplicado

Como não era viável a utilização do rolo de rotogravura, numa fase inicial foi utilizado um berbequim como fonte de rotação. Sabendo que este tem uma velocidade de rotação máxima, em vazio, de 500 RPM, o sistema foi calibrado para esta aplicação e foram realizados dez testes de rotação à velocidade máxima. Cada teste com uma duração de 30 segundos e foi dado tempo suficiente para que o motor e a bateria do berbequim pudessem arrefecer. Não é esperado obter-se o valor da rotação em vazio pois o suporte com a placa e a bateria requer algum binário do motor fazendo com que este não esteja exatamente a rodar em vazio. Os resultados dos testes realizados são apresentados na Tabela 3.3. Em cada iteração foi registada a velocidade média de rotação, o tempo de rotação e o número de voltas total.

Analisando os resultados é possível retirar algumas conclusões, nomeadamente:

- A velocidade de rotação média medida apresentou um valor inferior a 500 RPM, como era esperado, mas bastante próximo deste valor sugerindo que as medições foram realizadas corretamente pelo sistema;
- O sistema é capaz de calcular a média da velocidade de rotação de forma consistente;
- O tempo de funcionamento revelou um erro de 0,43 %, isto porque, o cálculo realizado pelo microprocessador recorre a mais casas decimais que o cálculo realizado

com os outros valores, que foram registados num ficheiro de texto no cartão de memória;

- O erro obtido no valor das voltas também se deve às casas decimais usadas nos diferentes cálculos.

Testes de rotação	RPM	Duração - Min	Voltas
1º	492,94	0,52	256
2º	494,27	0,52	257
3º	493,98	0,52	257
4º	493,19	0,50	247
5º	491,81	0,52	256
6º	486,38	0,50	243
7º	488,17	0,50	244
8º	487,1	0,50	244
9º	486,26	0,50	243
10º	484,76	0,54	262
Valores calculados usando Excel	489,89	0,0853 (horas)	2508
Valores calculados pelo sistema	489,89	0,0857 (horas)	2505
Erro entre as medidas percentual	0,00%	0,43%	0,13%

Tabela 3.3: Testes realizados com recurso a um berbequim

Com base nos testes realizados com o berbequim, verificou-se que o sistema estava pronto a ser validado num rolo de rotogravura. Assim, acoplou-se o sistema numa das fases do cilindro, como é possível observar na Figura 3.13. O cilindro é suportado por uma máquina que apresenta um velocidade de rotação de 50 a 60 RPM. Durante longos períodos de tempo deixou-se ao rolo a rodar e foram registados os mesmos dados que nos testes com o berbequim. Na Tabela 3.4 é possível observar estes valores.

Por fim, foi testada a capacidade de detetar quedas. Para tal, é necessário deixar cair o rolo com o sistema acoplado, em que foram provocadas várias forças de impacto no local onde este caía. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3.12. Analisando os resultados foi possível concluir que:

- O sistema desenvolvido apresenta versatilidade, sendo que é ajustável a várias aplicações com diferentes velocidades de rotação;

- Os testes de longa duração mostram a exatidão dos valores recolhidos, comprovado pelo erro de voltas realizado, comparativamente ao teste com o berbequim;
- Existe capacidade de detectar quedas com diferentes forças de impacto, que são medidas e registadas juntamente com a hora e data do acontecimento.

Testes de rotação	RPM	Duração - Min	Voltas
1º	50,98	1,67	85,14
2º	51,01	14,29	728,93
3º	51,02	27,75	1415,81
4º	51,11	41,74	2133,33
Valores calculados usando Excel	51,03	1,424	4363,2
Valores calculados pelo sistema	51,03	1,424	4361
Erro entre as medidas percentual	0%	0%	0,051%

Tabela 3.4: Testes realizados com o sistema acoplado a um rolo de rotogravura numa máquina de rotação constante

```

Data e hora da queda: 12/8/20 11:54:47
Max A:0.32, 0.65, -0.57    Min A:-0.21, -0.38, -1.40

Data e hora da queda: 12/8/20 11:55:54
Max A:6.33, 4.70, 8.78    Min A:-2.23, -3.86, -9.10

Data e hora da queda: 12/8/20 11:57:13
Max A:3.62, 7.32, 15.99   Min A:-5.24, -3.20, -6.14

```

Figura 3.12: Registos do cartão de memória relativos a quedas

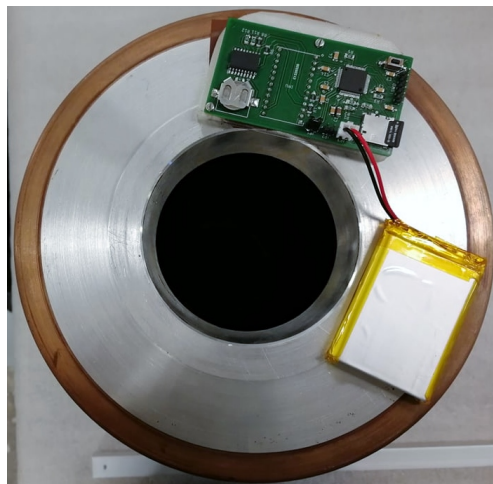


Figura 3.13: Sistema de monitorização montado num rolo de rotogravura

3.5 Conclusões

A escolha de componentes realizada no início do desenvolvimento do sistema apresentou algumas dificuldades, pois foi necessária uma familiarização com este tipo de componentes, e existia também uma dependência das condições de montagem de placas nas instalações da FEUP. Mesmo assim, cada componente foi escolhido com o objetivo de ser obtida a melhor performance possível com um baixo consumo. O microprocessador revelou ser eficiente e versátil permitindo um bom desenvolvimento do trabalho, com a IMU foi possível não só obter as medições pretendidas, como também gerar as interrupções necessárias à transição entre o modo ativo e inativo. O RTC mostrou-se capaz de alternar entre fontes de alimentação de modo a não ser perdida a informação guardada nos seus registos de tempo. Tendo em conta o valor do rendimento obtido nos testes relativamente ao consumo e rendimento do sistema concluí-se que o regulador de tensão escolhido não foi o melhor para a integração do sistema na aplicação final pretendida. No entanto, a implementação apresentada possibilitou a validação de todo o sistema.

O facto da maioria dos componentes serem produzidos pela ST revelou ser um fator importante, isto porque a utilização do IDE disponibilizado e o suporte existente possibilitou o desenvolvimento do *software* de forma eficaz. A criação da versão final foi feita de uma forma gradual, o que permitiu a constante resolução dos problemas que foram surgindo. É necessário salientar que os testes práticos realizados na fase final do desenvolvimento foram fulcrais para o correto ajuste de certos parâmetros.

A criação do esquemático e a sua placa correspondente revelou ser uma tarefa complexa visto que era pretendido um sistema de pequena dimensão e ainda existiam limitações tecnológicas relativamente às dimensões dos componentes que podiam ser utilizados. No final obteve-se uma placa completamente funcional, que apesar de ter alguns aspetos a melhorar, cumpriu todos os requisitos pretendidos.

Por fim, analisando os testes realizados e os resultados obtidos é possível concluir que os objectivos propostos nesta dissertação foram atingidos, sendo que foi possível medir a velocidade média de rotação, calcular o número de voltas, obter o tempo de funcionamento e registar quedas.

Capítulo 4

Energy Harvesting

Neste capítulo é estudada a possibilidade da utilização do movimento rotacional para ser gerada energia, através de um sistema de *energy harvesting*, para o carregamento de uma bateria de íões de lítio de modo a ser obtida uma maior autonomia para o sistema de monitorização desenvolvido. Desta forma, na primeira secção é apresentada a escolha do sistema a ser implementado com base no estudo realizado na revisão bibliográfica. Em seguida, na segunda secção é exposta a implementação realizada de modo a ser obtida uma prova de conceito para estudar a possibilidade de esta tecnologia poder vir a ser aplicada. Na terceira secção é descrita a forma como foram feitas certas configurações para as bobinas do sistema de recolha de energia de modo a ser possível recolher o máximo de energia possível. Após ser escolhida a melhor configuração, na secção quatro, são realizados testes e são observados os resultados obtidos. Na quinta secção é feito um estudo sobre baterias onde se avalia a capacidade necessária em função da autonomia pretendida e em seguida são escolhidas diferentes tecnologias de baterias para, de um modo comparativo, ser possível concluir qual a melhor a ser utilizada caso se recorra ou não a um sistema de *energy harvesting*. Por fim, na secção seis são tiradas conclusões do estudo e do trabalho realizado ao longo deste capítulo.

4.1 Escolha do sistema a ser implementado

Um dos objetivos principais desta dissertação é o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de *energy harvesting*, também designado como sistema de recolha de energia. A função deste sistema é obter energia a partir do movimento rotacional de um rolo para carregar a bateria que irá alimentar o sistema de monitorização. Desta forma, no Capítulo 2 realizou-se uma revisão bibliográfica de diversos artigos relacionados com o

desenvolvimento de sistemas de *energy harvesting* que irá permitir a comparação dos diferentes métodos de modo a estudar a possibilidade de ser desenvolvido um protótipo.

Foram escolhidos três sistemas possíveis de serem aplicados tendo em conta o método de recolha desejado: um gerador utilizando um motor DC acoplado a uma fonte de rotação e com um peso acoplado a este de modo a manter-se estático e assim gerar energia [14, 15]; um sistema composto por um conjunto de ímanes colocado num rolamento paralelo a um conjunto de bobines de modo a ser gerada corrente eléctrica nas mesmas à medida que estas rodam, sendo que os ímanes ficam parados com ajuda de um contrapeso [2]; um sistema similar ao anterior, em que é utilizado um conjunto de bobines desenvolvido numa placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board - PCB*) de múltiplas camadas, com isto obtém-se um conjunto de bobines compacto que é estático e é utilizado um conjunto de ímanes rotacional para a obtenção de energia [3]. Cada um dos sistemas tem vantagens e desvantagens para a situação pretendida sendo que foi necessário realizar uma comparação entre estes de modo a ser decidido qual deve ser implementado.

No desenvolvimento do sistema de *energy harvesting* é necessário ter em consideração a velocidade de rotação dos cilindros, em média 400 RPM, pois o sistema tem de ser capaz de gerar energia suficiente para este mesmo valor. Outro fator a considerar é a potência que é necessário produzir, visto que o objetivo é carregar uma bateria de íões de lítio, com uma corrente superior à que é consumida pelo sistema de monitorização desenvolvido cujo consumo é de 1,60 mA. Considerando que grande parte do carregamento deste tipo de baterias é gradual e com recurso a uma corrente constante, é necessário definir uma corrente mínima a ser fornecida pelo *energy harvesting*. Desta forma, foi definido o valor de 5 mA para fornecer ao sistema e carregar a bateria ao mesmo tempo. Com base neste valor e sabendo que a tensão máxima da bateria é 4,2 V, obtém-se um valor para a potência mínima a ser obtida a partir da recolha de energia de 21 mW.

Após uma análise cuidada dos artigos relativos ao gerador de energia utilizando um motor DC foram encontrados diferentes fatores que impossibilitam a sua aplicação num cilindro de rotogravura, nomeadamente:

- A colocação ideal deste sistema seria no eixo central de rotação do cilindro mas isso é impossível devido à existência de um veio, que proporciona suporte e rotação ao cilindro;
- A velocidade de rotação média de um cilindro não seria suficiente para ser gerada a energia necessária, sendo que os cilindros giram em média a 400 RPM e o artigo revelou que aplicando uma rotação de 6000 RPM eram gerados 50 mW em condições ideais;

- Num dos artigos também é abordada a possibilidade de ser colocado o gerador fora do eixo central de rotação, mas implica a utilização de um controlo mais sofisticado e resulta num valor de potência inferior.

No caso do sistema em que são utilizadas PCB de múltiplas camadas, a aplicação presente no artigo utiliza 10 camadas e revelou, numa primeira observação do artigo, ser uma excelente aplicação desta tecnologia para ser obtido um sistema compacto e funcional. No entanto, após algum estudo do mercado sobre PCB de múltiplas camadas, verificou-se que estas apresentam um custo extremamente inviável tornando assim esta opção inviável.

Por fim, foi considerada a implementação em que é utilizado um conjunto de ímanes e um conjunto de bobines paralelos entre si colocados no mesmo veio, esta revelou os seguintes fatores, que justificaram o possível desenvolvimento de um protótipo:

- O produto final presente no artigo foi capaz de produzir energia na mesma gama de velocidades de rotação que é utilizada nos rolos de rotogravura;
- O sistema pode ser implementado e embutido na lateral ou interior do cilindro;
- Utilização de materiais acessíveis tanto ao nível de local de compra como de custo;
- Apesar de a energia máxima produzida ser apenas de $550 \mu\text{W}$, que é cerca de quarenta vezes menor do que é pretendido, o protótipo utilizado apresenta dimensões muito menores comparativamente às dimensões dos cilindros de rotogravura, prevendo assim uma maior produção de energia pelo protótipo a desenvolver.

Considerando todas as observações e comparações realizadas concluiu-se que iria ser desenvolvido um protótipo tendo por base o estudo realizado por Yu-Jen Wang, Sheng-Chih Shen and Chung-De Chen, onde foi abordado um método de recolha de energia através da rotação do pneu de um automóvel, com o objetivo de alimentar o sistema de medição da pressão do mesmo [2].

4.2 Implementação do sistema de recolha de energia

O objetivo consiste em desenvolver um protótipo de modo a estudar a possibilidade de ser desenvolvido um sistema capaz de recolher energia suficiente para carregar uma bateria de iões de lítio, ou seja, trata-se apenas de uma prova de conceito. Este protótipo é constituído por um conjunto de bobines e outro conjunto de ímanes onde se pretende que, estando estes conjuntos paralelos entre si e o mais próximo possível um do outro,

as bobines girem em relação aos ímanes, que por sua vez se mantêm imóveis, pois estão colocados num rolamento e têm um contra peso que permite utilizar a força gravítica para opor a força de rotação.

De acordo com a lei de Faraday, quando se tem um íman e uma espira com um movimento relativo entre estes, a variação do fluxo dentro da espira gera um campo eletromagnético (EMF - Electromagnetic Field). Considerando uma bobina colocada numa cavidade em forma de cilindro por enrolamento em espiral, o conjunto da bobina pode ser dividido em camadas ao longo do eixo de enrolamento e cada camada tem múltiplas espiras.

Deste modo, é induzida uma corrente elétrica nas bobines pois ao estarem perpendiculares ao campo magnético, e em rotação relativamente aos ímanes, o campo induzido vai alternando entre os seus pólos. Tendo um campo magnético variável e perpendicular a uma espira, é induzida na mesma uma pequena corrente elétrica alternada. Como são utilizadas bobines com múltiplas espiras espera-se ser possível obter a energia elétrica pretendida. A energia obtida varia consoante a velocidade de rotação, a quantidade de ímanes, a força magnética destes, o tamanho das espiras e a sua quantidade.

O conjunto de ímanes foi criado utilizando 32 ímanes de Neodímio N42, com dimensões 20x5x5 mm. Este conjunto foi feito através da colocação dos ímanes numa configuração Halbach array. Na Figura 4.1 é possível observar como é feita esta distribuição e o modelo 3D do suporte utilizado para a sua montagem, com um diâmetro exterior de 100 mm, um diâmetro interior de 22 mm, para ser colocado um rolamento, e uma altura de 10 mm.

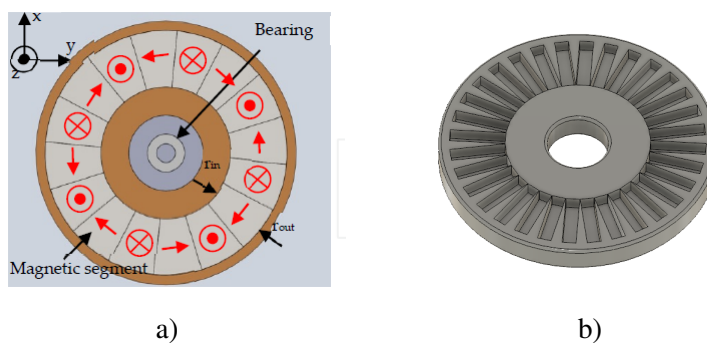


Figura 4.1: a) Distribuição utilizada - Halbach Array [2] e b) Modelo 3D realizado para criação do conjunto de ímanes

Um Halbach array é um arranjo especial de ímanes permanentes que aumenta o campo magnético de um lado do conjunto e cancela o campo para quase zero no outro lado, desta forma obtém-se um fluxo magnético entre os ímanes, não havendo praticamente nenhum fluxo no outro lado do suporte, sendo por isso um fluxo unilateral. A vantagem das

distribuições de um fluxo unilateral é a obtenção de um campo magnético duas vezes maior, cujo fluxo é confinado, e o facto de não ser produzido nenhum campo disperso no lado oposto ajuda no cancelamento do campo, que geralmente é problemático no design de estruturas magnéticas [44].

A dimensão das bobines foi tida em conta de modo a que as espiras pudessem estar todas dentro do campo magnético obtendo assim um aproveitamento máximo. O conjunto das bobines foi feito manualmente utilizando fio de cobre esmaltado de 0,1 mm tendo cada bobine um diâmetro interior de 8 mm, um diâmetro exterior máximo de 20 mm e uma altura de 11 mm. Assim, obteve-se uma média de 4350 espiras, uma resistência média de 350 Ohms e uma indutância média de 130 mH em cada uma das oito bobines produzidas. Na Figura 4.2 é possível observar o modelo 3D utilizado para a criação das bobines e o seu suporte que tem um diâmetro exterior de 100 mm, um diâmetro interior de 8 mm e diversos apoios de modo a ser possível colocar as bobines alinhadas com os ímanes.

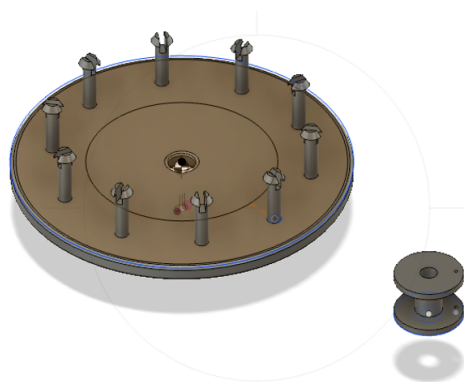


Figura 4.2: Modelo 3D realizado para a criação do conjunto das bobines

4.3 Configurações das bobines

Após alguns testes realizados com a ajuda de um torno mecânico, de modo a ser possível ter uma rotação a uma velocidade constante de 350 RPM, foi determinado que cada bobine gerava uma tensão sinusoidal com 4 a 5 Vrms, com uma frequência de 90 Hz. Com isto foram realizadas diferentes configurações com as bobines de modo a ser possível determinar qual a que fornece o máximo valor de energia após retificação da tensão.

As bobines não sendo todas iguais foram numeradas de 1 a 8 e foi medida a resistência de cada uma para que em seguida fosse possível fazer diferentes configurações equilibradas. A diferença entre estas está na forma como são feitas as ligações das bobines, em paralelo ou em série. Na Tabela 4.1 estão registadas as resistências das bobines.

Bobine	Resistência	Bobine	Resistência
1	281	5	349
2	314	6	337
3	367	7	467
4	316	8	444

Tabela 4.1: Resistência das bobines utilizadas

Para o teste de todas as configurações foi utilizado um retificador de onda completa com uma queda de tensão interna de 2 V e um condensador de 15 mF em paralelo para suavizar o *ripple* da tensão. De modo a ser observada a energia obtida a partir das diferentes configurações foram utilizadas diversas resistências acopladas em paralelo com o condensador e foi medida a tensão nos terminais da resistência. Com estas medições é possível calcular a corrente e a potência.

4.3.1 Primeira Configuração

A primeira configuração de bobines foi constituída por dois pares de quatro bobines em série, estando estes dois pares paralelos entre si. As séries foram feitas de modo a ficarem equilibradas em termos de resistência, o conjunto final apresentou uma resistência de 718,8 ohms.

Na Tabela 4.2 estão registados os resultados obtidos a partir desta configuração e na Figura 4.3 é apresentado um gráfico da variação da potência relativamente a carga aplicada.

4.3.2 Segunda Configuração

Nesta configuração as bobines foram todas colocadas em paralelo e foi obtida uma resistência de 43,8 ohms. Na Tabela 4.3 estão registados os resultados obtidos a partir desta configuração e na Figura 4.4 é possível observar a variação da potência relativamente a carga aplicada.

4.3.3 Terceira Configuração

Neste caso foram utilizadas quatro séries de duas bobines, sendo de seguida conectadas em paralelo. A resistência final do conjunto foi de 178,3 ohms. Na Tabela 4.4 estão registados os resultados obtidos a partir desta configuração e na Figura 4.5 é possível observar a variação da potência relativamente a carga aplicada.

4.3.4 Comparação das configurações

Após uma análise dos diferentes dados conclui-se que a potência máxima é obtida com uma carga resistiva equivalente à resistência da configuração das bobines. A potência máxima obtida nos testes realizados foi de cerca de 0,072581 W com a terceira configuração testada. Considerando que a potencia máxima é obtida num intervalo de tensões de 3,81 a 5,97 V e tendo em conta que para carregar uma bateria de iões de lítio é necessário é necessária uma tensão compreendida no intervalo de 3 a 4,2 V. Utilizando um circuito de carregamento deste tipo de baterias será possível conseguir utilizar a terceira configuração para carregar a bateria com uma corrente superior à corrente consumida pelo sistema de monitorização.

Resistência	Tensão (em V)	Potência (em W)	Corrente (em A)
1000000	20	0,0004	0,00002
100000	19,7	0,003881	0,000197
10000	16,5	0,027225	0,00165
5000	14,1	0,039762	0,00282
2000	10,5	0,055125	0,00525
1000	7,56	0,057154	0,00756
700	6,1	0,053157	0,008714
500	4,94	0,048807	0,00988
200	2,58	0,033282	0,0129
100	1,42	0,020164	0,0142
50	0,731	0,010687	0,01462

Tabela 4.2: Resultados obtidos utilizando diferentes cargas resistivas na primeira configuração



Figura 4.3: Gráfico da variação potência obtida na primeira configuração

Resistência	Tensão (em V)	Potência (em W)	Corrente (em A)
1000000	5,45	2,97025E-05	0,00000545
10000	5,01	0,00251001	0,000501
5000	4,84	0,00468512	0,000968
2000	4,51	0,01017005	0,002255
1000	3,64	0,0132496	0,00364
500	3,23	0,0208658	0,00646
200	2,54	0,032258	0,0127
100	1,90	0,0361	0,019
50	1,34	0,035912	0,0268
33	1,02	0,031527273	0,030909091

Tabela 4.3: Resultados obtidos utilizando diferentes cargas resistivas na segunda configuração

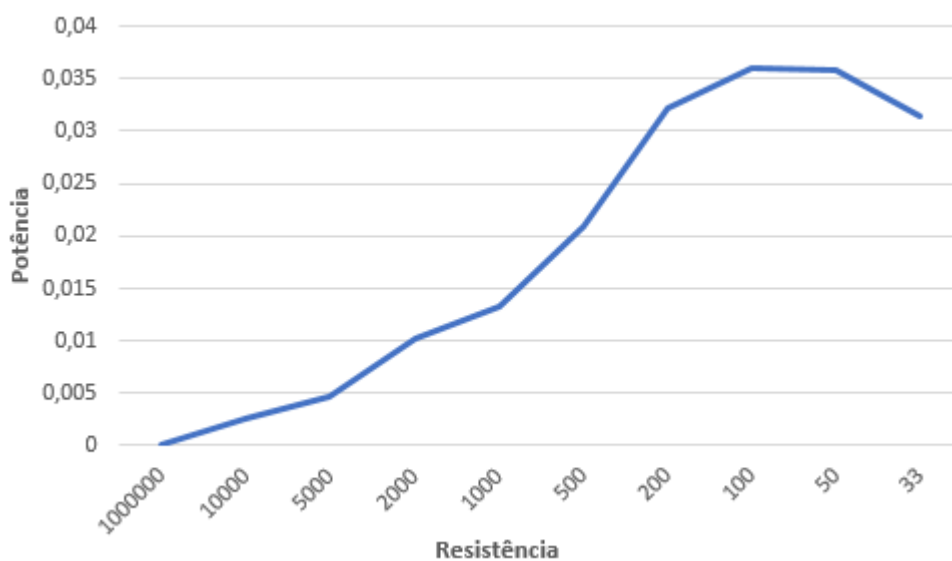


Figura 4.4: Gráfico da variação potencia obtida na segunda configuração

Resistência	Tensão (em V)	Potência (em W)	Corrente (em A)
10000	10	0,01	0,001
2000	8,86	0,0392498	0,00443
1000	7,6	0,05776	0,0076
500	5,97	0,0712818	0,01194
200	3,81	0,0725805	0,01905
100	2,42	0,058564	0,0242

Tabela 4.4: Resultados obtidos utilizando diferentes cargas resistivas na terceira configuração

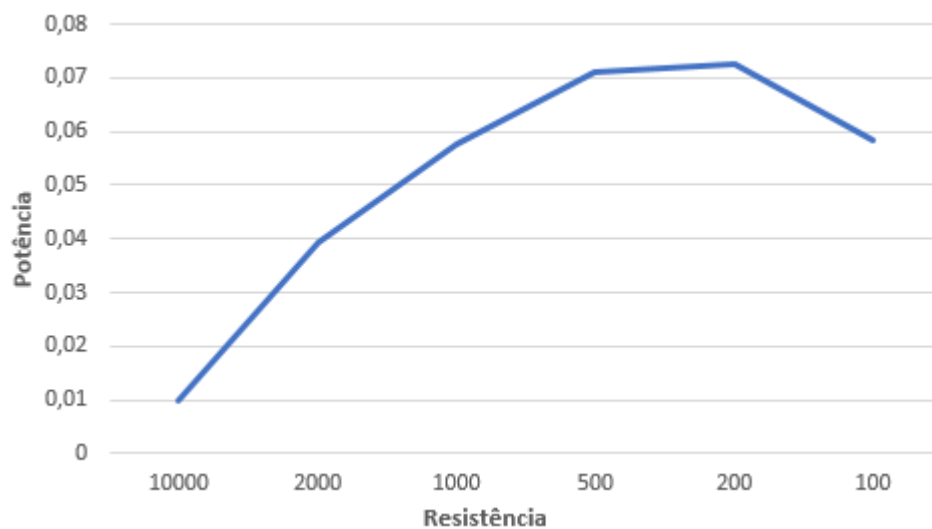


Figura 4.5: Gráfico da variação potência obtida na terceira configuração

4.4 Testes e Resultados

Após terem sido configuradas as bobines é possível entrar na fase de testes, na qual se pretende confirmar a eficiência com que se consegue carregar a bateria. Desta forma foi necessário realizar modificações no sistema onde foram escolhidos novos díodos de modo a diminuir as perdas na retificação. Foram utilizados quatro díodos *Schottky* BAT86 [45] para fazer uma ponte retificadora de onda completa que, de acordo com as características deste componente, terá uma queda máxima de 900 mV. Em paralelo ao condensador foi adicionada a placa PRT-14380 [46], da *SparkFun*, na qual já está incluído o MCP73831 [47], um carregador de baterias de íons de lítio. Na placa é possível configurar a corrente máxima a ser fornecida à bateria. Visto que este carregador é sensível aos níveis de tensão a que está sujeito foi necessário utilizar um regulador LDO, o LM2930T-5 [48], para garantir que a tensão não ultrapassava os 5 V. A utilização deste regulador provocou um

aumento nas perdas da energia a ser obtida a partir deste sistema, levando a uma diminuição no rendimento obtido. Na Figura 4.6 é possível observar as bobines e o circuito utilizado para o controlo da recolha de energia.

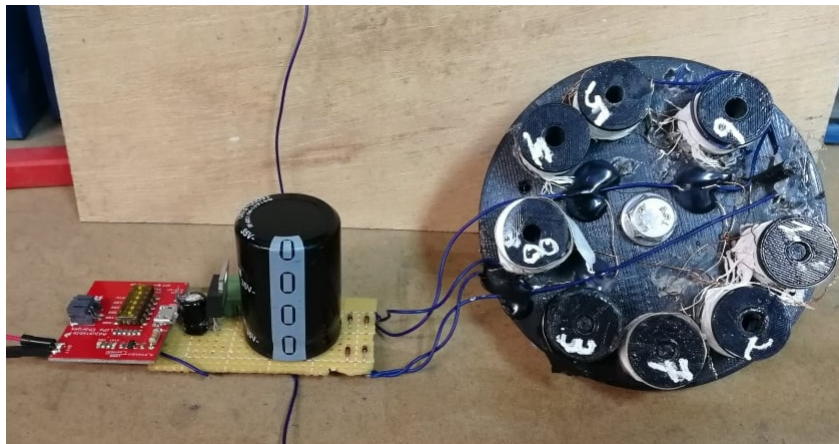


Figura 4.6: Bobines e circuito utilizado para o controlo da recolha de energia

Para testar o sistema recorreu-se novamente ao torno mecânico, onde foi colocado o conjunto de ímanes a uma rotação uma 350 RPM e o conjunto de bobines foi colocado em paralelo e completamente imobilizado. Com recurso a um amperímetro verificou-se que foi possível carregar a bateria com uma corrente média de 7,10 mA. Realizou-se também a medição da corrente na entrada do LDO verificando-se um valor de 18,28 mA, levando a concluir que existem perdas de 61,16% no conjunto do LDO e do carregador da bateria. Na Figura 4.7 é apresentado um exemplo do que era possível observar durante estas medições, no qual se verificou, uma tensão média, aos terminais do condensador, de 3,84 V estando portanto a ser recolhidos cerca de 70,195 mW. No caso da bateria, obteve-se uma tensão média de 3,52 V, resultando num fornecimento à bateria de 24,992 mW concluindo-se que o rendimento do circuito utilizado, no momento da medição, era de 35,6%.

Após o teste anterior foi realizada a montagem equivalente à que poderá vir a ser aplicada num rolo de rotogravura. Nesta montagem foi colocado no mesmo veio o conjunto das bobines e o conjunto dos ímanes. No conjunto dos ímanes foi colocado um rolamento e foi acoplado um contrapeso, desta forma quando o veio estiver em rotação o conjunto tende a estabilizar numa certa posição, que depende da massa do contrapeso e da energia que esta a ser obtida nas bobines, isto porque dependendo da energia absorvida o atrito electromagnético poderá provocar a rotação sincronizada dos ímanes com as bobines. Para evitar isto foi realizada a calibração do peso colocando as bobines em curto-circuito de forma a verificar se o conjunto não entrava em rotação.

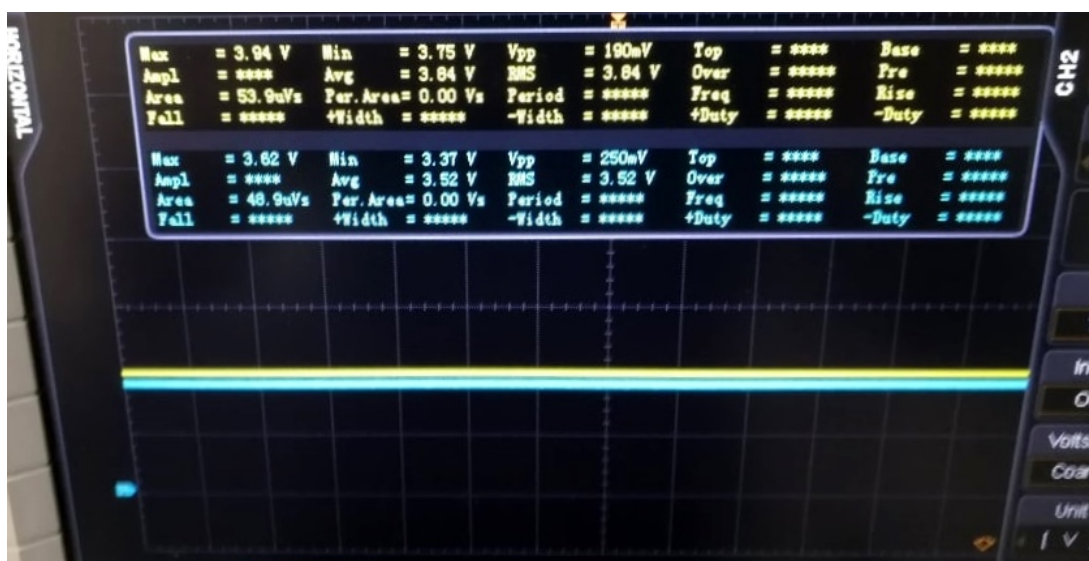


Figura 4.7: Medição registrada durante o carregamento de uma bateria de íons de lítio utilizando o *energy harvesting*

Ao conjunto de bobinas foi acoplada toda a electrónica e a bateria, de modo a ser possível verificar o carregamento da mesma. Como o sistema se encontra em constante rotação não é possível medir a corrente obtida pelo gerador, sendo que apenas foi possível analisar o carregamento da bateria a partir da existência de um led azul na placa PRT-14380, que acende caso esteja a carregar uma bateria, o que se verificou nos testes realizados. Na Figura 4.8 está presente a montagem final do sistema de *energy harvesting*.



Figura 4.8: Montagem final do sistema de *energy harvesting*

4.5 Baterias

O sistema desenvolvido no Capítulo 3 apresenta a necessidade de ser alimentado por uma bateria, de modo a ter capacidade de funcionar por longos períodos de tempo, sem que seja necessária a intervenção humana. Para calcular a capacidade mínima necessária, em mAh, recorreu-se aos consumos do sistema medidos na saída do regulador e cujos valores foram 1,60 mA, no modo ativo, e 173 μ A, no modo inativo. Assim, desprezando as perdas de um possível regulador de tensão, esta capacidade foi calculada em função do número de horas no modo ativo e no modo inativo e para diferentes períodos de tempo: um dia, um mês, um ano e cinco anos. No caso da capacidade necessária para um mês, esta foi calculada supondo 22 dias úteis e 8 dias não úteis, ou seja, para os 22 dias úteis é usada a capacidade necessária para um dia e nos 8 dias não úteis considera-se que o sistema está inativo. Todos estes resultados estão presentes na Tabela 4.5.

Horas Ativo	Horas Inativo	Consumo Diário	Consumo Mensal	Consumo Anual	Consumo em 5 Anos
0	24	4,15	124,56	1494,72	7473,60
1	23	5,58	155,95	1871,45	9357,24
2	22	7,01	187,35	2248,18	11240,88
3	21	8,43	218,74	2624,90	13124,52
4	20	9,86	250,14	3001,63	15008,16
5	19	11,29	281,53	3378,36	16891,80
6	18	12,71	312,92	3755,09	18775,44
7	17	14,14	344,32	4131,82	20659,08
8	16	15,57	375,71	4508,54	22542,72
9	15	17,00	407,11	4885,27	24426,36
10	14	18,42	438,50	5262,00	26310,00
11	13	19,85	469,89	5638,73	28193,64
12	12	21,28	501,29	6015,46	30077,28
13	11	22,70	532,68	6392,18	31960,92
14	10	24,13	564,08	6768,91	33844,56
15	9	25,56	595,47	7145,64	35728,20
16	8	26,98	626,86	7522,37	37611,84
17	7	28,41	658,26	7899,10	39495,48
18	6	29,84	689,65	8275,82	41379,12
19	5	31,27	721,05	8652,55	43262,76
20	4	32,69	752,44	9029,28	45146,40
21	3	34,12	783,83	9406,01	47030,04
22	2	35,55	815,23	9782,74	48913,68
23	1	36,97	846,62	10159,46	50797,32
24	0	38,40	878,02	10536,19	52680,96

Tabela 4.5: Capacidades necessárias em mAh para diferentes autonomias do sistema

A realização destes cálculos não contabilizou possíveis férias nem feriados, isto porque são fatores extremamente variáveis. Mas o facto de ser considerado que o sistema poderá vir a estar mais tempo ativo do que inativo leva a um valor de capacidade necessária superior, o que é uma segurança para que o sistema tenha a autonomia pretendida.

No caso de ser utilizado um sistema de *energy harvesting* poderá ser escolhida uma bateria de menor capacidade, isto porque à medida que o rolo gira a bateria vai sendo carregada. Considerando que uma bateria com a capacidade de suportar o sistema ligado no modo inativo durante um ano seja suficiente para que seja garantido o bom funcionamento de todo o sistema, existe a possibilidade de utilizar uma bateria de botão, uma de polímero de íões de lítio ou uma cilíndrica de íões de lítio. As vantagens de ser utilizada uma bateria de botão são o seu tamanho reduzido (35,2 mm diâmetro por 5,7 mm altura), a capacidade de ser integrada na placa do sistema de monitorização e o facto de serem mais seguras por apresentarem um invólucro em metal. No entanto, apresenta uma capacidade máxima de 500 mAh por bateria, sendo assim necessário utilizar múltiplas em paralelo para ser obtida a capacidade pretendida. Um exemplo de uma bateria de este tipo é a RJD3555 [49].

As baterias de polímero de íões lítio por norma são retangulares, têm espessura reduzida e apresentam diversas capacidades e dimensões, sendo possível dimensionar uma bateria de forma a obter-se a capacidade e dimensão pretendida. Contudo o seu invólucro é frágil sendo este tipo de bateria é mais perigoso para aplicação em certos ambientes inflamáveis. Para superar isto é necessário encapsular estas baterias em algum material protetor. Como exemplo para este tipo de bateria tem-se a que foi usada nos testes do sistema, MIKROE-1120 [50], que apresenta uma capacidade de 2000 mAh, 63 mm de comprimento, 43,5 mm de largura, 7,0 mm de altura e uma massa de 45 g.

A utilização de baterias cilíndricas de íões de lítio permite obter maiores capacidades e estas apresentam invólucros resistentes. Por norma tem formas cilíndricas sendo a bateria mais comum a 18650, que tem 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento, o que poderá ser uma desvantagem dependendo do espaço disponível para a colocação do sistema. Uma bateria deste tipo que pode ser aplicada é a INR18650MJ1 [51], com uma capacidade de 3500 mAh. Na Figura 4.9 estão presentes as imagens das três baterias de exemplo escolhidas e que podem ser aplicadas no caso em que será utilizado o *energy harvesting*.

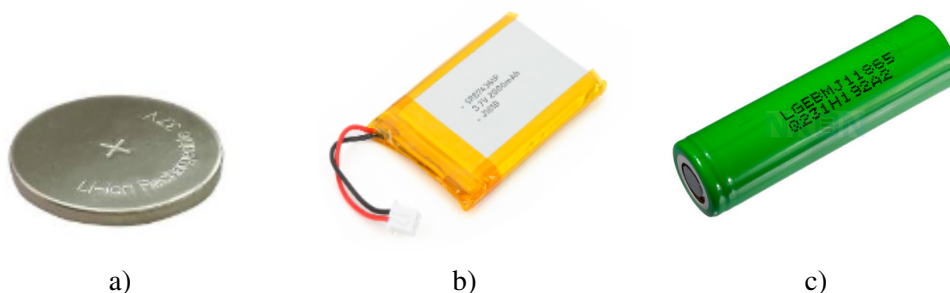


Figura 4.9: a) RJD3555, b) MIKROE-1120 e c) INR18650MJ1

Contudo existe a possibilidade de não ser utilizado um sistema de *energy harvesting*, neste caso terá de ser estimada a capacidade necessária tendo em conta o número médio de horas de utilização diária do cilindro e o número de anos que se espera que o rolo esteja no cliente. Tendo por base a Tabela 4.5 e considerando um cilindro que irá ser utilizado em média 8 horas por dia e que esteja no cliente num período de 5 anos é possível concluir que no mínimo será necessário uma bateria, ou conjunto de baterias, com uma capacidade igual a 22542,72 mAh.

Neste caso o tipo de baterias mais indicado são as baterias de iões de lítio ou as baterias de fosfato de ferro-lítio (*lithium iron phosphate* - LiFePO₄), em que ambos os tipos existem no formato cilíndrico e de paralelepípedo, normalmente designadas por polímero. Foi escolhido um exemplar de cada tipo para satisfazer o exemplo proposto e na Tabela 4.6 é possível observar a comparação realizada com base na tensão nominal, capacidade, ciclos carregamento, dimensões, massa e número de células necessário para conseguir a capacidade desejada.

Modelo	Tipo	Tensão Nominal	Capacidade	Ciclos	Diametro	Comprimento	Largura	Altura	Massa	Nº Células necessárias
INR21700-50E [52]	Cilíndrica de iões de lítio	3,6 V	5000 mAh	500	21 mm	71 mm	-	-	69 g	5
HA055275 [53]	Polímero de iões de lítio	3,7 V	21 Ah	500	-	275 mm	55 mm	10,5 mm	406 g	1
LFP-40152S [54]	Cilíndrica de LiFePO ₄	3,2 V	15 Ah	2000	40 mm	152 mm	-	-	480 g	2
100122200L [55]	Polímero de LiFePO ₄	3,2 V	20 Ah	2000	-	201 mm	122,5 mm	10,2 mm	512 g	1

Tabela 4.6: Comparação de possíveis baterias para o exemplo proposto

As baterias de LiFePO₄ apesar de apresentarem uma tensão nominal de apenas 3,2 V, são aplicáveis no sistema pretendido, pois o microprocessador escolhido funciona com tensões de 1,8 a 3,6 V, o RTC de 2,38 a 5,5 V e a IMU de 1,71 a 3,6 V. A utilização deste tipo de bateria sem regulador de tensão é possível mas teria de ser verificada primeiro a sua tensão máxima de modo a esta não danificar componentes.

Analizando a tabela verifica-se que as baterias de LiFePO₄ apresentam um número de ciclos quatro vezes superior mas também dimensões e massas superiores. Por outro lado, as baterias de iões de lítio apresentam uma tensão nominal superior e no caso da bateria de polímero de iões de lítio capacidade superior e a possibilidade de apenas ser utilizada uma célula.

Tendo em conta todos estes fatores, a melhor opção será a utilização da bateria cilíndrica de iões de lítio, INR21700-50E, pois permite o ajuste da capacidade utilizada através da variação do número de células. Apesar de ter menor capacidade por célula a massa total do conjunto necessário é menor que a das restantes opções. O volume ocupado por

esta configuração também é o menor e a capacidade resultante de todas as células também é superior às restantes.

4.6 Conclusões

O desenvolvimento do *energy harvesting* começou com a análise e comparação de diferentes sistemas de recolha de energia, todos eles abordados na revisão bibliográfica anteriormente realizada. Através desta análise foi possível escolher o melhor sistema a implementar tendo em conta o objetivo pretendido.

O protótipo implementado atingiu a meta pretendida sendo que, com a velocidade de rotação imposta pelo problema, foi possível obter uma corrente de carga superior à mínima pretendida. Contudo foi verificado que o rendimento do circuito utilizado é baixo, o que impossibilita a obtenção de uma corrente de carregamento superior. Assim, conclui-se que é possível recolher energia a partir do movimento rotacional dos cilindros de rotogravura.

Como alternativa a este sistema considerou-se a utilização de baterias e, depois de uma análise de mercado sobre baterias de iões de lítio verificou-se que é possível alimentar todo o sistema de monitorização por longos períodos de tempo apenas com um ciclo de carga, ou seja, não havendo necessidade de as carregar durante o período em que o cilindro se encontra a ser utilizado num determinado cliente. Apesar do volume que poderá ser ocupado pelas baterias e da necessidade de as proteger devido à possível atmosfera perigosa, este volume pode vir a ser menor comparativamente ao sistema de recolha de energia e permite ainda um melhor equilíbrio do rolo de rotogravura.

Desta forma conclui-se que, dependendo das dimensões do cilindro em que será implementado o sistema de monitorização e da autonomia que é pretendida para o mesmo, será necessário escolher entre a utilização de uma bateria de menores dimensões, que exige a aplicação de *energy harvesting*, e a utilização de múltiplas baterias em paralelo de modo a ser obtida a capacidade pretendida.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho futuro

Nesta dissertação foi desenvolvido um sistema de monitorização e um protótipo de um sistema de *energy harvesting* com o intuito de serem ambos aplicados em rolos de rotogravura, de modo a ser possível monitorizá-los por longos períodos de tempo. Os sistemas foram desenvolvidos em separado para facilitar a sua implementação e o seu teste.

O sistema de monitorização foi todo ele desenvolvido nesta dissertação, onde começou por ser feita uma escolha de componentes, que envolveu um estudo do que poderia ser necessário para criar o sistema em que foram tidas em conta algumas limitações técnicas por parte das instalações da FEUP levando a uma gama de componentes mais reduzida. Para este sistema recorreu-se a placas de desenvolvimento que permitiram desenvolver o sistema de uma forma modular e gradual, ou seja, programar e controlar cada componente individualmente e com uma mais fácil interpretação dos problemas que surgiam.

Depois de se obter um esquemático funcional do sistema pretendido foi desenvolvida uma placa onde foi colocado todo o *hardware*. Nesta placa todos os componentes atingiram as expectativas do seu funcionamento excepto o regulador de tensão, que apresentou valores baixos no rendimento obtido, levando a concluir que não foi o melhor para a integração do sistema na aplicação final.

Analisando os testes realizados e os resultados obtidos é possível concluir que os objectivos propostos nesta dissertação foram atingidos, sendo que foi possível medir a velocidade média de rotação, calcular o número de voltas, obter o tempo de funcionamento e registar quedas.

O desenvolvimento do *energy harvesting* começou com a análise e comparação de diferentes sistemas de recolha de energia, que permitiu a escolha do melhor sistema a implementar de modo a ser possível atingir o objetivo pretendido. Depois disto procedeu-se à criação de um prototipo, cujas dimensões foram baseadas num artigo e limitadas

pelo espaço disponível para posteriores testes, isto é, as dimensões do torno mecânico. A existência de diversas combinações de bobines fez com que fosse necessário testar múltiplas configurações, de modo a determinar com qual se obtém a máxima potência nos níveis de tensão pretendidos.

Os testes que foram realizados permitiram concluir que foi possível atingir a meta pretendida, isto é, foi possível carregar uma bateria de íões de lítio com uma corrente de carga superior à corrente utilizada pelo sistema de monitorização no modo ativo, o que significa que iria carregar a bateria e fornecer energia ao sistema de monitorização. Verificou-se que o rendimento obtido no circuito de controlo da tensão e corrente é baixo o que impossibilita a obtenção de uma corrente de carregamento superior à obtida.

Foi também realizado um estudo sobre baterias de íões de lítio disponíveis no mercado com o objetivo de verificar quais as que poderiam ser utilizadas em conjunto com o *energy harvesting* de modo a diminuir o espaço ocupado no cilindro e também verificar a possibilidade de todo o sistema de monitorização ser alimentado por uma bateria de grande capacidade, ou por múltiplas de menor capacidade em paralelo. Com este estudo foi possível concluir que é possível utilizar apenas baterias para obter grandes autonomias sem ter que as carregar durante o período em que o cilindro se encontra no cliente.

Com esta informação sobre as baterias e com base no trabalho desenvolvido relativamente ao *energy harvesting* concluí-se que, dependendo das dimensões disponíveis e da autonomia pretendida para o sistema de monitorização, vão haver casos em que será preferível aplicar a recolha de energia e outros em que será melhor serem utilizadas apenas baterias.

Assim, de acordo com o trabalho desenvolvido e analisando os resultados obtidos foi concluído que no futuro seria interessante trabalhar nos seguintes aspectos:

- Escolher um regulador de tensão com um melhor rendimento de modo a ser diminuído o consumo do mesmo;
- Diminuir a dimensão da placa do sistema de monitorização e estudar qual a melhor forma para este ser acoplado ao cilindro.
- Dimensionar um protótipo, do *energy harvesting*, adequado a ser aplicado nos cilindro de rotogravura;
- Desenvolver um método para medir a corrente fornecida à bateria com o sistema todo montado no mesmo veio;
- Estudar a possibilidade de ser aplicado um retificador baseado em transístores MOSFET e de ser regulado o carregamento de uma bateria com rastreamento do ponto de potência máxima do sistema de recolha de energia;

- Desenvolver um método para melhorar a escolha entre a utilização de *energy harvesting* ou um conjunto de baterias dependendo da dimensão do cilindro, do espaço disponível e da autonomia pretendida.

Anexo A

Código desenvolvido

```
#define rtc 0xD0
//desligar SQW
i2cbuf[0] = 0x13;
i2cbuf[1] = 0b00000000;
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c3, rtc, i2cbuf, 2, 10);

//Limpar bit HT
i2cbuf[0] = 0x0C;
i2cbuf[1] = 0b00000000;
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c3, rtc, i2cbuf, 2, 10);

//Defenir hora e data
i2cbuf[0] = 0x00;
i2cbuf[1] = 0x00;           //milisegundos
i2cbuf[2] = 0x00;           //segundos
i2cbuf[3] = 0b00100111;     //min
i2cbuf[4] = 0b00011001;     //hora
i2cbuf[5] = 0b00000010;     //dia da semana
i2cbuf[6] = 0b00101000;     //dia
i2cbuf[7] = 0b00000111;     //mes
i2cbuf[8] = 0b00100000;     //ano
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c3, rtc, i2cbuf, 8, 10);

//ativar OTP -> calibração de fabrica
i2cbuf[0] = 0x13;
i2cbuf[1] = 0b00000001;
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c3, rtc, i2cbuf, 2, 10);
HAL_Delay(4000);

//limpar bit OF
i2cbuf[0] = 0x0F;
i2cbuf[1] = 0b00000000;
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c3, rtc, i2cbuf, 2, 10);
```

Figura A.1: Código desenvolvido para inicialização do RTC

```

//Configuração da IMU
//configuração da frequência de medição dos sensores
lsm6dsr_xl_data_rate_set(&dev_ctx, LSM6DSR_XL_ODR_52Hz);
lsm6dsr_gy_data_rate_set(&dev_ctx, LSM6DSR_GY_ODR_52Hz);
//configuração da sensibilidade dos sensores
lsm6dsr_xl_full_scale_set(&dev_ctx, LSM6DSR_16g);
lsm6dsr_gy_full_scale_set(&dev_ctx, LSM6DSR_4000dps);
//Configuração do modo de operação dos sensores
lsm6dsr_xl_power_mode_set(&dev_ctx, LSM6DSR_LOW_NORMAL_POWER_MD);
lsm6dsr_gy_power_mode_set(&dev_ctx, LSM6DSR_GY_NORMAL);

//Definição do tempo para detecção de atividade -> 19.23 ms (= 1 * 1 / ODR_XL)
lsm6dsr_wkup_dur_set(&dev_ctx, 0x01);
//Definição do tempo para a detecção de inatividade -> 9.85 s (= 1 * 512 / ODR_XL)
lsm6dsr_act_sleep_dur_set(&dev_ctx, 0x01);
//Definição do peso de 1 bit no threshold (FS_XL/(2^8))
lsm6dsr_wkup_ths_weight_set(&dev_ctx, 1);
//Definição do threshold para ativação -> 62.5 mg por bit => 1*16000/2^8=63,5 mG
//Quanto mais bit menos sensível ficara.
lsm6dsr_wkup_threshold_set(&dev_ctx, 0x01);
//Configuração do modo de inatividade ->
//acelerômetro em baixo consumo e o giroscópio desligado
lsm6dsr_act_mode_set(&dev_ctx, LSM6DSR_XL_12Hz5_GY_PD);

// Configuração do int1 para ficar ativo quando IMU sair do modo de poupança
lsm6dsr_pin_int1_route_get(&dev_ctx, &int1_route);
int1_route.md1_cfg.int1_wu = PROPERTY_ENABLE;
lsm6dsr_pin_int1_route_set(&dev_ctx, &int1_route);
// Configuração do int2 para detectar quando o IMU entra no modo de poupança
lsm6dsr_pin_int2_route_get(&dev_ctx, &int2_route);
int2_route.md2_cfg.int2_sleep_change = PROPERTY_ENABLE;
lsm6dsr_pin_int2_route_set(&dev_ctx, &int2_route);

```

Figura A.2: Configuração da IMU

```

void enter_Run(void) {
    /* Enable Clocks */
    RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_PWREN;
    //FLASH->ACR |= FLASH_ACR_RUN_PD;
    /* Force the regulator into main mode */
    // Reset LPRUN bit
    PWR->CR &= ~( PWR_CR_LPRUN);
    // LPSSDR can be reset only when LPRUN bit = 0;
    PWR->CR &= ~( PWR_CR_LPSSDR);

    // Reinitialize peripherals dependent on clock speed
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_USART2_UART_Init();
    MX_I2C3_Init();
    MX_SPI1_Init();
    MX_FATFS_Init();
}

```

Figura A.5: Função utilizada para a configuração do modo funcionamento normal

```

void enter_LPRun(void) {
    /* 1. Each digital IP clock must be enabled or disabled by using the
       RCC_APBxENR and RCC_AHBENR registers */
    RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_PWREN;

    /* 2. The frequency of the system clock must be decreased to not exceed the
       frequency of f_MSI range1. */
    Config_SysClk_MSI_65();

    // Reinitialize peripherals dependent on clock speed

    /* 3. The regulator is forced in low-power mode by software
       (LPRUN and LPSDSR bits set ) */
    PWR->CR &= ~PWR_CR_LPRUN; // Be sure LPRUN is cleared!

    PWR->CR |= PWR_CR_LPSDSR; // must be set before LPRUN
    PWR->CR |= PWR_CR_LPRUN; // enter low power run mode
}

```

Figura A.3: Função utilizada para a configuração do modo *Low Power Run*

```

void Config_SysClk_MSI_65(void) {
    /* Enable and Configure Clock */
    RCC->CR |= RCC_CR_MSION;
    RCC->ICSCR = ( RCC->ICSCR & ~RCC_ICSCR_MSIRANGE ) | RCC_ICSCR_MSIRANGE_0;
    while (!( RCC->CR & RCC_CR_MSIRDY))
        ; // wait until MSI is ready

    /* Switch System Clock */
    // MSI oscillator used as system clock
    RCC->CFGR = ( RCC->CFGR & ~RCC_CFGR_SW ) | RCC_CFGR_SW_MSI;
    while (( RCC->CFGR & RCC_CFGR_SWS) != RCC_CFGR_SWS_MSI)
        ; // wait unit switched

    /* Disable other clocks (excluding LSE and LSI) */
    RCC->CR &= ~( RCC_CR_HSION | RCC_CR_HSEON | RCC_CR_PLLON);

    SystemCoreClockUpdate();
}

```

Figura A.4: Função utilizada para a configuração do relógio para o modo *Low Power Run*

Anexo B

Esquemático



Referências

- [1] Joseph A. Paradiso e Thad Starner. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. 4:18–27, 2005. doi:10.1109/MPRV.2005.9.
- [2] Yu-Jen Wang, Sheng-Chih Shen, e Chung-De Chen. Wideband electromagnetic energy harvesting from a rotating wheel. *IntechOpen*, 2012. doi:http://dx.doi.org/10.5772/50739.
- [3] Dragan Dinulovic, Michael Brooks, Martin Haug, e Tomislav Petrovic. Rotational Electromagnetic Energy Harvesting System. *Physics Procedia*, 75:1244–1251, 2015. doi:10.1016/j.phpro.2015.12.137.
- [4] Mahammad A. Hannan, Md Murshadul Hoque, Aini Hussain, Yushaizad Yusof, e Pin Jern Ker. State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. *IEEE Access*, 6:19362–19378, 2018.
- [5] J. Lebet. *Living on Air — History of the ATMOS Clock*. Jaeger-LeCoultre, 1997.
- [6] James W. Stevens. Optimized thermal design of small t thermoelectric generators. SAE International, aug 1999. doi:https://doi.org/10.4271/1999-01-2564.
- [7] S.R. Vettori et al. Renewable energy flashlight, 2001. US patent 6,220,719, to Applied Innovative Technologies, Inc., Patent and Trademark Office.
- [8] P.D. Mitcheson, Tim Green, Eric Yeatman, e A.S. Holmes. Architectures for vibrationdriven micropower generators., *ieee j. microelectromech. syst.* 13: 429–440. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 13:429 – 440, 07 2004. doi:10.1109/JMEMS.2004.830151.
- [9] David L. Churchill, Michael J. Hamel, Christopher P. Townsend, e Steven W. Arms. Strain energy harvesting for wireless sensor networks. Em Vijay K. Varadan e Laszlo B. Kish, editores, *Smart Structures and Materials 2003: Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology*, volume 5055, páginas 319 – 327. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2003. URL: <https://doi.org/10.1117/12.483591>, doi:10.1117/12.483591.
- [10] Thad Starner e Joseph Paradiso. Human generated power for mobile electronics. *Low Power Electron. Des.*, páginas 1–35, 2004. doi:10.1201/9781420039559.ch45.

- [11] N.S. Shenck e J.A. Paradiso. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics. *IEEE Micro*, 21:30–42, 2001.
- [12] R.D. Kornbluh e et al. Electroelastomers: Applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation, and smart structures. Em *Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, volume 4698, páginas 254–270. Proc. SPIE, 2002.
- [13] J.F. Antaki e et al. A gait-powered autologous battery charging system for artificial organs. *ASAIO J.*, 41:M588–M595, 1995.
- [14] Tzern T. Toh, A. Bansal, Paul D. Mitcheson G. Hong, Andrew S. Holmes, e Eric M. Yeatman. A gravitational torque micro-generator for self-powered sensing. páginas 341–344, September 2007.
- [15] Tzern T. Toh, A. Bansal, Paul D. Mitcheson G. Hong, Andrew S. Holmes, e Eric M. Yeatman. Energy harvesting from rotating structures. páginas 327–330, November 2007.
- [16] Klaus Schmidt-Rohr. How Batteries Store and Release Energy: Explaining Basic Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 95(10):1801–1810, 2018. doi:10.1021/acs.jchemed.8b00479.
- [17] Aoxia Chen e Pankaj K. Sen. Advancement in battery technology: A state-of-the-art review. *IEEE Industry Application Society, 52nd Annual Meeting: IAS 2016*, páginas 1–10, 2016. doi:10.1109/IAS.2016.7731812.
- [18] B. Isidor. *Batteries in a Portable World A Handbook on Rechargeable Batteries*. Cadex Electronics Inc., 2011.
- [19] Jiadeng Zhu, Yao Lu, Chen Chen, Han Jiang, Samuel Jasper, Jennifer Leary, Dawei Li, Mengjin Jiang, e Xiangwu Zhang. Porous one-dimensional carbon/iron oxide composite for rechargeable lithium-ion batteries with high and stable capacity. *Journal of Alloys and Compounds*, 672:79–85, July 2016. doi:10.1016/j.jallcom.2016.02.160.
- [20] Guangmin Zhou, Feng Li, e Hui-Ming Cheng. Progress in flexible lithium batteries and future prospects. *Energy and Environmental Science*, 7:1307–1338, 04 2014. doi:10.1039/c3ee43182g.
- [21] Wolfgang Oelerich, Kevin Gallagher, Mark Mathias, e Damla Eroglu. Quantifying the promise of lithium–air batteries for electric vehicles. *Energy and Environmental Science*, 7:1555–1563, 05 2014. doi:10.1039/C3EE43870H.
- [22] Killian Lobato, Pedro Nunes, e Filipe Serra. Sustainable energy systems in an imaginary island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37:229–242, 09 2014. doi:10.1016/j.rser.2014.05.008.

- [23] Chunli Gong, Zhigang Xue, Sheng Wen, Yun sheng Ye, e Xiaolin Xie. Advanced carbon materials/olivine lifepo4 composites cathode for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 318:93–112, 06 2016. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.04.008.
- [24] Xin Feng, Yurui Gao, Liubin Ben, Zhenzhong Yang, Zhaoxiang Wang, e Liquan Chen. Enhanced electrochemical performance of ti-doped $\text{li}_{1.2}\text{mn}_{0.54}\text{co}_{0.13}\text{ni}_{0.13}\text{o}_2$ for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 317:74–80, 06 2016. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.03.101.
- [25] Abbas Fotouhi, Daniel Auger, Karsten Propp, Stefano Longo, e Mark Wild. A review on electric vehicle battery modelling: From lithium-ion toward lithium-sulphur. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:1008–1021, 04 2016. doi:10.1016/j.rser.2015.12.009.
- [26] SparkFun. Informações sobre acelerômetro. Último acesso: 06-02-2020. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/accelerometer-basics/all#what-is-an-accelerometer>.
- [27] SparkFun. Informações sobre giroscópio. Último acesso: 06-02-2020. URL: https://learn.sparkfun.com/tutorials/gyroscope?_ga=2.77472145.5004516.1580948446-1613303469.1579198869.
- [28] ST. Datasheet stm32l073. Último acesso: 30-07-2020. URL: https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-ultra-low-power-mcus/stm32l0-series/stm32l0x3/stm32l073rz.html.
- [29] ST. Placa nucleo-l073rz. Último acesso: 05-08-2020. URL: https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-l073rz.html.
- [30] ST. Datasheet lsm6dsr. Último acesso: 30-07-2020. URL: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm6dsr.html>.
- [31] ST. Placa de desenvolvimento steval-mki194v1. Último acesso: 09-09-2020. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-mki194v1.html>.
- [32] ST. Datasheet mt41t83. Último acesso: 29-07-2020. URL: <https://www.st.com/en/clocks-and-timers/m41t83.html>.
- [33] Autodesk. Eagle. Último acesso: 05-08-2020. URL: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>.
- [34] SparkFun. Placa adaptadora de microsd. Último acesso: 09-09-2020. URL: <https://www.sparkfun.com/products/544>.

- [35] HIROSE ELECTRIC. Adaptador de microsd - dm3d-sf. Último acesso: 09-09-2020. URL: https://pt.mouser.com/datasheet/2/185/DM3_catalog-939223.pdf.
- [36] ST. Regulador de tensão ld3985m33r. Último acesso: 05-08-2020. URL: https://www.st.com/content/st_com/en/products/power-management/linear-voltage-regulators/low-dropout-ldo-linear-regulators/high-psrr-ldo-regulators/ld3985.html.
- [37] ST. Programador stlink-v3. Último acesso: 05-08-2020. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stlink-v3set.html>.
- [38] ST. Stm32cubeide. Último acesso: 05-08-2020. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>.
- [39] ST. Application note an3060. Último acesso: 29-07-2020. URL: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/44/6f/07/84/52/06/4d/a9/CD00248402.pdf/files/CD00248402.pdf/jcr:content/translations/en.CD00248402.pdf.
- [40] ST. Biblioteca lsm6dsr. Último acesso: 30-07-2020. URL: https://github.com/STMicroelectronics/STMems_Standard_C_drivers/tree/master/lsm6dsr_STdC.
- [41] ControllersTech. Guião e biblioteca para microsd. Último acesso: 30-07-2020. URL: <https://controllerstech.com/sd-card-using-spi-in-stm32/?fbclid=IwAR38eGiYIVcmdNhYQ-6vR6NO3Xmtf5r0O7oJQR7i64kXrVgUeBmiqLJf8IY>.
- [42] Matt Mielke. Low-power modes on the stm32l0 series. Último acesso: 30-07-2020. URL: <https://www.digikey.com/eewiki/display/microcontroller/Low-Power+Modes+on+the+STM32L0+Series#Low-PowerModesontheSTM32L0Series-Low-PowerSleepMode>.
- [43] Autodesk. Fusion 360. Último acesso: 05-08-2020. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>.
- [44] James Masi. Overview of halbach magnets and their applications. *Electrical Manufacturing and Coil Winding Expo 2010-2013*, páginas 134–139, 01 2013.
- [45] Nexperia. Datasheet diodo schottky bat86. Último acesso: 31-08-2020. URL: <https://pt.mouser.com/datasheet/2/916/BAT86-1320078.pdf>.
- [46] Sparkfun. Sparkfun adjustable lipo charger. Último acesso: 01-09-2020. URL: <https://www.sparkfun.com/products/14380>.

- [47] Microchip. Datasheet do mcp73831/2. Último acesso: 01-09-2020. URL: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/GeneralIC/33244_SPCN.pdf.
- [48] Texas Instruments. Datasheet do lm2930t-5. Último acesso: 03-09-2020. URL: <https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=LM2930T-5.0/NOPB>.
- [49] Cornell Dubilier. Bateria do tipo botão rjd3555. Último acesso: 22-08-2020. URL: https://pt.mouser.com/datasheet/2/88/RJD_series-962351.pdf.
- [50] MIKROELEKTRONIKA. Bateria polímero de íões de lítio mikroe-1120. Último acesso: 22-08-2020. URL: http://www.farnell.com/datasheets/2369105.pdf?_ga=2.228859868.1313244431.1598123586-1485843512.1594215394.
- [51] LG. Bateria de íões de lítio inr18650mj1. Último acesso: 22-08-2020. URL: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/10388.pdf>.
- [52] Samsung. Bateria de íões de lítio inr21700-50e. Último acesso: 22-08-2020. URL: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/7015-INR21700-50E.pdf>.
- [53] AA Portable Power Corp. Bateria de polímero de íões de lítio ha055275. Último acesso: 22-08-2020. URL: <https://www.batteryspace.com/Prod-specs/A055275-21Ah.pdf>.
- [54] AA Portable Power Corp. Bateria de lifepo4 lfp-40152s. Último acesso: 22-08-2020. URL: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/7493.pdf>.
- [55] AA Portable Power Corp. Bateria de polímero de lifepo4 100122200l. Último acesso: 22-08-2020. URL: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/5455.pdf>.