



# **Gestão de múltiplas fontes de recolha de energia**

**Alferes de Material David José Machado Gonçalves**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientadores: Professor Doutor Pedro Nuno Mendonças dos Santos  
Professor Doutor João Paulo Neto Torres

### **Júri**

Presidente: Major (Doutor) de Transmissões Luís Xavier Mendonça Dias  
Arguente: Professor Doutor Vítor Manuel da Silva Costa  
Diretor de Curso: Tenente Coronel de Material Énio Rodrigo Pereira Chambel  
Orientador: Professor Doutor Pedro Nuno Mendonças dos Santos

**Lisboa, Dezembro 2022**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Academia Militar.

# Agradecimentos

Ao longo destes anos todos de curso e na realização desta dissertação de mestrado contei com o apoio de muita gente, aos quais quero dar uma palavra de apreço.

À minha família, por ter estado sempre comigo ao longo da minha vida, pela educação que me proporcionaram, pelo lar que me forneceram, cheio de amor, carinho e nunca me faltar nada. Quero-lhes agradecer o apoio que me deram ao longo da Academia, as palavras de encorajamento para enfrentar as adversidades, o facto de acreditarem sempre em mim diz-me muito e por isso lhes agradeço.

Quero agradecer aos meus orientadores, os professores Pedro Santos e João Torres, pela orientação que me deram ao longo deste trabalho, os conselhos, os conhecimentos, a ajuda e todo o tempo que me disponibilizaram para a concretização deste trabalho.

Quero agradecer aos camaradas dos cursos das engenharias, foram 6 anos atribulados mas divertidos.

Um agradecimento ao Instituto de Telecomunicações pelo apoio e meios disponibilizados para a concretização deste trabalho.



# Resumo

As aplicações da Internet das Coisas aumentam a cada dia que passa, e estas têm necessidade de encontrar novas formas de se auto sustentar energeticamente, sem a necessidade de utilização de uma bateria que necessitaria de ser trocada ao longo do tempo. Esta dissertação procura oferecer uma alternativa a esse problema, a não utilização de uma bateria oferecendo um circuito sustentável em termos de energia.

Neste trabalho é estudado um circuito elevador de tensão do tipo indutivo, adaptado para tensões de alimentação muito baixas, da ordem das centenas de mV. O circuito é alimentado com 2 fontes de recolha de energia: uma célula solar e um termogerador. Estas fontes fornecem energia e, através de um combinador de energia, são capazes de alimentar em simultâneo o circuito.

Este circuito para além de combinar a energia recolhida de cada fonte, impõe um fator multiplicativo na sua saída. Isto possibilita obter à saída tensões que podem atingir os valores de alimentação padrão (1.2 e 2.4 V), enquanto que a entrada recebe apenas centenas de mV. É então possível trabalhar com baixa potência mas conseguir alimentar circuitos comerciais ou circuitos em tecnologia CMOS de nós mais recentes.

## Palavras Chave

**Recolha de Energia; Ultra-baixa tensão; Internet das Coisas; Conversor; *Charge Pump*; Autónomo.**



# Abstract

The Internet of Things applications are increasing day by day, and they need to find new ways to sustain themselves without the use of a battery, which would need to be replaced over time. This dissertation seeks to offer an alternative to this problem, the non-use of a battery by offering an energetically autonomous solution for circuit bias.

In this work, a circuit solution based on an inductive step-up dc-dc converter, is studied and adapted for ultra-low voltage (undreds of mV). The circuit under study is powered by two energy harvesting sources: a solar cell and a thermogenerator. These energy sources provide power and, through an energy combiner, are able to simultaneously power the circuit.

This circuit, in addition to combining the energy collected from each source, imposes a multiplying factor to achieve standard supply voltages (1.2 and 2.4 V), while the input receives only hundreds of mV. It is then possible to work with low power but still be able to power common functional blocks in IoT systems and other applications.

## Keywords

**Energy harvesting; Ultra-low voltage; Internet of Things; Converters; Charge Pump; Autonomous.**



# Índice Geral

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Definição do Problema . . . . .	2
1.2	Motivação e Objetivos . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Sistema de recolha e gestão de energia proposto</b>	<b>15</b>
3.1	Estrutura do Trabalho a desenvolver . . . . .	16
3.2	Sistema de conversão de tensão proposto . . . . .	16
3.2.1	Dimensionamento do circuito . . . . .	16
3.2.2	Simulação do Circuito Combinador . . . . .	19
3.2.3	Oscilador LC de Collpitts . . . . .	23
3.3	Caracterização de elementos do sistema . . . . .	26
3.3.1	Célula Solar ONP1.2-12x24 . . . . .	26
3.3.2	Gerador Termoelétrico MGM250-17-10-16 . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Concretização experimental do sistema proposto</b>	<b>35</b>
4.1	Circuito testado com fonte de alimentação e gerador de sinais . . . . .	36
4.2	Fonte de alimentação e oscilador LC . . . . .	39
4.3	Fontes de <i>Energy Harvesting</i> e oscilador LC . . . . .	42
4.4	Protótipo com componentes de baixo perfil em PCB . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>51</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>53</b>



# Índice de Figuras

2.1	Sistema em diagrama de blocos [1]. . . . .	6
2.2	Diagrama de blocos do combinador DC [1]. . . . .	7
2.3	Arquitetura do combinador de energia [2] . . . . .	7
2.4	Possíveis aplicações e combinador de múltiplas fontes de energia [3]. . . . .	8
2.5	Combinador de 2 fontes de energia [3]. . . . .	9
2.6	Combinador de 3 fontes de energia [3]. . . . .	9
2.7	Diagrama do sistema proposto do combinador de múltiplas fontes [4]. . . . .	10
2.8	(a) Comparador, (b) circuito do temporizador (c) bloco classificador de 4 entrada [4]. . . . .	10
2.9	(a) Esquemático do combinador, (b) símbolo, (c) resistência de entrada no terminal de alimentação do <i>buffer</i> [4]. . . . .	11
2.10	Conversor <i>boost</i> de duas entradas [5]. . . . .	12
2.11	Formas de onda medidas no circuito [5]. . . . .	12
3.1	Diagrama de blocos que resume as diferentes partes a ser estudadas do sistema proposto	17
3.2	Circuito combinador escolhido: conversor <i>boost</i> de duas/múltiplas entradas [5] . . . . .	17
3.3	Circuito simulado para baixa tensão e diferentes valores de resistência. . . . .	20
3.4	Tensão de saída (Verde), tensão dreno Q1 (ciano), tensão dreno Q2 (magenta), corrente bobina L1 (azul) e corrente bobina L2 (vermelho). Circuito com: $V_{i1} = 0.4V$ ; $V_{i2} = 0.3V$ ; $L1 = L2 = 150\mu H$ ; $C_c = C_o = 10nF$ ; $R_{load} = 30k\Omega$ . . . . .	21
3.5	Exemplo do comportamento da corrente na bobina $I_L$ e da tensão no terminal da bobina com o dreno do transístor $V_L$ , no modo de condução descontínua de um conversor <i>boost</i> [6]	22
3.6	Relação tensão de saída e resistência de carga para diferentes valores de entrada. . . . .	22
3.7	Esquema do oscilador LC de Collpitts . . . . .	23
3.8	Sinal de oscilação do oscilador LC de Collpitts em <i>LTspiceXVII</i> com $L = 470\mu H$ , $C_1 = 10pF$ , $C_2 = 47pF$ e $R = 1.2k\Omega$ . . . . .	24
3.9	Esquema do oscilador LC de Collpitts com inversor utilizados . . . . .	25
3.10	Ondas do oscilador LC e do inversor para controlar os transístores do sistema . . . . .	25

3.11	Célula Solar ONP1.2-12x24 utilizada neste trabalho . . . . .	26
3.12	Diferentes camadas de uma célula solar [7] . . . . .	27
3.13	Curva IV da célula ONP1.2-12x24. Relação entre a corrente e a tensão a vermelho e relação entre a potência e a tensão a azul. Com linha contínua está uma irradiância a $1000W/m^2$ , simulando a potência total do sol. Com linha descontínua está uma irradiância de $250W/m_2$ simulando 1/4 da potência do sol [8] . . . . .	28
3.14	Gerador Termoeléctrico MGM250-17-10-16 utilizado . . . . .	30
3.15	Par termoeléctrico, composto por materiais do tipo n e p. O calor flui do lado quente para o lado frio e a corrente eléctrica (I) está a fluir do material tipo n para o material tipo p, devido à diferença de temperatura ( $\Delta T = T_h - T_c$ ) [9] . . . . .	31
3.16	Parâmetros de funcionamento do termogerador [10] . . . . .	32
3.17	Curva temperatura e tensão do termogerador para diferentes temperaturas [10] . . . . .	32
4.1	Bancada utilizada com osciloscópio, fonte de alimentação, multímetro e gerador de sinais	36
4.2	Ondas quadradas geradas para as entradas das <i>gates</i> com frequência de 1 MHz, amplitude 0.5 V e D=50 % . . . . .	37
4.3	Tensão nos nós LD1 e LC2, a azul e vermelho, respetivamente . . . . .	37
4.4	Sinal de controlo e tensão na bobina . . . . .	38
4.5	Tensão de saída com $100k\Omega$ . . . . .	38
4.6	Relação entre a tensão de saída e variação de V2 para diferentes valores de V1 . . . . .	39
4.7	Relação entre a tensão de saída e variação de V1 para diferentes valores de V2 . . . . .	39
4.8	Esquema do oscilador LC de Collpitts utilizado . . . . .	40
4.9	Sinal gerado pelo oscilador LC e sua inversão . . . . .	40
4.10	Tensão à saída das bobinas . . . . .	41
4.11	Tensão de saída com $100k\Omega$ . . . . .	41
4.12	Sinal gerado pela célula solar . . . . .	42
4.13	Sinal gerado pelo oscilador LC e sua inversão . . . . .	43
4.14	Tensão nos nós LD1 e LC2 . . . . .	43
4.15	Tensão de saída com $100k\Omega$ . . . . .	44
4.16	Camada superior do protótipo no programa EAGLE . . . . .	45
4.17	Camada inferior do protótipo no programa EAGLE . . . . .	45
4.18	Placa PCB com o circuito pré e pós soldadura dos componentes . . . . .	46
4.19	Tensão nos nós LD1 e LC2 . . . . .	46
4.20	Tensão de saída com $100k\Omega$ . . . . .	47
4.21	Relação entre a tensão de saída e a carga . . . . .	47
4.22	Protótipo do sistema com as fontes ligadas e uma carga de $100k\Omega$ . . . . .	48

4.23 Relação entre as duas entradas e a saída real e o valor teórico do protótipo . . . . . 48



# Índice de Tabelas

3.1	Intervalo a utilizar dos componentes dimensionados do circuito . . . . .	18
3.2	Parâmetros dos componentes fixos do circuito . . . . .	20
3.3	Parâmetros da célula solar OPN1.2-12x24 [8] . . . . .	29



# Acrónimos

<b>AC</b>	Corrente Alternada ( <i>Alternate Current</i> )
<b>COTS</b>	componentes de uso comercial ( <i>Components of the Shelf</i> )
<b>DC</b>	Corrente Contínua ( <i>Direct Current</i> )
<b>EH</b>	Recolha de Energia ( <i>Energy Harvesting</i> )
<b>FA</b>	Forças Armadas
<b>IoT</b>	Internet das Coisas ( <i>Internet of Things</i> )
<b>MCC</b>	Modo de Condução Contínua
<b>MCD</b>	Modo de Condução Descontínua
<b>MOSFET</b>	Transístor de efeito de campo ( <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> )
<b>MPPT</b>	Rastreamento de ponto de máxima potência ( <i>Maximum Power Point Tracking</i> )
<b>PCB</b>	Placa de Circuito Impressa ( <i>Printed Circuit Board</i> )
<b>RF</b>	Radio frequência
<b>SMD</b>	Dispositivos de montar ( <i>Surface Mounted Device</i> )
<b>ULP</b>	Ultra-baixo Consumo ( <i>Ultra-Low Power</i> )



# 1

## Introdução

### Conteúdo

---

1.1 Enquadramento e Definição do Problema . . . . .	2
1.2 Motivação e Objetivos . . . . .	2

---

## 1.1 Enquadramento e Definição do Problema

A Internet das Coisas (*Internet of Things*) (IoT) continua a crescer, uma vez que a tecnologia está sempre a melhorar e abrir novos possíveis caminhos. A conceção de circuitos de Ultra-baixo Consumo (*Ultra-Low Power*) (ULP) é um desses caminhos a ser explorado continuamente. Com um consumo de energia estática da ordem dos  $\mu W$ , os sistemas ULP permitem aplicações IoT, que podem funcionar a partir de uma fonte de energia limitada como uma bateria por exemplo. Algumas aplicações como redes de sensores sem fios requerem uma vida operacional muito longa sem a necessidade de substituição de bateria. Nesses casos, foi experimentado a utilização de fontes de energia alternativas como forma de prolongar a vida útil da bateria ou mesmo de a substituir.

As fontes de Recolha de Energia (*Energy Harvesting*) (EH) são dependentes do ambiente o que impõe condições duras às cargas, entre elas as diferentes aplicações da IoT. Diferentes fontes tais como solar, térmica, piezoelétrica ou Radio frequência (RF) têm densidades de energia diferentes mas podem ser combinadas para permitir um funcionamento mais robusto. Por exemplo, a recolha de energia solar é referida como sendo capaz de fornecer grandes quantidades de energia, dependendo da disponibilidade de luz ou sol. Quando as fontes de luz não estão presentes devido à sombra ou chuva, não é possível extrair tanta energia ou energia suficiente, e outras fontes de recolha de energia, tais como a recolha de energia térmica, podem ter um papel importante. O mesmo cenário de condições mais ou menos propícias aplica-se a outras fontes também.

## 1.2 Motivação e Objetivos

As aplicações IoT estão em crescimento, facilitando a comunicação e a transmissão de informações e melhorando a automatização destas entre dispositivos. De maneira que entramos num mundo onde tudo está à distância de um clique, através desta passagem automática de informação entre dispositivos, uma vasta rede conectada a todo o lado com acesso a todo o tipo de informação.

Estas aplicações IoT podem-se aplicar às Forças Armadas (FA) e no projeto do Soldado do Futuro, possibilitando a sua monitorização constantemente através de biossensores ou até de *wearables*. Estes seriam então alimentados através de um circuito de múltiplas fontes de EH. Trabalhos anteriores dentro desta área implementaram circuitos de múltiplas fontes de recolha de energia, mas cuja gestão utilizava apenas um tipo de energia de cada vez.

Com este trabalho pretende-se ultrapassar os problema que advém da utilização de apenas uma fonte de energia de cada vez, como não ter tensão suficiente para alimentar um sensor ou o sistema, e obter uma solução em que se retira energia das fontes simultaneamente com a finalidade de obter tensão suficiente, sempre que for necessário, para alimentar o sistema ou o sensor.

O objetivo é conseguir uma tensão de pelo menos 500mV do conjunto das fontes para ser aumentado através de um conversor DC-DC *Boost* para conseguirmos obter uma tensão de saída do sistema de aproximadamente 1.3V.



# 2

## **Estado da Arte**

Neste capítulo são descritos diversos trabalhos realizados no âmbito de recolha de energia, especificamente na utilização de várias fontes em simultâneo em circuitos de ultra-baixo consumo. Esta revisão é importante para a realização deste trabalho, uma vez que o estudo de trabalhos anteriores indica as dificuldades existentes neste tema, o que já existe feito e qual a direção que a comunidade científica está a adotar. São apresentados 5 trabalhos de relevo no âmbito do tema deste projeto.

Em [1] é apresentado um sistema de recolha de energia de diferentes fontes, que a converte através de um conversor DC-DC *Buck-Boost*, fig.2.1. Este sistema recolhe energia através de fontes de energia solar, de vibração e de RF.

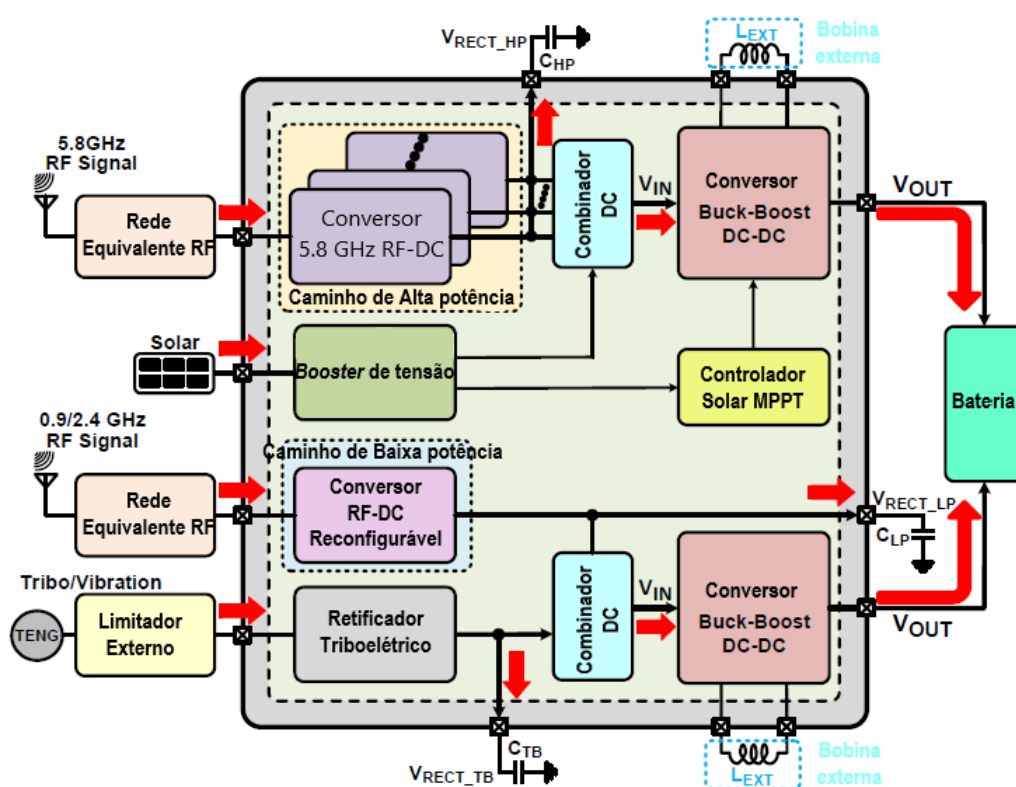


Figura 2.1: Sistema em diagrama de blocos [1].

A recolha é realizada em pares, onde o primeiro par consiste numa fonte de energia de RF para sinais de 5,8 GHz e de energia solar. O segundo par consiste numa fonte de energia triboelétrica e de RF para sinais de 0,9 e 2,4 GHz. A junção das energias recolhidas é realizada através de um DC Combiner, fig.2.2.

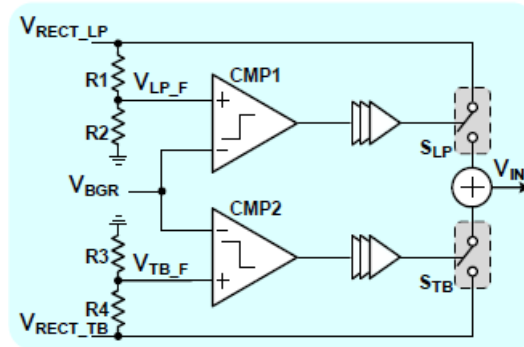


Figura 2.2: Diagrama de blocos do combinador DC [1].

Este combinador consiste em dois comparadores que comparam a tensão proveniente das fontes com uma tensão de referência. Quando a tensão da fonte é superior à tensão de referência, é ativado um interruptor que permite a ligação da fonte para o conversor *Buck-Boost*. Isto permite o funcionamento individual ou combinado das fontes.

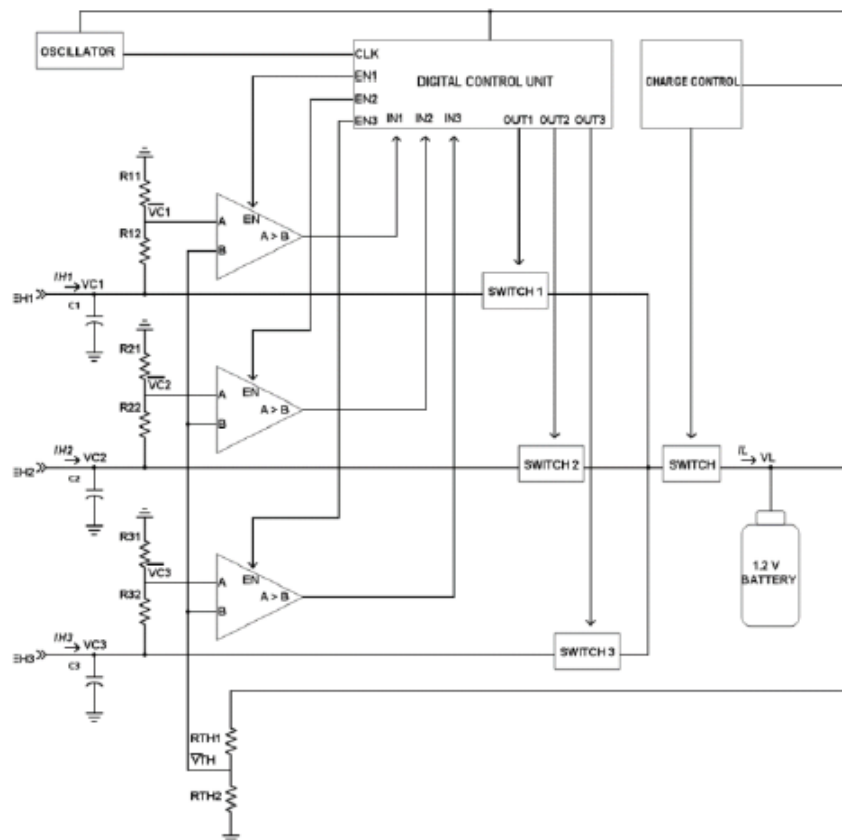


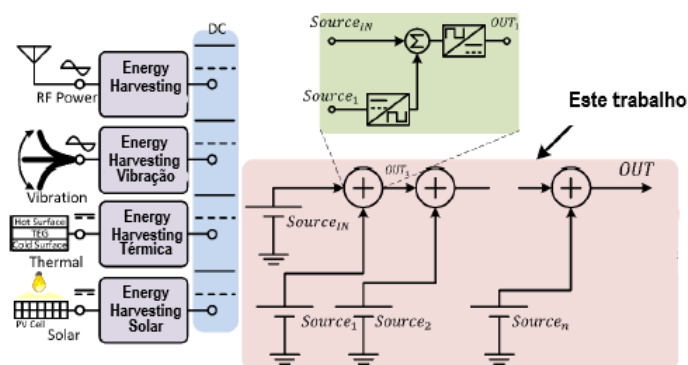
Figura 2.3: Arquitetura do combinador de energia [2]

Em [2] é apresentado o circuito de um combinador de energia de múltiplas fontes de energia implementado com controlo de carga (*Charge Control*), fig.2.3. Este circuito utiliza uma técnica de deteção

de tensão com um algoritmo de controlo, que combina as entradas das fontes de energia através de interruptores. Os principais blocos deste circuito são as fontes de energia, a unidade de controlo digital (*Digital Control Unit*), e o controlo de carga.

O controlo digital é realizado através de portas lógicas. Este verifica se existe alguma fonte de energia que tenha carregado o seu condensador à entrada e que ainda tenha tensão superior a uma tensão de referência predefinida. Assim, a unidade de controlo sabe que existe uma fonte disponível para utilizar e passa a alimentar carga. No caso de existir mais do que uma fonte de energia para o carregamento, a unidade de controlo irá ligar a fonte à carga alternadamente, mas não em simultâneo.

Em [3] é apresentado um sistema mais simples, sendo dividido em 3 principais partes: as fontes de energia, o combinador de múltiplas fontes e o auto-arranque do sistema. Porém, o autor considerou importante a realização de um combinador para múltiplas fontes de energia. Por conseguinte, apresentou um circuito combinador de duas fontes e, para além disso, desenvolveu e apresentou outro circuito combinador mas para 3 fontes diferentes. O autor procurou que os circuitos pudessem ter inúmeras possibilidades de fontes como é possível observar na fig.2.4.



**Figura 2.4:** Possíveis aplicações e combinador de múltiplas fontes de energia [3].

O circuito apresentado para combinar diferentes fontes de energia está representado na fig. 2.5. Este combinador é baseado num *charge pump* de condensadores comutados com a utilização de *MOS-FETs*. Um *charge pump* é um circuito que recebe um sinal Corrente Contínua (*Direct Current*) (DC) e através da utilização de condensadores comutados, consegue aumentar ou diminuir essa tensão.

Neste circuito é pretendido adicionar a tensão da *Source1* ( $V_1$ ) à tensão da *SourceIN* ( $V_{IN}$ ). A tensão  $V_1$  é convertida em Corrente Alternada (*Alternate Current*) (AC) através do oscilador  $I_0$  com dois sinais de saída desfasados que comandam os controladores  $I_1$  e  $I_2$ . Esses controladores são alimentados pela fonte1, o que permite obter à sua saída a tensão  $V_1$  quando ativados. À saída dos controladores encontram-se os condensadores comutados.

A malha composta pelo par, M1 e M2, define a tensão DC nos nós intermédios,  $v_{i1}$  e  $v_{i2}$ , equivalente a  $V_{IN}$  em condições de circuito aberto. O par M3-M4 actua como um rectificador de onda completa e o

sinal,  $OUT_i$ , é filtrado com um condensador de saída, não representado no circuito. Em condições de circuito aberto,  $OUT_i$  equivale à tensão de pico de  $v_{i1}$  e  $v_{i2}$  que equivale a  $V_1$  mais  $V_{IN}$ .

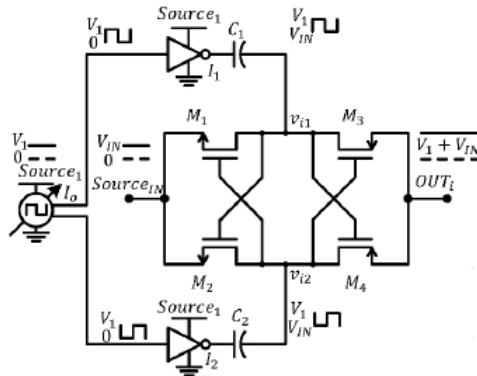


Figura 2.5: Combinador de 2 fontes de energia [3].

Para além do combinador de duas entradas, o autor implementou também um combinador de 3 entradas, fig. 2.6. O funcionamento é semelhante ao anterior, é realizada a combinação de duas entradas e depois é acrescentada a terceira.

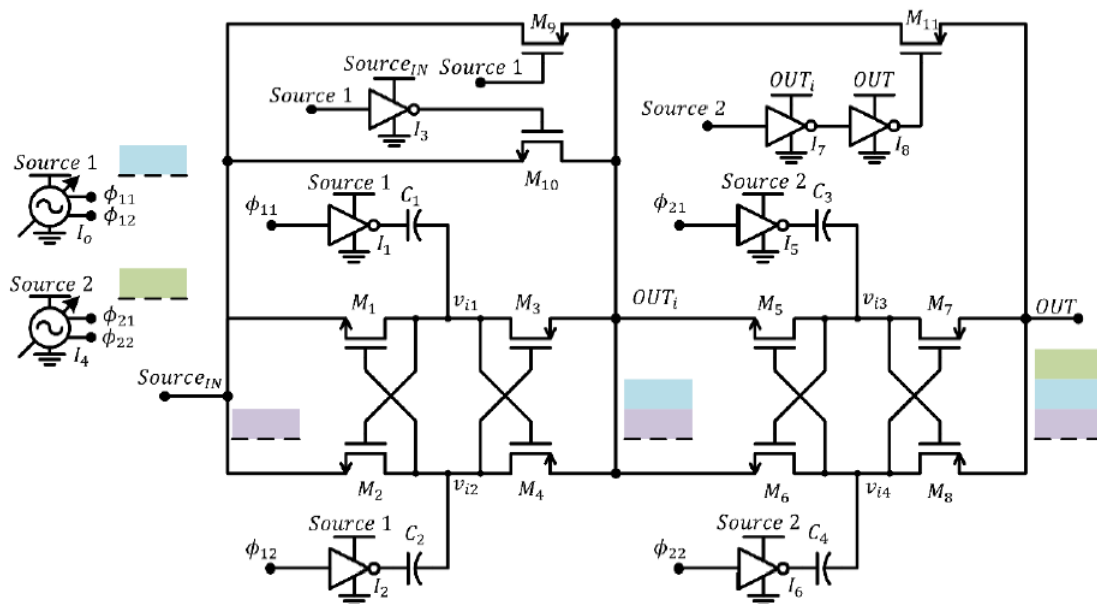


Figura 2.6: Combinador de 3 fontes de energia [3].

Em [4] é abordado um circuito totalmente integrado de um combinador que utiliza Rastreamento de ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking*) (MPPT), de quatro fontes de recolha de energia, fig.2.7. Este circuito combina as duas fontes de energia com maior potência para ligar à carga. Para a escolha dessas duas fontes que geram mais potência, é realizada uma classificação das fontes com o

uso de 6 comparadores de *gate* comum que comparam a tensão das fontes entre elas, fig.2.8.

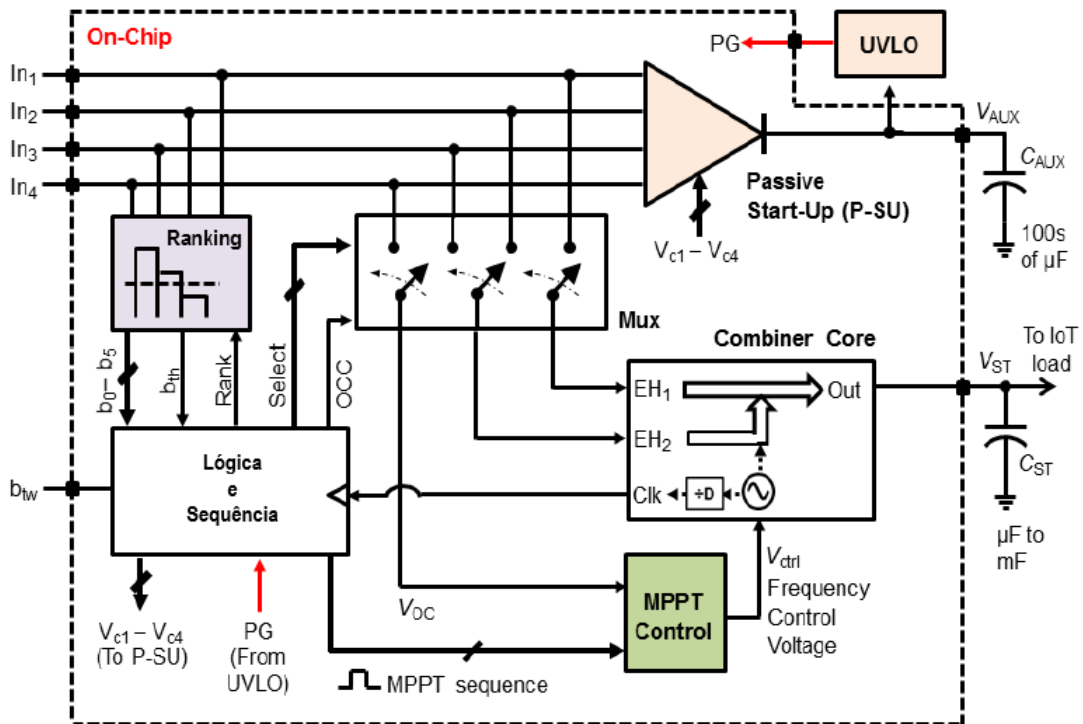


Figura 2.7: Diagrama do sistema proposto do combinador de múltiplas fontes [4].

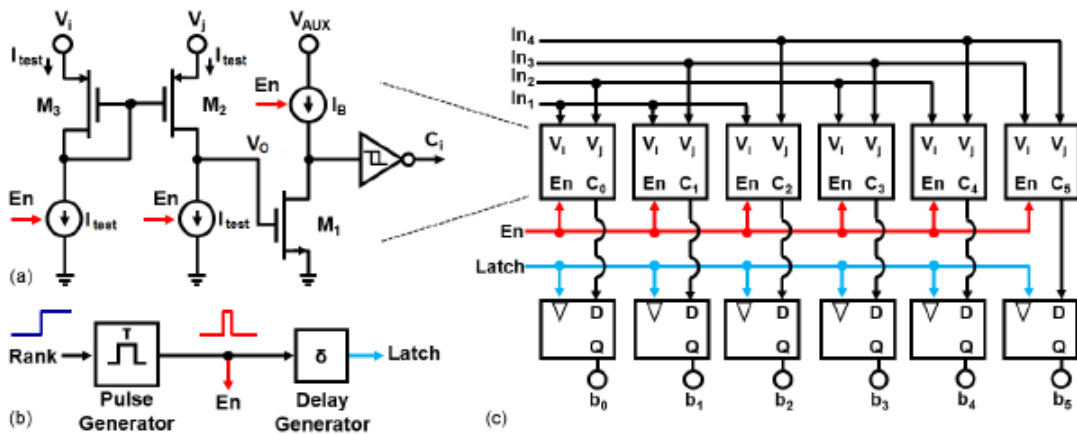


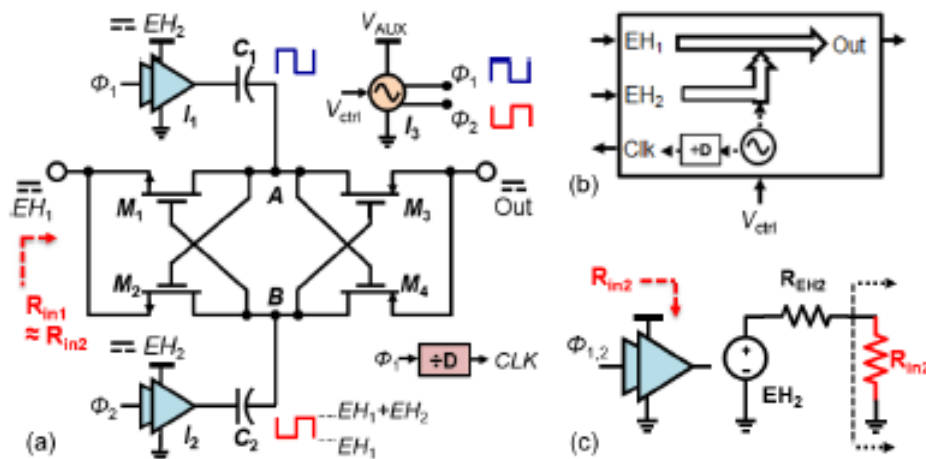
Figura 2.8: (a) Comparador, (b) circuito do temporizador (c) bloco classificador de 4 entrada [4].

A informação da comparação é passada por um *latch* D que converte a informação em binário para ser processado por um bloco de lógica e sequência. Esse bloco é que deduz quais são as fontes que tem maior potência, e envia o sinal que escolhe as fontes para um *multiplexer*.

A combinação das fontes é realizada através de um *charge pump* de condensadores comutados,

fig.2.9, baseado no circuito de [3]. Neste caso, este circuito aumenta a tensão do sinal  $EH_1$ , este está em DC, com  $EH_2$ . O sinal  $EH_2$  alimenta dois *buffers* que são ativados desfasadamente. Quando ativos, fornecem a tensão  $EH_2$  aos condensadores comutados,  $C_1$  e  $C_2$ , que funcionam como curto-circuito em AC e como circuito aberto em DC. Quando em curto-circuito, nos nós A e B, a tensão é  $EH_1 + EH_2$ . Como a ativação de  $I_1$  e  $I_2$  está desfasada, então a tensão de curto-circuito nos nós A e B aparecerá desfasadamente, mantendo sempre uma diferença de tensão de  $EH_2$ .

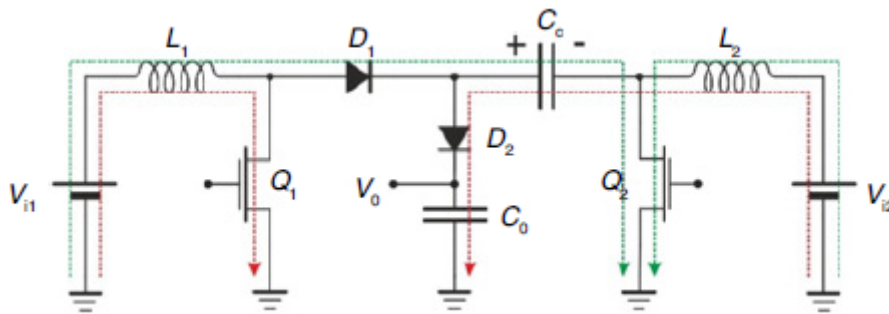
Essa desfasagem vai ativar os *MOSFETs*,  $M_3$  e  $M_4$ , alternadamente, passando a carga de  $EH_2$  alternadamente, carregando um condensador de carga, que não está representado, e ao mesmo tempo mantendo sempre a passagem de carga.



**Figura 2.9:** (a) Esquemático do combinador, (b) símbolo, (c) resistência de entrada no terminal de alimentação do *buffer* [4].

Esta arquitetura foi fabricada em tecnologia CMOS de 130nm, atingindo um pico de eficiência de 87,2% a  $198\mu W$  de potência de saída e conseguindo entregar até  $981\mu W$  de potência com 72% de eficiência.

Em [5] é proposto um conversor *boost* do tipo indutivo para duas/múltiplas entradas, que tem como principal vantagem combinar duas fontes e oferecer um ganho na saída, tudo no mesmo circuito, fig.2.10.



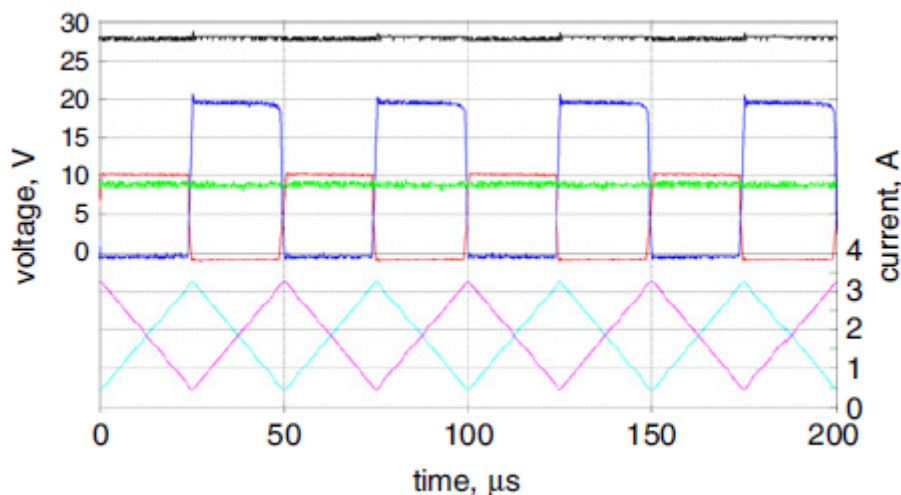
**Figura 2.10:** Conversor *boost* de duas entradas [5].

Como é possível observar na figura 2.10, este circuito é dividido em duas tipologias de circuitos: um conversor *boost*, constituído por  $V_{i1}$ ,  $L_1$ ,  $Q_1$  e  $D_1$ , e por um *charge pump* constituído por  $V_{i2}$ ,  $L_2$ ,  $Q_2$ ,  $C_C$  e  $D_2$ .

O funcionamento deste circuito está dividido em dois estados:

No primeiro estado, (com a cor vermelha),  $Q_1$  está ativo durante  $t_{ON}$ ,  $Q_2$  está desligado,  $D_1$  está inversamente polarizado e a bobine  $L_1$  está magnetizada por  $V_{i1}$ . Ao mesmo tempo, a bobine  $L_2$  está a descarregar a sua energia para a saída. Nesta situação a saída  $V_O$  é alimentada por  $L_2$  e pelo condensador  $C_C$ , tendo  $V_O = V(L_2) + V(C_C)$ . Nesta situação, o condensador  $C_O$  está em fase de carregamento.

No segundo estado, (cor verde), temos o oposto,  $Q_1$  encontra-se desligado durante  $t_{OFF}$ ,  $Q_2$  encontra-se ligado,  $D_2$  inversamente polarizado e  $L_2$  está magnetizada por  $V_{i2}$ . Nesta situação,  $L_1$  descarrega a sua energia para o condensador  $C_C$  e  $V_O$  é alimentado pelo condensador  $C_O$ .



**Figura 2.11:** Formas de onda medidas no circuito [5].

Na fig.2.11 está representado um gráfico do funcionamento do circuito apresentado. Nesta ex-

periência  $V_{i1} = 10V$ ,  $V_{i2} = 5V$  e um fator de ciclo (*duty-cycle*) de 50% para cada fonte. A preto está a tensão de saída, a azul a tensão do dreno de  $Q_1$ , a vermelho a tensão do dreno de  $Q_2$ , a verde a queda de tensão do condensador  $C_C$  e as correntes das bobines  $L_1$  e  $L_2$ , a ciano e magenta, respetivamente.

Como é possível observar, este circuito consegue somar a tensão das duas fontes e ainda obter um ganho ( $V_O/(V_{i1} + V_{i2})$ ) de 2. O funcionamento das duas fontes é simultâneo, permite ligar diferentes fontes com diferentes características de tensão e corrente com uma carga comum. Este conversor é facilmente controlável, é possível selecionar as fontes mudando o ciclo de funcionamento, é simples e é adequado para aplicações de baixas tensões.

Os trabalhos aqui apresentados expõem diferentes abordagens ao problema com lados positivos e negativos, dificuldades para a aplicação ao objetivo desta dissertação. Em [1] o sistema apresenta um sistema para 4 fontes de entrada, cuja combinação é realizada após comparação com um valor de tensão de referência escolhido. Este sistema apresenta grande complexidade devido ao número e variedade de circuitos aplicados. Outro aspeto negativo deste trabalho é o facto do sistema ter que ser alimentado por uma fonte externa, para permitir o seu funcionamento, o que não se enquadra no objetivo desta dissertação de ser auto-sustentável.

Em [2] é apresentado um circuito com múltiplas fontes de energia na sua entrada, onde, através de um algoritmo de controlo, é selecionada a fonte com maior energia para alimentar a carga presente na saída. Esta abordagem não se enquadra no objetivo deste trabalho, uma vez que se pretende combinar a energia de diferentes fontes como forma de alimentar a carga presente na saída. O sistema apresentado em [2] é alimentado externamente, o que também não está de acordo com os objetivos propostos para este trabalho.

Em [3] é apresentado um combinador para 2 e para 3 fontes cuja combinação é realizada por vários *charge pump*, cujo sistema é auto sustentável. Este sistema é aplicável a circuitos de ultra baixa potência, mas revela um maior grau de complexidade comparado com [5] e uma perda de eficiência com o aumento de fontes de entrada a funcionar.

Em [4], é apresentado um sistema combinador com 4 entradas mas que apenas combina as 2 melhores. É um circuito totalmente integrado com MPPT, comparadores, lógica e sequência, tornando este sistema muito complexo para a aplicação ao objetivo apresentado.

No trabalho [5] é apresentado um circuito simples para duas fontes. O circuito apresentado é dimensionado para trabalhar com tensões muito superiores às tensões fornecidas pelas fontes de EH. O que torna o desafio deste trabalho dimensionar o circuito para funcionar com tensões na ordem das centenas de mV. Este desafio passa também pela dificuldade que haverá em ligar o circuito, uma vez que a alimentação por parte das fontes tem valores da ordem de grandeza das tensões de limiar dos Transístor de efeito de campo (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) (MOSFET). Isto im-

plica que seja necessário escolher outro tipo de MOSFET em relação ao apresentado em [5]. Uma vez que é necessário uma excitação dos semicondutores, será necessário adicionar um oscilador ao circuito. Este oscilador deverá ser capaz de funcionar com uma alimentação na ordem das centenas de mV. Com um oscilador incluído no sistema, este sistema passará a ser um sistema de conversão DC-DC autónomo.

# 3

## Sistema de recolha e gestão de energia proposto

### Conteúdo

---

3.1	Estrutura do Trabalho a desenvolver . . . . .	16
3.2	Sistema de conversão de tensão proposto . . . . .	16
3.3	Caracterização de elementos do sistema . . . . .	26

---

## 3.1 Estrutura do Trabalho a desenvolver

A metodologia de investigação adotada para este trabalho consiste no estudo de aplicações já existentes, caracterização das fontes de energia a utilizar, e simulação de uma solução de circuito.

Deste modo, a investigação vai na direção de um sistema com pelo menos duas fontes de recolha de energia, que seja capaz de extrair a energia proveniente de todas as fontes ao mesmo tempo e que apresente na saída um valor de tensão superior ao valor padrão de 1.3V. Este sistema terá de funcionar em ultra-baixa tensão (algumas centenas de mV), e aumentar a tensão de entrada, para ter à saída um valor de tensão suficiente para alimentar uma aplicação de IoT.

Deste modo, é necessário investigar duas áreas principais que serão a base deste projeto: um circuito combinador da energia proveniente das fontes; e um circuito que aumente a tensão de entrada (um conversor DC-DC do tipo *boost*).

## 3.2 Sistema de conversão de tensão proposto

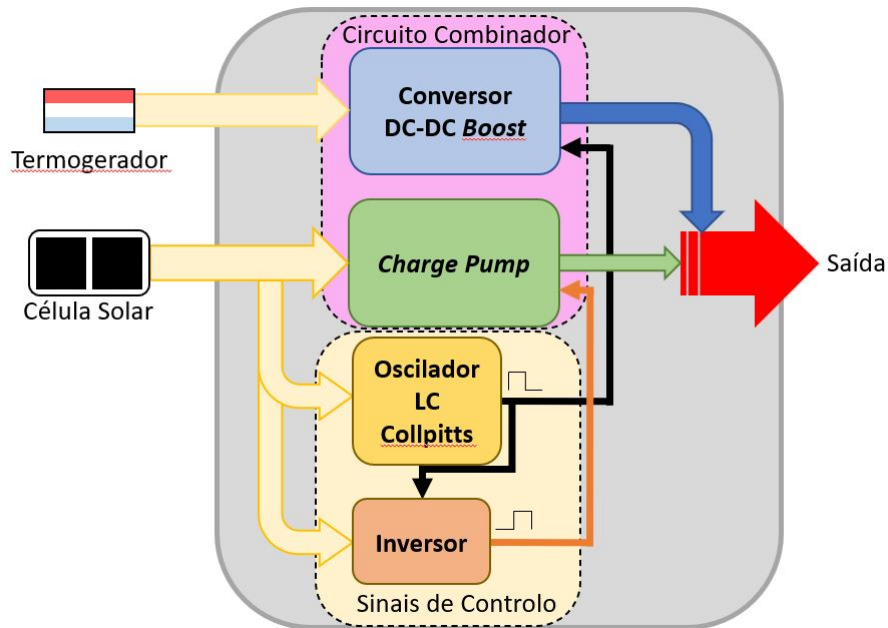
### 3.2.1 Dimensionamento do circuito

Neste capítulo é apresentada a proposta do sistema de gestão de energia e posteriormente o sistema de recolha. O sistema de gestão será um circuito combinador adaptado do circuito de [5], alimentado por fontes de recolha de energia composto de uma célula solar e de um termogenerador.

Nesta parte, foi realizada a tentativa de utilizar o circuito proposto em [5], um circuito combinador de duas entradas envolvendo duas tipologias de circuitos. Estas duas tipologias são um conversor DC-DC *boost* com um *charge pump* de condensador comutado. É utilizado este circuito uma vez que permite fazer a combinação de múltiplas fontes de energia simultaneamente. Para além da combinação simultânea das fontes, este circuito oferece um ganho na saída, que em baixas tensões é valioso, apresentado uma grande vantagem na direção do objetivo deste trabalho.

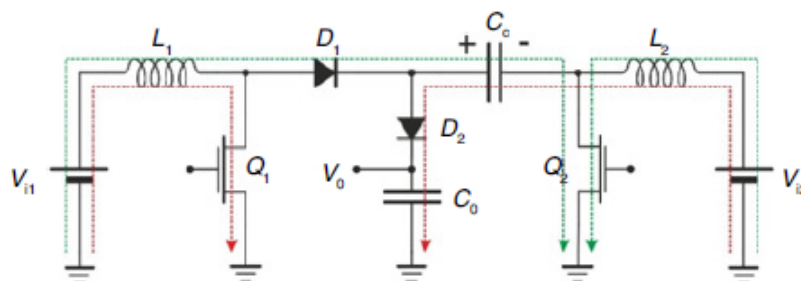
Este circuito funciona com base na comutação oposta de transístores, mas para haver a comutação destes, é necessário um sinal de controlo para cada transístor que seria exterior ao circuito. Por esse motivo, e para o sistema ser auto suficiente, é necessário adicionar um oscilador para realizar esse controlo. É realizado um estudo sobre osciladores em que é escolhido um oscilador LC de *Collpitts*, que será abordado posteriormente.

Há que ter em atenção, que na realização deste sistema, o objetivo é trabalhar com tensões o mais baixo possível para obter à saída um valor significativo, mas que permita ultrapassar as perdas dos componentes e os limites de funcionamento dos mesmos. Nomeadamente a queda de tensão nos díodos e a tensão de *threshold* dos transístores. Por esses motivos, apresenta-se uma dificuldade em trabalhar nestes tipos de circuitos em ULP, podendo limitar a tensão de entrada no sistema.



**Figura 3.1:** Diagrama de blocos que resume as diferentes partes a ser estudadas do sistema proposto

O diagrama de blocos apresentado na figura 3.1 é uma simplificação do que este trabalho realizou. O sistema possui três grupos principais: as fontes de recolha de energia, o circuito combinador e os sinais de controlo. O grupo das fontes de recolha de energia é constituído por duas fontes: uma célula solar e um termogerador, este grupo é responsável por fazer a recolha de energia natural e transformar em energia eléctrica. O circuito combinador é o grupo responsável por fazer a combinação da energia recolhida por cada fonte e aumentá-la na saída. Como abordado anteriormente, este circuito combinador é composto por duas tipologias de circuito: um conversor DC-DC *Boost* e um *Charge Pump* de condensadores comutados. O grupo sinais de controlo é constituído por um oscilador LC de Collpitts e um inversor. Este grupo é responsável pelo controlo dos transístores do circuito combinador. A sua implementação será abordada posteriormente.



**Figura 3.2:** Circuito combinador escolhido: conversor *boost* de duas/múltiplas entradas [5]

Como foi abordado anteriormente, o circuito combinador tem dois estados de funcionamento. Num

primeiro estado onde o transístor  $Q_1$  está ligado e o transístor  $Q_2$  está desligado. E num segundo estado o transístor  $Q_1$  está desligado e o transístor  $Q_2$  está ligado. De seguida são apresentadas as equações de funcionamento do circuito nesses dois estados. Para o primeiro estado são apresentadas as seguintes expressões:

$$L_1 \frac{\partial I_{L_1}}{\partial t} = V_{i1} \quad (3.1)$$

$$L_2 \frac{\partial I_{L_2}}{\partial t} = V_{i2} + V_c - V_o \quad (3.2)$$

Para o segundo estado, as expressões são as seguintes:

$$L_1 \frac{\partial I_{L_1}}{\partial t} = V_{i1} - V_c \quad (3.3)$$

$$C_o \frac{\partial I_{V_o}}{\partial t} = \frac{V_o}{R_L} \quad (3.4)$$

$$L_2 \frac{\partial I_{L_2}}{\partial t} = V_{i2} \quad (3.5)$$

Com estas equações, é possível dimensionar o circuito e obter os intervalos dos componentes a utilizar. Para isso, os valores nominais para o dimensionamento utilizados foram  $V_{i1} = V_{i2} = 0.5 V$ ,  $V_o = 1.3 V$ ,  $R_L = 100 k\Omega$ ,  $V_c = 1 V$  e  $\Delta t = 0.5 \mu s$  (uma vez que a frequência escolhida foi 1MHz).

Nome	Componente	Intervalo de funcionamento	Valor do Componente
$L_1 = L_2$	Bobine	$\Delta I_l \sim [1m; 4m]A$	$L \sim [300\mu; 125\mu]H$
$C_c = C_o$	Condensador	$\Delta V_o \sim [0.1m; 2m]V$	$C \sim [130n; 6.5n]F$

**Tabela 3.1:** Intervalo a utilizar dos componentes dimensionados do circuito

A tabela 3.1 apresenta o intervalo de valores possível dos componentes para sistema funcionar nos modos pretendidos. Foi escolhido que a corrente das bobinas  $\Delta I_l$  operasse no intervalo de 1mA a 4mA, o que baliza as bobinas  $L_1$  e  $L_2$  entre  $300\mu H$  e  $125\mu H$  para operar com os valores pretendidos. No caso do condensador de saída  $C_o$ , considerou-se que a saída tinha um *ripple* entre 0.1mV e 2mV, significando que o condensador teria que ter uma capacidade entre 130nF e 6.5nF. Foi decidido que o condensador  $C_c$  tivesse o mesmo valor que o condensador de saída  $C_o$ .

Uma vez que o objetivo é poder realizar este circuito com componentes de uso comercial (*Components of the Shelf*) (COTS), foram escolhidos valores facilmente acessíveis no mercado. Uma necessidade que advém da utilização do sistema em ULP, é escolher componentes que não dissipem energia ou que tenham valores de *threshold* elevados. Por esses motivos, os transístores escolhidos

foram transístores cujo  $V_{th}$  é nulo, permitindo assim ativar os transístores com valores de tensão mais baixos. Ao contrário de um transístor cujo  $V_{th}$  é não nulo, este necessitaria de um valor mínimo de tensão superior a  $V_{th}$  para funcionar, aplicando essa condição ao sistema na sua globalidade.

Por um motivo semelhante, foi escolhido a utilização de díodos de *Schottky*. Uma vez que este estudo circula em volta das baixas tensões, um díodo cuja queda de tensão seja 0.7V iria afetar bastante o resultado final. Deste modo, foi escolhido utilizar díodos de *Schottky* uma vez que tem uma queda de tensão menor, na zona dos 0.2V. Isto permite trabalhar com tensões mais baixas uma vez que existe menos perdas no circuito.

Os restantes componentes escolhidos foram as bobines,  $L_1$  e  $L_2$ , de  $150\mu H$ , os condensadores  $C_o$  e  $C_c$ , de 10nF e a resistência  $R_L$  de  $100k\Omega$ .

Através das equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.5, é possível realizar um estudo tensão-segundo das bobinas e atingir estas expressões, tendo em conta que  $T_S = t_{ON} + t_{OFF}$ :

$$L_1 \rightarrow V_{i1}t_{ON} + (V_{i1} - V_c)t_{OFF} = 0 \quad (3.6)$$

$$L_2 \rightarrow (V_{i2} + V_c - V_o)t_{ON} + V_{i2}t_{OFF} = 0 \quad (3.7)$$

Manipulando essas expressões e tendo em conta que  $D = \frac{t_{ON}}{T_S}$  (*Duty-Cycle*), é possível obter a expressão da tensão de saída:

$$V_o = \frac{V_{i1}}{1-D} + \frac{V_{i2}}{D} \quad (3.8)$$

Uma vez que é escolhido um *duty-cycle* de 0.5, o circuito terá uma tensão de saída de:

$$V_o = 2(V_{i1} + V_{i2}) \quad (3.9)$$

Isto significa que o circuito combinador irá ter uma saída com o dobro do somatório das entradas, o que vai de acordo com os objetivos deste trabalho.

### 3.2.2 Simulação do Circuito Combinador

Nesta secção é apresentado a implementação do circuito combinatório em simulação, com recurso ao programa *LTspice XVII*. Utilizando os valores dos componentes apresentados anteriormente, testou-se para diferentes valores das fontes de entrada.

Para simular os díodos de *Schottky* introduziu-se o modelo manualmente, visível na figura 3.3. A queda de tensão do díodo (v<sub>fwd</sub>) foi indicada nessa diretiva sendo 0.2V como um díodo real e com uma resistência interna (r<sub>on</sub>) de 1Ω.

O mesmo foi realizado para os transistores Nmos, os parâmetros a serem introduzidos foram a tensão de limiar ( $v_{to}$ ) sendo 0 e o coeficiente de transcondutância ( $k_p$ ), sendo  $10 \text{ mA/V}^2$  para simular um transistor comum. A tabela seguinte apresenta os parâmetros utilizados nas simulações.

Nome	Componente	Parâmetros da simulação
L1 = L2	Bobine	$150 \mu\text{H}$ ; $5 \Omega_{serie}$
Cc = Co	Condensador	10 nF
nMOS	transistor tipo n	$K_p = 10 \text{ mA/V}^2$ ; $V_{TO} = 0 \text{ V}$
f	Frequência	1 MHz

Tabela 3.2: Parâmetros dos componentes fixos do circuito

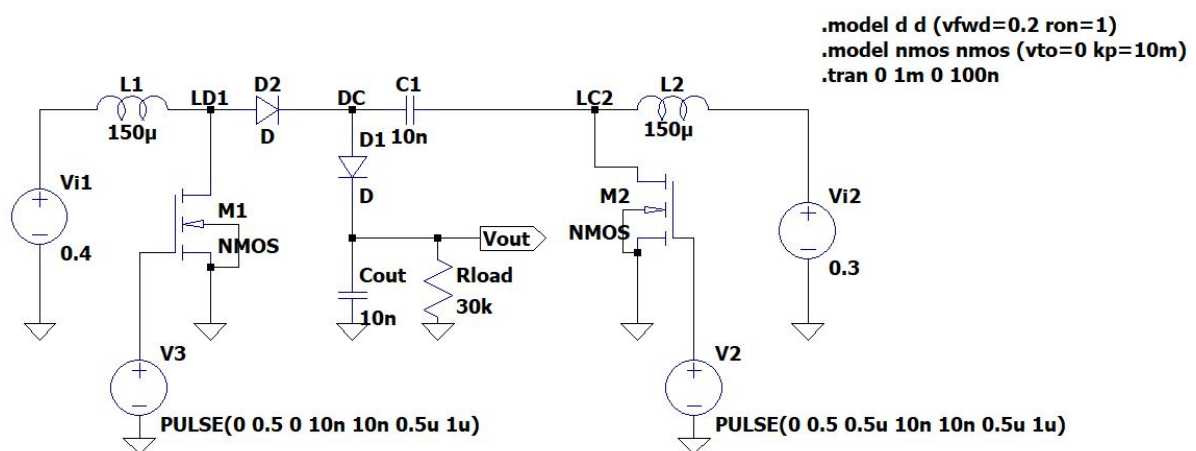
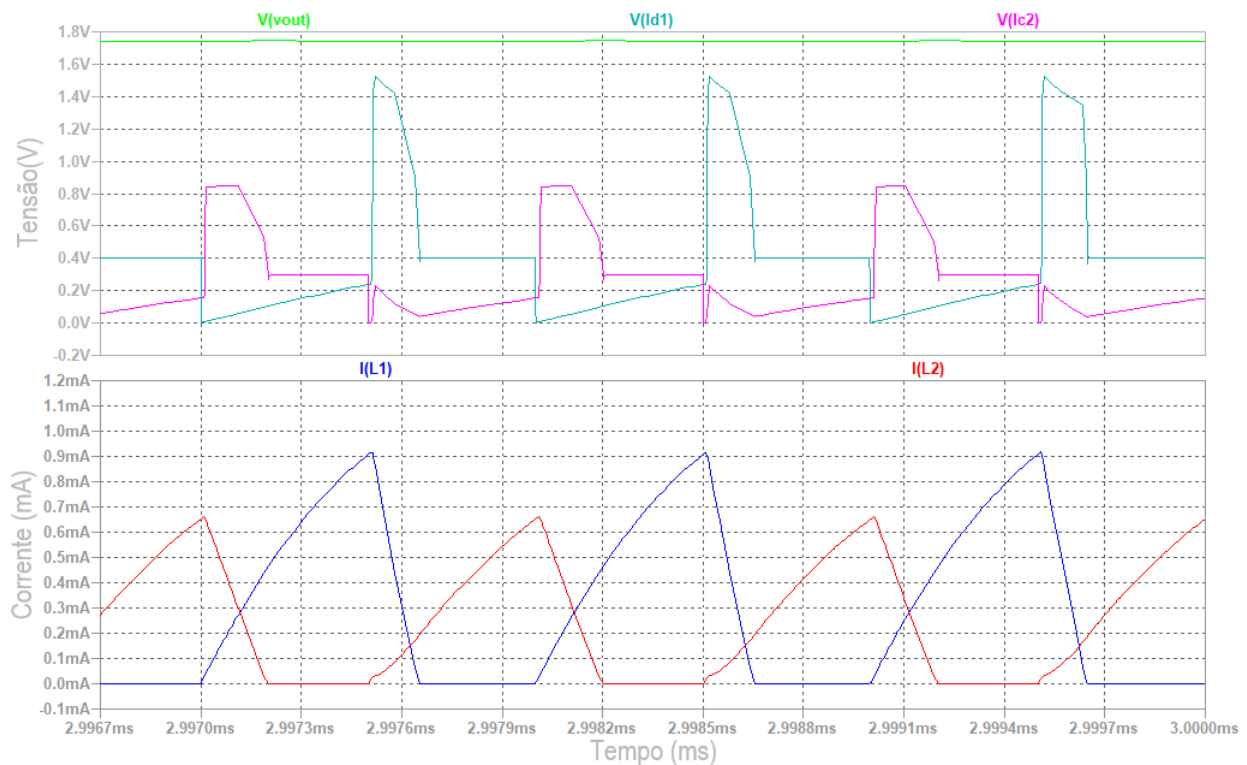
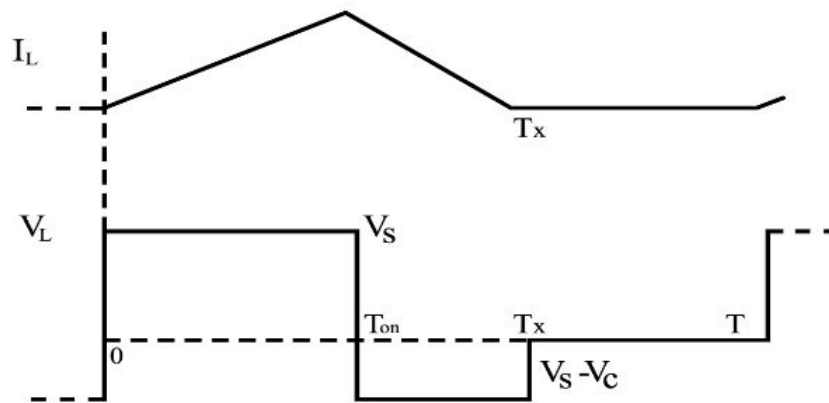


Figura 3.3: Circuito simulado para baixa tensão e diferentes valores de resistência.



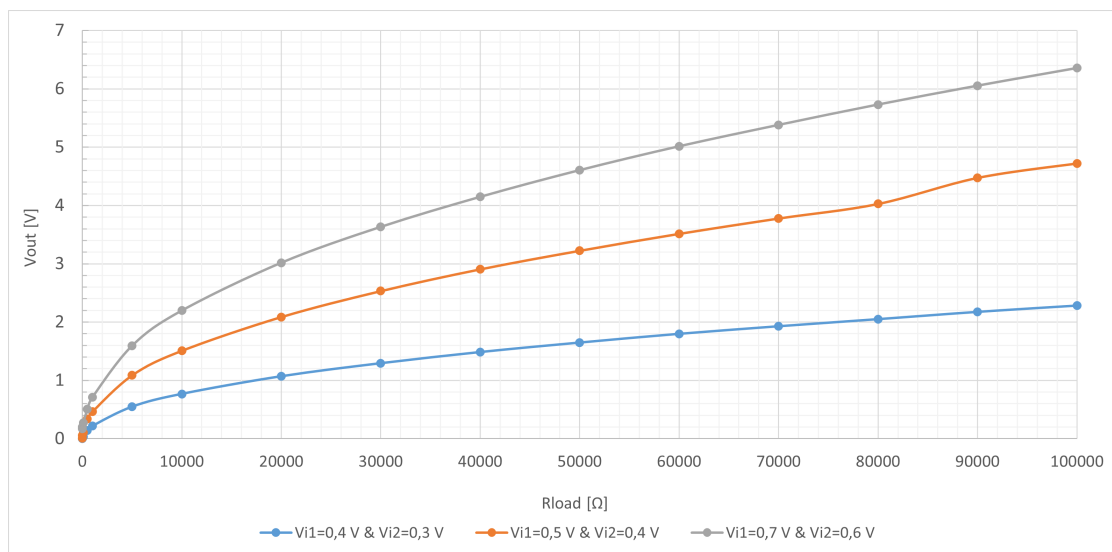
**Figura 3.4:** Tensão de saída (Verde), tensão dreno Q1 (ciano), tensão dreno Q2 (magenta), corrente bobina L1 (azul) e corrente bobina L2 (vermelho). Circuito com:  $V_{i1} = 0.4V$ ;  $V_{i2} = 0.3V$ ;  $L1 = L2 = 150\mu H$ ;  $C_c = C_o = 10nF$ ;  $R_{load} = 30k\Omega$ .

A figura 3.4 apresenta uma simulação realizada com as entradas  $V_{i1}$  e  $V_{i2}$  a 0.4 V e 0.3 V, respectivamente. A saída (verde) observada é 1.74 V, o que é superior ao dobro do somatório das entradas. Continuando a analisar os gráficos, conseguimos ainda ver que no intervalo que a tensão LD1 (ciano) não varia, a corrente da sua bobina L1 (azul) se anula até começar outro ciclo, o mesmo se aplica à tensão LC2 (magenta) e corrente L2 (vermelho). Isto significa que este circuito funciona no modo de condução descontínua (MCD). Este fenómeno acontece quando a corrente das bobinas quer atingir valores negativos, mas os díodos D1 e D2 não o permitem. Isto significa que, ao contrário ao Modo de Condução Contínua (MCC), onde a tensão de saída depende apenas do fator de ciclo, agora no Modo de Condução Descontínua (MCD) a tensão de saída dependerá da carga  $R_{load}$ , do fator de ciclo e do valor da bobina.



**Figura 3.5:** Exemplo do comportamento da corrente na bobina  $I_L$  e da tensão no terminal da bobina com o dreno do transistor  $V_L$ , no modo de condução descontínua de um conversor *boost* [6]

Na figura 3.5 temos um exemplo do comportamento que a bobina deve ter no MCD. A corrente da bobina  $I_L$  atinge 0 A durante o intervalo  $[T_x; T]$ , no mesmo momento a tensão no dreno do MOSFET mantém-se constante. Este comportamento é observável na figura 3.4, tanto no comportamento de  $L_1$  como de  $L_2$ , mostrando que o circuito está no MCD.



**Figura 3.6:** Relação tensão de saída e resistência de carga para diferentes valores de entrada.

Na figura 3.6 é possível observar a influência da resistência de carga no circuito. É de realçar que para valores de carga mais elevados, é possível atingir até 5 vezes o conjunto das entradas.

Se este circuito irá alimentar uma carga, este deve fornecer uma tensão mínima. Esta tensão, para efeitos de simulação numa primeira parte, é considerada 1.3 V. Assim, é também possível observar no gráfico até que valores se pode baixar. Concluiu-se que as fontes devem manter-se acima de 0.3V e uma resistência de carga superior a 30 kΩ, a fim de se obter essa tensão de saída mínima. Uma vez

que com uma carga de  $100\text{ k}\Omega$  o circuito consegue obter essa tensão de saída, é escolhido esse valor para a carga do circuito.

### 3.2.3 Oscilador LC de Collpitts

Este circuito combinador funciona a partir de uma comutação dos transístores, esta comutação tem de aparecer através de dois sinais inversos que comutam os transístores. Para este sistema ser autónomo, é necessário que o próprio sistema faça a própria oscilação e que produza os sinais inversos. Apenas quando o sistema conseguir gerar os sinais controladores da comutação dos transístores, é que o sistema será auto suficiente, daí o estudo e introdução de um oscilador no sistema.

Uma vez que o estudo deste circuito é no âmbito da ULP, é necessário um oscilador que consiga oscilar com uma pequena alimentação, no âmbito das centenas de  $mV$ . Para isso foi escolhido um oscilador do tipo LC, com apoio no artigo [11], que utiliza um oscilador LC do tipo de Collpitts com vista em aplicações de ULP, que é o objetivo deste trabalho.

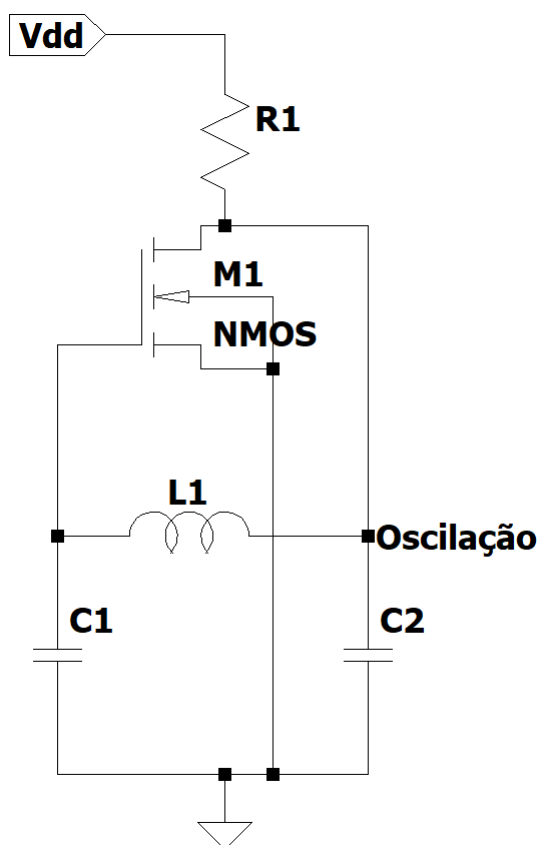


Figura 3.7: Esquema do oscilador LC de Collpitts

Na figura 3.7 é apresentado o oscilador acima discutido, cujo sinal de oscilação sai no nó *Oscilação*.

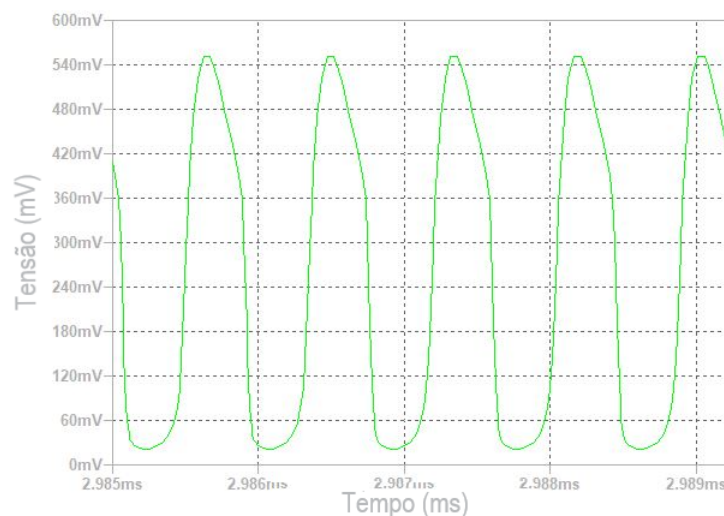
O circuito precisa de ser alimentado em  $V_{dd}$ , cuja alimentação será realizada através de uma das fontes. A frequência de oscilação deste circuito depende da malha de realimentação LC, e é dada pela seguinte equação:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}} \quad (3.10)$$

O problema com esta equação 3.10 é que não tem em conta as capacidades parasitas dos MOSFET, que irão influenciar na frequência de oscilação do circuito. Tendo em conta essas capacidades parasitas, é possível chegar à seguinte expressão:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{(C_1C_{gd}+(C_1+C_{gd})C_2)}{C_1+C_2}}} \quad (3.11)$$

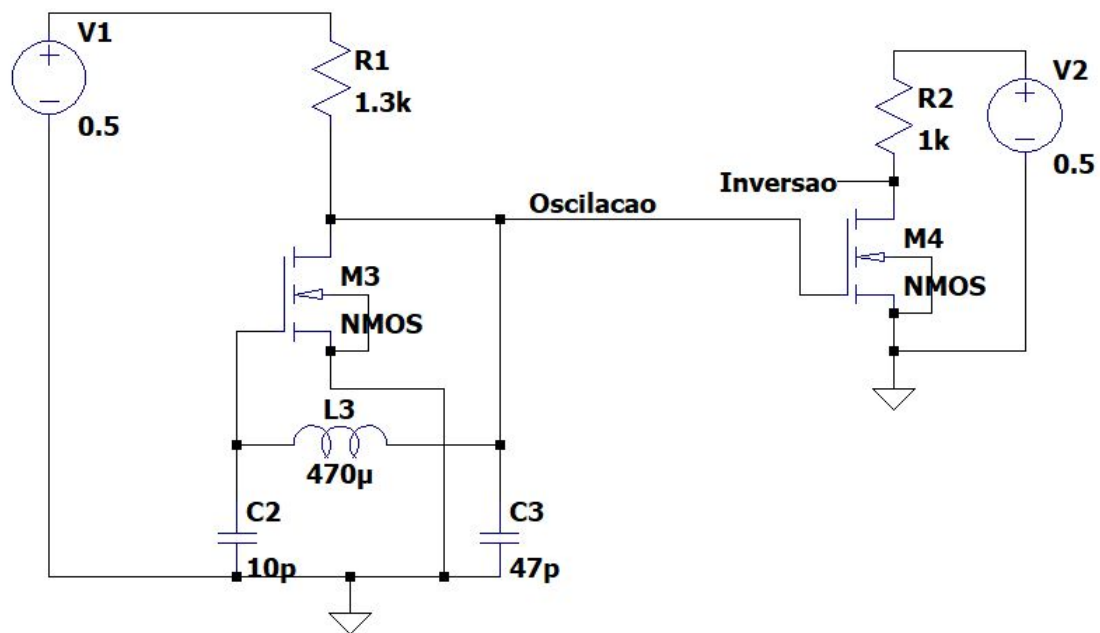
A diferença é que utilizando os valores dos componentes  $L = 470 \mu H$ ,  $C_1 = 10 pF$ ,  $C_2 = 47 pF$  e  $C_{gd} = 30 pF$ , na equação 3.10 a frequência resultante é 2.55 MHz, e na equação 3.11 a frequência é 1.18 MHz. De seguida é apresentado o sinal resultante em simulação.



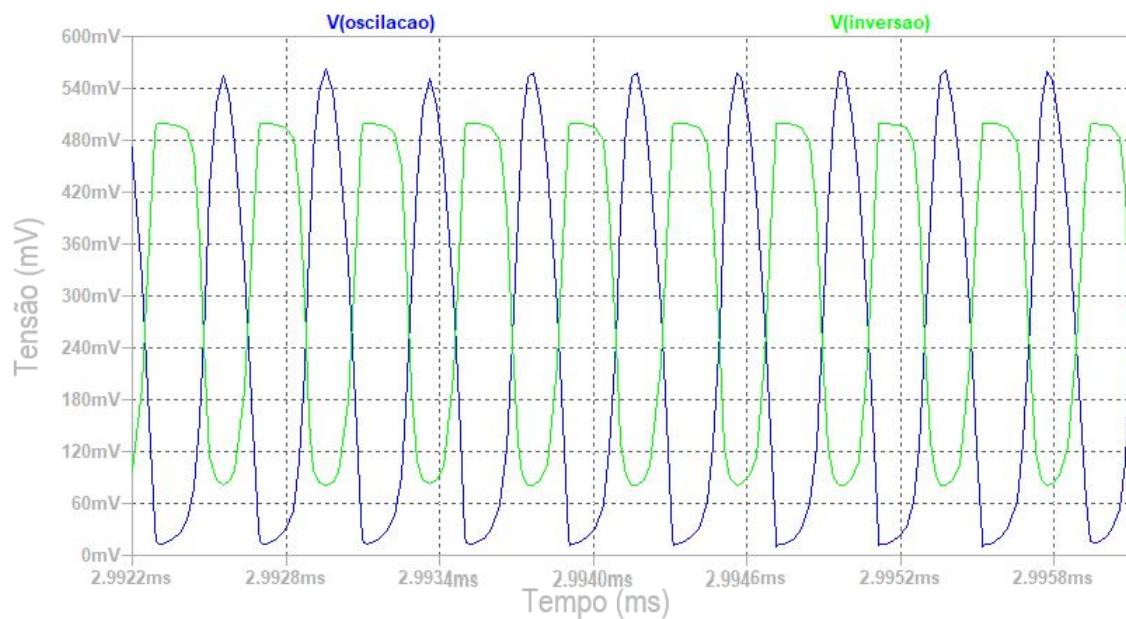
**Figura 3.8:** Sinal de oscilação do oscilador LC de Collpitts em *LTspiceXVII* com  $L = 470\mu H$ ,  $C_1 = 10pF$ ,  $C_2 = 47pF$  e  $R = 1.2k\Omega$

Na figura 3.8 observa-se a onda do oscilador LC de Collpitts simulado no programa *LTspice XVII*, tendo em conta as capacidades parasitas. A frequência resultante é 1.19 MHz.

Para realizar o sinal de controlo inversor é utilizado um inversor de 1 transistor, procurando sempre não aumentar muito a complexidade do circuito.



**Figura 3.9:** Esquema do oscilador LC de Collpitts com inversor utilizados



**Figura 3.10:** Ondas do oscilador LC e do inversor para controlar os transístores do sistema

Na figura 3.9 é apresentado o circuito completo de geração dos sinais, onde à esquerda observa-se o oscilador LC de Collpitts a gerar o sinal de controlo 1, para o transístor  $Q_1$ , e à direita o inversor a gerar o sinal de controlo 2, inversor ao primeiro, para controlar o transístor  $Q_2$ .

O inversor utilizado não é um inversor CMOS simples, mas um inversor de um só transístor nmos.

Não é possível a utilização de um inversor CMOS simples uma vez que estes incluem 2 transístores, um nmos e um pmos, e não existem pmos com  $V_{TH}$  nulo.

Abaixo na figura 3.10 são apresentadas as ondas simuladas pelo circuito no programa *LTspice XVII*. O sinal "Oscilacao" é o sinal de controlo 1, o original, e o sinal "Inversao" é o sinal de controlo 2, o invertido.

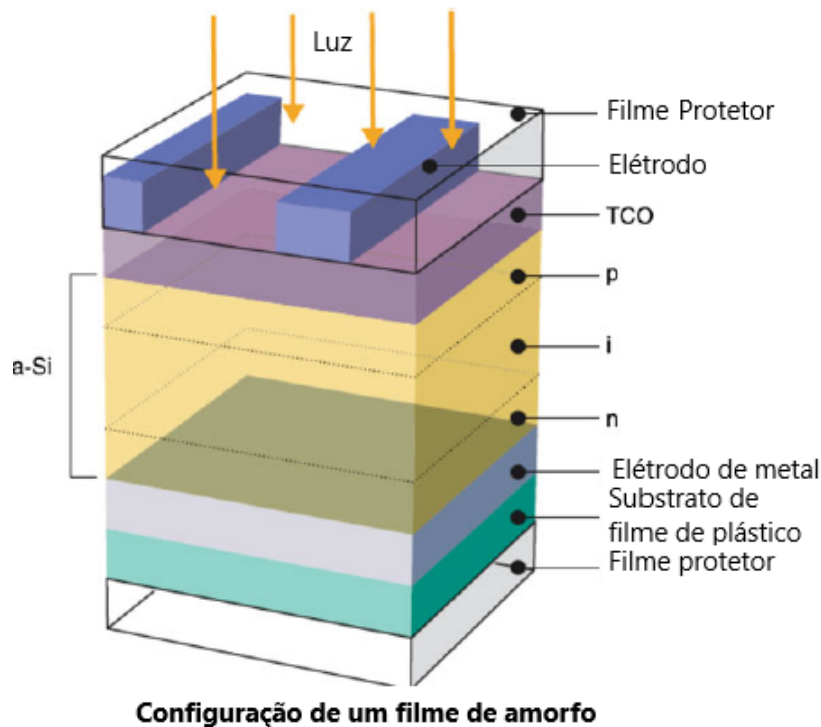
### 3.3 Caracterização de elementos do sistema

#### 3.3.1 Célula Solar ONP1.2-12x24

A célula solar ONP1.2-12x24, figura 3.11, utilizada neste trabalho é uma célula de filme, flexível e leve, que permite a sua utilização em condições onde é necessário uma certa mobilidade sem a possibilidade do material se estragar ou impedir movimentos. Esta célula demonstra ser um caminho viável para a utilização da célula em roupa como a aplicação do soldado do futuro abordado anteriormente.



**Figura 3.11:** Célula Solar ONP1.2-12x24 utilizada neste trabalho



**Figura 3.12:** Diferentes camadas de uma célula solar [7]

O funcionamento desta célula solar é através de uma junção PIN que existe nas diferentes camadas da célula. A célula é composta por várias camadas: um filme protetor, um eléttrodo, um óxido condutor transparente, uma região do tipo p de silício dopada com impurezas aceitadoras, uma região intrínseca não dopada de semiconductor, uma região do tipo n de silício dopada com impurezas dadoras, um eléttrodo de metal, um substrato de filme de plástico e a última camada de filme protetor.

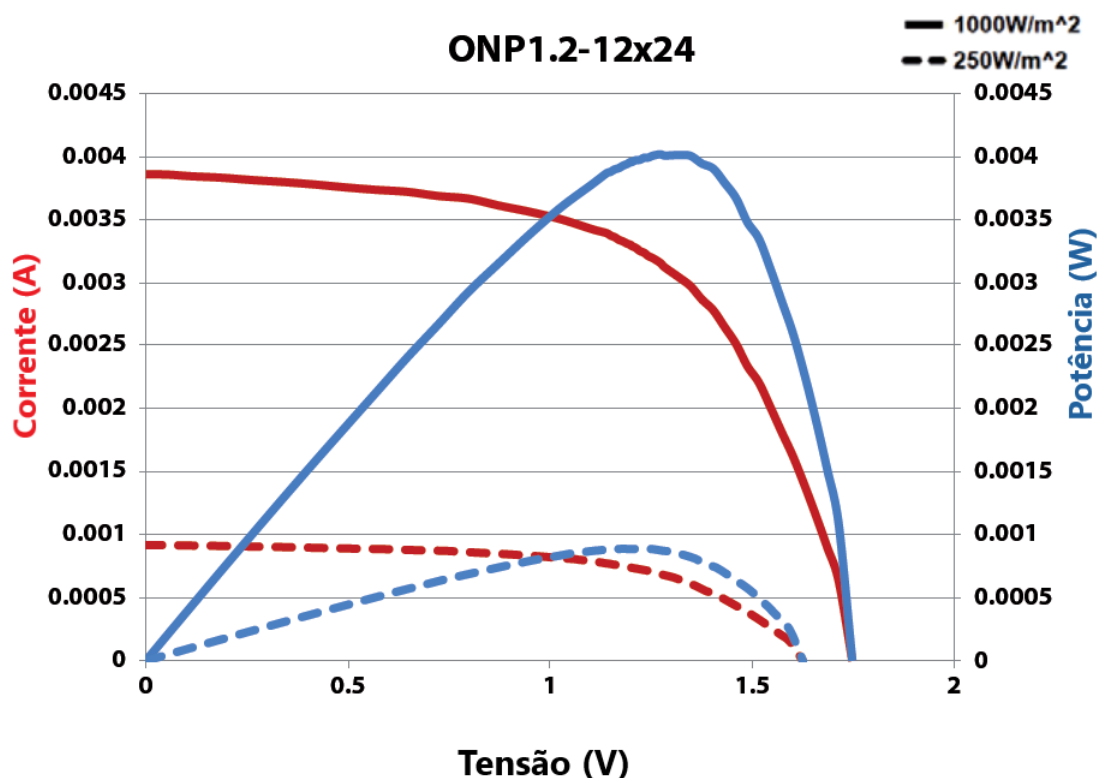
O filme protetor tem como função isolar os eléttrodos do exterior para evitar descargas de corrente, proteger dos desgastes meteorológicos, (uma vez que esta célula é para uso exterior) ou do desgaste proveniente do uso. O eléttrodo é para a conexão do lado positivo da célula. O óxido condutor transparente serve para a condução de corrente entre o eléttrodo e a região dopada de tipo p. Este é transparente para a radiação passar e atingir a região de depleção, não sendo absorvida antes. As regiões P, I e N são o silício amorfo onde o processo de transformação de energia solar para elétrica acontece. O eléttrodo de metal é a ligação com o lado negativo da célula para fazer a passagem de corrente com o exterior. O substrato de filme de plástico serve como base da célula e é de plástico para permitir flexibilidade.

O funcionamento deste dispositivo deriva da exposição solar e da entrada de fótons para a região de depleção. A região i consiste numa zona com poucos elétrons, criando um potencial eletrostático negativo na região p e um positivo na região n, ou seja, juntam-se íons negativos na fronteira com a região p e juntam-se íons positivos na fronteira da região n.

É criada uma barreira de potencial entre as duas regiões, uma vez que qualquer elétron que se encontre na região i será repelido pelos íons negativos e atraído pelos íons positivos, indo parar à região n. O oposto acontece com um aceitador, é repelido pelos íons positivos e atraído pelos íons negativos, parando na região p.

Quando a célula recebe luz, os fótons são absorvidos na região de depleção. Se os fótons tiverem energia suficiente, os elétrons dos íons são excitados para a banda de condução, deixando um buraco na banda de valência. Antes que esse par elétron-buraco volte a associar-se, o elétron e o buraco são acelerados para os terminais como explicado anteriormente. Esse processo repete-se com a entrada de fótons na região de depleção. Assim, por existir uma grande falta de elétrons no terminal da região p, o terminal fica positivamente carregado. Do outro lado, por existir uma grande quantidade de elétrons na região n, o terminal de n fica negativamente carregado criando uma tensão entre os terminais da célula solar.

Ligando os terminais a um circuito, os elétrons vão ser atraídos para os buracos criando uma corrente na direção de p para n. Quanto maior a intensidade luminosa, mais fótons e mais energia estes trazem, criando mais pares elétrons-buracos, gerando mais corrente.



**Figura 3.13:** Curva IV da célula ONP1.2-12x24. Relação entre a corrente e a tensão a vermelho e relação entre a potência e a tensão a azul. Com linha contínua está uma irradiância a  $1000W/m^2$ , simulando a potência total do sol. Com linha descontinua está uma irradiância de  $250W/m_2$  simulando 1/4 da potência do sol [8]

Como se pode observar na figura 3.13, estão expostas as curvas da relação corrente com tensão (vermelho) e da relação potência com tensão (azul), onde as linhas contínuas são as curvas para a potência máxima de sol e as linhas interrompidas são para 1/4 de potência do sol.

Parâmetro	Sol Total	1/4 de sol	Todos os níveis
Potência	4mW	0.9mW	
Tensão de funcionamento	1.2V	1.2V	
Corrente de funcionamento	3.3mA	0.7mA	
$V_{OC}$ Médio			1.6V
$V_{OC}$ Máximo			1.9V
$I_{SC}$			4.3mA

**Tabela 3.3:** Parâmetros da célula solar OPN1.2-12x24 [8]

Na tabela 3.3 é possível observar as características de funcionamento da célula solar. Os parâmetros apresentados são a potência, a tensão e a corrente de funcionamento, a tensão em circuito aberto ( $V_{OC}$ ) médio, a tensão em circuito aberto máxima e a corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ ).

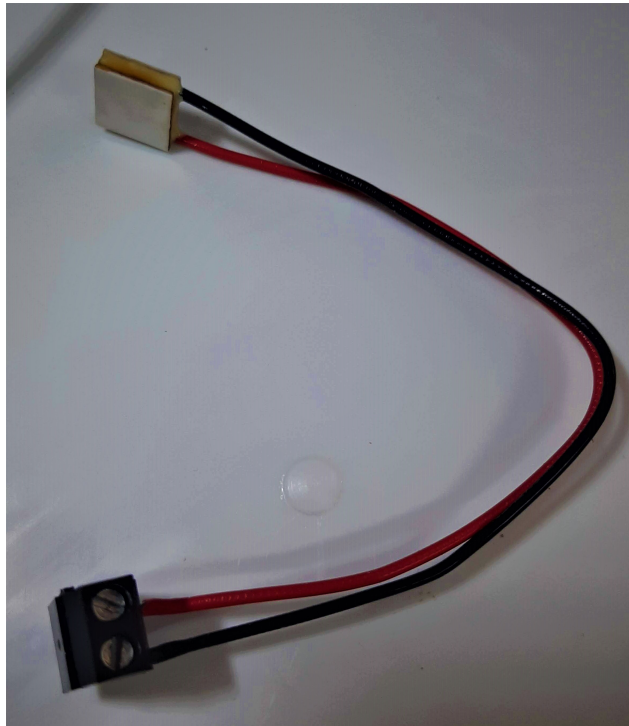
A potência é a potência máxima que a célula pode atingir naquela condição. a tensão e a corrente de funcionamento indicam a janela de normal funcionamento da célula, que se pode verificar no gráfico da figura 3.13. A tensão em circuito aberto é a tensão obtida aos terminais sem nenhum circuito ligado onde a célula está ligada. A corrente de curto circuito é a corrente obtida se os terminais estivessem em curto circuito, é também a corrente máxima possível de obter da célula.

Como é possível retirar dos dados da tabela 3.3, esta célula mostra que trabalha no espectro da ultra baixa potência, pois a potência máxima possível de extrair ronda 4mW. Esta célula mostra que consegue alimentar o circuito pois a tensão máxima de saída é 1.9V ou até 4.3mA.

Esta célula aplica-se ao objetivo proposto e enquadra-se nos requisitos do projeto.

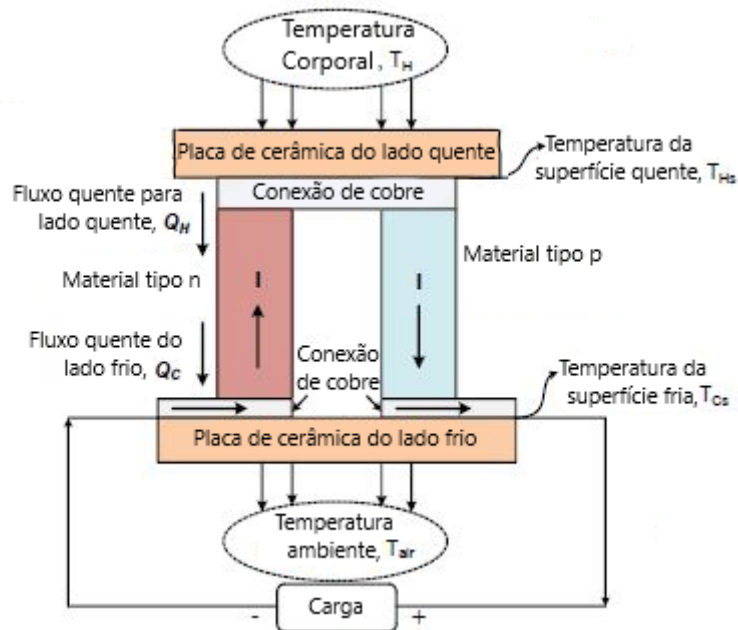
### 3.3.2 Gerador Termoelétrico MGM250-17-10-16

Um gerador termoelétrico é um transdutor que converte energia térmica em energia elétrica. Foi utilizado este tipo de transdutor uma vez que o calor é uma energia de fácil acesso e enquadra-se na ideia de *wearable* para o projeto do Soldado do Futuro, por exemplo, e porque tem aplicações de ultra-baixa potência.



**Figura 3.14:** Gerador Termoelétrico MGM250-17-10-16 utilizado

Este termogerador, figura 3.14, é um *Mini Thermoelectric Generator Module* (MGM), ou seja, um mini módulo de gerador termolétrico. Este termogerador utiliza o efeito de Seebeck para fazer a transformação de energia. Esse efeito consiste numa aceleração das partículas subatômicas devido ao calor, que gera uma queda de tensão aos terminais de um metal. Mais pormenorizadamente, o mini termogerador é constituído por centenas de pares termoelétricos, ilustrados na figura 3.15.



**Figura 3.15:** Par termoelétrico, composto por materiais do tipo n e p. O calor flui do lado quente para o lado frio e a corrente elétrica ( $I$ ) está a fluir do material tipo n para o material tipo p, devido à diferença de temperatura ( $\Delta T = T_h - T_c$ ) [9]

O calor entra em contacto com a placa de cerâmica do lado quente, por condução, o calor transmite para a camada inferior. A camada inferior é um conector de cobre que liga o par termoelétrico, este par é constituído por dois metais, um do tipo n (grande quantidade de eletrões) e um do tipo p (falta de eletrões, buracos). O calor atinge o cobre que conduz o calor para o material, com o calor, as partículas, os eletrões e os buracos, excitam-se devido à absorção de energia. Essas partículas excitadas, saltam para o lado mais frio do próprio material.

Supondo que o calor atinge o material mas que não tem a ligação de cobre. No caso do material tipo n, os eletrões excitados saltam para o lado frio, tendo o lado frio uma grande quantidade de eletrões, fica negativamente carregado e o lado quente com menos eletrões fica positivamente carregado, tendo uma queda de tensão aos terminais desse metal. No caso do material tipo p, os buracos tem o mesmo comportamento, ficando positivamente carregado do lado frio, e negativamente carregado do lado quente.

Se agora os conectores são considerados, os eletrões do lado quente do material de tipo n são atraídos para os buracos do lado quente do material do tipo p criando assim uma queda de tensão entre o lado frio do material do tipo n e o lado frio do metal tipo p. Se ligarmos os terminais a um circuito, existe também uma corrente devido à atração existente entre os eletrões e os buracos.

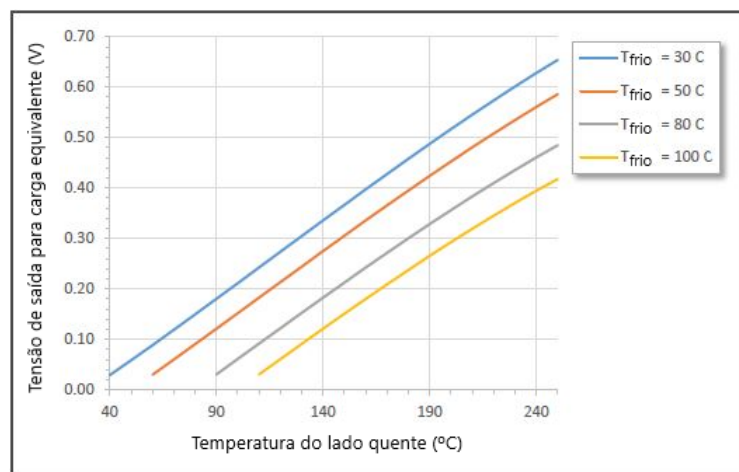
Agora, um par termoelétrico gera uma queda de tensão muito pequena para ser útil, mas se inúmeros pares forem conectados em série, é possível atingir valores significativos. E é assim que

este tipo de termogerador funciona.

Parâmetros corretos à temp.	Lado quente: 250° Lado frio: 30°	Lado quente: 100° Lado frio: 30°
Potência de saída para carga equiv.	0.42W	0.05W
Resistência da carga equivalente	1.0Ω ± 15%	0.8Ω ± 15%
Tensão de circuito aberto	1.4V	0.4V
Saída a carga equivalente	0.6A	0.3A
Tensão de saída a carga equivalente	0.7V	0.2V
Fluxo de calor através do módulo	8W	2.5W
Compressão máxima (não destrutiva)	1MPa	
Temperatura máxima de operação	Lado quente: 250° Lado frio: 30°	

**Figura 3.16:** Parâmetros de funcionamento do termogerador [10]

Analisando a tabela, figura 3.16, denota-se duas colunas exemplificando duas situações que o termogerador pode operar, com 250° de temperatura do lado quente ou a 100°. Nos parâmetros expressos existe a potência com carga correspondente, que está identificada na segunda linha. Está expresso também a tensão de circuito aberto, corrente de saída com carga correspondente, tensão de saída, o fluxo de calor que percorre o módulo, a compressão máxima que o módulo pode sofrer sem destruir o mesmo e as temperaturas máximas em que os lados podem operar.



**Figura 3.17:** Curva temperatura e tensão do termogerador para diferentes temperaturas [10]

Na figura 3.17, é ilustrada a curva que relaciona a tensão com a temperatura do lado quente para diferentes situações de temperatura do lado frio. Para a utilização exterior em temperatura ambiente, a curva azul demonstra que para obter 100mV a temperatura aplicada ao lado quente teria de ser 60°. O que em situações normais, é difícil de obter. Este dispositivo para temperaturas normais corporais não fornece tensões significativas, é preciso arranjar um termogerador mais sensível que apenas com a temperatura corporal, consiga fornecer mais tensão na ordem das centenas de mV. Apesar desta

dificuldade, é possível ultrapassá-la colocando vários em série, o que iria somar as tensões e conseguir atingir um valor significativo. A utilização com vários em série é possível uma vez que, se aplicado ao soldado do futuro em termos de *wearable*, o soldado poderá vestir transportar/vestir vários termogeradores. Teria o lado frio para fora, à temperatura ambiente e o lado quente para a própria pele, à temperatura corporal.

Outra situação possível, para obter energia elétrica do termogerador, é utilizar um isqueiro para aquecer o termogerador até temperaturas superiores a 100°C, e então é possível obter 300mV.



# 4

## Concretização experimental do sistema proposto

### Conteúdo

---

4.1	Circuito testado com fonte de alimentação e gerador de sinais . . . . .	36
4.2	Fonte de alimentação e oscilador LC . . . . .	39
4.3	Fontes de <i>Energy Harvesting</i> e oscilador LC . . . . .	42
4.4	Protótipo com componentes de baixo perfil em PCB . . . . .	44

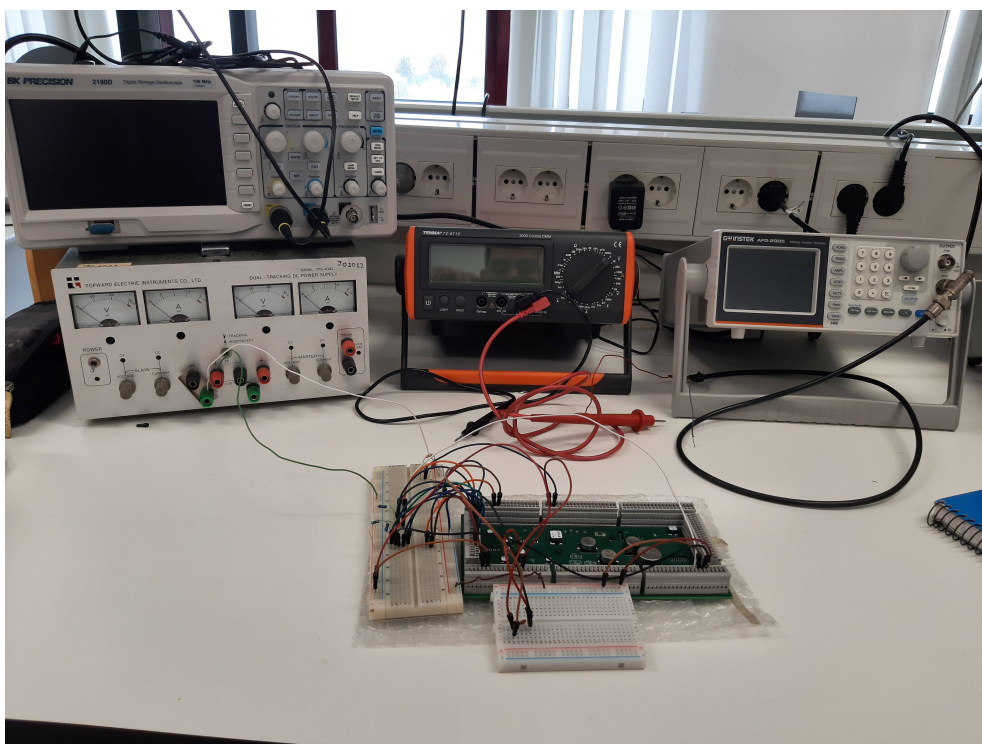
---

Neste capítulo é testado o circuito com componentes reais para verificar o seu funcionamento. A passagem da teoria para a prática é realizada neste capítulo em diferentes etapas: uma etapa em que é testado apenas o circuito com auxílio de uma fonte de alimentação e de um gerador de sinais; a etapa seguinte é utilizado o oscilador projetado para controlar as *gates* dos transístores, alimentado pela fonte de alimentação assim como as entradas; a penúltima etapa é ligar a célula solar ao circuito e este ser alimentado por ela; a última etapa é a realização de um protótipo final em Placa de Circuito Impressa (*Printed Circuit Board*) (PCB) e o seu teste com a célula solar e o termogerador.

Estes testes permitem verificar se o circuito simulado funciona, se os componentes reais irão comportar-se de maneira prevista, se as fontes de recolha de energia conseguem realmente alimentar o sistema ou se é preciso regressar um passo atrás antes de prototipar o sistema.

## 4.1 Circuito testado com fonte de alimentação e gerador de sinais

Neste capítulo, o circuito utilizado na simulação da figura 3.3 foi concretizado experimentalmente, utilizando uma fonte de alimentação para simular as fontes EH e para as funções quadradas nas gates, um gerador de sinais e o *wavegen* do *Analog Discovery 2*.



**Figura 4.1:** Bancada utilizada com osciloscópio, fonte de alimentação, multímetro e gerador de sinais

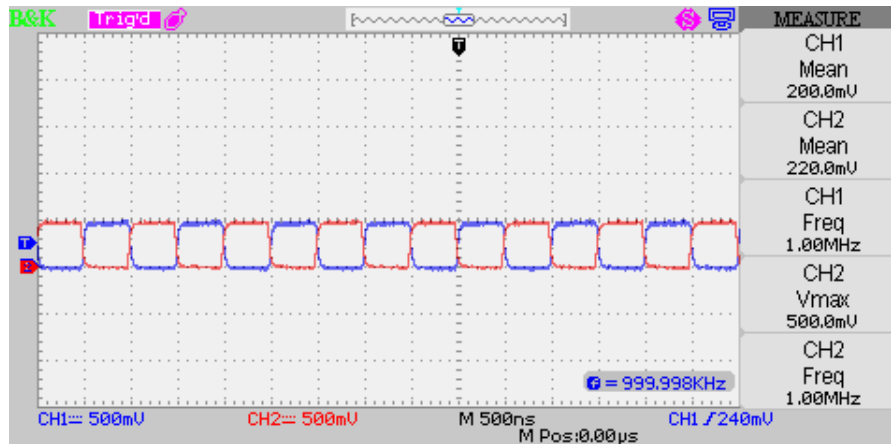


Figura 4.2: Ondas quadradas geradas para as entradas das *gates* com frequência de 1 MHz, amplitude 0.5 V e D=50 %

Os sinais colocados nas entradas das *gates* foram duas ondas quadradas com uma frequência de 1 MHz, uma amplitude de 0.5 V, um *duty-cycle* de 50% e inversas uma da outra.

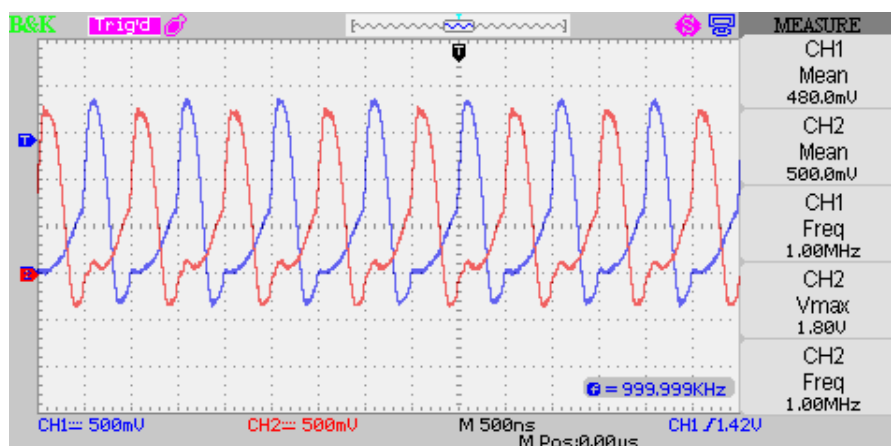
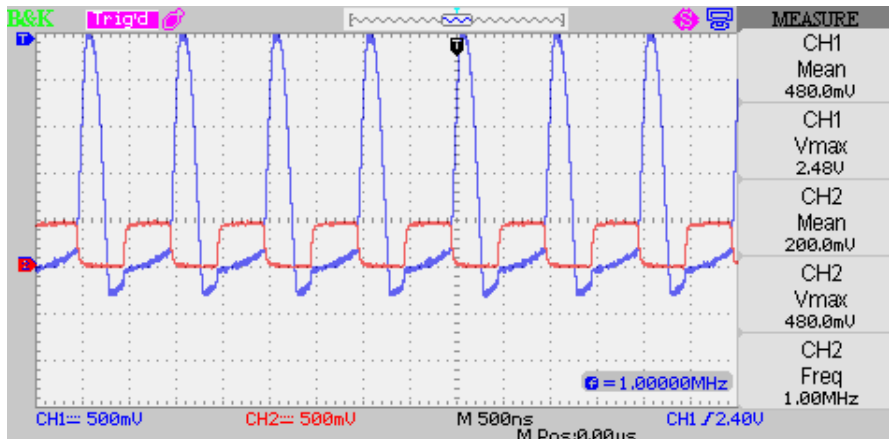


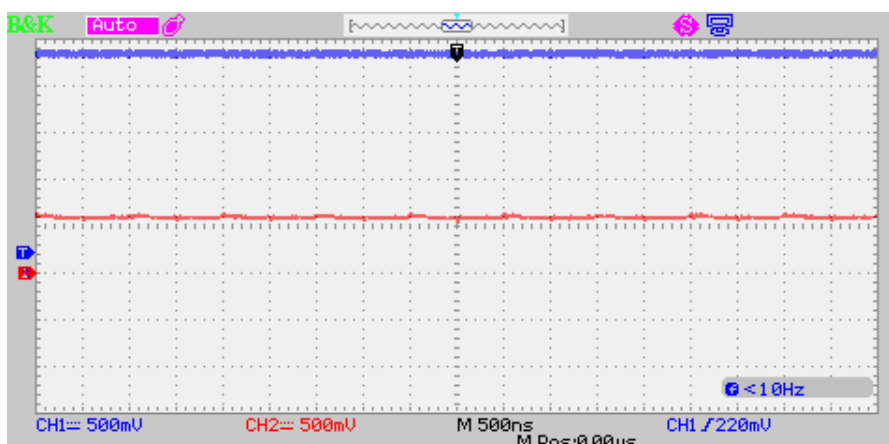
Figura 4.3: Tensão nos nós LD1 e LC2, a azul e vermelho, respectivamente



**Figura 4.4:** Sinal de controlo e tensão na bobina

Na figura 4.3 observamos o carregamento e descarregamento das bobinas com a ativação dos transístores. A azul temos a bobina 1 e vermelho a bobina 2, o comportamento das bobinas é igual mas com um desvio de fase de  $180^\circ$ .

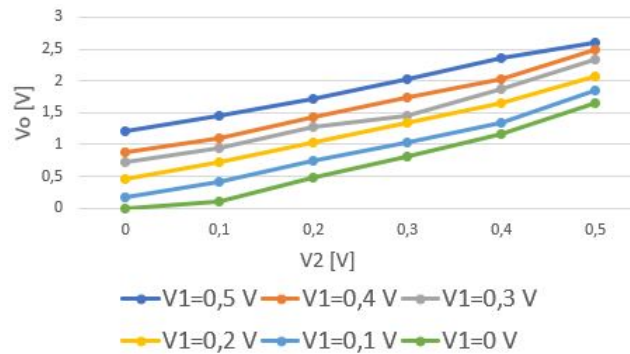
O funcionamento pode-se observar com apoio da figura 4.4, onde está a azul a tensão no nó LD1, e a vermelho o sinal de controlo da bobina. No momento que uma onda atinge o seu pico, o seu transístor está fechado e a bobina está a carregar. No 2º momento, a bobina descarrega porque o transístor está aberto e a energia é conduzida para a saída. Quando o transístor está ligado, observa-se na tensão da bobina um pequeno declive, nesse intervalo em que a tensão é praticamente 0. confirma-se que o conversor entrou no modo de condução descontínua, de acordo com o previsto teoricamente pela simulação.



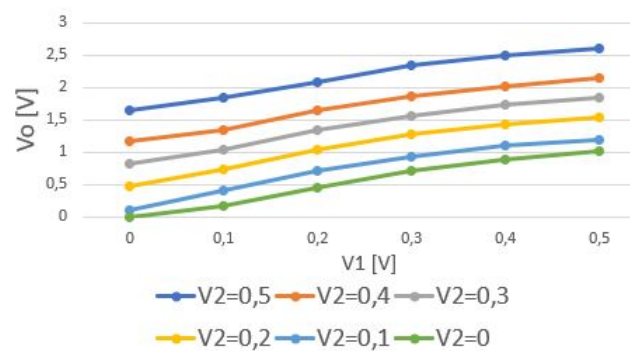
**Figura 4.5:** Tensão de saída com  $100k\Omega$

Nesta figura 4.5, a vermelho está a tensão de entrada nas duas fontes (V1 e V2) e a azul está a tensão de saída (Vo). A tensão de entrada é de 600mV e a de saída tem 2.35V, o que é aproxima-

damente o dobro da soma das entradas. Este valor está de acordo com o valor teórico da saída do circuito.



**Figura 4.6:** Relação entre a tensão de saída e variação de V2 para diferentes valores de V1



**Figura 4.7:** Relação entre a tensão de saída e variação de V1 para diferentes valores de V2

Como se observa nos gráficos das figuras 4.6 e 4.7, o impacto de cada fonte para o circuito é semelhante em declive mas com a fonte V2 a obter valores mais elevados, uma vez que o *charge pump* tem maior impacto em aumentar a tensão de um circuito. Também se pode chegar à conclusão que, se uma das fontes estiver desligada, a outra fonte pode sustentar o circuito se tiver energia suficiente. Esta informação é deveras positiva, uma vez que sendo uma fonte apenas a alimentar, enquadra-se nos problemas de quando uma fonte de EH não tem condições para funcionar.

## 4.2 Fonte de alimentação e oscilador LC

Nesta parte foi implementado um oscilador LC de Collpitts para gerar o sinal à porta do *mosfet* 1 e à porta do *mosfet* 2 através de um inversor. Esse inversor é apenas constituído de um transistor. Este oscilador continua a ser alimentado por uma fonte de alimentação com 0.5V.

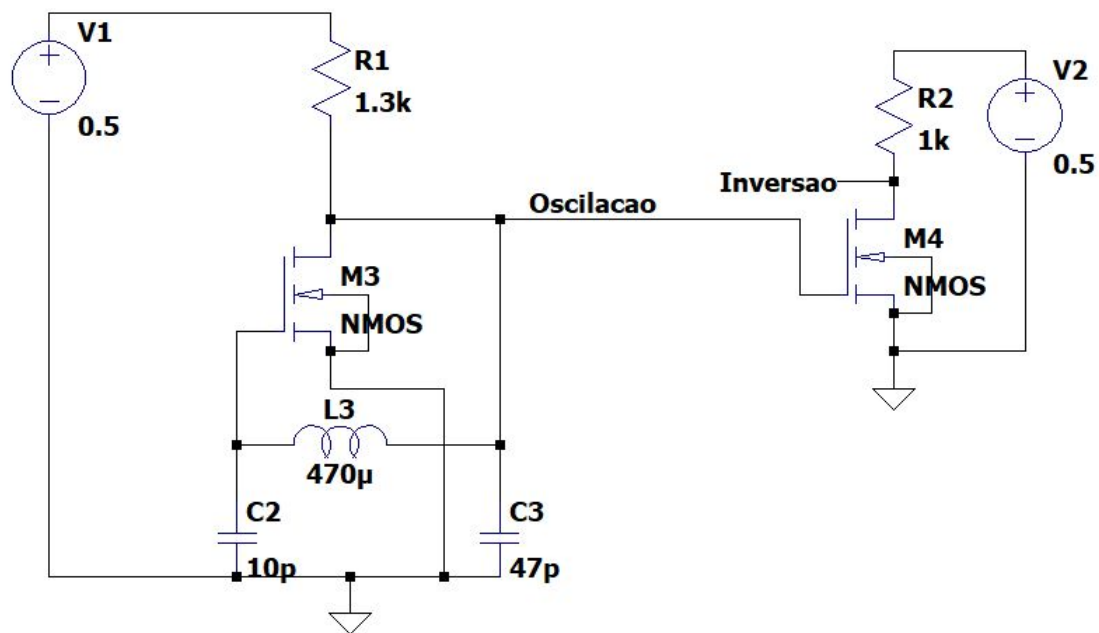


Figura 4.8: Esquema do oscilador LC de Collpitts utilizado

O esquema apresentado na figura 4.8 é o circuito utilizado para o oscilador LC de Collpitts. Do lado esquerdo está o oscilador a gerar o primeiro sinal que controlará o *mosfet* 1, onde o sinal sai no nó "Oscilacao". À direita está a inversão para criar o sinal oposto para o *mosfet* 2 através de um transistor, cujo sinal invertido sai no nó "Inversao". Como ambos são alimentados pela mesma fonte, os circuitos passaram a ser montados em paralelo.

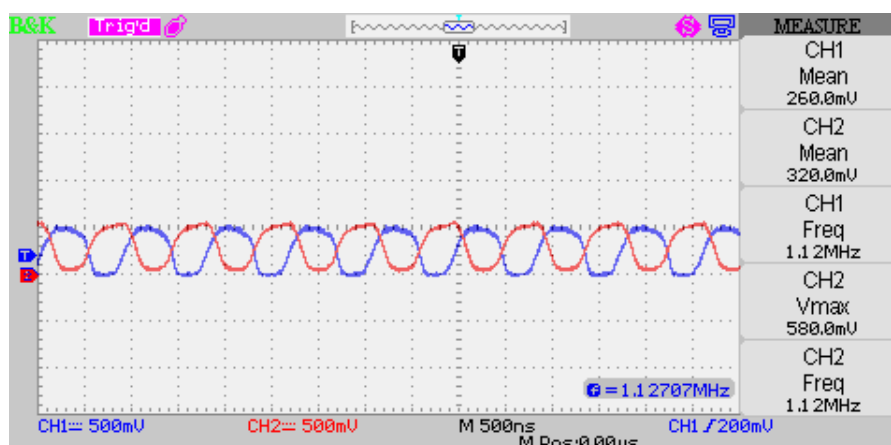
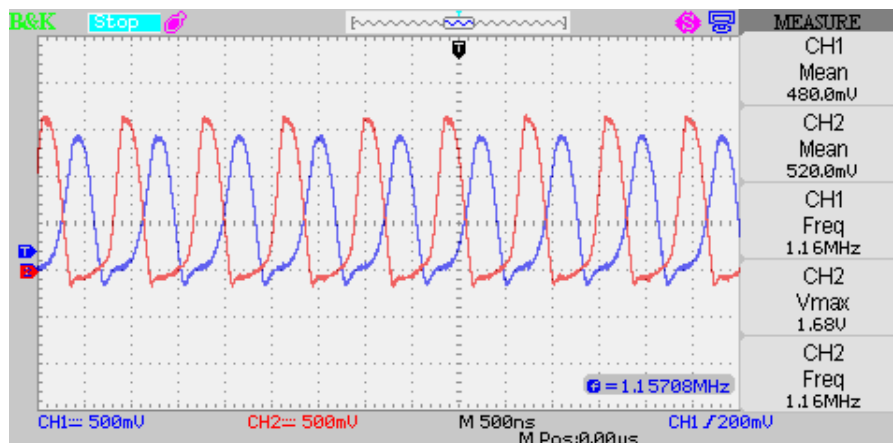


Figura 4.9: Sinal gerado pelo oscilador LC e sua inversão

Na figura 4.9 observa-se as ondas criadas pelo oscilador LC de Collpitts, a azul o sinal do oscilador e a vermelho o sinal criado pela inversão. O sinal gerado tem uma frequência de 1.12 MHz, uma amplitude de 0.5 V e um *duty-cycle* de 50%. O sinal deixa de ser uma onda quadrada perfeita devido às

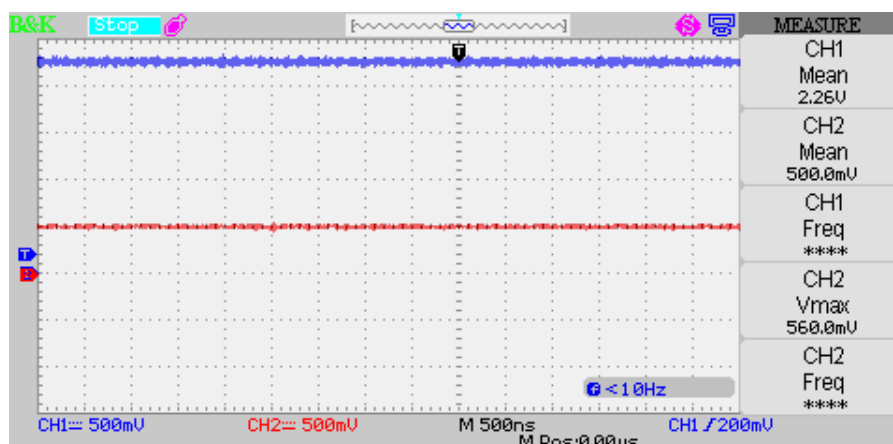
perdas dos componentes, os sinais deixam de ser simétricos, os picos respetivos de cada onda estão bastante próximos. Esta proximidade e não simetria resulta que os dois sinais passaram a ter uma sobreposição de 8%.

A limitação que aparece é que o circuito do oscilador precisa de ser alimentado por 500 mV ou não existe oscilação. Não existindo oscilação o circuito não consegue fazer a combinação nem a elevação da tensão de entrada. Esta limitação é enorme quando o objetivo é trabalhar em ultra baixo consumo e os transdutores nem sempre conseguem fornecer 500 mV.



**Figura 4.10:** Tensão à saída das bobinas

Na figura 4.10 observa-se as tensões às saídas das bobinas. A azul, a tensão no nó LD1 e a vermelho, a tensão no nó LC2. Uma vez que agora os sinais de controlo de cada transístor não são simétricos, as ondas de tensão das bobinas não são simétricas também. Consegue-se observar o deslocamento sofrido das ondas do oscilador nestas ondas, o pico atingido está mais próximo comparado com a figura 4.3.



**Figura 4.11:** Tensão de saída com 100kΩ

Na figura 4.11 temos a saída (azul) e a entrada (vermelho) do circuito montado com uma carga de  $100k\Omega$  alimentado pela fonte de alimentação. Pode-se verificar que continua a existir um fator multiplicativo face às entradas, o que é o pretendido.

Nesta parte, as experiências foram um sucesso do lado que o oscilador funciona, o circuito funciona com o oscilador mas trouxe uma grande dificuldade que é a limitação mínima da alimentação do oscilador.

### 4.3 Fontes de *Energy Harvesting* e oscilador LC

Nesta fase foi testado o sistema em que o circuito e o oscilador fossem alimentados por uma fonte de energia renovável, neste caso a célula solar devido ao fácil controlo para testar. A outra fonte utilizada é o termogerador.

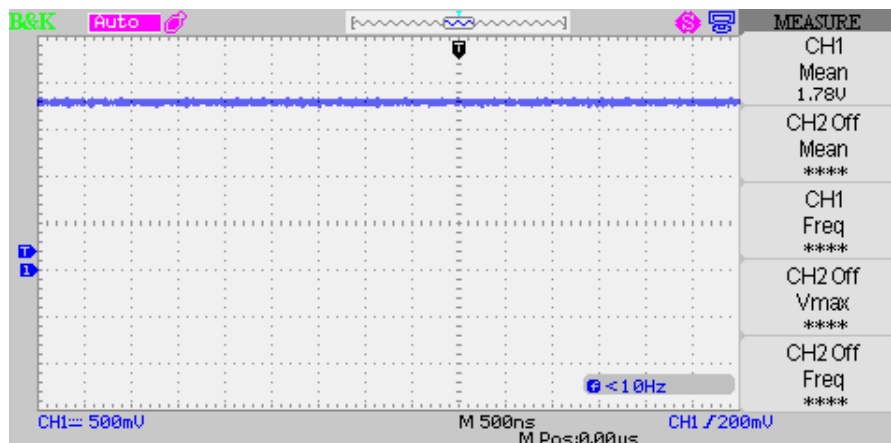
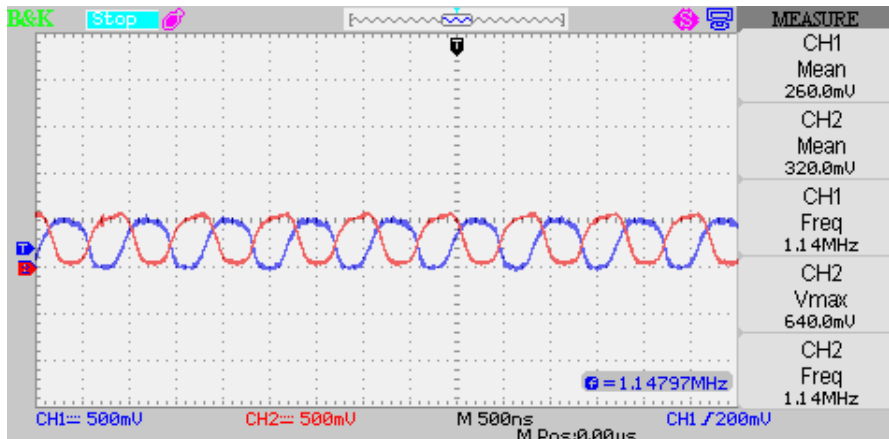


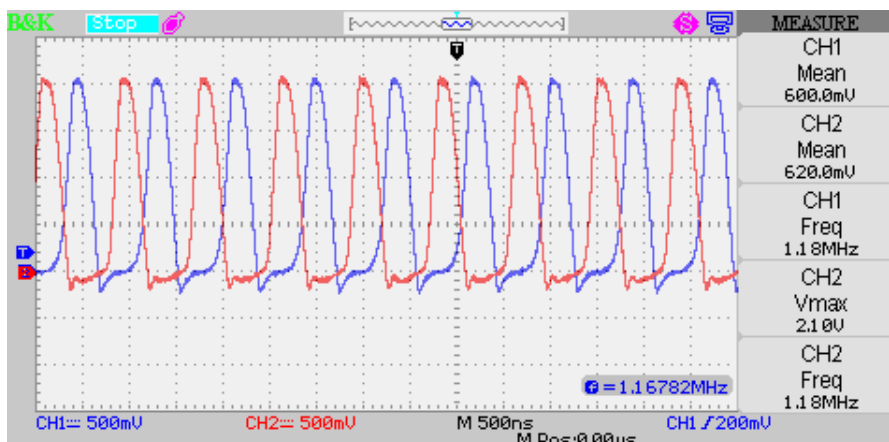
Figura 4.12: Sinal gerado pela célula solar

O teste realizado na figura 4.12 foi iluminar a célula solar com a luz de flash de um telemóvel, o telemóvel encontrava-se encostado para ver o máximo atingível por uma luz artificial.



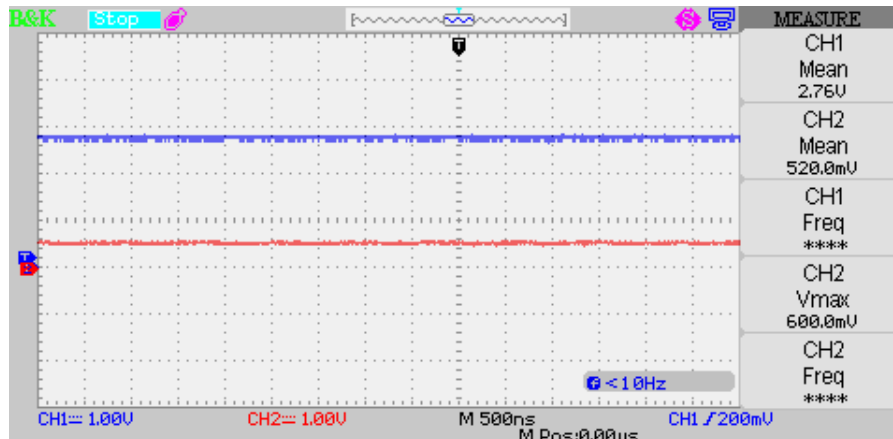
**Figura 4.13:** Sinal gerado pelo oscilador LC e sua inversão

As ondas resultantes da alimentação pela célula são iguais ao obtido pela alimentação pela fonte. Isto é um ponto positivo mas que seria de esperar uma vez que apenas foi mudada a fonte.



**Figura 4.14:** Tensão nos nós LD1 e LC2

Na figura 4.14 temos as ondas de tensão nos nós LD1 e LC2, a azul a tensão LD1 e a vermelho LC2. As ondas resultantes continuam a apresentar o resultado pretendido, tem a mesma forma apresentada na figura 4.10 quando era alimentado por uma fonte ideal, e tem a mesma forma apresentada na figura 3.5 do modo de condução descontínua. O facto do funcionamento ser igual tanto a ser alimentação por uma fonte EH é um ponto muito positivo, significando que a célula é uma viabilidade muito boa para alimentar este tipo de circuito.



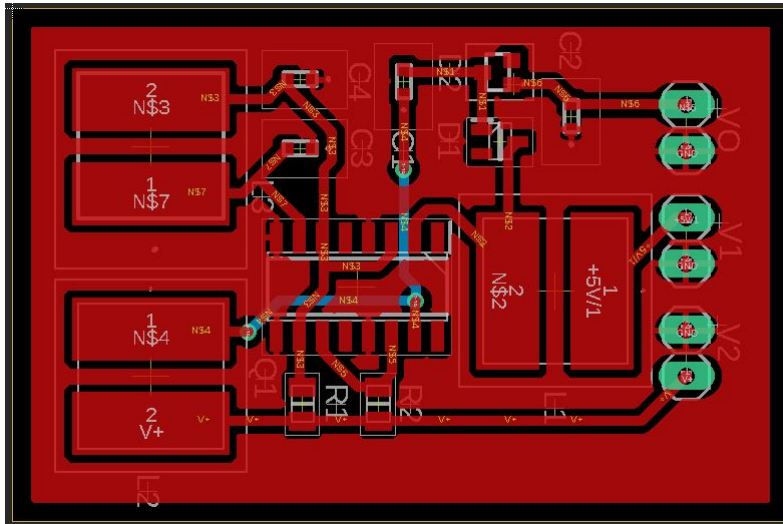
**Figura 4.15:** Tensão de saída com  $100k\Omega$

Na figura 4.15 temos a saída (azul) e a entrada (vermelho) do circuito montado com uma carga de  $100k\Omega$  alimentado pela célula solar. Como se pode verificar, o funcionamento mantém-se ao apresentado com uma fonte ideal a alimentar o circuito. O facto de o circuito ter funcionado como previsto e igual a quando foi alimentado por uma fonte de alimentação é muito positivo, mostrando que esta ideia de trabalho tem viabilidade e fundamentação.

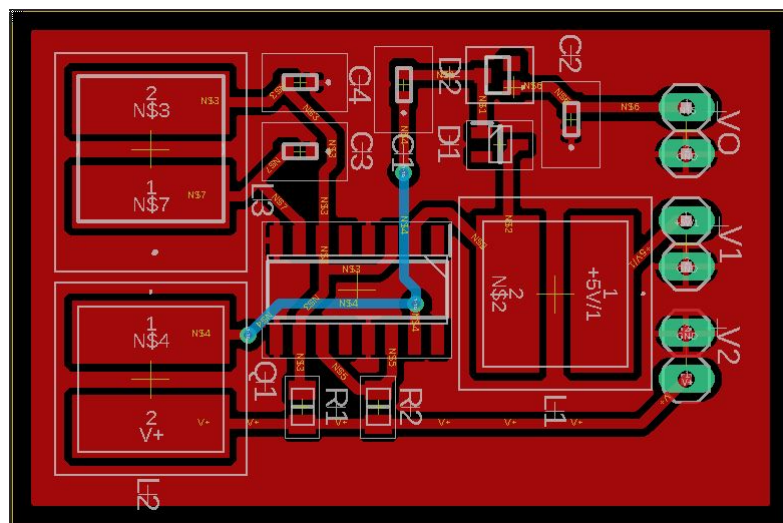
#### 4.4 Protótipo com componentes de baixo perfil em PCB

Nesta parte é apresentado o projeto de um protótipo final do circuito anteriormente apresentado. O dimensionamento do protótipo foi feito com a utilização do programa EAGLE da Autodesk. Para a constituição utilizou-se o critério da área mínima, tentando minimizar o número de camadas e otimizando a compactação do número de componentes montados, Dispositivos de montar (*Surface Mounted Device*) (SMD). A utilização de um *array* de transístores impossibilitou a realização da placa PCB em apenas uma camada devido ao elevado número de cruzamento de pistas. Foi tentado que a PCB englobasse uma ligação direta ao termogerador e à célula solar, de modo a ter tudo num só. Mas não se embutiu a resistência de carga na PCB para permitir a troca desta para testes.

O resultado obtido foi uma placa de duas camadas com uma dimensão de 28.45mm por 42.80mm, com uma área total de  $12.17cm^2$ .



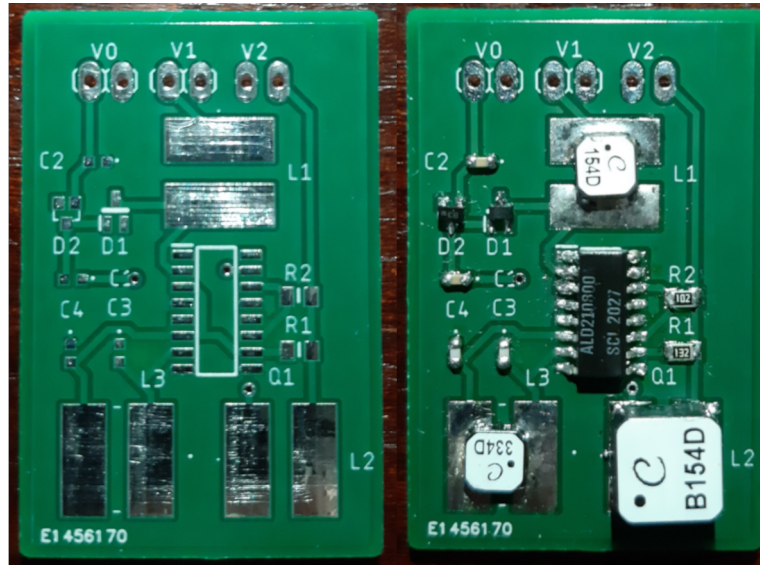
**Figura 4.16:** Camada superior do protótipo no programa EAGLE



**Figura 4.17:** Camada inferior do protótipo no programa EAGLE

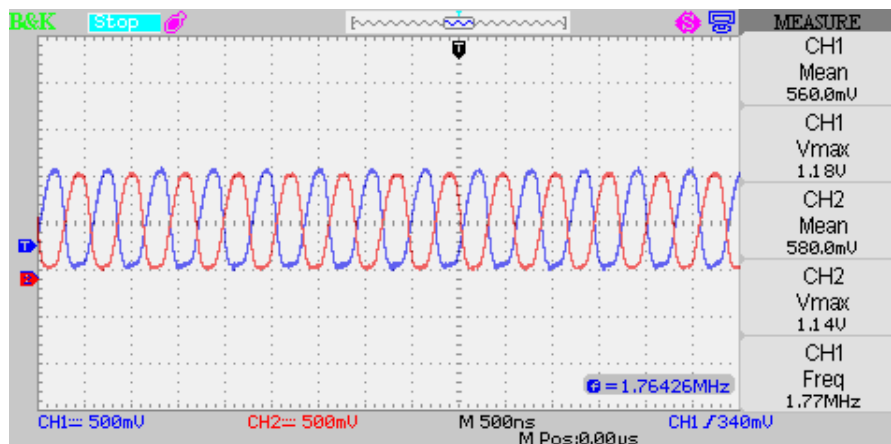
No dimensionamento foi utilizado uma espessura de 0.508mm para os caminhos, uma que não há necessidade de usar uma opção mais pequena. Como se pode observar pelas imagens, metade da placa é ocupada por bobinas, o que não permitia reduzir mais o espaço de placa.

Concretizou-se a placa de maneira que fosse possível mudar a resistência da carga, fez-se assim um acesso por pinos. O mesmo tipo de acesso foi feito para ligarmos as fontes às fontes de EH em V1 e V2.



**Figura 4.18:** Placa PCB com o circuito pré e pós soldadura dos componentes

Concretizou-se a placa de maneira que fosse possível mudar a resistência da carga, fez-se assim um acesso por pinos. O mesmo tipo de acesso foi feito para ligarmos as fontes às fontes de EH em V1 e V2.



**Figura 4.19:** Tensão nos nós LD1 e LC2

Na fig. 4.19 aparece um diferente comportamento ao observado anteriormente neste estudo. A onda diminuiu em escala, a tensão de entrada está ligada à célula solar alimentando o sistema com o mínimo que permite o seu funcionamento, 500mV. O que mudou foi que o circuito passou a funcionar no modo de condução contínua, a onda aparece como uma onda sinusoidal entre 0 e 1 V. Esta mudança deve-se à utilização de diferentes componentes na construção do protótipo em comparação com os utilizados nos testes anteriores. Outro facto que pode ter influenciado, pode ter sido o protótipo em si, o material utilizado, o tamanho das ligações ser demasiado comprido ou grosso, o trabalho de soldadura

não ter sido bem realizado ou por estar no limite da alimentação e seja necessário aumentar a tensão. Isto são outras possibilidades que podem influenciar a mudança de comportamento do circuito.

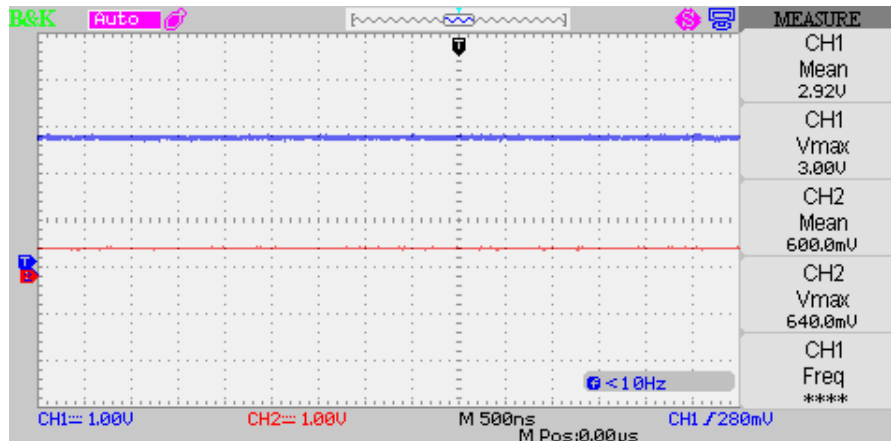


Figura 4.20: Tensão de saída com 100kΩ

Apesar do funcionamento diferente, o circuito continua a oferecer à saída (azul) um valor bastante aceitável de 2.92V com 600mV nas entradas (vermelho) proveniente da célula solar.

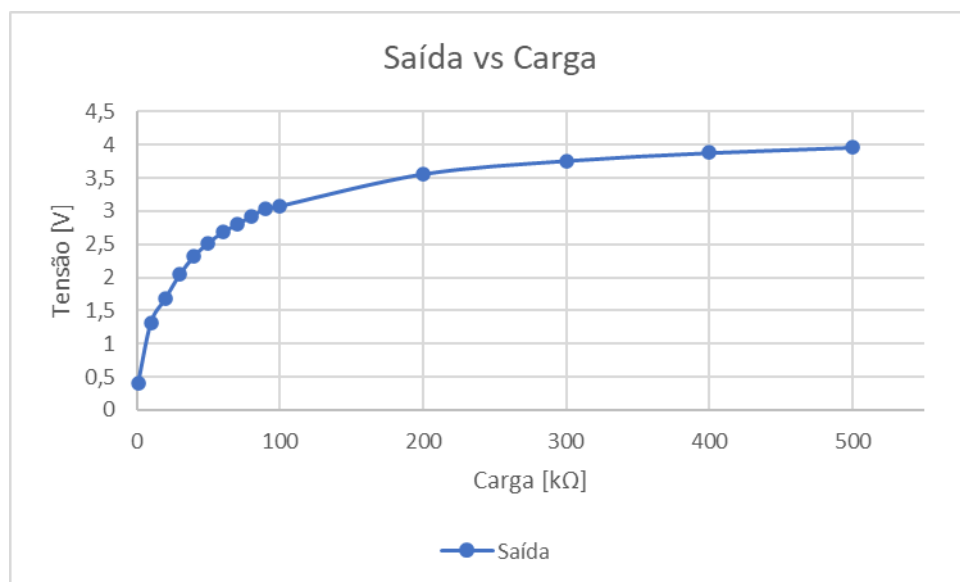
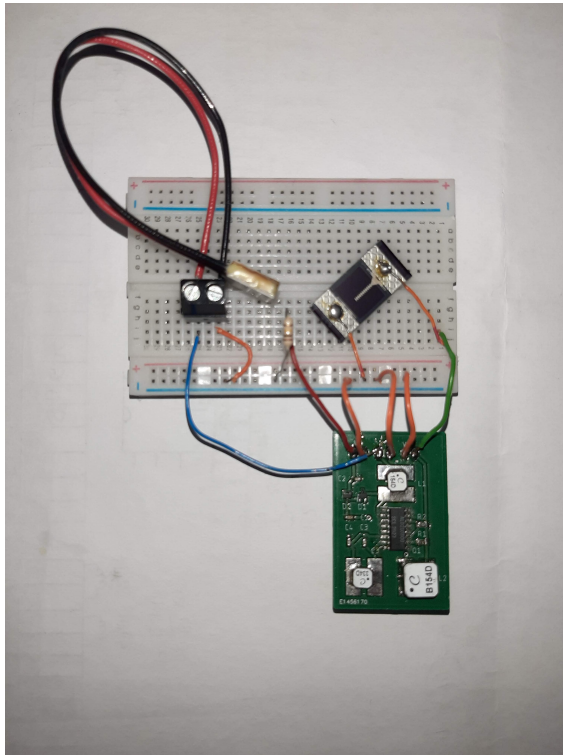


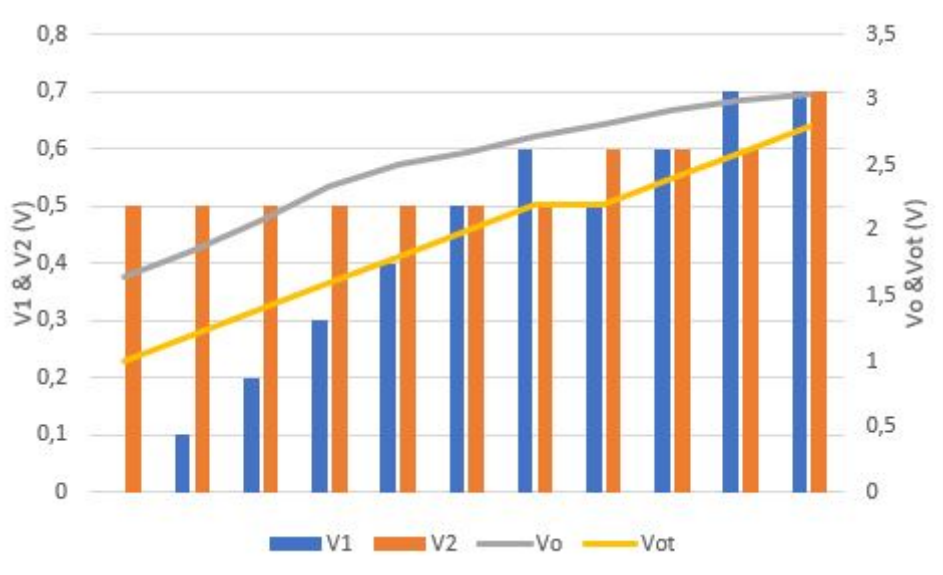
Figura 4.21: Relação entre a tensão de saída e a carga

O gráfico da fig. 4.21 demonstra o impacto da carga para a saída do sistema.



**Figura 4.22:** Protótipo do sistema com as fontes ligadas e uma carga de  $100k\Omega$

Na figura 4.22 é apresentado o sistema com o protótipo, a célula solar, o termogerador e a carga de  $100k\Omega$ .



**Figura 4.23:** Relação entre as duas entradas e a saída real e o valor teórico do protótipo

Na figura 4.23 estão representadas diferentes combinações das entradas V1 e V2, a azul e laranja

respetivamente. Para cada combinação está exposto o valor real, recolhido do protótipo a cinzento confrontado com o valor teórico a amarelo. A escala dos valores de entrada estão à esquerda e os valores da saída estão à direita. Como é possível observar, a saída real é superior ao valor teorizado, o que é bastante bom e mostra que o circuito é melhor que o esperado. Desta maneira pode-se concluir que o circuito funciona para o que este trabalho tinha como objetivo mas com uma limitação.



# 5

## **Conclusões e Trabalho Futuro**

Este projeto demonstra a viabilidade da combinação de pelo menos 2 fontes de EH de ULP para obter uma tensão padronizada de 1.3V, com vista a alimentação de sistemas eletrónicos de ULP, por exemplo IoT. O objetivo de ultrapassar a limitação da utilização de apenas uma fonte de cada vez e poder aproveitar várias ao mesmo tempo, é procurado com a utilização de uma célula solar e um termogerador.

A parte inicial da dissertação foi encontrar um circuito que fizesse o que era pretendido, esta parte envolveu muita procura devido a diferentes tentativas existentes mas, que na essência não eram compatíveis com o objetivo deste trabalho. Outra parte foi escolher os dispositivos que iriam funcionar como fontes de *Energy Harvesting* de uma vastidão que existe, os dispositivos escolhidos sofreram alterações ao longo do projeto devido à pouca energia que eles produziam. Posteriormente, a parte experimental permitiu concluir se o sistema proposto funcionaria ou não, para se poder passar para a criação do protótipo. O sistema completo foi implementado num protótipo em PCB com componentes SMD, com uma área de inferior a 12.2  $cm^2$ .

O sistema funciona para tensões de EH não inferiores a 500mV, devido à necessidade deste valor como mínimo para obter funcionalidade no oscilador. Para além da limitação de alimentação, existe uma limitação em que o oscilador apenas está ligado a umas das fontes, neste caso  $V_{i2}$ . Esta limitação deve-se à falta de um sistema de deteção de qual das fontes tem mais energia.

Este trabalho é considerado um sucesso uma vez que o objetivo foi conseguido, com algumas limitações mas com a aplicação de um circuito muito simples, e permite ser uma base para o estudo nesta área com recurso a um maior número de fontes de recolha de energia combinadas.

Para trabalho futuro sugere-se a abordagem dos seguintes assuntos:

- estudar a alimentação do oscilador através da tensão de saída, de forma a diminuir a tensão mínima de funcionalidade do sistema;
- estudar a inclusão de mais fontes de EH, por alteração do circuito, ou por adição de outros blocos funcionais;
- desenvolvimento de um sistema de controlo para deteção da fonte com maior energia para escolha como alimentação do oscilador e aplicar ao oscilador.

# Referências Bibliográficas

- [1] D. Khan, S.-J. Oh, S. Yeo, Y. Ryu, S.-H. In, R. E. Rad, I. Ali, Y.-G. Pu, S.-S. Yoo, M. Lee, K. C. Hwang, Y. Yang, and K.-Y. Lee, “A high-efficient wireless power receiver for hybrid energy-harvesting sources,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11 148–11 162, 2021.
- [2] R. V. C. Adrivan, R. K. G. Conde, A. B. Caberos, and C. T. C. Doloriel, “An energy combiner for multi-source energy harvesting with charge control,” in *2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2019, pp. 371–376.
- [3] M. A. Abouzied, H. Osman, V. Vaidya, K. Ravichandran, and E. Sánchez-Sinencio, “An integrated concurrent multiple-input self-startup energy harvesting capacitive-based dc adder combiner,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6281–6290, 2018.
- [4] J. J. Estrada-López, A. Abuellil, A. Costilla-Reyes, M. Abouzied, S. Yoon, and E. Sánchez-Sinencio, “A fully integrated maximum power tracking combiner for energy harvesting iot applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2744–2754, 2020.
- [5] L. Colalongo, D. Dotti, A. Richelli, and Z. Kovacs, “A non-isolated multiple-input boost converter for energy harvesting,” *Electronics Letters*, vol. 53, 06 2017.
- [6] E. Team. (2015, junho) Discontinuous conduction mode of simple converters. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/discontinuous-conduction-mode-of-simple-converters/>.
- [7] L. Fraas, *Chapter 6: The Dream of Thin film PV*. Springer, 06 2014.
- [8] Electronic component solar panels. classic application series. [Online]. Available: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/ONP1.2-12x24?qs=DRkmTr78QAQ0Fi5j5r64eg%3D%3D>
- [9] Z. N. C. Cekdin and M. Faizal, “The usage of thermoelectric generator as a renewable energy source,” *Telkomnika*, vol. 14, Agosto 2020.
- [10] Mini thermoelectric generator module. [Online]. Available: <https://www.europanthermodynamics.com/products/datasheets/MGM250-17-10-16-v1.pdf>

- [11] P. M. dos Santos, A. J. Serralheiro, B. Borges, J. P. N. Torres, and A. Charas, "An experimental study on step-up dc & dc converters for organic photovoltaic cells," *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 12, no. 2, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9268/12/2/20>
- [12] A. Richelli, M. Salem, and L. Colalongo, "A review of fully integrated and embedded power converters for iot," *Energies*, vol. 14, p. 5419, 08 2021.
- [13] Analog discovery 2 specifications. [Online]. Available: <https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/specifications>
- [14] J. C. S. Almeida, "Conversor dc-dc elevador de tensão para geradores termoelétricos de muita-baixa potência," Master's thesis, Academia Militar, 2021.