



ESCOLA NAVAL

ta sainte & bief faire



Alcides Leopoldo José Panzo

Colheita e armazenamento de energia para equipamentos militares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval Ramo de Armas e Eletrônica



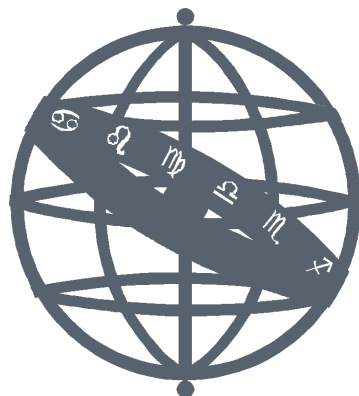
Alfeite

2025



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Alcides Leopoldo José Panzo

*Colheita e armazenamento de energia para equipamentos
militares*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo
de Armas e Eletrónica

Orientação de: Vitor Manuel Rodrigues Viegas

Co-orientação de: Bruno Duarte Damas

O Aluno Mestrando,

O Orientador,

Alcides L.J. Panzo

Alcides Panzo

Vitor Viegas

Alfeite

2025

O autor declara que recorreu a algumas ferramentas de inteligência artificial, utilizadas para pesquisa, organização de ideias e revisão linguística.

Dedico este trabalho aos jovens sonhadores que, como eu, carregam no peito a esperança de transformar o mundo através do saber. Àqueles que acreditam que a excelência académica não é apenas um destino, mas um caminho para servir e elevar as comunidades — dentro e além das fronteiras do continente africano. Dedico-o, com igual carinho, a todos que depositaram fé em mim, mesmo quando os ventos eram incertos. A cada gesto de apoio, a cada palavra de encorajamento — este é também o vosso legado.

Agradecimentos

Esta dissertação representa o culminar de um percurso ininterrupto iniciado em agosto de 2017, com o meu ingresso na Academia Naval em Luanda. Ao longo desta jornada, tive também passagens pela Escola de Fuzileiros Navais do Bengo e pela Academia Militar de Portugal, até chegar à Escola Naval, onde me encontro desde 29 de setembro de 2019.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, criador dos céus e da terra, que tem sustentado a minha vida, concedendo-me saúde, sabedoria e forças para enfrentar os desafios destes anos longe de casa.

Aos meus queridos pais, Sukissa e Lutala, pelo apoio incondicional e pelo lar feliz que me proporcionaram, transmitindo-me valores e princípios que têm guiado o meu desenvolvimento como homem.

Aos meus irmãos Apolónio, Claver, Cláudio, Clénio, Adalgisa e Madalena, pela constante disponibilidade, carinho e apoio em todos os momentos.

À minha amada, Leodumira Irina, pelo companheirismo, incentivo e, sobretudo, pela compreensão da minha ausência ao longo destes anos de dedicação intensa.

Ao meu camarada e amigo de longa data, Nilson da Silva, pela caminhada lado a lado durante estes oito anos.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Vitor Viegas e Professor Doutor Bruno Damas, pela orientação científica, pelas recomendações valiosas e pela constante disponibilidade ao longo dos seis anos de curso, servindo-me como referências humanas e académicas.

Aos meus pastores Francisco e Conceição, pelo acolhimento, acompanhamento espiritual e apoio no meu crescimento religioso e moral.

Aos meus tios, João e Maria, e aos meus primos, Simão e Sara, pelo carinho e incentivo.

À Marinha de Guerra e às Forças Armadas Angolanas, pelo apoio logístico e financeiro que tornou possível toda a minha formação.

À Academia Militar, por ter sido o meu primeiro lar em Portugal, pelos desafios e valores que me transmitiu, preparando-me para enfrentar um país multicultural e exigente.

Ao Coronel de Infantaria Bruno Brito, pelo apoio incondicional, e a todos os professores da Academia Militar, pela dedicação e contributo no meu percurso.

À Escola Naval e à Marinha Portuguesa, pela excelência da formação e por todo o apoio logístico recebido ao longo destes anos.

Ao Comandante do Corpo de Alunos, CFR M Saldanha Junceiro, pela postura ímpar e disciplinada que enfrentou os desafios que surgiram durante este percurso.

Aos meus camaradas do Curso Fernão de Magalhães, pelas experiências partilhadas que tanto contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus companheiros da Zakhumi Vision, que, mesmo na minha ausência física, continuam a elevar diariamente o projeto com dedicação e distinção.

Por fim, a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, estiveram presentes nesta caminhada e contribuíram para o meu crescimento pessoal, social, cultural, religioso e académico: a minha eterna gratidão

Resumo

A crescente dependência de fontes externas de energia em operações militares representa um desafio logístico e estratégico, especialmente em ambientes remotos ou hostis. A necessidade de soluções energéticas autônomas, sustentáveis e de baixa manutenção tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas de colheita de energia capazes de alimentar dispositivos eletrônicos de forma contínua e eficiente.

Neste contexto, esta dissertação propõe a análise da viabilidade de um sistema de colheita de energia baseado no módulo BQ25570, alimentado por fontes renováveis de baixa potência, como painéis solares, transdutores piezoelétricos e células de Peltier. O trabalho combina simulações no software TINA-TI com ensaios experimentais, avaliando o desempenho do sistema em condições reais e controladas.

Os resultados demonstram que, entre as fontes testadas, apenas o painel solar foi capaz de carregar efetivamente o supercondensador, atingindo os limiares necessários para ativação do circuito. As fontes térmica e piezoelétrica, embora tenham gerado tensão, não apresentaram potência suficiente para iniciar o carregamento. A integração do algoritmo MPPT revelou-se eficaz na otimização da captação solar, enquanto a análise da autodescarga do supercondensador evidenciou limitações em aplicações prolongadas.

Este estudo contribui para o avanço na área de sistemas energéticos autônomos, propondo uma solução modular e eficiente, com potencial aplicação em equipamentos militares, sensores remotos e dispositivos IoT. São ainda apresentadas propostas para trabalhos futuros, visando a melhoria da conversão energética e a integração com tecnologias emergentes.

Palavras-chave: Colheita de energia, painel solar, Peltier e circuito integrado.

Abstract

The growing dependence on external energy sources in military operations presents logistical and strategic challenges, particularly in remote or hostile environments. The need for autonomous, sustainable, and low-maintenance energy solutions has driven the development of energy harvesting systems capable of powering electronic devices continuously and efficiently.

In this context, this dissertation proposes an analysis of the feasibility of an energy harvesting system based on the BQ25570 module, powered by low-power renewable sources such as solar panels, piezoelectric transducers, and Peltier cells. The study combines simulations using TINA-TI software with experimental testing, evaluating the system's performance under both real and controlled conditions.

The results show that among the sources tested, only the solar panel was able to effectively charge the supercapacitor, reaching the voltage thresholds required to activate the circuit. Although the thermal and piezoelectric sources generated voltage, they did not produce sufficient power to initiate charging. The integration of the MPPT algorithm proved effective in optimizing solar energy capture, while the analysis of the supercapacitor's self-discharge highlighted limitations for long-term applications.

This study contributes to the advancement of autonomous energy systems by proposing a modular and efficient solution with potential applications in military equipment, remote sensors, and IoT devices. Future work is suggested to improve energy conversion, reduce losses, and integrate emerging technologies such as smart textiles and low-power electronics.

Keywords: Energy harvesting, solar panel, Peltier and integrated circuit.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Relevância	3
1.4	Desafios	3
1.5	Estrutura do documento	4
1.6	Metodologia	4
2	Estado da arte	7
2.1	Conceito de colheita de energia	7
2.2	Principais tecnologias de colheita de energia	9
2.2.1	Energia solar	9
2.2.2	Energia Piezoelétrica	15
2.2.3	Energia Térmica	17
	Arquitetura de um Gerador Termoelétrico (TEG)	18
	Aplicações e Vantagens	19
	Eficiência e Limitações	19
	Diferença entre TEG e TEC	20
2.2.4	Energia de Radiofrequência	22
2.3	Circuitos típicos de colheita e gestão de energia	24
2.3.1	Conversão AC/DC e DC/DC	24
2.3.2	Características relevantes dos PMIC	28
2.3.3	Requisitos para seleção de um PMIC	29
2.3.4	Análise Crítica	30
2.4	Integração com Equipamentos Militares	32
2.5	Trabalhos Relacionados	33
2.6	Desafios e Limitações Atuais	35

3	Desenvolvimento	39
3.1	Requisitos Funcionais e Técnicos	40
3.1.1	Seleção de Fontes de Energia	43
	Energia Solar	43
	Energia Piezoelétrica	44
	Energia Termoelétrica	45
3.1.2	Circuito de Gestão de Energia: BQ25570	46
3.1.3	Armazenamento de Energia	49
3.2	Arquitetura	52
4	Testes realizados e análise de resultados	53
4.1	Metodologia de Testes	53
4.2	Simulação do Pannel Solar no TINA-TI	54
	Configuração do MPPT	55
	Armazenamento de Energia – VSTOR	56
	Configuração global do circuito	57
	Análise das Curvas de Simulação	57
4.3	Testes por Fonte de Energia	60
4.3.1	Painel solar	60
	Carregamento do Supercondensador	61
	Avaliação da Autodescarga do Supercondensador 0,22 F/5,5 V	62
4.3.2	Célula Peltier (TEC)	64
	Análise Experimental da Célula Peltier em Modo Gerador - Sistema Fogão/Gelo	66
	Análise Experimental da Célula Peltier em Modo Gerador – Sistema Fogão/Ambiente	69
4.3.3	Filme Piezoelétrico: Determinação da Resistência Ótima	71
	Esquema Eléctrico do Circuito	71
	Plataforma de Teste e Aquisição de Dados	71
	Forma de Onda Gerada	72
	Resistência Ótima	73
4.4	Análise dos Resultados	74
4.5	Discussão	75
5	Considerações Finais	77
5.1	Conclusões	77
5.2	Limitações Identificadas	77
5.3	Contribuições do Trabalho	78

5.4 Perspectivas Futuras	78
Bibliografia	79
Apêndices	85
A Folha de cálculo disponibilizada pelo fabricante para dimensionamento do circuito	85
B Tabela de valores de tensão e corrente da simulação no TINA-Ti	87
C Resultados Experimentais da célula de Peltier	89
Anexos	91
I Diagrama Funcional do CI BQ25570 para painel solar	91
II Configuração dos pinos do módulo BQ25570	93
III Características, aplicações e descrição do módulo BQ25570	95

Lista de Figuras

2.1	Energy Harvesting Sources (Pandey 2020).	8
2.2	Sistema de colheita de energia (Elahi, Munir, Eugeni, Gaudenzi e Atek 2020).	8
2.3	Estrutura atômica do silício monocristalino, policristalino e amorfo.	11
2.4	a) Estrutura cristalina das perovskitas. b) Aplicação em painel solar.	11
2.5	Estrutura interna de uma junção PN.	12
2.6	Circuito Equivalente do Painel Solar.	13
2.7	Curva característica de um painel solar.	14
2.8	Esquema de funcionamento de um interruptor piezoelétrico, com ativação por pressão e alimentação entre 5 – 24 V.	16
2.9	Protótipo desenvolvido por Vitorino 2022.	17
2.10	Arquitetura típica de um módulo termoeletrico, composta por pares tipo N e tipo P conectados em série entre placas cerâmicas. Adaptado de (Chen, Yufei Zhang, Liu, Wang, Yucheng Zhang e Yadong Zhang 2022).	19
2.11	Esquema representativo de um sistema RF <i>Harvesting</i>	23
2.12	Retificador de meia onda.	25
2.13	Estrutura de um retificador de onda completa com ponte de Graetz.	26
2.14	Topologia típica de um conversor <i>buck</i>	27
2.15	Topologia típica de um conversor <i>boost</i>	27
2.16	Conversor <i>buck-boost</i>	27
2.17	Características relevantes dos principais PMICs	29
2.18	Comparação eficiência por módulo.	31
2.19	Comparação tensão de arranque por módulo.	31
3.1	Painel solar 60x60 mm RY6-427 policristalino da PTRobotics.	44
3.2	Filme piezoelétrico L-series sensor L-3030 290x300 mm da Emfit que será utilizado como uma fonte alternativa de alimentação do módulo BQ25570.	45
3.3	Célula de Peltier TEC1-03104.	46
3.4	Diagrama de blocos funcionais do CI BQ25570.	48

3.5	Circuito funcional alimentado por um painel solar.	49
3.6	Armazenador principal do módulo BQ25570.	50
3.7	Bateria de Polímero de Lítio LP553436 3.7V 700mAh.	51
3.8	Arquitetura proposta para o protótipo físico.	52
4.1	Representação simplificada da fonte alimentação.	55
4.2	Método de regulação do MPPT do BQ25504 por meio de resistências externas.	56
4.3	Arquitetura do circuito BQ25504 alimentado por um painel solar. .	58
4.4	Curvas resultantes da simulação do BQ25504 no TINA-TI	59
4.5	Montagem experimental do sistema de colheita de energia com pai- nel solar policristalino, circuito em <i>breadboard</i> e monitorização por osciloscópio Tektronix TDS 1002B.	61
4.6	Evolução da tensão de carregamento do supercondensador de 0,22 F através do circuito com o PMIC BQ25570.	62
4.7	Descarga Natural do Supercondensador de 0,22 F sem Carga Conec- tada.	63
4.8	Testes preliminares com a célula de Peltier.	64
4.9	Configuração experimental da célula de Peltier após otimização tér- mica, com chapas de alumínio (5x7mm) e vedação em papel de alu- mínio para melhorar o desempenho e evitar infiltrações.	65
4.10	Aparato de ensaios para célula de Peltier.	66
4.11	Montagem experimental para a caracterização do efeito Seebeck, uti- lizando uma célula de Peltier entre uma fonte quente (fogão) e uma fonte fria (gelo), com medição das grandezas elétricas em função do gradiente térmico (ΔT) e do tempo de funcionamento.	67
4.12	Gráficos de desempenho termoelétrico do sistema Fogão/Gelo: corre- lações entre ΔT , V_{oc} , I_{sc} , potência e tempo.	68
4.13	Gráficos de desempenho termoelétrico do sistema Fogão/Ambiente: correlações entre ΔT , V_{oc} , I_{sc} , potência e tempo.	70
4.14	Esquema eléctrico do circuito de teste com resistência de carga em paralelo.	71
4.15	Plataforma de ensaio com ligação ao osciloscópio.	72
4.16	Variação da tensão gerada pelo filme piezoelétrico durante um passo. .	72
4.17	Determinação experimental da resistência ótima para colheita de ener- gia	74
A.1	Limiares de tensão de carregamento seguro	85

A.2	MPPT definido pelo fabricante	86
B.1	Tabela de valores da corrente e tensão	87
C.1	Sistema Ambiente/Fogão	89
C.2	Sistema Gelo/Fogão	90
I.1	Digrama funcional do painel	91
II.1	Pinos do BQ25570	93
III.1	Circuito Integrado BQ25570	95

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre TEG e TEC quanto à função, princípio de operação e aplicações	21
2.2	Comparação simplificada entre Tensão de arranque e Eficiência dos diferentes PMICs	30
2.3	Comparação de abordagens de colheita de energia para aplicações militares.	35
3.1	Especificações técnicas para sistema de colheita de energia.	41
3.2	Requisitos Técnicos do Sistema.	42
3.3	Descrição dos principais pinos do PMIC.	47
3.4	Resumo comparativo entre Supercondensadores e Baterias Li-Po adaptado de (University 2025).	52
4.1	Configuração do ponto de operação MPPT.	55
4.2	Resumo comparativo entre simulação e datasheet do BQ25504 . . .	60

Lista de Equações

2.1	Corrente produzida pelo painel	13
2.2	Tensão gerada por efeito Seebeck	18
2.3	Eficiência dos materiais termoeletricos	20
3.1	Referência para a tensão de rastreamento do ponto de potência máxima	48
4.1	Cálculo do MPPT	56
4.2	Energia armazenada no supercondensador	57
4.3	Relação linear tensão/temperatura	68
4.4	Potência na carga	73

Lista de Abreviaturas

AC-	<i>Alternated Current</i>
AD-	<i>Analog Devices</i>
BIPV-	<i>Buiding Integrated Phototovoltaics</i>
CMOS-	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CPU-	<i>Central Processing Unit</i>
DC-	<i>Direct Currect</i>
EMI-	<i>Electromagnetic Interference</i>
F.E.M-	Força Electromotriz
IoT-	<i>Internet of Things</i>
ISE-	<i>Institute for Solar Energy Systems</i>
I-V-	Curva Tensão-Corrente
LT-	<i>Linear Technology</i>
MATLAB-	<i>Matrix Laboratoty</i>
MPPT-	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MOSFET-	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transitor</i>
NATO-	<i>North Athlantic Treaty Organization</i>
PMIC-	<i>Power Management Integrated Circuits</i>
RF-	Radiofrequências
RFI-	<i>Radiofrequency INterference</i>
SONAR-	<i>Sound Navigation And Ranging</i>
TEC-	Thermo Electric Cooler
TEG-	<i>Thermo Eletric Generator</i>
TI-	<i>Texas Instruments</i>
UV-	Ultra Violeta
Wi-Fi-	<i>Wireless Fidelity</i>

Lista de Símbolos

I	Corrente elétrica	A
P	Potência	W (J s^{-1})
R	Resistência	Ω
S_A e S_B	Coeficiente de Seebeck	(V K^{-1})
T	Temperatura	K
V	Tensão elétrica	V
ZT	Eficiência térmica	
κ	condutividade térmica total	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
σ	condutividade elétrica	S m^{-1}
ρ	Densidade de potência	W m^{-2}

Capítulo 1

Introdução

A crescente procura por autonomia energética nas operações militares tem impulsionado diversas investigações centradas no desenvolvimento de tecnologias de colheita de energia. Em contextos operacionais remotos e de difícil acesso, a disponibilidade de energia elétrica convencional é, frequentemente, limitada ou inexistente, o que compromete a continuidade das missões e o desempenho dos sistemas eletrónicos utilizados.

Neste âmbito, a dependência de baterias recarregáveis representa um desafio significativo. Do ponto de vista logístico, o seu transporte em operações prolongadas revela-se complexo, oneroso e, por vezes, arriscado, colocando em causa a segurança das tropas e das infraestruturas envolvidas. Adicionalmente, o peso dos acumuladores influencia negativamente a mobilidade dos combatentes (Vitorino 2022).

A ausência de infraestruturas adequadas para o carregamento de baterias em campo compromete não apenas a autonomia das forças militares, mas também a eficácia das suas operações. Como resposta a esta limitação, diversas soluções de baixo consumo energético têm sido propostas, tirando partido de fontes abundantes no meio ambiente, com a energia solar, vibrações mecânicas (através de materiais piezoelétricos), radiofrequência ou gradientes térmicos.

Estas tecnologias de colheita de energia apresentam-se como alternativas promissoras, ao permitirem a geração local e contínua de energia, promovendo a sustentabilidade energética dos sistemas militares (Teixeira 2022a).

1.1 Motivação

A Marinha Portuguesa tem, nos últimos anos, investido na modernização dos seus meios, incluindo a aquisição de câmaras de visão noturna, sistemas de navegação e comunicações avançadas, com objetivo de reforçar a sua capacidade

operacional e responder eficazmente aos seus desafios contemporâneos. Enquanto membro da NATO e da União Europeia, Portugal desempenha um papel estratégico na manutenção da estabilidade em regiões como África, Europa do Leste e Médio Oriente. De acordo com o Ministério da Defesa Nacional 2020, estes investimentos visam assegurar a prontidão e eficácia das Forças Armadas em contextos de elevada exigência.

Apesar dos avanços tecnológicos proporcionados pelos novos equipamentos eletrónicos, persiste a dependência de fontes de energia convencionais, nomeadamente combustíveis fósseis, para o carregamento de baterias, especialmente em cenários de combate. Neste contexto, a integração de tecnologias de colheita de energia desponta como uma abordagem inovadora e sustentável, contribuindo não apenas para redução das emissões de gases poluentes, mas também para o aumento da eficiência energética e da autonomia dos sistemas utilizados pelas forças armadas (Swanner 2017).

1.2 Objetivos

Para orientar o desenvolvimento desta dissertação, estabeleceu-se os objetivos que norteiam a investigação. Estes dividem-se em objetivo geral, que define de forma genérica o estudo e em objetivos específicos que delimitam a investigação.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta investigação consiste na análise da viabilidade da colheita de energia através do módulo BQ25570, da Texas Instruments (TI), quando alimentado por diferentes fontes renováveis, nomeadamente painéis solares, transdutores piezoelétricos e células de Peltier. Pretende-se, com esta abordagem, avaliar o desempenho e a eficiência do referido circuito integrado de gestão energética, tendo em vista a sua aplicação em contextos operacionais militares. A principal motivação subjacente ao estudo reside na procura de soluções tecnológicas que promovam uma maior autonomia energética, fiabilidade e sustentabilidade em equipamentos utilizados pelas forças armadas, contribuindo assim para o reforço da capacidade operativa em ambientes exigentes e de difícil acesso.

1.2.2 Objetivos Específicos

Tendo por base o objetivo geral delineado, importa definir um conjunto de metas específicas que orientam de forma sistemática a realização do presente

trabalho. Estes objetivos específicos permitem delimitar o âmbito da investigação, orientar a recolha e análise de dados, e garantir que as diversas etapas do estudo conduzem a conclusões fundamentadas e coerentes. Assim, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho do módulo em diferentes condições operacionais;
- Comparar a eficiência de diferentes fontes de energia (solar, piezoelétrica e termoeétrica);
- Avaliar a possibilidade de integração dos sistemas de colheita de energia em equipamentos militares existentes.

1.3 Relevância

O presente estudo assume particular relevância para as Forças Armadas, ao abordar a necessidade crescente de soluções energéticas sustentáveis, autónomas e adaptáveis a cenários operacionais exigentes. Em locais onde o acesso à rede elétrica é limitado ou inexistente, a adoção de sistemas de colheita de energia revela-se fundamental.

Para além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar o impacto ambiental das operações, estas tecnologias proporcionam uma maior autonomia às tropas, contribuindo para o prolongamento das missões e para o aumento da eficácia dos equipamentos eletrónicos. Simultaneamente, promovem a inovação tecnológica, com o potencial de aplicação em diversas áreas, nomeadamente no desenvolvimento de novos materiais e dispositivos adequados para ambientes adversos.

A segurança energética constitui igualmente uma questão crítica, uma vez que a capacidade de geração local de energia minimiza a vulnerabilidade associada à logística de reabastecimento, conferindo maior robustez e resiliência às operações.

1.4 Desafios

A implementação de sistemas de colheita de energia em contexto militar enfrenta múltiplos desafios. O desempenho dos dispositivos está intrinsecamente ligado a variáveis ambientais como a temperatura, a humidade e os níveis de iluminação, os quais podem comprometer a eficiência dos módulos e requer estratégias de otimização adequadas (Bai 2018). Outro obstáculo relevante prende-se com a integração destes sistemas em equipamentos militares existentes, cuja arquitetura e

regulamentação incluem normas relativas ao fardamento, plataformas operacionais e interoperabilidade podem limitar modificações (Othman 2017).

Adicionalmente, a robustez e a fiabilidade dos dispositivos são fatores determinantes, dada a exposição a ambientes hostis que envolvem vibrações, impactos mecânicos e condições climáticas extremas. A durabilidade dos sistemas deve, assim, ser assegurada de forma a garantir a repetibilidade dos testes e a operacionalidade contínuas dos módulos de testes.

1.5 Estrutura do documento

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos:

Capítulo 1- Introdução: apresenta o enquadramento do tema, a sua relevância, os objetivos da investigação e os principais desafios identificados;

Capítulo 2- Estado da Arte: realiza uma revisão crítica da literatura sobre tecnologias de colheita de energia, com ênfase nas aplicações no domínio militar, discutindo as principais abordagens propostas (solar, piezoelétrica e térmica) e as lacunas existentes;

Capítulo 3- Desenvolvimento: descreve o desenvolvimento técnico do sistema proposto, incluindo o desenho, os materiais utilizados e as estratégias de integração em plataformas militares.

Capítulo 4- Testes Realizados e Análise de Resultados: este capítulo descreve os ensaios experimentais realizados, os métodos utilizados e os dados recolhidos, com o objetivo de avaliar o desempenho das soluções propostas. Os testes foram conduzidos em condições controladas, utilizando equipamentos específicos e parâmetros previamente definidos.

Capítulo 5- Considerações Finais: são apresentadas as conclusões do trabalho, limitações identificadas e sugestões para investigações futuras.

1.6 Metodologia

A metodologia adotada nesta investigação baseia-se numa abordagem mista, de natureza predominantemente experimental, combinando métodos qualitativos e quantitativos para uma compreensão mais abrangente da viabilidade da colheita de energia com o módulo BQ25570. Serão utilizadas como fontes de alimentação painéis solares e elementos piezoelétricos, simulando condições típicas dos cenários militares,

incluindo iluminação natural e vibração mecânica. O ambiente experimental será cuidadosamente definido de forma a representar condições reais de operação.

O plano de testes compreenderá as seguintes etapas:

- Montagem e configuração do módulo BQ25570;
- Integração de diferentes fontes de energia (solar, piezoelétrica e térmica);
- Simulação de circuitos em software Tina-TI/LT SPICE;
- Processamento e visualização de dados em MATLAB.

A análise de dados obtidos permitirá avaliar o desempenho e a eficiência do sistema de colheita de energia em diferentes condições operacionais, possibilitando conclusões fundamentais sobre a sua aplicabilidade nas Forças Armadas.

Capítulo 2

Estado da arte

O presente capítulo tem como finalidade apresentar uma revisão transversal das principais tecnologias de colheita de energia, onde serão abordadas as principais fontes de energia, com especial ênfase nas aplicações proeminentes no domínio militar, destacando-se a análise comparativa de fontes de energias mais utilizadas, como a solar, piezoelétrica, RF (Radiofrequência) e térmica, bem como os dispositivos e circuitos responsáveis pela sua conversão e gestão eficiente. Serão igualmente discutidas as tendências atuais, os principais desafios no processo de integração destas tecnologias em sistemas militares e as lacunas existentes na literatura científica.

A análise crítica da literatura visa não apenas identificar os avanços realizados até ao momento, mas também fundamentar a relevância da investigação desenvolvida nesta dissertação. Deste modo, este capítulo constitui a base teórica essencial para a compreensão do problema em estudo e o desenvolvimento de soluções adequadas às exigências dos desafios operacionais das forças armadas.

2.1 Conceito de colheita de energia

A colheita de energia, também conhecida como *energy harvesting* ou *power scavenging*, refere-se ao processo de captura e conversão de pequenas quantidades de energia disponíveis no ambiente para alimentar dispositivos eletrónicos de baixo consumo, como sensores, transmissores e sistemas integrados (Paradiso e Starner 2005). Segundo (Priya e Inman 2009), esta abordagem visa substituir ou complementar o uso de baterias convencionais, sobretudo em aplicações onde a substituição ou recarga frequente das mesmas se revela impraticável ou ineficiente. A figura 2.1 ilustra as principais fontes de energia.



FIGURA 2.1: Energy Harvesting Sources (Pandey 2020).

O princípio de funcionamento da colheita de energia baseia-se na conversão das diferentes formas de energia disponíveis na natureza, como a luz solar, vibrações mecânicas, variações térmicas ou ainda a radiação eletromagnética, em energia elétrica utilizável. Essa energia é, em seguida, regulada, armazenada e distribuída para circuitos eletrônicos, normalmente através de um sistema de gestão de energia composto por retificadores, conversores DC-DC, reguladores e sistemas de armazenamento, com supercondensadores ou baterias recarregáveis (Priya e Inman 2009), tal como a figura 2.2 abaixo descreve a arquitetura típica de um sistema de *energy harvesting*.

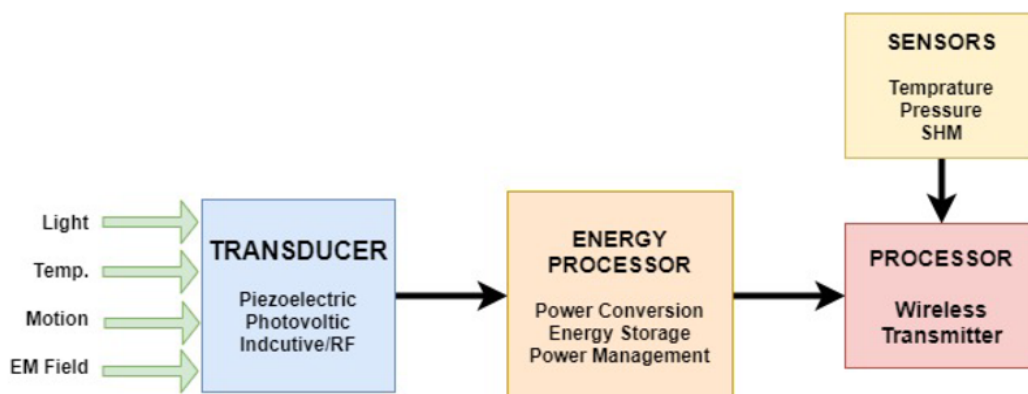


FIGURA 2.2: Sistema de colheita de energia (Elahi, Munir, Eugeni, Gaudenzi e Atek 2020).

Do ponto de vista eletrotécnico, a eficiência deste processo depende de vários

fatores, entre os quais a natureza da fonte de energia, a tecnologia de conversão utilizada, a intermitência da fonte, as perdas de conversão e as necessidades energéticas do dispositivo alimentado. Tecnologias como as células fotovoltaicas, os materiais piezoelétricos, os geradores térmicos e as antenas de recolha de RF têm sido amplamente investigadas, cada uma com particularidade que as tornam mais adequadas para determinados cenários operacionais (Beeby, Tudor e White 2006).

A aplicação de sistemas de colheita de energia tem ganhado destaque em diversos domínios tais como áreas IoT (*Internet of Things*), sistemas embebidos remotos, dispositivos biomédicos implantáveis e, mais recentemente, em ambientes de defesa e segurança. Em cenários militares, onde a autonomia energética e a redução da pegada logística são cruciais, estas tecnologias permitem o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis, autónomas e silenciosas, reduzindo a dependência de fontes de energia convencionais (Swanner 2017).

2.2 Principais tecnologias de colheita de energia

2.2.1 Energia solar

A energia solar constitui uma das fontes renováveis mais abundantes e promissoras disponíveis no planeta, assumindo um papel central na transição energética global para sistemas de baixo carbono. A conversão da radiação solar em eletricidade é realizada, principalmente, através de células fotovoltaicas, as quais utilizam o efeito fotoelétrico para transformar diretamente a energia solar em energia elétrica (Green, Dunlop, Hohl-Ebinger, Yoshita, Kopidakis e Hao 2022).

A radiação solar compreende um vasto espectro eletromagnético emitido pelo Sol, do qual a luz visível representa apenas uma fração. A eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica depende da capacidade do material semicondutor em absorver fótons com diferentes comprimentos de onda. Este fator tem impulsionado a investigação no desenvolvimento de novos materiais e arquiteturas de células capazes de manter elevado desempenho em condições ambientais variáveis (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE 2023).

Historicamente, o princípio da conversão fotovoltaica foi descrito pela primeira vez em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel. Contudo, apenas em 1954 os Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, desenvolveram a primeira célula solar prática baseada em silício cristalino, com uma eficiência de cerca de 6%. Desde então,

avanços na ciência dos materiais e nas técnicas de fabrico permitiram aumentar significativamente a eficiência e reduzir os custos de produção, tornando a tecnologia fotovoltaica competitiva com fontes de energia convencionais em várias regiões do mundo (Becquerel 1839).

O material semiconductor mais amplamente utilizado na produção de células solares é o silício, disponível em diferentes formas cristalinas:

- **Silício monocristalino** – Produzido a partir de um único cristal de elevada pureza, apresenta eficiências típicas entre 18% e 22%, com elevado desempenho sob alta irradiância e temperaturas moderadas. O seu fabrico requer processos controlados de crescimento cristalino, o que eleva o custo;
- **Silício policristalino** – Obtido a partir da solidificação de múltiplos cristais, possui eficiências entre 15% e 18%. Embora menos eficiente que o monocristalino, o seu custo inferior favorece a aplicação em grandes instalações;
- **Silício amorfo** – Material de estrutura não cristalina, depositado sobre substratos flexíveis, com eficiências entre 6% e 10%. Apesar do menor rendimento, é vantajoso em aplicações móveis, portáteis ou em ambientes interiores com baixa iluminação.

A principal diferença entre os tipos de silício utilizados em células solares reside na sua estrutura interna. O silício monocristalino apresenta uma rede cristalina contínua e ordenada, o que permite maior mobilidade dos portadores de carga e, conseqüentemente, maior eficiência na conversão fotovoltaica. Já o silício policristalino é composto por múltiplos cristais orientados aleatoriamente, o que introduz fronteiras de grão que dificultam o fluxo de elétrons, reduzindo ligeiramente o desempenho. Por sua vez, o silício amorfo não possui estrutura cristalina definida, sendo formado por átomos dispostos de forma irregular. Esta desordem interna limita a eficiência, mas confere flexibilidade mecânica e leveza, tornando-o ideal para aplicações móveis e superfícies curvas.

A figura 2.3 ilustra visualmente estas diferenças estruturais entre os três tipos de silício.

Para além do silício, tecnologias emergentes incluem células de telureto de cádmio (*CdTe*), disseleneto de cobre, índio e gálio (*CIGS*) e, mais recentemente, as perovskitas, que têm apresentado rápidas melhorias de eficiência laboratorial, ultrapassando os 25% em protótipos experimentais.

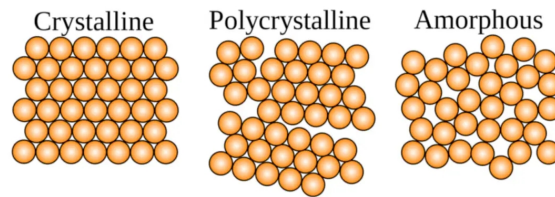


FIGURA 2.3: Estrutura atômica do silício monocristalino, policristalino e amorfo.

Entre estas tecnologias emergentes, as células solares de perovskita têm despertado particular interesse devido à sua estrutura cristalina do tipo ABX_3 , que favorece uma elevada absorção de luz e eficiente transporte de carga. A sua produção pode ser realizada por métodos de baixo custo, como deposição por spray ou impressão, a temperaturas significativamente inferiores às exigidas pelo silício, o que abre caminho para aplicações em substratos flexíveis e superfícies não convencionais. Com eficiências laboratoriais já superiores a 25%, as perovskitas posicionam-se como fortes candidatas para a próxima geração de painéis solares. Contudo, ainda enfrentam limitações técnicas, como a instabilidade química e a presença de chumbo na sua composição, fatores que comprometem a durabilidade e levantam preocupações ambientais.

A figura a) 2.4 apresenta a estrutura interna típica deste material, enquanto a figura b) 2.4 exemplifica a sua aplicação em painéis solares retirando de (Resende 2019) e (Vargas e Camargo 2017).

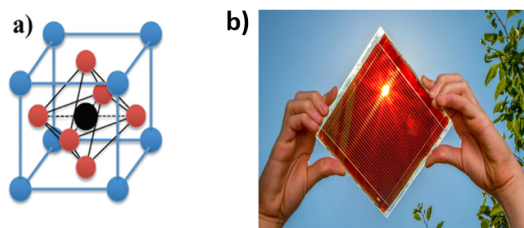


FIGURA 2.4: a) Estrutura cristalina das perovskitas. b) Aplicação em painel solar. Adaptado de (Resende 2019) e (Vargas e Camargo 2017).

O funcionamento de uma célula fotovoltaica baseia-se numa junção PN formada por dois semicondutores dopados de forma distinta. O material tipo P contém excesso de lacunas (cargas positivas), enquanto o material tipo N possui excesso de elétrons (cargas negativas). Quando a luz solar incide sobre o semicondutor, fótons com energia superior à largura da banda proibida excitam elétrons da banda de valência para a banda de condução, originando pares elétron-lacuna. Tal como a

figura 2.5 sugere, a região de depleção da junção PN gera um campo elétrico interno que separa estas cargas, conduzindo os eletrões para o lado N e as lacunas para o lado P. Ao ligar a célula a um circuito externo, estabelece-se um fluxo de corrente contínua, que pode ser utilizada diretamente ou convertida em corrente alternada através de inversores.

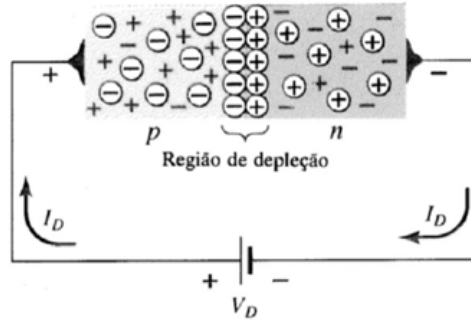


FIGURA 2.5: Estrutura interna de uma junção PN.

O comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica pode ser representado por um modelo equivalente, figura 2.6, composto por:

- Uma fonte de corrente dependente da radiação solar;
- Um díodo, que modela as perdas internas por recombinação;
- Uma resistência série R_s , associada a perdas óhmicas nos contactos e no material;
- Uma resistência paralela R_{sh} , que representa fugas de corrente devido a defeitos.

A figura 2.6 é o modelo de um circuito elétrico equivalente de um painel solar (Camacho, Carrijo, Ferreira e Jr. 2010). Este circuito consiste numa fonte de corrente em paralelo com uma resistência ligada a uma resistência em série. A resistência em série R_s representa as perdas por condução e/ou contacto. A resistência em paralelo R_{sh} representada por I_0 , este valor é diretamente proporcional à radiação incidente no painel solar (Pindado, Cubas, Manuel e Sorribes-Palmer 2014). I_{pan} e V_{pan} representam, respetivamente, a corrente e a tensão dos terminais do painel solar.

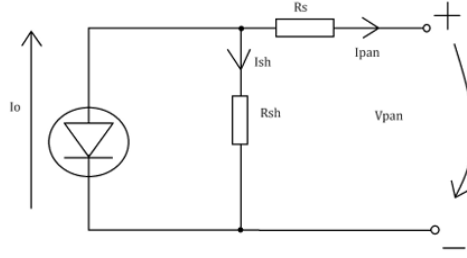


FIGURA 2.6: Circuito Equivalente do Paine Solar.

A equação 2.2 representa o cálculo da corrente produzida pelo painel solar. I_{sh} representa a corrente gerada pela incidência da radiação solar e I_{sh} é a corrente perdidas nas junções.

$$I_{pan} = I_0 - I_{sh} \quad (2.1)$$

Todos os painéis solares têm uma curva característica, conhecida igualmente por curva (I-V), representa a relação entre tensão (V) e a corrente (I). Paralelamente, um mesmo painel pode ter várias curvas, sendo que cada curva é para uma intensidade de luz diferente. O gráfico da figura 2.6 foi retirado de (Camacho, Carrijo, Ferreira e Jr. 2010) e representa a curva característica de um painel solar. Cada curva do gráfico corresponde a uma intensidade de luz diferente e a intensidade foi medida em W/m^2 .

Na figura 2.7 existem dois pontos importantes para o estudo de um painel fotovoltaico. Os dois pontos são a corrente em curto-circuito (I_{sh}) e a tensão em circuito aberto (V_{oc}) é quando o eixo vertical (relativo à corrente), a tensão em circuito aberto é quando o gráfico interceta o eixo horizontal (eixo relativo à tensão), a corrente é igual a zero (em situações ideais) e a resistência do circuito em situações ideais é infinita. Para a construção da curva mede-se os valores de tensão e corrente para diferentes valores de resistência de carga.

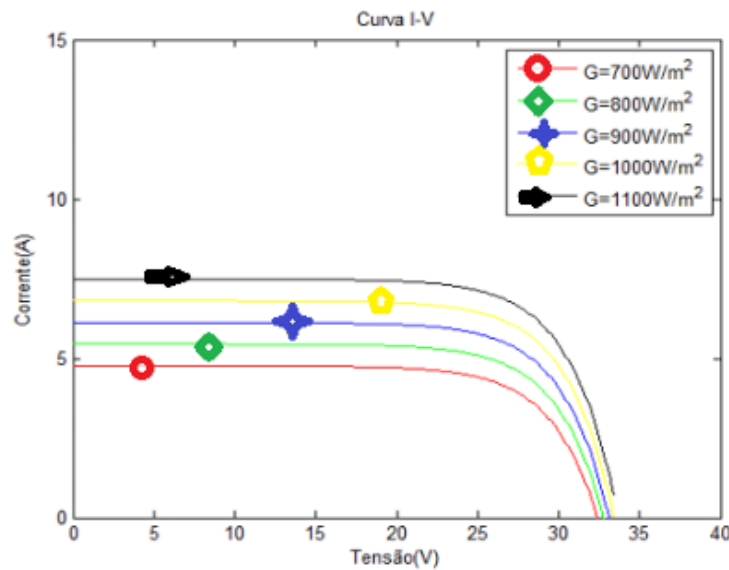


FIGURA 2.7: Curva característica de um painel solar.

A eficiência de um sistema fotovoltaico é influenciada por diversos fatores, incluindo:

- **Temperatura** – A elevação da temperatura reduz a tensão de saída e, consequentemente, a potência;
- **Ângulo de incidência** – A orientação e inclinação do painel determinam a quantidade de radiação captada;
- **Nível de irradiância** – Condições de nebulosidade ou sombreamento diminuem a produção;
- **Degradação dos materiais** – A exposição prolongada à radiação *UV* (Ultra-Violeta) e ciclos térmicos acelera a perda de rendimento.

Atualmente, a energia solar fotovoltaica é aplicada em grande escala, desde centrais solares ligadas à rede elétrica até sistemas autônomos de pequena dimensão, como carregadores portáteis, dispositivos da IoT e sistemas de telecomunicações remotos. Tendências recentes incluem a integração de módulos solares em superfícies arquitetônicas conhecidas por BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*), veículos elétricos, vestuário inteligente e sensores autônomos. Paralelamente, o desenvolvimento de materiais mais eficientes, flexíveis e recicláveis permanece uma prioridade para aumentar a viabilidade econômica e reduzir o impacto ambiental (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE 2023).

2.2.2 Energia Piezoelétrica

A piezoelectricidade é a capacidade de certos materiais gerar uma diferença de potencial elétrico quando submetidos a uma deformação mecânica, fenómeno descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie durante o estudo de cristais de quartzo (B. Jaffe, Cook e H. Jaffe 1971). No ano seguinte, Gabriel Lippmann previu teoricamente o efeito piezoelétrico inverso, que consiste na deformação física de um cristal quando sujeito a um campo elétrico, tendo sido posteriormente confirmado experimentalmente pelos próprios irmãos Curie. Este fenómeno ocorre devido à criação de dipolos elétricos na estrutura cristalina de determinados materiais, quando deformados, os centros geométricos das cargas positivas e negativas deixam de coincidir, gerando um campo elétrico interno que induz uma diferença de potencial entre as extremidades do material. Se estas forem ligadas a um circuito externo, produz-se uma corrente elétrica até que o equilíbrio de carga seja restabelecido. Quando a força é removida, o material tende a regressar à sua forma original, podendo inverter os potenciais e gerar corrente em sentido oposto (Uchino 2017). Por outro lado, quando se aplica um campo elétrico ao material, verifica-se o efeito inverso, provocando o deslocamento das cargas internas e, conseqüentemente, a deformação física do material, propriedade amplamente explorada em atuadores, sistemas de posicionamento de alta precisão e dispositivos médicos (Heywang, Lubitz e Wersing 2008).

Embora as descobertas iniciais da piezoelectricidade tenham permanecido, durante décadas, no domínio teórico, a sua relevância prática emergiu com o advento da Primeira Guerra Mundial, quando transdutores piezoelétricos foram utilizados em equipamentos SONAR para deteção de submarinos inimigos (Uchino 2017). Ao longo do século XX, as propriedades de ressonância dos cristais de quartzo permitiram o desenvolvimento de osciladores de precisão, fundamentais para relógios, sistemas de comunicação e dispositivos eletrónicos de alta frequência. Com o avanço da ciência dos materiais e da microeletrónica, a piezoelectricidade passou a ser explorada em diversas aplicações contemporâneas, incluindo sensores, microgeradores, atuadores e sistemas de colheita de energia.

Um exemplo adicional da versatilidade dos materiais piezoelétricos pode ser observado nos interruptores piezoelétricos utilizados em dispositivos electrónicos modernos. Estes componentes, como os desenvolvidos pela Langir, funcionam sem partes móveis internas, recorrendo à deformação superficial para gerar sinais eléctricos. A sua robustez, resistência à água e ao pó (classificação IP68/IP69K,

conforme norma IEC 60529), bem como a elevada durabilidade (mais de 50 milhões de ciclos), tornam-nos particularmente adequados para ambientes exigentes, incluindo aplicações militares e navais.

Apostando na inovação e na capacidade operacional, a Marinha Portuguesa tem investido em plataformas tecnológicas avançadas para os seus navios patrulha oceânicos, estes interruptores revelam-se especialmente úteis em interfaces de operação naval, como painéis de comando selados e sistemas resistentes à corrosão marítima. A figura 2.8 retira de (Langir Electric 2025), apresenta um exemplo típico deste tipo de interruptor, evidenciando o seu modelo compacto e a sua superfície metálica plana que caracteriza esta tecnologia.

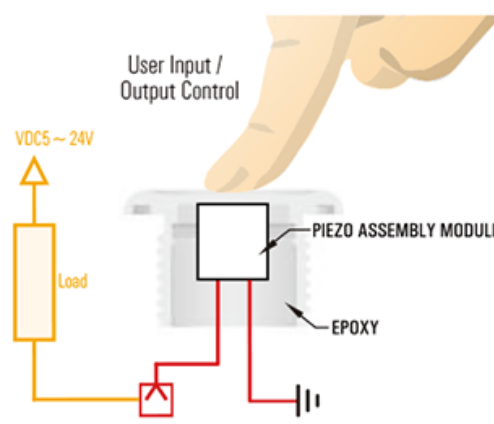


FIGURA 2.8: Esquema de funcionamento de um interruptor piezoelétrico, com ativação por pressão e alimentação entre 5 – 24 V.

Além disso, os materiais piezoelétricos revelam-se particularmente promissores para a geração de energia elétrica em ambientes de elevada mobilidade, como o setor militar. A sua capacidade de converter deformações mecânicas em eletricidade pode ser aproveitada através da incorporação em componentes de vestuário, como botas, permitindo que os movimentos naturais dos soldados gerem energia de forma contínua e localizada. Embora a densidade energética obtida por estes sistemas seja limitada, a piezoelectricidade oferece uma alternativa sustentável e complementar para alimentar dispositivos portáteis em cenários operacionais exigentes (Dagdeviren 2014).

Um exemplo concreto desta aplicação encontra-se no trabalho de Vitorino 2022, que desenvolveu um protótipo de gerador piezoelétrico integrado numa bota militar, concebido para aproveitar a energia cinética gerada durante a marcha de um soldado e convertê-la em eletricidade para alimentar equipamentos eletrónicos,

conforme a figura 2.9 ilustra. Os testes realizados demonstraram que, a um ritmo de um passo por segundo, o protótipo foi capaz de gerar cerca de $800.90 \mu\text{J}$ por passo, valor que, embora insuficiente para alimentar dispositivos de forma contínua, pode ser utilizado como fonte auxiliar de energia ou em sistemas de emergência, como localizadores de homem ao mar.



FIGURA 2.9: Protótipo desenvolvido por Vitorino 2022.

Assim, a colheita de energia piezoelétrica representa uma solução inovadora e sustentável para alimentar dispositivos em ambientes onde outras fontes de energia são escassas ou impraticáveis. A sua aplicação em equipamentos militares, biomédicos e industriais demonstra o potencial desta tecnologia como fonte complementar de energia, especialmente em sistemas portáteis e de difícil acesso. A investigação contínua sobre novos materiais, arquiteturas e métodos de integração poderá contribuir para o aumento da eficiência e viabilidade destes sistemas em larga escala, consolidando a piezoelectricidade como uma ferramenta estratégica no desenvolvimento de tecnologias autônomas e energeticamente eficientes.

2.2.3 Energia Térmica

A colheita de energia térmica constitui uma abordagem promissora no âmbito da conversão direta de calor em eletricidade, enquadrando-se no paradigma do *Energy Harvesting*. Este processo baseia-se no *efeito Seebeck*, descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821, o qual consiste na geração de uma força eletromotriz (f.e.m.) quando dois condutores de materiais distintos estão ligados em dois pontos submetidos a temperaturas diferentes. A diferença de potencial gerada é proporcional ao gradiente térmico e à diferença entre os coeficientes de Seebeck dos materiais envolvidos:

$$V = (S_A - S_B)\Delta T \quad (2.2)$$

Onde:

V é a tensão gerada;

S_A e S_B são os coeficientes de Seebeck dos materiais A e B, respetivamente.

ΔT é a diferença de temperatura entre as junções.

Materiais semicondutores como o telureto de bismuto Bi_2Te_3 são amplamente utilizados em dispositivos termoelétricos modernos, devido à sua elevada eficiência e capacidade de operar com gradientes térmicos reduzidos (D. Rowe 2006).

Arquitetura de um Gerador Termoelétrico (TEG)

Um gerador termoelétrico é composto por múltiplos pares de termopares conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo, formando módulos que maximizam a produção de energia. Cada par inclui elementos semicondutores dopados do tipo N e tipo P, unidos por placas condutoras. O lado quente é colocado em contacto com a fonte de calor (como o corpo humano, motores ou radiação solar), enquanto o lado frio é mantido à temperatura ambiente ou acoplado a um dissipador térmico. A diferença de temperatura induz o movimento de portadores de carga (eletrões e lacunas), gerando uma corrente elétrica contínua (Goldsmid 2016).

A figura 2.10 ilustra a arquitetura típica de um módulo termoelétrico, composta por duas placas cerâmicas (quente e fria) e múltiplas unidades de pares termoelétricos conectadas em série por tiras metálicas condutoras. Este arranjo permite a conversão direta de calor em eletricidade, sendo modelado eletricamente como uma fonte de tensão em série com uma resistência interna. A imagem foi extraída do artigo de (Chen, Yufei Zhang, Liu, Wang, Yucheng Zhang e Yadong Zhang 2022), que explora estratégias de reconfiguração dinâmica para sistemas TEG sob distribuições de temperatura heterogêneas

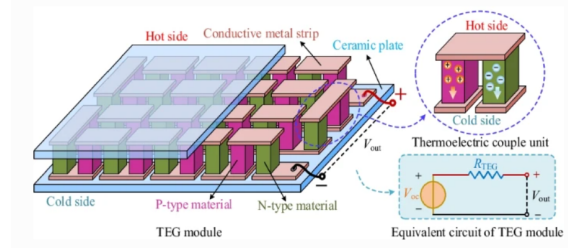


FIGURA 2.10: Arquitetura típica de um módulo termoeletrico, composta por pares tipo N e tipo P conectados em série entre placas cerâmicas. Adaptado de (Chen, Yufei Zhang, Liu, Wang, Yucheng Zhang e Yadong Zhang 2022).

Aplicações e Vantagens

Esta tecnologia revela-se particularmente vantajosa em ambientes com variações térmicas significativas, como desertos, climas montanhosos, ou em contacto direto com o corpo humano. Em sistemas eletrônicos portáteis ou de difícil acesso — como sensores integrados em equipamentos militares ou dispositivos médicos implantáveis — os TEGs destacam-se pela sua autonomia, ausência de partes móveis, baixa manutenção e elevada fiabilidade (Mateu e Moll 2005).

Além disso, a energia térmica é uma das fontes mais abundantes no ambiente, resultando de gradientes de temperatura entre superfícies ou regiões. A sua conversão direta em eletricidade, sem necessidade de componentes mecânicos, torna os TEGs ideais para aplicações industriais, urbanas e biomédicas (Priya e Inman 2009).

Eficiência e Limitações

Os TEGs têm despertado crescente interesse na comunidade científica devido à sua capacidade de converter calor residual em eletricidade de forma direta, silenciosa e sem partes móveis. No entanto, a eficiência destes dispositivos continua a ser considerada modesta quando comparada com outras tecnologias de conversão energética. As células de Peltier, por exemplo, têm sido utilizadas para este fim, mas apresentam limitações em termos de rendimento global (Leonov, Torfs e Vullers 2009). Esta limitação tem incentivado o desenvolvimento de novos materiais e abordagens que visam melhorar o desempenho dos TEGs, tornando-os mais competitivos e economicamente viáveis.

A eficiência dos materiais termoeletricos é geralmente avaliada pela figura de mérito adimensional, conhecida como ZT , definida pela equação 2.3:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \quad (2.3)$$

Onde:

- S é o coeficiente Seebeck (voltagem gerada por unidade de diferença de temperatura),
- σ é a condutividade elétrica,
- T é a temperatura absoluta,
- κ é a condutividade térmica total (incluindo contribuições eletrônicas e de rede cristalina).

No entanto, melhorar esse parâmetro é tecnicamente desafiante, pois os fatores envolvidos estão interligados — por exemplo, aumentar a condutividade elétrica tende a elevar também a condutividade térmica, o que pode comprometer o desempenho global.

Para contornar essas limitações, a investigação atual tem-se centrado em estratégias como a introdução de nanoestruturas, que dispersam fônons sem afetar significativamente o transporte de elétrons, reduzindo assim κ e aumentando o ZT . Outra abordagem promissora é a engenharia de ligas e dopagem, que ajusta a composição química dos materiais para otimizar o coeficiente Seebeck (S) e a condutividade elétrica (σ). Além disso, materiais complexos como *skutterudites*, clatratos e ligas *half-Heusler* têm demonstrado estruturas cristalinas favoráveis ao bloqueio de fônons, mantendo boa mobilidade eletrônica. O desenvolvimento de estruturas em camadas e super-redes também tem permitido um controle mais preciso sobre o fluxo de calor e de carga, contribuindo para o aumento da eficiência termoelétrica e para a redução dos custos de produção.

Diferença entre TEG e TEC

Dispositivos termoelétricos têm ganhado especial relevância em diversas áreas tecnológicas devido à sua capacidade de converter energia térmica em elétrica e vice-versa, utilizando materiais semicondutores como o bismuto telureto (Bi_2Te_3). Entre os principais tipos, destacam-se o Gerador Termoelétrico (TEG) e o Refrigerador Termoelétrico (TEC), também conhecido como célula de Peltier. Apesar de ambos se basearem em fenômenos termoelétricos e partilharem materiais semelhantes, apresentam diferenças fundamentais quanto à função, ao princípio físico

envolvido e às aplicações. O TEG explora o efeito Seebeck para gerar eletricidade a partir de gradientes térmicos, enquanto o TEC utiliza o efeito Peltier para produzir refrigeração a partir de corrente elétrica. A compreensão clara dessas distinções é essencial para a seleção adequada de tecnologias em contextos como geração de energia em ambientes com calor residual ou refrigeração localizada em sistemas eletrônicos sensíveis.

A tabela 2.1 apresenta uma comparação entre as principais características de ambos os dispositivos, evidenciando as suas diferenças funcionais, operacionais bem como as suas respectivas aplicações, as informações descritas foram retiradas de (Bell 2008, Riffat e Ma 2003, Snyder e Toberer 2008 Goldsmid 2016 e D. M. Rowe 2005).

Característica	TEG	TEC
Função principal	Gerar eletricidade a partir de calor	Produzir refrigeração a partir de eletricidade
Princípio físico	Efeito Seebeck	Efeito Peltier
Direção da energia	Calor $\rightarrow$ Eletricidade	Eletricidade $\rightarrow$ Calor
Aplicações típicas	Sensores remotos, wearables, motores, ambientes industriais	Refrigeração de componentes eletrônicos, câmaras térmicas, sistemas de climatização
Eficiência	Relativamente baixa, mas útil em ambientes com calor residual	Baixa eficiência, mas útil em sistemas compactos e silenciosos
Exemplo de uso	Alimentar sensores em locais sem acesso à rede elétrica	Refrigerar CPUs, lasers, ou pequenos compartimentos térmicos

TABELA 2.1: Comparação entre TEG e TEC quanto à função, princípio de operação e aplicações

A análise comparativa entre o TEG e o TEC evidencia não apenas as suas diferenças funcionais, mas também o potencial complementar que ambos oferecem em sistemas energéticos modernos. O TEG converte calor em eletricidade, sendo particularmente eficaz em ambientes com calor residual constante, como motores, processos industriais ou fontes geotérmicas (Bell 2008). Por outro lado, o TEC

transforma eletricidade em um gradiente térmico, permitindo refrigeração localizada, silenciosa e sem partes móveis, o que a torna ideal para aplicações em eletrônica de precisão, sistemas biomédicos e dispositivos portáteis (Snyder e Toberer 2008). A integração estratégica destes dispositivos representa uma abordagem inovadora para enfrentar desafios relacionados à eficiência energética, gestão térmica e sustentabilidade tecnológica. Com os avanços em materiais termoelétricos, como os *skutterudites* e ligas *half-Heusler*, espera-se uma melhoria contínua no desempenho e na viabilidade comercial destas soluções (D. M. Rowe 2005).

2.2.4 Energia de Radiofrequência

A energia de radiofrequências pode ser colhida a partir de sinais da comunicação existentes, como os de rádio, televisão ou redes móveis. Embora seja uma fonte com baixa densidade energética. Predominantemente em zonas urbanas e teatros de operações modernas pode ser usada como fonte de energia para sensores de curto alcance com baixo consumo (Pinuela, Mitcheson e Lucyszyn 2013).

A energia de RF também pode ser transformada em energia elétrica. A tecnologia usada torna a energia RF numa fonte sustentável e renovável para várias aplicações, desde o fornecimento de energia para pequenos dispositivos eletrônicos até à alimentação de redes de sensores sem fios.

A produção de energia através de RF opera com base no princípio da indução eletromagnética, onde a energia das ondas de rádio é capturada usando antenas especializadas e depois é convertida em energia elétrica por meio de circuitos de retificação e regulação de tensão. Esse processo permite extração de energia de sistemas de comunicação sem fios, como Wi-Fi, redes móveis, bluetooth, entre outros.

De acordo com Teixeira 2022a, o desenvolvimento de sistemas de gestão de potência é essencial para otimizar a energia recolhida de fontes RF. O autor propõe um protótipo que utiliza uma antena planar para captar sinais a 2,45 GHz, seguido por um circuito de retificação em tecnologia CMOS de 65 nm e um conversor boost para elevar a tensão. Este tipo de arquitetura permite alimentar dispositivos eletrônicos com tensões superiores a 1,2 V, demonstrando a viabilidade da colheita de energia RF em ambientes urbanos e indoor (Teixeira 2022a).

Um dos componentes-chave dos sistemas de RF é antena, que é projetada para uma captura eficiente de energia RF numa largura de banda grande. Essas antenas podem ser integradas em componentes de infraestrutura como semáforos de trânsito e em vários dispositivos (Lubna et al. 2022), incluindo geradores elétricos

portáteis e sensores IoT. O conceito IoT refere-se à conexão digital existente entre objetos do dia a dia com internet. A IoT permite que os objetos comuniquem entre si e realizem tarefas de forma autónoma (Tripathy e Anuradha 2017).

A tensão gerada na antena é processada por circuitos retificadores, que convertem o sinal de corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). Circuitos de regulação de tensão garantem que a energia gerada se encontra estável e compatível para o armazenamento ou carregamento de dispositivos eletrónicos.

A energia de RF oferece algumas vantagens em relação aos métodos tradicionais de gerar energia. Ao contrário da energia solar ou eólica, a energia de RF está disponível em ambientes indoor e urbanos, o que a torna ideal para alimentar dispositivos em locais onde outras fontes de energia renovável podem ser limitadas. Além disso, a colheita de RF não requer exposição direta à luz solar ou ao vento, tornando-a adequada para uma ampla gama de aplicações, incluindo dispositivos IoT, infraestrutura inteligente e geradores portáteis.

Apesar das vantagens apresentadas, a produção de energia RF também apresenta desvantagens. Uma das vantagens é a baixa eficiência de conversão, que se deve às perdas nos componentes eletrónicos (diodos, condensadores, entre outros). Outra desvantagem é a dependência de fontes RF (torres de rede móvel, routers de Wi-Fi e outras fontes de emissão de rádio), em zonas pouco urbanizadas a quantidade de sinais RF pode não ser suficiente para a produção de energia (RF Wireless World 2023). Mais uma desvantagem é o alcance limitado, uma vez que a eficiência diminui significativamente com o aumento da distância à fonte RF (Tran, Cha e Park 2017).

Na figura 2.11 encontra-se uma prosposta de um RF *Harvesting*, bem como fatores que afetam o seu funcionamento retirado de Teixeira 2022b.

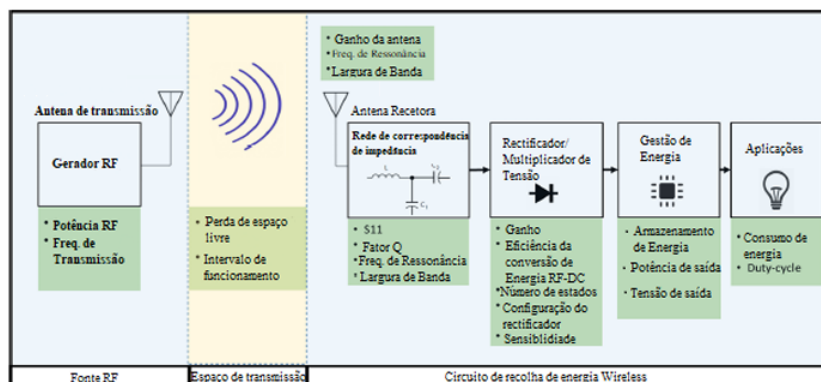


FIGURA 2.11: Esquema representativo de um sistema RF *Harvesting*.

2.3 Circuitos típicos de colheita e gestão de energia

As fontes utilizadas para colheita de energia *energy harvesting* apresentam, na maioria dos casos, natureza intermitente, baixa potência e variação significativa dos níveis de tensão e corrente fornecidos. Estas características tornam inviável a ligação direta das fontes de energia aos circuitos de consumo, exigindo a presença de um circuito de gestão energética capaz de condicionar e estabilizar o sinal elétrico. Nesse sentido, os PMICs (*Power Management Integrated Circuits*) assumem um papel fundamental, permitindo não só otimizar a extração de energia, mas também assegurar o funcionamento estável e seguro do sistema.

De forma geral, as principais funções desempenhadas por um PMIC incluem:

- Efetuar a extração máxima de energia da fonte, recorrendo a um algoritmo de rastreio do ponto de máxima potência MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que adapta a impedância de entrada à condição ideal de operação da fonte;
- Gerar tensões reguladas e estáveis para alimentar os circuitos de carga;
- Gerir o processo de armazenamento de energia, controlando a carga e descarga de supercondensadores ou baterias recarregáveis;
- Proteger o sistema contra sobretensões, correntes de pico, descargas rápidas e outros eventos que possam comprometer a integridade dos componentes.

Importa salientar que os PMICs destinados à colheita de energia são desenvolvidos para operar em condições de potência ultra-baixa, conseguindo, em alguns casos, iniciar o funcionamento (*cold-start*) com tensões tão reduzidas quanto 20 mV. Esta característica torna-os especialmente adequados para aplicações que recorrem a fontes muito fracas, como TEGs ou transdutores piezoelétricos. Graças a esta versatilidade, os PMICs são amplamente utilizados em sensores sem fios, sistemas de IoT e dispositivos portáteis de longa duração (Analog Devices 2025).

2.3.1 Conversão AC/DC e DC/DC

A conversão de energia desempenha um papel central nos sistemas de colheita, pois as diferentes fontes renováveis disponíveis no ambiente produzem sinais elétricos com características muito distintas das necessárias para alimentar diretamente a carga ou carregar sistemas de armazenamento. Por exemplo, geradores

piezoelétricos produzem tipicamente uma tensão alternada (AC) com amplitude variável e frequência dependente da excitação mecânica, enquanto painéis solares fornecem tensão contínua (DC), mas cujo valor varia significativamente em função da luminosidade e da temperatura. Em ambos os casos, o nível de tensão e corrente obtido nem sempre coincide com os requisitos do dispositivo a alimentar ou do sistema de armazenamento (supercondensadores e baterias recarregáveis), tornando indispensável a presença de circuitos de conversão para ajustar e estabilizar a energia disponível.

1- Conversão AC/DC:

Nos casos em que a fonte fornece energia em corrente alternada — como acontece com os transdutores piezoelétricos — o primeiro passo é a retificação, que converte a forma de onda alternada em tensão contínua. As topologias de retificação mais comuns incluem:

Retificador de meia onda: utiliza um único diodo, conduzindo apenas durante metade do ciclo AC. É simples e de baixo custo, mas apresenta baixa eficiência, uma vez que descarta metade da energia disponível. A figura 2.12 apresenta a topologia típica de um retificador de meia onda.

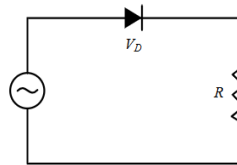


FIGURA 2.12: Retificador de meia onda.

Retificador de onda completa: recorre a dois díodos (com transformador com derivação central) ou a quatro díodos numa configuração de ponte (ponte de Graetz), conduzindo em ambos os semiciclos e duplicando a energia útil em relação à meia onda, pela figura 2.13 encontra-se ilustrado a arquitetura típica de um retificador de onda completa com ponte de Graetz.

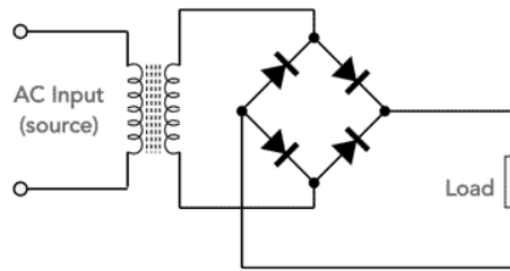


FIGURA 2.13: Estrutura de um retificador de onda completa com ponte de Graetz.

Retificadores síncronos: substituem os díodos por transístores MOSFET controlados eletronicamente, minimizando a queda de tensão direta (típica de 0,2 a 0,7 V nos díodos) e aumentando a eficiência global, especialmente relevante em sistemas de baixa potência.

A eficiência de conversão AC/DC é fortemente influenciada pela queda de tensão nos elementos retificadores, pelo dimensionamento dos condensadores de filtragem e pelas perdas resistivas. Em contextos de colheita de energia, onde a potência disponível pode situar-se na ordem dos miliwatts ou mesmo microswatts, qualquer redução de perda é crucial para garantir o funcionamento contínuo.

2- Conversão DC/DC:

Após a retificação, ou diretamente a partir de fontes DC como os painéis solares, é necessário ajustar o nível de tensão para o valor requerido pela carga ou pelo sistema de armazenamento. Esse processo é realizado por conversores DC/DC, que se dividem essencialmente em duas categorias:

Reguladores lineares: simples, silenciosos (sem comutação) e de baixo custo, mas com eficiência limitada, pois dissipam o excesso de energia sob a forma de calor. São viáveis apenas quando a diferença entre a tensão de entrada e a de saída é pequena e a potência disponível não é crítica.

Reguladores comutados (switching regulators): utilizam indutores e transístores de comutação de alta frequência para converter a tensão com elevada eficiência, tipicamente superior a 85 %. As topologias mais comuns incluem:

Buck: reduz a tensão de entrada para um valor inferior, sendo útil para alimentar circuitos de baixa tensão a partir de fontes como supercondensadores carregados a tensões mais elevadas, conforme ilustrado pela figura 2.14.

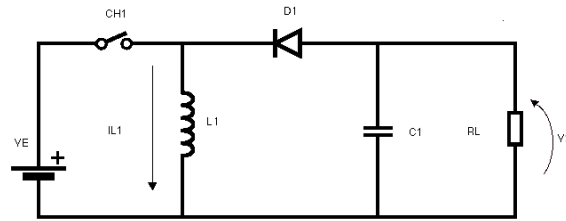


FIGURA 2.14: Topologia típica de um conversor *buck*.

Boost: eleva a tensão de entrada para um valor superior, sendo essencial quando a fonte fornece tensões baixas, como no caso de painéis solares sob baixa irradiância ou piezoelétricos com baixa excitação, ilustrado na figura 2.15.

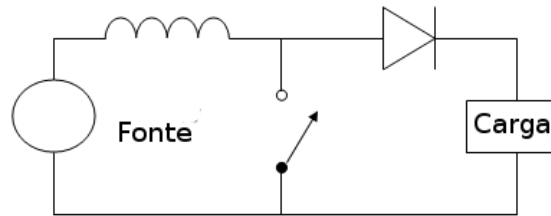


FIGURA 2.15: Topologia típica de um conversor *boost*.

Buck-boost: combina as duas funções, permitindo fornecer uma tensão de saída estável mesmo quando a tensão de entrada varia acima ou abaixo do valor desejado, este modelo apresenta-se normalmente conforme a figura 2.16 ilustra.

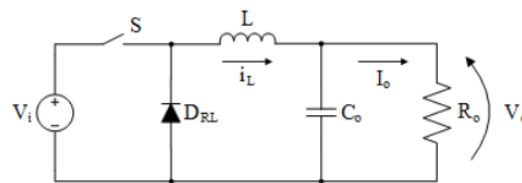


FIGURA 2.16: Conversor *buck-boost*

Nos sistemas de colheita, os conversores DC/DC podem ainda incorporar algoritmos de MPPT, que ajustam dinamicamente o ponto de operação da fonte para extrair a potência máxima possível, especialmente relevante em fontes variáveis como painéis solares.

Deste modo, os PMICs utilizados em colheita de energia integram muitas destas funções num único circuito integrado, otimizando espaço e reduzindo perdas.

Um parâmetro crítico é a tensão de arranque, que define a energia mínima necessária para que o circuito inicie a operação. Em aplicações como o aproveitamento de energia a partir de atuadores piezoelétricos ou de baixa luz solar, um *cold-start* na ordem de dezenas ou centenas de milivolts é determinante para o funcionamento. Além disso, a eficiência global do PMIC — desde a entrada até à carga ou armazenamento — deve ser maximizada, pois cada miliwatt desperdiçado pode representar uma redução significativa na autonomia do sistema.

Assim, a correta seleção e dimensionamento dos estágios de conversão AC/DC e DC/DC é um fator determinante no desempenho de qualquer sistema de colheita, influenciando diretamente a sua viabilidade em contextos práticos, sobretudo em aplicações de baixo consumo e elevada exigência, como as militares e industriais.

Em síntese, a seleção do PMIC representa um equilíbrio entre eficiência energética, robustez operacional e adequação funcional, sendo um elemento crítico para a maximização do aproveitamento da energia colhida e para a garantia de um funcionamento contínuo e fiável do sistema.

2.3.2 Características relevantes dos PMIC

A figura 2.17 apresenta uma análise comparativa das características mais relevantes de diversos PMICs aplicados em sistemas de colheita de energia. A seleção destes dispositivos teve como base a sua ampla utilização em projetos académicos e industriais, bem como a disponibilidade de documentação técnica detalhada fornecida pelos respetivos fabricantes.

Os parâmetros considerados incluem informações essenciais para o dimensionamento e seleção do PMIC, tais como o fabricante, a fonte de energia típica para a qual o dispositivo foi otimizado, a presença ou ausência de algoritmos de MPPT, a tensão mínima de arranque (*cold-start*), a gama de tensões de entrada suportadas e a eficiência típica de conversão. Adicionalmente, a tabela contempla a capacidade de armazenamento integrado ou suporte a elementos externos (supercondensadores ou baterias), a existência de reguladores de tensão internos, o consumo em modo de espera (*standby*) e exemplos de aplicações típicas.

Esta sistematização permite uma comparação direta entre diferentes soluções, facilitando a identificação do PMIC mais adequado para cada aplicação específica. Por exemplo, dispositivos com *cold-start*, isto é, a tensões extremamente reduzidas e elevado rendimento energético são mais indicados para fontes de baixa potência, como geradores termoelétricos, enquanto soluções com MPPT configurável

e regulador integrado se adequam a sistemas alimentados por painéis solares quando há variação luminosa.

Característica	BQ25504	BQ25570	LT3108	SPV1050	AEM10941
Fabricante	Texas Instruments	Texas Instruments	Analog Devices	STMicroelectronics	e-peas
Fonte Típica	Solar, piezo e TEG	Solar, piezo e TEG	TEG e RF	Solar e TEG	Solar e TEG
MPPT	Resistência programável	Simples + controlo	Impedância fixa	Adapativo	MPPT dinâmico
Cold-Start	~330 mV	~330 mV	~20 mV	~150 mV	~275 mV
Tensão de entrada	330 mV- 5,1 V	330 mV- 5,1 V	20 mV- 500 mV	150 mV- 5,5 V	275 mV- 5,0 V
Eficiência Típica	Até 93 %	Até 94 %	Até 80 %	Até 80 - 90 %	Até 94 %
Armazenamento	Supercondensador e	Supercondensador e bateria	Condensador	Supercondensador e	Supercondensador e bateria
Conversor Interno	Não	Boost Converter	Boost 2,35 - 3,30 V	Linear LDO	LDOs programá-
Consumo Standby	~330 nA	~488 nA	~6 µA	~2 µA	< 1 µA
Aplicações típicas	Sensores, IoT wearables	Sensores com entrada	TEG com baixa tensão (V)	IoT e wearable	Sensores sem fios

FIGURA 2.17: Características relevantes dos principais PMICs

2.3.3 Requisitos para seleção de um PMIC

A escolha de um CI (circuito integrado) adequado para um sistema de colheita de energia é um processo que exige a análise criteriosa de múltiplos parâmetros, dado que o desempenho do sistema depende diretamente da compatibilidade entre as características da fonte, o método de armazenamento e as exigências da carga. Entre os requisitos mais relevantes encontram-se:

- **Baixa tensão de arranque *cold-start*** — fundamental para permitir a operação mesmo com fontes de energia extremamente limitadas, como TEGs de baixa temperatura ou piezoelétricos sob vibrações reduzidas;
- **Baixo consumo em modo de espera *standby*** — essencial para preservar a energia armazenada em sistemas intermitentes;
- **Circuito de MPPT integrado** — garante a extração máxima de energia ao ajustar dinamicamente a impedância de entrada;

- **Gestão de armazenamento** — capacidade de comutação entre alimentação direta da carga e alimentação através do sistema de armazenamento, conforme a disponibilidade energética;
- **Conversores *buck*, *boost* e *buck-boost*** — permitem regular a tensão de entrada e saída de acordo com os requisitos do sistema.

2.3.4 Análise Crítica

A análise da tabela 2.2 evidencia que o módulo LT3108 apresenta a tensão de arranque mais baixa entre os dispositivos avaliados, o que o torna particularmente adequado para fontes de energia de muito baixa potência. Em seguida destacam-se o SPV1050 e o AEM10941, que também operam com níveis reduzidos de *cold-start*, embora ligeiramente superiores. Em contraste, os módulos da TI (BQ25504 e BQ25570) requerem tensões de arranque um pouco mais elevadas.

Finalmente, observa-se que os dispositivos da TI e da e-peas alcançam eficiências superiores a 90%, superando significativamente o LT3108, que, apesar da sua vantagem na tensão de arranque, apresenta um rendimento global inferior.

Módulo	Tensão [V]	Eficiência [%]
BQ25504	0,330	93
BQ25570	0,330	94
LT3108	0,020	80
SPV100	0,150	90
AEM10941	0,275	94

TABELA 2.2: Comparação simplificada entre Tensão de arranque e Eficiência dos diferentes PMICs

O gráfico das figuras 2.18 ilustra visualmente as diferenças entre as eficiências dos diferentes PMICs.

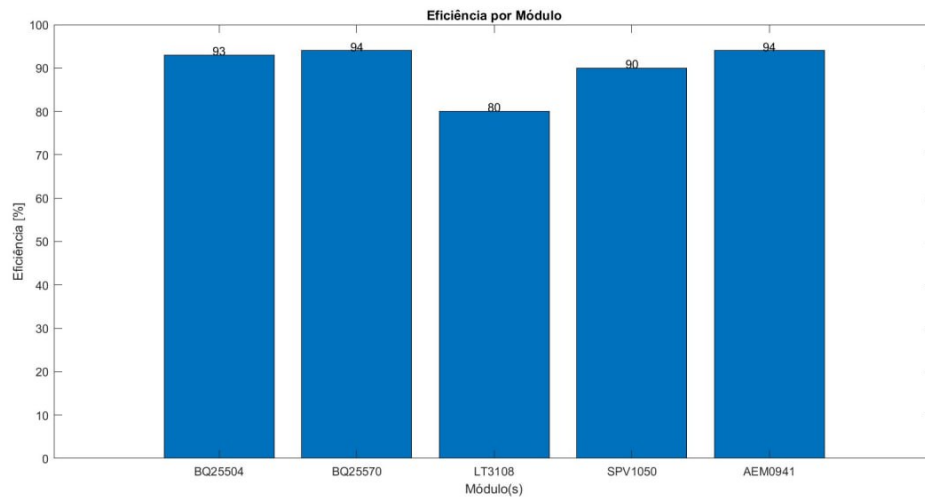


FIGURA 2.18: Comparação eficiência por módulo.

A partir do gráfico da figura 2.19 consegue-se observar as diferenças reais da tensão arranque entre os diferentes PMICs.

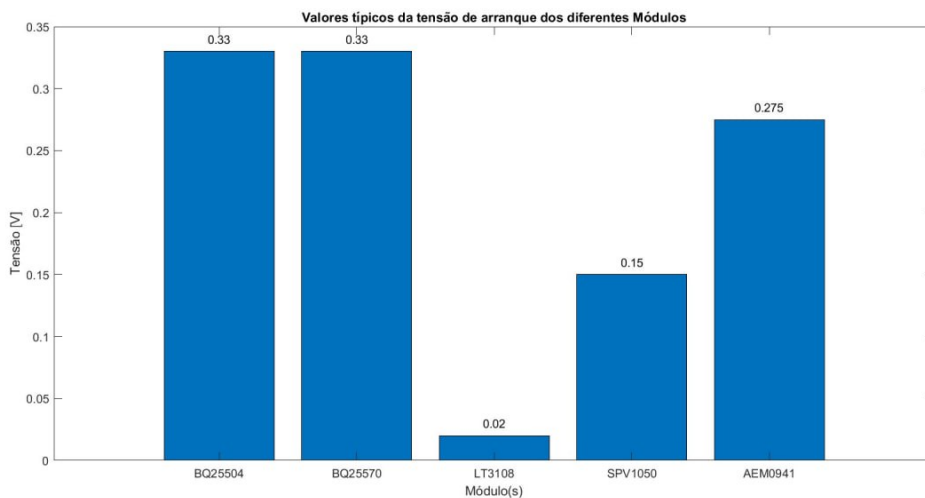


FIGURA 2.19: Comparação tensão de arranque por módulo.

Adicionalmente, estes modelos destacam-se pelas suas características e aplicações específicas produzidas pelos fabricantes:

BQ25504 — solução robusta e amplamente aplicada em sistemas alimentados por fontes solares e piezoelétricas, ideal quando não é necessária regulação da tensão de saída ou esta é assegurada por um circuito externo;

BQ25570 — integra um conversor boost regulado de 1,8 V, sendo adequado para aplicações compactas que requerem tensão de saída estável;

LT3108 — desenvolvido para operar com fontes extremamente fracas, como TEGs de baixa potência, embora apresente menor eficiência global;

SPV1050 — oferece MPPT adaptativo e baixo consumo, sendo comum em aplicações médicas e IoT;

AEM10941 — solução de elevada eficiência, com múltiplas saídas reguladas, adequada a sistemas complexos com diversas fontes e cargas, como dispositivos wearable militares e redes de sensores.

2.4 Integração com Equipamentos Militares

A integração de sistemas de colheita e gestão de energia em equipamentos militares constitui um fator estratégico para aumentar a autonomia operacional, reduzir a dependência logística e reforçar a resiliência energética em missões prolongadas (Swanner 2017). Em cenários onde o reabastecimento é limitado ou logisticamente complexo, a capacidade de gerar energia localmente permite manter operacionais dispositivos críticos, minimizando a necessidade de transporte de baterias suplementares. Além disso, a independência energética contribui para a segurança das operações, reduzindo a exposição de pessoal e meios a riscos associados a missões de reabastecimento.

A aplicação destas tecnologias abrange um vasto conjunto de dispositivos, incluindo sensores remotos para vigilância e detecção de intrusões, rádios portáteis para comunicações táticas, sistemas de monitorização biométrica de tropas, e equipamentos de visão noturna de elevado consumo energético. Nestes contextos, a integração de módulos de colheita de energia — sejam eles fotovoltaicos, piezoelétricos ou baseados em radiofrequência — permite prolongar significativamente o tempo de funcionamento sem intervenções externas. Por exemplo, painéis solares flexíveis integrados no uniforme ou no equipamento de transporte podem recarregar baterias durante deslocações diurnas, enquanto geradores piezoelétricos embutidos no calçado podem fornecer energia suplementar durante a marcha. Paralelamente, a captação de energia de fontes de RF pode garantir operação contínua de sensores de baixa potência, mesmo em ambientes urbanos densos.

Contudo, a implementação em contexto militar impõe desafios técnicos e operacionais significativos. O ambiente de operação é frequentemente hostil, com variações extremas de temperatura, elevada humidade, poeiras, vibrações intensas e exposição a impactos mecânicos. A robustez estrutural dos sistemas torna-se, assim, um requisito fundamental, exigindo encapsulamento adequado, resistência

a choque e proteção contra corrosão. A compatibilidade eletromagnética é outro aspecto crítico, uma vez que a presença de sistemas de rádio e radar pode induzir interferências nos circuitos de gestão de energia ou nos próprios sensores. Além disso, o peso e o volume dos módulos devem ser minimizados, de forma a não comprometer a mobilidade e a ergonomia do militar, especialmente quando integrados no vestuário ou em equipamentos portáteis.

Olhando para o futuro, prevê-se que a integração destes sistemas se expanda com a adoção de tecnologias emergentes, como a IoT militar, que permitirá a interligação de múltiplos dispositivos autônomos no campo de batalha, partilhando dados de forma segura e em tempo real. A utilização de protocolos de comunicações seguras, aliados a arquiteturas energéticas inteligentes capazes de selecionar automaticamente a fonte de energia mais adequada, reforçará a eficiência e a fiabilidade. Adicionalmente, o desenvolvimento de materiais avançados, como células solares de perovskita e polímeros piezoelétricos de elevada flexibilidade, poderá permitir soluções mais leves, adaptáveis e discretas, potenciando a autonomia e a furtividade operacional.

Em suma, a integração de sistemas de colheita de energia em equipamentos militares representa não apenas uma evolução tecnológica, mas também uma vantagem estratégica, aumentando a capacidade de atuação autônoma das forças armadas e reduzindo a vulnerabilidade logística em cenários de elevada exigência.

2.5 Trabalhos Relacionados

A análise de trabalhos prévios no domínio da colheita de energia revela-se essencial para a definição de critérios técnicos e a seleção das soluções mais adequadas ao contexto militar. Estes estudos permitem compreender não apenas o potencial das diferentes tecnologias, mas também as suas limitações práticas, oferecendo dados concretos que sustentam decisões de projeto. A avaliação comparativa entre abordagens distintas — como colheita mecânica, solar, piezoelétrica ou de radiofrequência — fornece uma base sólida para identificar a combinação mais eficiente e robusta em cenários operacionais exigentes.

O trabalho de Vitorino 2022 focou-se no desenvolvimento de um gerador piezoelétrico incorporado em botas militares, concebido para aproveitar a energia mecânica gerada durante a marcha. O sistema, baseado em transdutores piezoelétricos posicionados na sola, foi testado em condições controladas, obtendo uma média de 800,90 μJ por passo a uma cadência de 1 passo/segundo. Considerando

um acumulador típico AAA com capacidade de 1,2 V e 1000 mAh (cerca de 4,32 kJ), seriam necessários aproximadamente 7 milhões de passos para uma carga completa. Apesar do rendimento modesto, o estudo demonstrou a viabilidade da tecnologia como fonte complementar de energia para dispositivos de baixo consumo, como sensores biométricos ou sistemas de localização. A integração no calçado também apresenta a vantagem de ser não intrusiva e de não exigir alterações significativas no equipamento do militar.

Já Gomes 2024 apresentou um sistema portátil híbrido de carregamento de equipamentos eletrônicos, combinando energia solar, piezoelétrica e indução eletromagnética. Os ensaios laboratoriais indicaram que o módulo fotovoltaico obteve o melhor desempenho com uma resistência de carga de $5,2 \Omega$, atingindo potências próximas de 200 mW em condições de radiação solar direta de 1000 W/m^2 . A componente piezoelétrica mostrou-se eficiente na recuperação de pequenas quantidades de energia durante o movimento, enquanto o sistema de indução eletromagnética foi útil para recarregar equipamentos por acoplamento próximo. A utilização combinada das três fontes permitiu ao protótipo manter autonomia energética mesmo em cenários de ausência de luz solar ou de movimento reduzido, reforçando o seu potencial para operações militares de longa duração e com logística limitada.

Por sua vez, Teixeira 2022a desenvolveu um sistema de gestão de potência dedicado à energia recolhida de fontes de RF. O projeto centrou-se na captação de sinais de RF por antenas dedicadas, convertendo-os em energia elétrica através de circuitos de retificação de alta eficiência. Com um nível de potência incidente de apenas -20 dBm ($10 \mu\text{W}$), o sistema foi capaz de armazenar energia suficiente para alimentar microcontroladores de ultra baixo consumo por períodos prolongados, demonstrando a viabilidade desta abordagem para sensores remotos e dispositivos de vigilância. A implementação incluiu técnicas de MPPT adaptadas a níveis extremamente reduzidos de potência, garantindo uma otimização contínua da captação.

A comparação direta destes estudos evidencia a diversidade de abordagens e as suas limitações. Enquanto a solução de Vitorino 2022 oferece integração passiva e utilização contínua durante o movimento, apresenta taxas de carregamento muito baixas para aplicações de consumo elevado. O sistema de Gomes 2024, por integrar múltiplas fontes, oferece maior robustez e adaptabilidade, mas aumenta a complexidade de implementação e o custo. Já o trabalho de Teixeira 2022a, embora limitado à presença de sinais de RF com intensidade mínima, apresenta vantagens na possibilidade de funcionamento totalmente autónomo, sem partes móveis e com potencial de operação contínua em ambientes urbanos densos.

Em síntese, estas investigações demonstram que a escolha da tecnologia de colheita de energia depende fortemente do perfil de consumo do sistema-alvo, das condições ambientais e das restrições operacionais. No entanto, nota-se a ausência de estudos que realizem uma avaliação experimental integrada de diferentes PMICs em cenários militares reais, analisando simultaneamente parâmetros como eficiência, tempo de arranque a frio e comportamento com múltiplas fontes. É precisamente esta lacuna que o presente trabalho se propõe colmatar.

A tabela 2.3 sintetiza os principais contributos dos trabalhos analisados, evidenciando os compromissos entre eficiência energética, complexidade de implementação e adaptação ao contexto militar.

TABELA 2.3: Comparação de abordagens de colheita de energia para aplicações militares.

Referência	Fonte	Tecnologia/ Material	Potência/ Energia	Vantagens/ Limitações
Vitorino 2022	Mecânica (marcha)	Transdutores piezoelétricos em botas	800,90 μJ /passo	Integração passiva; rendimento baixo para cargas elevadas
Gomes 2024	Solar, piezoelétrica, indução eletromagnética	Módulo fotovoltaico, piezo, bobina de indução	Até 200 mW (solar)	Alta adaptabilidade; maior complexidade e custo
Teixeira 2022a	Radiofrequência (RF)	Antenas + circuito de retificação com MPPT	10 μW	Funcionamento autónomo; dependência de sinais RF e potência reduzida

2.6 Desafios e Limitações Atuais

Apesar dos avanços significativos no campo da colheita de energia, a implementação prática destas tecnologias ainda enfrenta diversos obstáculos técnicos e operacionais que limitam a sua eficiência e adoção em larga escala. Tais desafios derivam tanto das características físicas das fontes de energia quanto das restrições impostas pelas próprias aplicações, especialmente em cenários de elevada exigência, como as operações militares.

Alguns aspectos que devem ser levados em consideração antes:

1. Armazenamento de energia:

Supercondensadores e baterias recarregáveis são soluções comuns para armazenar a energia captada, mas cada uma apresenta limitações específicas. Supercondensadores oferecem elevada densidade de potência, mas baixa densidade de energia, descarregando-se rapidamente. Já as baterias de íons de lítio ou polímero de lítio apresentam maior capacidade, mas sofrem degradação com ciclos de carga/descarga e podem ter restrições de temperatura — sendo crítico no domínio militar, onde as operações podem ocorrer entre -30°C e $+60^{\circ}\text{C}$.

2. Custos e viabilidade econômica:

Embora o custo de algumas tecnologias — como painéis solares — tenha diminuído nas últimas décadas, dispositivos especializados para colheita de energia de fontes não convencionais (piezoelétricos, termogeradores de alta eficiência, antenas de RF de banda larga) ainda apresentam preços elevados, sobretudo em versões miniaturizadas e robustas para uso militar. A viabilidade econômica torna-se, assim, um fator decisivo, particularmente quando se compara com soluções convencionais baseadas em baterias descartáveis ou recarregáveis.

3. Eficiência de conversão e perdas:

Os estágios de conversão AC/DC e DC/DC, essenciais para adaptar a energia colhida às necessidades da carga, introduzem inevitavelmente perdas. Mesmo com tecnologias modernas, a eficiência média de conversores de baixo consumo situa-se entre 70 % e 90 %, sendo ainda menor em regimes de potência extremamente reduzida (na ordem de μW). Além disso, a fase de *cold-start* em PMICs pode exigir energia acumulada suficiente para inicializar o circuito, o que retarda o início da operação em condições de baixa geração.

4. Integração e miniaturização:

A incorporação de sistemas de colheita de energia em equipamentos portáteis exige um compromisso entre potência gerada, tamanho e peso. A miniaturização dos conversores, controladores e módulos de armazenamento é um desafio, especialmente quando se pretende manter alta eficiência e baixa dissipação térmica. Em muitos casos, a área disponível para a captação (painéis solares ou antenas de RF) é limitada, restringindo severamente a potência máxima obtida.

5. Robustez mecânica e ambiental:

Em aplicações militares, os dispositivos de colheita estão sujeitos a vibrações, impactos, humidade, poeira, exposição prolongada a radiação solar e interferências eletromagnéticas. A robustez mecânica dos componentes piezoelétricos, a resistência à corrosão dos painéis fotovoltaicos e a proteção dos circuitos contra EMI (*Electromagnetic Interference*) ou RFI (*Radiofrequency Interference*) são requisitos fundamentais. O incumprimento destas exigências compromete não só a eficiência energética, mas também a fiabilidade operacional.

6. Variabilidade e intermitência das fontes:

As fontes de energia ambiental — sejam elas solares, piezoelétricas, térmicas ou de radiofrequência — apresentam uma natureza intrinsecamente variável e, por vezes, intermitente. Por exemplo, a irradiância solar pode oscilar entre 1000 W/m^2 em condições ideais e valores inferiores a 50 W/m^2 em dias nublados ou no interior de edificações. De forma semelhante, a potência gerada por elementos piezoelétricos depende da frequência e intensidade das vibrações, podendo cair abaixo de 1 mW em períodos de baixa atividade mecânica. Essa instabilidade dificulta a garantia de um fornecimento energético contínuo, exigindo circuitos de gestão de potência sofisticados e sistemas de armazenamento com elevada eficiência.

Capítulo 3

Desenvolvimento

Este capítulo tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de colheita de energia capaz de alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo energético, recorrendo a fontes renováveis e intermitentes como a energia solar, vibrações mecânicas e gradientes térmicos. Segundo Swanner 2017, esta abordagem visa responder à crescente necessidade de soluções energéticas autónomas, sustentáveis e de elevada eficiência, especialmente em contextos onde o acesso à rede elétrica é limitada ou inexistente, como em aplicações militares, industriais ou monitorização remota.

Para concretizar este desígnio, foi selecionado o circuito integrado BQ25570, da TI (Texas Instruments), que se destaca pela sua capacidade de recolher, armazenar e regular energia proveniente de múltiplas fontes com elevada eficiência. Este módulo permite a gestão inteligente da energia captada, otimizando o processo de conversão e garantindo uma alimentação estável e contínua para os dispositivos conectados. A escolha do BQ25570 justifica-se pela sua versatilidade, baixo consumo em modo *standby* e compatibilidade com fontes de energia de baixa potência, características essenciais para o sucesso do sistema proposto.

O aperfeiçoamento do sistema contempla ainda a integração de um módulo de armazenamento energético, que assegura a autonomia do dispositivo durante períodos em que não há geração ativa de energia. A regulação da tensão de saída, a proteção contra sobretensões e a compatibilidade com diferentes tipos de transdutores são também requisitos fundamentais que orientam a concepção do protótipo.

Deste modo, se pretende criar uma solução compacta, eficiente e fiável, capaz de operar de forma contínua e autónoma, contribuindo para a disseminação de tecnologias sustentáveis e para a redução da dependência de fontes convencionais de energia.

3.1 Requisitos Funcionais e Técnicos

Para garantir que o sistema de colheita de energia cumpre os objetivos definidos, foram estabelecidos requisitos funcionais e técnicos que orientam a sua concepção, seleção de componentes e validação experimental. Estes requisitos refletem as necessidades práticas da aplicação, bem como as limitações impostas pelas fontes de energia disponíveis e pelas características dos dispositivos a alimentar.

Do ponto de vista funcional, o sistema deverá ser capaz de fornecer uma tensão de saída regulada e estável, adequada à alimentação de sensores, microcontroladores ou outros dispositivos eletrônicos de baixo consumo. A autonomia energética é outro requisito essencial, sendo necessário assegurar que o sistema consiga operar durante períodos prolongados sem geração ativa de energia, recorrendo ao módulo de armazenamento integrado. Além disso, o sistema deverá ser compatível com múltiplas fontes de energia, permitindo a recolha simultânea de energia solar, piezoelétrica e térmica, de forma a maximizar a eficiência global e a adaptabilidade às condições ambientais.

A tabela 3.1 apresenta os principais requisitos funcionais, acompanhado da respectiva justificação técnica com base nas características dos componentes selecionados, nas limitações das fontes de energia utilizadas bem como nas suas necessidades operacionais.

3.1. Requisitos Funcionais e Técnicos

TABELA 3.1: Especificações técnicas para sistema de colheita de energia.

Requisito	Valor Esperado/ Intervalo	Justificação Técnica
Tensão de saída regulada	$3,3 \text{ V} \pm 5\%$	Compatível com microcontroladores e sensores de baixo consumo
Corrente de fornecimento à carga	$\geq 100 \text{ mA}$	Garante operação contínua de dispositivos típicos (ex.: sensores, módulos RF)
Tempo de carga do armazenamento	$\leq 2 \text{ horas}$	Permite recarga rápida em ambientes com geração intermitente
Autonomia mínima	$\geq 2 \text{ horas}$ sem geração ativa	Assegura funcionamento em períodos de ausência de luz, vibração ou calor
Tensão mínima de entrada	$\geq 330 \text{ mV}$	Compatível com fontes de baixa potência (ex.: TEGs)
Eficiência de conversão energética	$\geq 80\%$	Minimiza perdas e maximiza aproveitamento da energia recolhida
Dimensões físicas do sistema	$\leq 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$	Facilita integração em aplicações móveis ou de difícil acesso
Proteção contra sobre-tensão	Ativa (VBAT_OV configurável)	Evita danos ao armazenamento e à carga, conforme especificações do BQ25570 (Texas Instruments 2019)

Para além dos requisitos funcionais, é essencial definir os parâmetros técnicos que garantem o desempenho e a fiabilidade do sistema. Estes requisitos foram definidos com base nas especificações técnicas do circuito BQ25570, nas características dos transdutores selecionados e nas exigências da aplicação final. A sua validação será realizada através de simulações e testes práticos, que permitirão aferir o desempenho real do sistema e ajustar os parâmetros de funcionamento conforme necessário.

A tabela 3.2 abaixo apresenta os principais requisitos técnicos e a sua respectiva justificação retirados do *datasheet* da Texas Instruments:

TABELA 3.2: Requisitos Técnicos do Sistema.

Parâmetro Técnico	Valor Esperado / Intervalo	Justificação / Fonte
Tensão mínima de arranque	$\geq 600 \text{ mV}$	Valor mínimo para <i>cold start</i> do BQ25570 (Texas Instruments 2019)
Tensão de operação contínua	$\geq 100 \text{ mV}$	Permite funcionamento com fontes de baixa potência após arranque inicial
Tensão de saída regulada	$3,3 \text{ V} \pm 5\%$	Compatível com microcontroladores e sensores típicos
Corrente de saída (IOUT)	Até 110 mA	Limite máximo suportado pelo regulador <i>buck</i> do BQ25570
Eficiência de conversão (boost)	$\geq 80\%$	Valor típico em condições ideais (Texas Instruments 2019)
Eficiência de conversão (buck)	Até 93%	Conforme especificações do regulador integrado (Texas Instruments 2019)
Capacidade de armazenamento	$470 \mu\text{F}$ a 1 F	Compatível com supercondensadores de pequena dimensão
Tempo de carga do armazenamento	$\leq 2 \text{ horas}$	Garante recarga rápida em ambientes com geração intermitente
Corrente de repouso total	$\leq 500 \text{ nA}$	Minimiza perdas em modo de espera
Temperatura de operação	-40°C a $+85^\circ\text{C}$	Faixa típica para aplicações em ambientes exteriores
Dimensões físicas do circuito	$\leq 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$	Facilita integração em sistemas portáteis ou embutidos

A partir destes parâmetros técnicos, o sistema deverá ser capaz de operar com tensões de entrada muito reduzidas, típicas de fontes de baixa potência, como células solares de pequena dimensão ou transdutores piezoelétricos. A corrente de carga deverá ser suficiente para alimentar os dispositivos conectados, e a eficiência de conversão energética deverá ser elevada, minimizando perdas e otimizando

o aproveitamento da energia recolhida. O tempo de carregamento do módulo de armazenamento deverá ser compatível com os ciclos de funcionamento pretendidos, e as dimensões físicas do sistema deverão permitir a sua integração em aplicações móveis ou de difícil acesso.

3.1.1 Seleção de Fontes de Energia

A seleção das fontes de energia para o sistema de colheita foi orientada por critérios de disponibilidade ambiental, densidade energética, compatibilidade com o circuito de gestão BQ25570 e viabilidade técnica para aplicações de baixo consumo. Considerando o contexto de operação autónoma e sustentável, foram escolhidas três fontes principais: energia solar, energia piezoelétrica e energia termoeétrica. Cada uma destas fontes apresenta características complementares que, quando integradas, aumentam a resiliência e a eficiência do sistema.

Energia Solar

A energia solar foi selecionada como fonte primária devido à sua elevada densidade energética e ampla disponibilidade em ambientes exteriores. Células fotovoltaicas de silício amorfo ou monocristalino são capazes de gerar tensões superiores a 500 mV mesmo sob condições de iluminação reduzida, o que as torna compatíveis com o BQ25570, cuja tensão mínima de entrada é de aproximadamente 600 mV (Texas Instruments 2019). Além disso, a tecnologia fotovoltaica é madura, acessível e apresenta boa relação custo-benefício. Estudos demonstram que, em ambientes urbanos, é possível obter potências superiores a $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ com iluminação natural (Paradiso e Starner 2005).

Para o desenvolvimento desta dissertação foi selecionado o painel solar 60x60 RY6-427 policristalino da figura 3.1 com uma tensão de circuito aberto de $V_{oc} = 3,60 \text{ V}$ e uma corrente de curto-circuito $I_{sc} = 100 \text{ mA}$.

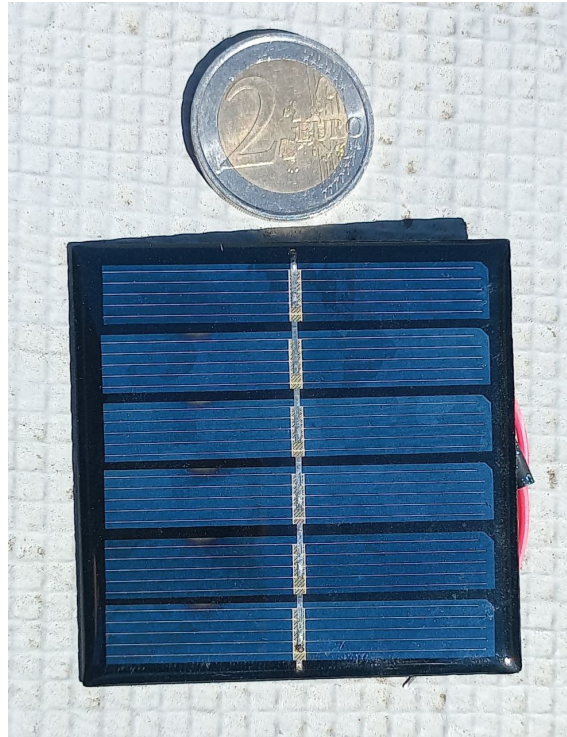


FIGURA 3.1: Painel solar 60x60 mm RY6-427 policristalino da PTRobotics.

Energia Piezoelétrica

Neste trabalho, será utilizado o filme piezoelétrico Emfit L3030 (290×300 mm), figura 3.2, como uma fonte complementar de alimentação para o circuito de recolha BQ25570. Este material, desenvolvido pela Emfit, distingue-se dos piezoelétricos convencionais por ser um ferroeletrito expandido por gás, contendo cavidades internas que respondem a variações de espessura, em vez de flexão (Ltd. 2022). A sua estrutura incorpora eletrodos de alumínio laminados sobre uma base de poliolefina, o que lhe confere elevada sensibilidade a forças dinâmicas e uma resposta de frequência plana até 20 kHz (Soini, Paajanen e Lekkala 2006).

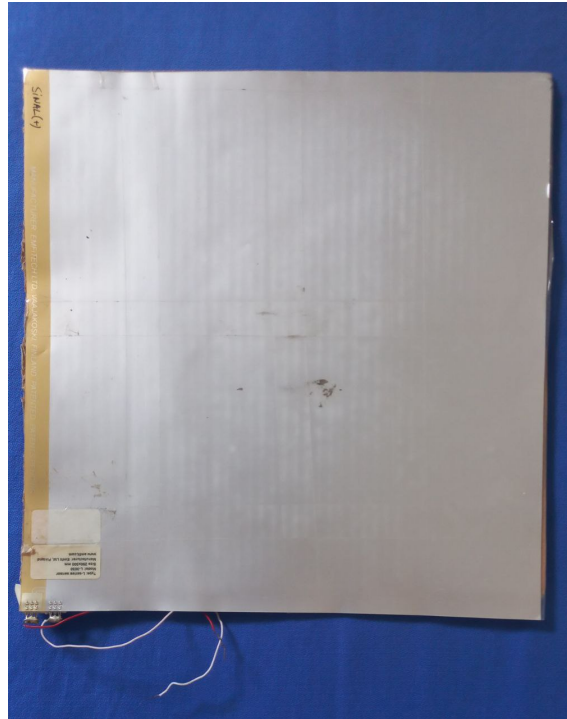


FIGURA 3.2: Filme piezoelétrico L-series sensor L-3030 290x300 mm da Emfit que será utilizado como uma fonte alternativa de alimentação do módulo BQ25570.

Estas características tornam o Emfit L3030 particularmente adequado para captar vibrações em ambientes dinâmicos, como o movimento humano, sem depender de ressonância mecânica. A sua baixa massa e elevada flexibilidade permitem uma integração discreta em sistemas vestíveis, enquanto a capacidade de gerar sinais elétricos consistentes sob estímulo mecânico faz dele uma alternativa viável para recolha de energia em contextos onde fontes primárias e secundárias não são suficientes. Apesar da corrente gerada ser relativamente baixa, a tensão de saída é suficientemente elevada para facilitar a integração com circuitos de recolha como o BQ25570 (Instruments 2023), tornando esta fonte especialmente útil em aplicações móveis ou vestíveis, onde o movimento do utilizador pode ser explorado como recurso energético complementar e sustentável.

Energia Termoelétrica

Os módulos termoelétricos, baseados no efeito Seebeck, permitem a conversão direta de gradientes térmicos em energia elétrica. Esta tecnologia é especialmente útil em ambientes com variações de temperatura entre superfícies, como motores, tubagens ou mesmo o corpo humano em contacto com o ambiente. Embora a tensão gerada por um único módulo seja geralmente inferior a 100 mV, a utilização de

múltiplos módulos em série ou a aplicação de técnicas de *pré-boost* permite atingir os níveis exigidos pelo circuito de gestão (Leonov, Torfs e Vullers 2009). A energia termoelétrica destaca-se pela sua fiabilidade e ausência de partes móveis, o que contribui para a durabilidade do sistema.

A figura 3.3 apresenta um refrigerador termoelétrico, que foi explorado neste estudo como fonte secundária de alimentação para o módulo. Embora este tipo de dispositivo seja tradicionalmente utilizado para o arrefecimento de componentes eletrónicos, através do efeito Peltier, neste caso foi aproveitado como gerador termoelétrico. Esta abordagem surge como alternativa prática ao uso de TEGs, cuja disponibilidade é limitada no contexto atual, permitindo ainda assim a análise do comportamento do sistema sob condições reais de conversão térmica.



FIGURA 3.3: Célula de Peltier TEC1-03104.

3.1.2 Circuito de Gestão de Energia: BQ25570

O circuito integrado BQ25570, desenvolvido pela TI, representa uma solução eficiente para sistemas de *energy harvester*, especialmente em aplicações de baixa potência e fontes intermitentes, como painéis solares, TEGs e dispositivos piezoelétricos. Este CI combina um carregador boost com um conversor *buck* regulado, permitindo simultaneamente o armazenamento de energia e a alimentação de cargas com tensão regulada.

Entre as suas principais características, destacam-se:

- *Cold-start* com $V_{IN} \geq 600$ mV e potência mínima de $15 \mu\text{W}$;
- Corrente de repouso ultra-baixa (tipicamente 488 nA);
- Operação contínua com $V_{IN} \geq 100$ mV;
- Conversores *boost* e *buck* com eficiência até 93%;

- MPPT programável para extração otimizada de energia;
- Proteção da bateria contra sobrecarga e descarga profunda;
- Sinal digital VBAT_OK para monitorização da tensão da bateria.

Este dispositivo possui outras funcionalidades consideradas essenciais, que controlam o estado interno e gerem os seus modos de operação:

- **Modo *Ship*:** desliga quase tudo para manter a energia armazenada (consumo interno tipicamente 5 nA);
- **Modo Ativo:** conversores *buck* e *boost* ativos simultaneamente;
- **Modo *Standby*:** *boost* ativo, *buck* desativado;
- ***Shutdown* térmico:** proteção contra sobreaquecimento.

O BQ25570 é amplamente utilizado em redes de sensores sem fios, dispositivos portáteis, sistemas de monitorização ambiental e aplicações vestíveis, onde a gestão energética precisa ser autossuficiente. O circuito possui alguns pinos importantes, que incluem as entradas e saídas descritas na tabela 3.3.

TABELA 3.3: Descrição dos principais pinos do PMIC.

Pino	Função Principal
VIN_DC	Entrada da principal fonte de energia
VSTOR	Saída do carregador <i>boost</i>
VBAT	Ligação ao elemento de armazenamento
VOUT	Saída regulada do conversor <i>buck</i>
EN/VOUT_EN	Controlo digital dos modos de operação
VBAT_OK	Sinal digital de bateria em nível seguro
VOC_SAMP	Amostragem para MPPT
VREF_SAMP	Armazena referência de tensão para MPPT

O diagrama funcional do BQ25570, apresentado na figura 3.4, revela os principais blocos internos que compõem o CI. O carregador *boost* é responsável por elevar a tensão da fonte de entrada para carregar o elemento de armazenamento conectado ao pino VSTOR. O conversor *buck* regula a tensão de saída para alimentar a carga, podendo ser ativado ou desativado conforme necessário. O motor MPPT realiza amostragem periódica da tensão da fonte para ajustar dinamicamente o ponto de operação ideal, garantindo máxima eficiência na extração de energia. O comparador VBAT_OK gera um sinal digital quando a tensão da bateria está dentro dos limites

seguros, permitindo que o sistema funcione apenas quando há energia suficiente. O controlador de estado interno gere os modos de operação do CI, incluindo *cold-start*, ativo, *standby* e, além de proteção térmica contra sobreaquecimento.

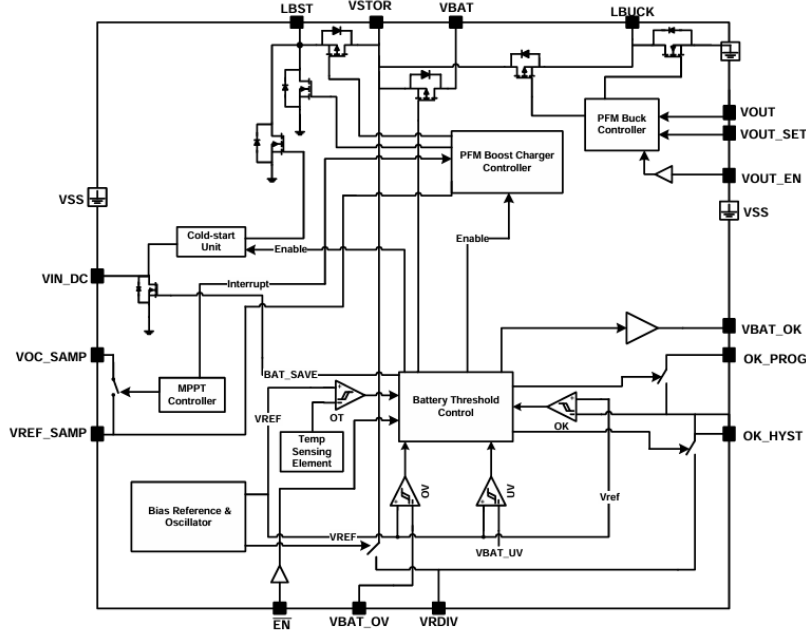


FIGURA 3.4: Diagrama de blocos funcionais do CI BQ25570.

A descrição detalhada do funcionamento do BQ25570 revela um sistema adaptável. No modo *cold-start*, o CI inicia o carregamento mesmo com energia mínima (600 mV), ideal para fontes fracas como TEGs ou luz solar difusa. No modo ativo, o carregador *boost* e o conversor *buck* operam simultaneamente, permitindo o carregamento da bateria e a alimentação da carga. No modo *standby*, apenas o *boost* permanece ativo, enquanto o *buck* é desativado para economizar energia. O modo *Ship* é utilizado para armazenamento ou transporte do dispositivo, com consumo inferior a 5 nA. O sistema de MPPT realiza amostragem da tensão da fonte a cada 16 segundos, desativando temporariamente o carregador para calcular o ponto de potência máxima com base na equação 3.1. Este mecanismo pode ser configurado para 50% ou 80% através de resistências externas, adaptando-se às características da fonte de energia utilizada. No caso fonte ser um painel solar, o MPPT recomendável é de 80% da tensão de circuito aberto.

$$V_{REF_SAMP} = V_{IN_DC} \text{ (circuito aberto)} \times \left(\frac{ROC_1}{ROC_1 + ROC_2} \right) \quad (3.1)$$

A figura 3.5 apresenta uma aplicação típica do BQ25570, envolvendo a utilização de um painel solar como fonte de entrada. A energia captada é elevada pelo carregador *boost* e armazenada numa bateria de lítio conectada ao pino VBAT. O conversor *buck* regula a tensão de saída para alimentar sensores ou microcontroladores, enquanto o sinal VBAT_OK só é ativado quando a bateria está suficientemente carregada. Esta configuração permite a operação autossuficiente de sistemas remotos com fontes de energia renovável.

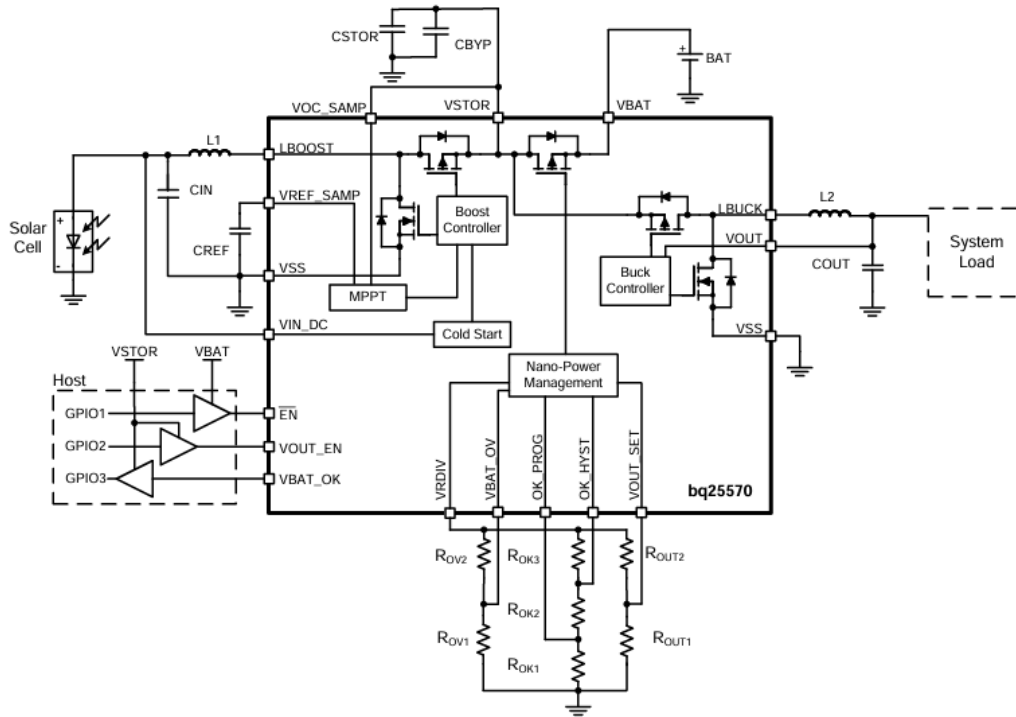


FIGURA 3.5: Circuito funcional alimentado por um painel solar.

3.1.3 Armazenamento de Energia

O armazenamento de energia constitui um elemento essencial na arquitetura de sistemas de colheita energética, sobretudo quando se recorre a fontes intermitentes e de baixa potência. A principal função deste módulo é acumular a energia recolhida durante os períodos de geração ativa, assegurando a alimentação contínua dos dispositivos eletrónicos mesmo na ausência temporária das fontes externas. A seleção da tecnologia de armazenamento deve considerar critérios como densidade energética, tempo de carga, durabilidade, segurança e compatibilidade elétrica com o circuito de gestão.

Considerando os objetivos definidos, foram analisadas duas soluções principais para o sistema de armazenamento energético: supercondensadores e baterias

de polímero de Lítio (Li-Po). Ambas apresentam vantagens e limitações que devem ser ponderadas em função das exigências específicas da aplicação.

Os supercondensadores distinguem-se pela elevada densidade de potência, tempo de carga extremamente reduzido e longa vida útil, podendo suportar centenas de milhares de ciclos de carga e descarga sem degradação significativa (Burke 2000). Estas características tornam-nos particularmente adequados para aplicações que requerem fornecimento rápido de energia ou operam em ambientes com geração energética intermitente e imprevisível. Contudo, a sua densidade energética é inferior à das baterias, o que condiciona a autonomia do sistema em períodos prolongados sem geração ativa.

A figura 3.6 apresenta o supecondensador que foi utilizado para desenvolver o protótipo com os seguintes valores capacitância de 200 mF e uma tensão nominal de 5,5 V como elemento de armazenamento de energia primário.



FIGURA 3.6: Armazenador principal do módulo BQ25570.

Alternativamente, as baterias de Li-Po apresentam uma densidade energética significativamente superior, o que se traduz numa maior autonomia e capacidade de armazenamento mesmo em volumes reduzidos. Esta característica, aliada à leveza, flexibilidade e estabilidade de tensão, torna-as particularmente adequadas para aplicações em dispositivos portáteis e vestíveis. No entanto, estas baterias requerem tempos de carga mais prolongados e possuem uma vida útil limitada em termos de ciclos de carga e descarga, quando comparadas com os supercondensadores. Acresce ainda a necessidade de integrar circuitos de proteção contra sobrecarga e descarga

profunda, o que contribui para uma maior complexidade do sistema — aspectos amplamente discutidos na literatura especializada sobre os desafios tecnológicos das baterias recarregáveis baseadas em lítio (Tarascon e Armand 2001).

A figura 3.7 apresenta a bateria de polímero de Lítio utilizada como elemento de armazenamento alternativo ao supercondensador nos testes experimentais deste estudo. A sua inclusão permite avaliar o desempenho do sistema sob diferentes configurações de armazenamento energético, contribuindo para uma análise comparativa da eficiência e viabilidade de cada solução. Este tipo de bateria é particularmente relevante devido à sua elevada densidade energética e estabilidade de tensão. Além disso, o circuito integrado BQ25570, utilizado no sistema, incorpora mecanismos dedicados de monitorização e proteção que garantem o carregamento seguro da bateria de Li-Po, evitando sobrecargas e assegurando a longevidade do componente. A integração desta tecnologia reforça a versatilidade do sistema proposto, permitindo adaptar-se a diferentes cenários operacionais e requisitos energéticos.



FIGURA 3.7: Bateria de Polímero de Lítio LP553436 3.7V 700mAh.

A tabela 3.4 apresenta um resumo comparativo dos principais parâmetros técnicos de ambas as soluções, evidenciando suas vantagens e limitações em diferentes aplicações.

TABELA 3.4: Resumo comparativo entre Supercondensadores e Baterias Li-Po adaptado de (University 2025).

Aspecto	Supercondensador	Bateria Li-Po
Energia	Baixa densidade ($\sim 1\text{--}10$ Wh/kg)	Alta densidade ($\sim 100\text{--}250$ Wh/kg)
Potência	Muito alta (~ 10 kW/kg)	Moderada (~ 1 kW/kg)
Carga	Rápida (segundos a minutos)	Lenta (dezenas de minutos a horas)
Ciclos de vida	>500.000	$300\text{--}1.000$
Temperatura	(-40°C a $+70^\circ\text{C}$)	(0°C a $+60^\circ\text{C}$)
Gestão	Simples	Complexa (proteção e balanceamento)
Volume/Peso	Maior para mesma energia	Mais compacto
Custo por Wh	Elevado	Acessível

3.2 Arquitetura

O aparato físico foi concebido com base nos resultados das simulações e nos requisitos funcionais definidos anteriormente, visando a construção de um sistema compacto, eficiente e funcional para colheita, armazenamento e conversão de energia proveniente de fontes renováveis. O protótipo integra todos os elementos essenciais do sistema, permitindo validar experimentalmente o desempenho do circuito de gestão BQ25570 em condições reais de operação conforme a figura sugere 3.8.



FIGURA 3.8: Arquitetura proposta para o protótipo físico.

Capítulo 4

Testes realizados e análise de resultados

4.1 Metodologia de Testes

Para realizar os testes experimentais, foram utilizados diversos materiais e equipamentos com o objetivo de avaliar o desempenho das fontes de energia e o comportamento dos circuitos de gestão baseados nos CI BQ25570/BQ25504, simulados previamente no software TINA-TI da Texas Instruments. Importa referir que a simulação foi realizada com o modelo BQ25504, uma vez que este é o único disponível na biblioteca do TINA-TI. Apesar de o BQ25570 ser uma alternativa funcionalmente semelhante, distinguem-se principalmente pelo facto de este último integrar uma saída regulada adicional, destinada à alimentação direta de pequenos dispositivos. Esta diferença, embora relevante em aplicações específicas, não compromete a validade da simulação para os objetivos definidos nesta análise.

Dessa forma, os testes foram estruturados em duas fases complementares: a simulação, efetuada com o BQ25504, e os ensaios experimentais, conduzidos com o BQ25570, assegurando uma análise coerente e representativa do desempenho dos circuitos de gestão energética.

Equipamentos de medição: foram usados dois multímetros digitais (Gwinstek GDM-533 e Uni-T UT131C) para medir tensões e correntes em diferentes pontos do circuito. Um osciloscópio Tektronix TDS1002B permitiu observar sinais elétricos em tempo real, como variações de tensão e forma de onda. Mais dois termómetros digitais TP101 da AliExpress e um termómetro de Mercúrio que permitiu medir a temperatura durante os ensaios.

Fontes de energia e componentes: os testes incluíram várias fontes de energia:

- Painéis solares policristalinos da PTRobotics (modelo RY6-427);
- Filmes piezoelétricos da Emfit (L3030 290x300 mm);
- Células Peltier (TEC1-03104), utilizadas com gradientes de temperatura.

Circuitos integrados e simulação: os circuitos de gestão de energia foram baseados nos CI BQ25570/BQ25504, ambos da Texas Instruments. Antes da montagem física, os circuitos foram simulados no software TINA-TI para validar o funcionamento e otimizar os parâmetros de operação.

Montagem experimental: todos os componentes foram montados numa *breadboard*, permitindo fácil reconfiguração. As ligações foram feitas com cabos de ensaio e conectores padrão. Os painéis solares foram posicionados com suportes ajustáveis para otimizar a captação de luz solar durante os testes ao ar livre.

4.2 Simulação do Painel Solar no TINA-TI

Nesta secção, desenvolve-se a abordagem utilizada para simular o circuito de gestão de energia baseado no PMIC BQ25504, recorrendo ao software TINA-TI. O objetivo principal consiste em validar o comportamento do sistema de colheita de energia em condições próximas das reais, através de simulação em computador que reproduzem o funcionamento dos seus principais componentes.

A simulação inicia-se com a construção do modelo equivalente proposto por (Camacho, Carrijo, Ferreira e Jr. 2010), que representa o painel fotovoltaico como:

- Uma **fonte de corrente**, que simula a corrente gerada pela radiação solar incidente;
- Um **díodo**, que reproduz o comportamento típico dos semicondutores;
- Duas **resistências**, que representam as perdas internas do painel.

Embora este modelo não seja o mais completo disponível na literatura, apresenta uma fidelidade suficiente para reproduzir o comportamento elétrico do painel fotovoltaico selecionado para os testes práticos.

A fonte utilizada possui uma tensão de circuito aberto $V_{oc} = 3,6$ V e uma corrente de curto-circuito $I_{sc} = 120$ mA, valores que foram integrados no modelo conforme ilustrado na figura 4.1.

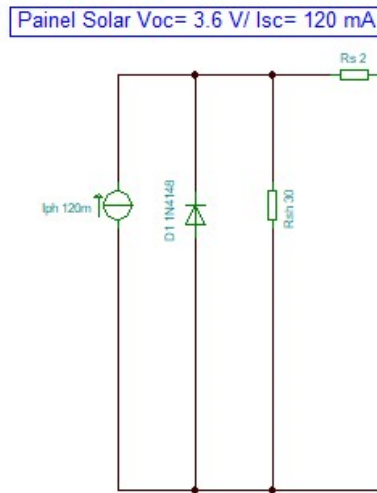


FIGURA 4.1: Representação simplificada da fonte alimentação.

Configuração do MPPT

O algoritmo MPPT é implementado com o objetivo de maximizar a energia extraída da fonte solar. O carregador *boost* modula indiretamente a impedância de entrada do sistema ao regular a tensão de entrada $V_{IN_DC(OC)}$, comparando-a com um valor de referência armazenado no pino V_{REF_SAMP} .

Este valor de referência é atualizado tipicamente a cada 16 segundos, sendo obtido através da amostragem de uma fração da tensão de circuito aberto, após a desativação temporária do carregador durante 256 ms. Para fontes solares, o algoritmo MPPT opera entre 70% e 80% de $V_{IN_DC(OC)}$, com a configuração do pino V_{OC_SAMP} representada na tabela 4.1 permite definir diretamente o ponto de operação:

Ligação do V_{OC_SAMP}	MPPT (% $V_{IN_DC(OC)}$)
VSTOR	80%
GND	50%

TABELA 4.1: Configuração do ponto de operação MPPT.

No circuito simulado no TINA-TI, o valor do MPPT foi otimizado para a fonte solar utilizada, através da ligação de resistências externas R_{OC1} e R_{OC2} entre V_{RDIV} e GND, com o ponto médio conectado ao pino V_{OC_SAMP} . A tensão de referência é dada por:

$$V_{\text{REF_SAMP}} = V_{\text{IN}} \cdot \left(\frac{\text{ROC1}}{\text{ROC1} + \text{ROC2}} \right) \quad (4.1)$$

Substituindo os valores:

$$\text{ROC1} = R_2 + R_3 = 5,6 \text{ M}\Omega + 10 \text{ M}\Omega = 15,6 \text{ M}\Omega$$

$$\text{ROC2} = R_1 = 4,42 \text{ M}\Omega$$

$$V_{\text{IN}} = 3,6 \text{ V}$$

$$V_{\text{REF_SAMP}} = 3,6 \cdot \left(\frac{15,6}{15,6 + 4,42} \right) \approx 2,81 \text{ V}$$

Este valor corresponde a **78% de VIN(OC)**, conforme ilustrado na figura 4.2.

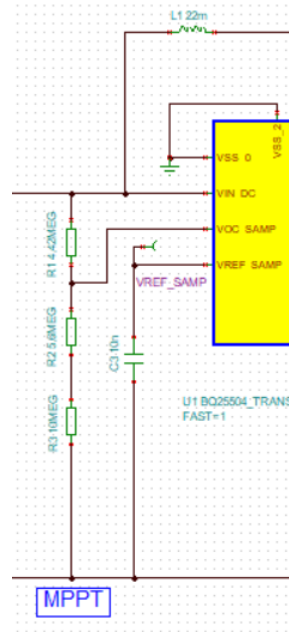


FIGURA 4.2: Método de regulação do MPPT do BQ25504 por meio de resistências externas.

Armazenamento de Energia – VSTOR

O elemento de armazenamento primário do circuito é um supercondensador com capacidade $C_{\text{STOR}} = 220 \text{ mF}$, complementado por um condensador de bypass recomendado pelo fabricante ($C_{\text{BYP}} = 100 \text{ nF}$). O foco da análise recai sobre o supercondensador, cuja energia armazenada é calculada pela equação:

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (4.2)$$

Substituindo:

$$C = 220 \text{ mF} = 0,220 \text{ F}$$

$$V = 3,55 \text{ V}$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot 0,220 \cdot (3,55)^2 \approx 1,38 \text{ J}$$

Este valor representa a energia máxima disponível para alimentar os circuitos de baixa potência integrados no sistema.

Configuração global do circuito

O dimensionamento do circuito pode ser realizado a partir dos valores recomendados pelo fabricante para os componentes passivos, recorrendo às equações que justificam as partes críticas, como o MPPT, VBAT_OK, VBAT_UV e VBAT_OV. Essas equações encontram-se no *datasheet* do BQ25570, permitindo um cálculo direto dos parâmetros necessários. Alternativamente, a Texas Instruments disponibiliza uma folha de cálculos que já incorpora diversas dessas equações, facilitando a otimização do circuito global. Essa ferramenta encontra-se descrita no Apêndice A.

O circuito global desenvolvido é apresentado na figura 4.3.

Análise das Curvas de Simulação

A análise das curvas obtidas na simulação permite validar o comportamento dinâmico do circuito de gestão de energia baseado no BQ25504, em condições que simulam a operação real de um sistema de colheita fotovoltaica. A figura 4.4 correspondente apresenta cinco sinais distintos, cada um representando uma variável crítica do sistema ao longo de um intervalo de 10 segundos.

O sinal VBAT (linha verde) evidencia um perfil de carregamento progressivo da bateria, com incrementos discretos observados aos 6 e 8 segundos. Este comportamento é compatível com o mecanismo de regulação de carga do BQ25504, que atua sobre a tensão de saída para garantir a integridade da unidade de armazenamento.

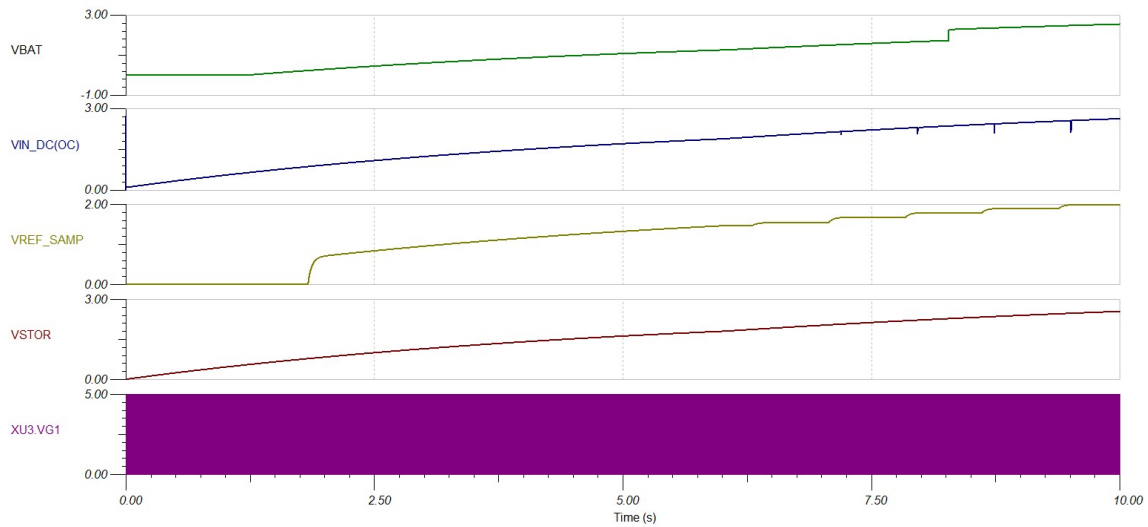


FIGURA 4.4: Curvas resultantes da simulação do BQ25504 no TINA-TI

solar, embora revele limitações na potência disponível para acelerar o processo de transição.

Em síntese, as curvas simuladas demonstram coerência com os princípios de funcionamento descritos no datasheet do BQ25504, validando a arquitetura proposta e a configuração dos componentes passivos. A resposta do sistema às condições simuladas confirma a capacidade de iniciar o carregamento em modo de baixa potência, atualizar o ponto de operação MPPT e gerir eficientemente a energia armazenada, ainda que com limitações impostas pela intensidade da fonte solar modelada.

A figura 4.4 apresenta as curvas de tensão simuladas, permitindo uma visualização clara da evolução dos sinais ao longo do tempo.

A tabela 4.2 apresenta uma comparação entre os valores obtidos na simulação do circuito de gestão de energia e os parâmetros de referência especificados no datasheet do BQ25504/BQ25570. Esta análise permite validar a coerência entre o comportamento observado no modelo simulado e as características técnicas do componente real.

Observa-se que a tensão de saída **VBAT** estabiliza em aproximadamente 3,00 V, valor que se encontra dentro da faixa operacional segura definida pelo fabricante, entre 2,0 V e 4,2 V. A tensão no nó de armazenamento **VSTOR**, por sua vez, atinge cerca de 1,00 V ao final da simulação, o que indica que o sistema permanece em modo de *cold-start*, uma vez que o algoritmo MPPT só é ativado quando **VSTOR** ultrapassa os 1,8 V.

O sinal `VREF_SAMP`, responsável por armazenar a referência do ponto de potência máxima, apresenta um valor de aproximadamente 2,81 V, o que corresponde a cerca de 78% da tensão de entrada estimada em 3,6 V. Este resultado está em conformidade com a configuração recomendada para fontes solares, que operam tipicamente entre 70% e 80% de `VIN(OC)`.

Por fim, verifica-se que o algoritmo MPPT é ativado após cerca de 2 segundos, comportamento que está alinhado com o ciclo de amostragem descrito no datasheet, que prevê atualizações a cada 16 segundos com uma janela de amostragem de 256 milissegundos.

Em conjunto, os dados apresentados na tabela 4.2 confirmam a fidelidade da simulação e a correta implementação dos princípios de funcionamento do circuito integrado, reforçando a validade do modelo proposto para aplicações de colheita de energia com fontes fotovoltaicas de baixa potência.

TABELA 4.2: Resumo comparativo entre simulação e datasheet do BQ25504

Parâmetro	Simulação	Datasheet	Observação
VBAT	3,00 V	2,0 V – 4,2 V	Dentro da faixa operacional
VSTOR	3,00 V	$\geq 1,8$ V para MPPT	Sistema em <i>cold-start</i>
VREF_SAMP	2,81 V	$\sim 2,88$ V (80% de VIN)	Valor esperado
VIN(OC)	3,6 V	600 mV – 5,1 V	Fonte compatível com <i>cold-start</i>
MPPT	Ativo após 2 s	Ciclo de 16 s / 256 ms	Coerente com o algoritmo

4.3 Testes por Fonte de Energia

4.3.1 Pannel solar

Para alimentar o circuito de colheita de energia baseado no BQ25570, foi utilizado um pannel solar policristalino RY6-427 da PTRobotics, com dimensões de 60×60 mm. Este pannel apresenta uma tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 3,6 V e uma corrente de curto-circuito (I_{sc}) de 120 mA, sendo adequado para aplicações de baixa potência em ambientes com iluminação natural.

De forma a proteger o circuito contra sobretensões, especialmente em condições de radiação solar intensa, foram integrados dois díodos Zéner de 4,7 V ligados em oposição na entrada do sistema. Esta configuração limita a tensão máxima à

entrada do PMIC, garantindo que não ultrapasse os 5,1 V, conforme especificado no *datasheet* do fabricante, preservando assim a integridade do componente.

Para otimizar a captação de luz solar, foi utilizado um suporte em madeira que permitiu inclinar o painel de forma adequada, maximizando a incidência dos raios solares sobre a superfície fotovoltaica. Os ensaios foram realizados em condições meteorológicas favoráveis, num dia de céu limpo e elevada exposição solar, assegurando um ambiente ideal para avaliar o desempenho do sistema.

A montagem experimental do sistema pode ser observada na figura 4.5, onde se destaca o painel solar policristalino instalado sobre um suporte em madeira com a inclinação ajustada para maximizar a captação de luz solar. O circuito foi desenvolvido sobre uma *breadboard*, contendo os componentes necessários para o controlo e proteção da tensão de entrada, incluindo os díodos Zéner. A monitorização dos sinais elétricos foi realizada com recurso a um osciloscópio digital Tektronix TDS 1002B, permitindo validar o comportamento do sistema em tempo real durante os ensaios.

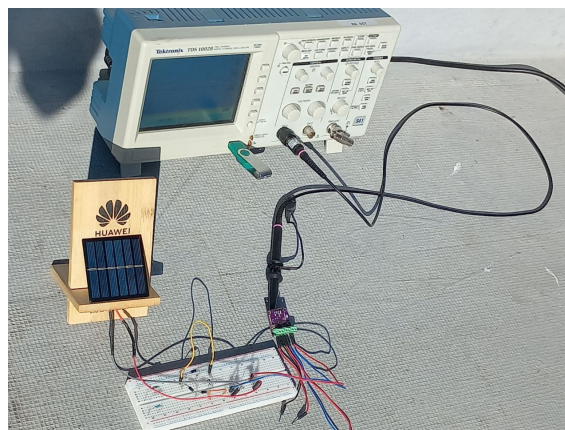


FIGURA 4.5: Montagem experimental do sistema de colheita de energia com painel solar policristalino, circuito em *breadboard* e monitorização por osciloscópio Tektronix TDS 1002B.

Carregamento do Supercondensador

A figura 4.6 apresenta a evolução da tensão de carregamento de um supercondensador de 0,22 F, alimentado pelo painel solar através do circuito de colheita baseado no PMIC BQ25570. A curva mostra um comportamento típico de carga capacitiva: um crescimento rápido da tensão nos primeiros instantes, seguido de uma aproximação assintótica ao valor máximo, próximo de 3 V.

Este perfil confirma o funcionamento eficiente do circuito de gestão energética, com a tensão a estabilizar gradualmente à medida que o supercondensador se aproxima da sua capacidade máxima de armazenamento. O tempo total de carregamento observado foi de aproximadamente 350 segundos, sob condições de elevada incidência solar.

Este resultado demonstra a capacidade do sistema em acumular energia de forma contínua e controlada, validando a integração entre o painel solar, o circuito de proteção e o BQ25570 como solução viável para alimentar cargas intermitentes ou sensores de baixo consumo.

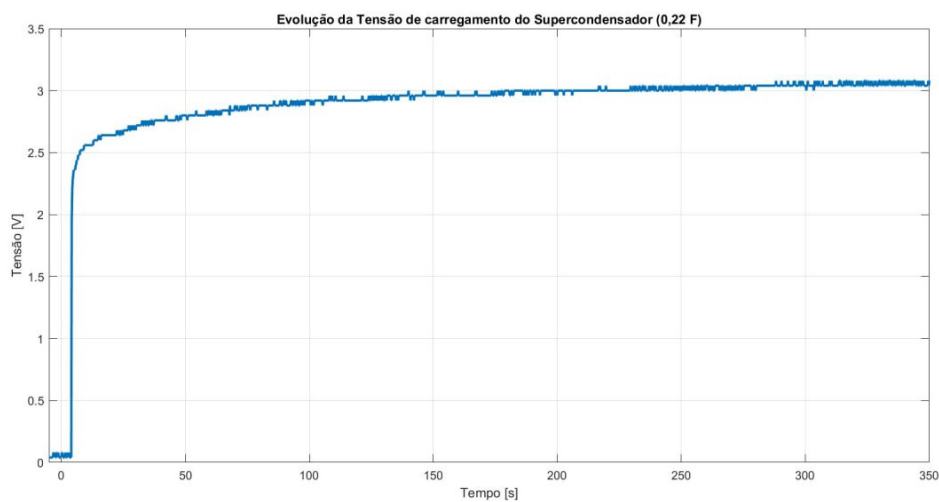


FIGURA 4.6: Evolução da tensão de carregamento do supercondensador de 0,22 F através do circuito com o PMIC BQ25570.

Avaliação da Autodescarga do Supercondensador 0,22 F/5,5 V

A figura 4.7 mostra o comportamento da tensão ao longo do tempo durante a descarga natural do supercondensador de 0,22 F, sem carga conectada. Observa-se uma queda gradual da tensão, partindo de aproximadamente 3,34 V até cerca de 3,13 V ao fim de 200 segundos.

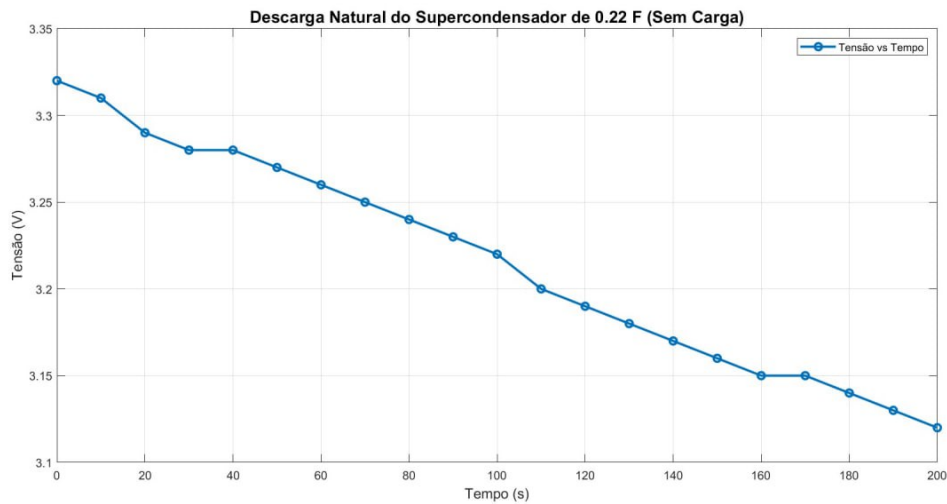


FIGURA 4.7: Descarga Natural do Supercondensador de 0,22 F sem Carga Conectada.

O comportamento observado na curva de descarga natural do supercondensador de 0,22 F é típico de dispositivos eletroquímicos, refletindo a presença de correntes de fuga internas e imperfeições dielétricas que contribuem para a perda gradual de tensão ao longo do tempo. Embora a taxa de descarga seja relativamente lenta, pode comprometer aplicações que exigem retenção de energia por períodos prolongados sem recarga.

Importa destacar que, apesar da forma da curva sugerir uma descarga controlada, os valores de queda de tensão observados — cerca de 240 mV em 200 s — indicam uma corrente de fuga superior àquela esperada no modo *Ship* do circuito integrado BQ25570. Segundo o *datasheet*, esse modo de operação reduz a corrente de fuga para a ordem de 5 nA, o que resultaria numa variação de tensão praticamente imperceptível nesse intervalo de tempo. Assim, é provável que o modo *Ship* não esteja ativo ou que o CI não esteja devidamente configurado para entrar nesse estado durante o ensaio apresentado.

Esta constatação reforça a necessidade de verificação experimental rigorosa do estado de operação do CI, especialmente em aplicações onde a conservação de energia é crítica. Ensaio complementares com o BQ25570 corretamente configurado poderão confirmar a eficácia do modo *Ship* na minimização de perdas energéticas e na extensão da autonomia de sistemas embarcados.

4.3.2 Célula Peltier (TEC)

A célula de Peltier, conforme descrita no capítulo anterior, foi utilizada como fonte de energia para alimentar o módulo BQ25570. Para este estudo, optou-se pelo refrigerador termoelétrico **TEC1-03104**, comercializado pela Mouser, em alternativa aos geradores termoelétricos convencionais TEGs, devido à sua maior disponibilidade no mercado e ao custo relativamente inferior.

Os ensaios preliminares consistiram na exposição de uma das faces da célula à radiação solar, enquanto a face oposta era arrefecida pela ventilação ambiente, no telhado das camaratas do edifício Olimpo, na Escola Naval. Observou-se, nesse contexto, uma ligeira variação da tensão nos terminais da célula, conforme ilustrado na figura 4.8.

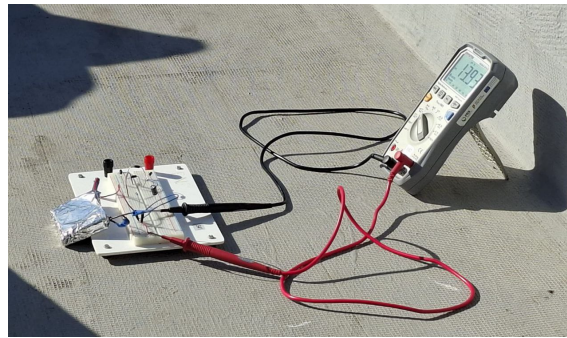


FIGURA 4.8: Testes preliminares com a célula de Peltier.

Após este ensaio piloto, verificou-se a necessidade de aumentar o gradiente térmico entre as faces da célula, bem como de melhorar a distribuição uniforme da temperatura. Para tal, foram aplicadas duas chapas simétricas de alumínio (5x7mm) em cada uma das faces, com a adição de pasta térmica entre as superfícies de contacto. Adicionalmente, procedeu-se à vedação externa com papel de alumínio, de forma a evitar eventuais infiltrações de água figura 4.9.

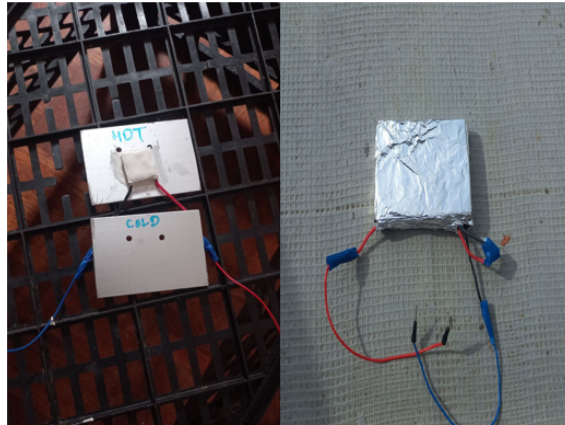


FIGURA 4.9: Configuração experimental da célula de Peltier após otimização térmica, com chapas de alumínio (5x7mm) e vedação em papel de alumínio para melhorar o desempenho e evitar infiltrações.

Para o estudo, foram testadas diversas fontes de calor, nomeadamente: fogão elétrico, secador de cabelo, ventilador, aquecedor, condensador de frigorífico e ar condicionado portátil. No que respeita ao lado frio, recorreu-se à utilização de gelo e à ventilação ambiente. Os sistemas de teste foram organizados em dois modelos principais: o sistema Fogão/Gelo e o sistema Fogão/Temperatura Ambiente, por se revelarem os mais seguros e com melhor repetibilidade entre os ensaios realizados, ilustrado pela figura 4.10.

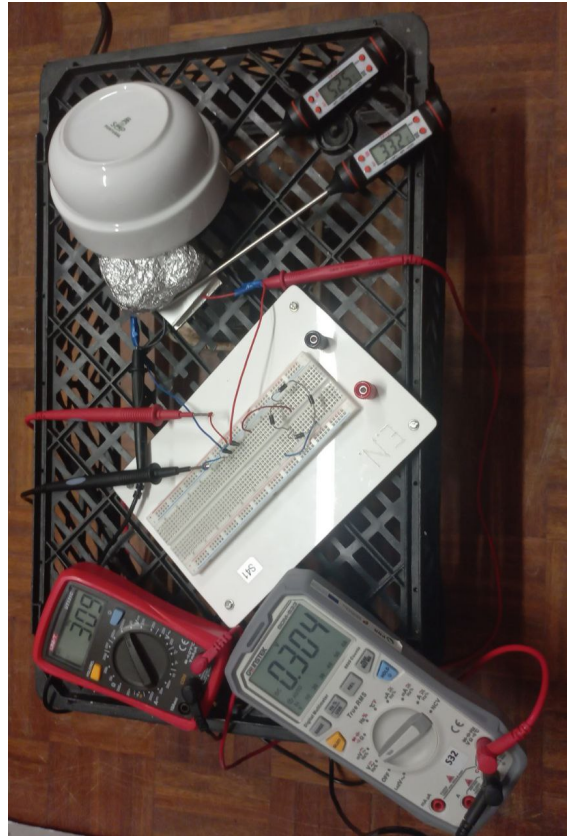


FIGURA 4.10: Aparato de ensaios para célula de Peltier.

O sistema permitiu a realização dos ensaios em condições controladas e com total segurança, tendo sido efetuada a recolha sistemática de dados ao longo de um período de 30 minutos de funcionamento contínuo. Os testes decorreram num ambiente estável, com temperatura ambiente monitorizada, de forma a garantir a repetibilidade e a fiabilidade dos resultados obtidos C.

Análise Experimental da Célula Peltier em Modo Gerador - Sistema Fogão/Gelo

Neste ensaio, foi explorado o efeito Seebeck através da utilização de uma célula de Peltier posicionada entre uma fonte quente (fogão) e uma fonte fria (gelo), com o objetivo de caracterizar a evolução das grandezas elétricas em função do gradiente térmico (ΔT) e do tempo de funcionamento conforme ilustrado pela figura 4.11.

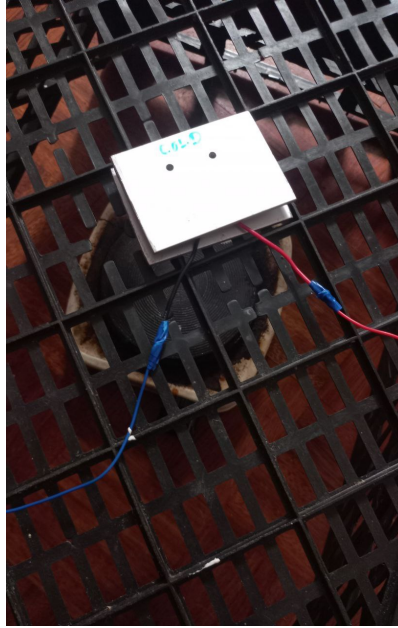


FIGURA 4.11: Montagem experimental para a caracterização do efeito Seebeck, utilizando uma célula de Peltier entre uma fonte quente (fogão) e uma fonte fria (gelo), com medição das grandezas elétricas em função do gradiente térmico (ΔT) e do tempo de funcionamento.

Durante os ensaios foram monitorizados os seguintes parâmetros:

- T_{quente} ($^{\circ}\text{C}$): temperatura na face em contacto com a fonte quente;
- T_{fria} ($^{\circ}\text{C}$): temperatura na face em contacto com o gelo;
- ΔT ($^{\circ}\text{C}$): diferença de temperatura entre as faces;
- V_{oc} (mV): tensão em circuito aberto;
- V_{carga} (mV): tensão sobre carga resistiva;
- I_{sc} (mA): corrente de curto-circuito;
- P (mW): potência elétrica entregue a carga resistiva de $100\ \Omega$;
- Δt (min): tempo do ensaio.

A figura 4.12 apresenta os gráficos obtidos a partir dos ensaios realizados com o sistema térmico Fogão/Gelo, evidenciando a evolução das grandezas elétricas em função da diferença de temperatura e do tempo de funcionamento.

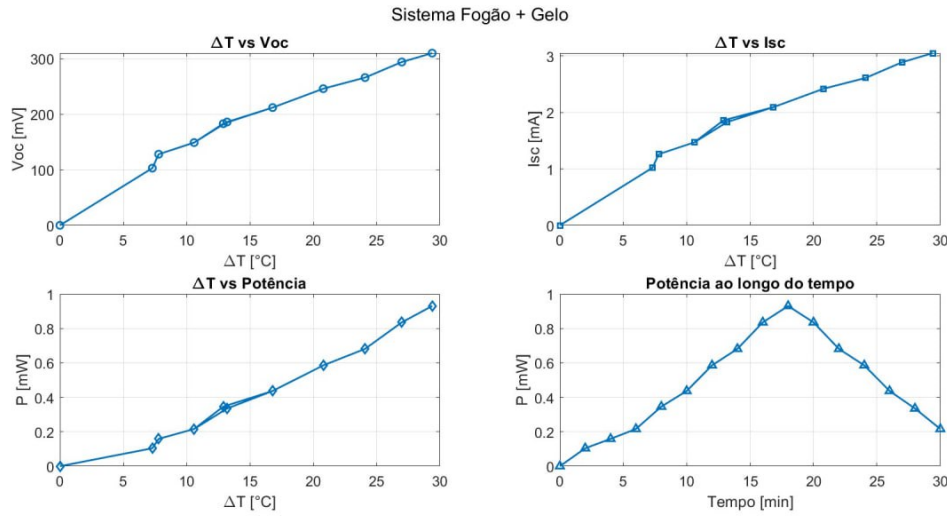


FIGURA 4.12: Gráficos de desempenho termoeletrico do sistema Fogão/Gelo: correlações entre ΔT , V_{oc} , I_{sc} , potência e tempo.

A evolução temporal revelou três fases distintas:

1. Fase inicial ($\Delta T \approx 0^\circ\text{C}$): ausência de geração elétrica;
2. Aquecimento progressivo: aumento quase linear de V_{oc} , I_{sc} e P com ΔT ;
3. Declínio térmico: após cerca de 18 minutos, redução de ΔT e consequente queda das grandezas; elétricas, devido à perda de eficácia do gelo como dissipador.

A partir destes resultados foram observados algumas características:

1- Relação V_{oc} vs ΔT ;

A tensão em circuito aberto apresentou uma relação linear com o gradiente térmico, conforme previsto pela equação:

$$V_{oc} = \alpha \cdot \Delta T \quad (4.3)$$

onde α representa o coeficiente de Seebeck do módulo;

2- Relação I_{sc} vs ΔT ;

A corrente de curto-circuito aumentou com ΔT , embora limitada a cerca de 3 mA, devido à resistência interna do módulo.

3- Relação P vs ΔT A potência elétrica atingiu um máximo de aproximadamente:

$$P_{\max} \approx 0.93 \text{ mW} \quad \text{para} \quad \Delta T \approx 29.4^\circ \text{C}$$

4- Evolução Temporal ;

Observou-se um perfil típico de subida e descida, com pico aos 18 minutos, refletindo a natureza não-estacionária do sistema e a degradação das condições térmicas ao longo do tempo.

Diante disso, os resultados obtidos validam os princípios fundamentais da conversão termoelétrica:

- Relação linear entre V_{oc} e ΔT (efeito Seebeck)
- Limitação de I_{sc} pela resistência interna
- Existência de potência máxima para $\Delta T \approx 30^\circ \text{C}$
- Influência do tempo e das condições térmicas na performance do sistema

Este ensaio, realizado em ambiente controlado, permitiu quantificar o desempenho de uma célula de Peltier em modo gerador, evidenciando o potencial da tecnologia termoelétrica para aplicações de conversão direta de calor em eletricidade, considerando-a como uma fonte de alimentação alternativa para o CI BQ25570.

Análise Experimental da Célula Peltier em Modo Gerador – Sistema Fogão/Ambiente

Neste segundo ensaio, foi avaliado o desempenho da célula Peltier utilizando como fonte quente um fogão e como fonte fria o ambiente, explorando novamente o efeito Seebeck. A figura 4.13 apresenta os gráficos obtidos, evidenciando a evolução das grandezas elétricas em função do gradiente térmico (ΔT) e do tempo de funcionamento.

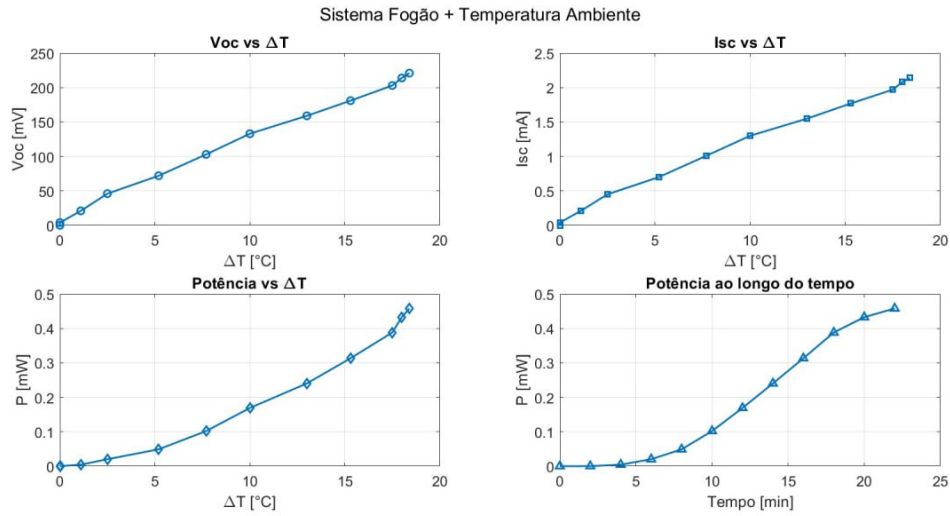


FIGURA 4.13: Gráficos de desempenho termoeétrico do sistema Fogão/Ambiente: correlações entre ΔT , V_{oc} , I_{sc} , potência e tempo.

Durante o teste, foram medidas as mesmas grandezas elétricas e térmicas do ensaio anterior, com destaque para a menor diferença de temperatura disponível:

$$\Delta T_{\text{máx}} \approx 18.4^{\circ}\text{C}$$

Principais resultados: tensão em circuito aberto (V_{oc}): Atingiu um máximo de aproximadamente 221 mV, inferior ao sistema anterior, refletindo o menor gradiente térmico.

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): cresceu com ΔT até cerca de 2.14 mA, limitada pela resistência interna do módulo.

Potência elétrica (P): atingiu um pico de 0.46 mW para $\Delta T \approx 18.4^{\circ}\text{C}$, decaindo com a redução térmica ao longo do tempo.

Evolução temporal: o perfil térmico revelou um crescimento inicial de ΔT até cerca de 18 minutos, seguido de declínio. As grandezas elétricas acompanharam esse comportamento, com pico e posterior queda.

A análise do sistema Fogão/Ambiente reafirmou a correlação direta entre o gradiente térmico (ΔT) e a geração elétrica, conforme previsto pelo efeito Seebeck. No entanto, o desempenho foi inferior ao observado no sistema Fogão/Gelo, refletindo a limitação imposta pelo menor ΔT disponível. A potência máxima gerada foi aproximadamente metade da obtida no ensaio anterior, o que evidencia de forma clara o papel determinante do diferencial térmico na eficiência dos módulos termoeétricos.

4.3.3 Filme Piezoelétrico: Determinação da Resistência Ótima

Com o intuito de maximizar a eficiência na colheita de energia piezoelétrica, foram realizados ensaios experimentais para identificar a resistência de carga que permite extrair a máxima potência do sistema. Para tal, foram testadas 23 resistências comerciais, entre 100 k Ω e 10 M Ω , aplicadas individualmente ao circuito em condições laboratoriais controladas. Cada ensaio foi conduzido de forma sequencial, com registo dos dados em ficheiros .csv e captura da forma de onda através do osciloscópio digital **Tektronix TDS-1002B**, assegurando rastreabilidade e fiabilidade dos resultados.

Esquema Eléctrico do Circuito

A configuração experimental baseia-se num circuito simples, onde o filme piezoelétrico está ligado em paralelo com uma resistência variável. A fonte de excitação VG1 simula o estímulo mecânico de um passo humano, conforme ilustrado na figura 4.14.



FIGURA 4.14: Esquema eléctrico do circuito de teste com resistência de carga em paralelo.

Plataforma de Teste e Aquisição de Dados

O filme piezoelétrico foi montado sobre uma superfície rígida e sujeito a estímulos mecânicos uniformes, garantindo a repetibilidade dos ensaios. A tensão gerada foi observada em tempo real e registada para posterior análise. A figura 4.15 apresenta o aparato experimental utilizado.

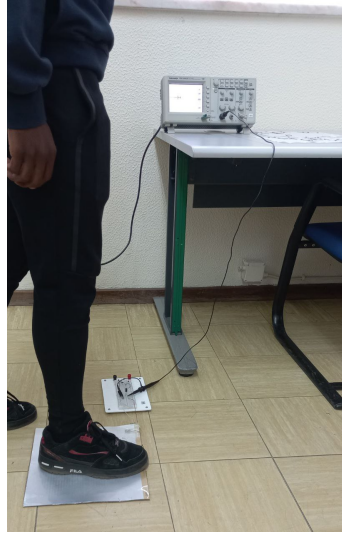


FIGURA 4.15: Plataforma de ensaio com ligação ao osciloscópio.

Forma de Onda Gerada

Durante os ensaios, foi registada uma forma de onda típica resultante do impacto de um passo. A resposta transiente apresenta picos de aproximadamente +0,15 V e -0,25 V, conforme ilustrado na figura 4.16.

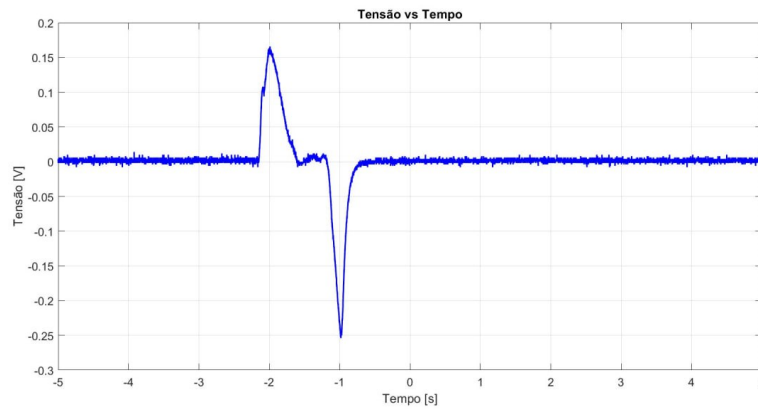


FIGURA 4.16: Variação da tensão gerada pelo filme piezoelétrico durante um passo.

Este comportamento confirma a capacidade do filme piezoelétrico em converter energia mecânica em sinal eléctrico, com características relevantes para o dimensionamento do circuito de colheita.

A potência instantânea foi calculada com base na expressão clássica:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (4.4)$$

Onde:

P representa a potência em watts;

V a tensão medida aos terminais da resistência;

R o valor da resistência de carga.

Cada resistência foi conectada ao circuito durante um intervalo de 1 segundo, permitindo a medição da potência gerada em tempo real.

Resistência Ótima

A figura 4.17 apresenta a relação entre resistência de carga e potência gerada. Observa-se um ponto de máximo, típico de sistemas piezoelétricos, com potência de 69,47 mW obtida a 2,7 M Ω . Este valor, inicialmente considerado um *outlier*, foi validado por ensaios repetidos, sugerindo ressonância mecânica ou acoplamento elétrico otimizado.

Resistências inferiores a 1 M Ω provocaram perdas por dissipação, enquanto valores superiores a 5 M Ω resultaram numa queda acentuada da potência, atribuída à limitação de corrente. Este comportamento está em conformidade com a teoria da impedância adaptada, segundo a qual a transferência máxima de potência ocorre quando a impedância da carga se aproxima da impedância interna da fonte piezoelétrica (Altafim, Lima, Bastos e Oliveira 2021).

A resistência ótima identificada permite ajustar o circuito de colheita para operar com maior eficiência, orientar o dimensionamento do CI BQ25570 e estabelecer uma referência para futuros ensaios com diferentes filmes piezoelétricos ou configurações mecânicas.

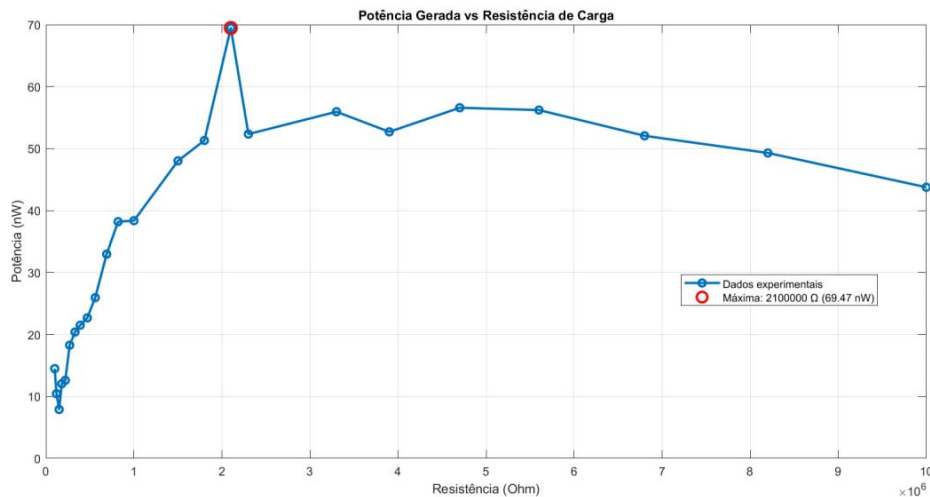


FIGURA 4.17: Determinação experimental da resistência ótima para colheita de energia

4.4 Análise dos Resultados

Os ensaios práticos e as simulações realizadas permitiram avaliar o desempenho das diferentes fontes de colheita de energia — térmica, piezoelétrica e solar — em conjunto com o circuito de gestão baseado no CI BQ25570/BQ25504.

- **Fontes térmicas e piezoelétricas:** embora tenham gerado tensão suficiente para ativar o circuito, **nenhuma destas fontes conseguiu carregar efetivamente o supercondensador**. A potência disponível foi insuficiente para ultrapassar o limiar de entrada necessário para iniciar o carregamento.
- **Fonte solar (painel RY6-427):** foi a **única fonte capaz de carregar o supercondensador**, atingindo 3 V em cerca de 350 s. A simulação no TINA-TI confirmou este comportamento, com o sinal VBAT estabilizando em torno de 3 V e o MPPT operando a cerca de 78 % de VIN(OC), conforme esperado.
- **Simulação no TINA-TI:** a modelação do painel solar como fonte de corrente, diodo e resistências internas permitiu validar o comportamento do circuito em condições próximas das reais. A curva VSTOR revelou uma subida lenta, compatível com o modo *cold-start*, enquanto o sinal VREF_SAMP confirmou a atualização periódica do MPPT. A energia armazenada no supercondensador foi estimada em 1,38 J, suficiente para alimentar circuitos de baixa potência.
- **Autodescarga do supercondensador:** durante os ensaios, observou-se uma queda de tensão no supercondensador que não corresponde ao comportamento

esperado do modo *Ship* do CI BQ25570. A taxa de descarga foi superior àquela prevista no *datasheet*, indicando que o modo *Ship* provavelmente não estava ativo ou corretamente configurado. Isso sugere que a perda de energia observada se deve às características internas do supercondensador, e não à atuação do circuito de gestão. A análise reforça a importância de verificar experimentalmente o estado do CI em aplicações que exigem alta eficiência energética.

4.5 Discussão

A análise conjunta dos dados experimentais e das simulações permite concluir que o sistema proposto é funcional e eficiente, desde que alimentado por uma fonte solar com intensidade adequada. As fontes térmica e piezoelétrica, embora viáveis para geração pontual de energia, **não foram capazes de iniciar o carregamento do supercondensador**, o que limita a sua aplicação como fontes primárias.

A simulação no TINA-TI revelou-se essencial para compreender o comportamento dinâmico do circuito de gestão, especialmente em modo *cold-start*. A resposta do sistema às condições simuladas confirmou a ativação progressiva do MPPT, a regulação da tensão de saída e a acumulação de energia no supercondensador. A fidelidade do modelo equivalente do painel solar permitiu validar os parâmetros críticos definidos no *datasheet* do BQ25504/BQ25570.

A integração das três fontes mostra-se promissora para aplicações híbridas, mas exige estratégias complementares — como armazenamento intermitente, amplificação ou fontes secundárias — para garantir autonomia em ambientes com baixa radiação solar. A escolha do supercondensador revelou-se acertada para ciclos curtos, embora a sua autodescarga deva ser considerada em projetos de maior duração.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo analisar a viabilidade da colheita de energia através do módulo BQ25570, alimentado por fontes renováveis como painéis solares, transdutores piezoelétricos e células de Peltier, com vista à sua aplicação em equipamentos militares. Através de uma abordagem experimental e simulações no software TINA-TI, foi possível validar o funcionamento do sistema em condições reais e controladas.

Os resultados demonstraram que, entre as fontes testadas, apenas o painel solar foi capaz de carregar efetivamente o supercondensador, atingindo os limiares necessários para ativação do circuito. As fontes térmica e piezoelétrica, embora tenham gerado tensão, não apresentaram potência suficiente para iniciar o carregamento. A integração do algoritmo MPPT e a análise da autodescarga do supercondensador reforçaram a eficiência e a robustez do sistema proposto.

Este estudo confirma a viabilidade da aplicação de sistemas de colheita de energia em equipamentos militares, contribuindo para a autonomia energética, redução da dependência logística e aumento da resiliência operacional.

5.2 Limitações Identificadas

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram identificadas limitações que influenciaram diretamente os resultados obtidos. Em primeiro lugar, a potência gerada pelas fontes térmica e piezoelétrica revelou-se insuficiente para carregar o supercondensador, comprometendo a viabilidade de um sistema totalmente autônomo baseado nessas tecnologias. Além disso, as simulações realizadas na plataforma TINA-TI não conseguiram reproduzir com precisão as condições reais de operação,

sobretudo em ambientes sujeitos a variações dinâmicas, o que limita a fiabilidade dos modelos teóricos utilizados. Acresce que a dependência da radiação solar impõe restrições à autonomia do sistema, particularmente em ambientes interiores ou com baixa luminosidade, tornando necessária a consideração de fontes complementares. Por fim, observou-se uma autodescarga do supercondensador que, pela sua taxa de variação, sugere que o modo *Ship* do CI BQ25570 não estava ativo ou corretamente configurado, representando uma perda energética relevante em aplicações de longa duração e reforçando a importância de estratégias de gestão energética mais eficientes.

5.3 Contribuições do Trabalho

Este trabalho representa um avanço relevante na área de colheita de energia, destacando-se pela validação prática de um sistema de gestão de energia baseada em PMICs, pela demonstração da eficácia do algoritmo MPPT aplicado a fontes solares de pequena escala, pela integração entre simulação e experimentação como abordagem complementar de análise, e pela caracterização de fontes alternativas em contexto real, com documentação dos seus limites e potencial.

5.4 Perspectivas Futuras

Com base nos resultados obtidos, abrem-se diversas possibilidades para continuidade e aprofundamento do estudo, incluindo a integração de conversores dedicados para otimização da tensão proveniente de fontes piezoelétricas e termoelétricas, a exploração de supercondensadores com menor taxa de autodescarga ou baterias com maior densidade energética, o desenvolvimento de um sistema híbrido com comutação automática entre fontes conforme a disponibilidade ambiental, e a aplicação prática em sensores remotos, dispositivos IoT ou vestuário inteligente, com foco na autonomia energética e na miniaturização dos sistemas.

Bibliografia

- Altafim, Ruy A. P., Felipe A. C. B. Lima, João P. A. Bastos e Marcelo A. A. Oliveira (2021). «Estimação da força tangencial para o controle de impedância de cadeira de rodas servo-assistida». Em: *Proceedings of the IEEE INDUSCON 2021*. Discussão sobre controle de impedância e transferência de potência em sistemas eletromecânicos. IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9685801>.
- Analog Devices (2025). *LTC3108 Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager*. Product data sheet. Acesso em 2025-08-09. URL: <https://www.analog.com/en/products/ltc3108.html>.
- Bai, Y. et al (2018). «Energy harvesting for wearable devices in military applications». Em: *IEE Transactions on Industrial Electronics* 3, pp. 2793–2802.
- Becquerel, Alexandre–Edmond (1839). «Descobrimento do efeito fotovoltaico». Em: *Comptes Rendus*. Efeito fotovoltaico experimental descrito por Becquerel.
- Beeby, S. P., M. J. Tudor e N. M. White (2006). «Energy harvesting vibration sources for microsystems applications». Em: *Measurement Science and Technology* 17.12, R175–R195. DOI: 10.1088/0957-0233/17/12/R01.
- Bell, Lon E. (2008). «Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems». Em: *Science* 321.5895, pp. 1457–1461.
- Burke, Andrew (2000). «Ultracapacitors: why, how, and where is the technology». Em: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 49.1, pp. 288–294.
- Camacho, José Roberto, Daiane Rezende Carrijo, Rodrigo Sousa Ferreira e Sebastião Camargo Guimarães Jr. (set. de 2010). «Uma Proposta de Técnica de Rastreamento de Máxima Potência de um Pannel Fotovoltaico». Em: *Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia*. Acesso em: agosto de 2025. URL: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Camacho-23/publication/258911509_Uma_Proposta_de_Tecnica_de_Rastreamento_de_Maxima_Potencia_de_um_Panel_Fotovoltaico/links/57f52f7d08ae886b897f70a9/Uma-Proposta-de-Tecnica-de-Rastreamento-de-Maxima-Potencia-de-um-Panel-Fotovoltaico.pdf.

- Chen, Zhiwei, Yufei Zhang, Yuxuan Liu, Yanjie Wang, Yucheng Zhang e Yadong Zhang (2022). «Dynamic reconfiguration strategy for thermoelectric generator systems under heterogeneous temperature distributions». Em: *Protection and Control of Modern Power Systems* 7.1, pp. 1–11. DOI: 10.1186/s41601-022-00259-6. URL: <https://pcmp.springeropen.com/articles/10.1186/s41601-022-00259-6>.
- Dagdeviren, Canan et al. (2014). «Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm». Em: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.5, pp. 1927–1932. DOI: 10.1073/pnas.1317233111.
- Elahi, Hassan, Khushboo Munir, Marco Eugeni, Paolo Gaudenzi e Sofiane Atek (2020). «Energy Harvesting towards Self-Powered IoT Devices». Em: *Energies* 13.21, p. 5528. DOI: 10.3390/en13215528. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5528>.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2023). *Photovoltaics Report*. Freiburg: Fraunhofer ISE. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>.
- Goldsmid, H.J (2016). *Introduction to thermoelectricity*. Springer, 2nd ed.
- Gomes, Vicente Kitchcanar (2024). *Sistema portátil de carregamento de equipamentos eletrônicos*. Alfeite: Escola Naval.
- Green, Martin A., Ewan D. Dunlop, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, Nikos Kopidakis e X. Hao (2022). «Solar cell efficiency tables (version 60)». Em: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 30.7, pp. 687–701. DOI: 10.1002/pip.3506.
- Heywang, Walter, Karl Lubitz e Wolfram Wersing (2008). *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*. Springer. ISBN: 9783540686835.
- Instruments, Texas (2023). *BQ25570 - Ultra Low Power Harvester Power Management IC*. <https://www.ti.com/product/BQ25570>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- Jaffe, Bernard, William R. Cook e Hans Jaffe (1971). *Piezoelectric Ceramics*. Academic Press. ISBN: 9780123795502.
- Langir Electric (2025). *Interruptor piezoelétrico*. Consultado em 12 de agosto de 2025. URL: <https://www.langir.com/pt/news/piezo-switch>.
- Leonov, Vladimir, Tom Torfs e Ruud J. M. Vullers (2009). «Thermoelectric Converters of Human Body Heat for Wearable Sensors». Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 156.1, pp. 95–102. DOI: 10.1016/j.sna.2009.03.008.

- Ltd., Emfit (2022). *L-Series Sensor Specifications*. <https://www.sensors.emfit.com/copy-of-publications-1>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- Lubna, Lubna, Hira Hameed, Shuja Ansari, Adnan Zahid, Abubakar Sharif, Hassan Tahir Abbas, Fehaid Alqahtani, Naveed Mufti, Sadiq Ullah, Muhammad Ali Imran e Qammer Hussain Abbasi (2022). «Radio frequency sensing and its innovative applications in diverse sectors: A comprehensive study». Em: *Frontiers in Communications and Networks* 3. DOI: 10.3389/frcmn.2022.1010228. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/communications-and-networks/articles/10.3389/frcmn.2022.1010228>.
- Mateu, Loreto e Francesc Moll (2005). «Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics». Em: *VLSI Circuits and Systems II*. Vol. 5837. SPIE, pp. 359–373. DOI: 10.1117/12.613046. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5837/0000/Review-of-energy-harvesting-techniques-and-applications-for-microelectronics/10.1117/12.613046.full>.
- Othman, M. et al (2017). «Military wearable technology: challenges and applications». Em: *Defence Technology* 1, pp. 1–7.
- Pandey, Anil Kumar (fev. de 2020). *Energy Harvesting and Wireless Power Transfer Antenna for IoT Applications*. <https://anilkrpandey.wordpress.com/2020/02/09/energy-harvesting-and-wireless-power-transfer-antenna-for-iot-applications>. Acesso em: 31 ago. 2025. URL: <https://anilkrpandey.wordpress.com/2020/02/09/energy-harvesting-and-wireless-power-transfer-antenna-for-iot-applications>.
- Paradiso, Joseph A. e Thad Starner (2005). «Energy scavenging for mobile and wireless electronics». Em: *IEEE Pervasive Computing* 4.1, pp. 18–27. DOI: 10.1109/MPRV.2005.9.
- Pindado, Santiago, Carlos Cubas, Iván de Manuel e Eugenio Sorribes-Palmer (2014). «Simple mathematical model for the I–V curve of solar cells and modules». Em: *Solar Energy* 100. Acesso em: agosto de 2025, pp. 100–107. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.027. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.027>.
- Pinuela, Marta, Paul D. Mitcheson e Stepan Lucyszyn (2013). «Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments». Em: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 61.7, pp. 2715–2726. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2262687.
- Priya, S e D.J Inman (2009). *Energy Harvesting Technologies*. Springer.

- Resende, João (nov. de 2019). *Células Solares de Perovskitas: o futuro da energia solar ou um sonho científico*. Acesso em: agosto de 2025. URL: <https://shifter.pt/2019/11/celulas-solares-de-perovskitas-o-futuro-da-energia-solar-ou-um-sonho-cientifico/>.
- RF Wireless World (2023). *RF Energy Harvesting: 5 Advantages and Disadvantages*. Acesso em: 9 ago. 2025. URL: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/rf-energy-harvesting-advantages-disadvantages>.
- Riffat, S. B. e X. Ma (2003). «Thermoelectrics: a review of present and potential applications». Em: *Applied Thermal Engineering* 23.8, pp. 913–935.
- Rowe, D. M. (2005). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. CRC Press.
- (2006). «Thermoelectrics: an environmentally-friendly source of electrical power». Em: *Renewable Energy* 31.7, pp. 1051–1056.
- Snyder, G Jeffrey e Eric S Toberer (2008). «Complex thermoelectric materials». Em: *Nature materials* 7.2, pp. 105–114.
- Soini, Esko, Mika Paaanen e Jukka Lekkala (2006). «Ferroelectret sensors and actuators: principles and applications». Em: *Materials Research Society Symposium Proceedings* 889, W02–01. DOI: 10.1557/PROC-0889-W02-01.
- Swanner, J. et al. (2017). «Integrating multiple energy harvesting system for department of defence applications». Em: *EESAT Conference Proceedings*.
- Tarascon, Jean-Marie e Michel Armand (2001). «Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries». Em: *Nature* 414.6861, pp. 359–367. DOI: 10.1038/35104644.
- Teixeira, Pedro Emanuel Amorim (2022a). «Sistema de gestão de potência para energia recolhida de fontes de RF». Acesso em: 9 ago. 2025. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Academia Militar. URL: <https://comum.rcaap.pt/bitstreams/06f68fff-5a89-4694-a88c-9b2894105a00/download>.
- (2022b). *Sistema de gestão de potência para energia recolhida de fontes de RF*. Lisboa: Academia Militar.
- Texas Instruments (2019). *BQ25570: Nano Power Boost Charger and Buck Converter for Energy Harvester Powered Applications*. SLUSBH2G – Rev. G. Texas Instruments Incorporated. URL: <https://www.ti.com/product/BQ25570>.
- Tran, Le-Giang, Hyouk-Kyu Cha e Woo-Tae Park (2017). «RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications». Em: *Micro and Nano Systems Letters* 5.14. DOI: 10.1186/s40486-017-0051-0. URL: <https://mnsl-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40486-017-0051-0>.

- Tripathy, B.K. e J. Anuradha (2017). *Internet of Things (IoT): Technologies, Applications, Challenges and Solutions*. Boca Raton: CRC Press. ISBN: 9781315269849. DOI: 10.1201/9781315269849. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9781315269849/internet-things-iot-bk-tripathy-anuradha>.
- Uchino, Kenji (2017). *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. Woodhead Publishing. ISBN: 9780081012543.
- University, Battery (2025). *BU-501: Basics about Discharging*. Acesso em: 23 ago. 2025. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-501-basics-about-discharging> (acedido em 23/08/2025).
- Vargas, Bruno e Pedro H. C. Camargo (2017). «Nanocristais de Perovskitas Coloidais: Histórico, Propriedades e Aplicações». Em: *Química Nova* 40.10. Acesso em: agosto de 2025, pp. 1192–1200. DOI: 10.21577/0100-4042.20170597. URL: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170597>.
- Vitorino, João Paulo Amaro (2022). «Gerador elétrico portátil». Acesso em: 11 ago. 2025. Tese de mestrado. Escola Naval. URL: <https://www.rcaap.pt/detail.jsp?id=oai:comum.rcaap.pt:10400.26/42090>.

Apêndice A - Folha de cálculo disponibilizada pelo fabricante para dimensionamento do circuito

[illegible]

FIGURA A.1: Limiares de tensão de carregamento seguro

For the bq25570 only, comparator threshold for VOUT of buck converter.					Maximum power point threshold, e.g. ~0.7-0.8 of solar panel's open circuit voltage.				
1.3V ≤ VOUT ≤ VBAT_OV					MPPT				
RSUM ¹	13	MΩ			RSUM ¹	20	MΩ		
VOUT	1,3	V			VIN_DC(OC)	1	V	Open Circuit Volts	
					VREF_SAMP	0,9	V	MPP voltage	
								closest 1% resistor ¹	
						Exact	<	>	
					ROUT1	8,000	7,870	8,060	MΩ
ROUT1	2,100	2,050	2,100	MΩ	+10MEG ²	#####	10,000	10,000	MΩ
+10MEG ²	#####	10,000	10,000	MΩ	ROC2	2,000	2,000	2,050	MΩ
ROUT2	0,900	0,887	0,909	MΩ	+10MEG ²	0,000	0,000	0,000	MΩ
VOUT	→	1,299	1,301	V	VREF SAMP	→	0,899	0,898	V
ROUT1	2,1	MΩ			ROC1	8	MΩ		
+10MEG ²	10,00	MΩ			+10MEG ²	#####	MΩ		
ROUT2	0,9	MΩ			ROC2	2	MΩ		
	↓				+10MEG ²	0,000	MΩ		
VOUT(typ)	1,300	0,00	% diff			↓			
					VREF_SAMP	0,900	V	0,00	% diff

FIGURA A.2: MPPT definido pelo fabricante

Apêndice B - Tabela de valores de tensão e corrente da simulação no TINA-Ti

I_L1[VIN_DC(OC),3]	960,21nA
I_R1[4,VIN_DC(OC)]	-179,82nA
I_R10[6,0]	1,17nA
I_R2[8,4]	-179,82nA
I_R3[0,8]	-179,82nA
I_R4[7,1]	-1,19nA
I_R5[0,7]	-1,19nA
I_R6[9,1]	-1,17nA
I_R7[0,9]	-1,17nA
I_R8[1,11]	1,17nA
I_R9[11,6]	1,17nA
I_Rs[10,VIN_DC(OC)]	1,14uA
I_Rsh[10,0]	120mA
V_C1[0,VIN_DC(OC)]	-3,6V
V_C2[0,VIN_DC(OC)]	-3,6V
V_C3[0,VREF_SAMP]	-2,81V
V_CBAT[0,VBAT]	-3,55V
V_CBYP[VSTOR,0]	3,55V
V_CSTOR[VSTOR,0]	3,55V
V_D1[0,10]	-3,6V
V_lph[0,10]	-3,6V
V_L1[VIN_DC(OC),3]	48,01mV
V_R1[4,VIN_DC(OC)]	-794,8mV
V_R10[6,0]	5,16mV
V_R2[8,4]	-1,01V
V_R3[0,8]	-1,8V
V_R4[7,1]	-4,76mV
V_R5[0,7]	-6,99mV
V_R6[9,1]	-5,19mV
V_R7[0,9]	-6,57mV
V_R8[1,11]	1,67mV
V_R9[11,6]	4,93mV
V_Rs[10,VIN_DC(OC)]	2,28uV
V_Rsh[10,0]	3,6V
VBAT	3,55V
VIN_DC(OC)	3,6V
VREF_SAMP	2,81V
VSTOR	3,55V

Show
☐ Nodal Voltages
☒ Other Voltages
☒ Currents
☒ Outputs

Cancel
Help

FIGURA B.1: Tabela de valores da corrente e tensão

Apêndice C - Resultados Experimentais da célula de Peltier

Sistema Ambiente + Fogão							
Thot (°C)	Tcold (°C)	ΔT (°C)	Voc (mV)	Vcarga (mV)	Isc(mA)	P (mW)	ΔT [min]
23,5	23,5	0	0	0	0	0	0
23,7	23,7	0	4	4	0,04	0,00016	2
25,3	24,2	1,1	21	21	0,21	0,00441	4
27,9	25,4	2,5	46	45	0,45	0,02025	6
31,8	26,6	5,2	72	70	0,7	0,049	8
36,4	28,7	7,7	103	101	1,01	0,10201	10
41,8	31,4	10,4	133	130	1,3	0,169	12
47	34	13	159	155	1,55	0,24025	14
53	37,7	15,3	181	177	1,77	0,31329	16
59,9	42,4	17,5	203	197	1,97	0,38809	18
62,4	44,4	18	214	208	2,08	0,43264	20
66,8	48,4	18,4	221	214	2,14	0,45796	22
68,6	50,5	18,1	215	208	2,08	0,43264	24
68,6	52,5	16,1	178	173	1,73	0,29929	26
66,8	52,4	14,4	174	169	1,69	0,28561	28
67,6	52,8	14,8	173	168	1,68	0,28224	30

FIGURA C.1: Sistema Ambiente/Fogão

Sistema Gelo+Fogão							
Tquente (°C)	Tfria (°C)	ΔT (°C)	Voc (mV)	Vcarga (mV)	Isc(mA)	P (mW)	Δt (min)
28	28	0	0	0	0	0	0
21,6	14,3	7,3	103	102	1,02	0,10404	2
22,6	14,8	7,8	128	126	1,26	0,15876	4
25,3	14,7	10,6	149	147	1,47	0,21609	6
31,6	18,7	12,9	183	186	1,86	0,34596	8
37,8	21	16,8	212	209	2,09	0,43681	10
45,4	24,6	20,8	246	242	2,42	0,58564	12
53	28,9	24,1	266	261	2,61	0,68121	14
58,7	31,7	27	294	289	2,89	0,83521	16
62,5	33,1	29,4	310	305	3,05	0,93025	18
58,7	31,7	27	294	289	2,89	0,83521	20
53	28,9	24,1	266	261	2,61	0,68121	22
45,4	24,6	20,8	246	242	2,42	0,58564	24
37,8	21	16,8	212	209	2,09	0,43681	26
31,6	18,4	13,2	186	183	1,83	0,33489	28
25,3	14,7	10,6	149	147	1,47	0,21609	30

FIGURA C.2: Sistema Gelo/Fogão



The desired voltage levels are VBAT_OV = 4.2 V, VBAT_OK = 2.39 V, VBAT_OK_HYST = 2.80 V and MPP (V_{OC}) = 80% which is typical for solar panels. A 1.8-V, up to 100-mA power rail is also needed. There are no large load transients expected on either rail.

The recommended $L1 = 22 \mu H$ with $ISAT \geq I\text{-CHG}(CBC_LIM)_{MAX}$, $L2 = 10 \mu H$ with $ISAT \geq I\text{-BUCK}(CBC_LIM)_{MAX}$, $CBYP = 0.01 \mu F$ and low leakage $CREF = 10 nF$ are selected. In order to ensure the fastest recovery of the harvester output voltage to the MPPT level following power extraction, the minimum recommended $CIN = 4.7 \mu F$ is selected. Because no large system load transients are expected and to ensure fast charge time during cold start, the minimum recommended $CSTOR = 4.7 \mu F$.

- Keeping in mind $VBAT_UV < VBAT_OV \leq 5.5\text{ V}$, to size the $VBAT_OV$ resistors, first choose $RSUM_{OV} = R_{OV1} + R_{OV2} = 13\text{ M}\Omega$ then solve [Equation 2](#) for

- $R_{OV2} = R_{SUM_{OV}} - R_{OV1} = 13\text{ M}\Omega - 5.62\text{ M}\Omega = 7.38\text{ M}\Omega \rightarrow 7.32\text{ M}\Omega$ resulting in $V_{BAT_OV} = 4.18\text{V}$ due to rounding to the nearest 1% resistor.

[Submit Documentation Feedback](#)

25

Anexo II - Configuração dos pinos do módulo BQ25570

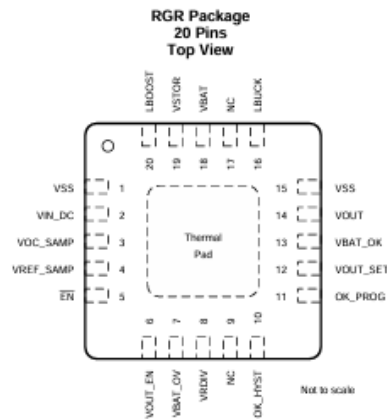


bq25570

SLUSBH2G – MARCH 2013 – REVISED MARCH 2019

www.ti.com

5 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

PIN		I/O	DESCRIPTION
NAME	NO.		
EN	5	I	Active low digital programming input for enabling/disabling the IC. Connect to GND to enable the IC.
LBOOST	20	I/O	Inductor connection for the boost charger switching node. Connect a 22 μ H inductor between this pin and pin 2 (VIN_DC).
LBUCK	16	I/O	Inductor connection for the buck converter switching node. Connect at least a 4.7 μ H inductor between this pin and pin 14 (VOUT).
NC	9	I	Connect to ground using the IC's PowerPAD™.
NC	17	I	Connect to ground using the IC's PowerPAD.
OK_HYST	10	I	Connect to the mid-point of external resistor divider between VRDIV and GND for setting the VBAT_OK hysteresis threshold. If not used, connect this pin to GND.
OK_PROG	11	I	Connect to the mid-point of external resistor divider between VRDIV and GND for setting the VBAT_OK threshold. If not used, connect this pin to GND.
VBAT	18	I/O	Connect a rechargeable storage element with at least 100 μ F of equivalent capacitance between this pin and either VSS pin.
VBAT_OK	13	O	Digital output for battery good indicator. Internally referenced to the VSTOR voltage. Leave floating if not used.
VBAT_OV	7	I	Connect to the mid-point of external resistor divider between VRDIV and GND for setting the VBAT overvoltage threshold.
VIN_DC	2	I	DC voltage input from energy harvesting source. Connect at least a 4.7 μ F capacitor as close as possible between this pin and pin 1.
VOC_SAMP	3	I	Sampling pin for MPPT network. Connect to VSTOR to sample at 80% of input source open circuit voltage. Connect to GND for 50% or connect to the mid-point of external resistor divider between VIN_DC and GND.
VOUT	14	O	Buck converter output. Connect at least 22 μ F output capacitor between this pin and pin 15 (VSS).
VOUT_EN	6	I	Active high digital programming input for enabling/disabling the buck converter. Connect to VSTOR to enable the buck converter.
VOUT_SET	12	I	Connect to the mid-point of external resistor divider between VRDIV and GND for setting the VOUT regulation set point.
VREF_SAMP	4	I	Connect a 0.01- μ F low-leakage capacitor from this pin to GND to store the voltage to which VIN_DC will be regulated. This voltage is provided by the MPPT sample circuit.
VRDIV	8	O	Connect high side of resistor divider networks to this biasing voltage.
VSS	1	I	Power ground for the boost charger.
VSS	15	—	Power ground for the buck converter and analog/signal ground for the resistor dividers and VREF_SAMP capacitor.
VSTOR	19	O	Connection for the output of the boost charger. Connect at least a 4.7 μ F capacitor in parallel with a 0.1 μ F capacitor as close as possible to between this pin and pin 1 (VSS).

4 [Submit Documentation Feedback](#)

Copyright © 2013–2019, Texas Instruments Incorporated

Product Folder Links: [bq25570](#)

FIGURA II.1: Pinos do BQ25570

Anexo III - Características, aplicações e descrição do módulo BQ25570

bq25570 nano power boost charger and buck converter for energy harvester powered applications

1 Features

- Ultra Low Power DC-DC Boost Charger
 - Cold-Start Voltage: $V_{IN} \geq 600\text{ mV}$
 - Continuous Energy Harvesting From V_{IN} as low as 100 mV
 - Input Voltage Regulation Prevents Collapsing High Impedance Input Sources
 - Full Operating Quiescent Current of 488 nA (typical)
 - Ship Mode with $< 5\text{ nA}$ From Battery
- Energy Storage
 - Energy can be Stored to Re-chargeable Li-ion Batteries, Thin-film Batteries, Super-capacitors, or Conventional Capacitors
- Battery Charging and Protection
 - Internally Set Undervoltage Level
 - User Programmable Overvoltage Levels
- Battery Good Output Flag
 - Programmable Threshold and Hysteresis
 - Warn Attached Microcontrollers of Pending Loss of Power
 - Can be Used to Enable or Disable System Loads
- Programmable Step Down Regulated Output (Buck)
 - High Efficiency up to 93%
 - Supports Peak Output Current up to 110 mA (typical)
- Programmable Maximum Power Point Tracking (MPPT)
 - Provides Optimal Energy Extraction From a Variety of Energy Harvesters including Solar Panels, Thermal and Piezo Electric Generators

2 Applications

- Energy Harvesting
- Solar Chargers
- Thermal Electric Generator (TEG) Harvesting
- Wireless Sensor Networks (WSN)
- Low Power Wireless Monitoring
- Environmental Monitoring
- Bridge and Structural Health Monitoring (SHM)
- Smart Building Controls
- Portable and Wearable Health Devices
- Entertainment System Remote Controls

3 Description

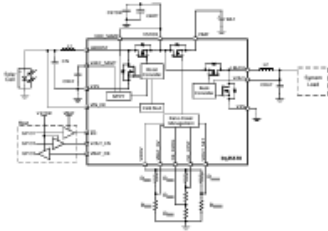
The bq25570 device is specifically designed to efficiently extract microwatts (μW) to milliwatts (mW) of power generated from a variety of high output impedance DC sources like photovoltaic (solar) or thermal electric generators (TEG) without collapsing those sources. The battery management features ensure that a rechargeable battery is not overcharged by this extracted power, with voltage boosted, or depleted beyond safe limits by a system load. In addition to the highly efficient boosting charger, the bq25570 integrates a highly efficient, nano- power buck converter for providing a second power rail to systems such as wireless sensor networks (WSN) which have stringent power and operational demands. All the capabilities of bq25570 are packed into a small foot-print 20-lead 3.5-mm x 3.5-mm QFN package (RGR).

Device Information⁽¹⁾

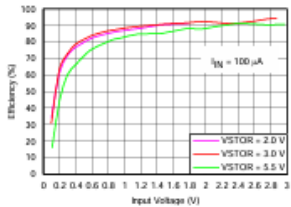
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
bq25570	VQFN (20)	3.50 mm x 3.50 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

Typical Application Schematic



Charger Efficiency vs Input Voltage



 An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

FIGURA III.1: Circuito Integrado BQ25570