

Gestão de múltiplas fontes de recolha de energia

David J. Machado Gonçalves^{1,2} P. Mendonça dos Santos^{1,2} João Paulo N. Torres^{1,2}
¹Academia Militar-CINAMIL – Lisboa, Portugal ²Instituto De Telecomunicações – Lisboa, Portugal
 goncalves.djm@exercito.pt pms@lx.it.pt joaoptorres@hotmail.com

Resumo—Este trabalho apresenta o estudo de um sistema eletrónico para duas entradas de fontes de *Energy Harvesting* de modo a obter à saída um valor de tensão superior ao somatório das tensões de entrada. O sistema consiste num conversor *Boost* do tipo indutivo combinado com um *Charge Pump*. Este sistema engloba também um oscilador LC de Collpitts para gerar o sinal de controlo dos transístores. O sistema foi dimensionado para ser alimentado por um termogerador e uma célula fotovoltaica flexível. Desta forma, é possível obter valores de tensão de saída superiores a 2.6 V com valores de entrada da ordem dos 500 mV. O protótipo foi concretizado em PCB com componentes de baixo perfil em tecnologia SMT, ocupando uma área de 12.17 cm².

Palavras Chave: Recolha de Energia; Ultra-baixa tensão; Internet das Coisas

I. INTRODUÇÃO

Os dispositivos associados à internet das coisas (*Internet of Things*, IoT) têm consumos estáticos da ordem dos μW , e podem ser alimentados de fontes limitadas como baterias, o que provoca o problema da necessidade da sua troca. Outra possibilidade é alimentar estes dispositivos através de fontes de energia recolhidas da natureza ou do meio circundante. Vários trabalhos apresentam soluções para recolher energia de várias fontes simultaneamente.

Em [1] é apresentado um sistema de recolha de energia de diferentes fontes, que a converte através de um conversor DC-DC *Buck-Boost*. Este sistema recolhe energia através de fontes de energia solar, vibração e RF. Este sistema permite a utilização de uma fonte ou uma combinação das fontes mas necessita de alimentação auxiliar.

Em [2] é apresentado o circuito de um combinador de energia de múltiplas fontes, implementado com controlo de carga (*Charge Control*). Este circuito utiliza uma técnica de deteção de tensão com um algoritmo de controlo, que combina as entradas das fontes de energia através de interruptores. A combinação de energia, porém, não é realizada em simultâneo mas alternando a fonte ligada à saída.

Em [3] é apresentado um sistema mais simples, sendo dividido em 3 principais partes: as fontes de energia, o combinador de múltiplas fontes e o auto-arranque do sistema. O circuito apresentado para combinar diferentes fontes de energia é baseado num *charge pump* de condensadores comutados com a utilização de *MOSFETs*. O problema que reside nesta implementação é que com o aumentar do número de fontes, a máxima potência de saída diminui.

Em [4] é abordado um circuito totalmente integrado de um combinador que utiliza rastreio de máxima potência, (*Maximum Power Point Tracking* (MPPT)), de quatro fontes de

recolha de energia. Este circuito combina as duas fontes de energia com maior potência para ligar à carga. É depois combinada a energia através de um *charge pump* de condensadores comutados.

Em [5] é proposto um conversor *boost* para duas ou múltiplas entradas. Este circuito consiste em duas abordagens juntas na saída: um conversor *BOOST* e um *charge pump*. Este circuito consegue somar a tensão das duas fontes e ainda obter um fator multiplicativo ($V_O/(V_{i1} + V_{i2})$) de 2. O funcionamento das duas fontes é simultâneo, permite ligar diferentes fontes com diferentes características de tensão e corrente com uma carga comum. Este conversor é facilmente controlável, é possível selecionar as fontes mudando o ciclo de funcionamento. É uma solução simples, contudo não testada em sistemas de tensão muito baixa, na ordem das centenas de mV.

II. CIRCUITO PROPOSTO

O circuito proposto em [5] mas adotado para ultra baixa potência e tensão foi análise de estudo neste trabalho, numa tentativa de concretização de funcionamento autónomo, com oscilador interno e alimentado por duas fontes de recolha de energia, fig. 1.

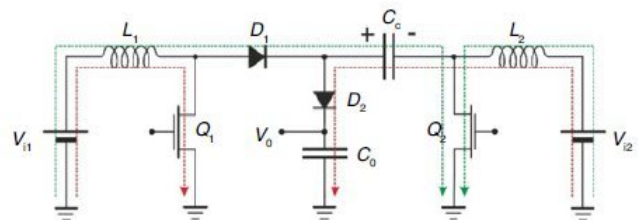


Figura 1. Conversor *boost* de duas entradas [5]

O funcionamento deste circuito está dividido em dois estados: No primeiro estado, (com a cor vermelha), Q_1 está ativo durante t_{ON} , Q_2 está desligado, D_1 está inversamente polarizado e a bobine L_1 está magnetizada por V_{i1} . Ao mesmo tempo, a bobine L_2 está a descarregar a sua energia para a saída. Nesta situação a saída V_O é alimentada por L_2 e pelo condensador C_C , tendo $V_O = V(L_2) + V(C_C)$. Nesta situação, o condensador C_O está em fase de carregamento. No segundo estado, (cor verde), temos o oposto, Q_1 encontra-se desligado durante t_{OFF} , Q_2 encontra-se ligado, D_2 inversamente polarizado e L_2 está magnetizada por V_{i2} . Nesta situação, L_1 descarrega a sua energia para o condensador C_C e V_O é alimentado pelo condensador C_O .

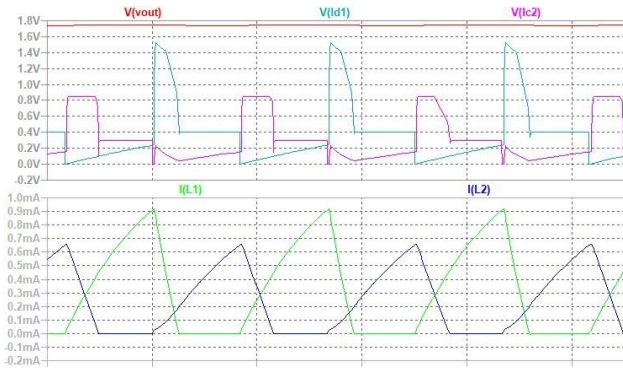


Figura 2. Tensão de saída (Vermelho), tensão dreno Q1 (ciano), tensão dreno Q2 (magenta), corrente bobina L1 (verde) e corrente bobina L2 (azul). Circuito com: $V_{i1}=0,4V$; $V_{i2}=0,3V$; $L1=L2=150\mu H$; $C_c=C_o=10nF$; $R_{load}=30k\Omega$.

A fig. 2 apresenta uma simulação realizada com as entradas V_{i1} e V_{i2} a 0.4 V e 0.3 V, respetivamente. A saída (vermelho) observada é 1.74 V, o que é superior ao dobro do somatório das entradas. Continuando a analisar os gráficos, são notáveis ainda os sinais de tensão LD1, o nó LD1 reúne a bobine L_1 , o transistor Q_1 e o diodo D_1 , e LC2, nó que reúne a bobine L_2 , o transistor Q_2 e o condensador C_C . É observável que no intervalo que a tensão LD1 não varia, a corrente da sua bobina L1 se anula até começar outro ciclo, o mesmo se aplica à tensão LC2 e corrente de L2. Isto significa que este circuito funciona no modo de condução descontínua (DCM). Este fenómeno acontece quando a corrente das bobinas quer atingir valores negativos, mas os diodos D1 e D2 não o permite. Isto significa que a tensão de saída dependerá da carga R_{load} , do fator de ciclo e do valor da bobina.

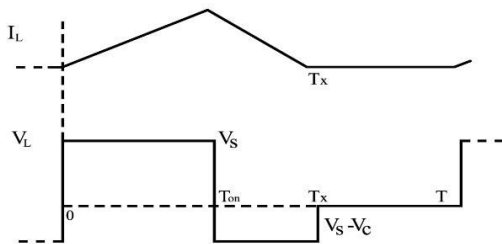


Figura 3. Exemplo do comportamento da corrente na bobina I_L e da tensão no terminal da bobina com o dreno do transistor V_L , no modo de condução descontínua de um conversor *boost* [6]

Na fig.3 temos um exemplo do comportamento que a bobina L1 devia ter no modo de condução descontínua. A corrente da bobina I_L atinge 0 A durante o intervalo $[T_x;T]$, no mesmo momento a tensão no dreno do MOSFET anula-se. Na fig.4 é possível observar a influência da resistência de carga no circuito. É de realçar que para valores de carga mais elevados, é possível atingir até 5 vezes o conjunto das entradas. Para o dimensionamento do sistema considerou-se que a tensão mínima de saída deverá ser superior a 1,3V. Desta forma, as fontes de alimentação na entrada devem manter-se acima de 0,3V para uma resistência de carga superior a 5k Ω , a fim de se obter essa tensão de saída mínima. O sistema foi

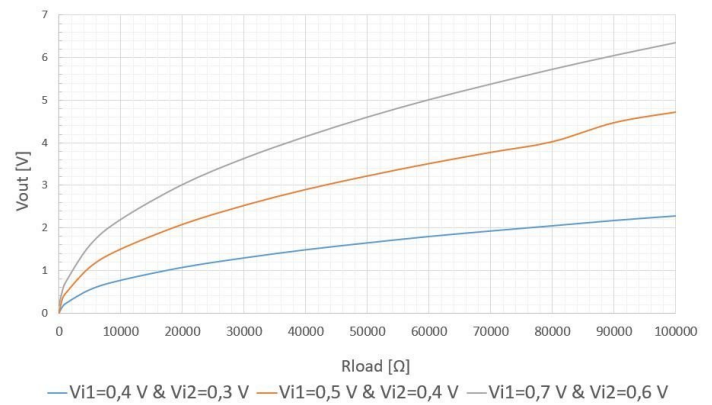


Figura 4. Circuito simulado para baixa tensão e diferentes valores de resistência

simulado com recurso a modelos de todos os componentes e das fontes de recolha de energia, e posteriormente desenvolvido em protótipo para teste, utilizando componentes comerciais *of the shelf* (COTS).

III. TESTES EXPERIMENTAIS

Posteriormente às simulações foram realizadas os testes experimentais divididos em várias fases: alimentação com fontes ideais, adição do oscilador LC, adição das fontes de *Energy Harvesting*.

A. Fontes ideais

Nesta fase, foram realizados os testes com uma fonte de alimentação ligada às entradas V_{i1} e V_{i2} . Para gerar os sinais de controlo nas *gates* dos *Mosfets* foram utilizados um gerador de sinais ou o *Analog Discovery 2* através do *WaveForms*. A bancada utilizada para realizar os testes encontra-se na fig. 5.

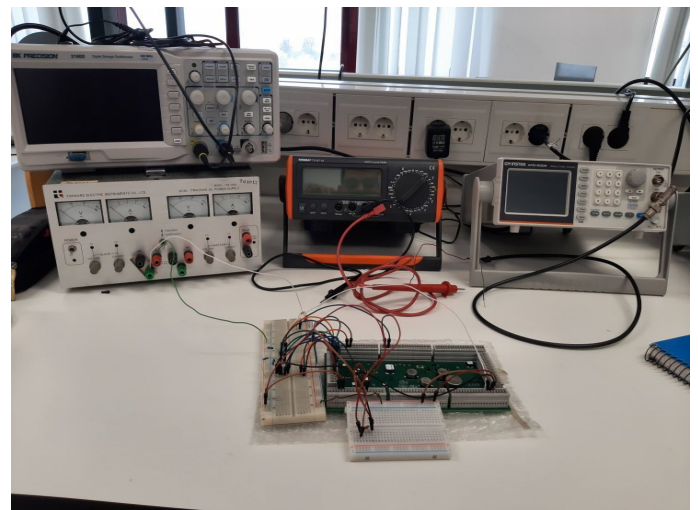


Figura 5. Bancada utilizada com osciloscópio, fonte de alimentação, multímetro e gerador de sinais (da esquerda para a direita)

Os sinais colocados nas entradas das *gates* foram duas ondas quadradas com uma frequência de 1 MHz, uma amplitude de 0,5 V, um *duty-cycle* de 50% e desfasadas 180°.

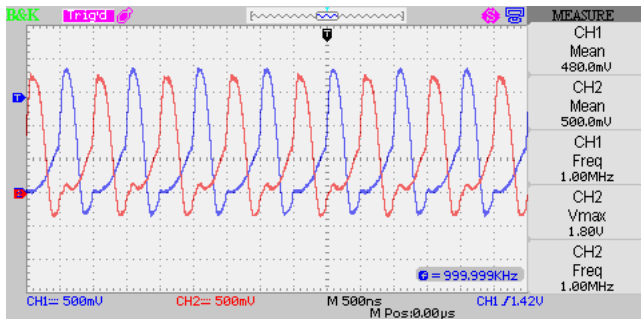


Figura 6. Tensão à saída das bobinas

Na figura 6 observamos o carregamento e descarregamento das bobinas com a ativação dos transístores. A azul temos a bobina L1 e a vermelho a bobina L2. O comportamento das bobinas é igual mas com um desvio de fase de 180°. Comparando as ondas da fig. 6 com a fig. 3, podemos concluir que o circuito funciona no modo de condução descontínua.

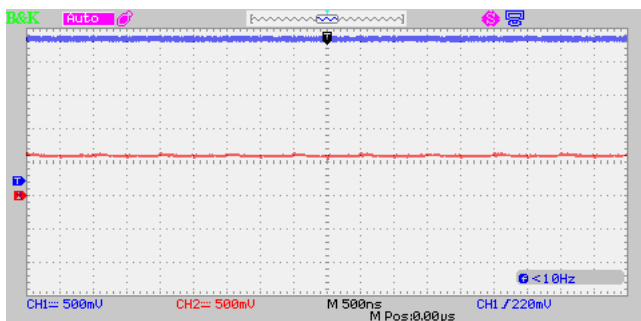


Figura 7. Tensão de saída com 100kΩ

Na fig. 7, a vermelho está a tensão de entrada nas duas fontes (V1 e V2) e a azul está a tensão de saída (Vo). A tensão de entrada é de 600mV e a saída tem 2,35 V, o que é aproximadamente o dobro da soma das entradas.

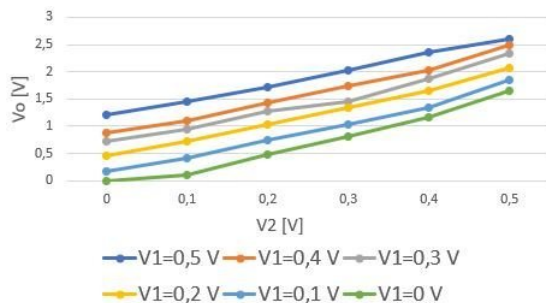


Figura 8. Relação saída e variação de V2 para diferentes valores de V1 100kΩ

Como se observa nos gráficos das fig. 8 e fig. 9, o impacto de cada fonte para o circuito é semelhante em declive, mas com a fonte V2 a obter valores mais elevados, uma vez que o *charge pump* tem maior impacto em aumentar a tensão do que o conversor Boost. Também se pode chegar à conclusão que, se

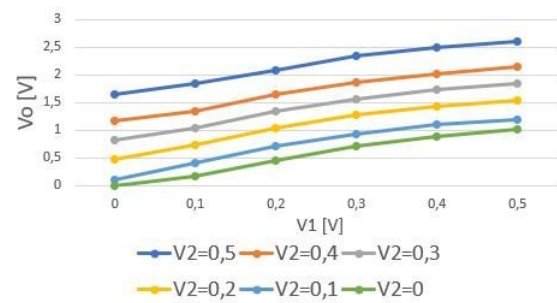


Figura 9. Relação saída e variação de V1 para diferentes valores de V2 100kΩ

uma das fontes estiver desligada, a outra fonte pode sustentar o circuito se tiver um valor de tensão mínimo (V1=0.5 V no caso de V2 ser 0 V e V2 = 0.4 V no caso de V1 ser 0 V).

B. Fonte de alimentação com oscilador LC de Collpitts

O oscilador utilizado foi um oscilador LC do tipo de Collpitts ilustrado na fig. 10, com uma frequência de 1.12 MHz, uma amplitude de 0.5 V e um *duty-cycle* de 50%. O 2º sinal foi realizado através de um inversor fonte comum.

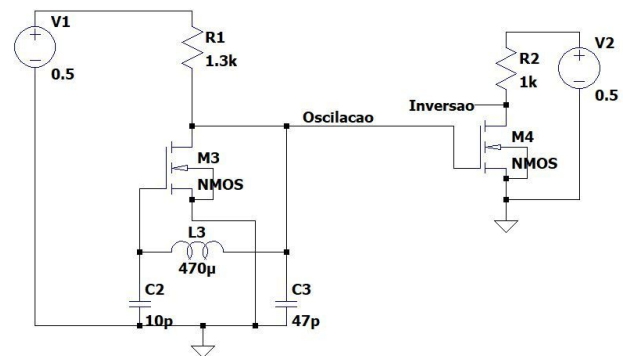


Figura 10. Esquema do oscilador LC de Collpitts utilizado

Nesta fase, foi ligado a fonte de alimentação ao oscilador para o alimentar, manteve-se a alimentação às entradas e passou a ser o oscilador a controlar os *mosfets*.

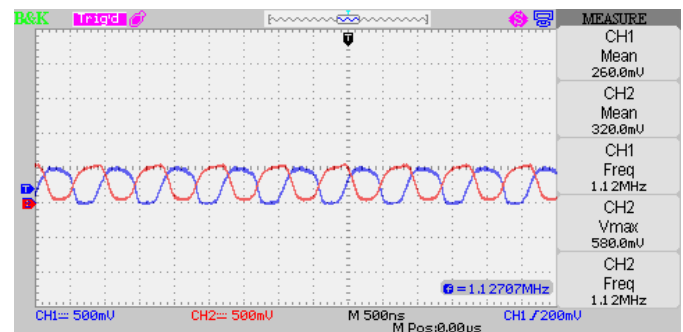


Figura 11. Ondas do oscilador LC de Collpitts

Na figura 11 observa-se as ondas criadas pelo oscilador LC de Collpitts, a azul o sinal na saída do oscilador e a vermelho

o sinal criado pela inversão. A única limitação aparece com o valor mínimo de alimentação para o oscilador funcionar, a cerca de 500 mV, ou seja, pelo menos uma das fontes de recolha de energia deverá ter este valor.

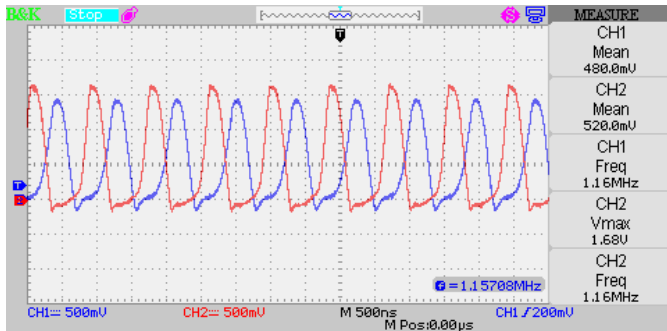


Figura 12. Tensão à saída das bobinas

As ondas observadas na fig. 12 são idênticas ao comportamento observado na fig. 6, apenas com a diferença de deslocamento da onda devido ao deslocamento das ondas do oscilador. Com 560 mV nas entradas, a saída tem um valor de 2.26 V, o que significa que mesmo com o oscilador, o circuito continua a funcionar como pretendido com a única limitação da alimentação do oscilador.

C. Alimentação com fontes de recolha de energia

Nesta fase foi testado o sistema em que o circuito e o oscilador foram alimentados pelas duas fontes de recolha de energia: a célula solar flexível e o termogerador.

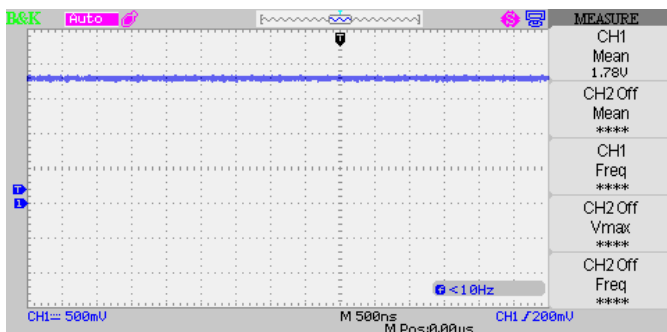


Figura 13. Sinal de saída gerado pela célula solar com luz flash de telemóvel encostado

O funcionamento do circuito não mudou em nada, necessita na mesma de ser alimentado por 500 mV, funciona no modo de condução descontínua, e obtém-se uma tensão de saída de 2.76 V com 520 mV nas entradas proveniente da célula solar, como é possível verificar pela fig. 13.

D. Protótipo do sistema

Na última fase deste trabalho foi elaborada e fabricada a PCB com auxílio do programa Eagle. O resultado foi uma placa PCB com 28.45 mm por 42.80mm, perfazendo uma área total de 12.17 cm², como se mostra nas figuras 14 e 15.

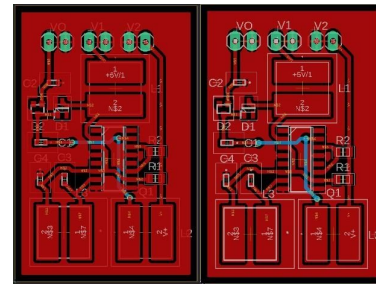


Figura 14. Camadas da board do protótipo: superior (esquerda) e inferior (direita)

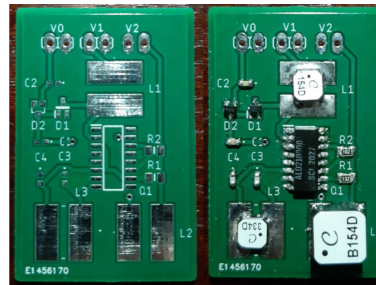


Figura 15. Protótipo sem os componentes (esquerda) e com os componentes SMD (direita)

Como se pode observar, as entradas e a saída são acessíveis, com a possibilidade de utilizar diferentes cargas e diferentes fontes de recolha de energia.

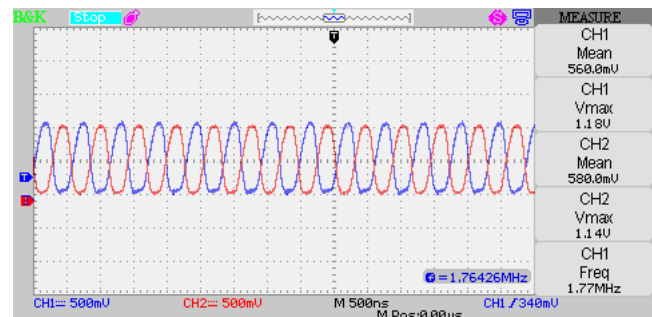


Figura 16. Tensão à saída das bobinas

Na fig. 16 aparece um diferente comportamento ao observado anteriormente neste estudo. A onda diminuiu em escala, a tensão de entrada está ligada à célula solar alimentando o sistema com o mínimo que permite o seu funcionamento, 500 mV. A mudança é que o circuito passou a funcionar no modo de condução contínua, a onda aparece como uma onda sinusoidal entre 0 e 1 V. Esta mudança deve-se à utilização de diferentes componentes na construção do protótipo em comparação com os utilizados nos testes anteriores.

Apesar desta diferença de funcionamento, o circuito oferece à saída um valor bastante aceitável de 2.92 V com 600 mV nas entradas, por aplicação de luz na célula solar e aumento de temperatura na face quente do termogerador.

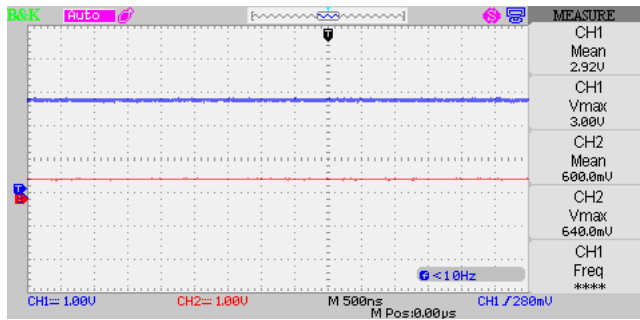


Figura 17. Tensão de saída do protótipo

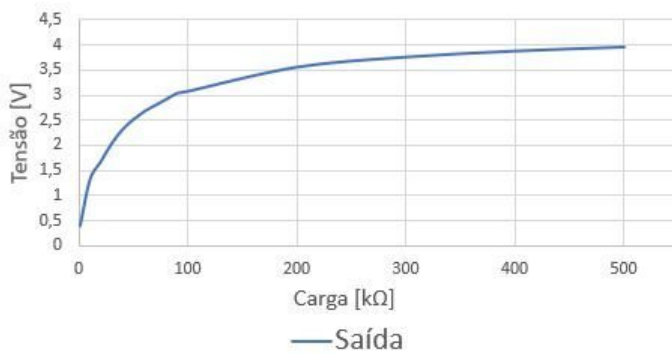


Figura 18. Relação saída [V] e carga [kΩ]

O gráfico da fig. 18 demonstra o impacto da carga na tensão de saída do sistema.

Na figura 19 é apresentado o sistema com o protótipo, a célula solar, o termogerador e a carga de 100 kΩ. Os fios laranja estão ligados à terra, o verde é o V2 que se encontra ligado à célula solar, o azul é o V1 que liga ao TEG e o vermelho é a saída que está ligado à carga de 100kΩ.

IV. CONCLUSÕES

Este projeto procurou encontrar um sistema que trabalhasse em muito baixa tensão e potência, mas que conseguisse oferecer à saída uma tensão contínua superior a 1.2 V, com a combinação de duas fontes de *energy harvesting*, uma célula solar e um termogerador. O sistema completo foi implementado num protótipo em PCB com componentes SMD, com uma área de inferior a 12.2 cm².

O sistema funciona para tensões de entrada não inferiores a 500mV, devido à necessidade deste valor como mínimo para obter funcionalidade no oscilador. Este projeto permite ser uma base para o estudo nesta área com recurso a um maior número de fontes de recolha de energia combinadas.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Khan, S.-J. Oh, S. Yeo, Y. Ryu, S.-H. In, R. E. Rad, I. Ali, Y.-G. Pu, S.-S. Yoo, M. Lee, K. C. Hwang, Y. Yang, and K.-Y. Lee, "A high-efficient wireless power receiver for hybrid energy-harvesting sources," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11148–11162, 2021.
- [2] R. V. C. Adrivan, R. K. G. Conde, A. B. Caberos, and C. T. C. Doloriel, "An energy combiner for multi-source energy harvesting with charge control," in *2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, pp. 371–376, 2019.
- [3] M. A. Abouzied, H. Osman, V. Vaidya, K. Ravichandran, and E. Sánchez-Sinencio, "An integrated concurrent multiple-input self-startup energy harvesting capacitive-based dc adder combiner," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6281–6290, 2018.
- [4] J. J. Estrada-López, A. Abuellil, A. Costilla-Reyes, M. Abouzied, S. Yoon, and E. Sánchez-Sinencio, "A fully integrated maximum power tracking combiner for energy harvesting iot applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2744–2754, 2020.
- [5] L. Colalongo, D. Dotti, A. Richelli, and Z. Kovacs, "A non-isolated multiple-input boost converter for energy harvesting," *Electronics Letters*, vol. 53, 06 2017.
- [6] E. Team, "Discontinuous conduction mode of simple converters." <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/discontinuous-conduction-mode-of-simple-converters/>, junho 2015.
- [7] L. Fraas, *Chapter 6: The Dream of Thin film PV*. 06 2014.
- [8] "Silicon pin photodiode, rohs compliant." https://pt.mouser.com/datasheet/2/427/VISH_S_A0012000273_1-2572197.pdf.
- [9] Z. N. C. Cekdin and M. Faizal, "The usage of thermoelectric generator as a renewable energy source," *Telkonnika*, vol. 14, Agosto 2020.
- [10] A. Richelli, M. Salem, and L. Colalongo, "A review of fully integrated and embedded power converters for iot," *Energies*, vol. 14, p. 5419, 08 2021.
- [11] "Analog discovery 2 specifications." <https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/specifications>.
- [12] "Mini thermoelectric generator module." <https://www.eurothermodynamics.com/products/datasheets/MGM250-17-10-16-v1.pdf>.
- [13] J. C. S. Almeida, "Conversor dc-dc elevador de tensão para geradores termoeletricos de muita-baixa potência," Master's thesis, Academia Militar, 2021.
- [14] P. M. dos Santos, A. J. Serralheiro, B. Borges, J. P. N. Torres, and A. Charas, "An experimental study on step-up dc & dc converters

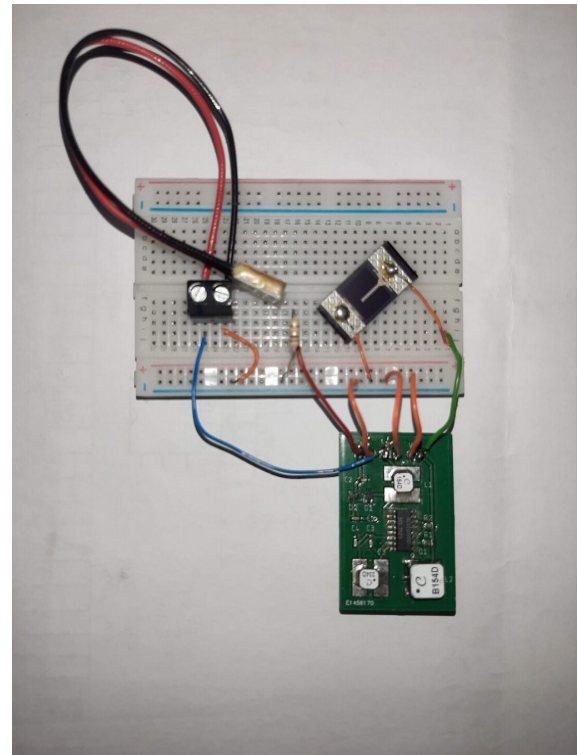


Figura 19. Protótipo do sistema com as fontes ligadas e uma carga de 100kΩ

for organic photovoltaic cells,” *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 12, no. 2, 2022.