



INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

Título do Trabalho: Estudo de autonomia de sensores autônomos com comunicação sem fio

Autor(es): Cleiton de Oliveira Alves, Pierre Victor da Silva Sousa, Rodolfo Moreira Diniz Lima, Sidney Marcus Azevedo Santos, Wendler de Souza Queiroz, Michelle Mendes Santos, Virgil Del Duca Almeida, Leandro Freitas de Abreu

Palavras-chave: colheita de energia, *energy harvesting*, sensores sem fio.

Campus: Betim

Área do Conhecimento (CNPq): Engenharia Elétrica / Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos

RESUMO

Este trabalho visa fazer um estudo de autonomia energética de três tipos de dispositivos com comunicação sem fio: sensor de presença, sensor de aberturas e interface teclado. Foram realizados estudos e levantamentos dos componentes mais adequados a esses dispositivos como transdutores de energia, microcontroladores, transceptores, detectores de presença, conversores DC-DC e armazenadores de energia. Os principais critérios comparados foram o baixo consumo de energia, adequação a ambientes residenciais e aos possíveis produtos finais, eficiência na produção de energia e faixas de trabalho de tensões e correntes. Concluiu-se que as células solares de silício cristalino caracterizam-se como os transdutores mais viáveis. Para o cálculo de autonomia, foram feitas estimativas do ciclo de trabalho de cada um dos componentes, considerando uma aplicação em automação residencial, em que foram verificados os principais requisitos teóricos para o projeto dos dispositivos autônomos, i.e. que não precisam de substituição de baterias ou pilhas. Verificou-se que, para o sensor de aberturas e a interface teclado, idealizados no projeto inicial, mais pesquisas precisam ser realizadas a fim de viabilizar a adequação de outras formas de transdução de energia em ambiente residencial.

INTRODUÇÃO

Uma das dificuldades dos desenvolvedores de dispositivos de comunicação sem fio é a alimentação. A necessidade de substituição de baterias periodicamente traz transtornos e custos. Uma saída para este problema é o desenvolvimento de sensores autônomos, isto é, dispositivos capazes de coletar a energia do ambiente (*energy harvesting*) para seu próprio consumo.

O objetivo deste trabalho é descrever um estudo de autonomia de três sensores autônomos: detector de presença, sensor de abertura de portas e janelas e interface teclado. Este projeto está sendo desenvolvido em parceria com uma empresa que desenvolve produtos para automação residencial, financiado pelo CNPq.

METODOLOGIA

Como ponto de partida para o início das pesquisas foi tomado como base o diagrama representado na Figura 1, que ilustra os componentes internos para o projeto dos sensores. A energia disponível no meio é coletada pelo 1) transdutor de energia, em que é gerenciada pelo 2) conversor DC-DC e 3) armazenada. O processamento é feito pelo 4) microcontrolador que gerencia o 6) sensor e troca sinais de comunicação sem fio por meio do 5) transceptor. Cada um desses componentes foram estudados, aproveitando-se conhecimentos adquiridos pela empresa parceira, para realizar o levantamento de materiais que permitiu o estudo de autonomia, explanados a seguir.

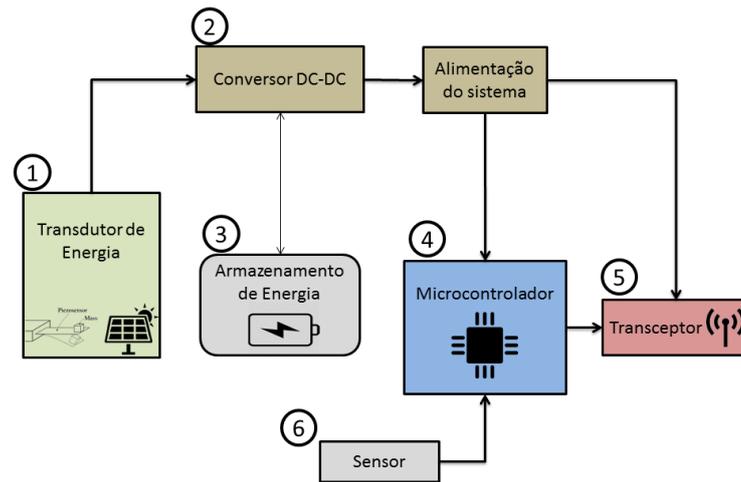


Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema energy harvesting.

1. Levantamento de Materiais

Seguindo a Figura 1, o primeiro passo tomado foi a realização de pesquisas relacionadas a transdutores de energia (células solares, dispositivos eletromecânicos e piezoelétricos). Foi pesquisado o funcionamento de vários tipos de transdutores, em especial as células solares fotovoltaicas, transdutores piezoelétricos, eletromecânicos, de rádio frequência. Em seguida, foi verificado quais destes existem no mercado e se adequam a ambientes residenciais. A forma de transdução mais eficiente foi selecionada e, para critérios de comparação para uma posterior compra, selecionou-se os dispositivos mais eficientes, de diferentes fabricantes, tendo como base o estudo de seus respectivos manuais e *datasheets*.

Foram feitos estudos de alguns transceptores e realizados ensaios de alcance com dispositivos disponíveis na instituição, a fim de verificar requisitos adequados de alcance da comunicação sem fio. Foram feitas pesquisas de mercado a fim de selecionar aqueles que, com base nos respectivos *datasheets*, consumiriam menor quantidade de energia para enviar sinais com um alcance suficiente para a aplicação residencial.

Em sequência foram realizadas pesquisas sobre conversores de energia específicos para aplicações *energy harvesting*. Como critério de escolha foi estabelecida uma faixa de tensão de trabalho que atenda os demais componentes, disponibilidade no mercado, baixas dimensões e boa eficiência.

Para sensores, foram pesquisados detectores de presença por infravermelho, que trabalham na faixa de 3 a 5 volts, possuem baixas dimensões e baixo consumo de energia. Quanto ao alcance, variam de 5 a 12 metros –valor estimado para a aplicação do produto a ser desenvolvido.

Trabalhos anteriores feitos pela empresa parceira levaram à seleção de três modelos de microcontroladores. Como critério de seleção comercial foram tomados valores de tensão de alimentação e consumo. Considerou-se o modo “ativo” com CPU e demais módulos ativos, modo “*stand-by*” com CPU desligada e em espera para ativar, modo “*off*” como modo desligado com apenas a memória RAM em funcionamento.

2. Estudo sobre autonomia

Diante do levantamento dos materiais a serem utilizados, foi feito um estudo de autonomia de cada produto final, com base em *datasheets* de fabricantes destes materiais. Para isso, foram



discriminados cenários de uso, programação e protocolos de componentes como microcontrolador e transceptor.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

1. Levantamento de materiais

Sobre as células fotovoltaicas, foram escolhidas as fabricadas com silício cristalino, que segundo dados do *National Center for Photovoltaics* [1], possuem uma eficiência que chega a 46% e além disso, possuem alta disponibilidade no mercado. A partir disso foram feitas as escolhas comerciais. Como critério, foram observadas aquelas de maior eficiência calculada usando a Equação 1:

$$\zeta = \frac{P_{max}}{A} \quad (\text{eq. 1})$$

em que ζ é a potência gerada por unidade de área [W/cm^2], P_{max} a potência máxima gerada sob a iluminância [2] de 200 Lux, A a área ocupada pela célula solar (produto da largura pelo comprimento). A Tabela 1.1 mostra o estudo comparativo.

Tabela 1.1 - Comparativo entre células solares. Datasheets disponíveis nos sites das empresas Cymbet [3], Enocean [4], Sanyo [5] e Solems [6]. Os preços indicados foram consultados no site da empresa DigiKey Electronics [7].

Empresa	Modelo	P_{max} [μW]	ζ [$\mu W/cm^2$]	A [cm^2]	Preço [USD]
Cymbet	CBC-PV-01	160,8	4,89	32,9	5,42
Cymbet	CBC-PV-02	88	4,88	18,0	6,00
Enocean	ECS 300	13,5	3	4,5	1,34
Enocean	ECS 310	33	3,3	10,0	1,35
Sanyo	AM-1801	55,5	4,17	13,3	5,86
Sanyo	AM-1816	252	4,6	54,8	12,77
Solems	03/048/032	48	3,12	15,4	-

Conhecendo o princípio de funcionamento dos dispositivos eletromecânicos, foi possível pesquisar alguns produtos comerciais que poderiam ser adaptados para a geração de energia. A Tabela 1.2 foi produzida com os principais produtos analisados. Nesta etapa foram considerados o produto ECO 200, da EnOcean [9] e alguns micromotores [8,10] que podem ser acoplados a um sistema de transmissão mecânica e serem utilizados como geradores CC.

Tabela 1.2 – Comparativo dos sistemas eletromecânicos – algumas informações não estavam disponíveis nos datasheets [8,9,10].

Dispositivo	Rotação /Esforço	Tensão	Corrente	Energia
Micro Motor DC Neoyama AK080 (8)	6000 rpm	5 V	90 mA	
Eco 200 EnOcean (9)	1 aperto			120 – 210 μJ
Micro Motor DC Akiyama AK280 (10)	4600 rpm	12 V	0,35 mA	



Entre os diversos produtos comerciais com a capacidade piezoelétrica, adequados a diferentes finalidades e com preços que vão de alguns centavos a centenas de reais, foram escolhidas pastilhas piezoelétricas para desenvolver a Tabela 1.3 com as principais características desses produtos.

Tabela 1.3 – Comparativo dos transdutores piezoelétricos [11,12,13].

Dispositivo	Deflexão	Tensão	Carga
LDT-028K MEAS (11)	10 mm	20- 25 V	10 – 12 nC
D220-A4-103XE (12)	13 μ m	64 V	
EH220-A4-503YB (13)	2,6 mm	20,9 V	

Sobre os conversores, foi construída a Tabela 1.4, conforme metodologia descrita anteriormente.

Tabela 1.4 - Comparativo entre conversores boost. As características foram retiradas dos datasheets dos dispositivos [14,15,16,17,18] e os preços foram retirados da página da empresa Digi-key Electronics[7].

Modelo	Fabricante	Tensão entrada [V]	Tensão saída [V]	Dimensões [mm]	Preço [USD]
LTC3105 [14]	Linear Instruments	0,225 – 5	1,5 – 5,25	3x3x0,5	5,78
BQ25504RGTT [15]	Texas Instruments	0,33 – 3	2,5 – 5,25	3x3x0,5	6,17
MAX17710 [16]	Maxim Integrated	0,3 – 3,3	1,8 – 5,7	3x3x0,5	16,54
EH4205 [17]	Advanced Linear Devices Inc	0,08 – 5	0 – 15	25,4x38,1x15,2	44,4
CBC-EVAL-10 (kit placa solar e conversor) [18]	Cymbet	0 – 5,5	0 – 5,5	-	-

Os microcontroladores previamente selecionados pela empresa parceira [19,20,21] estão listados na Tabela 1.5. Por não ter sido feito um estudo mais profundo desses dispositivos, os valores de consumo serão utilizados apenas como referência de comparação para determinação da autonomia teórica do produto completo.

Tabela 1.5 – Microcontroladores e valores de interesse conforme informações dos fabricantes [19,20,21].

Fabricante	Modelo	Tensão [V] (min / tip / max)	Consumo [μ W] (ativo / stand-by / off)
Texas Instruments [19]	MSP430G2955	1,8 / 2,2 / 3,6	550 / 1,54 / 0,22
FreeScale [20]	MC9S08QE32CWL	1,8 / 3,0 / 3,6	39000 / 21,9 / 1,35
Microchip [21]	PIC18F47J53 TQFP	2,0 / 2,0 / 3,6	12,4 / 0,21 / 0,026

Dentre os transceptores pesquisados, os escolhidos pelo grupo são: RFM 12B [22], NRF24L01 [23] e o RFM69HCW [24]. O quadro comparativo é mostrado na Tabela 1.6. Entretanto, verificou-se que a escolha da forma e protocolo de comunicação tem grande impacto na autonomia do sensor, já que o rádio é o componente de maior consumo.



Tabela 1.6 - Comparativo entre rádios de comunicação sem fio [22,23,24].

Rádios	Tensão [V]	Tx [mW]	Rx [mW]	Standby [mW]	Idle [mW]
RFM 12B [1]	3	84	45	0,0009	-
NRF24L01+ [2]	3	33,9	40,5	0,078	0,0027
RFM69HCW [3]	3	390	48	4,5	0,0036

2. Estudo sobre autonomia

2.1 Autonomia do Sensor de Portas e Janelas

Para estimação da autonomia do sensor de abertura de portas e janelas seria considerado o transdutor eletromecânico ECO 200 da fabricante Enocean [9]. Entretanto, o uso desse produto conforme indicado pelo fabricante inviabilizaria a recepção de informações pelo sensor e obrigaria o uso dos protocolos de comunicação da Enocean [9]. Contudo, o produto pode servir de inspiração para o projeto de um novo transdutor pela equipe de pesquisa.

2.2 Autonomia da Interface Teclado

A interface teclado é um caso em que o próprio sensor pode coletar energia do meio, em que a energia mecânica do movimento é aproveitada. Neste estudo foi considerado o uso de transdutores piezoelétricos.

Para caracterização da quantidade de energia gerada há diversas variáveis envolvidas, tais como as dimensões físicas do transdutor, a frequência de aplicação mais adequada, a forma com que o estímulo humano será aplicado no produto. Grande parte dos produtos que usam transdutores piezoelétricos tem interesse em captar energia por vibração e não por um estímulo impulsivo, tal qual seria a interface teclado.

Por falta de estudos contundentes que se aproximam melhor da aplicação desejada, foi decidido aprofundar melhor na caracterização e estudo desse tipo de transdutor para que se chegue a uma estimativa mais acertada. Testes práticos em dispositivos piezoelétricos também serão realizados, a fim de se obter melhor conhecimento sobre a capacidade de geração de energia.

2.3 Autonomia do Sensor de Presença com *harvesting* solar

Para o estudo de autonomia deste item foram utilizados os componentes listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Componentes considerados para o cálculo de autonomia do produto final.

Item	Componente	Fabricante	Modelo
1	Colheitador de Energia (<i>Harvester</i>)	Cymbet	CBC-PV-02
2	Conversor <i>Boost</i>	Linear	LTC3105
3	Armazenador de energia	-	Bateria 1,2V 2500mAh
4	Microcontrolador	Microchip	PIC18F47J53 TQFP
5	Rádio de comunicação sem fio	Nordic	NRF24L01
6	Sensor de presença	Panasonic	EKMB1103111

O cálculo do consumo foi realizado baseado no balanço de potência média das partes, conforme a equação:

$$P_{tot} = n \cdot P_{sol} \cdot e_0 - P_{mic} - P_{radio} - P_{sensor},$$



em que P_{tot} é o balanço de potência média total do dispositivo, n o número de células solares no dispositivo, $e0$ a eficiência de conversão da energia, P_{sol} a potência média gerada pela célula solar, P_{mic} a potência média de consumo do microcontrolador, P_{radio} a potência média de consumo do rádio e P_{sensor} a potência média consumida pelo elemento sensor.

Nesse cálculo, vale lembrar que a célula solar, o microcontrolador e o rádio são elementos de consumo/produção bimodal, i.e., tem basicamente dois valores que determinam sua potência: o estado ativo (*run*) e o estado em *stand-by* (*idle*, *sleep*). Para calcular a potência consumida/gerada é preciso estabelecer o ciclo de trabalho (*duty cycle*) de cada um desses dispositivos, de modo a possibilitar o cálculo da potência média consumida.

O ciclo de trabalho considerado de cada dispositivo é apresentado na *Tabela 2.2*. O valor apresentado mostra um percentual estimado do tempo em que o dispositivo permanecerá em modo ativo. Para a célula solar, foi estimada uma produção de 8 horas diárias de energia, resultando no valor percentual de 33,3% (8h / 24h). Para o microcontrolador, foi estimado que ele fique ativo por 100ms, a cada 10 minutos do dia, o que equivale a um ciclo de trabalho de 0,01667%. Para o rádio, foi estimado que ele fique ativo por 20ms, a cada 10 minutos, o que equivale a um ciclo de trabalho de 0,003333%. Para o rádio no modo “ativo”, foi considerado o maior consumo entre transmissão (Tx) e recepção (Rx) do sinal.

A *Tabela 2.2* também mostra a potência média de cada dispositivo, calculada conforme a seguir:

$$P_{média} = \eta \cdot P_{run} + (1 - \eta)P_{idle}$$

em que n é o ciclo de trabalho, P_{run} e P_{idle} as potências em modo ativo e *stand-by*.

Tabela 2.2 - Ciclo de trabalho (duty-cycle) considerado e sua respectiva potência média produzida / consumida.

Item	Componente	Ciclo de Trabalho η [%]	Potência Média $P_{média}$ [μ W]
1	Colheitador de Energia (<i>Harvester</i>)	33,3	29,3
2	Conversor DC-DC	-	-
3	Armazenador de energia	-	-
4	Microcontrolador (<i>run / sleep</i>)	0,01667	0,2120
5	Rádio transceptor (<i>on / sleep</i>)	0,003333	79,35
6	Sensor de presença	100	4,75

Para o conversor DC-DC foi considerado um fator de eficiência de conversão de energia de $e0=50\%$ para fins de cálculo e projeto. Esse valor foi estimado baseado em informações do *datasheet* do fabricante [14] e em trabalhos anteriores [25].

Para o armazenador de energia também foi considerada uma “eficiência de armazenamento” de 60%, considerando que apenas esse percentual do total de energia armazenada esteja disponível para uso.



Com os valores de potência e eficiência considerados, foram estabelecidos quatro cenários possíveis para composição do produto, de acordo com o número de células solares utilizadas para geração de energia. O resultado é apresentado na *Tabela 4*.

Tabela 4 - Autonomia energética do produto considerando os produtos e valores de potência, eficiência e ciclo de trabalhos especificados nessa seção.

	Quantidade de células solares e área ocupada [mm x mm]	Potência Média Gerada [mW]	Potência Média Consumida [mW]	Autonomia [anos]
1	2 células solares [53,4x67,3]	0,029	0,084	0,3
2	4 células solares [106,8x67,3]	0,059	0,084	0,7
3	5 células solares [133,5x67,3]	0,073	0,084	1,6
4	6 células solares [133,5x134,6]	0,088	0,084	autônomo

CONCLUSÕES

De acordo com as pesquisas realizadas sobre transdução de energia, as células fotovoltaicas foram caracterizadas como o tipo de transdutor mais eficiente, considerando espaço ocupado, preço, adequação ao ambiente residencial, disponibilidade no mercado e produção de energia.

Os demais materiais foram selecionados basicamente levando em conta o baixo consumo de energia. Entretanto, alguns fatores ainda precisam ser melhor definidos como local de instalação (*indoor* ou *outdoor*) dos produtos finais, ciclos de trabalho e protocolos de comunicação.

Devido ao grande diferencial da célula solar, o estudo de autonomia energética foi mais direcionado ao sensor de presença pela maior facilidade de adequação deste ao transceptor. Contudo, mais estudos ainda precisam ser realizados para que as outras formas de transdução sejam aplicáveis ao sensor de aberturas e à interface teclado, afim de se obter também para estes, estudos mais precisos de autonomia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq/SETEC-MEC e da empresa parceira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] National Center for Photovoltaics. Research Cell Efficiency Records. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/ncpv/>>. Acesso em: 11/06/2015.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5413: Iluminância de Interiores. Rio de Janeiro, 1992.
- [3] Site CYMBET. Disponível em: <<http://www.cymbet.com/pdfs>>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [4] ENOCEAN, 2013. Disponível em: <https://www.enocean.com/en/enocean_modules/ecs-300-data-sheet.pdf>. Acesso em: 27 de maio 2015.
- [5] SANYO, Amorphous Silicon Solar Cells / Amorphous Photosensors, EP120B, 2007. Disponível em: <<http://panasonic.net/energy/amorton/en/pdf/EP120B.pdf>>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [6] SOLEMS, FT- PHOTOP_en/2013-1/p1, **. Disponível em: <http://www.solems.com/IMG/pdf/Solar_cells_13.pdf>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [7] Site DigiKey Electronics. Disponível em: <<http://www.digikey.com/>>. Acesso em: maio de 2015.
- [8] NEOYAMA,1. Disponível em: <<http://www.neoyama.com.br/produtos/micromotores/micro-motor-dc/>>. Acesso em: maio de 2015.



- [9] ENOCEAN, ECO 200 - Energy converter for motion energy harvesting. Disponível em: <https://www.enocean.com/en/enocean_modules/eco-200>. Acesso em: maio de 2015.
- [10] ROBOCORE. Disponível em: <https://www.robocore.net/modules.php?name=GR_LojaVirtual&prod=151>. Acesso em: maio de 2015.
- [11] MEAS. LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch. Disponível em: <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/ForceFlex/LDT_Series.pdf>. Acesso em: maio de 2015.
- [12] PIEZO SYSTEMS INC., 1. STANDARD DOUBLE QUICK-MOUNT EXTENSION SENSORS Disponível em: <<http://www.piezo.com/prodexg8dqm.html>>. Acesso em: maio de 2015.
- [13] PIEZO SYSTEMS INC., 2. PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING KIT. Disponível em: <<http://www.piezo.com/prodproto4EHkit.html>>. Acesso em: maio de 2015.
- [14] Linear Technology. 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 250mV Start-Up. Disponível em: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3105fa.pdf>>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [15] Texas Instruments. *Ultra Low Power Boost Converter with Battery Management for Energy Harvester Applications*. Disponível em: <www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>. Acesso em: setembro de 2012.
- [16] Maxim Integrated. *Energy-Harvesting Charger and Protector MAX17710*. Datasheet Disponível em: <www.maximintegrated.com/en/products/MAX17710>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [17] Advanced Linear Devices Inc. *Micropower Step up Low Voltage Booster Module*. Datasheet disponível em: <www.aldinc.com/pdf/EH4205.pdf>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [18] Cymbet. *EnerChip™ CC Energy Harvester Evaluation Kit*. Datasheet disponível em: <www.cymbet.com/pdfs/DS-72-20>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [19] Texas Instruments. *Mixed Signal Microcontroller*. Datasheet disponível em: <www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2955.pdf>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [20] FreeScale. *MC9S08QE32 series*. MC9S08QE32, Rev. 7, 9/2011. Datasheet disponível em: <http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S08QE32.pdf>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [21] Microchip. *PIC18F47J53 Family, 28/44-Pin, High-Performance USB Microcontrollers with nanoWatt XLP Technology*. Datasheet disponível em: <www.microchip.com/PIC18F47J53>. Acesso em: 27 de maio de 2015.
- [22] RFM12B Universal ISM Band FSK Transceiver. Datasheet disponível em: <http://www.hoperf.com/rf/fsk_module/RFM12B.htm>. Acesso em: 13 de junho de 2015.
- [23] nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver. Preliminary Product Specification v1.0. Datasheet disponível em: <<http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P/%28language%29/eng-GB>>. Acesso em: 13 de junho de 2015.
- [24] RFM69HCW ISM TRANSCEIVER MODULE v1.1. Datasheet disponível em: <http://www.hoperf.com/rf/fsk_module/RFM69HCW.htm>. Acesso em: 13 de junho de 2015.
- [25] Taneja, J. Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-Solar Power Sensor Networks. International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2008.