

Supercapacitores como meio de armazenamento de energia para circuitos autônomos seguidores de linha

Giovani Pereira Sella
Instituto federal do Paraná
Londrina, Brasil
gipereirasella@gmail.com

Murilo de Souza Neves
Instituto federal do Paraná
Londrina, Brasil
murilogrilosn@gmail.com

Rafael Figueiredo Cobo
Instituto Federal do Paraná
Londrina, Brasil
rafaelcobo@gmail.com

Diogo Roberto Olsen
Instituto federal do Paraná
Londrina, Brasil
diogo.olsen@ifpr.edu.br

Abstract— Supercapacitors demonstrate to be a viable alternative to substituting batteries in autonomous circuits with a short operational period. Supercapacitors can hold enough energy and, meanwhile due to the low internal resistance, allow charging and discharging way faster than regular batteries. This article chases ways to facilitate the use of supercapacitors and demonstrate the effectiveness of those - by making a prototype of a line-follower robot -. Two attachable modules, one using conventional batteries and the other using supercapacitors, are going to be built, allowing to compare and prove the viability of the use of supercapacitors on these circuits. The supercapacitors module is based on a self regulating boost converter, which the development is described in this article. The calculation of the energy use and storing system of Supercapacitors point out an autonomy of 182.25 seconds on ideal conditions. The construction of the line-follower has been completed and the two modules are being developed. Although the research is not finished, the results point out the viability of the substitution of batteries by Supercapacitors.

Keywords — Line-follower; Supercapacitor; Ultracapacitor; Boost converter; Joule Thief.

Resumo — Supercapacitores demonstram ser uma alternativa viável de substituição das baterias em circuitos autônomos com baixo tempo de funcionamento. Pois conseguem armazenar energia suficiente, ao mesmo tempo que, devido a sua resistência interna baixa, possibilitam carga e descarga de maneira expressivamente mais rápida quando comparado a baterias. O presente trabalho busca maneiras de viabilizar o uso dos supercapacitores e demonstrar efetividade, por meio da construção de um protótipo de seguidor de linha modular. Dois módulos, um com baterias convencionais e outro com o supercapacitor poderão ser vinculados ao seguidor para assim comparar e provar a viabilidade do uso dos supercapacitores nesses circuitos. O módulo de supercapacitores depende de um circuito de aumento de tensão auto regulável com desenvolvimento relatado neste trabalho. Até então, cálculos de gasto e armazenamento de energia do sistema com supercapacitores apontam autonomia de 182,25 segundos em condições ideais. A construção do seguidor já foi concluída e os módulos estão em desenvolvimento. Apesar da pesquisa não estar concluída, os resultados obtidos apontam viabilidade na substituição de baterias por supercapacitores.

Palavras-chave — Seguidor de linha; Supercapacitores; Ultracapacitores; Conversor de tensão; Ladrão de Joules.

I. INTRODUÇÃO

Robôs seguidores de linha são circuitos autônomos que possuem seu funcionamento baseado em ciclos de curto período de tempo. Esses robôs normalmente contam com baterias de lítio-polímeros (li-po) ou íon-lítio (li-ion), porém a substituição dessas baterias por Supercapacitores [1](SCs) pode ser uma alternativa viável que traz algumas vantagens em seu uso. O uso de SCs pode resultar em queda drástica no tempo de carregamento, diminuição no peso dos seguidores de linha, redução de custos, além de inovação na categoria. A prova de conceito almejada por esse trabalho também poderá resultar em uma tecnologia que poderá ser utilizada em diversos outros dispositivos.

Supercapacitores, também chamados de Ultracapacitores, são capacitores de alta capacitância. Esses componentes eletrônicos possuem características intermediárias entre capacitores e baterias. Segundo Barbosa [2], o supercapacitor “é um sistema de armazenamento de energia que une duas características interessantes para diversas aplicações: a alta densidade de potência dos capacitores dielétricos e a alta densidade de energia das baterias químicas”.

Diferente das baterias eletroquímicas, os SCs permitem o uso completo da carga armazenada além de inúmeros ciclos sem comprometer significativamente sua vida útil. Em seu livro [3], Grbović, apresenta as propriedades de dispositivos de armazenamento de energia, contidas na Tabela 1.

O fato a ser contornado na utilização dos SC é que sua tensão decai linearmente em relação ao tempo, isso impossibilita o uso de toda a energia armazenada. Para circuitos autônomos, deixar de utilizar toda a carga armazenada significa perda de autonomia, o que poderia inviabilizar o uso dos SCs. A solução encontrada para esse problema foi utilizar um conversor de aumento de tensão que possibilitasse o controle de sua eficiência conforme a tensão decai.

TABELA I
PROPRIEDADES DOS DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA EXISTENTES

	Capacitores	Supercapacitores	baterias eletroquímicas
Densidade de energia (Wh/kg)	~0.1	1*	~100
Pico de densidade de potência (kW/kg)	10 ⁴	2-20	0.1-0.5
Número de ciclos	10 ¹⁰	10 ⁴	~10 ³
Vida útil (anos)	~10	~15	~5

*Baseado nas tendências de demandas do mercado, é esperado aumento de 10% na densidade de energia dos SC nos próximos anos.

Fonte: adaptada de Grbović [2].

Um sistema parecido - de controle adaptativo da tensão dos SCs - foi criado por K.Saichand, em 2019. Tal sistema, segundo Saichand [4], obteve ganho de eficiência de 10% a 50%, dependendo do nível de tensão dos SCs. O presente trabalho aplica técnicas similares, porém, voltadas à capacitâncias, tensões e circuitos autônomos menores.

Além disso, este trabalho usa o circuito conhecido como *ladrão de Joules*¹ (LJ), que é um circuito oscilador [5] simples que pode ser utilizado para aumentar a tensão de uma fonte de energia, o qual é comumente utilizado para alimentar lâmpadas LED com tensões mais baixas que de sua operação. Ao acoplar componentes de estabilização e limitação de tensão à saída do LJ é possível utilizá-lo como um transformador de tensão.

Porém, a eficiência do circuito oscilador LJ é variável, podendo variar entre 24 a 94% dependendo da tensão de entrada [6]. Por isso, é necessário encontrar um método de regulação do LJ conforme a tensão dos supercapacitores caem, sempre maximizando a eficiência da conversão.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo geral

Testar a viabilidade de uso dos SC como meio de armazenamento de energia para circuitos autônomos seguidores de linha.

B. Objetivos específicos

- 1) Construir um robô seguidor de linha modular - que possibilita a troca do módulo de alimentação;
- 2) Construir o módulo de alimentação do robô utilizando baterias *Li-po* ou *li-ion*;
- 3) Desenvolver um sistema *boost* ajustável baseado no sistema Ladrão de joule;
- 4) Construir o módulo de alimentação do robô utilizando o SC e sistema *boost*;
- 5) Avaliar e comparar a performance do robô seguidor de linha com ambos os módulos;

¹ Tradução livre do inglês, *Joule Thief*.

III. MATERIAIS E MÉTODO

A. Seguidor de linha

Segundo Costa [7], “Um robô seguidor de linha é aquele que tem a capacidade de detectar uma linha desenhada no chão por meio do contraste entre a cor desta linha e a cor do restante do piso”.

Para a execução dessa tarefa certos componentes são essenciais na composição do robô: Algum sensor para a detecção da linha, algum atuador para movimentar o robô, um controlador para interpretar o sinal dos sensores e controlar os atuadores e algum método de alimentação de energia para os componentes.

Como a alimentação deste seguidor será modular, o robô foi desenhado de forma que os pinos que permitem o acoplamento dos dois módulos de bateria estejam disponíveis. O robô foi projetado da seguinte maneira: Em uma placa de fenolite dupla e personalizada os componentes foram soldados. Estes componentes são apresentados no Quadro II.

QUADRO II
COMPONENTES DO ROBÔ

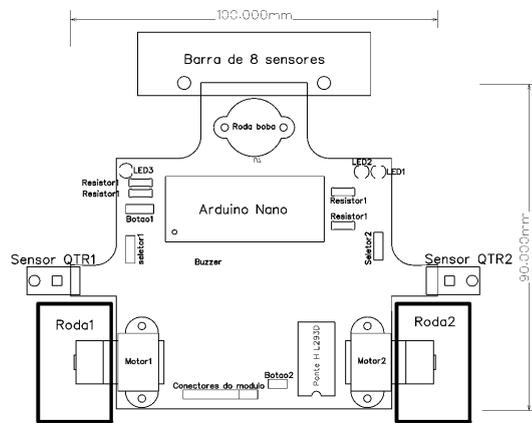
Classificação do componente	Qtd.	Componente
Controlador	1	Arduino Nano genérico
Atuadores	2	Motores DC 3-6v
	3	LED 3mm
	1	Buzzer 12mm
Sensores	1	Barra de 8 sensores QTR
	2	Sensores QTR
	2	Botões
Componentes Auxiliares	1	Ponte H L393D
	4	Resistores
	2	Rodas
	2	Conjunto de pinos seletores
Alimentação	1	Pinos para módulo

Fonte: Autoria própria

O *design* da Placa de circuito impresso (PCI) foi feito no software Easy EDA² a partir da decisão de onde os componentes estariam, ilustrados na Figura 1. O *design* da PCI foi transferido para para a placa de fenolite à mão, em um processo manual de produção de PCIs.

² Software Easy EDA: Disponível em: <https://easyeda.com> - acesso em 19/09/2021.

Fig. 1. Projeto da placa de circuito impresso e posicionamento dos componentes



Fonte: Autoria própria.

Os componentes seletores são formados por três pinos cada, além de um jumper, que dependendo de sua posição faz a ligação dos pinos analógicos do arduino com os sensores laterais ou aos sensores das extremidades da barra de sensores.

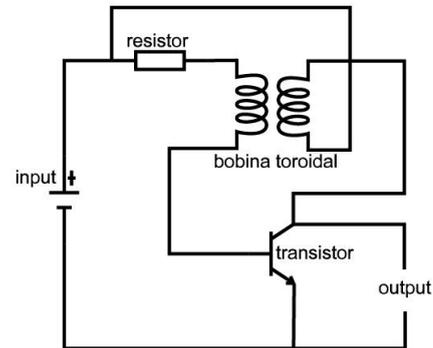
Os pinos para os módulos de bateria são compostos de 8 conexões, 2 pinos para a alimentação do robô, *VIN* e *GND*, e outros 6 pinos conectados direto aos pinos digitais do arduino, caso haja algum atuador ou sensor presente nos módulos. A tensão esperada no pino *VIN* é de 5-6V, os motores e o microcontrolador são alimentados diretamente com essa tensão, porém o restante dos componentes é alimentado pela a saída 5V do arduino, que possui um regulador de tensão interno.

O software presente no microcontrolador é construído na linguagem de programação C++, através da *IDE Arduino*³. Essa programação tem como objetivo interpretar os dados recolhidos pelos sensores e, de acordo com a leitura do ambiente, guiar o robô controlando os motores. O diferencial do software do robô em questão é que será a partir dele que o regulador de tensão será controlado: o microcontrolador irá ler a tensão dos SCs e irá modificar em tempo real o sistema do LJ para que sua eficiência sempre seja a mais alta possível.

B. Módulo dos supercapacitores

Os supercapacitores escolhidos para esse módulo inicialmente foram de 2.7V 4.7F, seriam de 6 a 8 SCs como esses ligados em paralelo para soma de suas capacitâncias. Esse sistema, com 8 supercapacitores, armazenaria cerca de 137 joules. Posteriormente foram substituídos por um SC de 2.7V e 100F, que provêm 364,5 joules. Esta alteração foi feita pois a densidade energética e o formato do SC de 100F é mais conveniente para o uso no seguidor de linha. Além dos SCs, o módulo em questão irá conter o sistema de regulação de tensão. Como mencionado, esse sistema será baseado no circuito LJ, representado na Figura 2.

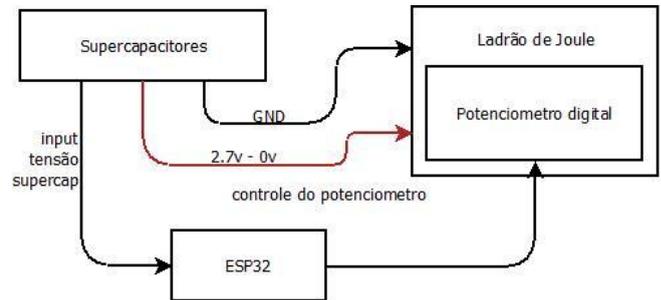
Fig. 2. Esquemático do circuito ladrão de joules.



Fonte: Autoria própria.

O LJ é um circuito simples e com poucos componentes. Sua melhor tensão de operação pode ser alterada de acordo com o tamanho da bobina, ou pelo valor do resistor do sistema. Para que a eficiência durante o funcionamento do robô continue sempre a maior possível será utilizado o próprio microcontrolador para ler a tensão do supercapacitor e a partir dela aplicar uma resistência diferente no LJ. O diagrama do circuito de regulação de eficiência pode ser visto na Figura 3.

Fig. 3. Diagrama do circuito de regulação de eficiência.



Fonte: Autoria própria.

C. Módulo de bateria

O módulo de bateria será expressivamente mais simples que o módulo de supercapacitores, as baterias escolhidas foram duas baterias li-po de 3.7V e 530mAh conectadas em série para duplicar a tensão do sistema. Além das baterias, um regulador step down comercial será utilizado para que a tensão de entrada do robô não ultrapasse 6V. Assim como o robô e o módulo do SC, a construção deste módulo será feita em placa de fenolite com conectores fêmea que se encontram com os pinos macho da base do robô.

IV. RESULTADOS PARCIAIS

Ao desenvolver o robô seguidor de linha relatado anteriormente, foi somado o gasto energético de cada componente para, assim, descobrir qual o gasto total do robô e quanta energia armazenada seria necessária para seu funcionamento. O resultado da soma do consumo dos componentes resultou em cerca de 2W de gasto do seguidor, esse gasto pode ser muito diferente da realidade, pois a corrente dos motores, que são os componentes de maior

³ IDE Arduino: Disponível em:

<https://www.arduino.cc/en/software> - acesso em 19/09/2021.

gasto, varia de acordo com o torque exigido. O cálculo foi feito, portanto, a partir da média da corrente exigida pelos motores. A energia que os supercapacitores de 100F podem armazenar foi dada pela Equação [8]:

$$\frac{C \times V^2}{2} = E$$

C = Capacitância
V = Tensão(Volts)
E = Energia(Joules)

Resultando 364,5 joules. Portanto, podemos determinar que o tempo de funcionamento do robô, em condições ideais, é de 182,25 segundos a partir da equação:

$$\frac{J}{V} = W$$

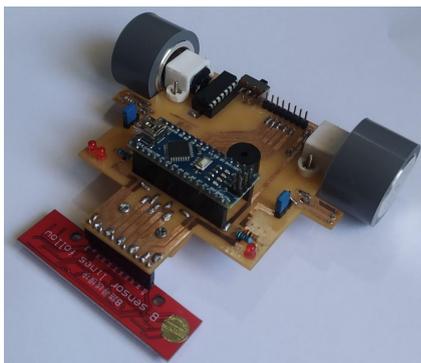
J = Joules
V = Tensão(Volts)
W = Watts

Foi realizado um teste para confirmar a característica de multiplicação de tensão do circuito LJ. O objetivo foi acionar um led com uma tensão inicial inferior ao necessário. Para esse teste foi utilizada uma bobina toroidal de dimensões: interna de 7,5 mm, externa de 12,5 mm e largura de 6,5 mm, com 16 voltas com dois fios de 0,3 mm. Juntamente com a bobina, foi usado um transistor BC337, um resistor de 1k (posteriormente substituído por um potenciômetro de 1k) conectados de acordo com a Figura 3. por fim uma LED de 3v na saída do circuito.

Com esse teste foi possível acender a LED de 3V com a tensão inicial de 1,4V. De acordo com a resistência aplicada no potenciômetro, foi possível determinar que a luminosidade da LED aumentou devido ao aumento de tensão gerado pelo supercapacitor, até que chegasse ao ponto de saturação e deixasse de iluminar por excesso de tensão.

Outro resultado obtido foi o *design* e construção da primeira PCI do robô (Figura 4), contendo os principais componentes e os pinos que se ligam ao microcontrolador, possibilitando a troca do módulo de alimentação. A partir do *design* feito anteriormente, puderam ser determinados parâmetros como dimensão e posição dos componentes nos módulos de alimentação.

Fig. 4. PCI do seguidor construída



Fonte: Autoria própria.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Apesar de depender do desenvolvimento dos módulos para o resultado final do trabalho, os resultados preliminares são positivos e animadores. Até então, os cálculos de gasto e armazenamento de energia sugerem um tempo de operação suficiente para uso dos seguidores de linha. Os cálculos, juntamente com os estudos de eficiência do LJ indicam que seja possível substituir o uso das baterias por SC com o auxílio de um conversor baseado no LJ para o uso completo da energia contida no SC do sistema.

O módulo de bateria será construído e em seguida o software do robô será desenvolvido com ele, antes do fim do desenvolvimento do conversor de tensão. O desenvolvimento do módulo de SC dependerá dos testes com o LJ adaptado e confirmação do seu auto regulamento. Quando os módulos estiverem funcionais será testado e analisado quais as vantagens de cada método de alimentação do circuito.

VI. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o Lucas Murbach Pierin por apoiar nosso projeto e ao IFTECH - IFPR pelo auxílio no desenvolvimento do projeto.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] GONZÁLEZ, “Review on supercapacitors: technologies and materials” in *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 2016.
- [2] BARBOSA, “Análise da viabilidade de uso de supercapacitores em carregadores de baterias com painel fotovoltaico” in *ROCA*, 2017.
- [3] GRBOVIĆ, “Ultra-Capacitor Energy Storage Devices” in *Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems*, 2014.
- [4] KASICHEYANULA, “Adaptive Control Strategy for Ultracapacitor Based Bidirectional DC-DC Converters” in *Ieee Transactions On Industry Applications*, 2019.
- [5] SUJATHA, J *et al.* “A Review on Joule Resurrection Circuit and its Applications” in *International Journal Of Advanced In Management, Technology And Engineering Science*, 2018.
- [6] Greatscott!, “SUPERCAPACITOR Joule Thief”. in <https://youtu.be/jq7cqmDtZdc>, 2016.
- [7] COSTA, “um mini robô móvel seguidor de pistas guiado por visão local” in *Simpósio brasileiro de automação inteligente*, 2003.
- [8] NAVARRO, “SISTEMA AUTÔNOMO DE ILUMINAÇÃO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR” in *repositório unesp*, 2015.