

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

FONTES DE ENERGIA E ALIMENTAÇÃO EM ROBÓTICA MODULAR

Pedro Paulo Sanches Guimarães, pedropaulosg@hotmail.com

Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br

Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, ckoike@unb.br

Thaís França Galembeck, tfrancag@gmail.com

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - DF, 70910-900

Resumo: Robôs modulares são máquinas autônomas com morfologia variável, e portanto possuem uma grande versatilidade e capacidade de operação em diversos ambientes e situações. Essa vantagem é significativa quando o robô é aplicado em locais remotos, como situações de resgate ou inspeção, por exemplo.

Uma das configurações mais estudadas da robótica modular é a apodal, onde o robô possui formato de serpente e a capacidade de realizar movimentos variados, como subir obstáculos ou avançar em tubulações, por exemplo, sem mudança na sua estrutura. Este estudo visa o projeto de um sistema de alimentação que seja capaz de prover maior autonomia energética ao robô. Este trabalho propõe perfis de alimentação de complexidade variada, incluindo sistemas com cabos, com baterias e mistos. Cada perfil é apresentado com exemplos de situações específicas em que são adequados. Assim, são projetados os sistemas para implementação no protótipo de robô modular Erekebot Sigma Lily.

Palavras-chave: robótica modular, alimentação, fonte de energia.

1. INTRODUÇÃO

Uma nova abordagem para o problema de locomoção de robôs, que até então se concentrava em projetar um robô específico para movimentação em um determinado tipo de terreno, foi proposta por Mark Yim e consiste em usar robôs com base em módulos que podem alterar a sua forma, adotando diferentes morfologias de acordo com o terreno onde estão operando (Yim, 1994). Robôs modulares tendem a ser versáteis e robustos, uma vez que são compostos de módulos independentes que podem se rearranjar. O baixo custo financeiro também deve ser objetivo de projetos para esses robôs, a fim de que módulos possam ser repostos, sem prejuízos exorbitantes, em caso de dano, uma vez que eles podem trabalhar em situações de extremo perigo.

Um dos desafios da robótica modular sempre é o suprimento energético. As fontes de alimentação normalmente geram uma tensão padrão enquanto os subsistemas do robô possuem tensões de operação diferentes. Outro problema é em relação ao peso do sistema, baterias, por exemplo, que são muitas usadas nessas aplicações, podem prejudicar, significativamente, robôs de tamanho reduzido com motores pequenos. O projeto deve também levar em consideração a autonomia do robô, relacionada ao tempo máximo de operação, no caso de baterias, ou distância máxima de um fio, no caso de um sistema alimentado diretamente por uma fonte DC.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de alimentação que cumpra os requisitos citados acima. Assim, foram projetados 4 perfis diferentes, com ordem crescente de complexidade de implementação, cada um com suas vantagens e devem ser usados em robôs com finalidades diferentes.

O primeiro perfil soluciona o problema de componentes eletrônicos com tensões de operação diferentes, usando-se regulares de tensão. A partir do segundo perfil, são usadas baterias para proporcionar mais autonomia ao robô. Foram desenvolvidos circuitos com base desses perfis visando a implementação no protótipo de robô modular ErekeBot Sigma, desenvolvido pelo grupo de pesquisa Ereko da Universidade de Brasília.

2. PERFIS DE ALIMENTAÇÃO

2.1. 1º Perfil - Fonte de alimentação DC

Este perfil consiste em uma fonte de alimentação de corrente contínua (DC) sendo conectada diretamente a cada módulo. Contudo, é comum, em diversos dispositivos eletrônicos, que os subsistemas possuem tensões de operação

diferentes. Assim, a partir da especificação dos componentes a serem utilizados pela aplicação é desenvolvido um sistema que alimente cada um com a diferença de potencial adequada. Outro ponto a se observar é a corrente máxima utilizada, a fim de que a fonte seja capaz de suprir com a potência necessária. Assim, cada módulo deve ter um circuito com reguladores de tensão e capacitores, que impedem picos de tensão ou corrente, para, finalmente, distribuir a energia para os demais componentes.

A maioria dos módulos na robótica modular objetiva ser compacto e por isso, é essencial que seus sistemas eletrônicos sejam pequenos e leves, o que é proporcionado por esse perfil. Além disso, como já há o uso de fios para alimentação, é comum serem adicionados outros para comunicação entre o robô e um host, ou mesmo entre os módulos.

Contudo, os fios também podem se tornar um empecilho. Robôs modulares, que tem como um dos objetivos alcançar lugares que o ser humano não pode, operam, muitas vezes, em situações extremas, como em destroços ou mesmo dentro de tubulações. Nesses casos, cabos poderiam se prender em alguma superfície irregular, impedindo assim, o movimento do robô. Outro problema é que cabos dão uma limitação à distância máxima que o robô pode chegar de uma fonte de alimentação, uma vez que a resistência do fio aumenta proporcionalmente ao seu tamanho, logo, para distâncias muito grandes, a dissipação da potência é significativa.

Assim, este perfil pode ser excelente para robôs em fase de testes de sistemas, uma vez que os algoritmos de movimentação podem ser implementados sem que levem em consideração pesos extras de baterias, por exemplo. Contudo, para implementações mais definitivas, que precisam de mais autonomia e alcance, esse perfil não é o mais adequado. Para isso, torna-se necessário o uso de baterias no robô.

2.2. 2º Perfil - Baterias com Recarga Externa

Visando dar maior autonomia ao módulo, este perfil se baseia no uso de baterias para alimentação. Assim, não é necessário o uso de fios conectados ao robô. Contudo, ainda é necessário um circuito para regular a tensão que chega aos componentes. Além disso, deve haver um circuito para monitorar a tensão nas células, uma vez que elas possuem uma tensão mínima, que abaixo dessa, a bateria é danificada permanentemente.

Bateria é um dispositivo que converte a energia química contida em seus materiais ativos para energia elétrica por reações eletroquímicas de redução-oxidação (redox). Elas possuem propriedades diferentes, devido, principalmente, ao material que são feitas. Sua tensão é determinada pelo tipo de material ativo contido nela e a sua taxa de descarga (medida em C, 1C é o mesmo que dizer que é possível consumir toda sua capacidade em uma hora) é restrita à velocidade da reação redox entre seus eletrodos. Sua capacidade é determinada pela quantidade de material ativo dentro da bateria, ou seja, quanto maior e mais pesada uma bateria de um certo material, maior sua capacidade, ela é definida como a quantidade total de eletricidade envolvida no processo eletroquímico e é expressa em ampère-hora(Ah). São divididas em dois grandes grupos, as células primárias e as secundárias. As primeiras são as que fazem uma reação irreversível, já as células secundárias, podem reverter a reação quando corrente elétrica é forçada na direção contrária à de descarga, sendo assim, recarregáveis(Linden,2002).

Considerando-se tais características para a escolha de um tipo de bateria, optou-se pelas baterias de íon-lítio, uma vez que elas possuem umas das maiores densidades energéticas pelo peso e volume dentre as baterias secundárias, assim baterias com maior capacidade são menores e mais leves. A tensão de operação de uma célula dessas baterias está entre 3V e 4,2V (se a tensão cair para menos de 2,8V a bateria pode ser permanentemente danificada) e sua taxa de descarga (entre 1C e 2C) é suficiente para a maioria das aplicações na robótica.

Assim, essas baterias são uma boa escolha para projetos na robótica modular, contudo, recarregá-las requer um série de cuidados para que não aqueçam rapidamente e se tornem inutilizáveis. A recarga dessas baterias de forma errada pode resultar em incêndios e/ou explosões. Um dos algoritmos para isso é o de CC/CV (corrente controlada/tensão constante) que consiste em, basicamente, três fases:

1. Carga lenta - É utilizada para restaurar a carga de células muito descarregadas. Quando a tensão da célula fica abaixo de aproximadamente 2,8 V, a célula é carregada com uma corrente constante de máxima 0.1C. Um temporizador de segurança opcional pode ser utilizado para terminar a carga, se a voltagem da célula não subiu acima do limiar de carga lenta em aproximadamente 1 hora.

2. Carga Rápida - Uma vez que a tensão da célula se elevou acima do limiar de carga lenta, a corrente é elevada para realizar o carregamento rápido. A corrente de carga rápida deve ser inferior a 1.0C. Em alguns carregadores lineares, a corrente é aumentada conforme a tensão de célula aumenta, a fim de minimizar a dissipação de calor no elemento de passe. Um temporizador de segurança opcional pode ser utilizada para terminar a carga se não houver outra conclusão foi atingida em cerca de 1,5 horas a partir do início da fase de carga rápida.

3. Tensão Constante - Começa quando a tensão da célula atinge 4.2V. A fim de maximizar o desempenho, a tolerância de regulação de tensão deve ser melhor que $\pm 1\%$. O carregamento é normalmente terminada por um dos dois métodos: A corrente de carga é monitorada durante esta fase e quando ela diminui para abaixo de 0.07C, ou um utilizado um limite de 2 horas para essa fase, quando o tempo acaba, a bateria deve estar carregada.

O gráfico na "Fig. 1" ilustra o que acontece com a tensão e a capacidade de uma célula de íon-lítio de 1000mAh, bem como a corrente que está sendo mandada pra ela durante seu carregamento. As fases do carregamento ficam claras, sendo a carga lenta de 0h a cerca de 0,25h, a carga rápida de 0,25h à cerca de 1,2h e o resto seria a fase de tensão constante.

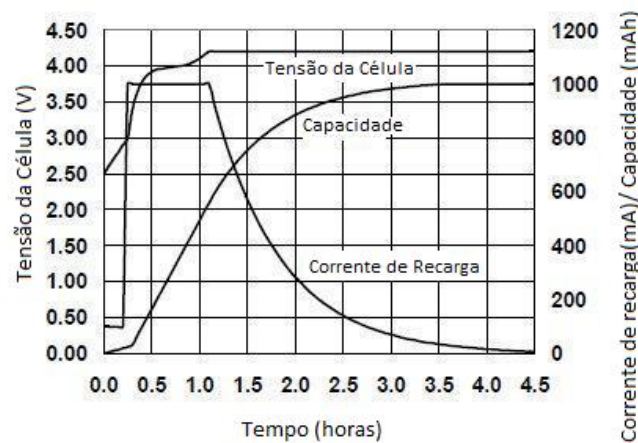


Figura 1. Gráfico ilustrativo do algoritmo CC/CV (Adaptada de Dearborn,2004)

Para recarregar a bateria, é usado um carregador externo com um dispositivo para acoplar as baterias em paralelo, assim, é possível recarregar baterias de vários módulos ao mesmo tempo. Contudo, é necessária a retirada destas do módulo durante esse processo, assim o robô não pode operar durante certo tempo.

As baterias que podem ser de célula única, gerando até 4,2V quando em capacidade máxima, ou com mais células, gerando até 4,2V a mais de tensão a cada célula aumentada. Assim, é possível adaptar esse perfil a necessidade do sistema. Contudo, quando se tem duas mais células, o peso total da bateria aumenta para a uma mesma capacidade, isso pode levar a prejuízos relacionados a movimentação. O peso extra total do robô pode tornar necessária a troca do motor por um mais potente, aumentando, assim, o consumo de um módulo e diminuindo o tempo de autonomia. Se essa diminuição na autonomia for significativa, será necessária a troca da bateria por uma maior, e assim, o problema se torna cíclico, resultando em um dispêndio financeiro com componentes eletrônicos alto.

2.3. 3º Perfil - Baterias com Recarga Interna

Em aplicações mais definitivas, o robô precisa continuar operando mesmo que as baterias se esgotem e para isso, este perfil prevê um circuito embarcado no módulo para recarregá-las, assim, quando carga da bateria estiver baixa, basta conectar o módulo a uma fonte externa. A corrente que chega ao módulo deve ser suficiente para recarregar a bateria e alimentar o resto do sistema ao mesmo tempo. Embora, durante o período de recarga da bateria, o robô volte a ter as limitações de alcance, citadas no 1º perfil, ele não estará inutilizável.

Uma precaução que deve ser tomada na implementação deste perfil está relacionada à superaquecimento, uma vez que a corrente necessária para recarregar uma bateria e suprir o sistema pode ser muito alta para certos circuitos impressos.

2.4. 4º Perfil - Baterias Compartilhando suas Cargas

Neste perfil, o módulo possui um sistema de medição, controle e distribuição de corrente integrado em todo o robô, de modo que um módulo que esteja em uma posição que é necessária a aplicação de mais carga, esgotando a bateria mais rapidamente, possa ser alimentado pela bateria de um módulo com menos consumo. A recarga também deve ser integrada, de modo que apenas um módulo receba toda a carga de uma fonte externa e a distribua para o resto do robô.

As ideias desenvolvidas no perfil anterior também se aplicam a este, de modo que deve haver um circuito para compartilhamento de carga durante o carregamento das baterias. Para robôs com morfologias em que os módulos aplicam força de maneira desigual, resultando em consumos diferentes, este perfil é ideal. Para certos robôs é possível, inclusive, usar baterias com capacidades maiores em certos módulos, afim de alimentar aqueles que aplicam mais força.

Contudo, ao se aumentar a quantidade de módulos, a corrente que flui pelo circuito pode acabar se tornando muito grande, fazendo com que problemas de superaquecimento sejam criados e dificultando o uso de placas de circuitos impresso (PCB).

3. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento de circuitos de alimentação teve como foco atender as necessidades do robô ErekoBot Sigma. A partir do estudo de seus componentes eletrônicos e estrutura, foi desenvolvido um sistema capaz de suprir suas necessidades energéticas, bem como atender a restrições de peso e tamanho.

3.1. ErekoBot Sigma

O ErekoBot Sigma é um protótipo desenvolvido pelo grupo Ereko da Universidade de Brasília. Ele foi projetado para que os módulos se conectem em uma configuração apodal, ou seja, sem patas, em um formato serpentoidal como

mostrado na "Fig. 2". Seu objetivo é realizar um movimento de arfagem ou "pitch-pitch" (González, 2008) segundo uma equação senoidal "Eq. (1)", que gera os ângulos de abertura de cada módulo em função da posição que o módulo está no robô e da fase, o demais parâmetros, detalhados na "Tab. 1" se mantêm constantes para todos os módulos do robô. Além disso, o robô deve ser capaz de identificar obstáculos.

$$\varphi(\phi, i) = 2\alpha \sin(2\pi k / M) \sin \left\{ \phi + 2\pi k / M \left[(i - 1) + d_0 / d \right] \right\} \quad (1)$$



Figura 2. ErekoBot Sigma

Tabela 1. Descrição dos parâmetros, constantes e variáveis

Símbolo	Descrição	Intervalo
k	Nº de Ondulações	$k \geq 1$
α	Ângulo de abertura inicial	$[0^\circ, 120^\circ]$
M	Nº de articulações/módulos	$M > 1$
d	Distancia entre articulações/ tamanho do módulo	$d > 0$
d_0	Tamanho do braço do módulo	$d_0 > 0$
φ	Fase	$(-180^\circ, 180^\circ]$
i	Posição do módulo no robô	$[1, M]$

O módulo tem sua estrutura básica "Fig. 3" feita em PVC (Policloreto de vinila) e em ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e suas dimensões são de 70x70x70mm. Cada módulo possui um microcontrolador baseado no chip ATmega328V, um microservo motor HS-85MG, uma unidade de comunicação wireless XBee Trace Antenna - Series 1, sensores para medida de inércia (acelerômetro ADXL345 e girômetro ITG3200). No módulo frontal existe também um sensor de proximidade infravermelho (Sharp GP2Y0A41SK0F) que identifica qualquer obstrução em seu caminho. Os componentes estão ilustrados na "Fig. 4".

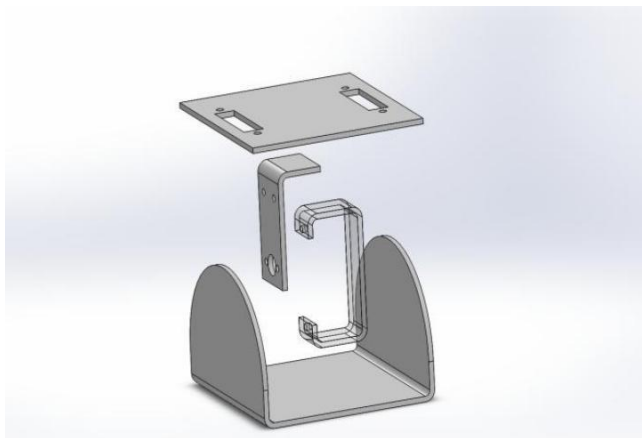


Figura 3. Vista explodida da estrutura do módulo.

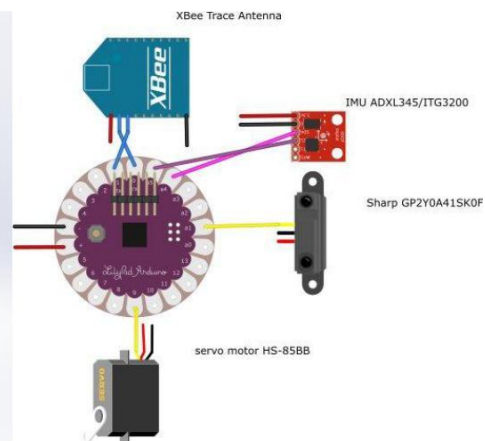


Figura 4. Ilustração dos componentes eletrônicos

Foi estudado, o consumo teórico máximo de cada componente eletrônico, assim como a tensão necessária para seu funcionamento a partir das suas especificações, como na "Tab. 2" abaixo.

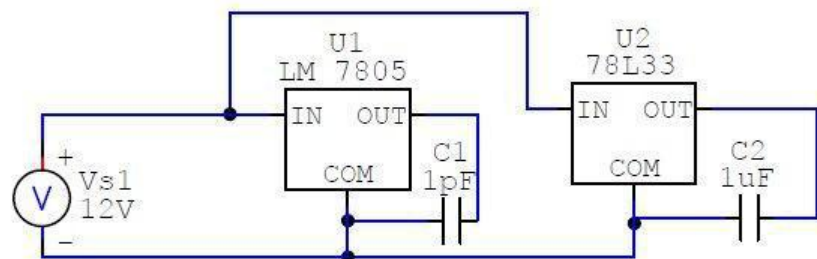
Tabela 2. Tensão de operação e consumo máximo dos componentes eletrônicos

Componente	Tensão (V)	Corrente máxima (mA)	
Servo Motor	5	260	
Controlador	5	50	
IR Sharp	5	20	
IMU ADXL/ITG3200	3,3	6,645	
Xbee	3,3	50	
		386,645	Total

3.2. Implementação

Pela tabela acima, nota-se que são necessárias tensões de 5V e 3,3V para suprir o sistema. Assim, foi projetado, primeiramente, um circuito que mude a tensão de entrada de uma fonte de tensão DC para a exigida pelos componentes.

Foram usados dois regulares de tensão: o 78L33, que converte a tensão para 3,3V, tem uma corrente de saída máxima de 100mA, que é suficiente para os dispositivos que requerem essa tensão e o LM7805, que converte para 5V, e possui uma corrente de saída máxima de 1A. Este último precisa que sua corrente seja consideravelmente maior porque o motor, que é o componente de maior consumo, vai usá-lo. Foram usados, também, dois capacitores para controlar picos de tensão e corrente. O esquemático do circuito está ilustrado na figura.

**Figura 5. Esquemático de circuito para regulação de tensão**

Foi feita uma placa de circuito impresso (PCB) para testar o sistema e foi usada uma fonte DC de 12V para alimentação. A corrente total usada por um módulo foi medida com um multímetro, o resultado foi uma variação entre 80mA (quando o motor estava funcionando livremente) e 300mA (quando aplicada a carga máxima para o torque do motor).

O 2º perfil também foi testado, substituindo a fonte de 12V por duas células de baterias de íon-lítio de 300mAh conectadas em série, resultando em cerca de 7,4V. O peso total das baterias foi de 30g, que quando acopladas ao módulo não tiveram impacto em sua movimentação. Contudo, o processo de retirar as baterias dos módulos e carregá-las é demorado e para aplicações definitivas, também não é o mais adequado.

Para aplicação do 3º perfil é necessário carregar a bateria dentro do módulo com o algoritmo de recarga CC/VC e além disso, alimentar o resto do módulo enquanto a bateria é carregada. Para isso, foi usado o circuito integrado (CI) da Microchip MCP73871, um chip para recarga de baterias de íon-lítio que usa o algoritmo acima e compartilha a carga entre o sistema e a bateria durante carregamento, além disso, ele possui um pino em que pode ser conectado a um termistor NTC para monitoramento da temperatura. O circuito possui também uma proteção caso a tensão da bateria caia para menos de 3V, fazendo com que a bateria pare de fornecer energia. Contudo, o dispositivo é projetado para uso com baterias de apenas uma célula, logo, a bateria escolhida, é uma bateria de íon-lítio de 1000mAh de uma célula. Na "Fig. 6" é mostrado o esquemático do circuito composto do CI, mais alguns componentes para seu uso.

Como a tensão da bateria varia de 3V a 4,2V, é necessário o uso de um outro sistema para que os dispositivos que operam a 5V funcionem, assim é usado o CI da Texas Instruments TPS61200 que fornece até 600mA de corrente com uma saída de 5V. O circuito possui também, proteção contra super aquecimento e contra curto circuito. É ilustrado na "Fig. 7" o esquemático do circuito integrado com o demais componentes necessários para seu uso.

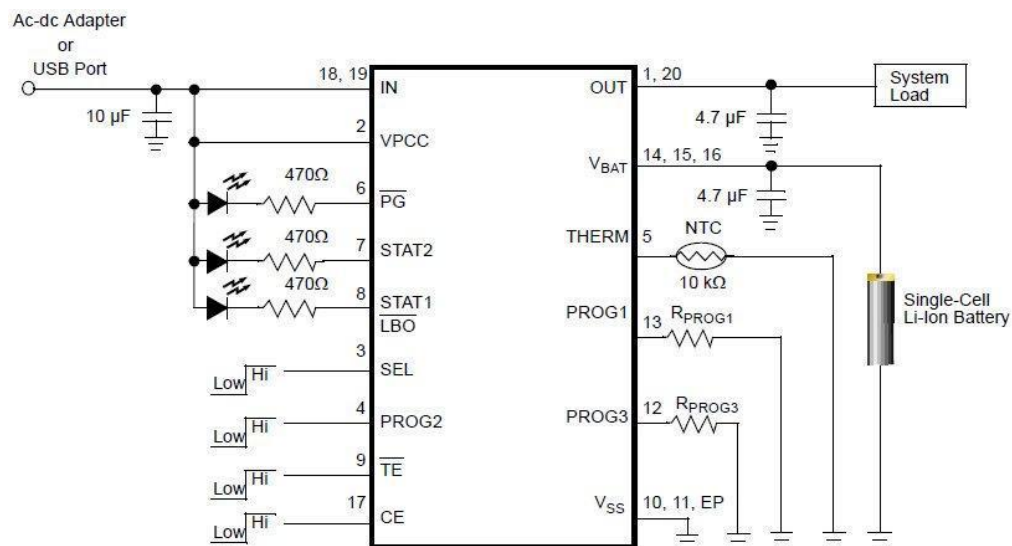


Figura 6. Esquemático de circuito para compartilhamento de carga com chip MCP73871

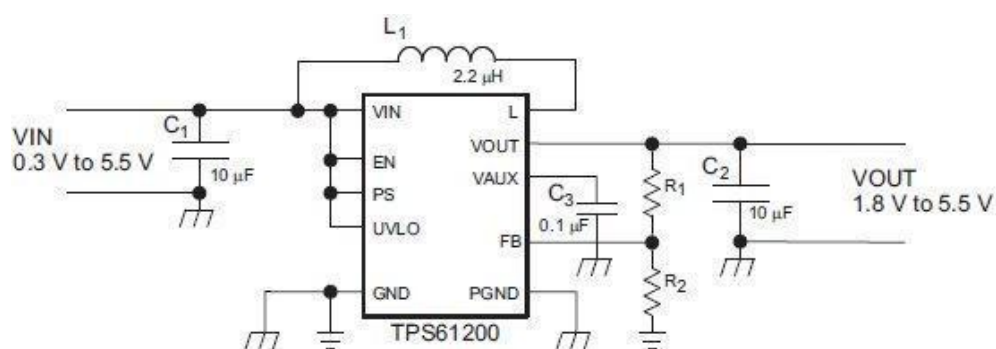


Figura 7. Esquemático de circuito para regulação de tensão para 5V com chip TPS61200

O sistema completo desenvolvido para implementação do 3º perfil consiste em usar uma fonte de tensão DC de 5V alimentando o circuito da "Fig. 6" e onde está escrito "System Load" deve se conectar o sistema da "Fig. 7". Além disso, deve ser colocada um interruptor entre os circuitos, caso seja necessário carregar a bateria, mas não haja interesse em manter o módulo funcionando nesse tempo, assim, basta abrir o circuito manualmente pelo interruptor.

4. CONCLUSÃO

Tendo como objetivo soluções para o problema de suprimento energético, este trabalho propôs perfis de alimentação que se adequam a necessidade de diversos projetos. Eles buscam dar aos sistemas autonomia, praticidade de operação e manutenção e eficiência. Contudo, existem algumas restrições em relação ao peso e tamanho da fonte de energia, quando se trata de baterias, uma vez que essas podem prejudicar significativamente o movimento dos robôs. É notório, também, que essas soluções podem ser aplicadas em projetos fora da robótica modular, mas que tenham requisitos e restrições parecidos, como por exemplo, outras áreas da robótica.

Os perfis possuem ordem crescente de complexidade na implementação pois os mais avançados necessitam das ideias desenvolvidas nos anteriores para funcionar. Porém, isso não significa que o 4º perfil é o melhor em todas as situações. O uso do primeiro perfil é ideal para robôs em fases de testes em laboratórios ou mesmo para robôs em que a limitação de alcance imposta pelo fio vindo da fonte não é um problema, por exemplo. O segundo perfil da mais autonomia e alcance ao módulo uma vez que cabos não são mais necessários. Outra vantagem deste perfil é que os carregadores externos são mais robustos e precisos que os chips usados no terceiro perfil, assim carregam a bateria de forma mais estável e segura, uma vez que elas podem ser carregadas em ambientes isolados.

O terceiro perfil é uma solução mais definitiva, uma vez que ele dá praticidade na operação e manutenção do robô, além disso, o peso do circuito a ser embarcado no módulo não é significativo (cerca de 5 gramas). Logo, é uma solução eficaz para grande parte dos projetos. O quarto perfil é o mais eficiente, uma vez que leva em consideração todo o conjunto de módulos, assim, o robô utilizará toda a capacidade das baterias, podendo ter um tempo de autonomia maior do que em uma situação em que os módulos são completamente independentes. Este último, ainda que não implementado no protótipo atual, foi desenvolvido para protótipos que tenham um consumo energético heterogêneo.

entre os módulos. É possível, por exemplo, robôs com uma câmera no módulo frontal ou sensores que demandam muita corrente para seu funcionamento.

No protótipo ErekoBot Sigma, foram implementados os perfis 1,2 e 3. Uma vez que não houveram diferenças significativas de consumo entre os módulos, o 4º perfil não foi usado. No terceiro perfil, optou-se por uma perda na eficiência ao se usar uma bateria de uma célula - uma vez que o processo de aumentar a tensão é mais ineficiente que o processo de abaixar -, afim de se obter um sistema mais leve e compacto.

Na implementação observou-se que peso e tamanho das baterias são, como esperado, um fator de extrema importância no projeto, uma vez que, ao se usar uma bateria muito pesada, é necessário trocar o motor por um com mais torque, aumentando o consumo do sistema e diminuindo o tempo de autonomia do robô.

4. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao PROIC, DEX, DEG/ UnB e FAP-DF pelo apoio financeiro e institucional.

5. REFERÊNCIAS

- Dearborn, Scott, 2004, " Power Management in Portable Applications: Charging Lithium-Ion/Lithium-Polymer Batteries ", AN947, Microchip.
- Linden, David; Reddy, Thomas B, 2002, " Handbook of Batteries, Third Edition ", New York: McGraw- Hill, Inc.
- MCP73871 datasheet, 2009, "Stand-Alone System Load Sharing and Li-Ion / Li-Polymer Battery Charge Management Controller", Microchip.
- TPS61200 datasheet, 2008, "Low input voltage synchronous boost converter".
- Yim, M., 1994, "Locomotion with a unit-modular reconfigurable robot".
- J. González. , 2008, "Modular Robotics and Locomotion Application to Limbless Robots." Pdd. Universidad Autonoma de Madrid. Madrid.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

POWER SUPPLY IN MODULAR ROBOTICS

Pedro Paulo Sanches Guimarães, pedropaulosg@hotmail.com

Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br

Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, ckoike@unb.br

Thaís França Galembeck, tfrancag@gmail.com

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - DF, 70910-900

Abstract. *Modular robots are autonomous machines with variable morphology, and therefore, they have great versatility and operability in various environments and situations. This advantage is significant when the robot is used in remote locations such as rescue situations or inspection, for example.*

One of the most studied configurations of modular robotics is the apodal, where the robot has a snake shape and the ability to perform various movements, such as climbing obstacles or move in pipes, for example, without changing its structure. This study is about the design of a power supply system in order to provide greater autonomy to the robot. This paper proposes varying complexity power profiles, including systems with cables, batteries and mixed. Each profile is presented with examples of specific situations in which they are appropriate. So, systems for implementation in the modular robot prototype ErekoBot Sigma Lily are designed.

Keywords: *modular robotics, power supply, energy source.*