

MICRO-REDE BASEADA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA CARREGAR BATERIAS DE ROBÔS DE EXPLORAÇÃO

Vinícius Vasconcelos do Rêgo (UFC) – viniciusvdr01@alu.ufc.br

Dalton de Araújo Honório (UFC) - dalton@dee.ufc.br

René Pastor Torrico Bascopé (UFC) - rene@dee.ufc.br

Resumo. Este trabalho apresenta o projeto e montagem de uma micro-rede de energia elétrica usando as energias fotovoltaica e bio-eletromecânica (BEM) vinda da força humana. O sistema bio-eletromecânico é formado por uma bicicleta ergométrica e um gerador de imã permanente de pequeno porte acoplado. Neste sistema a transmissão da força mecânica da bicicleta ao eixo do gerador é feito usando duas polias de diâmetros diferentes e uma correia de borracha dentada. A relação de velocidade de rotação da polia fixada no pedal e a polia no eixo do gerador são de aproximadamente 10. O gerador de imã permanente apresenta as seguintes características: tensão de saída alternada e trifásica, 8 pólos, rotação nominal de 1100 rpm (revoluções por minuto), potência nominal de 420 W. Após ensaios do sistema bio-eletromecânico, verificou-se que o ser humano consegue gerar uma potência elétrica entre 100W e 200W dependendo do preparo físico. Para processar a energia elétrica vinda de 4 módulos fotovoltaicos de 95 W, 18V conectados em série e a energia do sistema bio-eletromecânico, foi usado um conversor CC-CC meia ponte. Com um único conversor não é possível processar energia de ambas as fontes de energia simultaneamente. O sistema bio-eletromecânico deve operar somente a noite ou em situações onde há ausência de radiação solar na superfície dos módulos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia Solar, Micro-Rede com Energias Renováveis, Sistema Bio-eletromecânico

1. INTRODUÇÃO

A ambição do ser humano em explorar e analisar novos territórios sempre foi motivo de grandes descobertas científicas (Granath, 2015). Em muitas ocasiões, equipes de expedição são formadas a fim de investigar determinada região para coletar amostras, mapear possíveis minérios valiosos, realizar reconhecimento topográfico e estrutural, etc. Mesmo com uma equipe de profissionais treinados, existem ambientes hostis nos quais se torna inviável o envio e permanência de uma tripulação humana, sendo necessária a utilização de robôs de exploração autônomos que sejam capazes de cumprir os objetivos desejados (Lluvia, 2021).

O Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica - GPAR do Departamento de Engenharia Elétrica - DEE da Universidade Federal do Ceará - UFC, apresenta em seu laboratório dois robôs autônomos mostrados na Fig. 1 que contém internamente baterias estacionárias de chumbo ácido reguladas a válvula (VRLA- *Valve Regulated Lead Acid*) para suprimento de energia elétrica em condições de operação (UFC, 2015). Essas baterias apresentam uma alta densidade de potência, podendo operar com altas correntes (APC, 2002) e um baixo custo quando comparadas às promissoras baterias de lítio-íon, comumente utilizadas em veículos elétricos (Patry, 2015). Entretanto, a vida útil das baterias de chumbo ácido é muito curta, em torno de 1 ano caso haja uma descarga diária de 80% da sua energia acumulada (Johnson Controls), sendo necessário realizar monitoramento e manutenções periódicas para prolongar a sua vida útil (PowerThru).

Dentre os robôs citados, um deles é movimentado via um motor e uma esteira acionada pelas baterias Fig. 1(a), e o outro através de um motor e rodas giratórias também acionadas pelas baterias Fig. 1(b). A motivação deste trabalho veio por conta de um possível deslocamento para explorações em campo longe da rede de energia elétrica da concessionária. Para suprir a necessidade de energia elétrica em prol de carregar as baterias, propõe-se a utilização de painéis fotovoltaicos portáteis e de fácil transporte, bem como um sistema de energia bio-eletromecânica gerada por uma pessoa pedalando uma bicicleta ergométrica onde fica acoplado um gerador (alternador) de pequeno porte usando um sistema de transmissão formado por duas polias e uma correia dentada, similar ao proposto por (Strzelecki, 2007). Este último sistema é útil como um auxiliar ao primeiro, haja vista que, na natureza, dependendo da estação do ano, nem sempre existe radiação solar chegando à superfície dos módulos fotovoltaicos por conta do bloqueio das nuvens.

Sendo a energia elétrica advinda dos terminais do gerador de pequeno porte alternada e, portanto, não compatível com a tensão do barramento das baterias dos robôs e o nível de tensão e corrente dos painéis também não compatível, é necessário processar a energia proveniente de cada fonte, para tal intuito, é indispensável um conversor estático baseado em semicondutores, elementos magnéticos e capacitores.



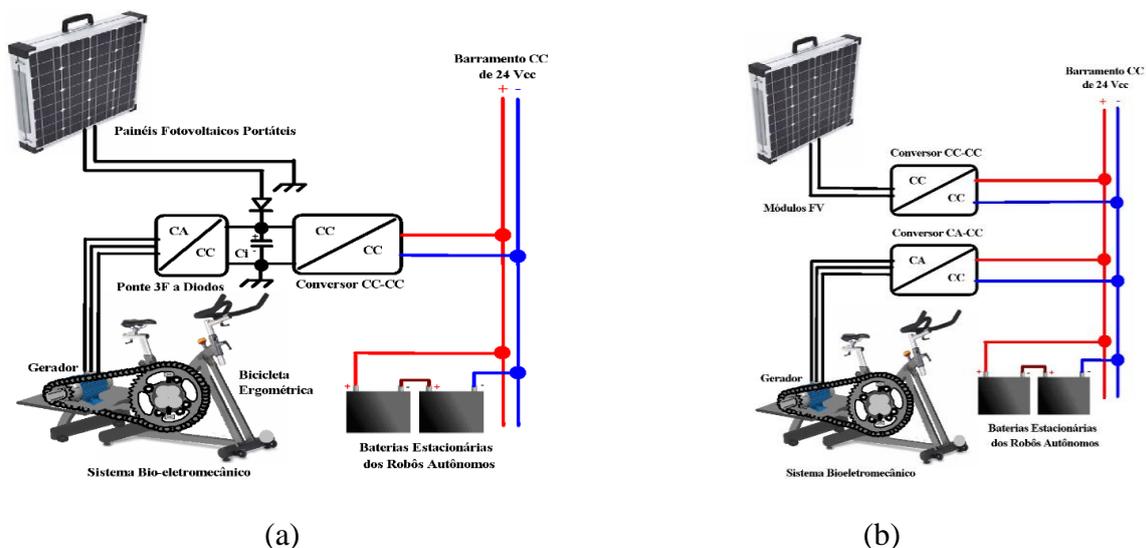
Figura 1. Robôs autônomos do GPAR movimentados por, (a) esteira, e (b) rodas giratórias

2. ESTRUTURA DA MICRO-REDE

2.1 Descrição

A micro-rede desenvolvida possui duas fontes de geração baseadas em energias renováveis, a primeira delas consiste em um sistema de geração composto por uma bicicleta ergométrica acoplada de um gerador de imã permanente que apresenta as seguintes características: tensão de saída alternada e trifásica, 8 pólos, rotação nominal de 1100 rpm (revoluções por minuto) e potência nominal de 420 W. Tal máquina permite a transformação da energia mecânica produzida pelo atleta em energia elétrica, que é nomeado como Bio-Eletromecânico (BEM). A outra forma de geração consiste na utilização de painéis fotovoltaicos de 95W e 18 V portáteis, providos de alça e dobradiças que facilitam o transporte dos mesmos. A Fig. 2 mostra em diagrama de blocos as possíveis arquiteturas para a micro-rede, muito bem como os estágios de processamento de energia envolvidos.

Um primeiro cenário possível é mostrado na Fig. 2(a), em que ambas as fontes de geração compartilham o mesmo conversor CC-CC responsável por manter os níveis de tensão e corrente adequados ao barramento das baterias dos robôs. Esta arquitetura não permite a utilização simultânea de ambas as fontes, tornando o sistema BEM útil como uma alternativa aos painéis fotovoltaicos em situações onde a radiação solar não é suficiente para garantir o carregamento das baterias. Já no arranjo da Fig. 2(b) cada fonte de geração possui um conversor próprio. Essa configuração confere mais flexibilidade à micro-rede, permitindo que ambas as fontes possam ser utilizadas ao mesmo tempo e possibilitando a implementação de algoritmos de busca por pontos de máxima potência (MPPT) ao processamento da energia advinda dos painéis fotovoltaicos, aumentando a eficiência e complexidade do projeto. Nas seções posteriores, é explorado o esquema da Fig. 2(a), escolhido para esta aplicação por conta da simplicidade quando comparado com o outro arranjo e por satisfazer os requerimentos do problema proposto. Já na Fig. 2(c) é mostrado um terceiro possível arranjo em que um conversor de alto ganho de tensão é utilizado para elevar a tensão do barramento CC das baterias de 24 V a 250 V. Essa extensão da arquitetura possibilita a conexão de cargas eletrônicas modernas ao sistema, que de acordo com (Kwasinski, 2011), podem facilmente ser utilizadas com níveis de tensão CC.



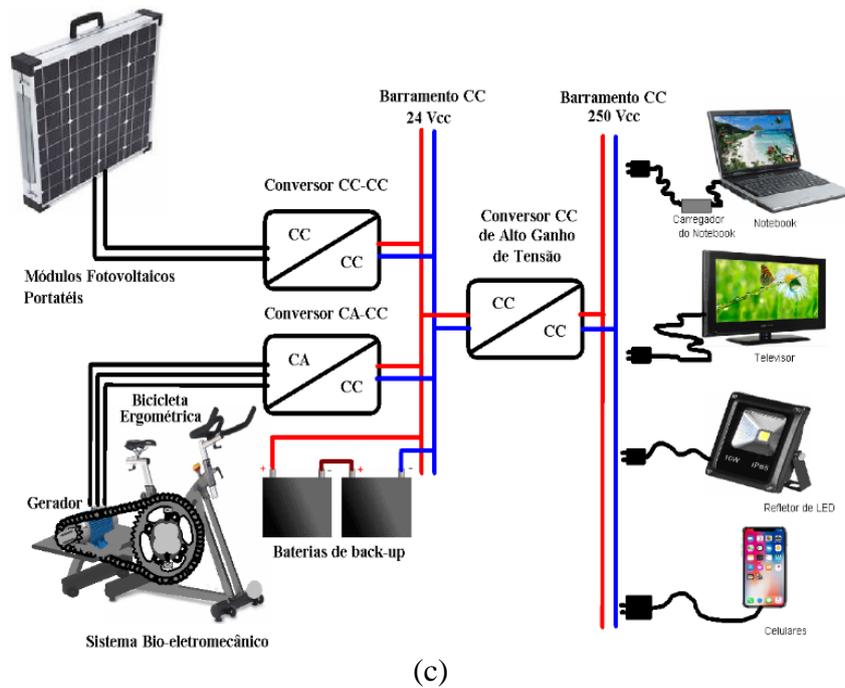


Figura 2. Arquiteturas de micro-redes com processadores de energia de, (a) um estágio, (b) dois estágios, e (c) três estágios.

3. PROCESSADOR DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 Topologia

O processador de energia mostrado na Fig. 3, é composto por uma ponte retificadora trifásica de seis pulsos para transformar a tensão alterada do gerador do sistema Bio-eletromecânico em tensão contínua, um diodo Dpv para garantir que apenas uma das fontes de energia sirvam de entrada para o conversor CC-CC, uma chave liga-desliga e um conversor CC-CC meia-ponte que é responsável pela adaptação da tensão de entrada (barramento CC) à tensão do banco de baterias.

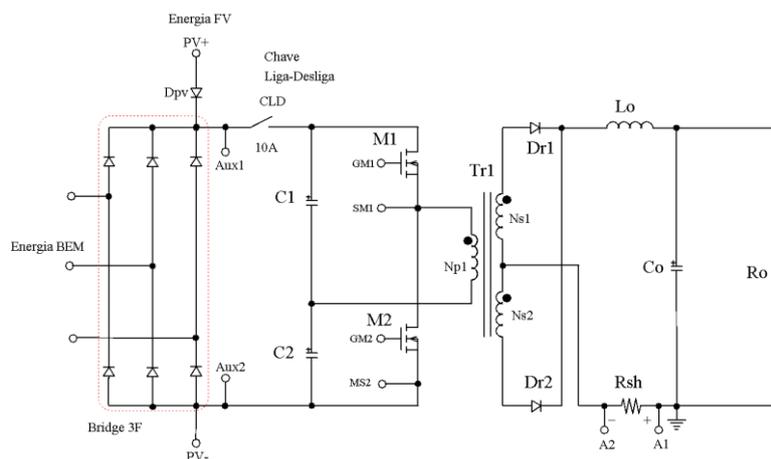


Figura 3. Processador de energia de um estágio.

3.2 Análise Qualitativa

O conversor CC-CC meia ponte foi adotado por conta das seguintes características: (1) transferência de duas parcelas de energia em um período de comutação, (2) isolamento galvânico, e (3) característica de fonte de corrente na saída, o qual se adapta muito bem para carregadores de baterias. Este conversor opera em modo de condução contínua (MCC) usando modulação por largura de pulso (*PWM- Pulse Width Modulation*) gerada pelo circuito integrado UC3525. Na estratégia de controle adotada, as malhas operam de maneira alternada, ou seja, ou uma ou outra. A malha de tensão evita que a tensão nos terminais da bateria em série ultrapasse de 27 V em condições de flutuação, ou seja, 13,5 V por bateria. Por outro lado, a malha de corrente limita a corrente de recarga da bateria, principalmente quando a bateria está

descarregada. Também o valor da corrente de recarga pode ser ajustado para facilitar o esforço físico da pessoa que está pedalando a bicicleta.

4. PROJETO DOS CIRCUITOS DE POTÊNCIA E CONTROLE

4.1 Projeto do Circuito de Potência.

As especificações e considerações para o projeto do conversor CC-CC meia ponte são mostradas na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Especificações.

GRANDEZAS	VALOR
Tensão de entrada nominal	$V_{inom} = 90 \text{ V}$
Tensão de entrada mínima	$V_{imin} = 60 \text{ V}$
Tensão de entrada máxima	$V_{imax} = 150 \text{ V}$
Tensão de saída nominal	$V_{onom} = 24 \text{ V}$
Tensão de saída mínima	$V_{omin} = 21 \text{ V}$
Tensão de saída máxima	$V_{omax} = 27 \text{ V}$
Potência de saída máxima	$P_{omax} = 400 \text{ W}$

Tabela 2 - Considerações

GRANDEZAS	VALOR
Frequência de chaveamento	$f_s = 30 \text{ kHz}$
Ciclo de trabalho máximo	$D_{max} = 0,4$
Rendimento teórico	$\eta = 0,9$
Ondulação de corrente no indutor	$\Delta I_{Lo} = 0,2 \cdot I_{omax}$
Ondulação de tensão na saída	$\Delta V_o = 0,1 \text{ V}$

O dimensionamento dos dispositivos envolvidos no conversor CC-CC meia ponte são realizados de acordo com o pior cenário de corrente, ou seja, correspondente a potência de saída máxima e tensão de saída máxima. Dessa forma, calcula-se a corrente de saída máxima como sendo:

$$I_{omax} = \frac{P_{omax}}{V_{omax}} \quad (1)$$

Levando em consideração a tensão de polarização direta de um diodo retificador $V_F = 1,5 \text{ V}$, a partir do ganho estático, determina-se a relação de transformação, n , do transformador sugerida em (Hart, 2016):

$$n = \frac{V_{omax} + V_F}{D_{max} \cdot V_{imin}} \quad (2)$$

No conversor sob análise, o indutor filtro de saída apresenta o dobro da frequência de chaveamento, onde a mesma é ponderada no projeto do circuito de controle. Para a tensão de entrada máxima, o ciclo de trabalho mínimo é igual a:

$$D_{min} = D_{max} \cdot \frac{V_{imin}}{V_{imax}} \quad (3)$$

Conforme considerado na Tabela 2, a ondulação de corrente no indutor é dada por:

$$\Delta I_{Lmax} = 0,2 \cdot I_{omax} \quad (4)$$

Em posse desses resultados, considerando a queda de tensão no diodo retificador de saída, obtém-se a indutância do indutor filtro de saída:

(b) Projeto das Malhas de Corrente e Tensão• **Malha de Tensão**

Para implementação da malha de tensão, usando o circuito integrado UC3525A, adota-se a amplitude da onda portadora dente de serra entre pico a pico igual a $V_D=2,4$ V, e a tensão de referência do compensador de tensão igual a $V_{refv} = 2,5$ V. Baseado nos valores do circuito de potência e os parâmetros indicados, as funções de transferência são:

$$H_V(s) = \frac{V_{refv}}{V_{omax}} \quad (8)$$

$$F_m(s) = \frac{1}{V_D} \quad (9)$$

$$G_v(s) = \frac{v_o(s)}{d(s)} = V_{imax} \cdot n \cdot \frac{s \cdot C_o \cdot R_{se} + 1}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot \left(\frac{R_{se}}{R_o} + 1 \right) + s \cdot \left(\frac{L_o}{R_o} + C_o \cdot R_{se} \right) + 1} \quad (10)$$

$$F_{TLAsc_v}(s) := G_v(s) \cdot F_m(s) \cdot H_V(s) \quad (11)$$

Usando a Eq. (11) é traçado o diagrama de Bode, mostrado na Fig. 5.

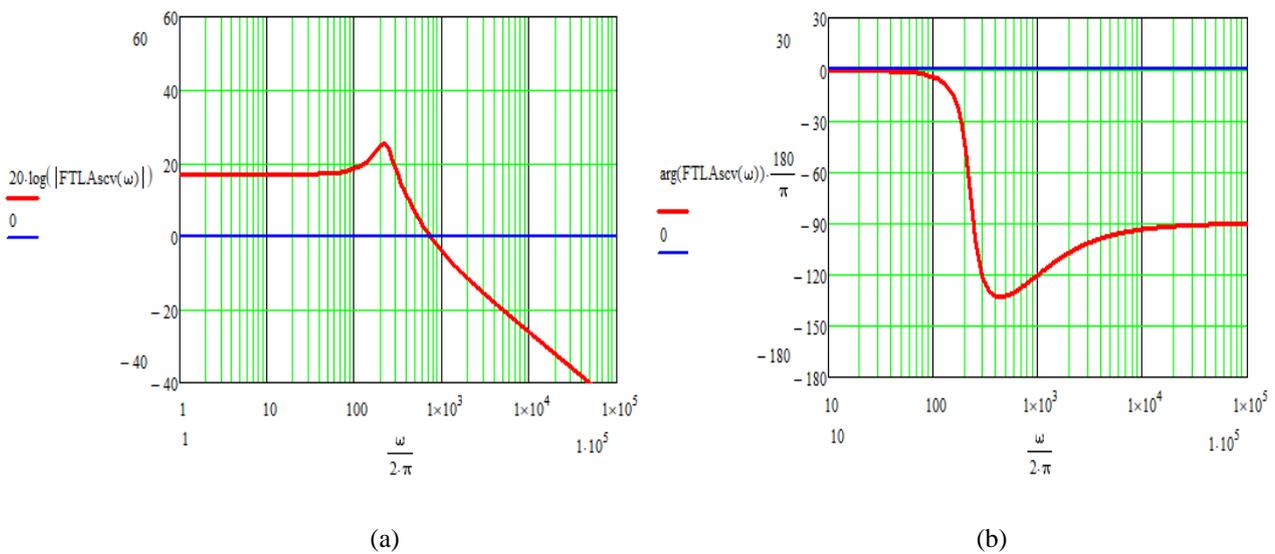


Figura 5. Diagrama de Bode da $F_{TLAsc_v}(s)$, (a) ganho, (b) fase.

Para o projeto escolhe-se uma frequência de cruzamento igual a:

$$f_{cv} = \frac{2 \cdot f_s}{10} = 6 \text{ [kHz]} \quad (10)$$

A partir da Fig. 5, para a frequência de cruzamento escolhido, o ganho é $A_v = -21$ dB e o ângulo fase é dado por $P = -96,2^\circ$ elétricos, significando que o compensador deve proporcionar um ganho de 21 dB e o ângulo P fase serve para determinar o avanço de fase α . Para este projeto é adotada a margem de fase de $MF = 60^\circ$ elétricos, dessa forma, calcula-se o avanço de fase necessário como sendo de $66,2^\circ$ elétricos a partir da eq. (11) (Lei, W.H., 2004).

$$\alpha = MF - P - 90 \quad (11)$$

O avanço de fase em função do fator k é dada pela Eq. (12) e sua curva é mostrada na Fig. 6.

$$\alpha(k) = \left(2 \cdot \text{atan}(k) - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (12)$$

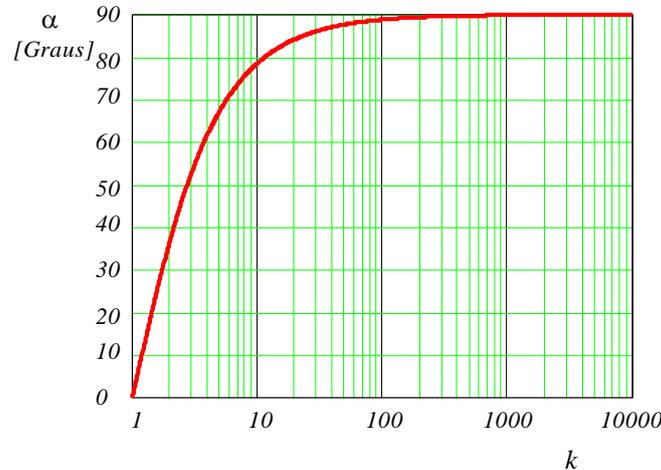


Figura 6. Curvas de avanço de fase em função do fator k .

Como o valor $\alpha=66,2^\circ$ elétricos é menor que 90° elétricos, para implementar o compensador da malha de tensão é suficiente o compensador Tipo 2 ou proporcional-integral com filtro.

Desde a curva da Fig. 6, para $\alpha=66,2^\circ$ o fator é igual a $k=4,7$. Portanto, segundo a teoria apresentada em (Lei, W. H.; 2004), foi realizada o projeto do compensador de tensão, cujos valores dos componentes estão junto ao circuito da Fig. 7.

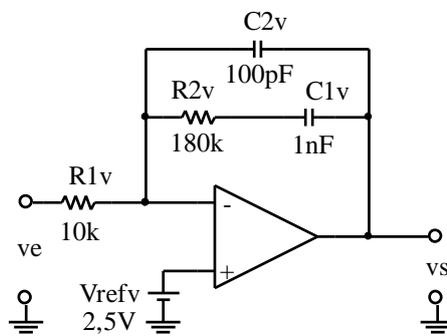


Figura 7. Compensador Tipo 2 ou PI com filtro.

- **Malha de Corrente**

Para implementar a malha de corrente, as funções de transferência envolvidas são listadas a seguir:

$$H_i(s) = 0,17 \quad (13)$$

$$G_i(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{V_{\text{imax}} \cdot n}{R_o} \cdot \frac{s \cdot C_o \cdot R_{se} + 1}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot \left(\frac{R_{se}}{R_o} + 1 \right) + s \cdot \left(\frac{L_o}{R_o} + C_o \cdot R_{se} \right) + 1} \quad (14)$$

$$FTL_{\text{Asci}}(s) = G_i(s) \cdot F_m(s) \cdot H_i(s) \quad (15)$$

Usando a Eq. (15) é traçado o diagrama de Bode, e o mesmo é mostrado na Fig. 8.

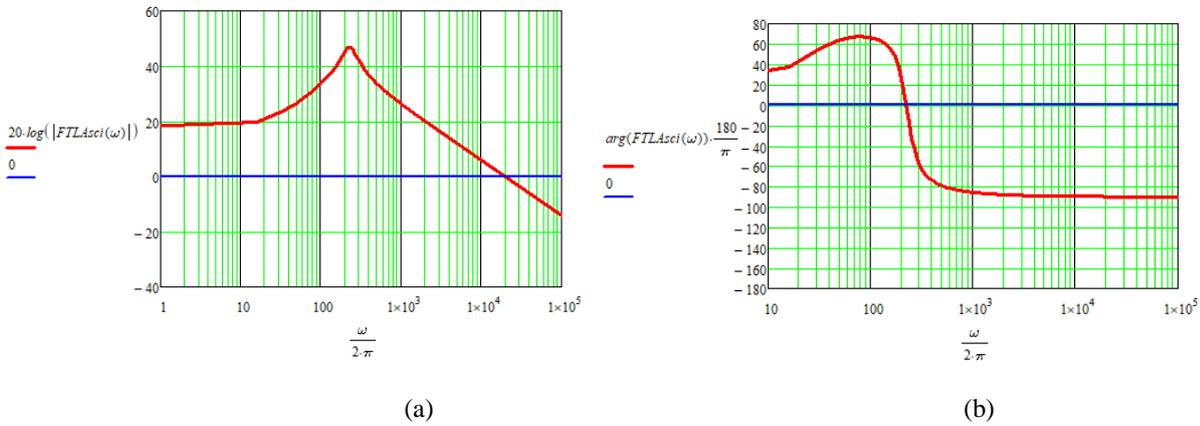


Figura 8. Diagrama de Bode da FTLAsci(s), (a) ganho, (b) fase.

Para o projeto escolhe-se uma frequência de cruzamento igual a:

$$f_{ci} = \frac{2 \cdot f_s}{4} = 15 \text{ [kHz]} \quad (10)$$

A partir da Fig. 8, para a frequência de cruzamento escolhida, o ganho é $A_i = 2,4 \text{ dB}$, e o ângulo de fase é igual a $P = -89,6^\circ$ elétricos, significando que o compensador deve proporcionar um ganho de $-2,4 \text{ dB}$ e o ângulo de fase serve para determinar o avanço de fase α para a malha de corrente utilizando a eq. (11). Para este projeto é adotada a margem de fase de $MF = 60^\circ$ elétricos e o valor do avanço de fase necessário é $\alpha = 59,6^\circ$ elétricos.

Como o valor de α é menor que 90° elétricos, para implementar o compensador da malha de corrente é suficiente o compensador Tipo 2 ou proporcional-integral com filtro.

Desde a curva da Fig. 6, para $\alpha = 59,6^\circ$ o fator é igual a $k = 3,7$. Portanto, segundo a teoria apresentada em (Lei, W. H.; 200), foi realizada o projeto do compensador de tensão, cujos valores dos componentes estão junto ao circuito da Fig. 9.

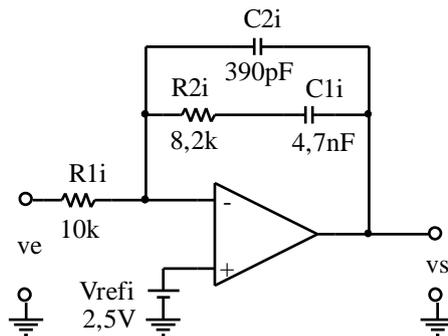


Figura 9. Compensador Tipo 2 ou PI com filtro.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

(a) Fotografias da Micro-rede

A Fig. 10(a) mostra a micro-rede com destaques das duas fontes de energia, o conversor meia-ponte e as baterias. Já na Fig. 10(b) é mostrada a facilidade de carregar dois painéis providos de uma alça. Em especial, as dobradiças implementadas no painel permitem instalá-los conforme mostra a Fig.10(a), mesmo assim, ainda é necessário ajustar o painel conforme o ambiente para aproveitar melhor a radiação solar.

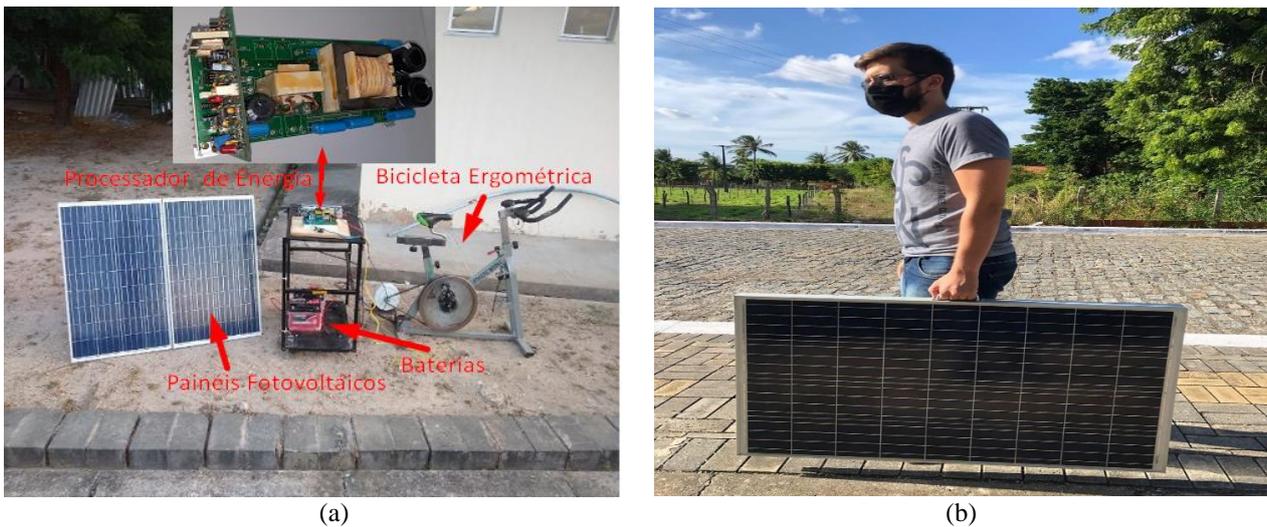


Figura 10: (a) Sistema micro-rede; (b) dois painéis fotovoltaicos sendo transportados.

(b) Usando as Energias BEM e Fotovoltaica

A Fig. 11(a) e (b) mostram os resultados experimentais usando as energias, bio-eletromecânica (BEM) e fotovoltaica. Para os ensaios a referência da malha de corrente foi ajustada para proporcionar uma corrente de saída ou de recarga de 7 A. Em ambos os casos são mostrados, a tensão de barramento CC, a corrente injetada nas baterias e a tensão sobre os terminais das baterias.

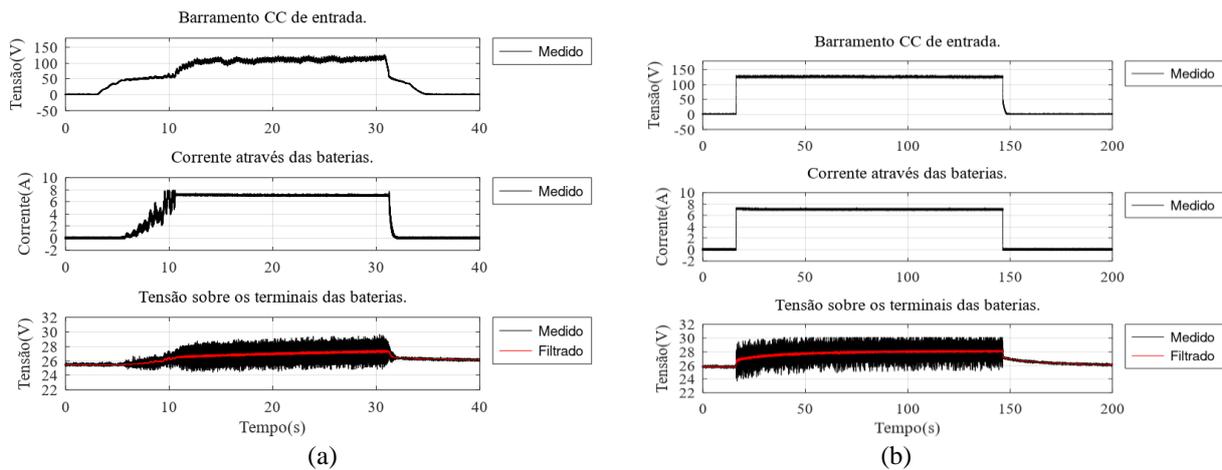


Figura 11: Formas de onda de tensão e corrente usando energias, (a) bio-eletromecânica, (b) fotovoltaica.

Conclusão

Usando as energias renováveis, bio-eletromecânica (BEM) e fotovoltaica foi possível desenvolver uma micro-rede para carregar baterias de chumbo-ácido ou de lítio-ion. O processamento de energia elétrica de ambas as fontes foi realizado usando um único conversor CC-CC meia ponte (*half-bridge*). Com esta opção não é possível processar a energia de ambas as fontes simultaneamente. Nesta aplicação a energia prioritária é a fotovoltaica e a bio-eletromecânica é somente complementar para as situações quando não há radiação solar sobre os módulos fotovoltaicos. A fonte fotovoltaica é composta por quatro módulos de 95 W/18 V conectados em série, e para facilitar seu transporte a regiões remotas, cada par de módulos foi ligado mecanicamente com dobradiças. Para controlar o fluxo de potência das fontes citadas para a bateria, foram usadas duas malhas de controle, uma de corrente e outra de tensão. A malha de corrente, conforme a referência V_{refi} , ajusta a corrente de saída conforme a capacidade de Ah das baterias e a força física do atleta que pedala a bicicleta ergométrica. Por outro lado, a malha de tensão é responsável em proteger as baterias da tensão recomendada pelo fabricante, no projeto realizado em 27 V para duas baterias em série de 12 V.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq por proporcionar recursos financeiros através da Chamada Pública Universal 01/2016, Processo No. 426972/2016-3, que possibilitou o projeto de pesquisa “Estudo, Projeto e Montagem de Micro-rede Baseado em Energias Renováveis para Carregar Baterias de Robôs Autônomos”. Também ao Laboratório de Condicionadores de Energia – LCE do DEE-UFC.

REFERÊNCIAS

- Granath, B. 2015, O . The Human Desire for Exploration Leads to Discovery. NASA. <https://www.nasa.gov/feature/the-human-desire-for-exploration-leads-to-discovery>
- Hart, D. W. 2016. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. McGraw Hill Brasil.
- Kwasinski, A. 2010. Quantitative evaluation of DC microgrids availability: Effects of system architecture and converter topology design choices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 835-851. American Power Conversion, “Battery Technology for Data Centers and Network Rooms: VRLA Reliability and Safety”, Rev 2002-1. Johnson Controls - Divisão de Baterias, “Catálogo Técnico”. 6 p.
- Lei, W. H., & Man, T. K. 2004. A general approach for optimizing dynamic response for buck converter. *Proc. Application notes Onsemi Conductors*.
- Lluvia, I., Lazkano, E., & Ansuategi, A. 2021. Active Mapping and Robot Exploration: A Survey. *Sensors*, 21(7), 2445.
- PATRY, Gaetan et al. Cost modeling of lithium-ion battery cells for automotive applications. *Energy Science & Engineering*, v. 3, n. 1, p. 71-82, 2015.
- PowerThru, “LEAD ACID BATTERY working – LIFETIME STUDY”. 13 p.
- R. Strzelecki, M. Jarnut, G. Benysek, “Exercise Bike Powered Electric Generator for Fitness club Appliances”, in European Conference on Power Electronics and Application. 2007, pp 1-8.
- Universidade Federal do Ceará. “Robô da NASA será aperfeiçoado no Pici”. *Jornal da UFC* N° 69 - Novembro de 2015 - Ano 12.

MICROGRID BASED ON RENEWABLE ENERGY TO CHARGE EXPLORATION ROBOTS BATTERIES

Abstract. This paper presents the project and mounting of a electric energy microgrid using photovoltaic and bio-eletromechanic energy provided by human force. The bio-eletromechanic system is composed of an ergometer bike and a small size coupled permanent magnet generator. In this system, the mechanical force of the bicycle is transmitted to the generator axis by two pulleys with diferente diameter and a toothed belt. The rotational velocity relationship of the pulley on the fixed pedal and the pulley on the generator axis is approximately 10. The permanent magnet generator presents the following characteristics: Three- Phase and alternated output voltage, 8 poles, nominal rotation of 1100 RPM (Revolutions Per Minute), nominal power of 420 W. After experiments of the bio-eletromechanic system, was verified that a human can generate between 100 W and 200 W depending on the physical preparation. To process the eletrical energy from the four photovoltaic modules of 95 W, 18 V conected in series and the energy from the bio-eletromechanic system, was used a Half-Bridge DC-DC converter. With a single converter it is not possible to process the energy from both sources simuntaneously. The bio-eletromechanic system should operate only at night or in a situation where there is lack of solar radiation on the surface of the photovoltaic modules.

Key words: Solar Energy, Renewable Energy Microgrid, Bio-Eletromechanic System