

SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA USANDO ENERGIA FOTOVOLTAICA

Emerson Neto da Silva (UFC) - silva.ens10@gmail.com

Rene Pastor Torrico Bascope (UFC) - rene@dee.ufc.br

Resumo:

Este artigo propõe uma topologia de conversor CC-CC boost de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados (CCTE), viável para aplicação em sistemas de bombeamento de água a partir de energia fotovoltaica. Uma alternativa a aplicações em que se deseja um aumento de nível de tensão na saída é a utilização de conversores CC-CC em cascata, porém esta solução alcança baixa eficiência devido a quantidade de estágios de processamento de energia. Entretanto, a topologia apresenta algumas vantagens como, alto ganho de tensão, característica Boost que permite facilmente incorporar o algoritmo de MPPT, o indutor de entrada opera com o dobro da frequência de chaveamento que favorece na redução do peso e do volume, e regula a tensão de barramento. Uma análise qualitativa e quantitativa é apresentada para ambos os estágios de processamento de energia elétrica. A simulação do sistema completo em regime permanente foi realizada mediante o software Psim. O artigo apresenta uma alternativa com a possibilidade de uso de um arranjo fotovoltaico com poucos módulos, enquanto os sistemas comerciais, normalmente, usam muitos módulos em série para atingir a tensão adequada dos inversores, alternativa viável somente para motobombas com potências mais elevadas. Os resultados de simulação obtidos demonstram que o conversor apresenta uma boa performance em termos de eficiência quando comparada a conversores clássicos.

Palavras-chave: *Energia Fotovoltaica, Bombeamento de Água, Conversor CC-CC Boost de Alto Ganho de Tensão.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de inversores e outros equipamentos de eletrônica de potência*

SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA USANDO ENERGIA FOTVOLTAICA

Emerson Neto da Silva – silva.ens10@gmail.com

Rene Pastor Torrico Bascope – rene@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Este artigo propõe um circuito eletrônico para acionamento de uma motobomba submersa usando energia fotovoltaica. O circuito eletrônico está composto por um conversor CC-CC Boost de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados, chamado na literatura como "conversor CC-CC boost AGT-CCTE", e um inversor trifásico na configuração tradicional. O conversor CC-CC Boost AGT-CCTE realiza a adaptação da tensão do arranjo fotovoltaico a tensão do barramento CC que alimenta o inversor trifásico em ponte. Outras características do conversor CC-CC Boost AGT-CCTE são: operação com frequência fixa (PWM), realiza a busca do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracking-MPPT) e drena corrente com baixa ondulação do arranjo fotovoltaico, o qual facilita a busca do MPPT. Uma análise qualitativa e quantitativa é apresentada para ambos os estágios de processamento de energia elétrica. A simulação do sistema completo em regime permanente foi realizada mediante o software Psim. O artigo apresenta uma alternativa para a possibilidade de uso de um arranjo fotovoltaico com poucos módulos, enquanto os sistemas comerciais, normalmente, usam muitos módulos em série para atingir a tensão adequada dos inversores, alternativa viável somente para motobombas com potências mais elevadas. Os resultados de simulação obtidos demonstram que o conversor apresenta uma boa performance em termos de eficiência quando comparada a conversores clássicos.

Palavras-chaves: Energia Fotovoltaica, Bombeamento de Água, Conversor CC-CC Boost de Alto Ganho de Tensão.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento na demanda de água em áreas rurais e locais isolados, tem contribuído para aumento do interesse no uso de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água. Em diversos países em desenvolvimento o déficit hídrico se torna um dos grandes problemas enfrentados pela população, onde a melhoria das condições de vida nessas áreas está ligada à busca de soluções adaptadas a esse problema como proposto por Nath e Mandal (2016).

Segundo Mergoul et al. (2018) um sistema fotovoltaico (PV) de bombeamento de água é um sistema que consiste no transporte de água da sua fonte natural para o ponto de uso baseado em um sistema composto por, módulos fotovoltaicos, conversor estático para controle de fluxo de potência, e uma motobomba. Os módulos fotovoltaicos são conectados a um conversor (CC-CC ou CC-CA) responsável pela alimentação da motobomba que converte a energia elétrica em energia potencial hidráulica. A Fig.1 adaptada do Mergoul et al. (2018) mostra o diagrama referente a esse processo.

Diversos estudos relacionados a sistemas de bombeamento de água usando energia fotovoltaica tem sido desenvolvidos. Segundo Ferreira Filho et al. (2018) muitas propostas de sistemas de bombeamento incluem a utilização de baterias, porém o custo elevado das baterias, aliada à sua relativa baixa durabilidade, inviabilizam a aplicação em comunidades incapazes técnica e financeiramente

de repor o banco de baterias a cada dois anos por exemplo. Visando o aumento da eficiência do processo, Singh et al. (2018) propõe um sistema fotovoltaico autônomo de bombeamento de água usando motor de indução com sensores reduzidos, na qual apresenta um esquema de controle inerentemente imune ao erro na estimativa da constante da bomba. Já Khan et al. (2019), analisa o desempenho de acionamento de motor de indução para bombeamento de água alimentada por matriz fotovoltaica de único estágio.

Seguindo a mesma linha de pesquisa de outros autores, este trabalho propõe o uso de uma topologia de conversor de energia denominada de conversor CC-CC Boost de alto ganho de tensão acoplado a um inversor trifásico em ponte completa, como mostra a Fig.2. Pelo fato do conversor CC-CC Boost clássico apresentar limitações de ganho de tensão, Araujo et al. (2010), propôs o conversor CC-CC Boost AGT-CCTE, que nesta aplicação é usado como o estágio de entrada do sistema proposto. O conversor CC-CC citado adapta a tensão do arranjo fotovoltaico a tensão necessária na entrada do inversor, e realiza a busca do ponto de máxima potência.

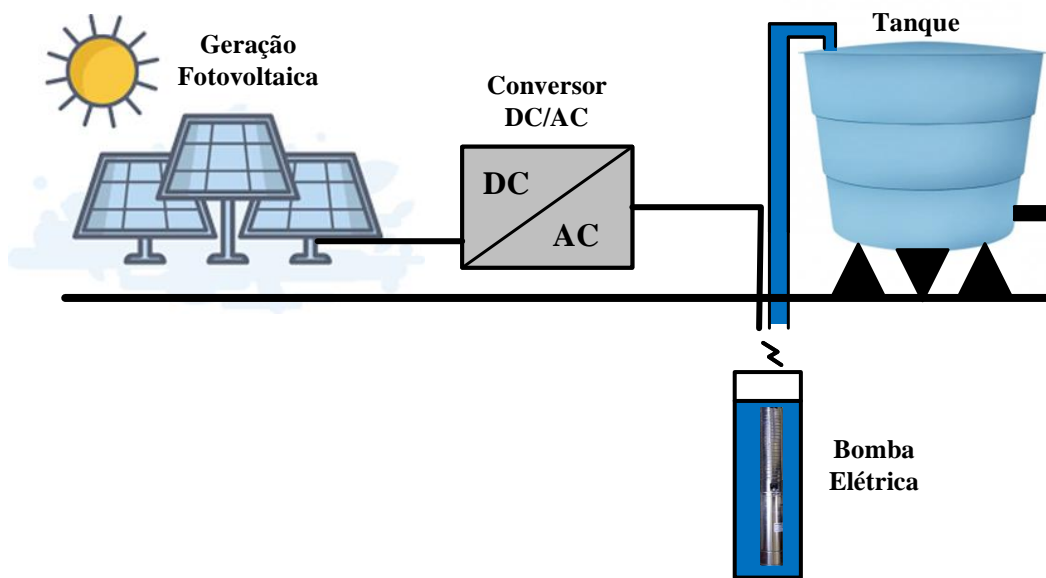


Figura 1 – Diagrama ilustrativo do sistema de bombeamento de água com energia fotovoltaica.

2. CIRCUITO DE ACIONAMENTO PROPOSTO

2.1. Topologia

O circuito de acionamento, é composto pelo conversor CC-CC Boost AGT-CCTE e pelo inversor trifásico, como mostra a Fig. 2. O primeiro estágio é composto pelos seguintes componentes: indutor L_b , diodos retificadores D1-D6, chaves controladas S1 e S2, transformador Tr dada por dois enrolamentos primários e um enrolamento secundário, capacitores filtro C1 e C2. Por outro lado, o segundo estágio, é composto pelas chaves controladas S3-S8, indutores filtro Lf1, Lf2 e Lf3, capacitores filtro Cf1, Cf2 e Cf3. A carga, trata-se de um motor de indução trifásico ligada em delta para possibilitar sua alimentação com tensão de linha de 230 V CA.

2.2. Descrição do Conversor CC-CC Boost AGT-CCTE

O conversor CC-CC Boost AGT-CCTE opera em modo de condução contínua (MCC) controlado por uma modulação por largura de pulso (*PWM-Pulse Width Modulation*). A modulação apresenta pulsos com razão cíclica maior que 0,5 e deslocados em 180 graus elétricos entre si. Com a modulação citada, o indutor opera com o dobro da frequência de comutação ou chaveamento, o qual

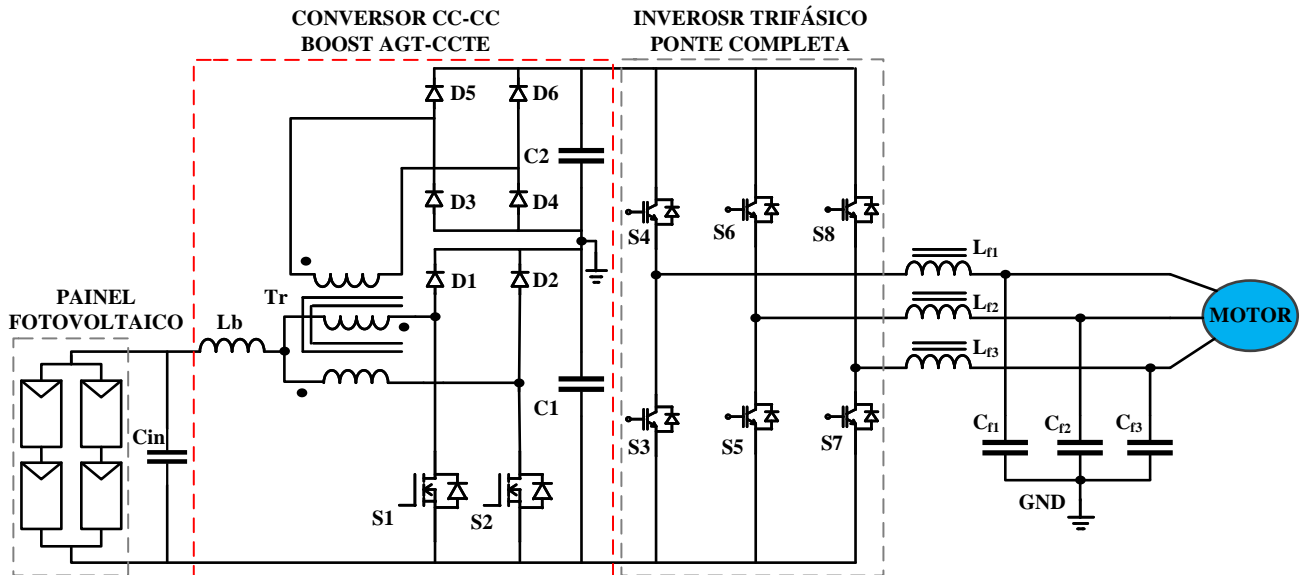


Figura 2 – Topologia do sistema proposto

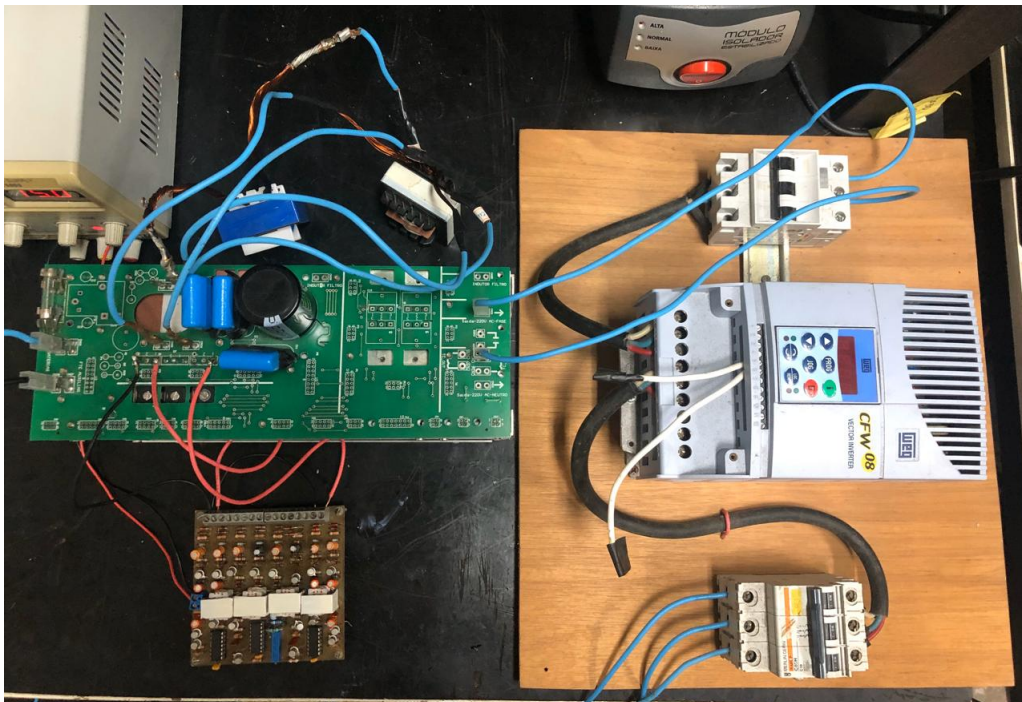


Figura 3 – Fotografia do protótipo

permite reduzir pela metade o peso e o volume em relação ao indutor de um conversor CC-CC Boost clássico.

Durante um período de chaveamento, o conversor apresenta quatro etapas de operação, sendo duas de armazenamento de energia no indutor L_b , e duas etapas de transferência de energia ao barramento onde está ligada a carga (inversor). Os detalhes da análise são encontradas em Araujo et al. (2010).

Outra característica a destacar neste conversor é a tensão máxima sobre as chaves $S1$ e $S2$, que são grampeadas pela tensão sobre o capacitor $C1$, que chega a ser a metade da tensão de barramento total. Isso implica em usar MOSFETs com menor valor de tensão, e como consequência com menor valor de resistência do canal $R_{DS(on)}$, proporcionando em uma redução considerável das perdas por

condução.

A razão cíclica, D , deve ser adotada entre 0,5 e 0,7, valores acima do valor máximo não são recomendados por causa das perdas por condução dos MOSFETs S1 e S2.

2.3. Inversor de Tensão

No barramento CC-CC é conectado um inversor de tensão trifásico na configuração em ponte completa que é responsável pela transformação da tensão contínua em tensão alternada, constituído basicamente por seis chaves IGBTs.

A estratégia de modulação aplicada a este inversor trata-se de modulação por largura de pulso senoidal (SPWM), na qual é comparado um sinal portador triangular com três sinais moduladores senoidais defasados em 120 graus elétricos.

A modulação descrita proporciona uma tensão bipolar entre o ponto meio dos braços e o terminal de neutro simbolizado com GND. Desta maneira, o filtro LC de saída deve ser dimensionada para mitigar harmônicas de tensão acima da frequência de chaveamento e deixar sintetizada a frequência de 60 Hz. Como foi dito anteriormente, o filtro LC de saída do inversor tem a finalidade de mitigar as harmônicas de alta frequência que podem causar perdas por efeito Joule no motor de indução da motobomba de água.

Os critérios básicos de dimensionamento obedecem as recomendações dadas por Martins e Barbi (2005), onde a frequência, f_o , do filtro LC deve ser sintonizado baseado nos seguintes critérios: a frequência de entrada do filtro LC é igual a de frequência de chaveamento, f_s . Normalmente, a frequência de cruzamento da malha de tensão (f_{cv}) é adotado $f_{cv} < 1/4 * f_s$, e a frequência, f_o , do filtro deve ser alocado entre $1/5 * f_{cv}$ a $1/10 * f_{cv}$.

3. EXEMPLO DE PROJETO DOS ESTÁGIOS DE POTÊNCIA

3.1. Especificações da Carga

A carga é uma motobomba trifásica submersa integrada. Segundo o fabricante, a motobomba usa um motor de indução trifásico de dois polos. Isso implica que para frequência de 60 Hz a rotação do eixo do motor é aproximadamente 3600 rpm (revoluções por minuto). O detalhe físico da motobomba é mostrada na Fig.4 e suas especificações na Tab.1.



Figura 4 – Motobomba submersa

Tabela 1 – Especificações da motobomba.

Características	Valores
Modelo	BMSAF404
Potência do motor	0,75 CV
Tensão trifásica nominal	230 V
Frequência de operação	60 Hz
Vazão máxima	4,16 m ³ /h
Rotação	3450 rpm
Peso	11,45 kg

O motor trifásico da motobomba está conectado em delta para operar com uma tensão trifásica (tensão de linha) de 230 V. Usando um medidor de impedância foi caracterizada sua composição, onde seus parâmetros elétricos estão apresentados na Tab.2.

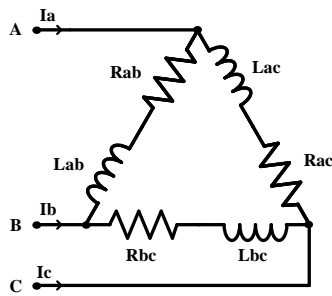


Tabela 2 – Parâmetros do motor trifásico da motobomba.

Parâmetros	Valores
Indutância Lab	71,55 mH
Resistência Rab	12 Ω
Indutância Lac	69,98mH
Resistência Rac	12,015 Ω
Indutância Lbc	78,45mH
Resistência Lbc	12 Ω

Figura 5 – Modelo elétrico do motor trifásico da motobomba.

3.2. Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos

Através do modelo físico do módulo fotovoltaico existente no *software* Psim, foi possível simular o comportamento do módulo fotovoltaico usando as especificações mostradas na Tab.3.

Tabela 3 – Especificações do módulo Yingli YL250P 29b.

Características	Valores
Máxima potência (P_m)	250 W
Tolerância	0/5 W
Tensão de máxima potência (V_m)	29,8 V
Corrente de máxima potência (I_m)	8,39 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	37,6 V
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	8,92 A
Tensão máxima do sistema	1000 V
Eficiência do painel	15,4 %
Temp. nominal de operação da célula	46 $^{\circ}\text{C}$

Foi considerado um arranjo de quatro módulos fotovoltaicos da Yingli de forma a atender a especificação da potência consumida pela carga (motor).

A curva de potência de cada módulo fotovoltaico para as condições de temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$ e uma irradiância de 1000 W/m^2 , é mostrada na Fig.6.

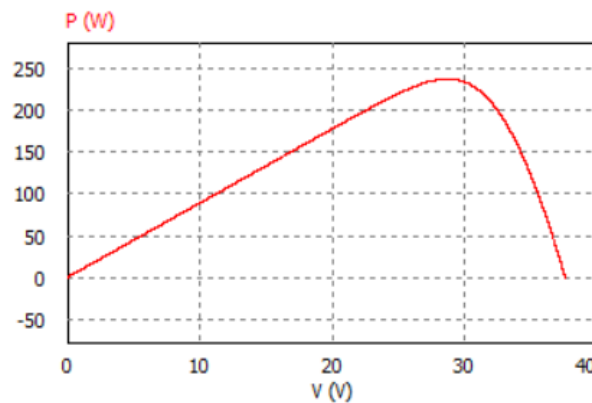


Figura 6 – Curva P-V módulo fotovoltaico Yingli YL250P 29b.

3.3. Dimensionamento do Conversor CC-CC Boost AGT-CCTE

Para o dimensionamento do respectivo conversor foi feita algumas considerações, e especificados alguns parâmetros relacionados ao funcionamento do mesmo.

Essas considerações e especificações são apresentadas na Tab.4, e as mesmas foram utilizadas para a simulação do conversor.

Tabela 4 – Especificações e considerações do conversor CC-CC AGT-CCTE.

Especificações		Considerações	
Tensão de entrada nominal (V_{inom})	60 V	Frequência de chaveamento (fs)	30 kHz
Tensão de saída (V_o)	400 V	Razão cíclica máxima (D_{max})	0,7
Potência de saída (P_o)	1000 W	Rendimento (η)	0,90

Com os valores da Tab.4 são determinadas, a potência média de entrada, a corrente média de entrada, e a corrente média de saída.

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = 1,11kW \quad (1)$$

$$I_i = \frac{P_i}{V_{i_{min}}} = 20,6A \quad (2)$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = 2,5A \quad (3)$$

Para determinar a indutância do indutor L_b , a ondulação de corrente no indutor é adotada como sendo 10% do valor da corrente média de entrada.

$$\Delta I_{L_b} = 10\%.I_i = 2,058A \quad (4)$$

A indutância do indutor L_b é encontrada a partir da expressão dada em Araujo et al. (2010), cujo valor é dada a seguir:

$$L_b = \frac{V_o}{16.f_s.\Delta I_{L_b}.(1+a)} = 182,25\mu H \quad (5)$$

A seguir, são encontradas a relação de transformação e a potência média processada pelo transformador Tr. Os valores estão representados na Eq. 6 e na Eq. 7.

$$a = \frac{V_o}{V_{i_{min}}}.(1 - D_{max}) - 1 = 1,22 \quad (6)$$

$$P_{Tr} = P_i.(0,5.\frac{2.a+1}{a+1}) = 861,11W \quad (7)$$

A tensão máxima e a corrente eficaz nas chaves S1 e S2 são expressadas pelas Eqs. 8 e 9, respectivamente.

$$V_{S1_{max}} = \frac{V_o}{a+1} = 180V \quad (8)$$

$$I_{S1_{ef}} = \frac{I_{max}}{2.(a+1)}.\sqrt{(3-2.D_{max})+2.a+D_{max}} = 10,1A \quad (9)$$

A seguir, são determinados os esforços de tensão e corrente nos diodos retificadores de alta frequência. Cujos valores estão expressados pelas Eqs. 10, 11 e 12. A análise foi realizada para o diodo D1, para os outros diodos (D2-D6) os esforços são os mesmos.

$$VD1_{piv} = \frac{a \cdot V_o}{a + 1} = 220V \quad (10)$$

$$ID1_{md} = \frac{I_{max}}{2 \cdot (a + 1)} \cdot (1 - D_{max}) = 1.38A \quad (11)$$

$$ID1_{ef} = \frac{I_{max}}{2 \cdot (a + 1)} \cdot \sqrt{(1 - D_{max})} = 2,54A \quad (12)$$

A capacitância dos capacitores C1 e C2, foi determinada pela Eq. 13, como mostrado por Bezerra (2010).

$$C = \frac{1}{16} \cdot \frac{P_o}{f_s \cdot \Delta V_{max} \cdot V_{obst} \cdot (1 + a)} = 391nF \quad (13)$$

Logo, deve ser selecionado um capacitor de polipropileno ou de poliéster com capacitância maior ou igual ao valor calculado. Para esta aplicação foram seleciona-se o capacitor, 2.2uF @ 400Vdc de poliéster.

3.4. Dimensionamento do Inversor

No inversor trifásico é fundamental o dimensionamento do filtro LC de saída, para evitar que as harmônicas de corrente e tensão causem problemas de aquecimento por efeito Joule no motor trifásico de indução da motobomba.

O dimensionamento está baseado nas Eqs.14, 15, 16 e 17, propostas por Martins e Barbi (2005).

$$M_a = \frac{V_{o1pk(fase)}}{V_i} = \frac{187,8}{200} = 0,94 \quad (14)$$

$$V_{controlpk} = M_a \cdot V_{tripk} = 0,94 \cdot 5 = 4,7V \quad (15)$$

$$L_{f1} = L_{f2} = L_{f3} = \frac{(V_i - V_{o1pk(fase)}) \cdot M_a}{f_s \cdot \Delta I_{Lo1}} = \frac{(200 - 187,8) \cdot 0,94}{30 \cdot 10^3 \cdot 0,35} = 1,09mH \quad (16)$$

$$C_{f1} = C_{f2} = C_{f3} = \frac{24^2}{L_{o1} \cdot (2 \cdot \Pi \cdot f_s)^2} = \frac{24^2}{1,09 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \Pi \cdot 30 \cdot 10^3)^2} = 14,87\mu F \quad (17)$$

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

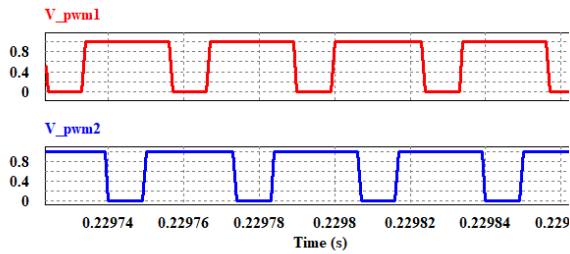
4.1. Conversor CC-CC AGT-CCTE

As formas de onda de tensão e corrente nos componentes do conversor CC-CC Boost AGT-CCTE são apresentadas. A Fig. 7 (a) mostra os sinais PWM aplicada na chaves S1 e S2. A Fig. 7 (b) mostra a tensão e a corrente nos terminais do indutor Lb.

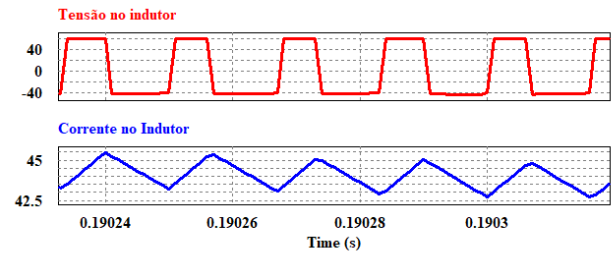
Seguindo a sequência, a Fig. 8 (a), mostra a tensão e a corrente no enrolamento primário do transformador Tr, sendo a tensão no enrolamento igual a metade da tensão fornecida ao capacitor C1, como mostrado por Silveira et al. (2014).

A Fig. 8 (b), mostra a tensão e a corrente no enrolamento secundário do transformador Tr (enrolamento ligado a ponte de diodos D3-D6).

Logo temos, na Fig. 9 (a) a tensão e corrente no MOSFET S1. Seguindo a sequência, a Fig. 9 (b) mostra a tensão e corrente no diodo retificador D1. Finalmente, na Fig. 10 é mostrada a tensão do barramento CC.

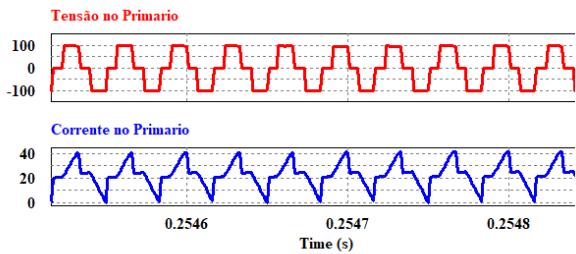


(a)

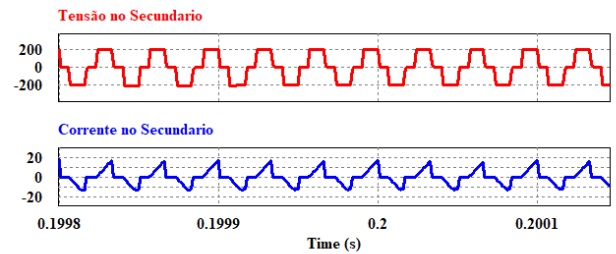


(b)

Figura 7 – (a) Sinais PWM nas chaves S1 e S2. (b) Tensão e corrente no indutor Lb

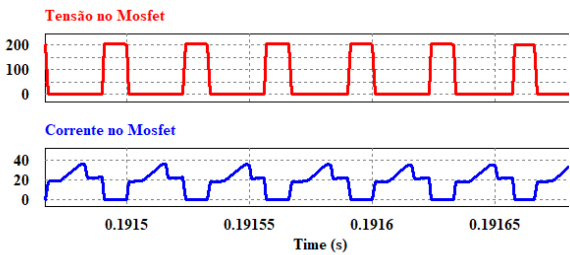


(a)

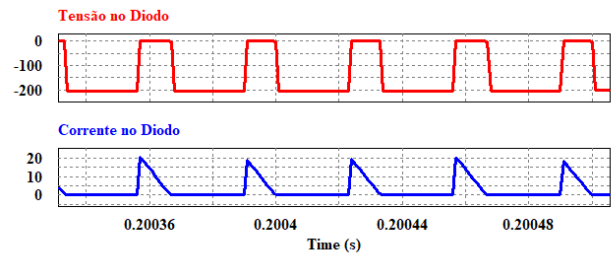


(b)

Figura 8 – Formas de onda de tensão e corrente nos enrolamentos do transformador Tr.



(a)



(b)

Figura 9 – (a) Tensão e corrente nas chaves S1 e S2. (b) Tensão e corrente no diodo D1.

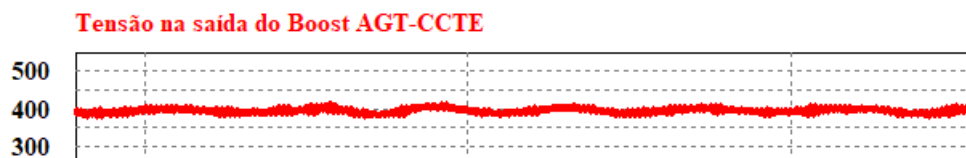


Figura 10 – Tensão do barramento CC-CC.

4.2. Inversor Trifásico

A Fig. 11 mostra a tensão e corrente de saída do inversor, que é aplicada à carga que consiste de um motor de indução trifásico.

Tanto a tensão como a corrente são grandezas trifásicas, ou seja, são valores de linha. A tensão trifásica do motor é de 230 V, implica que a tensão de fase é de 132,8 V.

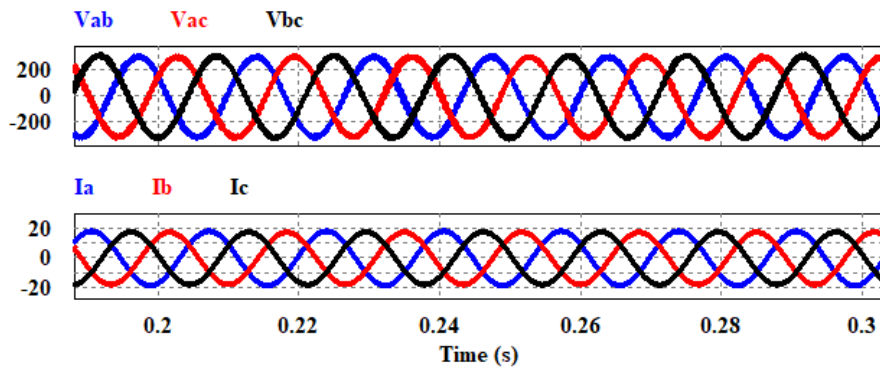


Figura 11 – Formas de onda de tensão e corrente na saída do inversor (terminais do motor).

5. CONCLUSÃO

O sistema proposto faz a adaptação da tensão disponível nos terminais do arranjo fotovoltaico à tensão necessária para acionar um motor de indução trifásico integrado a uma bomba de água. O sistema proposto apresenta dois estágios de processamento de energia elétrica que possibilita o uso de menor quantidade de módulos fotovoltaicos em série, evitando que efeitos de sombreamento sejam prejudiciais ao sistema. Os sistemas de acionamento comerciais utilizam um único estágio de processamento de energia elétrica, o que acarreta a desvantagem da conexão em série de muitos módulos fotovoltaicos para atingir o barramento CC do inversor.

O primeiro estágio apresenta alto rendimento ($> 96\%$), que além de realizar a adaptação de tensões entre o barramento dos módulos fotovoltaicos e o barramento CC de entrada do inversor, permite a operação dos módulos no ponto de máxima potência (*MPP-Maximum Power Point*). Também pode possibilitar a inclusão de baterias estacionárias em paralelo com o capacitor C1. Para isso, basta substituir os diodos D1 e D2 por transistores MOSFETs de potência, e assim proporcionar a versatilidade do sistema para bombear água em horários sem radiação solar, ex. a noite.

Agradecimentos

As instituições de fomento, FUNCAP e CNPQ pelo recurso financeiro que possibilitou a realização deste trabalho, ao Laboratório de Condicionadores de Energias (LCE) e ao Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC) da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS

- Araujo, S. V., Torrico-Bascopé, R. P., Torrico-Bascopé, G. V., 2010. Highly efficient high step-up converter for fuel-cell power processing based on three-state commutation cell. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6):1987–1997.
- Bezerra, L., 2010. Conversor cc-ca para aplicação em sistemas autônomos de energia elétrica. *Master's degree dissertation, Dept. Elect. Eng., Federal Univ. Ceara.*
- Ferreira Filho, J. R. M., Mendes, F. R. F., Sousa, J. R. B., Medeiros, C. M. S., Sousa, I. R., 2018. Photovoltaic panel based pumping system: A solution without batteries. *IEEE Latin America Transactions*, 16(2):514–520.
- Khan, K., Shukla, S., Singh, B., 2019. Performance based design of induction motor drive for single stage pv array fed water pumping. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Martins, D. C., Barbi, I., 2005. *Eletrônica de potência: introdução ao estudo dos conversores CC-CA.* Edição dos Autores.

- Mergoul, K., Laarabi, B., Barhdadi, A., 2018. Solar water pumping applications in morocco: State of the art. In *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pages 1–6. IEEE.
- Nath, S. R., Mandal, R., 2016. Some studies on performance analysis of two different laboratory scale solar photovoltaic water pumping in irrigation systems. In *2016 21st Century Energy Needs-Materials, Systems and Applications (ICTFCEN)*, pages 1–4. IEEE.
- Silveira, G. C., Tofoli, F. L., Bezerra, L. D. S., Torrico-Bascopé, R. P., 2014. A nonisolated dc–dc boost converter with high voltage gain and balanced output voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12):6739–6746.
- Singh, B., Sharma, U., Kumar, S., 2018. Standalone photovoltaic water pumping system using induction motor drive with reduced sensors. *IEEE transactions on industry applications*, 54(4):3645–3655.

WATER PUMPING SYSTEM USING PHOTOVOLTAIC ENERGY

Abstract. *This article proposes an electronic circuit for driving a submerged motor pump using photovoltaic energy. The electronic circuit consists of a high-gain DC-DC Boost converter based on the three-state switching cell, referred to in the literature as "TSSC-HVG DC-DC Boost Converter", and a three-phase inverter in the traditional configuration. The Boost TSSC-HVG DC-DC Boost Converter adapts the voltage of the photovoltaic array to the DC bus voltage that powers the three-phase bridge inverter. Other features of the TSSC-HVG DC-DC Boost Converter are: operation with fixed frequency (PWM), search for the maximum power point (Maximum Power Point Tracking MPPT) and drain current with low ripple from the photovoltaic array, which facilitates the MPPT search. A qualitative and quantitative analysis is presented for both stages of electrical energy processing. The simulation of the complete system on a permanent basis was performed using the Psim software. The article presents an alternative to the possibility of using a photovoltaic arrangement with few modules, while commercial systems normally use many modules in series to achieve the adequate voltage of the inverters, a viable alternative only for motor pumps with higher powers. The simulation results obtained demonstrate that the converter presents a good performance in terms of efficiency when compared to classic converters.*

Key words: *Solar Energy, Water Pumping, High Voltage Gain DC-DC Boost Converter.*