

SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL COM ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Rogério Luiz Nascimento¹
Romeu Hausmann²

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de bombeamento de água pluvial empregando energia solar fotovoltaica sem o uso de baterias. O trabalho apresenta também o estudo da viabilidade econômica do sistema para a unidade do SENAI/SC em Blumenau (SC). O sistema de bombeamento é composto por uma moto-bomba elétrica trifásica, acionada por um conversor CC-CA trifásico do tipo *boost*, o qual tem a função de fazer a conversão CC-CA e elevar a tensão, tudo em um único estágio. O sistema é alimentado em corrente contínua, com tensão de 100V, e gera, na saída, tensão alternada trifásica com frequência de 60Hz e valor eficaz de tensão de linha de 220V. O trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a situação hídrica no Brasil e a disponibilidade de água no país e no mundo. Também é mostrado o panorama da energia solar fotovoltaica, suas tecnologias e disponibilidade no Brasil e na região de Blumenau. Na sequência é apresentado o sistema de processamento eletrônico de energia, contendo descrição do funcionamento, equacionamento e metodologia de projeto. Em seguida são apresentados os resultados experimentais da estrutura implementada para diversas condições de operação.

PALAVRAS-CHAVE: Inversor *boost*. Modos Deslizantes. Conversores CC/CA.

1 Mestre, e-mail:
rogerblumenau3@
gmail.com

2 Doutor, e-mail:
romeu.hausmann@
gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Há uma preocupação mundial com a escassez da água, recurso limitado e precioso. Visando seu aproveitamento, sistemas convencionais de coleta de água da chuva são implantados, armazenando e posteriormente bombeando essa água para reservatórios elevados, com o intuito de utilizá-la em seus sistemas hidráulicos de distribuição.

A cidade de Blumenau (SC) está implantando seu sistema de coleta e tratamento de esgoto, e a cobrança desse serviço é proporcional ao consumo de água do consumidor. Isso faz com que o consumo de água tenha duplo impacto nos custos de uma unidade consumidora, a redução no consumo de água tendo um forte impacto financeiro. Devido ao grande acréscimo na fatura do consumo de água na unidade do SENAI/SC em Blumenau, em função da cobrança do tratamento de esgoto, o sistema proposto será empregado para bombear a água coletada da chuva para o aproveitamento e consumo em locais que não necessitam de água potável, como: descargas sanitárias, irrigações, lavações, entre outras. O bombeamento da água da chuva armazenada será feito por uma moto-bomba trifásica, que por sua vez será acionada por um conversor estático de energia. O conversor será alimentado com tensão contínua e deverá

fornecer tensão alternada trifásica para acionar a moto-bomba, tudo isso em um único estágio.

A ENERGIA ELÉTRICA NECESSÁRIA PARA OPERAR O SISTEMA SERÁ GERADA POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SEM O USO DE ACUMULADORES DE CARGAS (BATERIAS) E CONVERTIDA PARA UMA TENSÃO CA TRIFÁSICA COM VALOR EFICAZ DE 220V.

Estudos de precipitações e radiações solares, na região de Blumenau serão realizados para verificar a eficiência do sistema de bombeamento.

Serão realizados estudos teóricos, simulações e a construção de um protótipo do conversor, bem como o estudo de viabilidade financeira do projeto.

Inicialmente será apresentada uma contextualização sobre a situação hídrica no mundo, no Brasil e na região de Blumenau. A radiação solar na região de Blumenau também será apresentada, bem como a descrição do projeto de captação e posterior bombeamento de água pluvial.

2 A ESCASSEZ HÍDRICA

Para Pedde et al. (2013), um dos principais problemas a ser enfrentado pela humanidade neste século é a escassez hídrica. O uso sustentável da água deve ser prioridade de todos os setores econômicos, não apenas do setor agrícola e das regiões onde há a escassez de água. O frágil

equilíbrio entre a oferta e a demanda hídrica contribui para a escassez e reduz a qualidade de vida da população. Mesmo na América do Sul, onde se tem a segunda maior disponibilidade hídrica per capita do mundo, já se evidencia o desequilíbrio entre a oferta e a demanda hídrica,

principalmente pelo fato dos recursos hídricos não se distribuírem uniformemente na região. Isto é, nem sempre as quantidades hídricas adequadas se localizam em regiões de maiores concentrações urbanas e, conseqüentemente, de elevadas demandas. O aumento da população mundial, da poluição e do consumo excessivo e o alto grau de desperdício de água também contribuem para reduzir ainda mais a disponibilidade de água. Estima-se que a cada 100 litros de água potável, 60 se perdem por maus hábitos ou distribuição ineficiente. No Brasil calcula-se que 45% da água que sai dos reservatórios se perde em encanamentos mal conservados. Nos últimos anos, vários indicadores foram desenvolvidos visando avaliar quantitativamente a vulnerabilidade da população à disponibilidade hídrica. Os dois mais utilizados são o de Falkenmark e o índice de vulnerabilidade dos recursos hídricos. O primeiro índice relaciona à disponibilidade per capita por ano, e considera

SEGUNDO A ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (2014), EM 2013 A ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) DIVULGOU O RELATÓRIO “PERSPECTIVAS DE POPULAÇÃO MUNDIAL”. NESTE RELATÓRIO, A POPULAÇÃO MUNDIAL ERA DE 7,2 BILHÕES E, DE ACORDO COM AS PROJEÇÕES DE CRESCIMENTO DEMOGRÁFICO APRESENTADAS PELA ENTIDADE, A POPULAÇÃO MUNDIAL DEVE CHEGAR A 8,1 BILHÕES DE PESSOAS EM 2025 E 9,6 BILHÕES EM 2050.

que valores inferiores a 1.000m³/habitante/ano indicam condições de escassez hídrica. Já o segundo relaciona as retiradas totais anuais à disponibilidade hídrica anual.

Prevê, também, que este crescimento se dará principalmente nos países em desenvolvimento.

Conforme Santos (2012), a população mundial aumentou três vezes durante o século XX; no mesmo período, o volume de água utilizada aumentou aproximadamente nove vezes.

Portanto, o crescimento populacional e o consumo desenfreado tornam-se cada vez mais incompatíveis com a quantidade de água potável disponível.

Cuidar da água é uma questão de sobrevivência que depende da decisão e da ação de cada pessoa, comunidade e da sociedade em geral. Somente com determinação e participação será possível construir as respostas técnicas, científicas, ecológicas, sociais, políticas e econômicas para a gestão da água na perspectiva do desenvolvimento sustentável, com inclusão social e justiça ambiental.

2.1 Disponibilidade de água no mundo

Para Gomes et al. (2011), há de se conservar e preservar a água disponível no planeta, pois, de acordo com levantamentos geoambientais, cerca de 70% da superfície do Planeta é constituída por água, sendo que somente 3% da superfície é água doce e, desse total, 98% estão na condição de água subterrânea. Isto quer dizer que a maior parte da água disponível e própria para consumo é mínima perto da quantidade total de água existente no Planeta.

2.2 Situação da água no Brasil

Segundo Gomes et al. (2008), o Brasil é considerado o país mais rico em recursos hídricos do Planeta, dispondo em torno de 12% das reservas mundiais de água doce, com uma descarga de água fluvial de 77.990 m³/s que, se adicionada ao fluxo dos rios amazônicos internacionais (de 73.100 m³/s), atinge 251.000 m³/s, representando 53% da produção de água doce do continente sul-americano, que corresponde a 334.000 m³/s.

Embora o Brasil seja detentor de um vasto estoque de água, ela se distribui de maneira desigual em relação ao percentual do recurso, região e percentual de população, sendo que a região Norte possui 68,5% dos recursos hídricos, mas apenas 6,98% da população, e a região sudeste detém apenas 6% dos recursos hídricos, mas tem 42,65% da população. A região sul detém 6,5% dos recursos hídricos, com 15,05% da população nacional, ou seja, em algumas regiões existe pouca água para muita população. Isso reflete a realidade atual, principalmente na região sudeste.

Mesmo considerando essa situação privilegiada, o País vem vivenciando sérios problemas de escassez de água resultantes tanto da sua distribuição geograficamente desigual, como de sua contaminação.

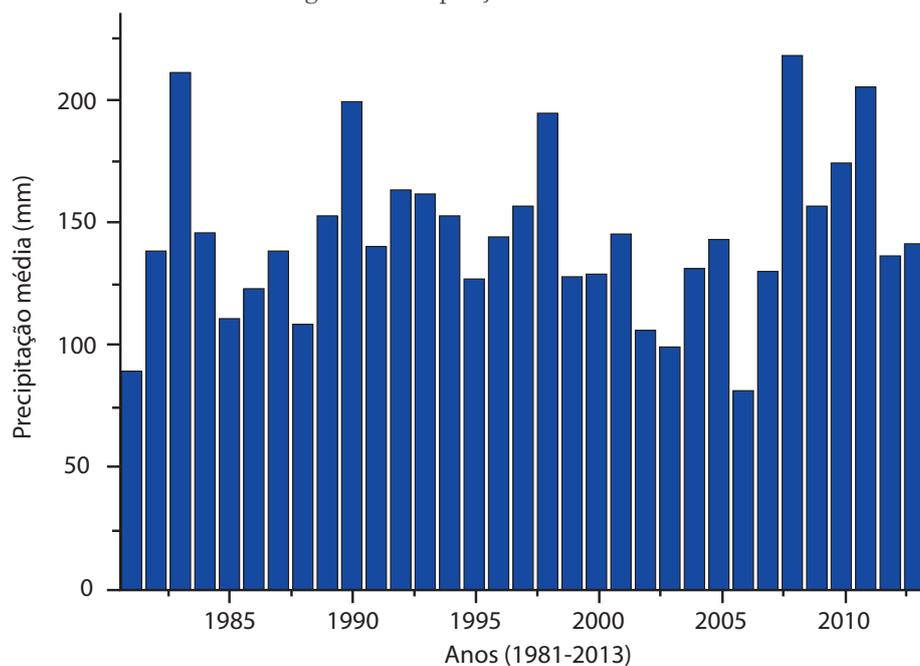
2.3 Situação da água na região de Blumenau

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014), o Vale do Itajaí, também conhecido como Vale Europeu, é a região mais alemã do Brasil. Sua colonização foi feita principalmente no século XIX por imigrantes alemães. O território está situado no estado brasileiro de Santa Catarina no vale formado pelos rios Itajaí-Açu, Itajaí-Mirim e seus afluentes, que formam a bacia do rio Itajaí-Açu e as serras do Mirador, Itajaí e Moema. A bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, também denominada Vale do Itajaí, abrange 15.000km² do Estado de Santa Catarina, onde estão localizadas 52 cidades, totalizando aproximadamente 800 mil habitantes (20% da população do estado). O município de Blumenau pertence à zona climática designada pela letra C, com o tipo climático Cfa, segundo a classificação do clima de Köppen. Tal tipo climático se caracteriza por ser um clima subtropical úmido. Segundo o Centro de Operação do Sistema de Alerta (2014), a temperatura média anual é de cerca de 20°C, e a pluviosidade média é de 2.000mm/ano, sendo fevereiro o mês mais chuvoso, com 194,6mm, e junho o mais seco, com 104,0mm.

Segundo dados do Centro de Operação do Sistema de Alerta (CEOPS),

conforme a Figura 1. Observa-se ainda que nos anos de 1983 e 2008 a precipitação média mensal ficou acima de 200mm, em virtude das enchentes que ocorreram neste período.

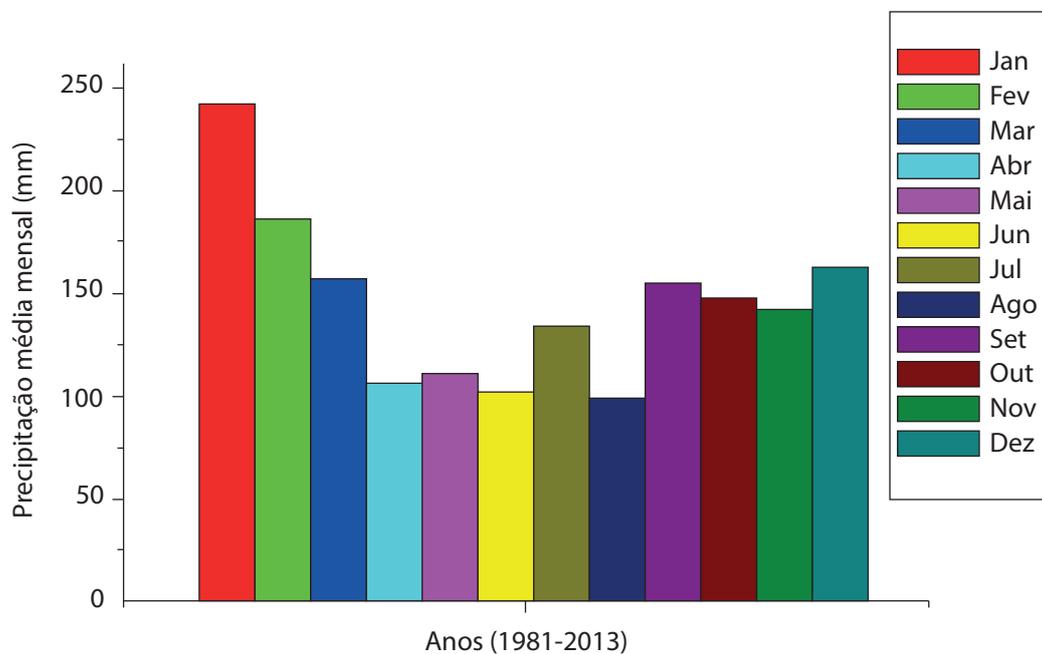
Figura 1: Precipitação média anual.



Fonte: Centro de Operação de Sistema de Alerta (2014).

A Figura 2 mostra que o índice de precipitação é maior no verão, e principalmente no mês de janeiro, no qual a média ficou acima de 200mm.

Figura 2: Precipitação média mensal.



Fonte: Centro de Operação do Sistema de Alerta (2014).

2.4 Consumo de água no SENAI/SC em Blumenau

A unidade do SENAI/SC em Blumenau apresenta um custo elevado no consumo de água,

agravado ainda mais pela cobrança do tratamento de esgoto, proporcional ao consumo de água. A Tabela 1 mostra o consumo de água em m³ e em moeda corrente, o real (R\$), no período de doze meses.

Tabela 1: Consumo de água SENAI/SC em Blumenau

Período	Consumo (m ³)	Custo Unitário (R\$/m ³)	Valor Pago (R\$)
Maio/2013	1274	4,25	5.409,75
Junho/2013	1185	4,26	5.048,13
Julho/2013	625	4,42	2.764,83
Agosto/2013	676	4,40	2.972,91
Setembro/2013	685	4,39	3.009,63
Outubro/2013	662	4,40	2.915,79
Novembro/2013	725	4,38	3.172,83
Dezembro/2013	476	4,53	2.156,91
Janeiro/2014	315	5,10	1.605,79
Fevereiro/2014	863	4,69	4.048,37
Março/2014	913	9,33	8.514,25
Abril/2014	789	9,52	7.513,15
TOTALIZAÇÃO	9.188		49.132,34

Fonte: Adaptado de Foz do Brasil (2014)

A partir do mês de março de 2014, a unidade do SENAI/SC em Blumenau passou a pagar o tratamento de esgoto, ocasionando um aumento de praticamente 100% do valor do metro cúbico da água.

Pode-se estimar que o valor acumulado nos próximos doze meses, considerando um consumo de 9.188 m³, será de aproximadamente 90 mil reais, viabilizando o referido estudo.

3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

SEGUNDO ZOMER (2010), A TERRA RECEBE ANUALMENTE $1,5 \times 10^{18}$ KWH DE ENERGIA SOLAR EM TODA A SUA SUPERFÍCIE, O QUE CORRESPONDE A DEZ MIL VEZES O CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA NESTE PERÍODO.

Considerando apenas a superfície terrestre, ou seja, com potencial para a instalação de geradores de energia por meio do sol, essa energia passa a ser de $10,8 \times 10^{11}$ GWh/ano. Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (térmica, elétrica etc.). Segundo Hinrichs (2010), a conversão de energia solar em energia elétrica foi descoberta por Edmond Becquerel em 1939, que constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de semicondutor quando exposto à luz. Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica. Com a crise de energia elétrica em 1973 e 1974, iniciaram-se os estudos para utilização da energia solar fotovoltaica não apenas para programas espaciais, mas também como geração de energia para ser utilizado em meio terrestre. No entanto, apenas uma parte da quantidade total da radiação solar atinge a superfície terrestre. A atmosfera reduz a radiação solar pela reflexão, absorção e dispersão.

O nível de irradiação na Terra atinge um total aproximado de 1.000 W/m^2 ao meio-dia, em boas condições climáticas.

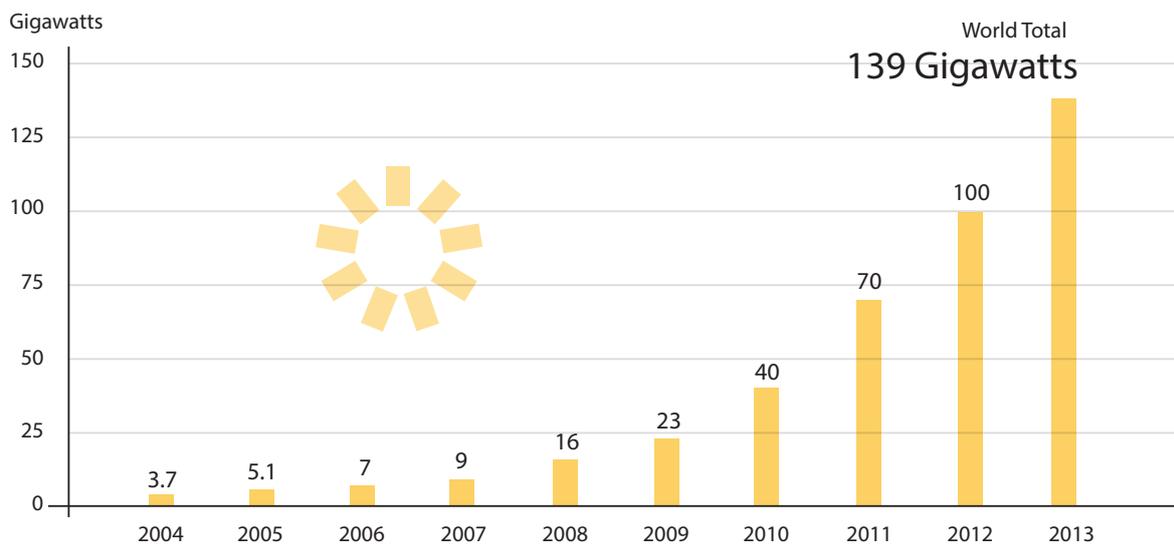
Ao se somar a quantidade total da radiação que incide na superfície terrestre durante o período de um ano, obtém-se a irradiação global anual, medida em kWh/m^2 . Esse é o parâmetro que varia de um modo significativo de acordo com as regiões. O aproveitamento da energia solar para aplicações diversas tem sido bastante destacado, especialmente em países tropicais e subtropicais, como o Brasil, que dispõe de condições excelentes de radiação solar ao longo do ano, podendo representar uma solução para parte dos problemas de escassez de energia que abala o mundo. Na busca pelo aproveitamento direto da energia solar, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, com especial destaque para a conversão fotovoltaica. O uso direto da energia solar tem três atrativos principais: primeiro, sua capacidade de renovação quase infinita, considerando a escala de tempo humana. Segundo, não gera impactos ambientais na sua operação, é silenciosa e não polui. O terceiro é a viabilidade de aplicação em fontes consumidoras, o que elimina a necessidade de transporte por grandes distâncias, diminuindo as perdas por transmissão e distribuição, uma das principais falhas do sistema convencional. A geração fotovoltaica (FV), conversão de luz solar diretamente em eletricidade, tem sido e continuará sendo uma das mais fascinantes tecnologias no campo da energia. Na década de 1950 a geração fotovoltaica recebeu um grande impulso, devido à utilização no programa espacial norte-americano. Desses dias até hoje o custo das células caíram de um fator de mais de

mil. Mesmo assim, as células solares continuam relativamente caras, e o grau de penetração futuro no mercado é altamente dependente da redução dos custos de produção e do aumento da eficiência das células. Nos últimos anos ocorreram significativos avanços no desenvolvimento

de materiais FV de baixo custo e eficiências maiores de 30% foram obtidas.

A Figura 3 mostra o crescimento exponencial, da capacidade instalada mundial de energia solar fotovoltaica, chegando a 139 GW em 2013.

Figura 3: Capacidade instalada mundial de FV



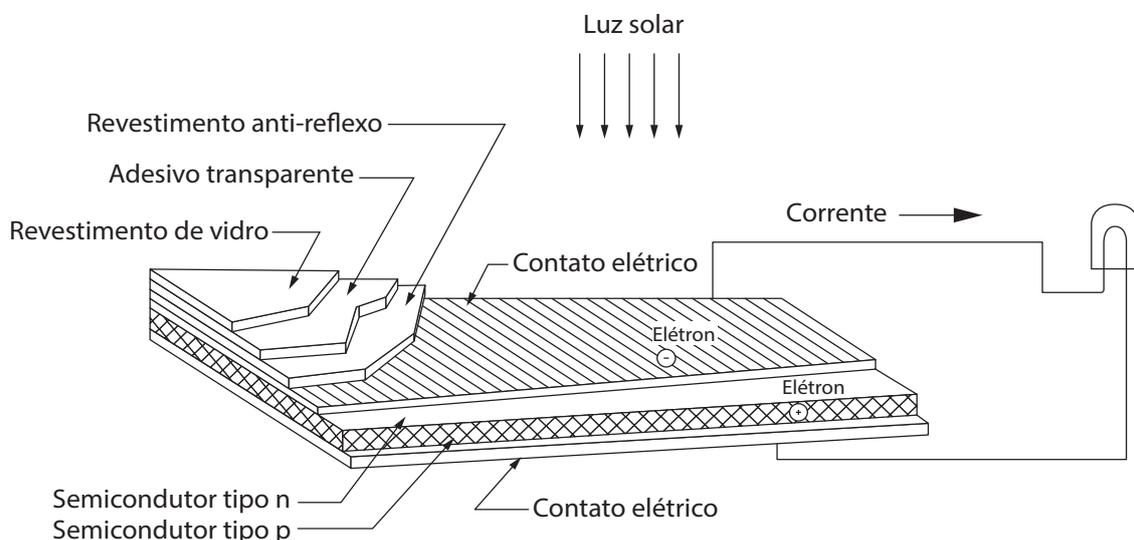
Fonte: REN21 (2014)

3.1 Célula fotovoltaica

Para Coelho (2008), as células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores capazes de converter diretamente a energia solar incidente em energia elétrica. Tradicionalmente uma célula

fotovoltaica mede entre 100 cm² e 200 cm², sendo capaz de gerar aproximadamente 0,6 V de tensão para uma potência entre 1 W e 3 W. Estruturalmente, a célula fotovoltaica pode ser dividida em várias camadas, com atribuições específicas, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Estrutura da célula fotovoltaica



Fonte: Coelho (2008)

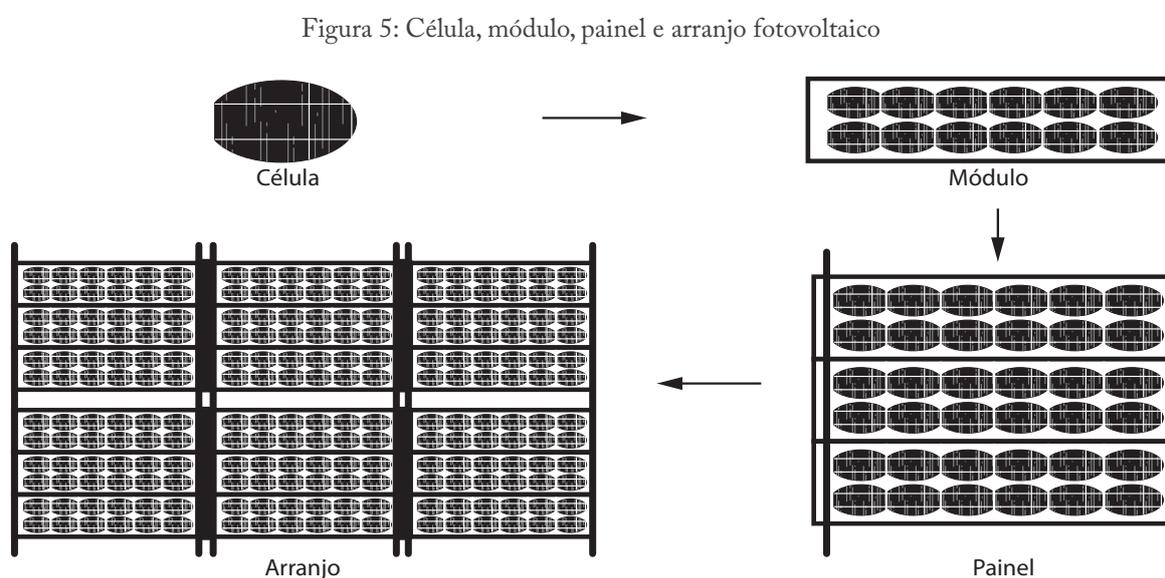
3.1.1 Módulo fotovoltaico

Segundo Coelho (2008), os módulos fotovoltaicos são constituídos pela ligação em série e/ou paralela de células fotovoltaicas com o intuito de elevar a potência de saída. Evidentemente, como os módulos são comercializados de forma fechada, uma vez realizadas as conexões por parte do fabricante, não há possibilidade de alteração pelo usuário. Em termos de dimensão, existe relação direta entre o tamanho do módulo e a potência de pico que pode ser gerada, não ultrapassando 160 W/m² para os módulos policristalinos comerciais de Silício.

3.1.2 Arranjo fotovoltaico

Por fim, visando a alcançar níveis significativos de geração, os módulos fotovoltaicos podem ser associados em série e/ou paralelo, dando origem aos arranjos fotovoltaicos que podem gerar desde alguns kW até potências mais expressivas, da ordem de MW. Evidentemente, o tipo de ligação entre os módulos irá ditar o nível de tensão, corrente e potência de saída do arranjo, mantendo-se a direta proporção entre a potência gerada e a área exposta à radiação solar.

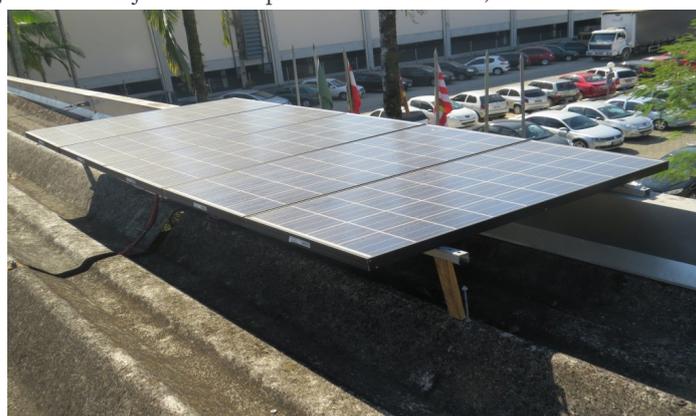
A Figura 5 retrata a diferença entre célula, módulo, painel e arranjo fotovoltaico.



Fonte: Coelho (2008)

A Figura 6 mostra o arranjo de cinco painéis fotovoltaicos de 140 W de potência cada, associados em série na unidade do SENAI/SC em Blumenau.

Figura 6: Arranjos de cinco painéis fotovoltaicos, SENAI/SC Blumenau



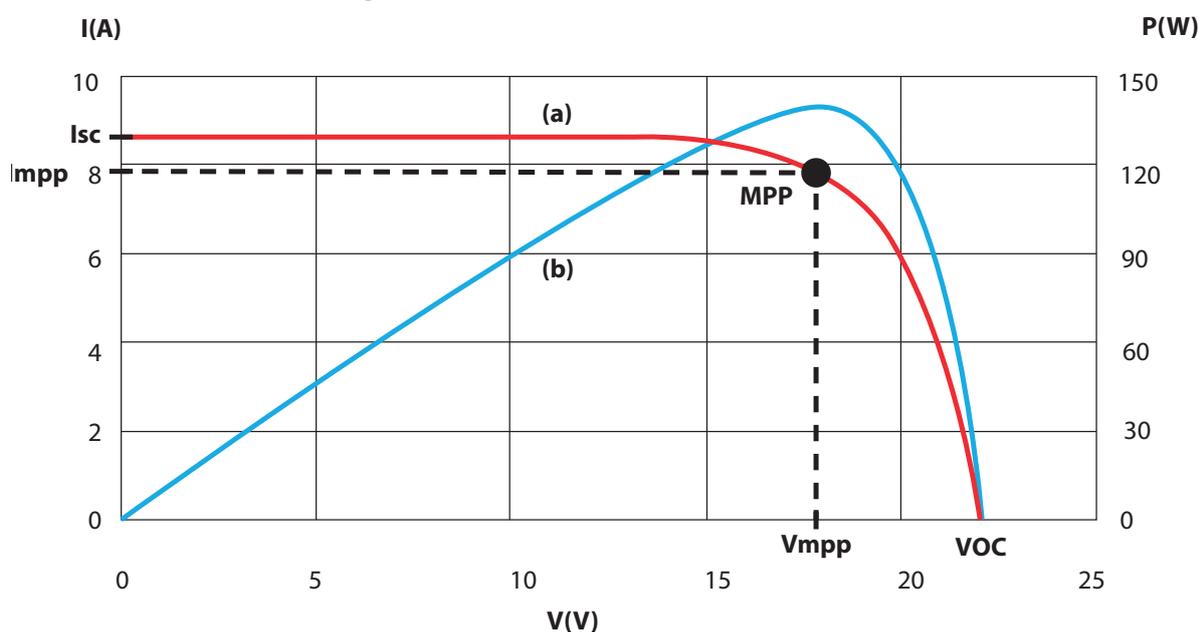
Fonte: Dos autores (2014)

3.1.3 Curvas características de um módulo fotovoltaico.

A Figura 7 mostra as curvas de corrente e de potência do painel fotovoltaico utilizado no projeto, o qual, com uma radiação solar de 1000 W/m^2 , obtém a potência máxima de 140 W (MPP), pois neste ponto de maior potência a tensão máxima (V_{mpp}) e a corrente máxima (I_{mpp}) valem $17,7 \text{ V}$ e $7,9 \text{ A}$, respectivamente.

Com a diminuição da radiação solar, estes dados de potência diminuem proporcionalmente.

Figura 7: Curva (a) Corrente / Curva (b) Potência.



Fonte: Dos autores (2014).

O conversor deve operar sempre no ponto de maior potência, ou seja, o conversor deverá atuar controlando a tensão e corrente de saída do painel fotovoltaico, de modo que o produto ($V \times I$) seja sempre o maior possível. Para isto, pode-se aplicar alguma das várias técnicas de rastreamento do ponto de maior potência (MPPT), como por exemplo: tensão constante, perturba & observa, condutância incremental, entre outras.

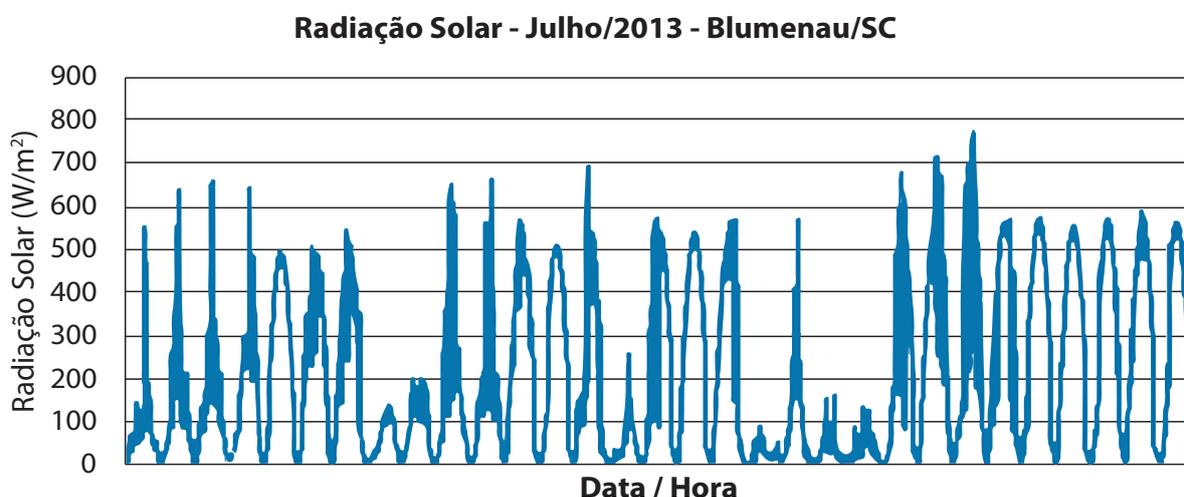
3.1.4 Radiação solar em Blumenau

Em 1984 foi instalado o Centro de Operação do Sistema de Alerta da Bacia do Itajaí (CEOPS), gerenciado e coordenado pela Universidade Regional de Blumenau. Teve como objetivo monitorar os níveis dos rios, focando na antecipação de previsões e prevenção de eventos climáticos, principalmente nas cheias, diminuindo os impactos relacionados a esses eventos. O CEOPS possui uma estação meteorológica, onde várias grandezas físicas como níveis de rios, precipitações, velocidades de ventos, temperaturas, umidade relativa e radiação solar são monitoradas e armazenadas em um banco de dados.

Como este trabalho propõe o estudo da viabilidade de acionar uma motobomba elétrica trifásica com uso de painéis fotovoltaicos, os dados de radiações solares dos meses de julho à dezembro de 2013 da cidade de Blumenau foram obtidos do CEOPS e plotados em gráficos para análise. Com os dados de radiações solares plotou-se os gráficos de todos os meses. Neste artigo serão mostrados os dois extremos, ou seja, o mês de menor radiação solar e o mês de maior radiação solar.

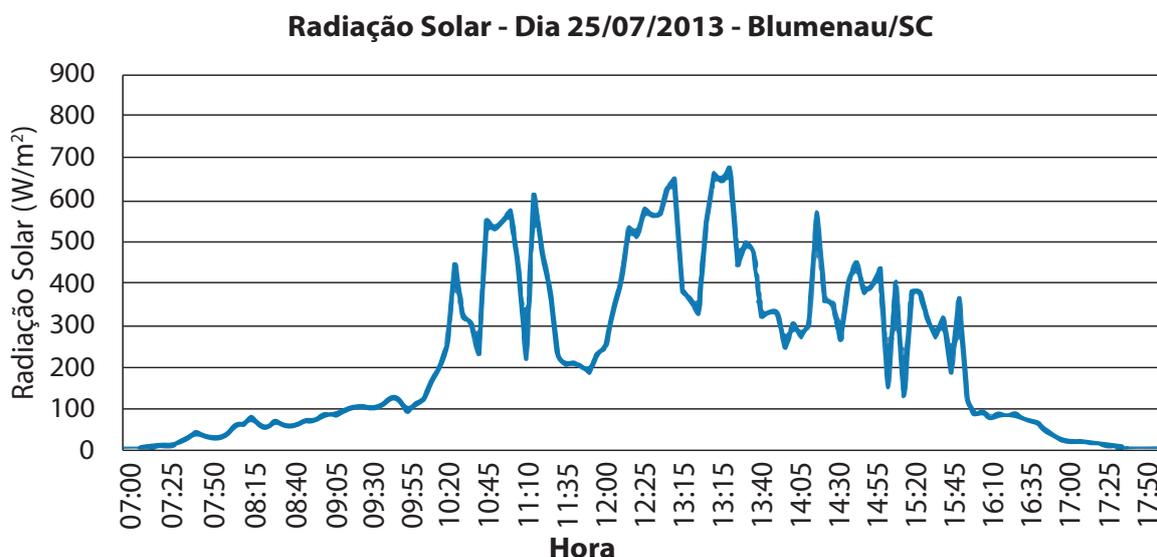
A FIGURA 8 MOSTRA A VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO MÊS DE JULHO DE 2013, EVIDENCIANDO O PICO MÁXIMO DE RADIAÇÃO NO DIA 25 DE JULHO DE 2013. A FIGURA 9 MOSTRA A VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO MESMO DIA, QUE REGISTRA O PICO MÁXIMO DE 771 W/M² ÀS 13H25.

Figura 8: Radiação solar julho/2013.



Fonte: Adaptado de Centro de Operação do Sistema de Alerta (2014)

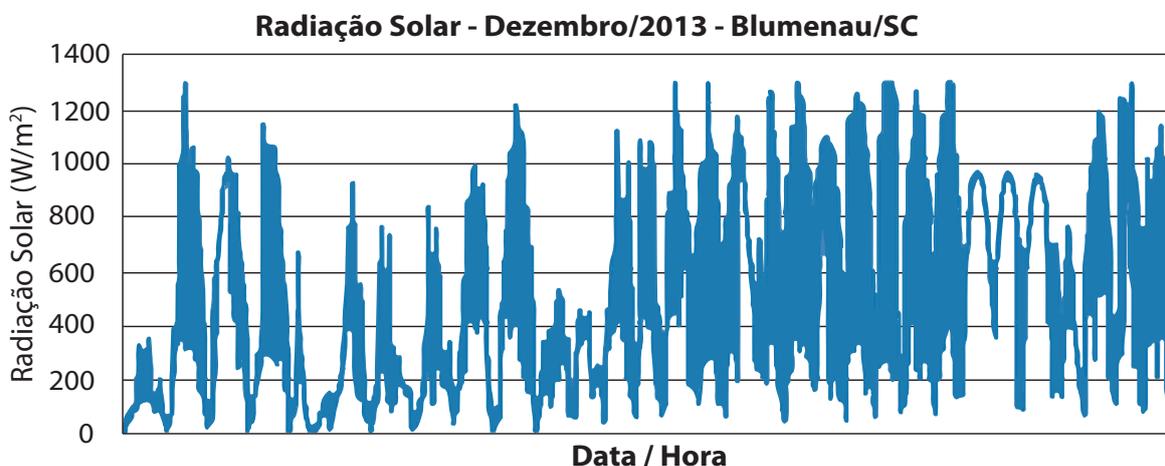
Figura 9: Radiação solar em 25/07/2013



Fonte: Adaptado de Centro de Operação do Sistema de Alerta (2014)

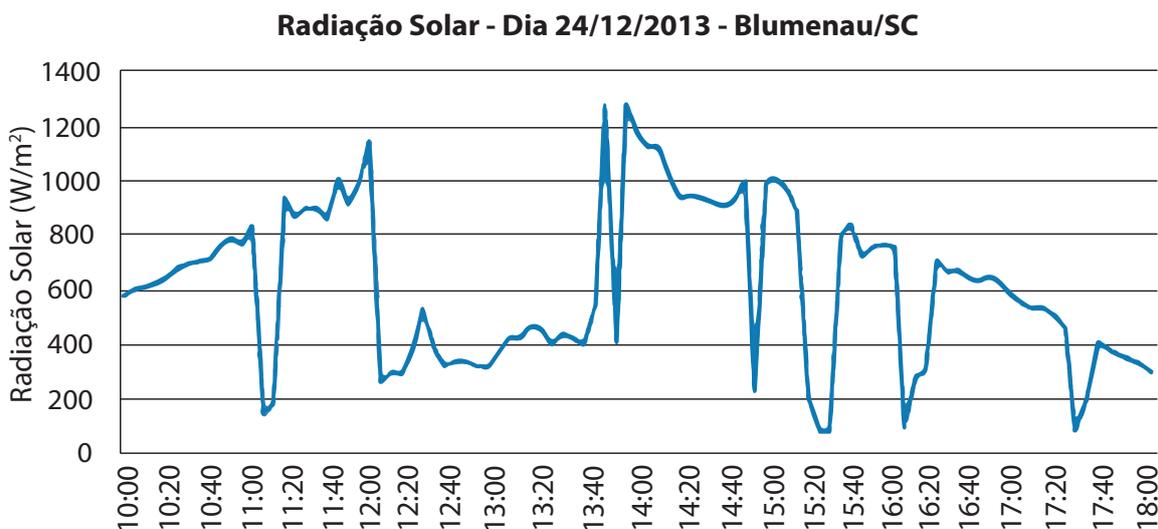
A Figura 10 mostra a variação da radiação solar no mês de dezembro de 2013, evidenciando o pico máximo de radiação no dia 24 de dezembro de 2013. A Figura 11 mostra a variação da radiação solar no mesmo dia, que registra o pico máximo de 1277 W/m² às 13h55.

Figura 10: Radiação solar em dezembro de 2013



Fonte: Adaptado de Centro de Operação do Sistema de Alerta (2014)

Figura 11: Radiação solar em 24/12/2013



Fonte: Adaptado de Centro de Operação do Sistema de Alerta (2014)

Utilizando os dados de radiação solar entre os meses de julho a dezembro de 2013, obtém-se a Tabela 2, que representa o tempo, em minutos e horas, em que a radiação solar esteve acima de 700 W/m².

Tabela 2: Tempo radiação solar acima 700 W/m².

Mês do ano de 2013	Radiação acima de 700 W/ m ² (min)	Radiação acima de 700 W/ m ² (h)
Julho	35	0,58
Agosto	155	2,58
Setembro	750	12,5
Outubro	2.855	47,58
Novembro	2.410	40,17
Dezembro	4.740	79,00
TOTALIZAÇÃO	10.945	182,41

Fonte: Adaptado de Centro de Operação do Sistema de Alerta (2014)

4 DISMENSIONAMENTO DO SISTEMA

O dimensionamento do sistema compreende calcular o volume dos reservatórios da água da chuva, a potência da motobomba, o conversor CC/CA e o retorno do investimento. Foi considerada a área de captação da água da chuva correspondente ao telhado do bloco “B”, da unidade do SENAI/SC em Blumenau.

4.1 Reservatório de água

Para que o reservatório seja suficiente para armazenar o consumo de água por uma semana (cinco dias úteis) na unidade do SENAI/SC em Blumenau, de acordo com a área de captação do telhado a ser utilizado, este deverá ter uma capacidade de 57,60m³, ou seja, aproximadamente 60 mil litros.

4.2 Potência da motobomba

Foi utilizada uma motobomba instalada em uma bancada didática com valores nominais de potência de 1/3cv, fator de potência 0,66,

rendimento 72%, rotação 3450 rpm, altura manométrica de 5 a 17 m e vazão 1,8 a 8 m³/h. Considerando a altura manométrica de 12 m, resultando em uma vazão de 4 m³/h, de acordo com a motobomba utilizada, obtém-se que a motobomba deverá permanecer ligada por 72 h no mês para bombear 288 m³ de água.

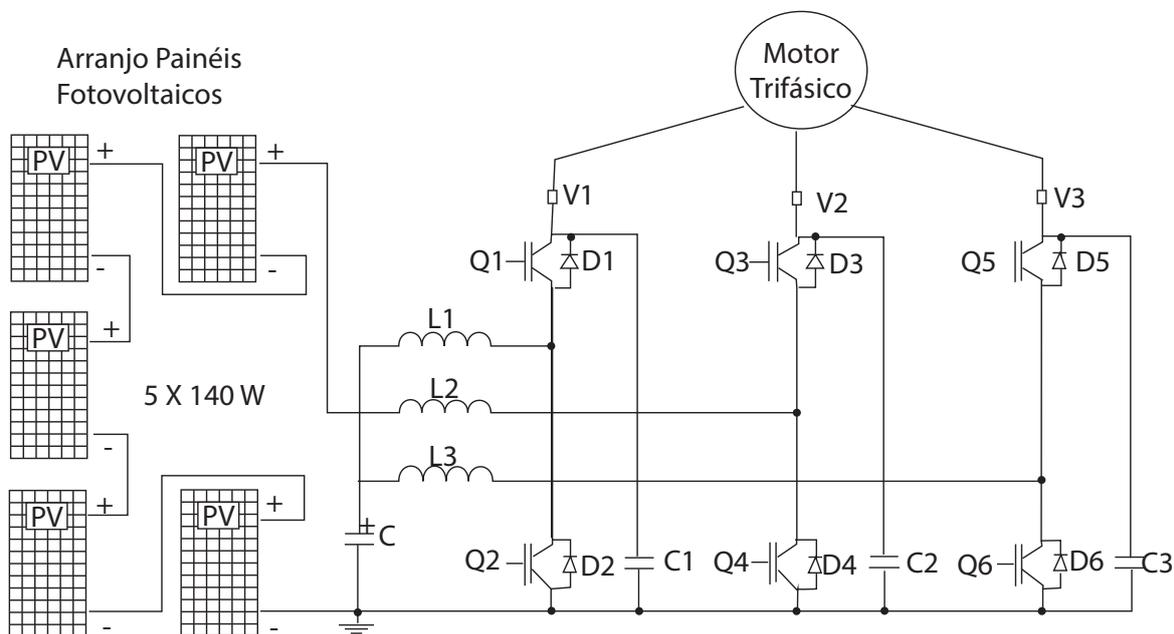
4.3 Conversor CC/CA trifásico

Foi utilizado o conversor boost trifásico, o qual em um único estágio de processamento de energia eleva e inverte a tensão em corrente contínua de aproximadamente 100 V, provenientes de um arranjo de cinco painéis fotovoltaicos de 140 W de potência conectados em série para uma tensão em corrente alternada em três fases defasadas de 120°, com valor eficaz em torno de 220 V.

O mesmo circuito foi testado com uma fonte de tensão em corrente contínua conectada à

rede comercial de energia elétrica. O circuito da Figura 12 mostra a topologia do conversor utilizado.

Figura 12: Topologia do conversor boost

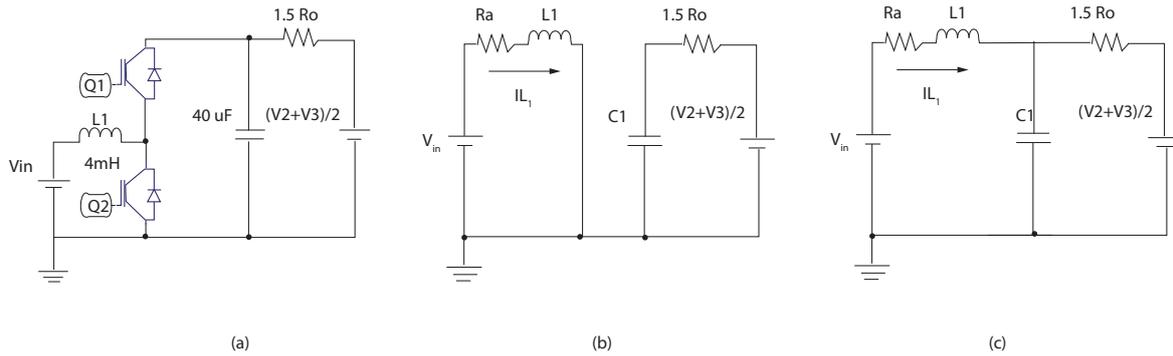


Fonte: Adaptado de Giacomini (2007)

Segundo Giacomini (2007), a estrutura é composta basicamente de três conversores CC/CC reversíveis (bidirecionais) em corrente alimentados por uma fonte de tensão CC e comandados de tal forma que a corrente de saída da fonte de alimentação de entrada seja dividida em três conversores, possibilitando o uso de motores de indução trifásicos. Para o inversor boost trifásico, a influência das duas outras fases, em uma fase de saída do conversor pode ser representada no circuito elétrico equivalente, conforme a Figura 13(a). As etapas de funcionamentos se resumem a duas, nas quais os interruptores Q1 e Q2 são acionados de forma complementar. Na primeira etapa,

com Q2 conduzindo e Q1 bloqueado, pode-se reescrever o circuito equivalente conforme o diagrama da Figura 13(b). A resistência do enrolamento do indutor L1 é representada por R_a , e a resistência dos enrolamentos das bobinas das outras duas fases é representada por R_o . Nesta primeira etapa a corrente I_{L1} cresce linearmente, o diodo D2 está polarizado reversamente e o capacitor C1 transfere energia para carga ou saída, diminuindo a tensão V1. Na segunda etapa, com Q2 bloqueado e Q1 conduzindo, pode-se reescrever o circuito equivalente conforme o diagrama da Figura 13(c). Nessa etapa a corrente I_{L1} circula pelo capacitor C1 e pela carga. A corrente I_{L1} diminui à medida que o capacitor C1 é carregado.

Figura 13: Circuitos elétricos equivalentes



Fonte: Adaptado de Giacomini (2007)

Equacionando o circuito das Figuras 13(b) e 13(c) obtêm-se respectivamente:

$$L_1 \frac{diL1}{dt} = Vin - Ra \cdot IL1$$

$$C_1 \frac{dVc1}{dt} = \frac{V2 + V3}{3 \cdot Ro} - \frac{V1}{1,5 \cdot Ro}$$

$$L_1 \frac{diL1}{dt} = Vin - Ra \cdot IL1 - V1$$

$$C_1 \frac{dVc1}{dt} = IL1 + \frac{V2+V3}{3 \cdot Ro} - \frac{V1}{1,5 \cdot Ro}$$

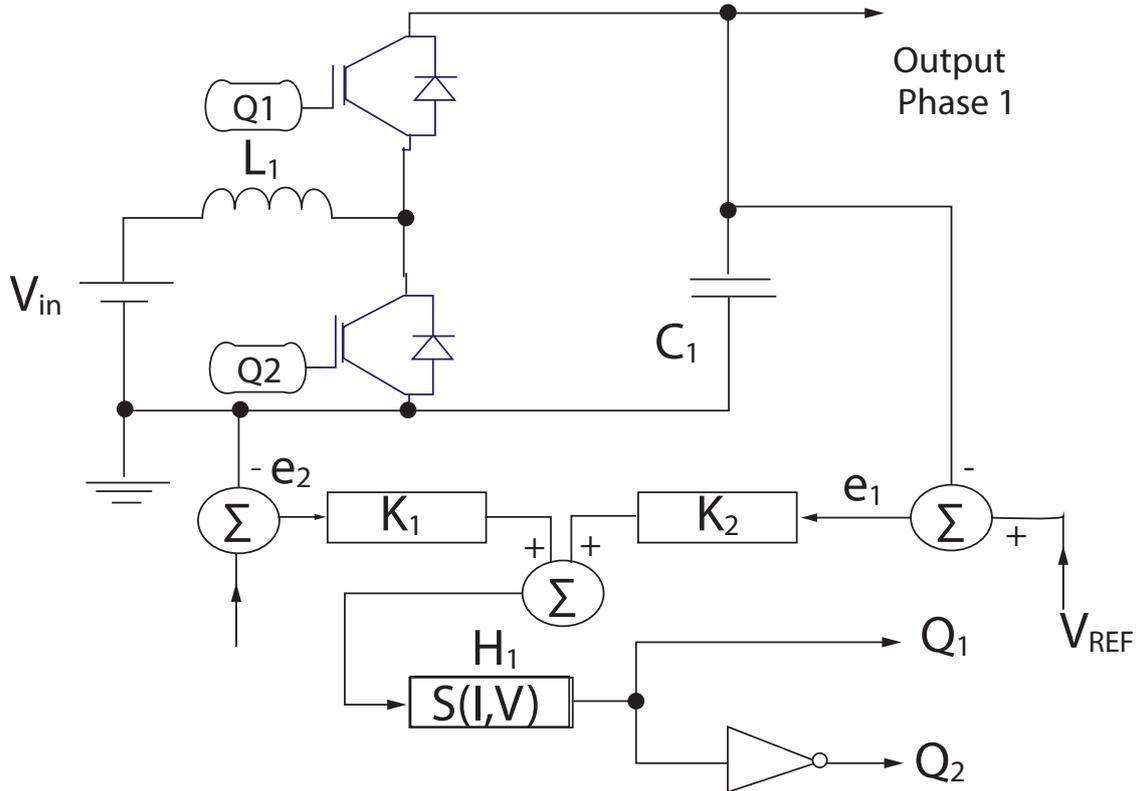
A modelagem em variáveis de estado do inversor boost trifásico, tendo como variáveis ($IL1$ e $V1$), pode ser representada em (5), na qual $\gamma=1$, a chave $Q2$ está ligada (ON) e a chave $Q1$ está desligada (OFF) e $\gamma=0$, a chave $Q2$ está desligada (OFF) e a chave $Q1$ está ligada (ON).

$$\begin{bmatrix} \frac{diL1}{dt} \\ \frac{dVc1}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{-Ra}{L1} \right) & \left(\frac{-1}{L1} \right) \\ \frac{1}{C1} & \left(\frac{-1}{1,5 \cdot C1 \cdot Ro} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IL1 \\ V1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V1}{L1} \\ \left(\frac{-IL1}{C1} \right) \end{bmatrix} \cdot \gamma + \begin{bmatrix} \frac{VIN}{L1} \\ \left(\frac{V2+V3}{3 \cdot Ro \cdot C1} \right) \end{bmatrix}$$

O sistema de controle utilizado foi por modos deslizantes, que consiste em comparar um sinal de referência à variável controlada, fazendo que esta variável obedeça e siga a referência. No caso do inversor boost trifásico, têm-se duas variáveis controladas em cada fase, corrente de entrada nos indutores e tensão de saída nos capacitores. A Figura 14 mostra o diagrama eletrônico de uma única fase, pois ele se repete para as outras duas fases do conversor. Esses sinais de saídas devem seguir a referência, que neste caso serão formas de ondas senoidais que

representam a corrente no indutor ($IREF$) e a tensão de saída sobre o capacitor ($VREF$). Os sinais são lidos, é gerado um sinal de erro entre valor da referência e o sinal lido; após o cálculo deste erro de corrente ($e2$), a corrente é multiplicada por uma constante $k1$ e, após o cálculo do erro de tensão ($e1$), ela é multiplicada por uma constante $k2$, sendo depois processada no bloco de histerese ($H1$) e atuando nos interruptores $Q1$ e $Q2$. Todo processamento foi realizado por um Processador Digital de Sinais DSP eZDSC F28335.

Figura 14: Diagrama do controle por modos deslizantes

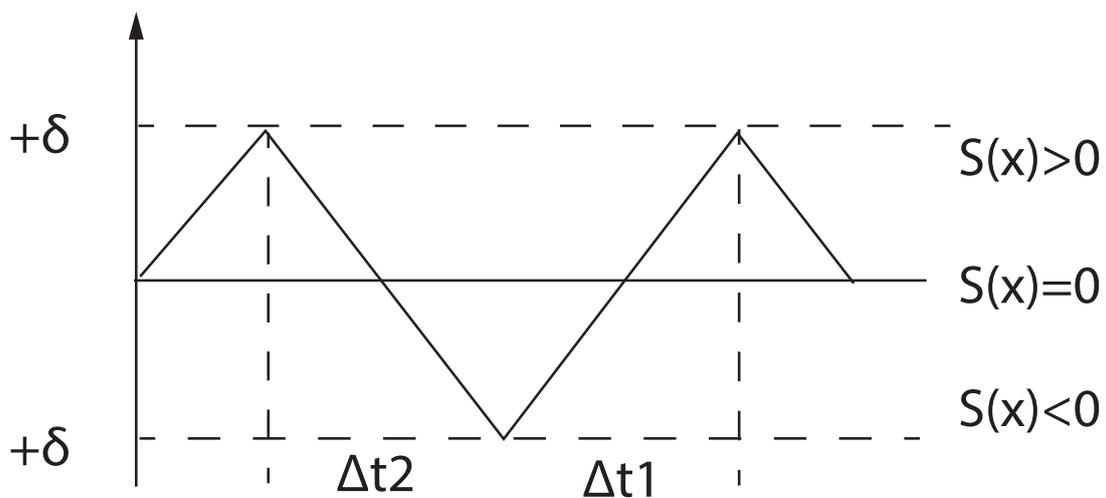


Fonte: Adaptado de Giacomini (2007)

No controle por modos deslizantes, a trajetória da variável a ser seguida está situada próxima à superfície no espaço dos estados (superfície de deslizamento), denominada de $S(IL1, V1)$, representada na Equação (6). A Figura 15 mostra a superfície de deslizamento.

$$= K_1 \cdot e_2 + K_2 \cdot e_1 = 0$$

Figura 15: Superfície de deslizamento



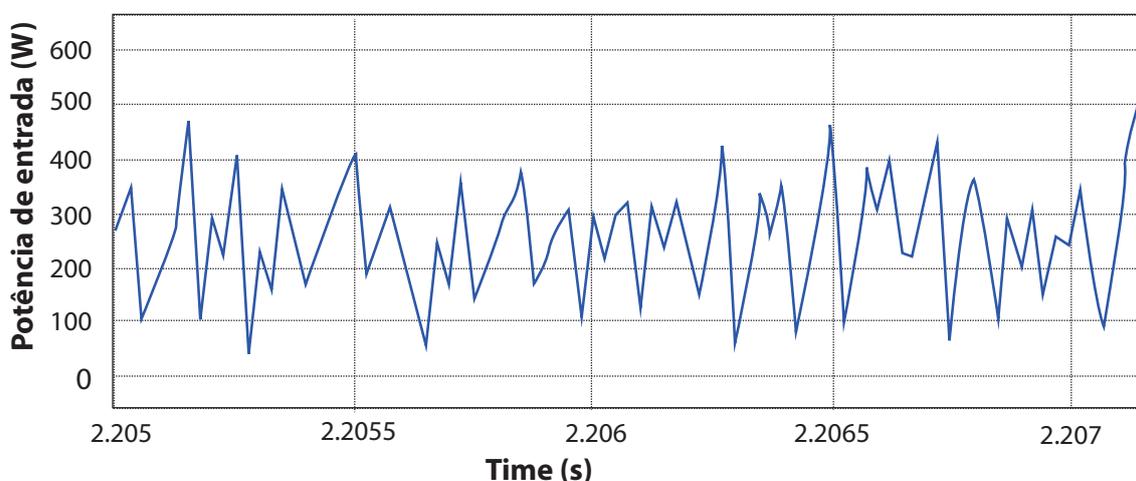
Fonte: Adaptado de Giacomini (2007)

4.4 Resultados simulados

O software de simulação PSIM foi utilizado para o desenvolvimento e validação dos algoritmos empregados na modulação do controle por modos deslizantes. No trabalho original foi simulado o conversor operando com uma fonte de energia comercial e também com o arranjo de cinco painéis fotovoltaicos conectados em série, os dados desse último serão mostrados neste artigo.

A Figura 16 apresenta o gráfico da potência total de entrada do conversor, extraída do arranjo dos painéis fotovoltaicos e necessária para acionar a carga em potência nominal. Os valores máximos de potência ocorrem em torno de 520 W; dessa forma, esta é a mínima potência necessária extraída dos painéis para o perfeito funcionamento.

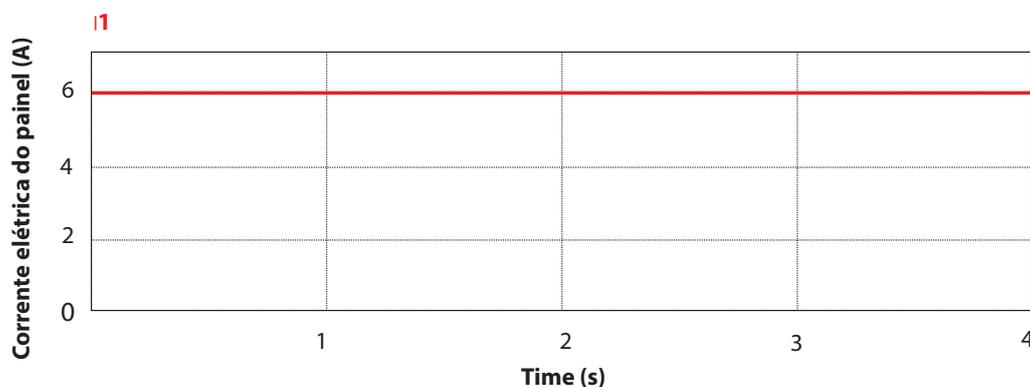
Figura 16: Potência de entrada



Fonte: Dos autores (2014)

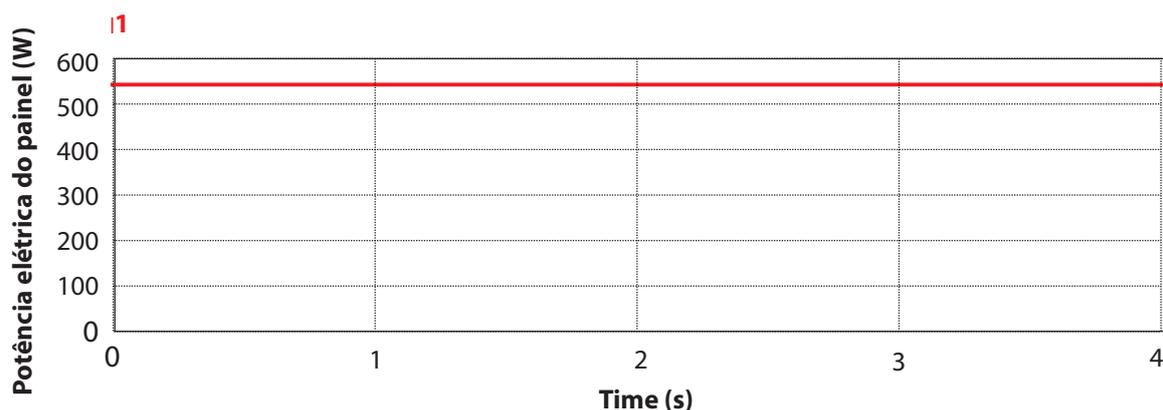
Para verificar qual é a radiação solar necessária no painel fotovoltaico para a geração da potência necessária, foi realizado um teste curtocircuitando a saída do painel, que media em torno de 6 A de corrente elétrica e tinha uma potência em torno de 550 W, para a radiação de 770 W/m² (radiação máxima no período do experimento). Assim, obteve-se o gráfico das Figuras 17 e 18.

Figura 17: Corrente elétrica fornecida pelo painel, com 700 W/m²



Fonte: Dos autores (2014)

Figura 18: Potência elétrica fornecida pelo painel, com 700 W/m²



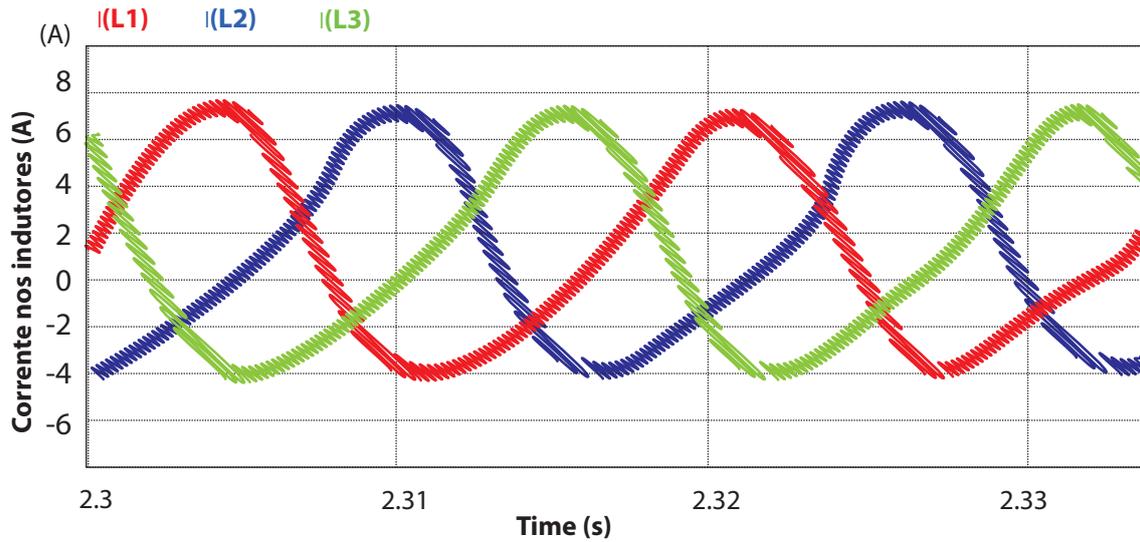
Fonte: Dos autores (2014)

CONFORME OS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO, OS CINCO PAINÉIS DISPONÍVEIS DE 140W NÃO SÃO SUFICIENTES PARA ACIONAR O MOTOR EM SUA PLENA CARGA. ISSO SE DEVE À CORRENTE DE ENTRADA DO CONVERSOR SER MAIOR DO QUE A DISPONÍVEL PELO PAINEL, BEM COMO A ALTA CORRENTE DE PARTIDA DO MOTOR, MESMO COM UMA RAMPA DE ACELERAÇÃO.

Observa-se que o conversor opera na máxima potência por um breve espaço de tempo. Isso ocorre porque a tensão extraída do painel é

continua, mas com grande oscilação na corrente elétrica, fazendo que a potência instantânea tenha a mesma envoltória da corrente de entrada do conversor, podendo ser menor ou maior que o MPP. Quando ela ultrapassa o valor de MPP, o painel pode ser submetido a um curto-circuito, o que faz que a tensão diminua para próximo de zero volt. Isso faz que se necessite de uma potência mais elevada para acionar o motor, mas não para ser utilizada em todo o tempo; assim, ficaria viável utilizar elementos armazenadores de energia, como baterias, para posterior utilização, evitando desperdícios e subutilização dos painéis fotovoltaicos. Com radiação solar menor que 770 W/m², o conversor não consegue partir e manter o motor girando. A Figura 19 mostra as correntes de entrada nos indutores, em cada fase do conversor.

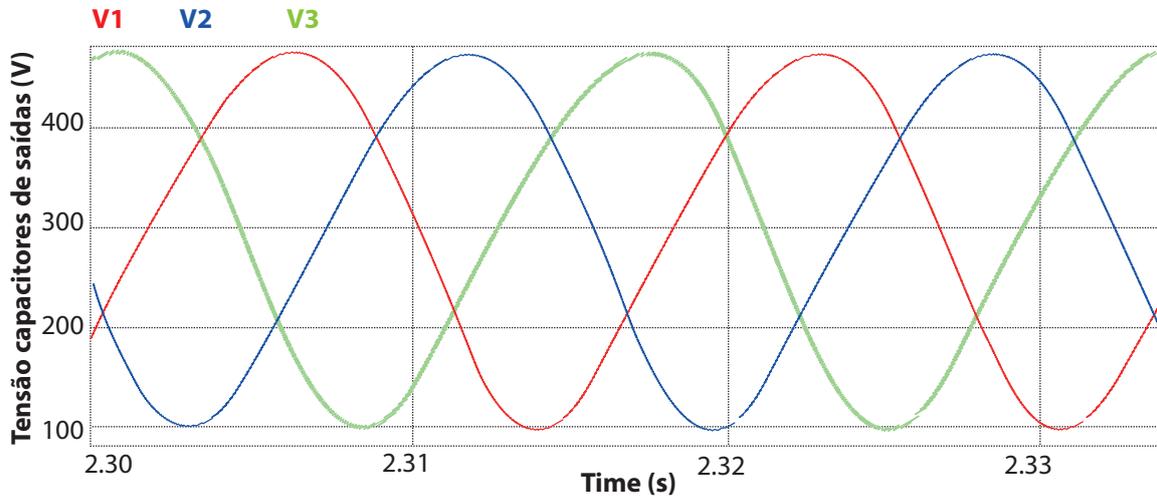
Figura 19: Corrente nos indutores de entrada



Fonte: Dos autores (2014)

A Figura 20 mostra as tensões de fase sobre os capacitores. Nota-se que a tensão sobre os capacitores possui uma componente contínua e uma componente senoidal, totalizando um valor máximo de 470 V.

Figura 20: Tensão nos capacitores de saída



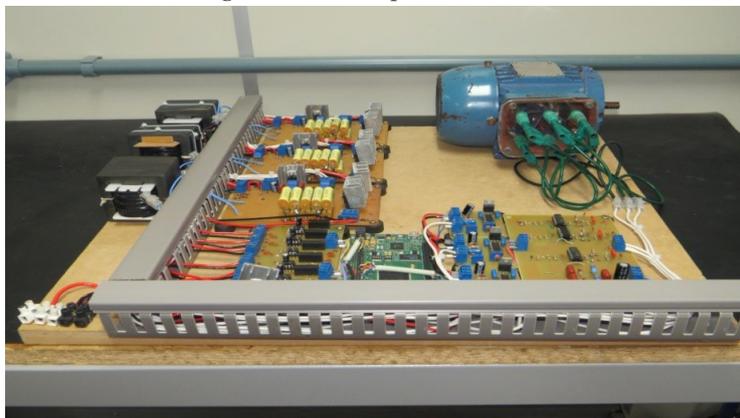
Fonte: Dos autores (2014)

4.5 Resultados experimentais

A Figura 21 mostra o protótipo implementado com as respectivas interligações entre todas

as placas eletrônicas do projeto, placas de potência, condicionamento de sinais e drivers de acionamento dos interruptores.

Figura 21: Protótipo do conversor



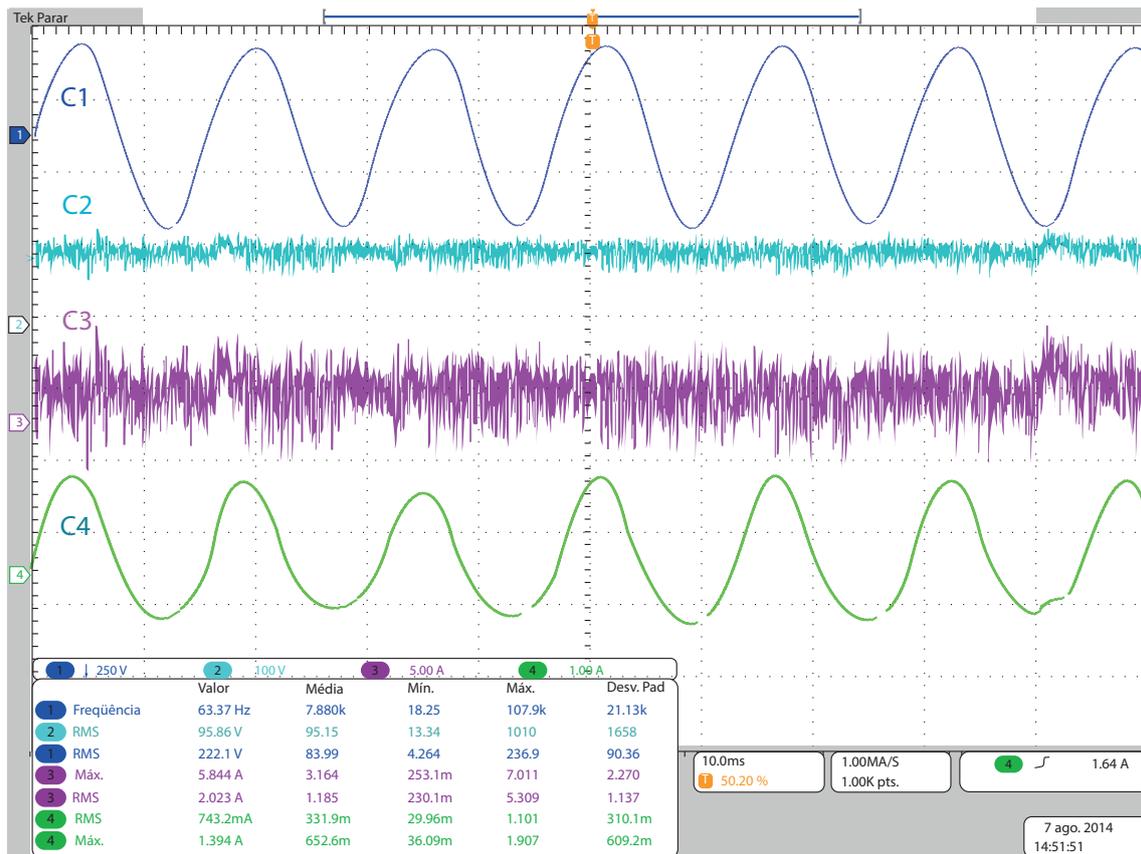
Fonte: Dos autores (2014)

No dia do experimento, 2 de agosto de 2014, a radiação solar era de 660 W/m^2 , inviabilizando os testes com o motor a plena carga. Assim, foram realizados os testes com o motor a vazio e com frequências de 40, 50 e 60 Hz, mantendo a relação tensão frequência (V/F) constante.

A Tabela 2 mostra o tempo em que a radiação permaneceu acima de 700 W/m^2 , evidenciando as baixas radiações de julho a dezembro de 2013, sendo que apenas em dezembro o tempo de bombeamento seria em torno de 79 hs.

Após a construção do protótipo do conversor, condicionado a sinais de tensão e de corrente, foi utilizada uma fonte de alimentação CC conectada à rede comercial de energia elétrica. Também foram feitos os testes utilizando o arranjo dos cinco painéis fotovoltaicos, obtendo as formas de onda da Figura 22. O canal 1 (C1) mostra a tensão de saída, C2 mostra a tensão de entrada, C3 a corrente de entrada e C4 mostra os dados da corrente de saída para uma das fases do motor.

Figura 22: Resultados com arranjo fotovoltaico, motor a vazio



Fonte: Dos autores (2014)

A Tabela 3 mostra o resumo de todos os resultados experimentais com utilização da fonte de tensão conectada à rede elétrica e ao arranjo dos painéis fotovoltaicos. Foram realizados testes com frequências de 40, 50 e 60 Hz, mantendo a relação V/F aplicada no motor.

Tabela 3: Resumo dos resultados experimentais

Parâmetros	Alimentação com fonte CC (Motor à plena carga)			Alimentação com painéis fotovoltaicos (Motor a vazio)		
	Frequência de saída (Hz) – C1	42,49	53,19	63,81	42,86	53,10
Tensão de linha de saída (V CA rms) – C1	149,6	182,7	217,1	148,10	189,8	222,1
Corrente de linha de saída (A rms) – C4	1,162	1,198	1,30	0,666	0,691	0,743
Corrente de linha de saída (A máx) – C4	2,015	2,156	2,407	1,206	1,317	1,394
Tensão de entrada (V CC) – C2	98,19	98,09	97,91	66,08	88,49	95,86
Corrente de entrada (A rms) – C3	3,099	3,318	4,249	1,873	1,837	2,023
Corrente de entrada (A máx) – C3	7,745	8,318	10,85	4,344	5,265	5,844
Rotação do motor (RPM)	2492	3125	3765	2534	3172	3810

Fonte: Dos autores (2014)

5 CONCLUSÃO

O desempenho do conversor com os parâmetros nominais de carga, ou seja, alimentando a motobomba elétrica trifásica, atenderam aos parâmetros de placa da motobomba, utilizando como alimentação do conversor uma fonte de tensão em corrente contínua conectada à rede comercial de energia elétrica. Entretanto, para a implementação do conversor alimentado com o arranjo de cinco painéis fotovoltaicos em série, não foram atendidos os parâmetros nominais de carga, pois a corrente total consumida pelo conversor variou de 7,745 A à 10,85 A, ultrapassando o limite máximo fornecido pelos painéis fotovoltaicos, que é de aproximadamente 8 A, no ponto de maior potência, considerando uma radiação solar de 1000 W/m². Dados de radiação solar no mês de agosto de 2014 mostram que a radiação máxima chegou em torno de 700 W/

m², diminuindo para aproximadamente 5,5 A de corrente disponível no painel, inviabilizando o uso na motobomba em carga nominal. Em função do resultado negativo referente aos testes da motobomba em plena carga, utilizando o arranjo de painéis fotovoltaicos, realizou-se um segundo teste utilizando um motor elétrico trifásico operando sem carga acoplada ao eixo, que funcionou perfeitamente. Isso aconteceu porque a corrente de entrada do conversor variou de 4,344 A a 5,844 A, ficando dentro das especificações dos painéis fotovoltaicos. Com os resultados obtidos, a operação do sistema torna-se inviável com energia solar fotovoltaica sem uso de acumuladores (baterias), pois para o perfeito funcionamento deve ser instalado no mínimo mais cinco painéis, acoplados em paralelo com os atuais, aumentando, assim, a

corrente elétrica fornecida. Mas nessa condição teria 1.400 W, para acionar uma motobomba de 1/3 CV, ou seja, 250 W, ocasionando uma elevação dos custos e um superdimensionamento de potência. Portanto, pode-se escolher três possibilidades para a utilização de energia solar fotovoltaica neste projeto: manter cinco painéis para carregar um banco de baterias ou acrescentar mais cinco painéis ao arranjo anterior, conectados em paralelo, ou ainda injetar a potência dos cinco painéis direto na rede da

concessionária. O retorno do investimento de R\$ 60 mil se dará em torno de aproximadamente 22 meses, podendo reduzir ainda mais se a área de captação de água for aumentada. Após este retorno de investimento, a unidade do SENAI/SC em Blumenau terá uma economia anual de aproximadamente R\$ 32 mil. Independente do uso de energia solar fotovoltaica ou não, devido ao custo atual da água, o sistema é viável economicamente.



RAINWATER PUMPING SYSTEM: STUDY OF THE FEASIBILITY OF USING PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY

ABSTRACT

This work presents the development of a rainwater pumping system which uses photovoltaic solar energy without using batteries. The work also features the study of the economic viability of the system for the Blumenau SENAI/SC unit. The water pumping system is composed by an electric three-phase motor pump which is driven by a three-phase DC-AC Boost converter, which raises the voltage and does the DC-AC conversion in a single stage. The system is supplied with 100 VDC voltage and converts it into a 220 VRMS three-phase line voltage. The work presents a bibliographic revision about the hydric situation in Brazil and the water availability in Brazil and Blumenau/SC. In sequence, the electronic power processing system is presented, describing its operation, equations and project methodology. Finally the experimental results of the structure for different operation conditions are presented.

KEYWORDS: *Boost Inverter, Sliding-Mode Control, Dc-Ac Converter .*

REFERÊNCIAS

CENTRO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA (CEOPS). Disponível em: <<http://ceops.furb.br/index.php>>. Acesso em: 7 jan. 2013.

COELHO, R. F. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FOZ DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.foz.com.br/blumenau/>>. Acesso em: 22 maio 2014.

GIACOMINI, P. S. **Projeto de um inversor elevador trifásico com controle por regime de deslizamento implementado em DSP.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade do Estado de Santa Catarina, 2007.

GOMES, A. S.; SCIVITTARO, W. B.; PETRINI, J. A.; FERREIRA, L. H. G. **A água:** distribuição, regulamentação e uso na agricultura, com ênfase ao arroz irrigado. Pelotas: Embrapa, 2008.

GOMES, M. A. F. **A água:** sem ela seremos o planeta Marte de amanhã. Local: Embrapa, mar. 2011. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=24160&xsecao=Agrotemas>>. Acesso em: 8 jan. 2014.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. **Energia e meio ambiente.** 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Informações estatísticas.** 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=420240>>. Acesso em: 9 jan. 2014.

SOBRE OS AUTORES

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **População mundial deve atingir 9,6 bilhões em 2050, diz novo relatório da ONU.** 13 de junho de 2013. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/populacao-mundial-deve-atingir-96-bilhoes-em-2050-diz-novo-relatorio-da-onu/>>. Acesso em: 08 jan. 2014.

PEDDE, S.; KROEZE, C.; RODRIGUES, L. N. **Escassez hídrica na América do Sul:** situação atual e perspectivas futuras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XX., 2013, Bento Gonçalves. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=155&PAG=2>>. Acesso em: 8 jan. 2014.

REN21. Renewable energy policy network for the 21st century. **Renewables 2013 Global Status Report.** Disponível em: <<http://www.unep.org/pdf/GSR2013.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2014.

SANTOS, H. V. R. **Reuso não potável de água em edifícios.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica, Brasília, 2012.

ZOMER, C. D. **Megawatt solar:** geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em meio urbano e conectada à rede elétrica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

Data de recebimento: 29/09/2015

Data de aprovação: 15/12/2015



Rogério Luiz Nascimento

Engenheiro eletricista graduado em Engenharia Elétrica pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 1995. Possui especialização lato sensu em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário Leonardo da Vinci (UNIASSELVI), obtida em 2011. Concluiu o mestrado em Engenharia Elétrica na área de concentração de sistemas de energia, na linha de pesquisa de Eletrônica Industrial de Potência na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 2014. Atualmente é coordenador e docente nos cursos superiores de Tecnologia em Automação e Mecatrônica Industrial, nos cursos de pós-graduação em Engenharia de Automação e Engenharia Mecatrônica e na Faculdade de Tecnologia SENAI Blumenau (SC). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em eletrônica industrial, sistemas e controles eletrônicos, energia solar fotovoltaica, conversores CC-CC, CC-CA e acionamentos elétricos.



Romeu Hausmann

Engenheiro eletricista graduado em Engenharia Elétrica pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 1995, com mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2000. Concluiu o doutorado no instituto de Eletrônica de Potência da UFSC em 2011. Atualmente é professor dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Telecomunicações da Universidade Regional

de Blumenau (FURB). É docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE – FURB). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em eletrônica industrial, atuando principalmente nos seguintes temas: inversores multiníveis, geração de energia solar fotovoltaica, conversores CC-CC e educação em engenharia. É membro da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP), da Power Electronics Society (PELS) e do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE).

