

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA PRODUÇÃO DE GELO PARA PEQUENAS COMUNIDADES ISOLADAS SEM UTILIZAÇÃO DE ACUMULAÇÃO ELETROQUÍMICA

Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@iee.usp.br
Aimé Fleury de Carvalho Pinto Neto – afpinto@iee.usp.br
Carlos Driemeier* – carlos.driemeier@bioetanol.org.br
Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, LSF – Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

Resumo. Este trabalho descreve uma máquina de gelo alimentada por energia solar de fácil construção e manutenção, capaz de produzir até 27 kg de gelo por dia com uma irradiação de 5,5 kWh/m². A máquina foi adaptada para ser alimentada por um conversor de frequência conectado diretamente a um gerador fotovoltaico. O trabalho também apresenta os resultados dos testes operacionais em laboratório e o contexto das comunidades isoladas que inspirou o desenvolvimento do equipamento.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, produção de gelo, conversor de frequência.

1. INTRODUÇÃO

Em comunidades isoladas, onde não existe energia elétrica da rede convencional e o acesso é bastante difícil, um dos maiores desafios está na refrigeração de alimentos e bebidas. Duas estratégias são normalmente empregadas: a utilização de gelo ou a geração local de eletricidade para alimentar um refrigerador ou freezer.

A utilização de gelo tradicionalmente se dá com a compra do mesmo em locais distantes do consumo, adicionando ao preço do produto os custos com a logística de transporte, podendo tornar essa opção inviável economicamente e escolhida apenas por imposição da necessidade de refrigeração. Isso inviabiliza empreendimentos que poderiam promover o desenvolvimento das comunidades, como o turismo e a pesca, garantindo melhores condições de vida.

A geração local de eletricidade pode se dar de duas formas: através de um grupo gerador ou de um sistema de geração com fontes renováveis. A primeira apresenta o inconveniente econômico do transporte do combustível, pois ele também precisa ser comprado em locais distantes, encarecendo-o, e o ambiental, devido às emissões do grupo gerador. A segunda apresenta a facilidade da produção local de gelo sem os problemas intrínsecos à geração com combustível fóssil, mas normalmente utiliza acumuladores eletroquímicos para estocar energia, a fim de garantir ao sistema maior autonomia e confiabilidade devido à intermitência das fontes. Esses acumuladores elevam os custos de instalação e manutenção e podem se tornar um problema ambiental no descarte.

Dessa forma, a utilização de fontes renováveis para a produção de eletricidade é uma alternativa atrativa, desde que seja evitado o uso de acumuladores. Para a eletrificação de comunidades isoladas é quase imprescindível o uso de acumuladores, mas se o objetivo for apenas produzir frio, o armazenamento de energia pode ser feito diretamente na forma de gelo.

2. PRODUÇÃO DE FRIO UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar tem se mostrado adequada para a produção de frio sem a utilização de acumuladores eletroquímicos. Diversos estudos já foram realizados e resultaram em protótipos tecnicamente viáveis.

DE BLAS et al (2003) descrevem um sistema de refrigeração para a conservação de leite. O sistema é capaz de resfriar até 150 L de leite por dia, e utiliza um gerador de 2,4 kWp que alimenta dois motores CC de 24 V e 650 W que acionam os compressores. O sistema consiste em um reservatório cercado por água, a qual é congelada durante o dia e mantém a refrigeração durante períodos de baixa ou nenhuma irradiação.

AXAOPOULOS e THEODORIDIS (2009) desenvolveram uma máquina de gelo com múltiplos compressores CC pequenos com potências diferentes, ao invés de um único compressor de potência mais elevada, de maneira a otimizar a utilização da energia que o gerador pode fornecer, permitindo iniciar o funcionamento da máquina com irradiações baixas (em torno de 150 W/m²), e diminuir a potência de partida devido ao menor atrito mecânico de compressores pequenos, o que é interessante em sistemas com limite máximo de potência. A produção de gelo, em um dia bom, é de 17 kg com um gerador de 440 Wp.

* Endereço atual: Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol – CTBE.

Outra aplicação é na conservação de medicamentos. PEDERSEN et al (2004) apresentam um refrigerador capaz de manter vacinas na temperatura adequada (entre 0 e 8 °C) por até quatro dias sem disponibilidade da fonte solar. Para isso, utiliza o gelo como reserva de frio. O equipamento, que utiliza um compressor CC, foi testado em campo e os dados obtidos da monitoração mostram que as vacinas permaneceram dentro da faixa de temperatura desejada.

Esses são apenas alguns exemplos de como sistemas fotovoltaicos de produção de frio podem ser utilizados para conservar alimentos e medicamentos e para produzir gelo, sendo esse último aproveitamento o enfoque da máquina apresentada nesse trabalho.

3. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DA MÁQUINA DE GELO

No contexto de utilização de sistemas FV sem acumuladores eletroquímicos para a produção de frio, Driemeier e Zilles (2010) propõem uma máquina de gelo adaptada para operar com conversor de frequência e geração FV. Nesta adaptação todos os componentes utilizados já estão disponíveis nos mercados de refrigeração. Para o condicionamento de potência foi feito um circuito de controle simples visando à reprodução da construção, difusão de unidades de produção de gelo e facilidade de manutenção.

O equipamento consiste em um gabinete termicamente isolado (Refricol T01) com capacidade total de 90 kg, uma unidade condensadora com compressor de deslocamento positivo (Bitzer ARS 070/2-I), um conversor de frequência (Weg CFW-08 plus, 220 V, 1,5 HP), uma fonte DC de 24 V, uma válvula solenóide (Danfoss EVR3), uma válvula de expansão termostática (Danfoss TEX2), um motor de indução (Weg W21) trifásico de quatro pólos e 1,5 HP e um gerador FV de 1040 Wp. A Fig. 1 mostra a máquina de gelo e o circuito refrigerante é mostrado na Fig. 2 (o refrigerante utilizado foi o R22).



(a)



(b)



(c)

Figura 1 – Máquina de gelo: (a) gabinete, (b) motor, compressor e demais componentes do circuito térmico e (c) quadro elétrico com circuito de controle, banco de resistores (com proteção metálica, externo à caixa de proteção) e banco de capacitores. (Adaptado de Driemeier e Zilles, 2010).

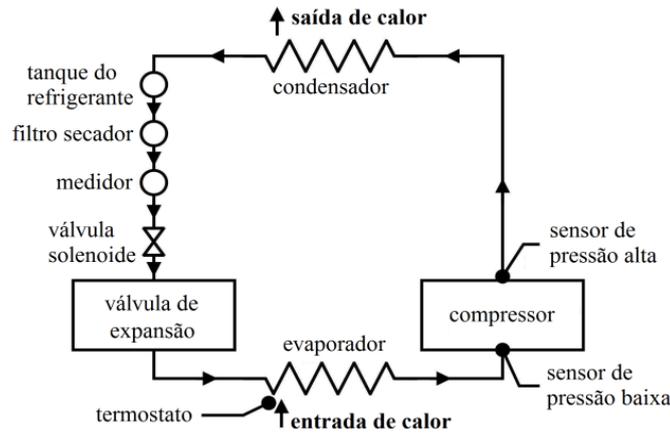


Figura 2 – Circuito refrigerante da máquina de gelo (Adaptado de Driemeier e Zilles, 2010).

Além desses componentes adquiridos no mercado, a máquina conta, também, com alguns desenvolvidos localmente, como é o caso do circuito de controle, do banco de resistores (R), que dissipa a energia gerada quando essa não é suficiente para acionar a máquina, e do banco de capacitores (C), que ajuda a diminuir a queda de tensão no momento do acionamento do motor. A Fig. 3 mostra o diagrama esquemático da máquina.

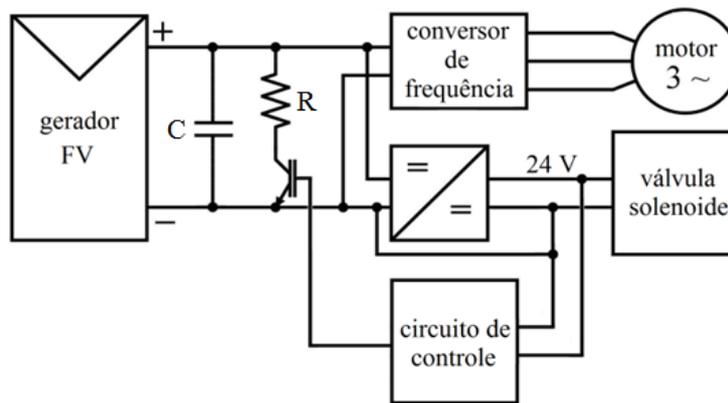


Figura 3 – Diagrama esquemático da máquina de gelo (Adaptado de Driemeier e Zilles, 2010).

A máquina foi projetada para produzir até 27 kg de gelo por dia, considerando uma irradiação $\geq 5,5$ kWh/m². A velocidade do motor é controlada pelo conversor de frequência, de forma a manter a tensão do gerador fixa em um valor que otimize a geração (aproximadamente 312 V para o gerador utilizado). Essa estratégia leva a perdas menores que 2% em comparação ao seguimento contínuo do ponto de máxima potência (Driemeier e Zilles, 2010).

O funcionamento inicia quando a tensão ultrapassa um valor mínimo (308 V, que corresponde aproximadamente à potência mínima para o motor funcionar), evitando falhas ao ligar o motor. A velocidade inicial do motor é de cerca de 600 rpm, contudo é demasiadamente baixa para o compressor operar corretamente. Dessa forma, o circuito de controle apenas aciona a válvula solenóide para ligar o circuito de refrigeração quando a rotação atingir 1260 rpm.

O desligamento pode se dar de duas maneiras: a primeira é por indicação do termostato, do sensor de baixa pressão ou do sensor de alta pressão que são ligados às entradas digitais do conversor, que indica erro se um deles for ativado. A segunda é por falta de potência, detectada pela diminuição da tensão do gerador FV. É importante destacar, ainda, que a faixa de velocidades entre 1755 e 1845 rpm foi evitada (por meio de programação no conversor) para não haver ressonância mecânica com na máquina.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para os testes experimentais a máquina foi carregada com 27 kg de água a aproximadamente 20°C. Foram medidas (em intervalos de 3 s) as variáveis irradiação no plano dos módulos, tensão e corrente do gerador FV, velocidade do motor e pressão de evaporação. A potência foi calculada multiplicando a corrente pela tensão do gerador ou dada como zero quando o motor estivesse parado. A Fig. 4 mostra o funcionamento da máquina durante um dia de céu limpo.

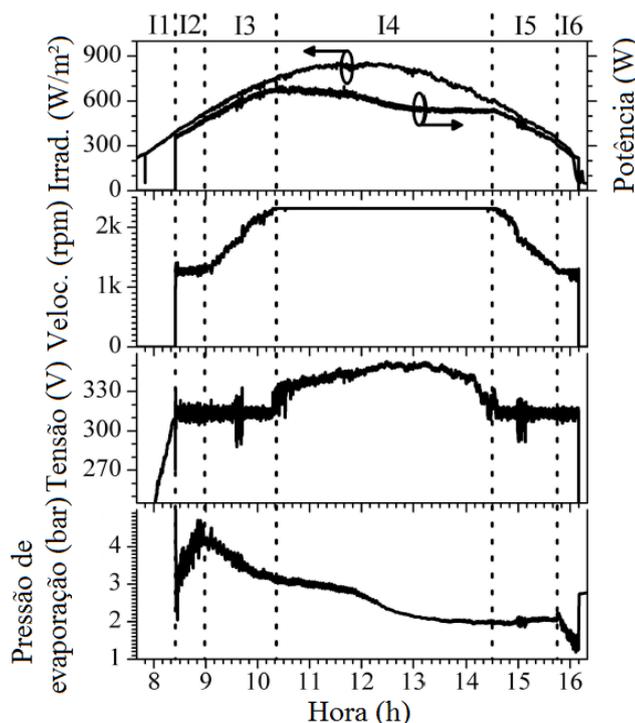


Figura 4 – Comportamento da máquina de gelo durante um dia de céu limpo (Adaptado de Driemeier e Zilles, 2010).

O dia foi dividido em seis intervalos. A Tab. 1 explica o funcionamento da máquina em cada um deles.

Tabela 1 – Descrição dos intervalos do funcionamento da máquina de gelo para um dia de céu limpo.

Intervalo	Descrição
I1	O motor permanece desligado até a irradiância atingir aproximadamente 390 W/m ² . Pode-se perceber uma relação direta entre a tensão e a irradiância, o que justifica o acionamento do motor ser controlado pelo valor da tensão do gerador FV (aproximadamente 308 V).
I2	Quando a tensão do gerador atinge 308 V, o motor é acionado e a tensão permanece em torno dos 312 V e a velocidade dos 1260 rpm. A abertura periódica da válvula solenóide modula a pressão de evaporação.
I3	O motor passa a girar com velocidade acima de 1260 rpm, acompanhando a disponibilidade de potência. A pressão de evaporação passa a ser controlada pela válvula de expansão e a tensão continua em torno dos 312 V. A variação significativa da tensão no meio desse intervalo se deve ao conversor evitar a faixa de frequência de ressonância.
I4	Esse intervalo inicia quando o motor atinge a velocidade máxima suportada pelo compressor (2310 rpm). A partir desse ponto a tensão não se mantém mais constante, e cresce com o aumento da potência disponível para que a velocidade máxima não seja ultrapassada.
I5	Ao final do dia a disponibilidade de potência decresce, e a velocidade começa a diminuir até atingir o valor mínimo de 1260 rpm. A tensão volta a oscilar em torno dos 312 V.
I6	Esse intervalo inicia quando a válvula solenóide recomeça a abrir periodicamente e modular a pressão de evaporação. Finalmente, a potência disponível torna-se menor que a limite e a máquina desliga.

A fim de analisar o preço do gelo produzido, os custos dos equipamentos foram anualizados com uma taxa de desconto de 12% ao ano. O custo do ciclo de vida anualizado A foi calculado com a Eq. 1, onde E é o investimento inicial, r é a taxa de desconto e n é a vida útil.

$$A = E \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} \quad (1)$$

Os custos com operação correspondem a ¼ de hora de trabalho todo dia durante um ano (para colocar água e retirar o gelo) em termos do salário mínimo brasileiro. A Tab. 2 mostra os resultados obtidos e o total do custo anualizado de R\$ 4.430,00.

Tabela 2 – Custo anualizado da máquina de gelo (Adaptado de Driemeier e Zilles, 2010).

Item	Investimento (R\$)		Vida útil (anos)	Custo do ciclo de vida anualizado (R\$)
Gerador FV	14.000,00			
Suporte mecânico	1.400,00	16.000,00	20	2.142,00
Instalação	600,00			
Máquina de gelo	8.000,00			
Componentes eletrônicos	1.300,00	10.100,00	10	1.788,00
Caixa de conexões	800,00			
Operação				500,00
TOTAL				4.430,00

Para calcular o custo de produção do gelo, basta dividir o valor total do custo anualizado da máquina pela quantidade de gelo produzida em um ano. Considerando a irradiação anual na região amazônica, local com potencial para a utilização da máquina, em torno dos 1.800 kWh/m² (Martins et al, 2008), a produção de gelo é de 7.500 kg por ano. Isso implica em um custo de 0,60 R\$/kg. Esse valor chega a ser seis vezes maior do que aquele considerando a máquina alimentada pela rede e abastecida com os 90 kg de água nominais (Driemeier e Zilles, 2010). Isso se deve ao preço elevado da energia FV e ao baixo fator de capacidade da máquina operada apenas com energia solar.

5. CONCLUSÕES

As condições de isolamento de determinadas comunidades e a preocupação com o meio ambiente tornam atrativa a utilização da energia solar FV para a produção de gelo para atender à demanda dessas comunidades. Esse trabalho apresentou uma máquina de gelo adaptada para operar com conversor de frequência e geração FV, onde todos os componentes utilizados já estão disponíveis nos mercados de refrigeração. Para acondicionamento de potência foi desenvolvido um circuito de controle simples, o que torna simples reproduzir sua construção e facilita a manutenção.

Esta máquina é capaz de produzir até 27 kg de gelo por dia com irradiação de 5,5 kWh/m². O custo do gelo foi estimado em 0,60 R\$/kg para uma irradiação anual de 1.800 kWh/m² e uma taxa de desconto de 12%. Os resultados apresentados correspondem a testes em laboratório. A próxima etapa é validar o funcionamento da máquina em campo, e para isso uma comunidade no interior do estado de São Paulo foi escolhida para receber o equipamento. Pretende-se estender o experimento, no âmbito das atividades do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, para uma comunidade Ribeirinha localizada na região Norte.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento da pesquisa e do trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA). Os autores manifestam seu agradecimento às empresas BITZER e REFRICOL pelo apoio e equipamentos cedidos para desenvolvimento do protótipo.

REFERÊNCIAS

- De Blas, M., Appelbaum, J., Torres, L., García, A., Prieto, E., Illanes, R. A Refrigeration Facility for Milk Cooling Powered by Photovoltaic Solar Energy. *Progress in Photovoltaics*. **11**:467–479. Abril, 2010.
- Axaopoulos, P. J., Theodoridis, M. P. Design and experimental performance of a PV Ice-maker without battery. *Solar Energy*. **83**:1360–1369. Março, 2009.
- Pedersen, P. H., Poulsen, S., Katic, I. SOLARCHILL - A solar PV refrigerator without battery. In: EuroSun 2004 Conference. 2004.
- Driemeier, C., Zilles, R. *An ice machine adapted into an autonomous photovoltaic system without batteries using a variable-speed drive*. *Progress in Photovoltaics*. 2010.
- Martins F. R., Pereira E. B., Silva S. A. B., Abreu S.L., Colle S. *Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment*. *Energy Policy*. **36**:2853-2864. 2008.

Abstract. *This paper shows the description of an ice machine powered by solar energy with easy construction and maintenance, capable to produce up to 27 kg of ice per day under a 5.5 kWh/m² irradiation. The machine was adapted to be powered by a frequency converter feed directly by a photovoltaic generator. The paper also shows the operational results under laboratory conditions and the context of isolated communities that inspired the development of the equipment.*

Key words: *Photovoltaic solar energy, ice production, frequency converter.*