

## REFRIGERADOR PORTÁTIL ALIMENTADO POR ENERGIA RENOVÁVEL

Carlos Henrique da Silveira Zanin<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0006-9158-5535>

## RESUMO

Este artigo consiste no projeto de um refrigerador portátil acionado por energia renovável. Foi realizado um estudo acerca da disponibilidade de energia solar e eólica em pequena escala. Para realizar a refrigeração se utiliza pastilhas termoelétricas, também conhecidas por pastilhas Peltier. Um bom projeto de refrigeração inicia com o correto dimensionamento da carga térmica. Os cálculos da carga térmica foram realizados utilizando o arquivo climático do município em estudo para a aplicação (Tramandaí). Para a seleção da pastilha Peltier, foi feita uma análise de transferência de calor baseada nos dissipadores de calor utilizados no projeto e na folha de dados disponibilizada pelo fabricante da pastilha. Utilizou-se o software EnergyPlus para o cálculo da potência obtida pelo painel fotovoltaico nas condições de operação. Por fim, foi feito um breve estudo sobre os componentes elétricos do refrigerador e um esboço das ligações entre esses componentes. O projeto do refrigerador portátil apresenta algumas limitações físicas e energéticas, como a grande dimensão e massa de seus componentes, o grande consumo de energia pelas pastilhas Peltier e a baixa obtenção de energia pelos painéis fotovoltaicos, limitando assim o valor da carga térmica. Porém, quando o produto é colocado a 5 °C no refrigerador, sua temperatura é conservada, e o refrigerador funciona dentro de suas limitações energéticas.

## Palavras-chave

Refrigeração; energia renovável; Peltier.

## PORTABLE REFRIGERATOR POWERED BY RENEWABLE ENERGY

## ABSTRACT

This study is about the design of a portable refrigerator powered by renewable energy. Research is done on small scale solar and wind energy availability. The refrigeration is generated by thermoelectric modules, also known as Peltier modules. A successful refrigeration project begins with the correct calculation of the heating load. These calculations are based on local data from the intended area of operation (Tramandaí). The Peltier module selection is done through a heat transfer analysis based on the heat sinks used on the design and using the datasheet provided by the module manufacturer. The software EnergyPlus is used to calculate the available power provided by the photovoltaic panel during operation. Finally a brief study about the system electric components is done and its connections are represented in a simplified drawing. The design of the portable refrigerator has some physical and energetic constraints, like the large size and weight of its components, great energy consume by the Peltier modules and the low rate of energy powered by the renewable sources, adding a limitation to the heating. However, when the product is placed at 5 °C in the refrigerator, the temperature is preserved, and the refrigerator works within its limitations energy.

## Keywords

Refrigeration; renewable energy; Peltier.

Submetido em: 19/09/2023 – Aprovado em: 30/10/2023 – Publicado em: 30/10/2023

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Marinha do Brasil, RJ, zanin@marinha.mil.br

## 1 INTRODUÇÃO

Energias renováveis são aquelas em que os recursos naturais utilizados são capazes de se regenerar, ou seja, são considerados inesgotáveis, diferente de fontes não renováveis como o petróleo [Portal Brasileiro de Energias Renováveis, 2013]. Exemplos de fontes renováveis de energia são a energia eólica e a energia solar. O crescimento da utilização de energias renováveis surge frente à preocupação da população mundial com os malefícios que a queima de combustíveis fósseis causa ao meio-ambiente. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o percentual de participação do conjunto das fontes renováveis de energia (hidráulica, eólica, etanol, biomassa, entre outras) vai aumentar na matriz energética brasileira nos próximos anos. A presença desses recursos, que somou 44,8 % em 2010, chegará a 46,3 % em 2020.

Acompanhando a tendência da utilização de energias renováveis, que vai desde grandes instalações até o carregamento de pequenos dispositivos eletrônicos, o presente artigo visa projetar um refrigerador portátil que utiliza fontes renováveis de energia. O produto a ser refrigerado, para efeito do cálculo da carga térmica, é cerveja. Porém, o refrigerador pode ser utilizado para refrigerar e transportar outros produtos como, por exemplo, alimentos ou órgãos e vacinas, desde que respeitadas as normas para o transporte de tais produtos. O local definido para as condições de projeto é o município de Tramandaí, no período do verão, pois o refrigerador pode ser utilizado em momentos de lazer à beira da praia.

Para o processo de refrigeração, opta-se por utilizar pastilhas termoelétricas, também conhecidas por pastilhas Peltier, que são módulos de pequenos cubos de telureto de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) entre placas cerâmicas e que, quando aplicada uma corrente elétrica, calor é absorvido em um lado da pastilha e dissipado no outro. São compactas em comparação a um ciclo de refrigeração por compressão, e por isso são utilizadas em pequenas aplicações de refrigeração ou aquecimento [Peltier, 2013].

Este artigo tem como objetivo o projeto de um refrigerador portátil utilizando energia renovável, estudando a viabilidade das fontes de energia solar e eólica para atender às condições de projeto.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Em 1822 Seebeck observou que, se um circuito elétrico fechado fosse composto por dois metais dissimilares, uma corrente elétrica surgiria quando as junções entre eles fossem mantidas a temperaturas diferentes. Em 1834 Peltier observou o efeito inverso: se uma corrente elétrica flui através da junção entre dois materiais dissimilares, calor é absorvido ou rejeitado pela junção. Esse fenômeno é chamado de efeito Peltier, ou efeito termoelétrico. Por muitos anos a única aplicação para o efeito termoelétrico foi quase que exclusivamente a medição de diferenciais de temperatura por termopares, porque os metais apresentam

propriedades termoelétricas baixas. Porém, o efeito termoelétrico em semicondutores é maior. O início da utilização de semicondutores em diversas aplicações estimulou a pesquisa sobre as propriedades destes materiais, que passaram a ser utilizados em aplicações onde o efeito termoelétrico tem uma magnitude relevante [ASHRAE, 1977].

O efeito termoelétrico deu origem às pastilhas termoelétricas, ou pastilhas Peltier, que são utilizadas em pequenas e médias aplicações de refrigeração e aquecimento como: *coolers* de chips microprocessadores, geladeiras portáteis, refrigeradores de chocolate, aquecedores/refrigeradores de assentos de automóveis, desumidificadores, entre outras aplicações. Atualmente, os módulos mais potentes podem transferir uma quantidade de calor máxima de 250 W, tornando-os inviáveis para o uso em um aparelho condicionador de ar, por exemplo. Porém, as pastilhas podem ser utilizadas em série, para se chegar a temperaturas mais baixas [Peltier, 2013]. O projeto de uma transportadora de vacinas portátil realizado por Ribeiro, 2007, mostra que o coeficiente de performance de uma pastilha Peltier para tal aplicação é baixo.

A utilização de energia renovável para produzir energia elétrica em pequena escala está crescendo. Por exemplo, pequenas turbinas eólicas e pequenos painéis fotovoltaicos estão sendo cada vez mais utilizados em aplicações como: residências, agricultura, iluminação pública, acampamentos e torres de telecomunicação. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) permite a venda do excedente de energia renovável à rede elétrica pública [Portal Brasileiro de Energias Renováveis, 2013], o que acaba de tornando um incentivo para investir em energia renovável para o consumo próprio de energia elétrica.

Pesquisou-se alguns modelos de turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos em pequena escala, como a turbina NaNo ZüS [Global Wind Group Inc.], com dimensões na ordem de 1 m e massa de 27 kg, e o painel fotovoltaico FM16-7200 [Power Film Solar, 2013], que pode ser dobrado e facilmente transportado. Porém, não encontrou-se nenhuma aplicação semelhante a este artigo, onde um sistema híbrido (sistema que utiliza mais de uma fonte de energia) forneça energia elétrica a um refrigerador portátil.

### 3 METODOLOGIA

O refrigerador é projetado para funcionar no município de Tramandaí, no verão, com uma temperatura interna de 5 °C. As demais condições, como o vento e a temperatura externa, as características do produto e as características da caixa térmica serão determinadas nesse capítulo.

#### 3.1 Caixa Térmica

A caixa térmica é responsável por armazenar o produto e diminuir a troca térmica entre o ambiente refrigerado e o ambiente externo. Selecionou-se de um fabricante uma caixa térmica de 28 litros, com dimensões externas de 515 mm de largura, 330 mm de profundidade e 335 mm de altura, em polietileno de alta densidade (PEAD) e com isolamento térmico em poliuretano (PU) de espessura 15 mm e condutividade térmica de 0,025 W/m.K. A capacidade da caixa é de 30 latas de 350 ml [Soprano, 2013].

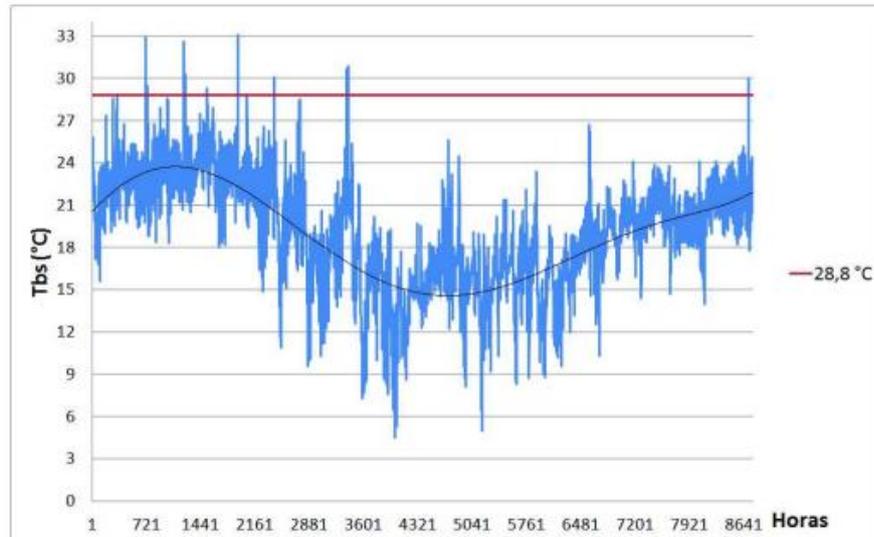
### *3.2 Produto*

O produto a ser refrigerado e transportado é cerveja. A cerveja geralmente é consumida a baixas temperaturas, e neste artigo a temperatura de consumo estipulada será 5 °C. Portanto, essa será a temperatura interna à caixa térmica, para que a cerveja se encontre em equilíbrio térmico com o ambiente refrigerado. A massa específica da cerveja é 1015 kg/m<sup>3</sup> [Palmer, 2013] e seu calor específico é 3,90 kJ/kg.K [Beyer, 2012]. Uma lata de alumínio de 350 ml tem massa de 16,7 g, conforme medição realizada. O calor específico do alumínio é 0,90 kJ/kg.K.

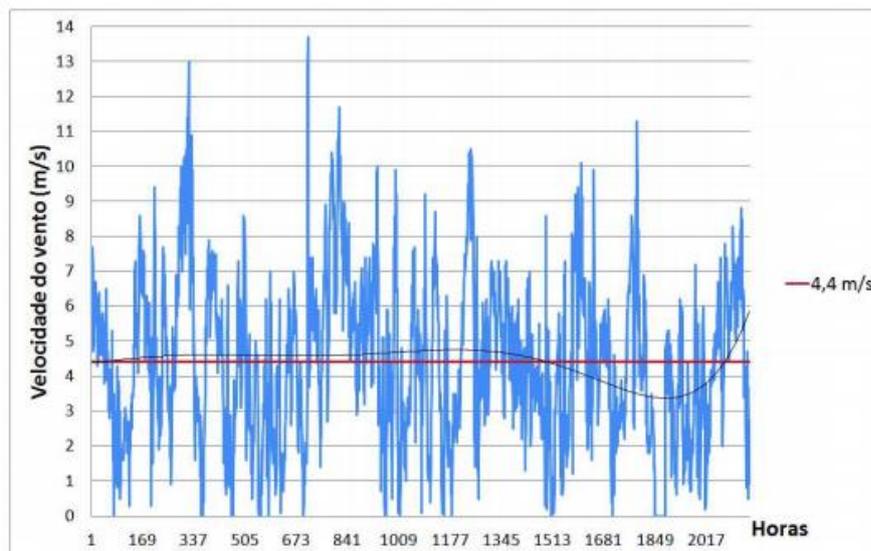
### *3.3 Dados Climáticos*

Com o arquivo climático de Tramandaí [LabEEE, 2013] se obteve, para um ano climático, a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a velocidade do vento. Os dados da estação climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Tramandaí são horários. A temperatura de projeto foi determinada utilizando a metodologia ASHRAE para dia de projeto, que consiste em desconsiderar 0,4 % das maiores Tbs do ano e utilizar a temperatura logo abaixo desses valores, obtendo 28,8 °C para a temperatura de projeto. A velocidade do vento de projeto, denominado vento predominante de verão, é a média durante o verão, igual a 4,4 m/s. A temperatura e o vento de projeto são apresentados, respectivamente, na Figura 1 e Figura 2.

**Figura 1** - Temperatura de projeto (Fonte: LabEEE, 2013).



**Figura 2** - Vento de projeto (Fonte: LabEEE, 2013).



Os valores do eixo horizontal correspondem às horas do período em análise. Para ambas as figuras foi traçada uma linha de tendência, e a linha em vermelho representa, na Figura 1, a temperatura de projeto de 28,8 °C e, na Figura 2, o vento de projeto de 4,4 m/s. Os dados são horários e por isso apresentam uma grande oscilação, em função da mudança de temperatura e da velocidade do vento ao longo do dia.

### 3.4 Carga Térmica

A metodologia e os dados utilizados no cálculo da carga térmica são encontrados em Beyer, 2012.

### 3.4.1 Carga Térmica de Transmissão

A carga térmica de transmissão é o calor transferido para dentro do espaço refrigerado através de suas superfícies. Com o vento de projeto, calcula-se o coeficiente de convecção externo igual a 25,4 W/m<sup>2</sup>K. Considerando nula a velocidade do ar interno ao refrigerador, calcula-se o coeficiente de convecção interno igual a 8,7 W/m<sup>2</sup>K. O coeficiente global de transferência de calor calculado foi 1,3 W/m<sup>2</sup>K.

O diferencial de temperatura ( $\Delta T$ ) entre o ar interno e o ar externo ao refrigerador é igual a 23,8 °C. Porém, deve ser ajustado para considerar o efeito do sol na carga térmica, em função da radiação solar incidente e da cor das superfícies. A caixa térmica selecionada tem a tampa de cor escura (preta) e as demais superfícies de cor média (vermelho). Obtém-se  $\Delta T$  igual a 27,8 °C para os lados leste e oeste,  $\Delta T$  igual a 26,8 °C para o lado norte e  $\Delta T$  igual a 34,8 °C para a tampa. Para o fundo da caixa e para o lado sul não é considerado acréscimo por efeito do sol, pois a incidência solar é mínima.

Considerando o pior caso, onde as superfícies de maior área estão voltadas para os lados leste e oeste, obtém-se a carga térmica de transmissão igual a 33 W.

### 3.4.2 Carga Térmica do Produto

Calor é removido do produto para reduzir sua temperatura inicial até a temperatura final. Considera-se a temperatura inicial do produto igual a 28,8 °C, por se encontrar em equilíbrio térmico com o ambiente externo, e a temperatura final igual à temperatura de 5 °C interna ao refrigerador. Considerando metade da capacidade da caixa, 15 latas de 350 ml, a massa total de cerveja e de alumínio é, respectivamente, 5,3 kg e 0,25 kg. A temperatura final do produto é superior à sua temperatura de congelamento. Portanto, somente calor sensível será removido.

Considerando o tempo de uma hora para o produto ser refrigerado, por ser um tempo de espera razoável, o cálculo da carga térmica do produto resulta em 139 W.

### 3.4.3 Carga Térmica do Ar de Infiltração

A infiltração ocorre quando a tampa da caixa é removida. Uma estimativa é que a caixa seja aberta seis vezes à hora, e que ocorra uma troca do volume interno a cada abertura. Então, tem-se uma vazão volumétrica média de 168 L/h. A carga térmica de infiltração é calculada com a Equação 1.

$$\dot{Q}_{\text{inf}} = (h_i - h_r) \rho_r \dot{V} \quad (1)$$

onde  $\dot{Q}_{inf}$  é a carga térmica do ar de infiltração (W),  $h_i$  é a entalpia do ar de infiltração (kJ/kg),  $h_r$  é a entalpia do ar refrigerado (kJ/kg),  $\rho_r$  é a massa específica do ar refrigerado (kg/m<sup>3</sup>) e  $\dot{V}$  é a vazão volumétrica média (m<sup>3</sup>/s).

Os dados horários da entalpia do ar de infiltração (ar externo) não são encontrados no arquivo climático, mas o mesmo contém dados suficientes para que a mesma possa ser calculada. Utilizando dados horários de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e pressão atmosférica, calcula-se a entalpia horária segundo a metodologia ASHRAE, desconsiderando 0,4 % das horas do ano com entalpia mais elevada e utilizando a entalpia logo abaixo desses valores, igual a 68,7 kJ/kg. Devido às constantes trocas do volume interno, a umidade relativa do ar refrigerado é próxima da umidade relativa de 80 % do ar de infiltração, obtida no arquivo climático. Consultando a carta psicrométrica, com a temperatura de 5 °C e a umidade relativa de 80 %, encontra-se  $h_i$  igual a 16 kJ/kg e  $\rho_r$  igual a 1,26 kg/m<sup>3</sup>.

Utilizando a Equação 1, calcula-se a carga térmica do ar de infiltração igual a 3 W.

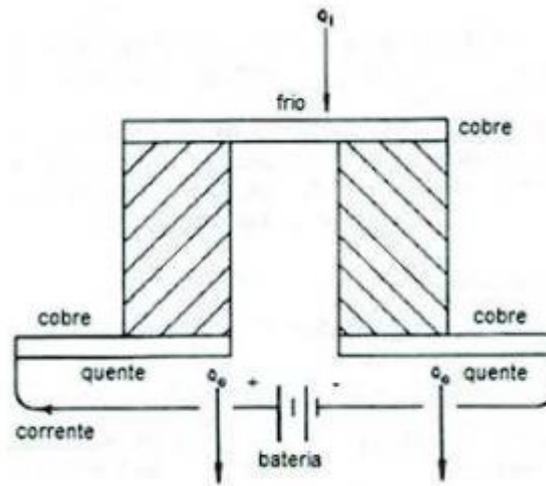
#### *3.4.4 Carga Térmica Total*

Somando as três cargas térmicas calculadas, obtém-se a carga térmica total de 175 W. A ASHRAE recomenda utilizar um fator de segurança de 15 % sobre a carga térmica total, em função de discrepâncias entre os critérios utilizados no projeto e condições de operação, e devido ao calor dissipado por possíveis equipamentos internos ao refrigerador. Aplicando o fator de segurança, calcula-se uma carga térmica total de 201 W.

#### *3.5 Efeito Peltier*

O efeito Peltier, ou efeito termoelétrico, é o responsável pelo funcionamento da pastilha Peltier. Em um circuito elétrico fechado com dois materiais semicondutores dissimilares, uma corrente elétrica contínua é fornecida através de uma bateria. Na junção de cobre entre os dois materiais, o calor absorvido ou dissipado é proporcional à corrente elétrica e depende do sentido da corrente aplicada. O circuito é apresentado na Figura 3.

**Figura 3** - Efeito Peltier (Fonte: ASHRAE, 1977).



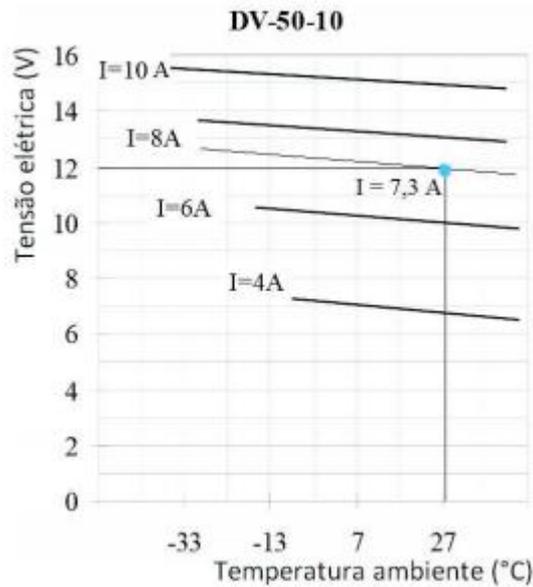
Nesse caso, calor é absorvido na junção fria ( $Q_i$ ) e dissipado nas junções quentes ( $Q_o$ ). Uma pastilha Peltier é composta por dezenas ou centenas desses pares. A refrigeração termoelétrica utiliza a mudança de nível energético dos elétrons para transportar energia térmica. Elétrons fluem através da junção de dois materiais termoelétricos dissimilares, ou seja, materiais com elétrons em diferentes níveis energéticos, que sob efeito de uma corrente elétrica, sofrem uma mudança de energia, resultando em um diferencial de temperatura entre os lados e, conseqüentemente, em um fluxo de calor. O sentido da corrente elétrica determina se calor será dissipado ou absorvido na junção [ASHRAE, 1977].

### 3.5.1 Seleção da Pastilha Peltier

Analisando os dados disponibilizados por um fornecedor de pastilhas Peltier [Peltier, 2013], é realizada a seleção da pastilha adequada ao projeto.

Primeiramente se estabeleceu a tensão elétrica de operação da pastilha. Como a tensão padrão de sistemas fotovoltaicos é 12 V, utiliza-se esse valor para a tensão da pastilha. Através da Figura 4 é possível obter a corrente de operação da pastilha.

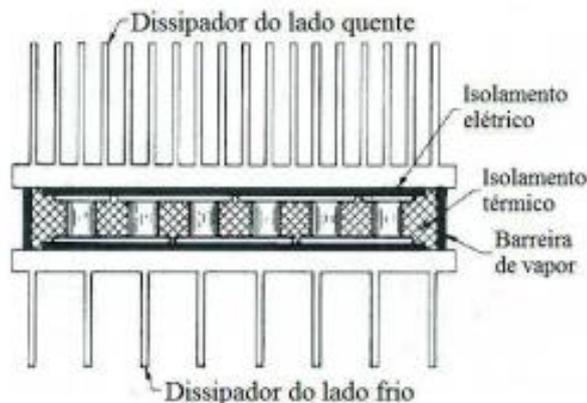
**Figura 4** - Corrente elétrica de operação para o modelo DV-50-10 (Fonte: Peltier, 2013).



A corrente de operação é função da tensão de operação e da temperatura ambiente de 28,8 °C. Para o modelo DV-50-10, por exemplo, a corrente de operação é 7,3 A.

O fluxo de calor do lado frio da pastilha é igual ao frio produzido pela pastilha, ou seja, o calor retirado do interior do refrigerador. O fluxo de calor do lado quente é a soma do calor retirado do refrigerador e o calor produzido por efeito Joule, devido ao aquecimento da pastilha durante sua operação. Para possibilitar a troca de calor entre a pastilha e o meio, utilizam-se dissipadores de calor do tipo *cooler*, um em cada lado da pastilha, com ventiladores para auxiliar na dissipação do calor. Considerando a seleção feita por Ribeiro, 2007, baseada em testes que apontaram os melhores dissipadores para a aplicação, utiliza-se um dissipador da marca VCOM modelo S754 para o lado quente e um da marca Leadership-XPC para o lado frio. A Figura 5 mostra a disposição dos dissipadores de calor em uma pastilha.

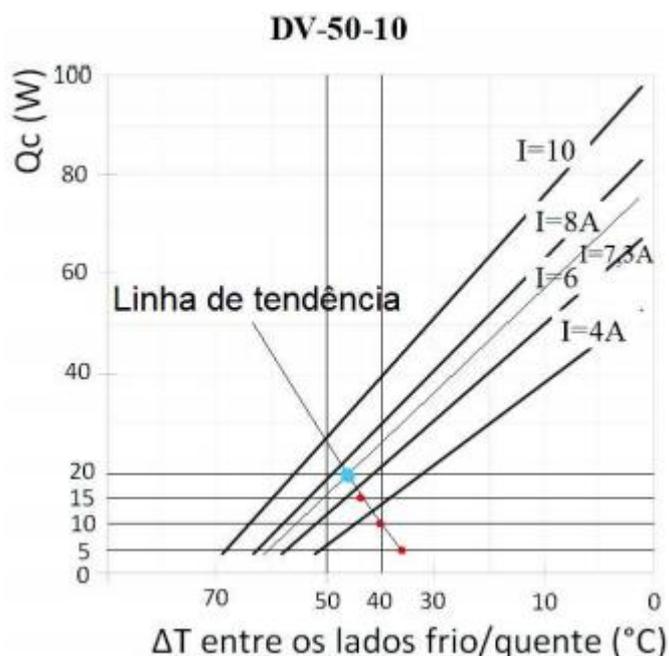
**Figura 5** - Disposição dos dissipadores de calor em uma pastilha (Fonte: ASHRAE, 1977).



O diferencial de temperatura entre os lados da pastilha foi calculado com a metodologia encontrada em Incropera e DeWitt, 1996, e com as características dos dissipadores utilizados. Utilizou-se o modelo de transferência de calor para aletas retangulares finitas. A condição de contorno utilizada na resolução foi a de fluxo de calor prescrito na base dos dissipadores. Os cálculos referentes a essa análise são apresentados no APÊNDICE A.

Com o gráfico apresentado na Figura 6, disponibilizado pelo fornecedor das pastilhas, pode-se obter o frio produzido ( $Q_c$ ). Com a equação utilizada na análise de transferência de calor é possível obter o diferencial de temperatura entre os lados da pastilha. Porém, o frio produzido pela pastilha também é uma variável da equação. Faz-se então uma iteração: utilizando os valores de  $Q_c$ , calcula-se os respectivos diferenciais de temperatura. Observa-se uma tendência nos pontos obtidos, representada pela “Linha de tendência”. Foi feita uma análise com os modelos disponíveis e a Figura 6 apresenta o gráfico do modelo DV-50-10.

**Figura 6** - Frio produzido pela pastilha modelo DV-50-10 (Fonte: Peltier, 2013).



Realizando a iteração para o valor de 20 W, o diferencial de temperatura calculado corresponde a um ponto sobre a corrente de operação do modelo DV-50-10, representado pelo ponto azul na Figura 6. Portanto, o frio produzido pela pastilha DV-50-10, nas condições de operação, é igual a 20 W. Esse modelo apresentou a maior produção de frio entre as pastilhas analisadas e, portanto, foi escolhido para ser utilizado no projeto. Com uma tensão elétrica de 12 V e uma corrente elétrica de 7,3 A, a potência fornecida à pastilha deve ser 87 W. O coeficiente de performance (COP), ou coeficiente de desempenho (COD), é a razão entre a energia fornecida à pastilha e a quantidade de frio produzida pela mesma. Para esse caso, o COP é igual a 0,23. Esse valor é baixo se comparado a um ciclo de refrigeração por compressão de vapor.

### 3.6 Fontes Renováveis de Energia

Dada a demanda energética do refrigerador, realizou-se uma pesquisa a fabricantes e fornecedores de tecnologias para o aproveitamento de energia alternativa. Considerou-se a possibilidade da utilização de turbinas eólicas e/ou painéis fotovoltaicos, pois o vento e a radiação solar são abundantes no litoral.

#### 3.6.1 Energia Eólica

A turbina eólica procurada para o projeto foi uma pequena turbina de eixo vertical. As turbinas de eixo vertical captam o vento proveniente de qualquer direção, não necessitando ajustar sua posição de acordo com a direção do vento, como é feito nas turbinas de eixo horizontal. Em pequena escala se utiliza dois tipos de turbina de eixo vertical, Darrieus e Savonius.

A forte influência da camada limite próxima ao solo reduz a velocidade do vento e prejudica o funcionamento das turbinas. Portanto, opta-se por utilizar uma turbina que obtenha energia elétrica para baixas velocidades do vento. Realizou-se uma pesquisa a fabricantes de pequenas turbinas de eixo vertical para verificar se suas dimensões, massa e velocidade mínima de operação satisfazem as determinações do projeto, entre as quais está a exigência de que a mesma possa ser transportada com facilidade. A Tabela 1 apresenta algumas das turbinas pesquisadas.

**Tabela 1** - Modelos de turbinas e suas características.

Modelo	Fabricante	Altura (m)	Diâmetro (m)	Massa (kg)	Vel. mín. do vento (m/s)
Sauer Energy	Sauer Energy	1,83	2,2	57	2,2
V 300	Venger Wind	1	1	52	3,5
NaNo ZüS	Global Wind Group Inc.	1	1	27	1,8
HoYi!	UGE	1,3	0,8	40	2,5

Observando a última coluna da Tabela 1, nota-se que a velocidade do vento de projeto, 4,4 m/s, é suficiente para o funcionamento das turbinas analisadas. Porém, as dimensões e a massa das mesmas não condizem com as características de um refrigerador portátil. Esses modelos de turbina são empregados para obter energia elétrica em residências, postes de iluminação, torres de comunicação, entre outras aplicações estacionárias. Portanto, descarta-se a utilização de uma turbina eólica no projeto.

#### 3.6.2 Energia Solar

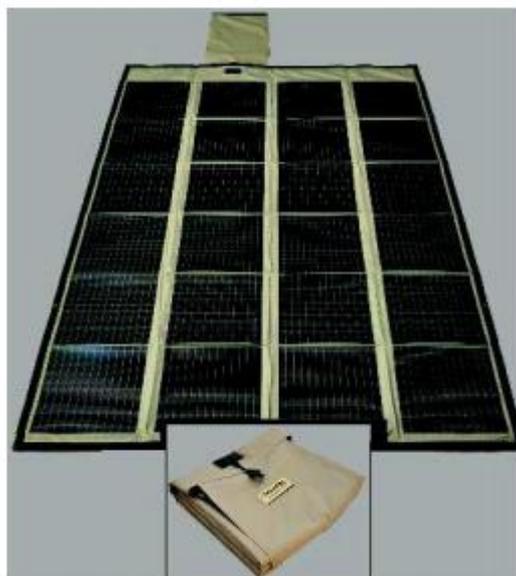
Para o aproveitamento da energia solar, realizou-se uma análise da radiação solar no município de Tramandaí. Para obter os dados de radiação, utilizou-se o arquivo climático de Tramandaí [LabEEE, 2013]. Escolheu-se uma semana típica de verão, com alta radiação solar, de 20 a 27 de janeiro. O horário utilizado na análise foi das 10:00 às 16:00 horas, por ser o período de maior radiação ao longo do dia. Com os dados horários dessa semana representativa, calculou-se a média para as horas em análise, obtendo um dia representativo, cujos valores de radiação são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Dia médio para radiação solar (Fonte: LabEEE, 2013).

Hora	Radiação Solar Horizontal (W/m <sup>2</sup> )
10:00 h	572
11:00 h	723
12:00 h	1011
13:00 h	1027
14:00 h	894
15:00 h	700
16:00 h	489

Encontrou-se um painel fotovoltaico adequado ao projeto, que pode ser dobrado e facilmente transportado [Power Film Solar, 2013], apresentado na Figura 7.

**Figura 7** – Painel solar dobrável (Fonte: Power Film Solar, 2013).



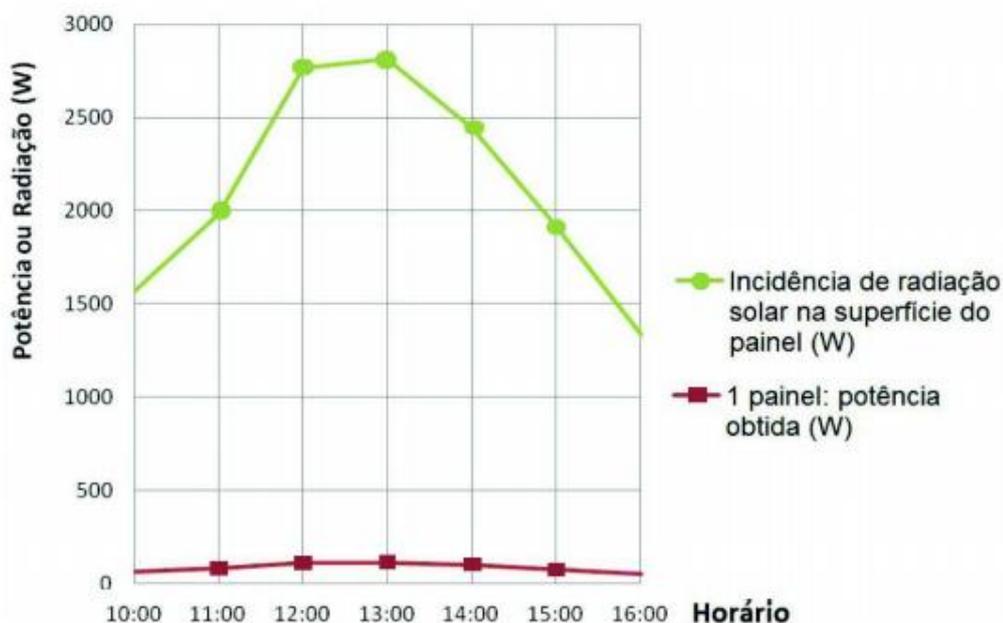
Segundo o fabricante, o painel tem potência nominal de 120 W e tensão e corrente elétrica de, respectivamente, 15,4 V e 7,2 A. Suas dimensões são 1384 x 2197 mm, composto

por pequenos módulos fotovoltaicos montados sobre um tecido, o que permite ao painel ser dobrado. A área efetiva ocupada pelos módulos é 90 % da área total do painel, ou 2,7 m<sup>2</sup>.

O valor da potência nominal de painéis fotovoltaicos é determinado considerando 1 kW/m<sup>2</sup> de radiação solar incidente na superfície do mesmo [ASTM, 2012]. Portanto, se a radiação incidente é 1 kW/m<sup>2</sup>, a área efetiva 2,7 m<sup>2</sup> e a potência nominal 120 W, a eficiência energética do painel é 4 %.

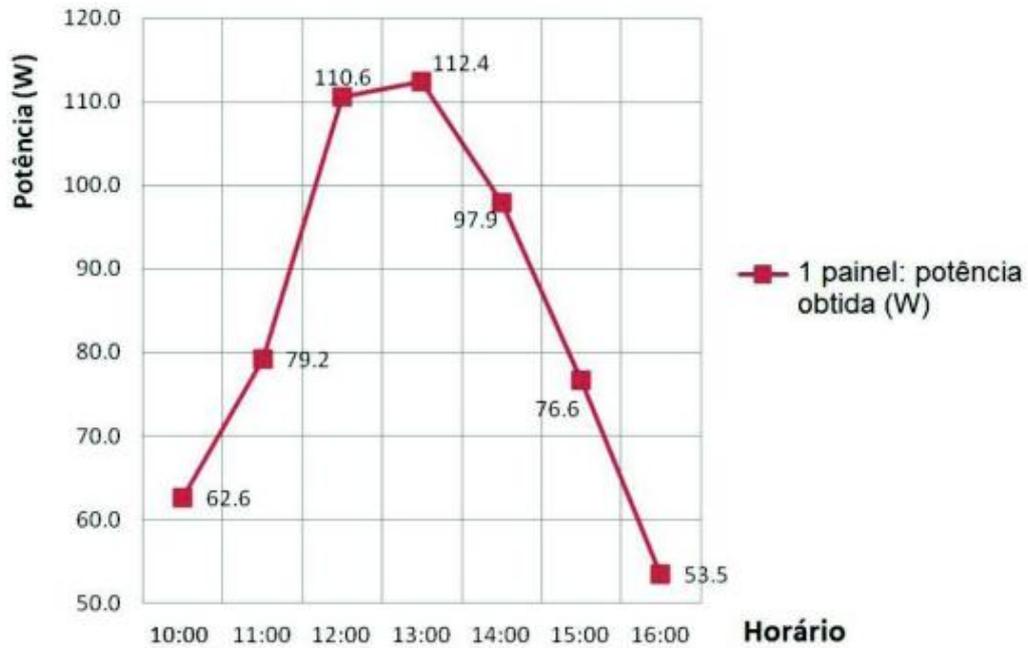
Com o programa de simulação energética EnergyPlus, utilizando o modelo GeneratorswithPV3, e os dados do painel fotovoltaico e de radiação solar da Tabela 2, calcula-se a potência obtida pelo painel utilizado no projeto. A Figura 8 apresenta os valores da incidência de radiação solar na superfície do painel e da potência obtida pelo painel.

**Figura 8** - Radiação incidente e potência obtida (Fonte: LabEEE, 2013).



Utilizou-se os dados de radiação solar horizontal, pois o painel pode ser desdobrado e disposto no chão na posição horizontal. A diferença entre as curvas se deve à baixa eficiência do painel fotovoltaico. Apenas 4 % da radiação solar incidente são transformados em energia elétrica. A potência obtida pelo painel é evidenciada na Figura 9.

Figura 9 - Potência obtida por um painel (Fonte: LabEEEE, 2013).



Pode-se observar a variação da potência obtida em função da variação da radiação solar ao longo do dia. A potência máxima obtida no período em análise é 112 W, às 13:00 horas, e a potência média é 85 W.

## 4 RESULTADOS

Com os resultados obtidos, dada a demanda energética e a potência obtida pelo painel fotovoltaico, determina-se as restrições de operação do refrigerador, os componentes que serão utilizados e a ligação entre os mesmos.

### 4.1 Ajuste da Carga Térmica

A carga térmica total é 201 W. Para esse valor serão necessárias 10 pastilhas Peltier modelo DV-50-10, cada uma produzindo 20 W de frio e operando com 87 W de entrada, resultando em um elevado consumo de energia elétrica.

No cálculo da carga térmica do produto foi considerada a temperatura inicial do mesmo igual a 28,8 °C. Considerando que o produto se encontre refrigerado à temperatura de 5 °C ao ser colocado no refrigerador, a carga térmica de refrigeração do produto é anulada, resultando em uma carga térmica de manutenção da temperatura do mesmo de 41 W. Portanto, considera-se essa condição para que o refrigerador funcione dentro de suas limitações energéticas.

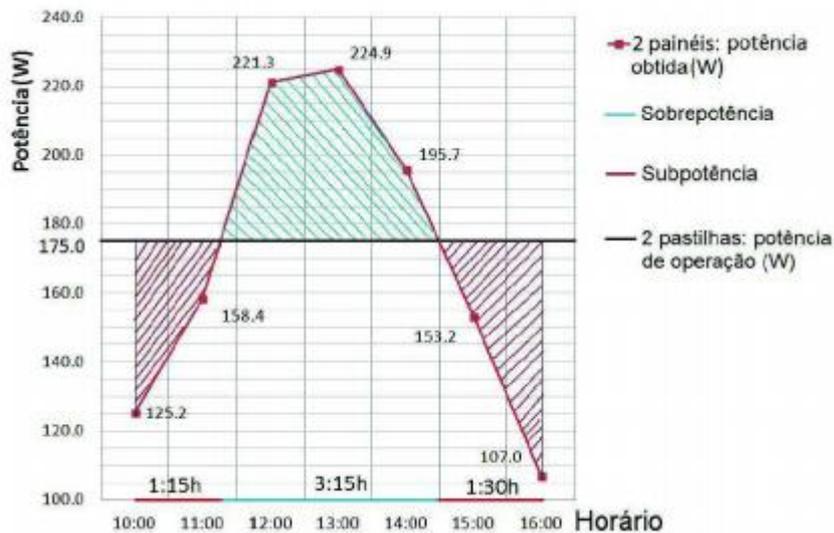
#### 4.2 Pastilha Peltier

Cada pastilha Peltier modelo DV-5-10 produz 20 W de frio. Considerando a carga térmica de manutenção da temperatura do produto igual a 41 W, utilizam-se duas pastilhas Peltier em paralelo para obter a potência desejada. A tensão e a corrente elétrica de cada pastilha são, respectivamente, 12 V e 7,3 A, resultando em uma potência de operação igual a 87 W, ou uma potência total de 174 W para as duas pastilhas.

#### 4.3 Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico obtém em média 85 W e no máximo 112 W de potência. Para fornecer energia elétrica às duas pastilhas durante as seis horas de uso do refrigerador, utilizam-se dois painéis em paralelo, dobrando o valor da potência obtida. Não se utilizou mais de dois painéis, pois cada um ocupa 3 m<sup>2</sup>, o que é uma área consideravelmente grande. Os painéis são ligados em paralelo, assim como as pastilhas, para que as correntes se somem e a tensão continue a mesma, não se distanciando da tensão de 12 V do sistema. A Figura 10 apresenta a potência obtida pelos dois painéis.

Figura 10 - Potência obtida por dois painéis (Fonte: LabEEE, 2013).



A linha azul representa o período de três horas e quinze minutos em que a potência obtida pelos painéis supera a potência de operação das pastilhas, ou seja, o sistema fica com sobrepotência. A linha vermelha representa a subpotência, ou seja, o período de duas horas e quarenta e cinco minutos em que a potência obtida pelos painéis fica abaixo da potência de operação das pastilhas.

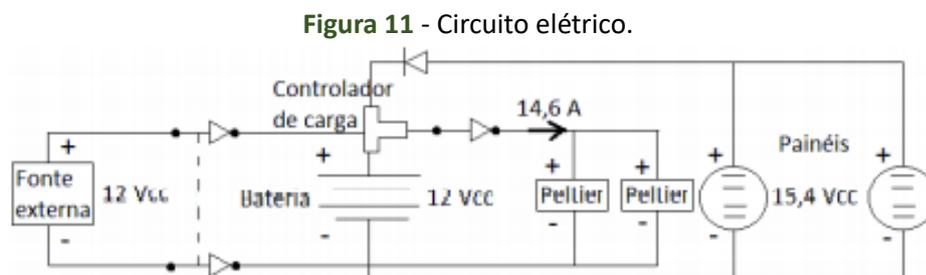
#### 4.4 Bateria

Para o armazenamento e fornecimento de energia elétrica devido à variação da potência obtida pelos dois painéis fotovoltaicos se utiliza, consultando um fabricante [Moura, 2013], uma bateria de 12 V, que é o padrão de tensão elétrica para baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos. Considerando o pior caso para o período em análise, onde os painéis obtêm apenas 107 W, calcula-se a corrente elétrica que a bateria deve fornecer no período de baixa radiação solar para que a potência da bateria, somada à obtida pelos painéis, seja igual à potência de operação das duas pastilhas Peltier, ou seja, 175 W. Segundo o fabricante, é recomendado multiplicar a corrente por um fator de 1,25, visando a longevidade da bateria, visto que a grande ciclagem nessa aplicação é prejudicial à mesma. Portanto, a bateria deve fornecer uma corrente elétrica de 7 A.

Para o uso com painéis fotovoltaicos, o fornecedor recomenda que a descarga da bateria não ultrapasse 11,4 V. Considerando a autonomia necessária de duas horas e quarenta e cinco minutos para o período de subpotência e consultando o ANEXO B, seleciona-se a bateria adequada ao projeto, modelo 12MF36, com corrente de descarga de 7,6 A para três horas de autonomia, atendendo à demanda energética. Na Figura 10, a área em azul representa a energia que carrega a bateria, enquanto a área em vermelho representa a energia que a bateria deve fornecer. A energia para carregar a bateria deve ser maior que a energia que a mesma fornece, devido às perdas elétricas que ocorrem no processo de carregamento. A bateria também pode ser carregada em fontes externas de energia elétrica, como tomadas elétricas e carregadores automotivos.

#### 4.5 Circuito Elétrico

Um esquema do circuito elétrico é apresentado na Figura 11.



Deve-se utilizar um controlador de carga para controlar o processo de carga e descarga da bateria. O controlador possui entrada para os painéis fotovoltaicos, para a bateria e para a fonte externa, e saída para as pastilhas Peltier. A corrente dos painéis que chega ao controlador é, na potência máxima, 14,6 A, e a corrente das pastilhas também é 14,6 A. Portanto, pode ser utilizado o controlador ProStar PS-15 [MorningStar, 2013], com corrente

nominal de entrada igual a 15 A, corrente nominal da carga de 15 A e tensão do sistema igual a 12 / 24 V.

## 5 CONCLUSÃO

O projeto do refrigerador portátil apresenta algumas limitações físicas e energéticas, como a grande dimensão e massa de seus componentes, o grande consumo de energia pelas pastilhas Peltier e a baixa obtenção de energia pelos painéis fotovoltaicos, limitando assim o valor da carga térmica. Porém, quando o produto é colocado a 5 °C no refrigerador, sua temperatura é conservada, e o refrigerador funciona dentro de suas limitações energéticas. Os principais componentes do refrigerador são: uma caixa térmica, duas pastilhas Peltier, dois dissipadores de calor, dois painéis fotovoltaicos e uma bateria.

Com o crescente investimento em fontes renováveis de energia, a expectativa é que em pouco tempo os painéis solares e as turbinas eólicas estejam mais eficientes e ainda menores, possibilitando seu uso em situações cotidianas e, provavelmente, tornando viável tecnicamente o projeto de um refrigerador portátil com grande capacidade de refrigeração.

Para reduzir a carga térmica, mais especificamente a carga térmica de transmissão, sugere-se aumentar a espessura do isolamento térmico de poliuretano e utilizar a cor branca nas superfícies externas da caixa térmica, reduzindo assim a absorção da radiação solar.

## REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials (ASTM). **G173-03 (2012) Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface**. 2012. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/G173.htm>>. Acesso em: 29 abr. 2013.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). **Handbook & Product Directory 1977 Fundamentals**. New York. 1977.

Beyer, P. O. **Apostila de climatização**. Porto Alegre. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Decenal de Energia – PDE 2020**. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20110606\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20110606_1.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2013.

Global Wind Group Inc. Clean energy Clear Future. **Turbina eólica**. Disponível em: <<http://www.globalwindgroup.com/products/nano-zus>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

Incropera, F. P.; DeWitt, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). **Arquivo climático**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>>. Acesso em: 21 mar. 2013.

MorningStar. World's Leading Solar Controllers & Inverters. **Controlador de carga**. Disponível em: <<http://www.morningstarcorp.com/en/pro-star>>. Acesso em: 08 jun. 2013.

Moura. **Bateria**. Disponível em: <<http://www.moura.com.br/pt/produtos/cleannano1>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

Palmer, J. **How To Brew**. Disponível em: <[http://howtobrew.homebrewer.com.br/index.php/P%C3%A1gina\\_principal](http://howtobrew.homebrewer.com.br/index.php/P%C3%A1gina_principal)>. Acesso em: 26 mar. 2013.

Peltier. **Pastilhas Peltier**. Disponível em: <<http://www.peltier.com.br/>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

Portal Brasileiro de Energias Renováveis. **Energia Renovável**. Disponível em: <<http://energiarenovavel.org/>>. Acesso em 09 jul. 2013.

Power Film Solar. **Painel Fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.powerfilmsolar.com/products/?fm167200&show=product&productID=271514&prod>>. Acesso em: 24 abr. 2013.

Ribeiro, F. S. **Projeto de uma transportadora de vacinas portátil**. 2007. 30 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

Sauer Energy. **Turbina eólica**. Disponível em: <<http://sauerenergy.com/index.php>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

Soprano. **Caixa Térmica**. Disponível em: <<http://www.soprano.com.br/produtos/utilidades/caixas-termicas/caixa-termica-28l>>. Acesso em: 18 mar. 2013.

Urban Green Energy (UGE). **Turbina eólica**. Disponível em: <<http://www.urbangreenenergy.com/products/hoyi/specifications>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

Venger Wind. **Turbina eólica**. Disponível em: <<http://www.vengerwind.com/products/v300.html#.UcP2idh4i4c>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

## APÊNDICE A - DIFERENCIAL DE TEMPERATURA

O cálculo do diferencial de temperatura entre os lados da pastilha foi calculado utilizando a metodologia encontrada em Incropera e DeWitt, 1996, e as características dos dissipadores de calor. Utilizou-se o modelo de transferência de calor para aletas retangulares finitas e a condição de contorno utilizada na resolução foi a de fluxo de calor prescrito na base dos dissipadores, através da Equação A.1.

$$q_a = N \sqrt{hPkA_{sr}} \theta_b \frac{\sinh(mL) + (h/mk) \cosh(mL)}{\cosh(mL) + (h/mk) \sinh(mL)} \quad (\text{A.1})$$

onde  $q_a$  é o fluxo de calor prescrito (W),  $N$  é o número de aletas,  $h$  é o coeficiente convectivo ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ),  $P$  é o perímetro das aletas (m),  $k$  é a condutividade térmica do material do dissipador ( $\text{W}/\text{m.K}$ ),  $A_{sr}$  é a área da seção reta da aleta ( $\text{m}^2$ ),  $\theta_b$  é o diferencial de temperatura ( $^\circ\text{C}$  ou K) entre a base da aleta e a temperatura ambiente ( $T_\infty$ ),  $L$  é a altura da aleta (m) e  $m$  é definido pela Equação A.2. Considerou-se a temperatura do lado da pastilha igual à temperatura da base da aleta.

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_{sr}}} \quad (\text{A.2})$$

As características dos dissipadores são as seguintes:

- Dissipador do lado frio:  $h = 25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ,  $k = 180 \text{ W}/\text{m.K}$  (alumínio),  $P = 0,104 \text{ m}$ ,  $A_{sr} = 3,15 \text{ cm}^2$ ,  $L = 0,035 \text{ m}$  e  $N = 20$ .
- Dissipador do lado quente:  $h = 25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ,  $k = 180 \text{ W}/\text{m.K}$  (alumínio),  $P = 0,198 \text{ m}$ ,  $A_{sr} = 6,44 \text{ cm}^2$ ,  $L = 0,035 \text{ m}$  e  $N = 30$ .

Aplicando um fluxo de calor prescrito  $q_a$  na base do dissipador do lado frio, obtém-se o diferencial de temperatura  $\theta_b$  entre a base da aleta do lado frio e o ambiente refrigerado. Como a temperatura do ambiente refrigerado é  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , tem-se a temperatura do lado frio da pastilha. O fluxo de calor prescrito no lado frio é o frio produzido pela pastilha.

O fluxo de calor prescrito  $q_a$  na base do dissipador do lado quente é igual ao fluxo de calor do lado frio mais o calor gerado na pastilha por efeito Joule, Equação A.3.

$$q_J = I^2 R \quad (\text{A.3})$$

onde  $q_J$  é o calor produzido por efeito Joule (W),  $I$  é a corrente elétrica (A) e  $R$  é a resistência interna da pastilha ( $\Omega$ ) informada pelo fabricante.

Repetindo os cálculos para o lado quente, tem-se a temperatura do lado quente da pastilha e, assim, o diferencial de temperatura entre os dois lados da pastilha.

## ANEXO A - PARÂMETROS DE UMA PASTILHA PELTIER

Utilizando o ASHRAE, 1977, fez-se um estudo das pastilhas Peltier e de como são obtidos os parâmetros encontrados na folha de dados do fabricante, tais como corrente máxima, diferencial máximo de temperatura entre os lados da pastilha e potência máxima. Tais cálculos não foram desenvolvidos, pois o fabricante não informa as propriedades termofísicas e a geometria dos pares termoelétricos.

Para regime permanente, o calor absorvido pela pastilha,  $Q_i$  (W) no lado frio é dado pela Equação A.1.

$$Q_i = \alpha T_c I - 0,5(I^2 R) - C\Delta T \quad (\text{A.1})$$

onde  $\alpha$  é a diferença entre o coeficiente absoluto de Seebeck para os materiais p e n do par termoelétrico,  $T_c$  é a temperatura do lado frio da pastilha (K),  $I$  é a corrente elétrica (A),  $R$  é a resistência elétrica dos pares termoelétricos ( $\Omega$ ),  $C$  é a condutividade térmica dos pares ( $\text{W}/^\circ\text{C}$ ) e  $\Delta T$  é diferença de temperatura entre o lado frio e quente da pastilha ( $^\circ\text{C}$ ).

A potência necessária para absorver essa quantidade de calor no lado frio é dada pela Equação A.2.

$$W = IV = I(IR + \alpha\Delta T) \quad (\text{A.2})$$

onde  $W$  é a potência de entrada da pastilha (W) e  $V$  é a tensão elétrica (V).

O coeficiente de performance  $\phi$  é um adimensional que representa o calor absorvido dividido pela potência de entrada, segundo a Equação A.3.

$$\phi = Q_i / W \quad (\text{A.3})$$

Para maximizar esse valor existe uma geometria para os pares termoelétricos, dada pela Equação A.4.

$$\frac{A_p/L_p}{A_n/L_n} = \sqrt{k_n q_n / k_p q_p} \quad (\text{A.4})$$

onde  $A_p$  e  $A_n$  são as áreas transversais dos pares termoelétricos ( $\text{cm}^2$ ),  $L_p$  e  $L_n$  são os comprimentos dos pares (cm),  $k_n$  e  $k_p$  são as condutividades térmicas dos pares ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) e  $q_n$  e  $q_p$  são as resistências elétricas dos pares ( $\Omega.\text{cm}$ ). Usando essa geometria, o coeficiente de performance é calculado pela equação A.5.

$$\phi_{\max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \left( \frac{M - (T_h/T_c)}{M + 1} \right) \quad (\text{A.5})$$

onde  $T_h$  é a temperatura do lado quente da pastilha e  $M$  é calculado pela equação A.6.

$$M = \sqrt{1 + \left[ \alpha^2 / (\sqrt{k_p q_p} + \sqrt{k_n q_n})^2 \right] [(T_h + T_c)/2]} \quad (\text{A.6})$$

Portanto, o coeficiente de performance máximo depende apenas da temperatura, do coeficiente de Seebeck e da condutividade térmica e elétrica dos materiais.

O parâmetro mais importante associado aos materiais termoelétricos é a figura de mérito, denotada pela letra  $Z$  e dado pela equação A.7.

$$Z = \alpha^2 / (\sqrt{k_p q_p} + \sqrt{k_n q_n})^2 \quad (\text{A.7})$$

Quanto maior o valor de  $Z$  (K<sup>-1</sup> ou °C<sup>-1</sup>), melhor é o desempenho da pastilha termoelétrica. Com o valor de  $Z$  podem ser calculados dois parâmetros da pastilha que se encontram na folha de dados disponibilizada pelo fabricante, a máxima potência e o máximo diferencial de temperatura entre os lados da pastilha, calculados pela Equação A.8 e Equação A.9, respectivamente.

$$Q_{i\max} = C(0,5ZT_c^2 - \Delta T) \quad (\text{A.8})$$

$$\Delta T_{\max} = 0,5(ZT_c^2) \quad (\text{A.9})$$

Outro parâmetro que se encontra na folha de dados é a corrente máxima, que pode ser calculada pela Equação A.10.

$$I_{\max} = \alpha T_c / R \quad (\text{A.10})$$

Com a corrente máxima obtém-se a potência máxima (Equação A.8) e o diferencial máximo de temperatura (Equação A.9).

## ANEXO B - SELEÇÃO DA BATERIA

Tabela B.1 – Seleção da bateria conforme autonomia e corrente de descarga (Fonte: Moura, 2013).

<b>Correntes de Descarga (A) a 25°C</b>																	
<b>Tensão de Corte 11,4 V (1,90 Vpe)</b>																	
<b>Modelo</b>	<b>Minutos</b>						<b>Horas</b>										
	5	10	15	20	30	45	1	2	3	4	5	8	10	20	24	100	120
12MF30	66,7	43,8	33,8	29,0	22,9	17,1	14,6	9,1	6,7	5,3	4,3	2,9	2,3	1,3	1,1	0,28	0,25
12MF36	85,9	55,1	41,7	35,3	28,2	21,0	17,1	10,4	7,6	6,0	4,9	3,5	3,0	1,6	1,4	0,36	0,29
12MF45	91,0	62,7	49,2	43,1	36,5	27,5	23,5	14,2	10,5	7,9	6,6	4,4	3,6	2,0	1,7	0,43	0,36
12MF45A	91,0	62,7	49,2	43,1	36,5	27,5	23,5	14,2	10,5	7,9	6,6	4,4	3,6	2,0	1,7	0,43	0,36
12MF55	120,9	81,0	62,8	54,2	44,4	34,3	28,0	16,6	12,1	9,4	7,7	5,3	4,4	2,4	2,1	0,53	0,45
12MF63	131,6	89,8	70,4	61,3	50,8	39,5	32,7	19,9	14,6	11,8	9,3	6,1	5,1	2,8	2,5	0,63	0,52
12MF80	191,0	126,6	95,7	79,2	60,8	45,7	37,5	22,6	16,8	13,3	10,9	7,7	6,5	3,6	3,1	0,80	0,67
12MF100	261,1	155,0	119,5	92,7	64,4	48,4	43,5	29,5	22,5	18,6	15,1	9,7	8,1	4,3	3,7	0,96	0,82
12MF105	280,0	157,0	113,6	99,0	82,2	63,8	52,3	31,2	23,4	19,1	15,7	10,6	8,3	4,6	4,0	0,98	0,85
12MF150	320,0	194,5	153,9	129,0	100,3	80,0	67,6	42,2	31,1	25,0	21,1	14,8	12,6	7,0	6,0	1,54	0,85
12MF170	355,4	237,0	184,6	158,0	127,5	98,9	81,8	48,5	36,3	28,9	23,9	16,7	14,0	7,7	6,6	1,69	1,42
12MF175	437,0	273,0	216,7	184,3	142,9	108,3	85,5	51,1	37,9	30,5	25,5	18,3	15,5	8,7	7,5	1,91	1,45
12MF220	534,0	310,9	245,4	208,9	166,9	130,8	110,9	68,4	50,1	39,4	32,4	21,6	18,0	10,0	8,6	2,19	1,83