



SUB-RESFRIAMENTO COM PLACA PELTIER VIA ENERGIA SOLAR

Erick Bueno de Almeida¹
Giulliano Zonaro¹
Dra. Annete S. Faesarella²
Universidade São Francisco
erick.almeida@mail.usf.edu.br
giulliano.zonaro@mail.usf.edu.br

¹ Alunos do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco; *Campus Itatiba*

² Professora Orientadora do Trabalho de Graduação, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco; *Campus Itatiba*

Palavras-chave

Sub-resfriamento com placas *Peltier*; Geração fotovoltaica aplicada a sistemas de refrigeração, Sistemas sustentáveis para sub-resfriamento do fluido refrigerante.

Resumo

Esse trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade técnica e financeira de sistema de sub-resfriamento alimentado por sistema fotovoltaico para a redução do consumo elétrico do cliente localizado na cidade de Santa Cruz do Rio Pardo, SP. Para isso o projeto do sub-resfriamento foi dimensionado de acordo com a carga térmica necessária, enquanto o sistema fotovoltaico em conformidade para suprir a necessidade energética consumida pelo sistema. A metodologia utilizada foi estudo de caso e a pesquisa visa uma eficiência maior ao sistema de refrigeração com o uso de placas *Peltier*. Os resultados encontrados estão cálculos relacionados a carga térmica, consumo de energia e dados econômicos do projeto. Esse estudo busca reduzir o custo de consumo de energia através do sub-resfriamento com pastilhas *Peltier* alimentadas por painéis fotovoltaicos.

Introdução

O uso da refrigeração representou um dos mais importantes avanços da civilização moderna, a possibilidade de armazenar alimentos e de viver e trabalhar em climas adversos deu às atividades humanas perspectivas maiores do que aquelas anteriormente.

Nos dias atuais a refrigeração tem grande importância na vida das pessoas, muitas vezes passando despercebida, mas presente para todas as pessoas, os locais em que mais comumente encontram-se sistemas de refrigeração vão desde as residências, no papel das geladeiras para armazenamento de alimentos e bebidas, até os hospitais e clínica. O alcance da refrigeração vai além, vai até o segmento hospitalar que necessita de uma refrigeração específica com um papel muito importante de refrigerar vacinas, sangue e órgãos, e outro local que a refrigeração não pode deixar de existir é no segmento da tecnologia, onde estão alocadas as fazendas de servidores de muitos aplicativos e entre outros, essas fazendas necessitam de uma refrigeração

eficiente, caso contrário os equipamentos são danificados pelas altas temperaturas (CORREA, 2019).

Diante da importância da refrigeração nas nossas vidas, uma busca por um sistema mais compacto e mais eficiente termodinamicamente e energeticamente vem sendo o foco de muitas empresas, e perante a essa necessidade, este trabalho de graduação apresenta um modelo de sub-resfriamento que é utilizado para se obter um melhor desempenho do sistema de refrigeração, na qualidade do frio e na redução de energia aplicada para o mesmo trabalho, integrando refrigeração com energia fotovoltaica sem a utilização da rede elétrica, um sistema independente.

Toda a alimentação do sistema de sub-resfriamento é realizada via geração fotovoltaica de energia elétrica, com vistas a uma maior eficácia do resfriamento do fluido refrigerante. Esse método constitui uma inovação tecnológica na área de refrigeração visando uma economia de energia e um modelo mais sustentável para o sistema de refrigeração.

A energia solar está sendo utilizada no Brasil majoritariamente em residências, como uma auxiliar na redução da conta de luz, seja por meio da energia térmica, aquecendo água, ou com a utilização da energia fotovoltaica, criando eletricidade. O Brasil possui uma vantagem por conta do extenso potencial energético a partir da energia solar, tendo em vista que os níveis de incidência solar são superiores aos de países que desenvolvem projetos fotovoltaicos com mais frequência, como Alemanha, França e Espanha. Portanto, a geração de energia fotovoltaica precisa ser amplamente explorada no país, já que possui os estímulos fundamentais para isso (PORTAL SOLAR, 2021).

Neste trabalho de graduação tem-se como objetivo demonstrar a aplicação de placas *Peltier* juntamente com energia fotovoltaica, pois as duas vertentes trabalham com energia CC - Corrente Contínua, o que facilita a implementação do sistema e reduz custos.

No presente trabalho são apresentados o referencial teórico do assunto com as fundamentações necessárias para o desenvolvimento da metodologia do projeto. Desta forma é apresentada também a completa metodologia elaborada a fim de aplicar placas *Peltier* e geração fotovoltaica no melhoramento de sistemas frigoríficos.

Referencial Teórico

1. Sistema de Refrigeração

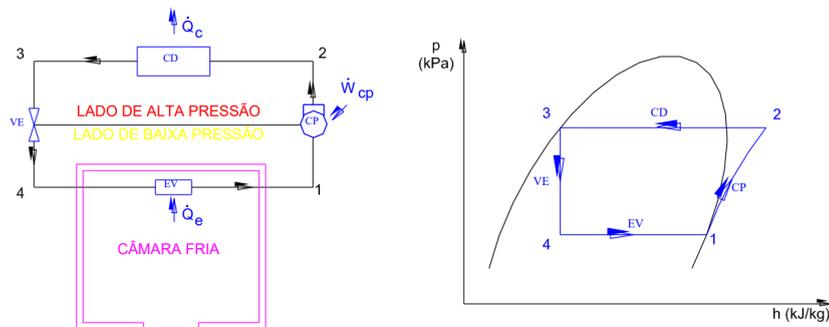
O sistema de refrigeração envolve um processo de transferência de calor de uma região de baixa temperatura para uma de alta temperatura, que é do evaporador para a câmara fria. Os dispositivos de refrigeração em geral operam em um ciclo que utiliza refrigerante vaporizado no ciclo, mas a refrigeração também pode ser realizada por um gás, como ocorre nas aeronaves e em alguns casos especiais, são utilizados ciclos de refrigeração por absorção.

O ciclo da refrigeração é composto por 4 principais componentes que são: Compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador, e cada etapa ocorre uma reação na etapa 1-2 ocorre a compressão do fluido refrigerante, passando de uma pressão P1, para uma pressão P2 (os valores de pressão alteram de acordo com o fluido refrigerante) para obtermos um novo valor de condensação para o fluido, no estágio 2-3 no condensador o vapor superaquecido, proveniente dos compressores é inicialmente resfriado isobaricamente até a temperatura de saturação, onde o fluido começa a ser condensado por uma reação isobárica-isotermicamente, no estágio 3-4 na válvula de expansão o líquido é expandido isentropicamente retornando a sua pressão inicial P1 e por consequência rebaixando a temperatura do líquido que vai para o evaporador, e no último estágio 4-1 onde o fluido se encontra líquido + vapor, no evaporador o

fluido absorve o calor proveniente do ambiente refrigerado, para depois eliminar no condensador, abaixo uma imagem ilustrando como é o ciclo de refrigeração (MORAN, SHAPIRO, 2008).

A figura 1 relaciona cada equipamento com o ciclo de refrigeração

Figura 1: PH e equipamentos



Fonte: REFRIGERAÇÃO, 2016

1.1. Entalpia

A Entalpia indica o nível de energia por unidade de massa em que se encontra a substância devida a sua energia interna e sua pressão, o diagrama PH é um gráfico da pressão versus entalpia, onde observa-se os pontos de condensação e evaporação de um fluido e a quantidade de energia liberada na condensação, e absorvida na evaporação (calor que é removido do ambiente que será refrigerado) (USP, 2017).

1.2. Vazão mássica

Vazão mássica ou fluxo de massa, é a quantidade de massa que escoar através de uma área por unidade de tempo, ou seja, a quantidade de fluido que é deslocada em um sistema de refrigeração em determinado tempo, cada fluido refrigerante tem uma massa específica (UNIP, 2011).

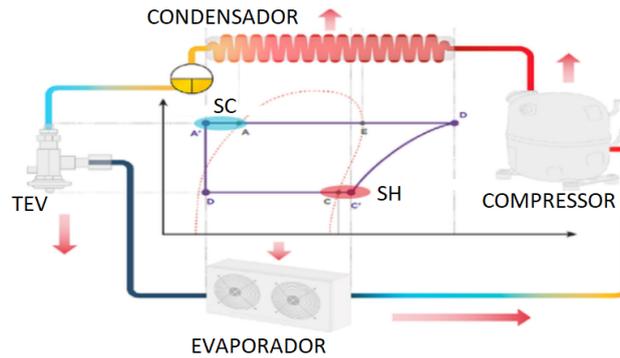
$$\dot{m} = \frac{A \times V}{v} \quad (1)$$

1.3. Sub-resfriamento

O sub-resfriamento é o resfriamento adicional do líquido refrigerante saturado. Com ele pode-se aumentar a eficiência do sistema de refrigeração, uma vez que a quantidade de calor retirado por grama de líquido refrigerante é maior. Além da eficiência do sistema isso proporciona ao sistema menos esforços mecânicos já que o compressor precisa trabalhar menos para manter a temperatura (CAPITAL REFRIGERAÇÃO, 2014).

A figura 2 mostra o ciclo de refrigeração com a representação do sub-resfriamento.

Figura 2: Ciclo da refrigeração



Fonte: WWM, 2020

1.4. Compressor

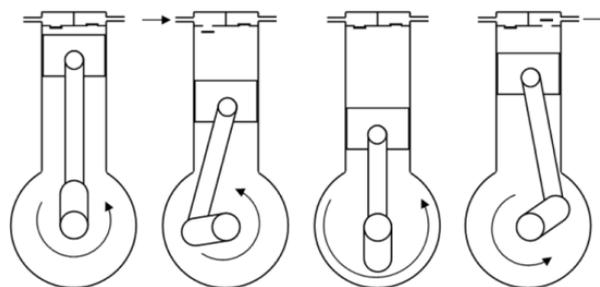
O compressor é um dos principais componentes de um sistema de refrigeração, responsável por elevar a pressão do fluido refrigerante e realizando a sua circulação no sistema. Os principais modelos utilizados são: alternativos, centrífugos, de parafuso, palhetas e Scroll, que são classificados como: máquina de deslocamento positivo ou de fluxo e dependendo da concepção de construção, os compressores são classificados como: herméticos, semi-herméticos e abertos.

Os compressores semi-herméticos são semelhantes aos herméticos, porém permitem a remoção do cabeçote, tornando possível o acesso às válvulas e aos pistões. Nos compressores do tipo aberto, o eixo de acionamento do compressor atravessa a carcaça, necessitando de um motor externo para o seu acionamento.

O modelo mais utilizado no sistema de refrigeração comercial são os alternativos, que são utilizados em pequenas e médias capacidades (ELETROBRÁS, 2005), que consistem no deslocamento positivo do fluido, realizando um deslocamento positivo e aumentando a pressão do vapor de fluido refrigerante pela redução do volume interno da câmara de compressão.

A figura 3 mostra o ciclo de compressão de um compressor a pistão.

Figura 3: Ciclo de compressão de um compressor a pistão



Fonte: ELETROBRÁS, 2005

1.5. Condensador

O condensador é o responsável por eliminar todo o calor absorvido pelo fluido refrigerante das câmaras, dos expositores e do compressor, de modo a rejeitar o calor absorvido

pelo fluido para o ambiente externo, a condensadora tem a função de realizar a transformação do fluido refrigerante de gasoso para líquido, onde ele libera a energia absorvida do sistema para o ambiente, o condensador trabalha em 3 etapas de condensação de um fluido refrigerante, que são:

1 - Resfriamento do fluido superaquecido, momento em que o fluido sai a uma alta temperatura do compressor, no estado gasoso

2 - Quando ele entra na zona de condensação, o fluido não sofre alteração de temperatura, apenas ocorre uma mudança de estado, do gasoso para o líquido

3 - Na terceira etapa o fluido refrigerante já está 100% líquido, e após isso, todo o calor que for retirado do fluido refrigerante é considerado sub-resfriamento do líquido.

Existem 3 tipos de condensação que são utilizados, que são:

- Resfriado a ar;
- Resfriado a água;
- Evaporativo.

No ramo de refrigeração comercial, o modelo mais utilizado é a condensação a ar, já no ramo industrial, o modelo de condensação predominante é a evaporativa (REFRIGERAÇÃO, 2016).

A figura 4 mostra um diagrama PH, e as etapas da condensação do fluido.

Figura 4: Etapas de condensação



Fonte: BRASIL ESCOLA (ADAPTADO DE CARRIER),2008

1.6. Evaporador

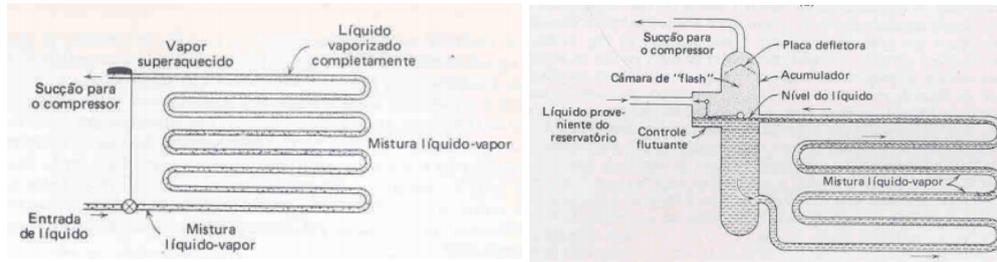
O evaporador tem sua função semelhante a do condensador, pois é responsável por absorver o calor de um ambiente ou produto refrigerado, o fluido refrigerante entra no evaporador da forma líquida e sai totalmente evaporado, após a passagem de fluido refrigerante na válvula de expansão, o fluido sofre uma redução de pressão e uma redução de temperatura, e então ele fica no estado gasoso + líquido, e durante a passagem do fluido refrigerante no evaporador, ocorre a mudança de estado físico, passando a ser 100% gasoso no final do evaporador, isso em um sistema com o correto funcionamento.

Por causa da ampla utilização dos evaporadores na refrigeração, existem vários tipos, formas, tamanhos e aplicações. Os evaporadores podem ser classificados de acordo com o método de alimentação do líquido, como expansão seca, inundado ou de sobre alimentação líquida, o modelo mais utilizado na refrigeração comercial é a expansão seca, pelo fato de ser

mais simples e não necessitar de outros itens como no inundado conforme figura abaixo (REFRIGERAÇÃO, 2016).

A figura 5 mostra um diagrama PH, e as etapas da condensação do fluido.

Figura 5: Etapas de condensação



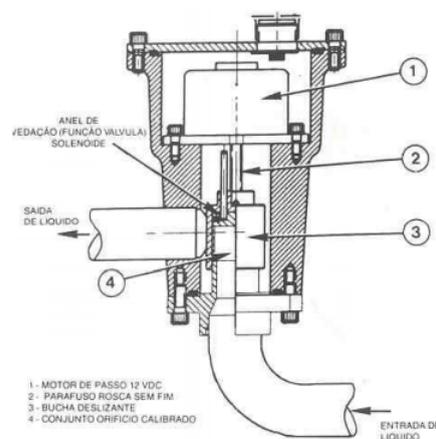
Fonte: UFPR, 2016

1.7. Válvula de expansão

O dispositivo de expansão é responsável por obstruir a passagem de fluido refrigerante linha de líquido, e com isso rebaixando a pressão da linha, após a válvula de expansão o fluido se encontra na maior parte em líquido, conforme diagrama PH. A válvula de expansão é responsável por realizar o controle entre o efeito da refrigeração e a carga térmica solicitada pelo ambiente refrigerado, os tipos básicos de expansão são: o tubo capilar, a válvula de expansão manual, válvula de expansão automática, termostática, boia de baixa pressão, boia de alta pressão, elétrica e eletrônica. O modelo mais comum na refrigeração comercial são as válvulas de expansão termostáticas e eletrônicas, a válvula que apresenta um melhor desempenho é a eletrônica, pois é controlada por um microprocessador que é responsável por manter um superaquecimento ideal para o compressor, e garantir que todo o fluido foi evaporado no evaporador.

A figura 6 mostra a parte interna da VEE (válvula de expansão eletrônica).

Figura 6: Válvula de expansão eletrônica



Fonte: REFRIGERAÇÃO, 2016

Para controlar a vazão do refrigerante em função das diferentes condições de operação, a bucha deslizante move-se para cima e para baixo sobre os orifícios, aumentando ou diminuindo a área de passagem do refrigerante. A bucha é movida por um motor de passos. O motor move-se em incrementos e é controlado diretamente pelo microprocessador. Assim que o motor gira, o movimento é transferido para a rosca sem fim gerando um movimento linear. São possíveis 760 posições distintas da bucha deslizante. O grande número de estágios e deslocamento resulta num controle acurado do fluxo de refrigerante garantindo o superaquecimento (REFRIGERAÇÃO, 2016).

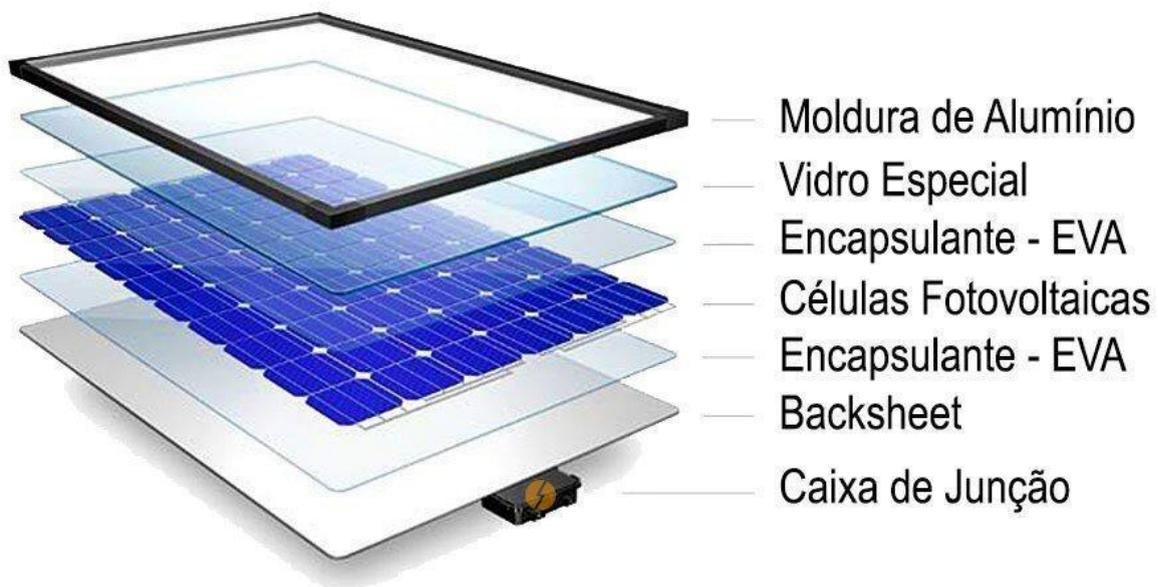
2. Sistema Fotovoltaico

2.1. Célula Fotovoltaica

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através do efeito fotovoltaico observado por Edmond Becquerel em 1839. Foi observada uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, quando incide uma luz sobre ela. Impulsionadas pelas novas descobertas da microeletrônica, em 1956 foram construídas as primeiras células fotovoltaicas industriais (LAVRAS, 2004).

A figura 7 mostra os principais componentes de um módulo fotovoltaico.

Figura 7: Componentes do módulo fotovoltaico



Fonte: PORTAL SOLAR, 2019

2.2. Módulo Fotovoltaico

Os Módulos Solares Fotovoltaicos não utilizam calor para produzir eletricidade. Interpretando a palavra, “*photo*” significa “produzido pela luz” e o sufixo “voltaico” refere-se à “eletricidade produzida por uma reação química”, ou seja, eles são os elementos básicos para a transformação de energia eletromagnética em energia elétrica e podem ser compreendidos como

dispositivos semicondutores que produzem uma corrente elétrica quando expostos à luz (UNIFOR, 2009).

2.3. Controlador Maximum Power Point Tracking

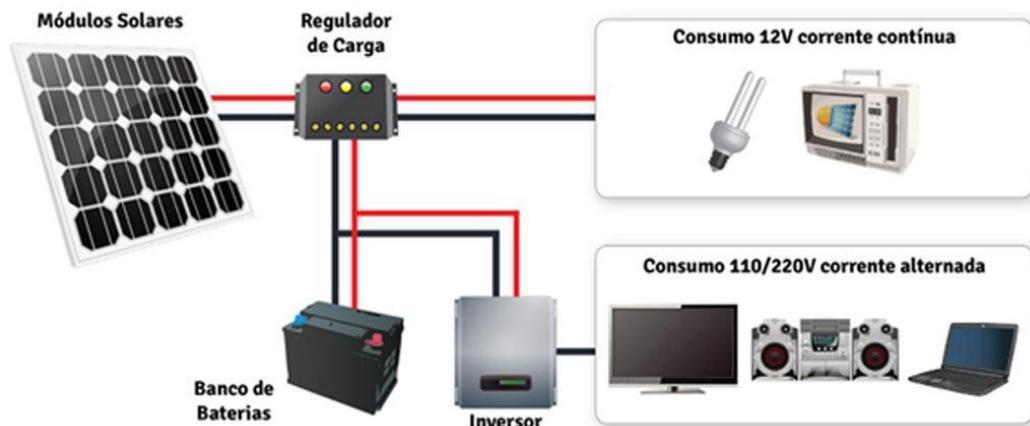
Os conversores que funcionam com essa descrição são aqueles que absorvem uma informação na forma de tensão ou de corrente e convertem para um outro valor desses parâmetros. Eles se apresentam de algumas formas:

- Conversor abaixador de tensão (conversor *buck*);
- Conversor elevador de tensão (conversor *boost*);
- Conversor abaixador-elevador (conversor *buck-boost*).

Em sistemas de geração fotovoltaica, os conversores são utilizados para fazer a ligação dos painéis às cargas de corrente contínua. Além disso, eles possuem duas funções no sistema fotovoltaico: uma é se adequar ao nível de tensão gerado nos terminais do painel à tensão no barramento CC, o que possibilita padronizar a tensão dos equipamentos conectados ao barramento, a outra é seguir o ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos (UFERSA, 2014).

A figura 8 mostra o esquema de ligação do controlador com módulos e cargas.

Figura 8: Esquema de ligação



Fonte: DEMATTÊ, 2017

3. Placas Peltier

3.1. Efeito Peltier

Em 1834, o físico francês Jean Charles Athanase *Peltier* observou que uma junção de dois metais, bismuto e cobre (Bi e Cu) se tornava mais quente quando era percorrida por uma corrente elétrica no sentido do bismuto para o cobre e esfriava, quando esse sentido era invertido, constituindo-se, portanto, em um efeito eletrotérmico denominado mais tarde de efeito *Peltier*.

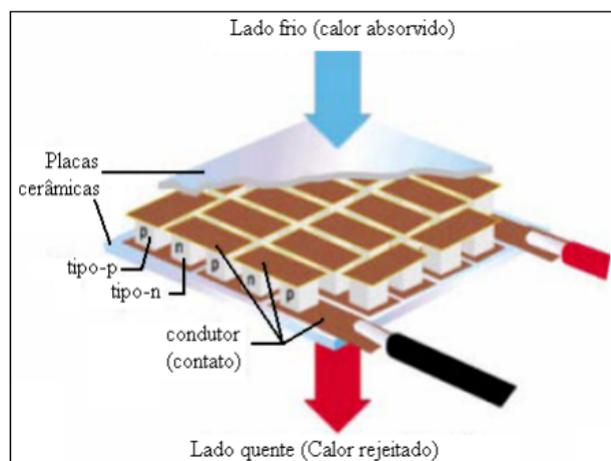
O efeito *Peltier* é a produção de um gradiente de temperatura entre duas junções de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma diferença de potencial elétrica em um circuito fechado.

3.2. Placas de Efeito Peltier

Placas de efeito *Peltier*, também conhecidas como pastilhas termoelétricas utilizam o efeito refrigerador e aquecedor ao se fazer passar corrente elétrica contínua por dois condutores. Com uma DDP (diferença de potencial) aplicada entre os polos, cria-se um diferencial de temperatura entre as faces opostas da placa. Basicamente, as pastilhas são formadas por semicondutores do tipo P e tipo N. Esses elementos semicondutores são soldados entre duas placas cerâmicas, eletricamente em série e termicamente em paralelo (IFRN, 2010).

A figura 9 mostra em detalhes a placa *Peltier*.

Figura 9: Placa *Peltier*



Fonte: IFRN, 2010

Metodologia

O método escolhido para o desenvolvimento deste trabalho é constituído de duas frentes, a que vai dimensionar o sistema de sub-resfriamento e a outra que vai dimensionar o sistema fotovoltaico e ao final das etapas elas foram unidas constituindo um completo projeto de refrigeração e energia solar.

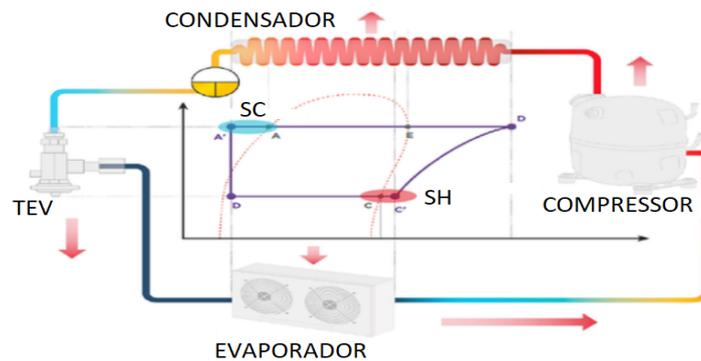
A elaboração desta pesquisa tem por objetivo apresentar a eficiência energética de máquinas frigoríficas com a utilização de placas *Peltier* para realizar o sub-resfriamento do sistema de refrigeração, sendo alimentado por placas fotovoltaicas na modalidade *Off-Grid*, ou seja, desconectado da rede elétrica da concessionária de energia.

Etapa 1 - Dimensionamento da carga térmica

O primeiro item a ser observado para o início dos cálculos é feito através da análise do diagrama PH, em que a abscissa é a entalpia e a ordenada é a pressão.

A figura 10 mostra o ciclo de refrigeração com a representação do sub-resfriamento.

Figura 10: Ciclo da refrigeração



Fonte: WWM, 2020

Com isso, será definido o valor do sub-resfriamento desejado, e após o valor definido, e de acordo com o sistema instalado, será calculado o valor da carga térmica necessária para o sub-resfriamento do projeto. Para a obtenção dos valores, será utilizado o programa *CoolPack* e serão inseridos os dados de projeto da instalação frigorífica.

A equação para o cálculo da carga térmica é:

$$Q = \dot{m} \times \Delta h \quad (2)$$

Q - Carga térmica.

\dot{m} - Fluxo de massa.

Δh - Variação da entalpia.

O valor de \dot{m} será encontrado via *Software* da fabricante de compressores *Bitzer*, e o Δh será encontrado utilizando o *CoolPack*.

Para encontrar a eficiência térmica das pastilhas *Peltier*, foi utilizado o datasheet do fabricante *Thermonamic*, onde foi escolhido o modelo TEC1-12710, com potência elétrica de 170W, e com isso a eficiência das placas *Peltier* são de 70%, e assim deve-se converter o valor da carga térmica do sub-resfriamento que está em kcal/h para kW, e realizar a conta.

$$\text{Potência das pastilhas Peltier} = \frac{\text{carga térmica do sub-resfriamento}}{\text{Eficiência da placa Peltier}} \quad (3)$$

$$N^{\circ}\text{pastilhas} = \frac{\text{Potência do sistema}}{\text{Potência das pastilhas}} \quad (4)$$

Etapa 2 - Dimensionamento sistema fotovoltaico

Para dimensionar o sistema fotovoltaico, é necessário encontrar o consumo de energia que as placas *Peltier* vão ter durante o período em que o sistema fotovoltaico está gerando energia. Contendo a quantidade e potência das pastilhas, é possível calcular o consumo.

A equação para o cálculo de consumo é:

$$\text{Consumo} = \left(\frac{\text{Potência}}{1000} \right) \times (\text{tempo em horas}) \times (\text{dias}) \quad (5)$$

Para encontrar a potência do sistema fotovoltaico, foi definido o valor da irradiação através do site da Global Atlas Solar, o qual monitora a irradiação solar sobre o globo terrestre, assim definindo um valor anual de irradiação. Com uma eficiência de 80% para geração, é possível dimensionar o sistema fotovoltaico.

A equação para o cálculo é:

$$\text{Potência fotovoltaico} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Eficiência} \times \text{Irradiação} \times 30} \quad (6)$$

Depois da potência fotovoltaica definida basta definir a quantidade de módulos fotovoltaicos a ser utilizados.

Etapa 3 - Consumo do compressor

O cálculo de potência consumida pelo compressor é dada pela seguinte equação:

$$\text{Potência consumida} = \frac{\text{Carga térmica}}{\text{Capacidade frigorífica}} \times \text{Fator qtd de comp} \times \text{Potência do compressor} \quad (7)$$

Os valores vão ser fixos, o único valor que vai sofrer alteração, e a capacidade frigorífica, pois com o sub-resfriamento ganha-se em capacidade no evaporador, e com isso será reduzido o fator de uso do compressor, já que ganha-se em capacidade térmica, e diminuindo o fator de uso, e reduzindo a potência consumida do compressor.

A carga térmica é dada de acordo com os expositores e câmaras da loja, o fator quantidade de compressores, é um valor dado pelo fabricante de acordo com a quantidade de compressores no sistema, e a potência do compressor é dada pelo *Software* da *Bitzer*, de acordo com os dados de operação.

Resultados Obtidos

Para realizar-se os cálculos, utiliza-se um estudo de caso da rede de supermercados Avenida, a loja para análise foi na cidade de Santa Cruz do Rio Pardo - SP.

A loja onde será feito o estudo de caso, não contém nenhuma fonte de sub-resfriamento adicional na linha de líquido.

Foi dividido em 3 etapas;

Etapa 1 - Cálculo da carga térmica do sub-resfriamento

Etapa 2 - Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaico

Etapa 3 - Cálculo de consumo antes e depois do sub-resfriamento

Etapa 1

Atualmente o *Rack* de congelados trabalha com as seguintes configurações:

Temperatura de condensação: **45°C**

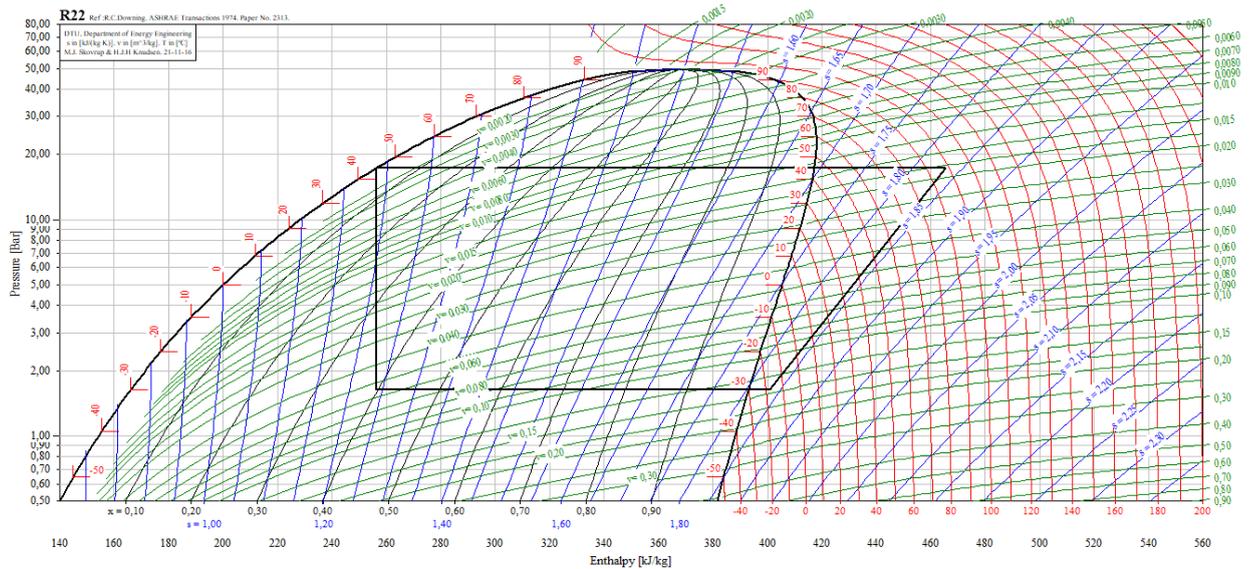
Temperatura de evaporação: **-30,0°C**

Superaquecimento total: entre 8 °C e 12 °C
 Fluido refrigerante: R22

Os valores acima são usuais em projetos de refrigeração, os valores são dimensionados para as piores condições de operação.

A figura 11 representa o ciclo do sistema, de acordo com os valores citados acima.

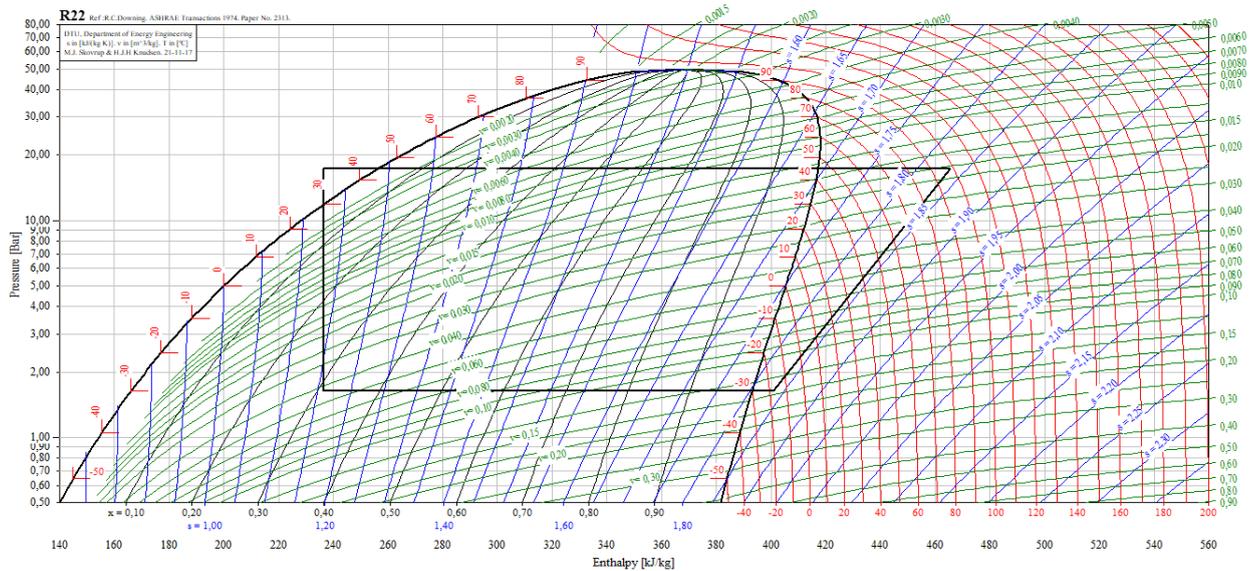
Figura 11: Diagrama PH sem Sub-resfriamento



Fonte: Software CoolPack

Na figura 11 mostra o sistema que não contém sub-resfriamento, e na figura 12 mostra um sistema que contém sub-resfriamento.

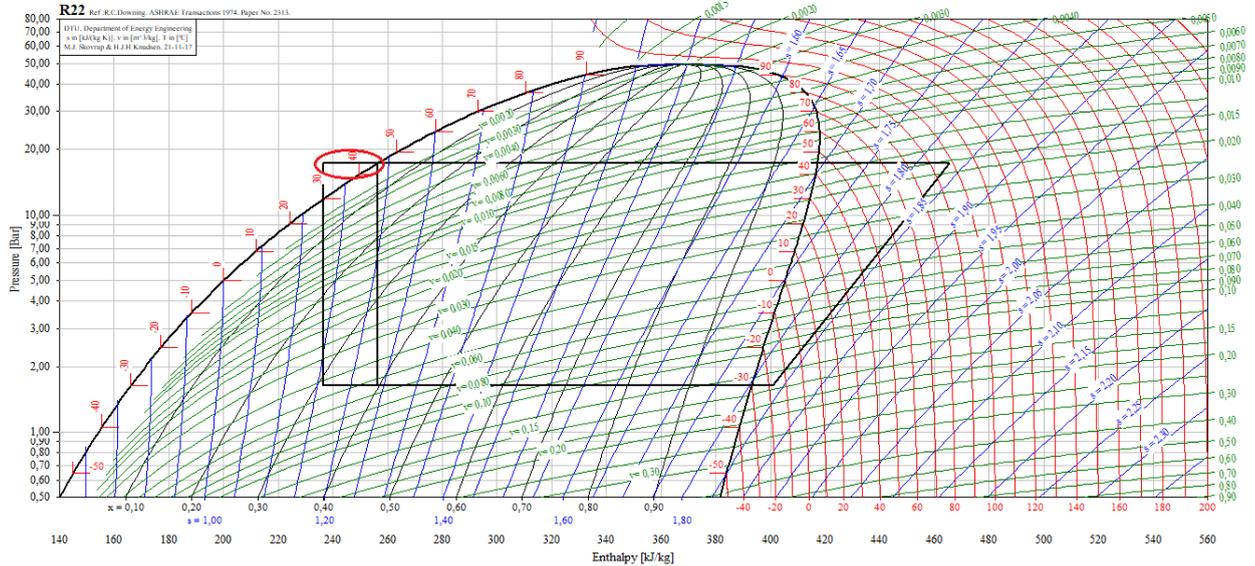
Figura 12: Diagrama PH com Sub-resfriamento



Fonte: Software CoolPack

E na figura 13 é a junção dos dois gráficos, onde é possível verificar a carga térmica do sub-resfriamento.

Figura 13: Diagrama PH



Fonte: Software CoolPack

Agora para encontrar a variação da entalpia (ΔH), deve-se encontrar o delta no ponto circulado acima, e para isso será utilizado as ferramentas do *CoolPack*. A figura 14 e 15 mostra a entalpia nos pontos de 30° e 45° na linha de condensação.

Figura 14: Dados do Software CoolPack com Sub-resfriamento

4	30,000	17,290	N/A	236,651	N/A
---	--------	--------	-----	---------	-----

Fonte: Software CoolPack

Figura 15: Dados do Software CoolPack sem Sub-resfriamento

4	45,000	17,290	N/A	256,384	N/A
---	--------	--------	-----	---------	-----

Fonte: Software CoolPack

$$\Delta H = 256,384 - 236,651 \quad (8)$$

$$\Delta H = 19,73 \text{ kJ/kg}$$

Deve-se converter esse valor de kJ/kg para kcal/kg, que será igual a:

$$\Delta H = 19,73 \text{ kJ/kg} \rightarrow 4,72 \text{ kcal/kg} \quad (9)$$

O fluxo de massa (\dot{m}) foi encontrado utilizando o *Software* online da *Bitzer*, fabricante de compressores, os valores de projetos foram inseridos no programa e o compressor utilizado foi o **4NC-12.2**, modelo instalado na loja em Sta. Cruz do Rio Pardo.

No *Software* da *Bitzer*, foi inserido apenas um compressor, então deve-se multiplicar o fluxo de massa por 3, já que na instalação da loja são 3 compressores, conforme figura 16, observa-se o valor do fluxo.

A figura 16 mostra a folha de dados de operação do compressor executado no programa.

Figura 16: Dados de operação do compressor

Compressor	4NC-12.2-20D
Capacity steps	100%
Cooling capacity	11,43 kW
Cooling capacity *	12,09 kW
Evaporator capacity	11,43 kW
Power input	8,21 kW
Current (380V)	15,44 A
Voltage range	360-400V
Condenser capacity	19,64 kW
COP/EER	1,39
COP/EER *	1,47
Mass flow	287 kg/h
Operating mode	CIC
Discharge gas temp. w/o cooling	--

Fonte: *Software* online da *Bitzer*

$$\text{Fluxo de massa} = 287 \times 3 \quad (10)$$

$$\text{Fluxo de massa} = 861 \text{ kg/h}$$

$$Q = \text{Fluxo de massa} \times \text{Variação da entalpia} \quad (11)$$

$$Q = 861 \times 4,72 \quad (12)$$

$$Q = 4.063,9 \text{ kcal/h}$$

Etapa 2

Com o valor da carga térmica acima é possível dimensionar a quantidade de pastilhas *Peltier* e o sistema fotovoltaico. Para conseguir resfriar o líquido refrigerante retirando 15°C, será necessário retirar 4063,9 kcal/h, agora convertendo esse valor para kW, será igual a 4,72 kW, como as pastilhas *Peltier* tem a eficiência térmica de 70% aproximadamente de acordo com o manual do fabricante, será realizada as seguintes equações para saber a quantidade de placas necessárias:

$$\text{Potência das Peltier} = \frac{\text{carga térmica do sub-resfriamento}}{\text{Eficiência da pastilha Peltier}} \quad (13)$$

$$\text{Potência} = \frac{4720}{0,7} \quad (14)$$

$$\text{Potência} = 6742,85$$

$$N^{\circ} \text{pastilhas} = \frac{\text{Potência do sistema}}{\text{Potência das pastilhas}} \quad (15)$$

$$N^{\circ} \text{pastilhas} = \frac{6742,85}{120} \quad (16)$$

$$N^{\circ} \text{pastilhas} = 57 \text{ pastilhas}$$

Para que a temperatura da linha de líquido caia de 45°C para 30°C, será necessário 6,75 kWh/hora, tendo 6 horas de sol útil para a geração de energia, o consumo diário é 40,5 kWh/dia multiplicando por 30 dias. Sendo assim, o consumo mensal é 1215 kWh/mês. Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico foi consultada a irradiação do local onde serão instalados os módulos fotovoltaicos.

Para efeito de cálculo foi utilizado o município de Santa Cruz do Rio Pardo, São Paulo onde a irradiação média é 5,56 kWh/dia, a uma perda de 20% do sistema.

$$\text{Potência fotovoltaico} = \frac{\text{Consumo mensal}}{\text{Eficiência} \times \text{Irradiação} \times 30} \quad (17)$$

$$\text{Potência fotovoltaico} = \frac{1215}{(1-0,2) \times 5,56 \times 30} \quad (18)$$

$$\text{Potência fotovoltaico} = 9,10 \text{ kWp}$$

Tendo a potência Watt-pico é possível calcular a quantidade de módulos necessário.

$$N^{\circ} \text{módulos} = \frac{\text{Potência fotovoltaico} \times 1000}{\text{Potência módulo}} \quad (19)$$

$$N^{\circ} \text{módulos} = \frac{6,97 \times 1000}{510} \quad (20)$$

$$N^{\circ} \text{módulos} = 17,85 \approx 18 \text{ módulos}$$

De acordo com os cálculos obtidos na metodologia, serão necessários 18 módulos de 510W para suprir a necessidade das placas *Peltier*, esses módulos serão conectados ao controlador de carga, onde ele é responsável por fazer o rastreamento do ponto de máxima potência buscando manter a potência dos módulos em 510W, para isso ele regula a corrente e a tensão.

Etapa 3 - Consumo do compressor

Para realizar o cálculo da potência consumida pelo compressor, será necessário usar a seguinte fórmula.

$$\text{Potência consumida} = \frac{\text{Carga térmica}}{\text{Capacidade frigorífica}} \times \text{Fator qtd de comp} \times \text{Potência do compressor} \quad (21)$$

1º caso, sem sub-resfriamento

$$\text{Potência consumida} = \frac{\text{Carga térmica}}{\text{Capacidade frigorífica}} \times \text{Fator qtd de comp} \times \text{Potência do compressor} \quad (22)$$

$$\text{Potência consumida} = 13,26$$

$$\text{Potência consumida por mês} = 13,26 \times 24 \times 30 \quad (23)$$

$$\text{Potência consumida por mês} = 9547,05 \text{ kWh}$$

2º caso, com sub-resfriamento

$$\text{Potência consumida} = 11,64$$

$$\text{Potência consumida} = [(11,64 \times 6) + (13,26 \times 18)] \times 30 \quad (24)$$

$$\text{Potência consumida} = 9255,61 \text{ kWh}$$

Agora deve-se realizar o cálculo para o consumo mensal, que será dado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Diferencial de potência} &= \text{Potência s/sub} - \text{Potência c/Sub} \quad (25) \\ \text{Diferencial de potência} &= 291,6 \text{ kWh} \end{aligned}$$

De acordo com os cálculos acima, pode-se observar que tem-se uma redução de 291,6 kWh por mês no consumo do sistema de refrigeração, trazendo esses números para porcentagem, tem-se uma economia de 3% aproximadamente no consumo do compressor por mês.

Conclusão

Baseado nos resultados obtidos durante esse projeto, pode-se dizer que o objetivo principal deste trabalho foi atingido. O sub-resfriamento com pastilhas *Peltier* demonstrou ser eficiente, além da redução no consumo energia através da geração fotovoltaica, o tempo menor de trabalho do compressor, resulta em um menor trabalho do sistema de refrigeração, no entanto, para que se tenha um resultado mais atrativo poderia ser considerado juntamente com o projeto elaborado outros modelos de eficiência energética para um melhor resultado, como por exemplo a instalação de controladores mais novos e com mais configurações, inversores de frequência e etc. Na prática, foram observados resultados bastante satisfatórios, que condizem com a teoria abordada e isso é algo muito importante, principalmente em se tratando de uma melhoria para um sistema mais eficiente.

Referências Bibliográfica

BRAIL ESCOLA, “**Aproveitamento do calor dissipado na tubulação em sistemas de refrigeração**”, disponível em:

<https://monografias.brasescola.uol.com.br/engenharia/aproveitamento-calor-dissipado-na-tubulacao-sistemas-refrigeracao.htm>, acesso em 11/06/2021.

CAPITAL REFRIGERAÇÃO, **O que significa “sub-resfriamento”**, disponível em:

<https://capitalrefrig.com.br/site/conteudo/11-muito-prazer-eu-sou-o-subresfriamento-veja-como.html> , acesso em 11/06/2021.

CONFESSOR,S.L.M., **Análise comparativa de controladores MPPT aplicados a um sistema fotovoltaico**, disponível em:

https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/tede/525/1/SamyaLMC_DISSERT.pdf, acesso em 18/05/2021.

CORREA,Y.,**Refrigeração: Qual sua importância para a Sociedade e a Ciência**, disponível em:

<https://www.webarcondicionado.com.br/refrigeracao-qual-sua-importancia-para-a-sociedade-e-a-ciencia>, acesso em 16/05/2021.

DEMATTÊ,R.D., **Avaliação da inserção de geração distribuída no sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro utilizando métodos multicritérios**, disponível em:

<https://docplayer.com.br/70475018-Avaliacao-da-insercao-de-geracao-distribuida-no-sistema-de-distribuicao-de-energia-eletrica-brasileiro-utilizando-metodos-multicriterio.html>, acesso em 16/06/2021.

(ELETROBRAS, 2005) disponível em:

<http://www.marioloureiro.net/tecnica/refrigeracao/EficiEnergSist.Refri.IndustrialCom.pdf>, acesso em 13/05/2021.

HOLOS, **Refrigeração utilizando pastilhas de efeito Peltier**, disponível em:

<https://www.redalyc.org/pdf/4815/481549220003.pdf>, acesso em 10/05/2021.

MARQUES,R.C., **Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro**, disponível em:

<https://periodicos.unifor.br/tec/article/viewFile/1049/4494>, acesso em 18/05/2021.

MATOS,R.S., **Refrigeração**, disponível em:

<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC153/Apostila/Apostila%20Refrigera%E7%E3o.pdf>, acesso em 16/05/2021.

MORAN,M.J., SHAPIRO, H.N, **Princípios da termodinâmica para engenheiros**

NASCIMENTO,C.A., **Princípios de funcionamento da célula fotovoltaica**, disponível em:

https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf, acesso em 13/05/2021.



PORTAL SOLAR, **Energia solar no Brasil**, disponível em:
<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>, acesso em 13/06/2021.

ROSA, A.R.O, **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil**, disponível em:
<https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/157/155>, acesso em 19/05/2021.

UNIP, **Módulo VII - 1ª Lei da Termodinâmica Aplicada a Volume de Controle: Princípio de Conservação da Massa. Regime Permanente**, disponível em:
https://adm.online.unip.br/img_ead_dp/31059.PDF acesso em 21/05/2021.

USP, **Sistemas de Refrigeração**, disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3550292/mod_resource/content/1/SEL0437_Aula10_Refrigeracao.pdf acesso em 21/05/2021.

WELLINGTON, **Sub resfriamento e Superaquecimento**, disponível em:
<https://www.consultoria.com/sub-resfriamento-e-superaquecimento/>, acesso em 09/06/2021.