

RESUMO

Trata o presente trabalho da otimização de uma câmara frigorífica portátil termoeétrica, acionada por células solares. Tal câmara pode ser utilizada na manutenção e transporte de pequena quantidade de produto a uma temperatura de aproximada-mente 10°C , tais como, remédios e vacinas à locais remotos e bebidas e alimentos de uso pessoal. A câmara consiste basicamente de uma caixa isolada termicamente, um refrigerador termoeétrico fixado lateralmente à caixa e um painel fotovoltaico usado como tampa da caixa ou separada da mesma. O refrigerador termoeétrico consiste de módulos termoeétricos com trocadores de calor tipo placa plana aletada com convecção natural. A metodologia de otimização empregada foi o método da procura (search method) auxiliada por simulação em microcomputador. O número de tentativas é reduzido quando se otimiza o sistema para um dado painel fotovoltaico. O sistema otimizado depende basicamente dos limites impostos às áreas dos trocadores de calor e a espessura do isolante térmico da câmara. Limitando a área total dos trocadores de calor em 0.9 m^2 e a espessura do isolante em 50 mm , obtivemos um sistema consistindo de uma câmara com as dimensões de 350 mm (largura), 350 mm (profundidade) e 350 mm (altura), isolante com condutividade térmica de $0.023\text{ w/m}^{\circ}\text{C}$ e espessura de 50 mm , um painel fotovoltaico que produz 1.44 A e 16.7 V , um refrigerador termoeétrico com um módulo de 254 termopares e fator geométrico de 0.064 cm e dois trocadores de calor, um com área de 0.39 m^2 para a face fria e outro com 0.50 m^2 para a face quente. O custo deste sistema foi avaliado em US\$ 336.00. Embora o procedimento desenvolvido tenha sido aplicado a sistemas com trocadores de calor com convecção natural, ele pode ser aplicado com convecção forçada, o que resultará em obtenção de câmaras otimizadas com maiores dimensões. Também poderá ser utilizado, com pequenas modificações, para otimizar uma câmara de dimensões dadas.

INTRODUÇÃO

Refrigeração termoeétrica

O processo de obtenção de temperaturas abaixo do ambiente é baseado no efeito Peltier. Um **par termoeétrico** ao ser percorrido por uma corrente elétrica contínua, apresenta uma junção quente e uma junção fria.

Os pares termoeétricos utilizados em refrigeração são constituídos de um metal (Cobre) e um semicondutor (Telureto de Bismuto).

A quantidade de calor absorvida na junção fria de um par termoeétrico é entretanto muito pequena, de modo que para que se tenha uma capacidade de refrigeração utilizável é necessário combinar vários pares termoeétricos formando um **módulo termoeétrico**.

Os módulos termoeétricos atuais são constituídos de:

- 1- vários pares termoeétricos ligados em série, sendo um de semicondutor tipo N e outro do tipo P alternadamente.
- 2- duas superfícies planas de material cerâmico, uma cobrindo as junções quente e outra as junções frias.

Quando submetido a uma fonte de corrente contínua, o módulo apresenta uma superfície quente e outra fria.

Um **refrigerador termoeétrico** é constituído de:

- 1- um ou mais módulos termoeétricos dispostos em série ou em paralelo.
- 2- trocadores de calor fixados às superfícies cerâmicas dos módulos para aumentar a capacidade de troca de calor dessas superfícies.
- 3- uma fonte de corrente contínua.

A refrigeração termoeétrica possui as seguintes vantagens em relação a refrigeração mecânica:

- 1- vida útil longa
- 2- manutenção simples e de baixo custo
- 3- não polui
- 4- baixíssimo nível de ruído
- 5- pequeno peso
- 6- operação simples e de fácil controle

Suas principais desvantagens são:

- 1- alto custo inicial
- 2- custo operacional relativamente alto quando comparado com sistemas de mesma capacidade.

Refrigeração termoeétrica acionada por células solares

Para acionar o refrigerador termoeétrico podem ser usadas as seguintes fontes de corrente contínua:

- 1- baterias de acumulação elétrica
- 2- conversores de corrente alternada
- 3- painéis de células solares (**painéis fotovoltaicos**)

As baterias e os conversores utilizam energia elétrica convencional.

Os painéis fotovoltaicos convertem diretamente a energia solar em corrente contínua de baixa voltagem.

A utilização de células solares apresentam as seguintes vantagens:

- 1- reduz o custo operacional do refrigerador termoeétrico a zero ou a valores muito baixos.
- 2- as células solares à base de silício se beneficiam dos avanços tecnológicos e da queda dos custos da indústria eletrônica.

DESCRIÇÃO DA CÂMARA FRIGORÍFICA PORTÁTIL

Componentes

- 1- caixa formada com painéis de isolamento térmico. A parte superior da caixa deve ser do tipo tampa para permitir o acesso à parte interna da caixa.
- 2- refrigerador termoeétrico formado basicamente de:
 - módulos termoeétricos

- dois trocadores de calor do tipo placa plana aletada, fixados a cada face dos módulos termoelétricos. O refrigerador deve ser fixado a uma das faces laterais da caixa.
- 3- um painel fotovoltaico separado da câmara.

Limitações

- 1- os componentes deverão ser os disponíveis do mercado, exceto os trocadores de calor que poderão ser fabricados.
- 2- a câmara é do tipo portátil e usada para conservar produtos previamente resfriados.
- 3- Outras limitações ver seção 3.1.2.

Usos

- 1- transporte de remédios e vacinas para regiões remotas.
- 2- transporte de alimentos e bebidas para regiões recreativas.

OTIMIZAÇÃO DA CÂMARA FRIGORÍFICA PORTÁTIL

Formulação matemática da otimização

Função objetivo

A função objetivo é o custo total do sistema (*CTS*), dado por

$$CTS = CCA + CPF + CMT + CTC \quad (1)$$

O custo de cada componente pode ser representado por:

$$CCA = f(ACA, EIS, KIS, CIS) \quad (2)$$

$$CPF = f(NPF, CPF1) \quad (3)$$

$$CMT = f(NM, NT, GT) \quad (4)$$

$$CTC = f(ATC, CTC1, KTC) \quad (5)$$

As variáveis das funções acima, são as variáveis otimizadoras da função objetivo.

O problema consiste em estabelecer os valores dessas variáveis que minimizam a função objetivo *CTS*, sujeita as funções limitadoras descritas na próxima seção.

Funções limitadoras

São funções que limitam os valores das variáveis otimizadoras.

Funções limitadoras diretas: expressam valores limites das próprias variáveis otimizadoras, das variáveis operacionais, dos parâmetros de desempenho e de projeto do sistema.

Funções limitadoras indiretas: expressam relações funcionais do desempenho de cada componente e dos balanços de massa e energia do sistema.

Câmara frigorífica

Funções limitadoras diretas:

Para facilidade de acomodação e transporte

$$LC \leq 100 \text{ cm} \quad WC \leq 75 \text{ cm} \quad HC \leq 50 \text{ cm}$$

$$EIS \leq 50 \text{ mm} \quad TR = 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad TE = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$CIS = 1 \text{ US\$/m}^2/\text{mm} \quad KIS = 0.023 \text{ W/m }^\circ\text{C}$$

Funções limitadoras indiretas:

Desempenho da câmara: (Ver seção 4.1)

- Capacidade de refrigeração requerida (*QR*).

Módulos termoelétricos

Funções limitadoras diretas:

$$0 \text{ }^\circ\text{C} < TC < TR \quad 60 \text{ }^\circ\text{C} > TH > TE$$

$$0.04 \text{ cm} < GT < 2.0 \text{ cm}$$

$$NT \leq 254$$

$$NM \leq 4$$

Funções limitadoras indiretas:

Desempenho do módulo termoelétrico: (Ver seção 4.3)

- Capacidade de refrigeração (*QM*)
- Voltagem requerida (*VM*)
- Corrente (*IM*)
- Coeficiente de desempenho (*CP*)

Desempenho do refrigerador termoelétrico:

$$IR = IM \quad (\text{arranjo em série})$$

$$IR = IM * NM \quad (\text{arranjo em paralelo})$$

$$VR = VM * NM \quad (\text{arranjo em série})$$

$$VR = VM \quad (\text{arranjo em paralelo})$$

$$WR = IR * VR$$

$$QE = QM * NM$$

Trocadores de calor

Funções limitadoras diretas:

- Peso total £ 1.0 Kg
- ATC £ 0.9 m2.
- KTC = 200 W/m°C (Alumínio)
- CTC1 = 10 US\$/m2

Funções limitadoras indiretas:

Convecção natural

Desempenho dos trocadores de calor: (Ver seção 4.4)

- Capacidade de transferencia de calor (QTC).

Painéis fotovoltaicos

Funções limitadoras diretas:

- NPF = 1
- RSP = 1000 W/m2
- CPF1 = 10 US\$/W para WPMAX < 35 W
- CPF1 = 8 US\$/W para WPMAX > 35 W

Funções limitadoras indiretas:

Desempenho do painel fotovoltaico: (Ver seção 4.2)

- Corrente (IP)
- Voltagem (VP)

Desempenho do sistema de painéis fotovoltaicos

$$IS = IP \quad (\text{arranjo em série})$$

$$IS = IP * NPF \quad (\text{arranjo em paralelo})$$

$$VS = VP * NPF \quad (\text{arranjo em série})$$

$$VS = VP \quad (\text{arranjo em paralelo})$$

$$WS = IS * VS.$$

Balancos de massa e energia do sistema

Neste caso somente balanço de energia.

Módulos termoelétricos:

$$QE \quad QR$$

$$QH = QE + WR$$

$$\text{Trocador de calor da face fria:} \quad QTC \quad QE$$

$$\text{Trocador de calor da face quente:} \quad QTC \quad QH$$

$$\text{Painéis fotovoltaicos:} \quad WS > WR$$

Métodos de otimização

De acordo com (Stoecker, 1989), os métodos de otimização utilizados em sistemas térmicos são:

- 1- Métodos de calculo diferencial: multiplicadores de La-grange.
- 2- Métodos de procura (search methods)
- 3- Programação dinâmica
- 4- Programação geométrica
- 5- Programação linear

Para sistemas em que os parâmetros de projeto dos componentes variam de forma discreta, como por exemplo, o tamanho dos módulos termoelétricos e dos painéis fotovoltaicos, o método recomendado para otimizar sistemas que contenham tais componentes, é o método da procura.

Otimização utilizando o método da procura

Procedimento com auxilio de simulação em computa-dor.

Este procedimento consiste basicamente em especificar cada componente do sistema e suas condições de operação, e determinar o desempenho de cada componente através da simulação em computador, de modo que o sistema esteja em equilíbrio. Para cada conjunto de especificações dos componentes, determina-se o custo do sistema. Repete-se o procedimento até se obter o sistema de menor custo.

Este procedimento se torna impraticável quando os parâmetros a especificar tem elevada variabilidade, pois o numero de tentativas para se obter o custo mínimo será enorme. Outro fator que eleva o numero de tentativas é a necessidade de se equilibrar o sistema.

Para reduzir o numero de tentativas do procedimento anterior quando aplicado ao problema em questão, observamos que:

- 1- O componente de maior custo é o painel fotovoltaico.
- 2- O componente de maior variabilidade de parâmetros a especificar é o modulo termoelétrico.

Portanto, o número de tentativas ficará bastante reduzido, se otimizarmos o sistema para um dado painel fotovoltaico operando com potência máxima e módulos termoelétricos com coeficiente de performance máximo. O equilíbrio do sistema será estabelecido dimensionando-se os trocadores de calor e a câmara para satisfazer o desempenho do refrigerador e as limitações impostas.

Descrição do procedimento:

1- Especificar sistema de painéis fotovoltaicos e condições de operação

- 1.1- Quantidade de painéis
- 1.2- Arranjo dos painéis
- 1.3- modelo do painel (catalogo do fabricante)
- 1.4- radiação solar sobre os painéis
- 1.5- temperatura do ambiente

2- Desempenho do sistema de painéis fotovoltaicos

- 2.1- Determinar corrente (I_S) e voltagem (V_S) para potência máxima.

3- Especificar o sistema de módulos termoelétricos e as condições de operação

- 3.1- Quantidade de módulos
- 3.2- Arranjo dos módulos
- 3.3- Temperatura da face fria
- 3.4- Temperatura da face quente

4- Seleção do modulo termoelétrico

- 4.1- Determinar a corrente (I_M) e a voltagem (V_M) em cada modulo a partir de (I_S) e (V_S).
- 4.2- Determinar o fator geométrico (GT) do modulo considerando corrente ótima $I_{opt} = I_M$.
- 4.3- Selecionar (GT) do catálogo do fabricante.
- 4.4- Determinar número de termopares (NT) do modulo, para satisfazer V_M .
- 4.5- Selecionar (NT) do catálogo do fabricante.

5- Desempenho do refrigerador termoelétrico.

- 5.1- Determinar voltagem requerida (V) para módulos selecionados e corrente $I = I_M$.
- 5.2- Se $V > V_M$, estabelecer $V = V_M$ e calcular corrente (I) no modulo.
- 5.3- Determinar a capacidade (QE) do refrigerador com os módulos selecionados e corrente (I).
- 5.4- Determinar a potência (WR) absorvida pelo refrigerador.
- 5.5- Determinar o calor rejeitado na face quente (QH).

6- Especificar limitações dos trocadores de calor da face fria e da face quente e as condições de operação.

- 6.1- Dimensões e emissividade da base (placa).
- 6.2- Resistência térmica entre a base e o modulo.
- 6.3- Eficiência das aletas.
- 6.4- Tipo de convecção nas superfícies.

7- Dimensionamento dos trocadores de calor

- 7.1- Determinar área do trocador da face fria para que sua capacidade $QTC = QE$.
- 7.2- Determinar área do trocador da face quente para que sua capacidade $QTC = QH$.

8- Especificar limitações da câmara e condições de operação.

- 8.1- Temperaturas interna e externa da câmara
- 8.2- Dimensões externas da câmara
- 8.3- Condutividade térmica do isolante

9- Dimensionamento da câmara

- 9.1- Determinar a espessura do isolante para equilibrar a carga térmica da câmara com a capacidade do refrigerador termo-elétrico (QE).

10- Determinar o custo do sistema especificado.

11- Repetir todo o procedimento até obter o sistema de custo mínimo.

DESEMPENHO DOS COMPONENTES

Câmara frigorífica

O desempenho da câmara é avaliado pela capacidade de refrigeração necessária para manter as condições internas estabelecidas. Essa capacidade depende da carga térmica imposta à câmara composta pelas seguintes cargas térmicas:

Carga térmica de transmissão. Condução de calor através das paredes da câmara.

Carga Térmica do Produto. Resfriamento/Congelamento do Produto.

Carga Térmica de Infiltração. Infiltração de ar Externo na câmara.

Carga Térmica Miscelânea. Ocupantes, Iluminação e Equipamentos dentro da câmara.

Limitaremos o estudo ao caso em que só existe a carga térmica de transmissão.

Carga de Transmissão :

$$QC = UCA \quad ACA \quad DTE \quad (7)$$

$$1/UCA = 1/HO + 1/HI + EIS/KIS \quad (8)$$

$$ACA = 2 (LC WC + LC HC + WC HC) \quad (9)$$

$$TE = TE - TR \quad (10)$$

Capacidade de Refrigeração Requerida:

$$QR = QC \quad (11)$$

Painéis fotovoltaicos.

O desempenho de um painel fotovoltaico é avaliado pela corrente (IP) e voltagem (VP) por ele produzido. No presente estudo, utilizamos como desempenho, a corrente e a voltagem para potência máxima do painel. Os catálogos dos fabricantes fornecem os valores da corrente (IP) e voltagem (VP) de um painel para potência máxima, nas condições de nível de insolação padrão (1000 W/m²), temperatura do ambiente (25 °C) e air mass igual a 1.5.

Módulos termoeletrônicos.

O desempenho do módulo termoeletrônico é avaliado por:

- 1- Calor bombeado na face fria (QM)
- 2- Voltagem que deve ser aplicada ao módulo (VM)
- 3- Coeficiente de desempenho (CP)

De (MELCOR, 1994), obtemos as seguintes expressões:

$$QM = 2 NT [IM TC - IM / (2 GT) KD T GT] \quad (12)$$

$$VM = 2 NT [IM / GT + D T] \quad (13)$$

$$CP = QM / (VM IM) \quad (14)$$

$$DT = TH - TC \quad (15)$$

$$GT = AST / LT \quad (16)$$

4- Corrente máxima (I_{max}):

A corrente máxima é obtida da equação (12), com $QM = 0$ e $\frac{d(DT)}{d(IM)} = 0$, ou seja

$$I_{max} = (K GT /) [1 + 2 Z TH - 1] \quad (17)$$

$$Z = / (K) \quad (18)$$

5- Diferença de temperatura máxima (DT_{max}):

É obtida da equação (12), com $I = I_{max}$ e $QM = 0$, ou seja

$$DT = TH - (1 + 2 Z TH - 1) / Z \quad (19)$$

6- Corrente Ótima (I_{opt})

A corrente ótima (I_{opt}) é aquela que maximiza o CP do módulo ou seja, e o valor de IM que maximiza a equação (14)

$$\frac{d CP}{d IM} = 0 \quad (20)$$

$$I_{opt} = KD T GT (1 + 1 + Z T) / (T) \quad (21)$$

$$T = (TC + TH) / 2 \quad (22)$$

7- CP Ótimo (COP)

O coeficiente de desempenho ótimo (COP) e o valor do CP para corrente ótima I_{opt} . Das equações (12), (13), (14) e (21) demonstra-se que:

$$COP = (T / D T) (1 + Z T - 1) (1 + Z T + 1) - 1/2 \quad (23)$$

Trocadores de calor

O desempenho de um trocador de calor é avaliado pela sua capacidade de transferência de calor (QTC). Para um trocador de calor do tipo placa aletada, temos:

$$QTC = D TS / [1 / (AF EFAL HF + HB AB) + RTB] \quad (24)$$

$$DTS = \sqrt{TS - TF} \quad (25)$$

$$HB = HF + HR \quad (26)$$

De (Holman, 1976), obtemos

$$HF = 1.42 (DTS / LB)^{0.25} \quad (27)$$

$$HR = EMS 5.669 10^{-8} (TS + TF) (TS^2 + TF^2) \quad (28)$$

Observar que temos dois trocadores de calor, ou seja, um na face quente e o outro na face fria. A resistência térmica da base (RTB) decorre da resistência de contato e do estrangulamento do fluxo de calor (Oliveira e Forslund, 1974) entre os módulos e a base do trocador de calor. Esta resistência é no entanto difícil de ser avaliada, usaremos um valor de 0.005 W/ °C e num trabalho futuro faremos uma avaliação mais precisa.

RESULTADOS

O procedimento descrito na seção 3.2.2 foi executado em microcomputador num total de 12 testes até obter o sistema otimizado, sendo os resultados apresentados nas tabelas 1, 2, 3 e 4 seguintes.

Nomeclatura

r Resistividade elétrica do material semicondutor

a Coeficiente Seebeck do termopar

AB Área da base (placa).

ACA Área externa da câmara

AF Área aletada do trocador de calor

AST Área da seção transversal do material semicondutor

ATC Área total dos trocadores de calor

CCA Custo da câmara frigorífica

CIS Custo específico do isolante térmico

CMT Custo dos módulos termoeletrônicos

CP Coeficiente de desempenho do módulo termoeletrônico

COP Coeficiente de desempenho ótimo do módulo termoeletrônico

CPF Custo dos painéis fotovoltaicos
CPF1 Custo unitário do painel fotovoltaico
CTC Custo dos trocadores de calor.
CTC1 Custo específico dos trocadores de calor
EFAL Eficiência das aletas.
EIS Espessura do isolante térmico
EMS Emissividade da superfície da base (placa).
GT Fator geométrico do material semicondutor.
HC Altura da câmara
HF Coeficiente de convecção nas aletas.
HI Condutância da superfície interna (5,7 W/M °C)
HO Condutância da superfície externa (9,5 W/M °C)
HR Coeficiente de radiação da superfície da base (placa).
IM Corrente elétrica no módulo termoeletrônico
IP Corrente elétrica do painel fotovoltaico.
IR Corrente elétrica fornecida pelo refrigerador termoeletrônico.
IS Corrente elétrica fornecida pelo sistema de painéis fotovoltaicos.
K Condutividade térmica do material semicondutor.
KIS Condutividade térmica do isolante
KTC Condutividade térmica do material dos trocadores de calor.
LB Lado da base da placa aletada.
LC Comprimento da câmara
LT Comprimento do termopar
NM Número de módulos termoeletrônicos
NPF Número de painéis fotovoltaicos
NT Número de termopares do módulo termoeletrônico
QC Carga de transmissão da câmara.
QE Capacidade de refrigeração do refrigerador termoeletrônico.
QH Capacidade do trocador de calor da face quente
QM Capacidade de refrigeração do módulo termoeletrônico
QR Capacidade de refrigeração requerida pela câmara
QTC Capacidade de transferência de calor do trocador de calor
RSP Nível de insolação no painel fotovoltaico.
RTB Resistência térmica da base (placa).
TC Temperatura da face fria do módulo termoeletrônico.
TE Temperatura externa da câmara
TF Temperatura do fluido.
TH Temperatura da face quente do módulo termoeletrônico
TR Temperatura interna da câmara
TS Temperatura da superfície da base (placa)
UCA Coeficiente global de transmissão de calor
VM Voltagem requerida pelo módulo termoeletrônico
VP Voltagem do painel fotovoltaico.
VR Voltagem requerida pelo refrigerador termoeletrônico
VS Voltagem do sistema de painéis fotovoltaicos.
WC Largura da câmara
WPMAX Potência elétrica máxima do painel fotovoltaico.
WR Potência elétrica requerida pelo refrigerador termo-elétrico
WS Potência elétrica do sistema de painéis fotovoltaicos.

REFERENCIAS

Holman, J.P., 1976, Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company. MELCOR., 1994, Engineering Catalog, Melcor Thermoelectrics, 1040 Spruce Street, Trenton, NJ, USA. Oliveira, H.Q., and Forslund, R.P., 1974, The Effect of Thermal Constriction Resistance in the Design of Channel Plate Heat Exchangers, Journal of Heat Transfer, Series C, Vol. 96, p. 292. Stoecker, W.F., 1989, Design of Thermal Systems, McGraw-Hill Book Company.

