

José Espínola Jr.  
José Maurício Gurgel



Refrigeração através  
da utilização de  
Rejeitos Térmicos

*José Espínola Jr.*  
*José Maurício Gurgel*

**Refrigeração Através da Utilização de  
Rejeitos Térmicos**

# REFRIGERAÇÃO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE REJEITOS TÉRMICOS

José Espínola Jr., José Maurício Gurgel

**Capa:** Ana Cecília Paes de Souza Espínola

**Representante do conselho editorial:** João Vicente Santiago do Nascimento, Letícia Bianca Barros de Moraes Lima, Chirlaine Cristine Gonçalves

**Arte final e diagramação:** Sarah Elisabeth Santos Cupertino, Crislaine Santos de Macêdo, Jonathas Farias de Carvalho

**Revisão Bibliográfica:** Ana Cecília Paes de Souza Espínola

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida ou duplicada sem autorização do IFS

© 2014 by José Espínola Jr, José Maurício Gurgel

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Espínola Jr., José  
E77r      Refrigeração através da utilização de rejeitos térmicos [recurso eletrônico] / José Espínola Jr., José Maurício Gurgel – Aracaju: IFS, 2014.  
77 p. : il.

Formato: e-book  
ISBN 978-85-68801-60-4

1. Refrigeração. 2. Motores de combustão interna. 3. Absorção sólida. I. Gurgel, José Maurício. II. Título.

CDU: 621.43

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Célia Aparecida Santos de Araújo  
CRB 5/1030

**Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS**

Avenida Jorge Amado, 1551 – Loteamento Garcia – Bairro Jardins – Aracaju / Sergipe. CEP: 49025 – 330, Tel.: +55 (79) 3711 – 3222

E-mail: [edifs@ifs.edu.br](mailto:edifs@ifs.edu.br), Impresso no Brasil – 2014



**Ministério da Educação**

**Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Sergipe**

**Presidente da República**  
Dilma Roussef

**Ministro da Educação**  
Henrique Paim

**Secretário da Educação Profissional e Tecnológica**  
Aléssio Trindade de Barros

**Reitor IFS**  
Ailton Ribeiro de Oliveira

**Pró-reitora de Pesquisa e Extensão**  
Ruth Sales Gama de Andrade



## *Dedicatória*

A minha esposa, Ana Cecília, a qual reservo carinho e amor incondicional, à minha filha, Sophia, razão da minha luta e vida, aos meus pais, José Espínola e Cremilda, por toda dedicação que tiveram ao longo de minha trajetória.



## *Agradecimentos*

A Deus por minha vida, família e amigos verdadeiros.  
Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe pela oportunidade de publicação do trabalho em foco.



*Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.*  
(Ayrton Senna)



## *Apresentação*

A presente obra visa mostrar a viabilidade do aproveitamento de rejeitos térmicos como insumo energético para um sistema de refrigeração. Para tanto, o enfoque principal do livro, é a utilização do calor de rejeição de um motor estacionário de combustão interna como propulsor de um sistema de refrigeração baseado no fenômeno de adsorção sólida aproveitando calor de rejeição de um motor de combustão interna estacionário para a regeneração. O funcionamento do sistema, em tela, é baseado na reação química entre dois compostos que se apresentam um na forma sólida (adsorvente ou simplesmente sorvente) e outro na forma líquida ou vapor (adsorbato ou simplesmente sorbato). A escolha do par sorvente/sorbato depende de parâmetros inerentes ao funcionamento do sistema, a quantidade de energia solicitada, a disponibilidade energética e outros nuances operacionais. Com o intuito de possibilitar a análise da influência das propriedades do par frigorígeno bem como a otimização construtiva de protótipos, um modelo matemático é apresentado, no qual são resolvidas as equações de difusão de calor no interior do leito poroso acopladas ao termo de geração de calor (sorção) relativo ao transporte de massa, com a utilização de métodos iterativos, para a obtenção da solução através do uso de técnicas numéricas. Com isso o dimensionamento de um sistema é apresentado e processado o seu funcionamento, para diversas situações, por intermédio de simulações numéricas.



# SUMÁRIO

## **Introdução**

Histórico.....	15
Energia Solar e a Refrigeração.....	16
Adsorção Sólida.....	17

## **Capítulo I – Fundamentos Básicos em Adsorção Sólida**

1 Processo de adsorção.....	19
2 - A escolha do par frigorígeno.....	23
3 - Princípio de funcionamento de um sistema de refrigeração a adsorção sólida.....	27

## **Capítulo II - Sistema de Refrigeração Adsorativo**

1 O Sistema.....	29
2 Descrição do sistema.....	29
2.1 O Reator.....	29
2.2 O Condensador.....	30
2.3 O Evaporador.....	30

## **Capítulo III – Idealização de Modelo Matemático**

1 Considerações Iniciais.....	31
2 Hipóteses.....	31
3 Equacionamento.....	32
3.1 Modelo para o Reator.....	33
3.1.1 Placa.....	33
3.1.2 Leito Poroso.....	34
3.2 Modelo para o Condensador.....	37
3.3 Modelo para o Evaporador.....	37
3.3.1 Metanol.....	37
3.3.2 Água.....	38

## **Capítulo IV - Caracterização**

1 Considerações Iniciais.....	39
2 Análise Termodinâmica.....	40
3 Análise de Parâmetros Característicos.....	46

## **Capítulo V - Dimensionamento do Sistema de Refrigeração**

### **Adsorativo**

1 Considerações Iniciais.....	52
2 Caracterização do Motor de Combustão Interna.....	52
3 Cálculos Dimensionais.....	52
4 Considerações Finais.....	56

<b>Bibliografia.....</b>	<b>57</b>
--------------------------	-----------

<b>Apêndice A – Simbologia.....</b>	<b>63</b>
-------------------------------------	-----------

<b>Apêndice B – Motor de Combustão Interna Estacionário.....</b>	<b>66</b>
------------------------------------------------------------------	-----------

<b>Apêndice C – Modelo de Cálculo de Temperatura no Interior de um Leito Poroso.....</b>	<b>69</b>
------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

<b>Apêndice D – Propriedades dos Componentes do Sistema de Refrigeração.....</b>	<b>74</b>
----------------------------------------------------------------------------------	-----------

# *Introdução*

## **Histórico**

A utilização da adsorção sólida em refrigeração é recente, entretanto a refrigeração por absorção foi descoberta por Nairn, em 1777, sendo que, somente em 1823, Ferdinand Carré construiu o primeiro refrigerador comercial segundo esse princípio. Os estudos para o uso de sorventes sólidos em ciclos intermitentes, com esse fim, remontam ao período entre as duas grandes guerras, quando Plank, Altenkirsch, Linge e Mehl contribuíram para a construção de geladeiras a absorção sólida. Em 1971, na União Soviética, Muradov e Shadiev realizaram experimentos com o par frigorígeno amônia/cloreto de cálcio e montaram um refrigerador solar a absorção sólida. No mesmo ano, ainda na União Soviética, Dubinin e Astakhov propuseram uma equação característica para processos de adsorção em materiais microporosos, na qual se pode acompanhar o comportamento de um adsorvente microporoso quando submetido a operações de adsorção e dessorção, mais tarde comprovada por Passos experimentalmente. Com o intuito de facilitar o estudo termodinâmico do fenômeno da adsorção, Dubinin e seus colaboradores, entre 1972 e 1980, desenvolveram a teoria do potencial de adsorção, introduzindo assim uma nova técnica de abordagem do referido problema. Em 1973, nos Estados Unidos, Dimiter Tchernev testou com sucesso um modelo de refrigerador solar a adsorção sólida utilizando como adsorvente a zeólita em estado natural e em 1981, Tchernev apresentou um sistema integrado de aquecimento e refrigeração solar a adsorção sólida, comercializado a partir de 1983. A partir de 1980, na França, Guilleminot e outros pesquisadores desenvolveram estudos referentes à refrigeração solar a adsorção sólida. Nesta época, aconteceu o *boom* da energia solar no mundo, os franceses formam discípulos em todo o planeta. Com o prosseguimento do estado de euforia solar, em 1986, Passos, em tese de doutorado, realiza um estudo completo sobre diversos tipos de carvão ativado e suas aplicações a refrigeração solar. Nos anos de 1986 e 1987, Pons, Guilleminot e Grenier desenvolveram diversos trabalhos voltados à produção de gelo em sistemas que utilizavam o par carvão ativado/metanol baseados no Brasil, em 1984, Klüppel e Vodianitskaia montam e testam uma geladeira solar a adsorção sólida com o par sílica-gel/água.

Utilizando o mesmo par e fonte térmica, Klüppel e Gurgel desenvolvem um sistema de refrigeração de água potável, em energia solar, em 1986. Em 1987, Santos, Venanzi e Cardoso projetaram um sistema de refrigeração por absorção a brometo de lítio e água com o aproveitamento do calor rejeitado nos gases de escape de máquinas térmicas. Em 1988, Passos e Escobêdo desenvolveram um protótipo de geladeira a adsorção sólida com o par zeólita 13x/água aproveitando os gases remanescentes de um fogão a lenha. Em 1992, Gurgel e Klüppel realizaram a simulação numérica de um sistema de refrigeração solar por adsorção sólida com o par sílica-gel/água, com o objetivo de otimização do mesmo. Mais tarde, em 1994, Gurgel apresenta a caracterização de um sistema de condicionamento de ar por adsorção sólida, regenerado por energia solar. Em 1996, Leite simulou o comportamento de um sistema de refrigeração solar a adsorção sólida usando carvão ativado/metanol e introduzindo uma cobertura de poliestireno expandido no coletor solar, aumentando o rendimento total do sistema. Em 1992, na Jordânia, Alhusein e Inayatullah montaram e testaram um sistema de climatização, a absorção, de um automóvel com o aproveitamento dos gases de escape. Como se vê, os sistemas de refrigeração a adsorção evoluíram e se diversificaram em consonância com os objetivos de projeto em todo o mundo. Desta forma, a energia solar deixou de ser a única fonte energética utilizada. O confronto de resultados experimentais e trabalhos de simulação numérica demonstra a necessidade de se utilizar ferramentas numéricas para simulação de sistemas, com o objetivo de se obter uma melhor caracterização de parâmetros, facilitando o estudo da viabilidade técnico/econômica no desenvolvimento de sistemas.

## **Energia Solar e a Refrigeração**

A busca de sistemas alternativos de produção de energia tomou grande impulso depois de passado o susto de um colapso energético imediato, por ocasião da grande crise do petróleo no início da década de 70. A energia solar surgiu, então, como uma opção bastante promissora; conseqüentemente, os estudos para o desenvolvimento de sistemas que utilizavam este tipo de suprimento, obtiveram enormes incentivos. Com o aperfeiçoamento dos coletores solares, os sistemas de refrigeração que

utilizam a energia solar voltaram a despertar o interesse dos pesquisadores que iniciaram um grande trabalho para otimização e viabilidade destes sistemas, em diversas partes do mundo.

A conservação de produtos perecíveis através da refrigeração é indispensável, entretanto, a dependência do suprimento de energia existente torna este processo bastante oneroso. Sendo assim, os sistemas que utilizam energia solar exercem um grande fascínio sobre os pesquisadores, pois apresentam custo operacional praticamente nulo, boa autonomia, baixos custos de fabricação e manutenção, simplicidade de manejo, segurança e longa vida útil.

O princípio da evolução cíclica de um fluido vaporizável em um circuito, no qual existe um número determinado de trocadores de calor, rege o funcionamento das máquinas de refrigeração convencionais. Todavia, os sistemas que utilizam a energia solar, apresentam ciclos intermitentes, a não ser que se disponha de meios de estocar a energia captada durante o dia. Levando em consideração estes tipos de sistemas, tem-se:

- Sistemas Fotovoltaicos;
- Sistemas a Expansão;
- Sistemas a Ejeção-Compressão;
- Sistemas a Absorção Líquida;
- Sistemas a Absorção Sólida;
- Sistemas a Adsorção Sólida.

### **Adsorção Sólida**

A adsorção sólida é atualmente uma das mais promissoras possibilidades para a utilização da energia solar através de sistemas de refrigeração. Tais sistemas são de grande simplicidade, sendo formados basicamente por três trocadores de calor interligados:

- Reator adsorativo;
- Condensador;
- Evaporador.

O funcionamento destas máquinas é baseado na reação química entre dois compostos, que se apresentam um na forma sólida (adsorvente) e outro na forma líquida ou vapor (adsorbato).

Trabalhos desenvolvidos por alguns pesquisadores (Gurgel, Klüppel, Adell, Jung, Vodianitskaia, Guilleminot, Meunier, Meschler, Grenier e outros), empenhados na viabilização dos sistemas de refrigeração que utilizam a energia solar, alertam para a adequação do par frigorígeno utilizado (adsorvente/adsorbato). Desta forma, a eficiência do sistema depende da criteriosa escolha deste.

Para possibilitar análise da influência das propriedades do par frigorígeno e das variáveis climáticas, bem como a otimização construtiva de protótipos, é preciso conseguir um modelo matemático que represente fielmente a operação de um sistema real. Deve-se mencionar que modelos simplificados, para um leito de geometria de placa plana, já foram apresentados por Bourbaki (1985) e Grenier *et al.* (1985) e posteriormente um estudo mais completo foi realizado por Guilleminot *et al.* (1987).

O dimensionamento dos equipamentos, a serem utilizados nestes sistemas, depende da transferência de calor e massa, sendo necessária então a determinação da condutividade e difusividade térmica do leito poroso. Como consequência desta necessidade, torna-se imperativo a simulação do sistema a ser dimensionado.

Os processos termodinâmicos que ocorrem em máquinas de refrigeração, as quais utilizam a adsorção sólida, e que funcionam com suprimento solar, são análogos aos que ocorrem em outros equipamentos de refrigeração, que utilizam o mesmo princípio, mas suprimento energético diverso. No nosso caso, tem-se como mudança fundamental em relação aos sistemas solares de refrigeração, a troca do coletor solar por um regenerador, o qual aproveita o calor gerado durante a combustão, no interior do motor.

# CAPÍTULO I

## *Fundamentos Básicos de Adsorção Sólida*

### **1. O processo de adsorção**

A sorção envolve o contato de uma fase fluida livre (gasosa ou líquida) com uma fase rígida (matriz porosa), permanente e granulada, que tem a propriedade de reter seletivamente uma, ou mais de uma, entre as espécies contidas inicialmente no fluido.

As operações de sorção podem ser classificadas em termos do tipo de fluido e da estrutura do sorvente.

Quando as forças atrativas são mais fracas e menos específicas que as de uma ligação química, e sua ação seletiva é mais pronunciada na camada monomolecular próxima a superfície sólida este efeito de combinação é identificado como adsorção física ou sólida.

A adsorção sólida é um processo reversível de atração e retenção de átomos ou moléculas de um gás ou vapor (adsorvato) na superfície de uma substância (adsorvente).

Na adsorção sólida, os átomos ou moléculas do sólido são mantidos em união por várias forças, entre as quais estão:

- Forças Eletrostáticas;
- Forças de Van der Waals;
- Forças de Valência, etc.

Um átomo no interior desse sólido é submetido a forças iguais em todas as direções, enquanto que um átomo na superfície do mesmo é submetido a forças desequilibradas, de forma que a tração para o interior é maior que a para o exterior. Como consequência disso, a superfície do sólido tenderá a reduzir-se, e uma tensão superficial se seguirá, fazendo com que ocorra a adsorção, segundo o relatado em Perry e Chilton (1980).

A reação envolvida no processo de adsorção pode ser representada por:



A reação, representada pela equação (1), ocorre a uma determinada temperatura e pressão ( $T$ ,  $P$ ) e ao estado inicial estão associados uma entalpia inicial  $H_i$  e entropia inicial  $S_i$  do composto. Ao estado final dissociado corresponde também uma entalpia  $H_d$  e uma entropia  $S_d$  da mistura de  $c$  moles de **A** com  $d$  moles de **B**, produzidas a partir da dissociação de 1 mol de **cAdB**. A entalpia molar de reação, para dados  $T$  e  $P$  é dada por:

$$\Delta H = H_d - H_i \quad (2)$$

e a entropia molar para  $T$  e  $P$  fixos é dada por:

$$\Delta S = S_d - S_i \quad (3)$$

A energia de formação (energia livre de Gibbs), à temperatura de reação, é dada por:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (4)$$

A constante de reação (lei de ação das massas), cujo sinal determina o sentido da reação é ligada à energia livre de Gibbs através de:

$$\Delta G^\circ = R \cdot T \cdot \text{Ln} \left( \frac{C_A^n \cdot C_B^m}{C_{\text{AnBm}}} \right) \quad (5)$$

Como a constante  $R$  é positiva e  $T$  sempre positiva, logo o sinal de  $\Delta G^\circ$  é determinado pelo logaritmo do produto das concentrações dos reagentes dividido pela concentração do produto. Um valor positivo ou negativo de  $\Delta G^\circ$ , significa uma tendência à dissociação ou à formação do composto, respectivamente, logo o equilíbrio é obtido com  $\Delta G^\circ = 0$ , o que permite determinar as temperaturas de reação através da equação (4), como também a mudança de entalpia  $\Delta H$ , então se tem:

$$\Delta H = T \cdot \Delta S \quad (6)$$

A reação adsorviva se processa em velocidade decrescente até que seja atingido o equilíbrio, ou seja, o estado no qual a pressão do gás se equaliza à da fase adsorvida. A quantidade de fluido por unidade de massa de adsorvente então retida é denominada capacidade de equilíbrio.

A equação (5) é viável somente para sistemas com comportamento ideal, todavia como nos casos práticos os coeficientes de atividade das substâncias envolvidas são altos, sua utilização é válida, pois, além disso, permite a melhor compreensão dos processos. A quantidade de energia envolvida no processo é denominada de calor isostérico e sua intensidade depende da natureza do par adsorvente/adsorvato.

Se a reação representada pela equação (1) se processa da esquerda para direita, o calor é absorvido no processo, a reação é de dissociação, caso contrário, a reação é de formação, se processa da direita para a esquerda, há rejeição de calor. O calor absorvido é transformado em energia potencial de reação química de forma que quanto mais fortes forem as ligações químicas do composto formado, maior será a quantidade molar de energia envolvida no processo.

Os diversos estudos existentes sobre o processo de adsorção sólida, e consequente domínio do fenômeno, amplia cada vez mais a diversidade de aplicações desse. Dentre essas, destaca-se o seu emprego na refrigeração, com o desenvolvimento de sistemas autônomos envolvendo uma reação termoquímica reversível.

Com a utilização de uma reação termoquímica reversível num sistema de refrigeração, surge à necessidade de se solucionar alguns problemas técnicos como a separação de componentes e a rejeição dos calores de evaporação e condensação para a atmosfera. Uma solução para isso é o acoplamento dos processos de evaporação/sorção e dessorção/condensação, num sistema dotado de um condensador entre o reator e a estocagem do líquido (Figura 1), o qual é baseado em quatro temperaturas (Kluppel e Gurgel, 1986).

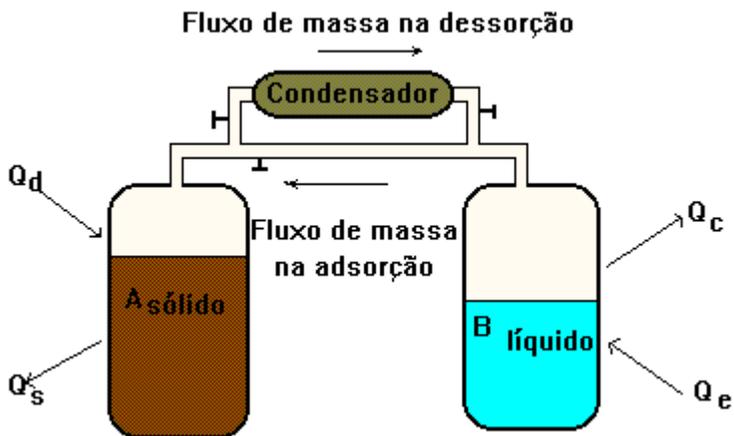
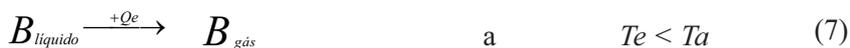


Figura 1 - Esquema de um sistema de refrigeração a adsorção sólida (Espínola Jr., 2002).

As reações que ocorrem no sistema de refrigeração representado na Figura 1 são:



## 2. A Escolha do Par Frigorígeno

A equação de estado do sistema formado por um dado par adsorvente/adsorvato é definida a partir de modelos semi-empíricos ou experimentais, podendo sua representação gráfica ser feita por meio de isósteras, definida como sendo o lugar geométrico de todos os pontos que representam estados termodinâmicos de mesma massa relativa de fluido adsorvida.

Um adsorvente nada mais é que um meio poroso, o qual se define, segundo Marle (1985), como um material de estrutura sólida constituída de poros interconectados nos quais podem coexistir uma ou mais fases fluidas. A grande totalidade dos adsorventes se apresenta na forma granular e com estrutura bidispersa, facilitando a análise estrutural do meio poroso, que apresenta como característica marcante a seletividade adsortiva, que varia em consonância com o tamanho dos poros existentes na superfície do mesmo. Então, os poros classificam-se em:

- Os macroporos: Diâmetro superior a 500 Å;
- Os mesoporos: Diâmetro entre 500 Å e 20 Å;
- Os microporos: Diâmetro inferior a 20 Å.

Em geral, todos os materiais microporosos são adsorventes, dentre eles pode-se destacar as zeólitas sintéticas, carvões ativados, vidros porosos, alguns tipos de gel de sílica e até mesmo certos materiais estratificados, nos quais os espaços interlamelares agem como microporos em processos adsortivos. Então em consonância com esta conformação estrutural aliada a outras propriedades físicas, tais como o volume dos poros e a geometria de distribuição e dimensão dos poros na superfície, há a determinação da característica adsortiva do material, estudos mais apurados são encontrados em Young e Crowell (1962), Ruthven (1984) e Yang (1987).

Uma única equação de estado, denominada isoterma de adsorção, pode descrever o equilíbrio termodinâmico de um dado par adsorvente/adsorvato, onde esta é função da temperatura, pressão e da razão entre a massa adsorvida e a massa de adsorvente utilizada no sistema (denominada de concentração da fase adsorvida). Vários tipos de modelos são encontrados na literatura, os mais utilizados são descritos com extrema simplicidade em Leite (1996). Dentre elas, destaca-se a teoria do potencial de adsorção, baseada na teoria de Polanyi do final da década de 20, e desenvolvida em Dubinin e Astakhov (1971) e Dubinin e Stoeckli (1980), a qual se trata de uma abordagem puramente termodinâmica que se adapta com extrema afinidade a adsorção em materiais microporosos. Com base neste modelo, Dubinin e Astakhov op. cit., desenvolveram uma equação de estado, posteriormente averiguada por Passos (1986), onde em função da temperatura do leito poroso e da pressão em que se encontra o adsorvato gasoso é expressa a concentração do adsorvato retido no adsorvente, na forma abaixo:

$$X = W_0 \cdot \rho_1(T) \cdot \exp\{(-D) \cdot [T \cdot (\ln(P_s / P))]^N\} \quad (11)$$

O teor de adsorvato retido no adsorvente é dado pela relação entre a massa adsorvida e a massa do adsorvente na forma:

$$\chi = \frac{Ma}{Ms} \quad (12)$$

O dimensionamento de um sistema de refrigeração passa por diversas etapas, dentre elas está o cálculo da quantidade de reagentes necessária e adequada à aplicação, para isso, torna-se primordial o auxílio do diagrama de isósteras (Figura 2), como foi obtido por Khelifa apud Klüppel e Gurgel op cit., através de dados experimentais.

O fator teórico preponderante para escolha de um composto adsorvente a ser utilizado em refrigeração, é que ele se apresente sob uma forma porosa, finamente dividida, oferecendo assim uma elevada superfície específica, e como consequência disso apresente uma grande capacidade de adsorção em temperaturas próximas as do ambiente sob uma pressão que possibilite a evaporação do fluido refrigerante a uma temperatura compatível com a da refrigeração.

Contudo, deve apresentar à temperatura de reativação, baixa capacidade adsortiva sob uma pressão correspondente a de condensação do fluido à temperatura ambiente. A temperatura alcançada no evaporador, o chamado efeito frigorífico, depende da capacidade de adsorção do leito poroso a baixas pressões e da quantidade de adsorvato contida no evaporador.

As baixas pressões no adsorvente podem ocasionar a retenção de vapores de um fluido a uma temperatura muito inferior a deste, o que acontece quando se usa água e metanol como adsorvato, influenciando de forma decisiva na temperatura de dessorção, pois durante o processo de adsorção o reator se resfria. A continuidade desse efeito tem seu limite máximo quando o adsorvato atinge o ponto triplo. Devido a esses fatores, a utilização de alguns pares frigorígenos é inviável para o nosso propósito.

Uma propriedade fundamental na escolha do adsorvato é seu alto calor latente de vaporização, como também a temperatura que se deseja atingir no evaporador em conformidade com o tamanho de suas moléculas.

Sendo assim, há uma dependência de adequação adsorvente e adsorvato para o domínio de temperaturas a ser fixado. Como a faixa de temperatura pretendida é muito baixa, alguns desses pares são descartados devido à própria limitação térmica. Façamos a análise de alguns adsorventes e adsorvatos:

- Zeólita/metanol: Em temperaturas em torno de 100° C, a zeólita catalisa a dissociação do metanol em água e éter dimetílico, provocando um bloqueio no processo de adsorção, segundo o relatado em Pons e Guilleminot (1986);

- Sílica-gel/Água: A utilização desse par é restringida quando se deseja atingir temperaturas baixas com o objetivo de produzir gelo, devido ao alto ponto de congelamento da água, que quando atingido proporcionará a formação de uma película de gelo na parte superior do evaporador, dificultando assim o processo de evaporação, devido a grandes resistências a transferência de massa que ocorrem em processos de sublimação, conforme estudos publicados em diversos trabalhos de Gurgel e Klüppel (1986, 1987, 1988, 1992); Yanagi *et al.* (1992); Dous *et al.* (1988), Jurinak *et al.* (1984); Jung *et al.* (1985). A limitação descrita acima, se estende a todos os pares frigorígenos que apresentam a água como adsorvato, como a zeólita/água;

- Amônia: Apesar de possuir um baixo ponto de congelamento, em torno de - 33°C, pressões extremamente elevadas na dessorção permitem que o sistema trabalhe com pressões positivas, de forma que um micro vazamento não afetaria a continuidade dos processos termodinâmicos, entretanto essas pressões podem ocasionar problemas técnicos, como vazamentos, e em decorrência disso, devido a sua alta toxicidade, constitui um fator de risco, e ainda apresenta baixos rendimentos em ciclos de adsorção, sendo mais utilizada em ciclos de absorção com água, características estas relatadas em Bougard e Veronikis apud Leite op cit.;

- Carvão Ativado/Metanol: O efeito catalisador do carvão na dissociação do metanol ocorre a 150°C, temperatura satisfatória levando-se em consideração o objetivo almejado. O metanol apresenta um ponto de congelamento em torno de - 94°C, entalpia de vaporização considerável, molécula de tamanho ideal para ciclos de adsorção em leitos microporosos e impõe baixas pressões ao sistema. Diversos resultados experimentais de ciclos de adsorção, com a utilização do par abordado, são encontrados em Pons e Guilleminot op. cit., Passos e Escobedo (1989); Boubakri *et al.* (1992); Delgado *et al.* (1982); Grenier e Pons (1983, 1987); Mhiri e Golli (1996); Leite op cit.;

Ao analisar os requisitos necessários à formação de um par frigorígeno adequado a nossa situação, diante do relatado acima, vê-se as limitações físicas de alguns adsorventes e adsorvatos, conseqüentemente seguindo a mesma linha de raciocínio conclui-se que o par compatível ao projeto objetado é o dueto carvão ativado/metanol.

### 3. Princípio de Funcionamento de um Sistema de Refrigeração Adsorativo

Um sistema deste tipo opera em ciclos alternados de adsorção e dessorção, sendo necessário o acoplamento de três trocadores de calor interconectados, os quais são:

- Reator (receptor da energia proveniente da fonte térmica);
- Condensador;
- Evaporador.

A Figura 2 apresenta a descrição do funcionamento do sistema

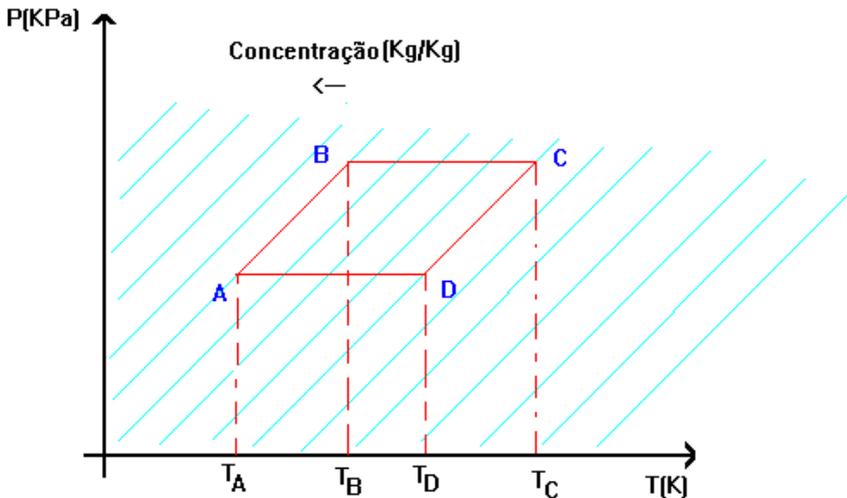


Figura 2 - Diagrama de isósteras para um par frigorígeno qualquer mostrando um ciclo de refrigeração a adsorção sólida (Espínola Jr. op cit.).

A partir da energia térmica fornecida, a temperatura do leito adsorvente se eleva (AB) no reator até que a pressão do reator se iguale a pressão de vapor saturante correspondente à temperatura do condensador, então a dessorção e a condensação têm início (BC), liberando calor para o ambiente com isso o incremento de energia fornecida servirá para que o adsorvato seja dessorvido, estando assim livre para fluir ao condensador. Este processo ocorre até que o adsorvente atinja sua temperatura máxima (que depende da fonte térmica), o que corresponde ao valor de concentração mínima atingida pelo adsorvato no leito poroso. A temperatura do leito adsorvente diminui (CD), a pressão no reator decresce até que se iguale a pressão do vapor saturante correspondente à temperatura do evaporador. Nesse instante, inicia-se a evaporação do adsorvato (DA), ocorrendo então a produção do efeito frigorífico no evaporador e a adsorção do fluido vaporizado com a liberação de calor para o ambiente, cessando esta quando o leito poroso atinge sua temperatura mínima, que corresponde ao ponto de concentração máxima de adsorvato no adsorvente.

# CAPÍTULO II

## *Sistema de Refrigeração Adsorativo*

### 1. O Sistema

Em regiões afastadas nas quais não existe o acesso a rede elétrica convencional, a utilização de motores estacionários de combustão interna como meio de produção de energia elétrica, através do acoplamento a estes de geradores, é bastante difundida. Entretanto, a energia térmica gerada no processo não é totalmente aproveitada, o que encoraja a ideia de utilização dos rejeitos térmicos (gases de escape) como fonte de calor para um sistema de refrigeração. O sistema escolhido no corrente estudo de caracterização foi o de refrigeração a adsorção sólida, devido a sua simplicidade (poucas partes móveis e baixo custo). A descrição do modelo de motor utilizado como referência para este fim encontra-se com detalhes no Anexo II.

### 2. Descrição do Sistema

#### 2.1. O Reator

O reator idealizado é composto por um leito poroso de carvão ativado, o qual é atravessado por uma estrutura multitubular (Figura 3), considerada disposta de forma que no interior do leito o espaço entre os dutos seja suficientemente pequeno permitindo assim que a distribuição de temperatura seja uniforme.

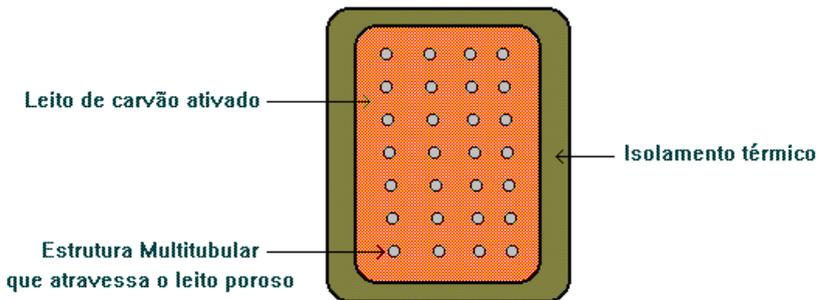


Figura 3 - Esquema do reator (Espínola Jr. op cit.).

## 2.2. O Condensador

O condensador considerado é composto por tubos de cobre espaçados entre si (Figura 4) e com área de condensação a ser determinada. A simulação realizada considera diversas situações nas quais a variação do coeficiente de convecção determina a eficiência do resfriamento e conseqüentemente o fluido exterior de trabalho. No intuito de auxiliar no armazenamento do fluido condensado, vê-se a necessidade de se acoplar um reservatório ao condensador. Para que o escoamento do fluido para o reservatório seja satisfatório torna-se necessário uma pequena inclinação nesse trocador de calor, facilitando assim a operação.

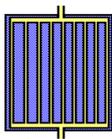


Figura 4 - Esquema do condensador (Espínola Jr. op cit.).

## 2.3. O Evaporador

No processo de simulação adotado, a massa metálica do evaporador é desprezada, pois o interesse repousa na determinação de uma massa de metanol suficiente à produção de gelo no sistema. A cada ciclo é introduzida no evaporador uma determinada massa de água a temperatura ambiente e retirada a massa de gelo formada no final de cada ciclo. A distribuição do adsorvato (Figura 5) e da água no interior do evaporador é realizada de maneira que a área da superfície de contato da chapa metálica que separa os dois líquidos seja a maior possível. O evaporador é considerado coberto por uma camada de isolante térmico de boa eficiência, logo as perdas de calor para o ambiente são pequenas, entretanto não podem ser ignoradas.

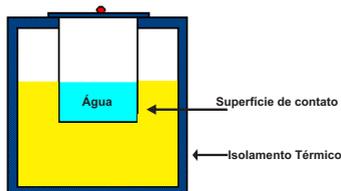


Figura 5 - Esquema do evaporador (Espínola Jr. op cit.).

# CAPÍTULO III

## *Idealização de Modelo Matemático*

### **1. Considerações Iniciais**

Para simular a transferência de calor e massa em um sistema de refrigeração por adsorção sólida, com o par carvão ativado/metanol, foi elaborado um modelo matemático que tendo as condições iniciais conhecidas, simula o comportamento do sistema, calculando pressão, temperatura, concentração em função de tempo em cada componente do mesmo, seguindo a sequência:

- Reator;
- Condensador;
- Evaporador;

Na elaboração desse modelo são consideradas algumas hipóteses, as quais introduzem certas simplificações que tornam possível a simulação, as quais são respaldadas em dados experimentais obtidos por Guilleminot *et al.* (op cit.), não indo de encontro aos conceitos termodinâmicos estabelecidos.

### **2. Hipóteses**

As simplificações adotadas são:

- Os processos de adsorção e dessorção são considerados quase – estáticos;
- A pressão é uniforme em qualquer ponto do leito adsorativo para cada instante de tempo, variando entre a pressão inicial e a pressão de condensação do adsorvato, o que corresponde a desprezar as resistências internas a difusão de massa no leito poroso.

O modelo de adsorção adotado no presente trabalho despreza a resistência à transferência de massa no interior do adsorvente, considerando o equilíbrio instantâneo entre as fases adsorvidas e gasosas, baseado em Dubinin e Erashko (1975), no modelo de difusão cristalina de Sakoda e Suzuki (1984), nas experiências relatadas em Kariogas e Meunier (1986) e no postulado no qual a queda de pressão no mesmo deve ser ignorada (GUILLEMINOT *et al.*, op. cit.);

- A distribuição de temperatura no adsorvente é considerada uniforme a cada instante de tempo;

- O leito adsortivo, em presença de vapor do adsorvato, é tratado como um sólido contínuo e homogêneo;

- A distribuição da temperatura no leito entre os dutos que atravessam o leito poroso, aquecendo-o ou resfriando-o, é uniforme devido à pequena espessura do leito (LEITE op cit.).

### 3. Equacionamento

O sistema de equações estabelecido é resolvido usando-se o método de diferenças finitas, com a formulação matemática totalmente explícita. As temperaturas e pressões calculadas são corrigidas a cada incremento de tempo. Existe uma cautela no que tange a estabilidade do sistema, então devido ao tratamento matemático empregado os intervalos de tempo são pequenos.

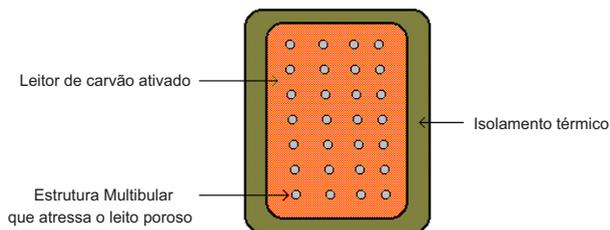


Figura 6 - Esquema do reator (Espínola Jr. op cit.).

### 3.1. Modelo para o Reator

Como o reator é composto de um grande número de dutos, conforme Figura 6, e o adsorvente fica compactado entre esses, consideraremos como simplificação para modelagem, um esquema composto por uma placa de área igual a de todos os dutos em contato com o leito poroso, o qual possui massa igual a do reator, conforme Figura 7. No caso estudado, a aplicação das equações de conservação de energia e massa ao referido trocador de calor dá-se em duas etapas, as quais são:

- Análise do processo ocorrido no leito adsorativo;
- Análise do processo ocorrido no duto.

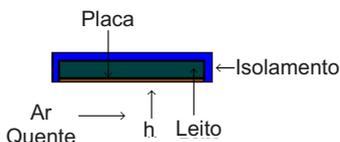


Figura 7 - Esquema do reator com um único tubo (Espínola Jr. op cit.).

#### 3.1.1. Placa (correspondente aos dutos)

A transferência de calor convectivo de insuflamento do ar quente ou frio para o leito poroso é controlado através de um coeficiente térmico de contato na interface metal/adsorvente. Para efeito de análise do parâmetro, realizou-se uma variação de valores do coeficiente, baseados em dados encontrados na literatura, com o objetivo de avaliar a sua influência no desempenho do sistema.

$$M_D \cdot C_{Pb} \cdot \frac{\partial T_D}{\partial t} \Big|_{Duto} = H_{CDUT} \cdot A_{CD} \cdot (T_L - T_D) + H_G \cdot A_{GD} \cdot (T_G - T_D) \quad (13)$$

Discretizando (13), temos:

$$M_D \cdot C_{Pb} \cdot \left( \frac{T_D^{t+\Delta t} - T_D^t}{\Delta t} \right) = H_{CDUT} \cdot A_{CD} \cdot (T_L - T_D^t) + H_G \cdot A_{GD} \cdot (T_G - T_D^t) \quad (14)$$

### 3.1.2 Leito Poroso

O calor entregue pela placa provoca o aquecimento do leito. Como esse se encontra em presença do adsorvato adsorvido, é considerado um termo fonte ( $Q_s$ ). Como condição limite, considera-se o leito isolado em sua outra extremidade, o que corresponde à simetria no caso do reator tubular.

$$M_L \cdot C_{P_L} \cdot \left. \frac{\partial T_L}{\partial t} \right|_{Leito} = Q_s + H_{CDUT} \cdot A_{CD} \cdot (T_D - T_L) \quad (15)$$

onde:

$$Q_s = M_s \cdot H_s \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (16)$$

Pela fórmula de Clausius-Clapeyron, temos:

$$\left( \frac{\partial \ln P}{\partial T} \right)_X = - \frac{H_s}{R T^2} \quad (17)$$

Pela equação de Dubinin-Astakhov, tem-se:

$$X = W_0 \cdot \rho_1(T) \cdot \exp \left[ -D \cdot \left( T \cdot \ln \left( \frac{P_s}{P} \right) \right)^N \right] \quad (18)$$

Derivando (18) em relação à temperatura em relação a temperatura do adsorvente, tem-se:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial T} = \frac{\partial \ln P_s}{\partial T} - \ln \left( \frac{P_s}{P} \right) \cdot \left[ \frac{1}{T} + \frac{W_0}{N \cdot D} \cdot \frac{\partial \ln(\rho_1/X)}{\partial T} \cdot \left[ T \cdot \ln \left( \frac{P_s}{P} \right) \right]^{-N} \right] \quad (19)$$

onde:

$$\alpha = W_0 \cdot \frac{\partial \ln \left( \frac{\rho_1}{X} \right)}{\partial T}$$

logo:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial T} = \frac{\partial \ln P_s}{\partial T} - \ln \left( \frac{P_s}{P} \right) \cdot \left[ \frac{1}{T} + \frac{\alpha}{N \cdot D} \cdot \left( T \cdot \ln \left( \frac{P_s}{P} \right) \right)^{-N} \right] \quad (20)$$

Substituindo (17) em (20) tem-se:

$$-\frac{H_s}{R \cdot T^2} = \frac{\partial \text{Ln} P_s}{\partial T} - \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) \cdot \left[ \frac{1}{T} + \frac{\alpha}{N \cdot D} \left( T \cdot \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) \right)^{-N} \right] \quad (21)$$

Resolvendo (21), tem-se:

$$H_s = -\frac{\partial \text{Ln} P_s}{\partial T} \cdot R \cdot T^2 - (R \cdot T^2) \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) \cdot \left[ \frac{1}{T} + \frac{\alpha}{N \cdot D} \left( T \cdot \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) \right)^{-N} \right] \quad (22)$$

onde:

$$L = -R \cdot T^2 \cdot \left( \frac{\partial \text{Ln} P_s}{\partial T} \right)_X \quad (23)$$

logo:

$$H_s = L + R \cdot T \cdot \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) + \left( \frac{\alpha}{N \cdot D} \right) \cdot \left[ T \cdot \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) \right]^{1-N} \quad (24)$$

Então, obtém-se a entalpia de sorção em função da pressão e temperatura no adsorvente.

Diferenciando-se (18) em relação a T e Ln P, tem-se:

$$dX = \left( \frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\text{Ln} P} \cdot dT + \left( \frac{\partial X}{\partial \text{Ln} P} \right)_T \cdot d \text{Ln} P \quad (25)$$

onde:

$$\left( \frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\text{Ln} P} = X \cdot N \cdot (-D) \cdot \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) \right]^{N-1} \cdot T^N \cdot \left( -\frac{\partial \text{Ln} P}{\partial T} \right) \quad (26)$$

Substituindo (17) em (26), tem-se:

$$\left( \frac{\partial X}{\partial T} \right)_{\text{Ln} P} = -X \cdot N \cdot \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P} \right) \right]^{N-1} \cdot D \cdot T^N \cdot \frac{H_s}{R \cdot T^2} \quad (27)$$

Analogamente, tem-se:

$$\left(\frac{\partial X}{\partial \ln P}\right)_T = X \cdot N \cdot D \cdot T^N \cdot \left[\ln\left(\frac{P_s}{P}\right)\right]^{N-1} \quad (28)$$

Substituindo (27) e (28) em (25), tem-se:

$$dX = X \cdot N \cdot D \cdot T^N \cdot \left[\ln\left(\frac{P_s}{P}\right)\right]^{N-1} \cdot \left[ d\ln P - \frac{H_s}{R \cdot T^2} \cdot dT \right] \quad (29)$$

Então, tem-se:

$$\left(\frac{\partial X}{\partial T}\right) = X \cdot N \cdot D \cdot T^N \cdot \left[\ln\left(\frac{P_s}{P}\right)\right]^{N-1} \cdot \left[ \frac{\partial \ln P}{\partial t} - \frac{H_s}{R \cdot T^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (30)$$

Discretizando (15) tem-se:

$$M_L \cdot C_{P_L} \cdot \left(\frac{T_L^{t+\Delta t} - T_L^t}{\Delta t}\right) = M_S \cdot H_s \cdot X \cdot N \cdot D \cdot (T^t)^N \cdot \left[\ln\left(\frac{P_s}{P}\right)\right]^{N-1} \cdot \left[ \left(\frac{\ln P^{t+\Delta t} - \ln P^t}{\Delta t}\right) - \frac{H_s}{R \cdot (T^t)^2} \cdot \left(\frac{T_L^{t+\Delta t} - T_L^t}{\Delta t}\right) \right] + H_{CDUT} \cdot A_{CD} \cdot (T_D - T_L^t) \quad (31)$$

Devido ao tipo de formulação usada, a pressão e temperatura durante os processos a concentração constante, são calculados através de um procedimento iterativo usando-se a equação de Dubinin (18) como recorrência, afim de que se estabeleça um critério de convergência. Desta forma, a pressão final no leito poroso é o resultado entre o valor estimado e calculado através de um algoritmo.

As temperaturas no leito adsortivo são corrigidas a cada incremento de tempo.

A convergência da solução será obtida com a utilização de um critério de convergência pré - estabelecido, da seguinte forma:

$$\left| \frac{\phi_P^{K+1} - \phi_P^K}{\phi_P^K} \right| \leq \varepsilon, \text{ onde } \varepsilon \text{ é o erro relativo.}$$

### 3.2. Modelo para o Condensador

$$M_{\text{Cond}} \cdot C_{\text{PCond}} \cdot \left. \frac{\partial T_{\text{Cond}}}{\partial t} \right|_{\text{Condensador}} = \frac{\partial m}{\partial t} \cdot L_{\text{LV}} + H_{\text{Cond}} \cdot A_{\text{CAG}} \cdot (T_{\text{AG}} - T_{\text{Cond}}) \quad (32)$$

Discretizando (32) tem-se:

$$M_{\text{Cond}} \cdot C_{\text{PCond}} \cdot \left( \frac{T_{\text{Cond}}^{i+\Delta t} - T_{\text{Cond}}^i}{\Delta t} \right) = \left( \frac{m^{i+\Delta t} - m^i}{\Delta t} \right) \cdot L_{\text{LV}} + H_{\text{Cond}} \cdot A_{\text{CAG}} \cdot (T_{\text{AG}} - T_{\text{Cond}}^i) \quad (33)$$

A temperatura da água é considerada constante.

### 3.3. Modelo para o Evaporador

No caso do evaporador são realizados dois balanços de energia, onde se considera a variações de energia interna do adsorvato e da água respectivamente, nos quais é desprezada a massa metálica do evaporador.

#### 3.3.1. Metanol

$$M_{\text{M}} \cdot C_{\text{PM}} \cdot \left. \frac{\partial T_{\text{M}}}{\partial t} \right|_{\text{Metanol}} = \frac{\partial m}{\partial t} \cdot L_{\text{LV}} + U_{\text{MAG}} \cdot A_{\text{MAG}} \cdot (T_{\text{AG}} - T_{\text{M}}) + U_{\text{MAMB}} \cdot A_{\text{MAMB}} \cdot (T_{\text{AMB}} - T_{\text{M}}) \quad (34)$$

Discretizando (34) tem-se:

$$M_{\text{M}} \cdot C_{\text{PM}} \cdot \left( \frac{T_{\text{M}}^{i+\Delta t} - T_{\text{M}}^i}{\Delta t} \right) = \left( \frac{m^{i+\Delta t} - m^i}{\Delta t} \right) \cdot L_{\text{LV}} + U_{\text{MAG}} \cdot A_{\text{MAG}} \cdot (T_{\text{AG}}^i - T_{\text{M}}^i) + U_{\text{MAMB}} \cdot A_{\text{MAMB}} \cdot (T_{\text{AMB}} - T_{\text{M}}^i) \quad (35)$$

### 3.3.2 Água

$$M_{Ag} \cdot C_{P_{Ag}} \cdot \left. \frac{\partial T_{Ag}}{\partial t} \right|_{Agua} = U_{MAg} \cdot A_{MAg} \cdot (T_M - T_{Ag}) + U_{AgAMB} \cdot A_{AgAMB} \cdot (T_{AMB} - T_{Ag}) \quad (36)$$

Discretizando (36), temos:

$$M_{Ag} \cdot C_{P_{Ag}} \cdot \left( \frac{T_{Ag}^{t+\Delta t} - T_{Ag}^t}{\Delta t} \right) = U_{MAg} \cdot A_{MAg} \cdot (T_M^{t+\Delta t} - T_{Ag}^t) + U_{AgAMB} \cdot A_{AgAMB} \cdot (T_{AMB} - T_{Ag}^t) \quad (37)$$

Enquanto a temperatura da água se mantiver acima do ponto triplo, a massa de gelo formada é igual à zero. Quando esta temperatura atingir esse limite, então se inicia a formação de gelo em camadas no evaporador.

Logo, tem-se:

$$L_S \cdot \left. \frac{\partial m_G}{\partial t} \right|_{Gelo} = U_S \cdot A_{MAg} \cdot (T_M - T_{Ag}) \quad (38)$$

Discretizando (38) tem-se:

$$L_S \cdot \left( \frac{m_g^{t+\Delta t} - m_g^t}{\Delta t} \right) = U_S \cdot A_{MAg} \cdot (T_M^{t+\Delta t} - T_{Ag}^{t+\Delta t}) \quad (39)$$

# CAPÍTULO IV

## *Caracterização do Sistema*

### **1 Considerações Iniciais**

A caracterização de um sistema de refrigeração consiste na análise dos diversos parâmetros e características peculiares a cada componente do sistema, bem como a análise do desempenho global. Para isso, no presente trabalho são realizadas simulações para três tipos de situações, as quais são determinadas pela temperatura máxima alcançada pelo reator. Desta forma, tem-se:

$$- T_{LEITO_{max}} = 373,15 \text{ K};$$

$$- T_{LEITO_{max}} = 405,15 \text{ K};$$

$$- T_{LEITO_{max}} = 418,15 \text{ K}.$$

Isso se torna possível, devido ao fato de utilizarmos como fonte térmica, a temperatura de escape de um motor estacionário à combustão interna, pois conforme Santos et al. (1987), a temperatura média do gás de escape, do motor tomado como referência, medida a 0,10 metros do respectivo cabeçote é de 743,15 K, sendo assim, existe uma vasta faixa de temperaturas que pode ser explorada para a regeneração do sistema.

Na simulação realizada alguns parâmetros são considerados característicos e de fundamental importância, tais como:

- Massa de carvão Ativado: 30 kg;

- Volume de metanol: 8 Litros;

- Massa de água a ser congelada: 13 kg;

- Área de captação de energia térmica: 1,5 m<sup>2</sup>;

- Concentração inicial de adsorvato no leito poroso: 0,15 kg kg<sup>-1</sup>;

- Área do evaporador: 2,2 m<sup>2</sup>.

A temperatura inicial do sistema é determinada pela pressão do evaporador e concentração inicial de adsorvato no leito poroso. Então para uma pressão do evaporador correspondente a uma temperatura do mesmo de 273,15 K e concentração inicial de adsorvato no leito poroso de 0,15 kg kg<sup>-1</sup>, temos uma temperatura inicial no reator igual a 317,15 K.

Durante as simulações, foi verificado que a área do evaporador determina a espessura do gelo formado no processo de evaporação, e por conseguinte, tem influência na quantidade de gelo formada.

## 2 Análise termodinâmica

Os ciclos termodinâmicos são delineados de acordo com a temperatura máxima do leito poroso alcançada por cada sistema simulado. Em todos os modelos simulados, a temperatura correspondente a pressão de início de operação do condensador é igual a 308,15 K. Na Figura 8, verifica-se o ciclo correspondente a temperatura máxima do leito igual a 373,15 K. Na mesma figura, verifica-se uma queda brusca de pressão no reator, no início do processo de adsorção, controlada pela taxa de resfriamento do mesmo.

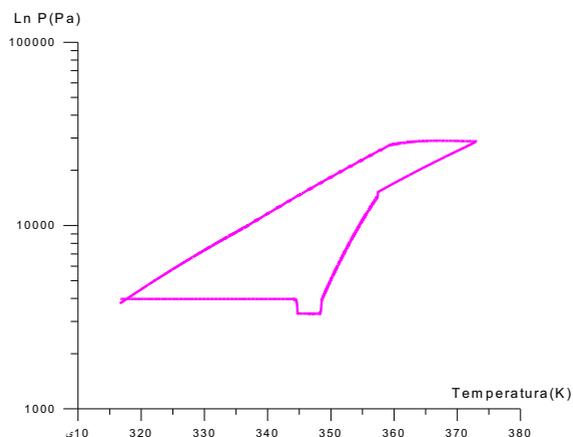


Figura 8 - Ciclo termodinâmico representativo para uma temperatura máxima do leito poroso igual a 373,15 K (Espínola Jr. op.).

As temperaturas do evaporador e da água podem ser acompanhadas através da Figura 9, onde é averiguado que após atingirem o equilíbrio térmico, alcançam temperaturas muito próximas.

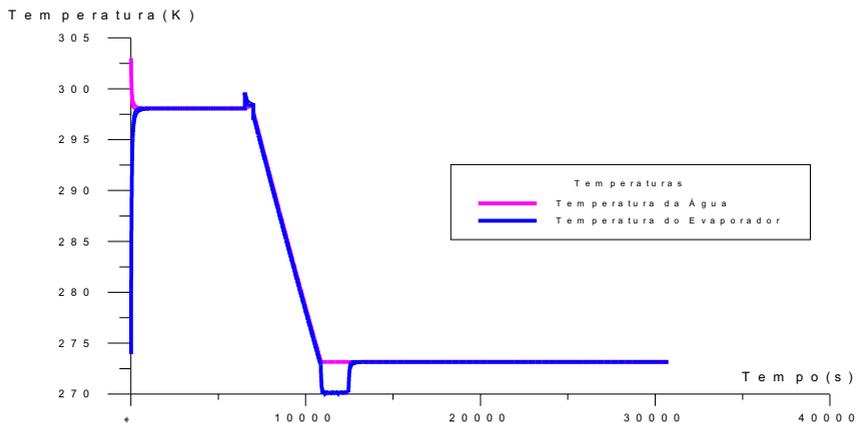


Figura 9 - Variação das temperaturas do evaporador e da água a ser congelada no tempo (Espínola Jr. op cit.).

A massa de gelo formada pelo processo descrito na Figura 8 é mostrada na Figura 10, onde se observa que a medida que vai aumentando a espessura (Figura 11) da película de gelo no evaporador vai também diminuindo a velocidade de formação do mesmo.

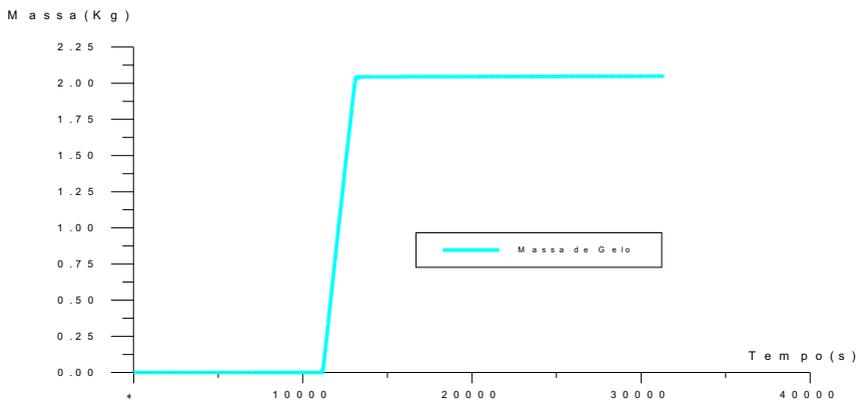


Figura 10 - Massa de gelo formada no tempo (Espínola Jr. op cit.).

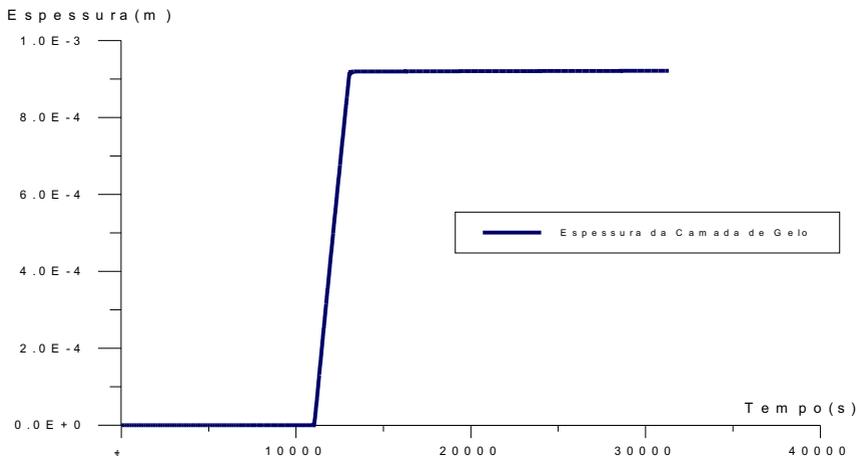


Figura 11 - Espessura da camada de gelo formada no tempo, no interior do evaporador (Espínola Jr. op cit.).

Na Figura 12 é descrito o ciclo termodinâmico para uma temperatura máxima do leito poroso igual a 405,15 K, no qual se verifica maior quantidade de metanol condensada, com relação a Figura 8, maior taxa de resfriamento do leito e conseqüente queda gradual de pressão.

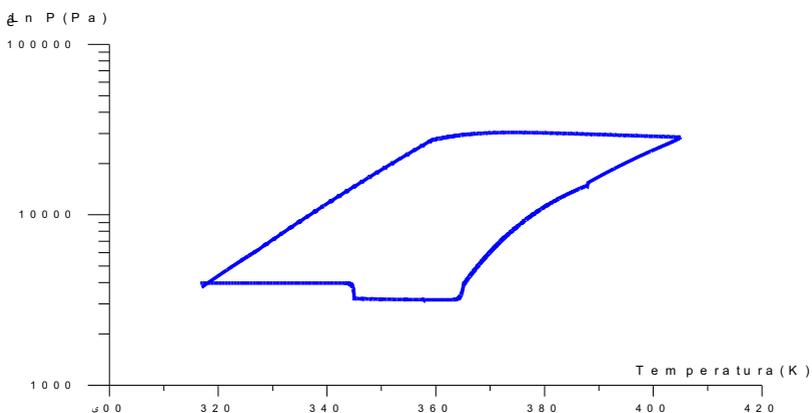


Figura 12 - Ciclo termodinâmico representativo para uma temperatura máxima do leito poroso igual a 405,15 K (Espínola Jr. op cit.).

Na Figura 13 foi verificado que, o evaporador alcança temperaturas abaixo do ponto triplo da água por um período de tempo mais longo, proporcionando assim um aumento da massa de gelo (Figura 14) apesar do aumento da espessura da película de gelo formada (Figura 15). Isso acontece em decorrência dos processos verificados no ciclo da Figura 12.

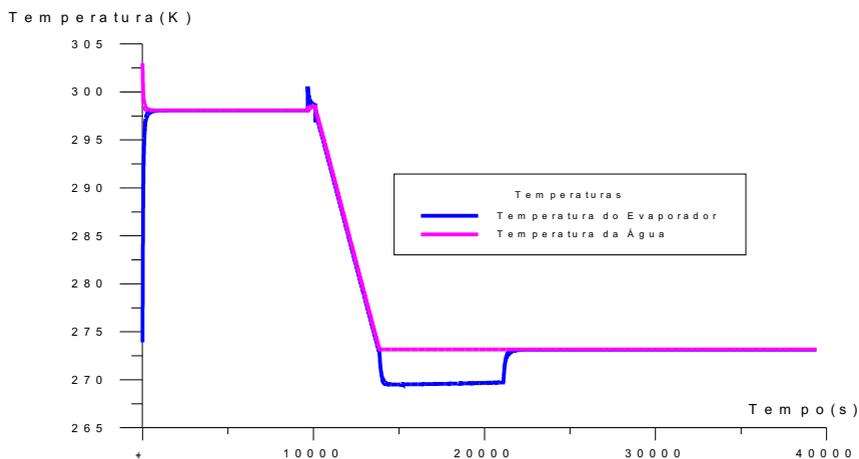


Figura 13 - Variação das temperaturas do evaporador e da água a ser congelada no tempo (Espínola Jr. op cit.).

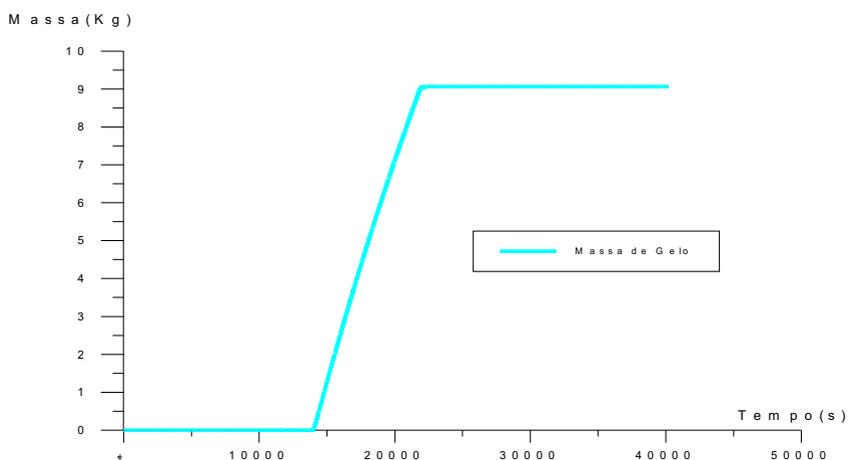


Figura 14 - Massa de gelo formada no tempo (Espínola Jr. op cit.).

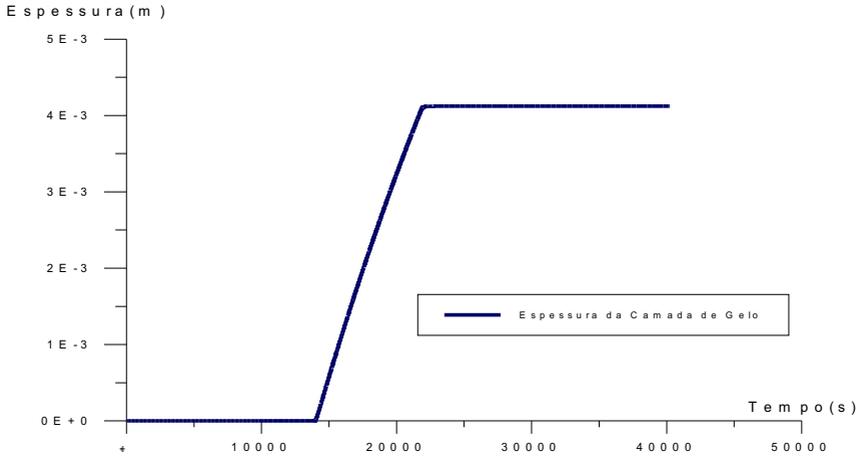


Figura 15 - Espessura da camada de gelo formada no tempo, no interior do evaporador (Espínola Jr. op cit.).

No ciclo da Figura 16, observa-se que a temperatura máxima alcançada é igual a 418,15 K. Consequentemente, a massa de metanol condensada é maior que nos ciclos anteriores. Logo, o evaporador atinge temperaturas abaixo do ponto triplo da água por período mais longo que os ciclos anteriores (Figura 17), ocasionando a formação de uma massa de gelo maior (Figura 18), em contraposto ao aumento da espessura da película de gelo formada (Figura 19).

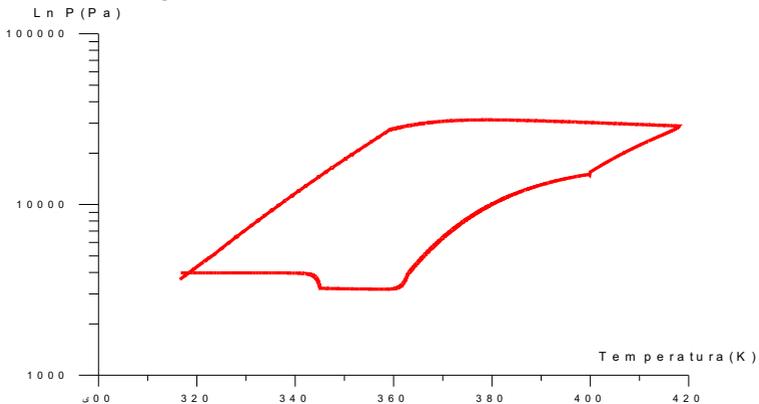


Figura 16 - Ciclo termodinâmico representativo para uma temperatura máxima do leito poroso igual a 418,15 K (Espínola Jr. op cit.).

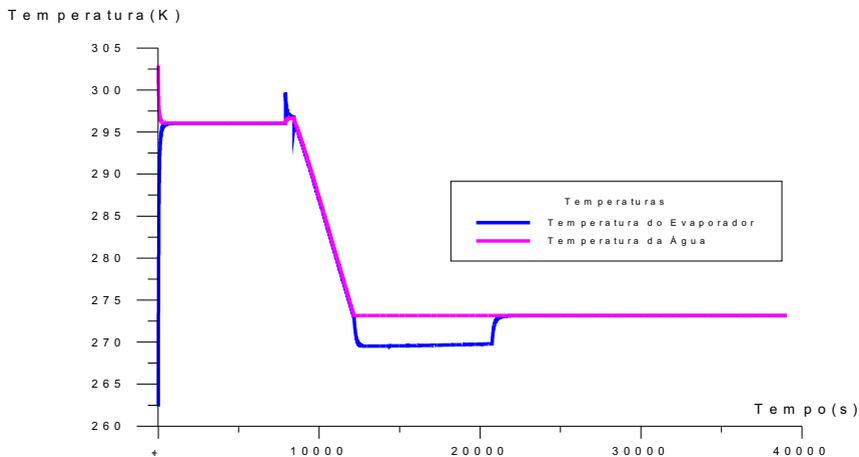


Figura 17 - Variação das temperaturas do evaporador e da água a ser congelada no tempo (Espínola Jr. op cit.).

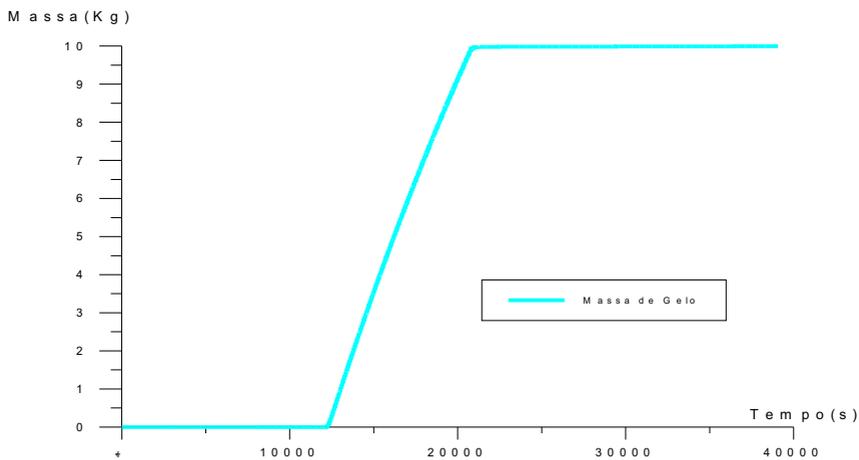


Figura 18 - Massa de gelo formada no tempo (Espínola Jr. op cit.).

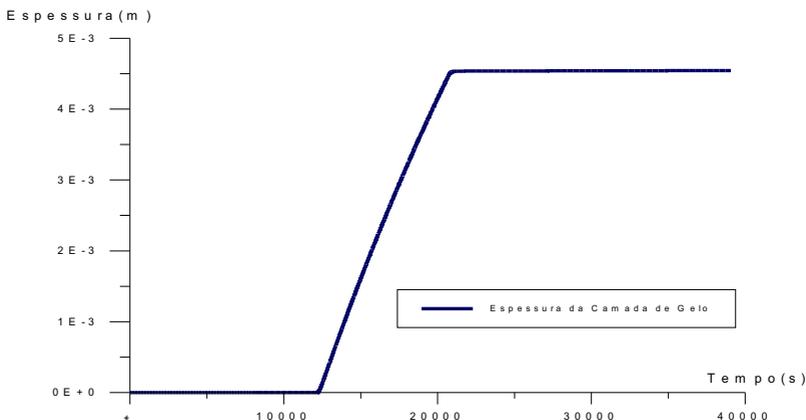


Figura 19 - Espessura da camada de gelo formada no tempo, no interior do evaporador (Espínola Jr. op cit.).

### 3. Análise de parâmetros característicos

A análise desse tipo de parâmetro é realizada, tomando como base um dos sistemas simulados acima. Para tanto, o sistema escolhido foi o que alcançou maior temperatura de regeneração do leito poroso, devido à sua eficiência comprovada anteriormente e sua compatibilidade com o objetivo do trabalho que é o aproveitamento de gases a alta temperatura.

O primeiro parâmetro a ser analisado é o coeficiente convectivo de contato térmico da interface metal/adsorvente. Alguns pesquisadores determinaram através de experimentos, diversos valores para o referido parâmetro. Guilleminot op. cit. e Gurgel op. cit. determinaram os valores distintos para o mesmo, os quais são respectivamente  $16,5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  (Figura 22) e  $6,8 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  (Figura 20). Devido à diversidade de valores encontrados na literatura, analisou-se a influência desse parâmetro no sistema, com a utilização dos valores acima mencionados como também, fazendo uso de valores intermediários, tais como  $12 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  (Figura 21) e  $18 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  (Figura 23).

Como se constata nas figuras mencionadas acima e visualizadas abaixo, o parâmetro analisado determina os tempos de desorção e adsorção do sistema. Nessa análise, a temperatura dos gases é considerada constante.

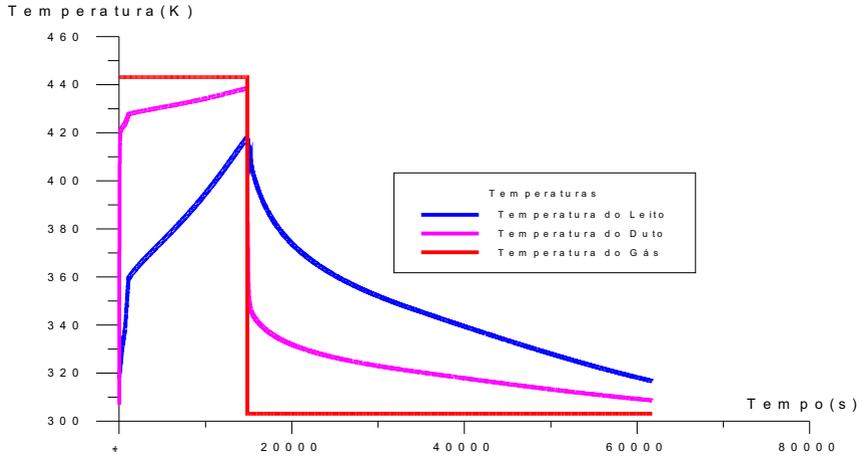


Figura 20 - Temperaturas do sistema simulado com coeficiente de contato térmico entre o leito e o duto de  $6,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (Espínola Jr. op

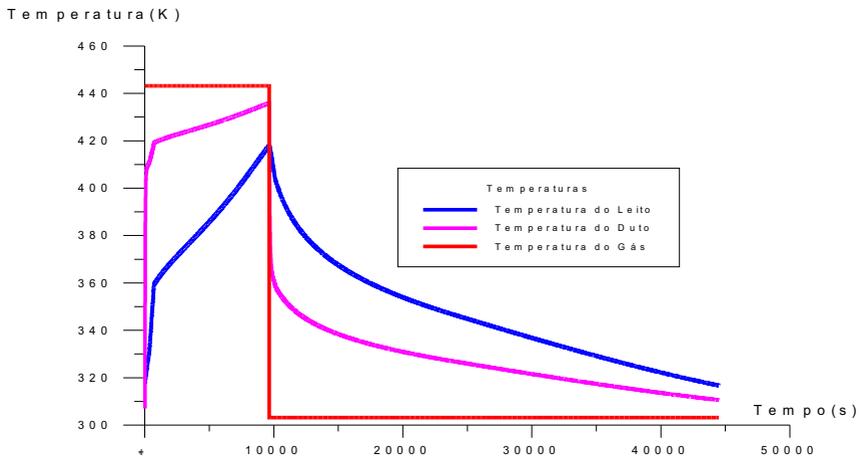


Figura 21 - Temperaturas do sistema simulado com coeficiente de contato térmico entre o leito e o duto de  $12,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (Espínola Jr. op cit.).

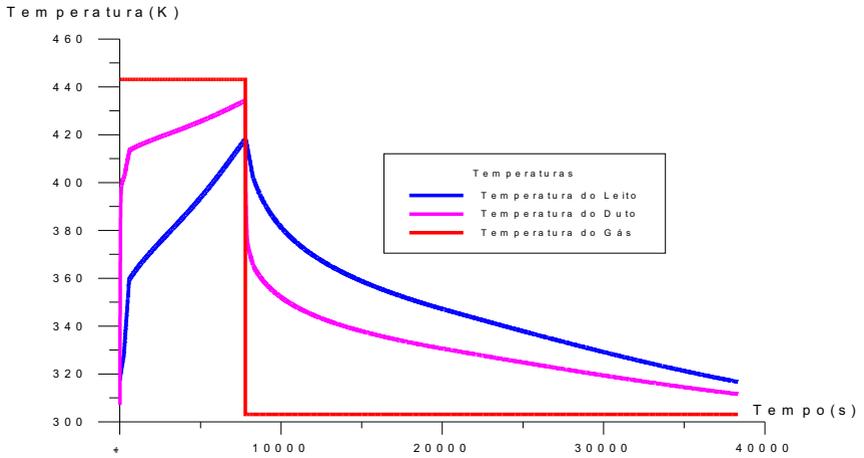


Figura 22 - Temperaturas do sistema simulado com coeficiente de contato térmico entre o leito e o duto de  $16,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (Espínola Jr. op cit.).

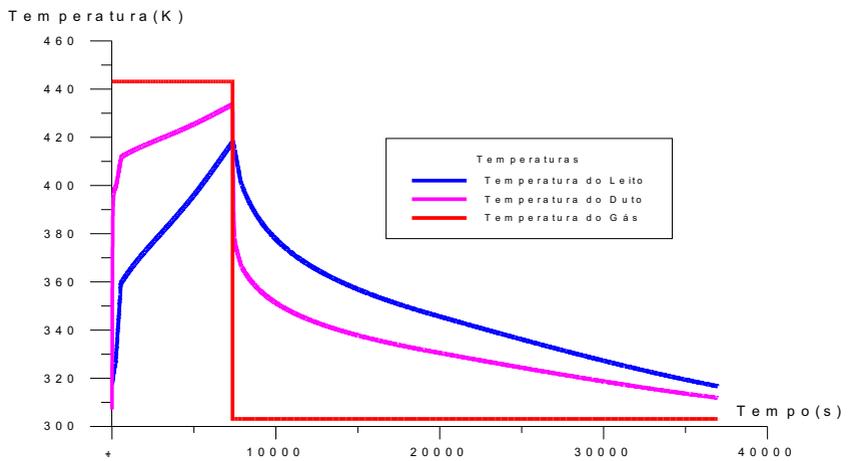


Figura 23 - Temperaturas do sistema simulado com coeficiente de contato térmico entre o leito e o duto de  $18,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (Espínola Jr. op cit.).

O aumento do coeficiente de contato térmico é inversamente proporcional ao tempo gasto nos processos de desorção e adsorção, o que nos leva a concluir que para melhorar o desempenho do sistema podemos utilizar a inserção de esponjas metálicas ou misturas bidispersas no interior do leito, conforme Gurgel (1991),

Outro parâmetro auxiliar analisado nesta caracterização é a temperatura de trabalho do condensador, o que depende do fluido de refrigeração, tipo de resfriamento (natural ou forçado), dimensões geométricas e limitações físicas do sistema, como a temperatura ambiente. Essa temperatura determina a pressão do sistema durante o processo. Para isso, são utilizadas as seguintes temperaturas 308,15 K (Figura 26), 313,15 K (Figura 25) e 318,15 K (Figura 24).

Analisando as curvas obtidas constata-se que o aumento da temperatura do condensador tem influência direta na massa de gelo formada durante o ciclo, pois com isso diminui-se o tempo de condensação e consequentemente o tempo de desorção.

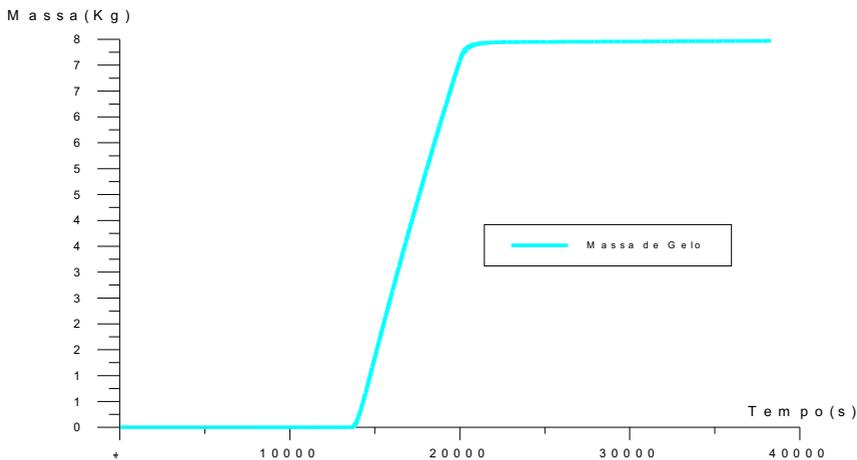


Figura 24 - Massa de gelo formada no tempo, com a temperatura de condensação igual a 318,15 K (Espínola Jr. op cit.).

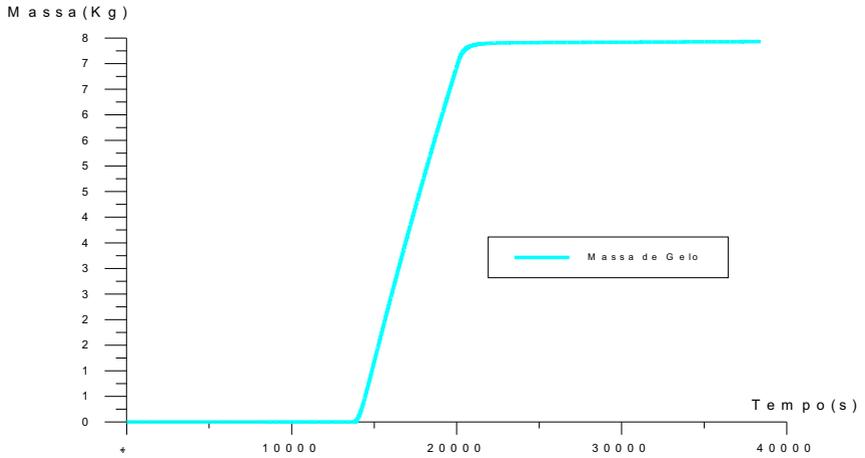


Figura 25 - Massa de gelo formada no tempo, com a temperatura de condensação igual a 313,15 K (Espínola Jr. op cit.).

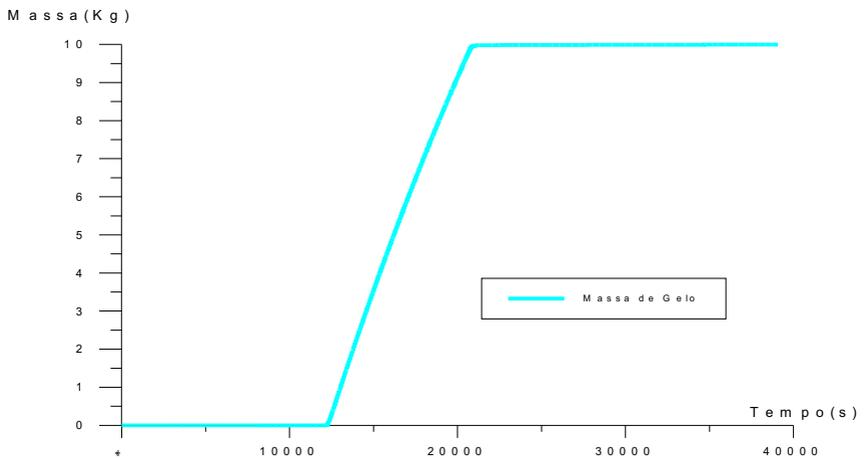


Figura 26 - Massa de gelo formada no tempo, com a temperatura de condensação igual a 308,15 K (Espínola Jr. op cit.).

A modelagem e simulação apresentadas no corrente trabalho permite verificar a influência de diversos parâmetros físicos e condições de funcionamento no sistema, oferecendo requisitos para a caracterização dessas influências, auxiliando assim no dimensionamento de um sistema.

O modelo com as hipótese simplificadoras já apresentou resultados satisfatórios quando confrontado com resultados experimentais. Naturalmente, o trabalho dessa dissertação seria bastante enriquecido com a construção de um protótipo, proporcionando assim medições e o posterior confronto com os resultados simulados.

# CAPÍTULO V

## *Dimensionamento do Sistema de Refrigeração Adsorção*

### **1. Considerações Iniciais**

Considerando a caracterização realizada anteriormente, procede-se o dimensionamento de um sistema de refrigeração idealizado (Figura 27). Para tanto, tornou-se necessário o cálculo do calor que os gases de escape fornecem ao sistema, bem como o calor requerido pelo mesmo.

### **2. Caracterização do Motor de Combustão Interna**

Tomando como referência o motor utilizado em Santos et al. (op. cit.), obtemos o seguintes dados:

- Para uma temperatura média de 743,15 K dos gases de escape do motor, medida a 0,10 metros do respectivo cabeçote, temos 45,28 kW de energia calorífica disponível ao sistema de refrigeração, com o motor trabalhando em regime de 50 % da carga total. Esses ensaios foram realizados em um motor GM - 261 a álcool etílico 96° GL, em dinamômetro segundo a norma NB - 372.

### **3. Cálculos Dimensionais**

Considerando que os gases de escape do motor entre no reator a uma temperatura de 423,15 K e saia a 403,15 K, então temos 1,28 kW de energia útil ao sistema.

Para se aquecer o metanol entre 303,15 K e 423,15 K é necessário o cálculo do calor sensível e do calor latente envolvido no processo. Desta forma, temos:

$$Q_{\text{SENSIVEL}} = M_{\text{CARVAO}} \cdot C_{\text{PCARVAO}} \cdot \Delta T \quad (40)$$

$$Q_{\text{LATENTE}} = M_{\text{METANOL}} L_{\text{LV}} \quad (41)$$

$$W_{\text{REQ}} = \frac{\sum Q_{\text{SENSIVEL}} + Q_{\text{LATENTE}}}{t_{\text{pr}}} \quad (42)$$

onde:

$Q_{\text{SENSIVEL}} \rightarrow$  Calor sensível envolvido no processo (J);

$Q_{\text{LATENTE}} \rightarrow$  Calor latente envolvido no processo (J);

$M_{\text{CARVAO}} \rightarrow$  Massa de carvão ativado (kg);

$C_{\text{PCARVAO}} \rightarrow$  Calor específico a pressão constante do carvão ativado ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$\Delta T \rightarrow$  Diferença entre a temperatura inicial e a temperatura final do sistema (K);

$M_{\text{METANOL}} \rightarrow$  Massa de metanol (kg);

$C_{\text{PMETANOL}} \rightarrow$  Calor específico a pressão constante do metanol ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$W_{\text{REQ}} \rightarrow$  Energia requerida pelo sistema ( $\text{J s}^{-1}$ );

$t_{\text{pr}} \rightarrow$  Tempo de duração do processo de aquecimento (s).

Adotando uma massa de carvão ativado igual a 50 kg e um volume de metanol correspondente a uma massa do mesmo igual a 7,5 kg e concentração de adsorvato no leito poroso igual a 0,15 Kg/kg, para um período de duração do aquecimento do sistema de 4 horas, obtemos a energia que o sistema necessita para a fabricação de 17,8 Kg de gelo (Figura 29) com 20 kg de água colocada no início do ciclo de refrigeração (Figura 28), a qual é igual a 873,35 kW, o que corresponde a 68,23 % da energia útil ao sistema. Apresentando assim um coeficiente de desempenho térmico global igual a 0,7171.

Como se percebe, a energia útil fornecida através dos gases de escape do motor é suficiente para que o sistema dimensionado acima funcione satisfatoriamente.

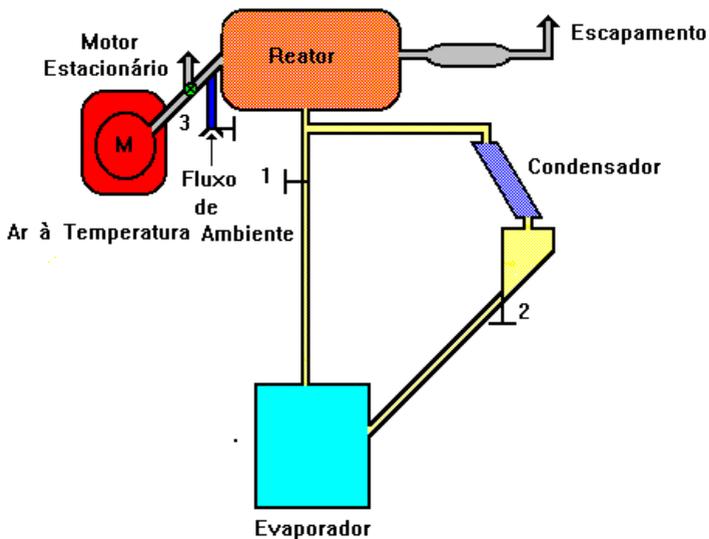


Figura 27 - Esquema do sistema de refrigeração (Espínola Jr. op cit.).

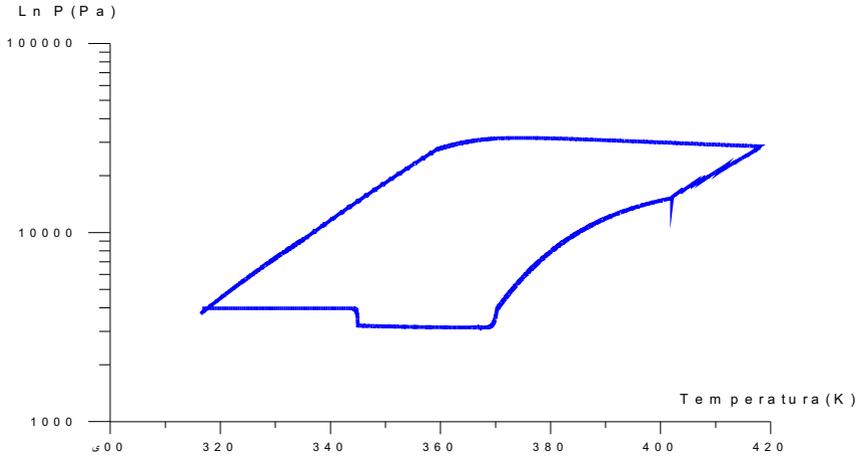


Figura 28 - Ciclo termodinâmico (Espínola Jr. op cit.).

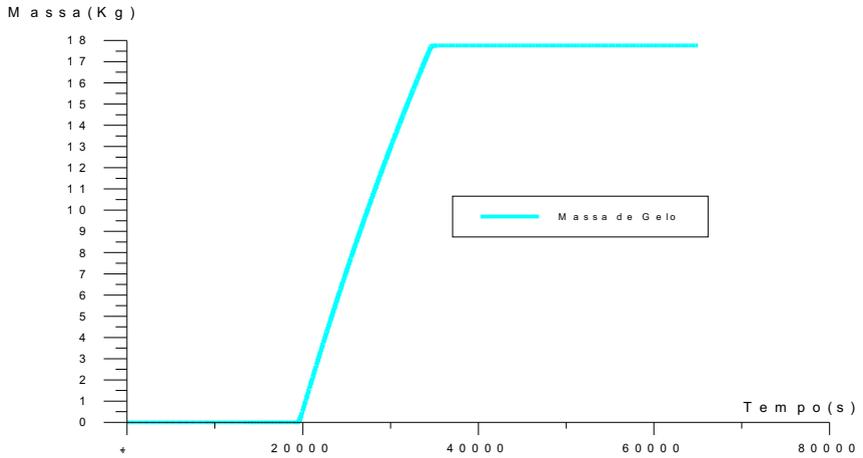


Figura 29 - Massa de gelo formada no tempo (Espínola Jr. op cit.).

#### 4. Considerações Finais

A modelização matemática e simulação numérica de um sistema de refrigeração por adsorção sólida com formação de gelo, usando o par carvão ativado-Metanol, demonstra a viabilidade técnica da construção de protótipos, os quais necessitam de uma implementação física otimizada que aponte na direção da viabilização econômica e posteriormente comercial. A utilização de rejeitos térmicos se consolida em uma alternativa energética de grande persuasão científica, o que ressoa no desenvolvimento de trocadores de calor mais eficientes, desenvolvimento de pares frigorígenos adequados a cada tipo de aplicação e etc. Com o modelo matemático estabelecido foi viabilizada a realização de diversas simulações, tornando possível uma caracterização paramétrica e geométrica.

A disponibilidade energética, é o principal fator impactante na capacidade térmica do sistema adsorativo, pois a partir dessa pode-se dimensionar um sistema com diversos reatores, com a operacionalização intermitente, aumentando assim as possibilidades de ampliação do equipamento pretendido (Figura 30). A análise dos resultados obtidos com a simulação numérica necessitam ainda de uma comparação com dados experimentais oriundos de um protótipo.

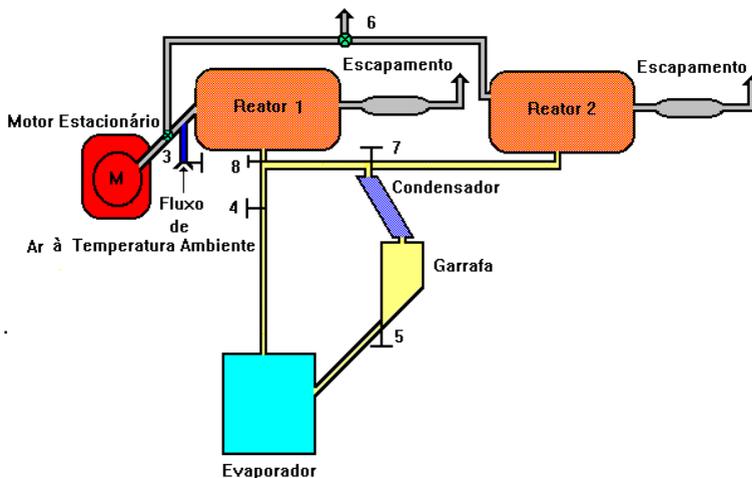


Figura 30 - Sistema com vários reatores acoplados (Espínola Jr. op cit.).

# BIBLIOGRAFIA

ADELL, A. **Refrigeration Solaire à Adsorption Solidé: Choix de Meilleur Couple d'Adsorption.** In: Rev. Phys. Appl. 19, 1984, p. 1005.

ALHUSEIN, A., INAYATULLAH, G. **Système à absorption pour climatiseur d'automobile fonctionnant avec la chaleur d'échappement.** Amman: 2 Congrès International du froid et de la climatisation, 1992.

BOUBAKRI, A. **Détermination des caractéristiques thermodynamiques du couple charbon actif ac-35/méthanol et étude de son application à la réfrigération solaire.** These présenté L'Universite Pierre et Marie Curie - Paris VI, 1985.

BOUBAKRI, A., ARSALANE, M., YOUS, B. et al. **Experimental study of adsorptive solar - powered ice makers in Agadir. Performance in actual site.** Renewable Energy, Vol. 2, N° 2, pp. 7-13, 1992.

BJURSTRON, H., KARAWACKI, E., CARLSON, B. **Thermal Conductivity of a Microporous Particulate Medium: moist Silica-Gel.** Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 27, N 11, 1984.

BOCHARDT, I. G., GOMES, A.F. **Termopares.** 1ª Edição, Porto Alegre: Sagra, 1979.

Castellan, G. **Fundamentos de Físico-Química.** 1ª Edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1986.

COSTA, Y. J. R. **Ensaio de Motores de Combustão Interna.**, Apostila do curso de motores - UFPB, mimeog., Campina Grande – PB, 1983.

DOUS, N., MEUNIER, F., SUN, L. M. **Predictive model and experimental results for a two-adsorber solid adsorption heat pump.** Washington: American Chemical Society, Vol. 27, N 2, pp. 310-316, 1988.

DUBININ, M. M., ASTAKHOV, V. A. **Molecular-Sieve Zeolites-II.** Washington: American Chemical Society, 1971.

DUBININ, M. M., STOECKLI, H. F. **Homogeneous and heterogeneous micropore structures in carbonaceous adsorbents.** Journal of Colloid Interface Sciences, Vol. 75, N1, pp. 34-35, 1980.

ESPÍNOLA JR., J. **Simulação Numérica de um Refrigerador Adsorativo utilizando Gases de Escapamento de um Motor Estacionário.** Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa–PB, 1997.

ESPÍNOLA JR., J. **Caracterização do Conjunto Coletor solar/Anteparo Ótico aplicado a um Sistema de Refrigeração Adsorativo.** Tese de Doutorado 2002.

ESPÍNOLA JR., J., Andrade, M. O. **Simulação da Incidência de Energia Solar em Cidades do Estado de Sergipe.** Anais do VIII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Salvador–BA, 2013.

ESPÍNOLA JR., J. et al. **Adsorção Sólida: Uma Solução Alternativa para Sistemas de Refrigeração.** Anais do VIII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Salvador–BA, 2013.

GUILLEMINOT, J. J., MEUNIER, F., MESCHLER, B. **Étude des Cycles Intermitents à adsorption Solide pour la Refrigeration Solaire.** Revue Physique Appliquée 15, p. 441, 1980.

GUILLEMINOT, J. J., MEUNIER, F, PALESKA, J. **Heat and mass transfer in a non-isothermal fixed bed solid adsorbent reator: a uniform pressure/non-uniform temperature case.** Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol.30, N 8, pp. 1595-1606, 1987.

GURGEL, J. M. **Caracterização de um Sistema de Condicionamento de Ar por Adsorção Sólida em ciclo Aberto Regenerado por Energia Solar.** V Encontro Nacional de Ciências Térmicas-ABCM, São Paulo, 1994.

\_\_\_\_\_ **Contribution à l'étude Experimentale de la Conduktivité Thermique des Mileux Granulares.** Tese de Doutorado apresentada a University Paris VI-LIMSI, França, 1989.

GURGEL, J. M., KLÜPPEL, R. P. **Simulação Numérica de um Sistema de Refrigeração por Adsorção**. IV Encontro Brasileiro de Ciências Térmicas-ABCM, pp. 561-563, Rio de Janeiro, 1992.

---

**Effect of Intensification of Heat Transfer Coefficient in Adsorption Beds for Solar Devices**. Anais do II Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, p. 132, João Pessoa, 1992.

---

**Transferência de Calor e Massa em um Leito de Sílica-Gel**. Anais do II Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, pp. 140, João Pessoa, 1992.

GURGEL, J. M., KLÜPPEL, R. P., PEREIRA, C. P. **Comparação entre algumas Técnicas de Identificação da Condutividade Térmica de Leitos Granulares**. XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, 1993.

---

**Aparelho da Difusidade Térmica de Materiais Granulares**. Anais do XI COBEM, São Paulo, 1991.

GURGEL, J.M., MEUNIER, F., GUILLEMINOT, J.J. **Intensificação da Condutividade Térmica de Leitos Granulares através de Misturas Bidispersas e de Inserções de Esponjas Metálicas**. Anais III ENCIT, Itapema – SC, 1991.

HOLMAN, J. P. **Transmissão de Calor**. Editora Mcgraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1983.

JURINAK, J.J., MITCHELL, J.W., BEKMAN, W.A. **Open cycle desiccant air conditioning as an alternative to vapor compression cooling in residential applications**. Trans. ASME, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 10, pp. 252-260, 1984.

JUNG, D., KHELIFA, N., SIZMANN, R. **Solar air conditioning with solid adsorbents in open systems**. Intersol, Vol. I, pp. 659-663, 1985.

KLÜPPEL, R. P., GURGEL, J. M. **Solar Adsorption Cooling Using Silica-Gel/Water**. Proc. ISES Solar Energy Congress, pp. 2627-2631, Hamburgo - R.F.A., 1987.

---

**Solar Refrigeration by Solid Adsorption**. V

Congresso Latino Americano de Energia Solar, Valparaíso - Chile, 1986.

\_\_\_\_\_ in: W.H. Bloss and E. Pfisterer( eds.) *Advances in Solar Energy Technology*, Vol. 3, Pergamon Press, pp. 2627-2631, 1988.

\_\_\_\_\_. “Solar Cooled Drinking Fountain”, *Sunworld* 12, N4, 1988.

KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor**. Tradução da 3ª Edição Americana, Edgard Blücher Editora, São Paulo, 1977.

LEITE, A. P. F. Sistema de refrigeração à adsorção sólida utilizando o par carvão ativado/metanol com regeneração por energia solar. Campina Grande: Trabalho apresentado perante banca examinadora no concurso para professor titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II, 1996.

MHIRI, F., GOLLI, S. **Etude d'un réfrigérateur solaire à adsorption solide avec le couple charbon actif - méthanol**. Paris: Rev. Gén. Therm., Vol. 35, pp. 269-277, 1996.

PASSOS, E .F. **Etude des couples charbon actif-metanol et de leur application a la refrigeracion solaire**. Lausanne: EPFL, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça, 1986.

PASSOS, E. F., ESCOBEDO, J. F. **Geladeira movida a fogão de lenha**. Anais do ENCIT, Águas de Lindóia, São Paulo, 1988.

PASSOS, E. F., ESCOBEDO, J. F., MEUNIER, F. **Simulation of an intermitent adsorptive solar cooling system**. *Solar Energy*, Vol. 42, N 2, pp. 103-111, 1989.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York: Mcgraw-hill, 1980.

PERRY, R. H., CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. Rio de Janeiro: Guanabara dois, 1980.

PONS, M., GRENIER, PH. **Experimental data on a solar- powered ice maker using activated cabon and methanol adsortive pair**. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol 109, pp. 303-310, 1987.

PONS, M., GRENIER, PH. **A phenomenological adsorption equilibrium law extracted from experimental and theoretical considerations applied to the activated carbon and methanol pair.** Carbon, Vol. 24, N 5, pp. 615-625, 1986.

PONS, M., GUILLEMINOT, J. J. **Design of an experimental solar-powered solid ice maker.** Trans. ASME, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 109, pp. 332-337, 1986.

RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption Processes.** New York: Wiley Interscience Publicacion, 1984.

RIOS, J. **Représentation des Equation d'Etat pour le Couple Zéolith-Eau à Partir des Données Experimentales.** In Boletim interno CNRS-ERA, França, 1982.

SALINAS, D. **Condicionamento de Ar por Adsorção Sólida Regenerado por Energia Solar.** João Pessoa, Tese de Mestrado apresentada à CPGEM-UFPB, 1994.

SANTOS, A. M., VENANZI, D., CARDOSO, S. **Aproveitamento do Calor Rejeitado nos Gases de Escape de Máquinas Térmicas.** Anais do I Simpósio Brasileiro de Transferência de Calor e Massa, Campinas – SP, pp. 293, 1987.

SILVA, Z. E., SANTOS, C. A. C. **Método Analítico para Determinação da Difusidade Térmica em Materiais Homogêneos.** Anais do II Congresso Norte-Nordeste de Engenharia Mecânica, João Pessoa - PB, 1992.

SIZMANN, R., JUNG, D., KHELIFA, N. **Le stockage de la chaleur a Basse Temperature por Reactions Termochimiques.** Rev. Inter. d'Heliotec, N 2, pp. 42, 1981.

VAN WYLLEN, G. J., Sountag, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** São Paulo: Edgard Bücher, 2ª Edição, 1978.

VODIANITSKAIA, P. **Protótipo de um Refrigerador Solar a Adsorção Sólida Utilizando o Par Frigorígeno Gel de Sílica/ água.** Tese de

Mestrado apresentada à CPGEM-UFPB, João Pessoa - PB, 1984.

VODIANITSKAIA, P., KLÜPPEL, R. P. **Geladeira Solar de Adsorção**. Anais do III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro – RJ, 1984.

YANG, R. T. **Gas Separation by Adsorption Processes**. Londres: Butterworths, 1987.

YOUNG, D.M., CROWELL, A. D. **Physical Adsorption of Gases**. Londres: Butterworths, 1962.

YANAGI, H., KOMATU, F., YAKAMOTO, Y. **Protoipe test of adsorption refrigerator using silica-gel/water pair**. Proc. Meet. on Solid Sorption Refrigeration, Vol. 1, pp. 177-222, Paris: Institut International du Froid, 1992.

ZEMANSKY, M. W. **Calor e Termodinâmica**. 5ª Edição, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1977.

# Apêndice A

## Simbologia

- A** → Substância Adsorvente
- AB** → Composto formado pela reação adsorvente/ adsorbato
- $A_{CD}$  → Área de contato do duto
- $A_{GD}$  → Área de contato gás/duto
- $A_{CAg}$  → Área de contato condensador/fluido refrigerante
- $A_{MAG}$  → Área de contato metanol/água
- $A_{MAMB}$  → Área de contato metanol/ambiente
- $A_{AgAMB}$  → Área de contato água ambiente
- B** → Substância Adsorbato
- c** → Coeficiente de equilíbrio da reação  $C_p$  Calor específico à pressão constante ( $J/Kg K$ )
- $C_{PD}$  → Calor específico do duto à pressão constante ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )
- $C_{PL}$  → Calor específico do leito à pressão constante ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )
- $C_{pcond}$  → Calor específico do condensador à pressão constante ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )
- $C_{PM}$  → Calor específico do metanol à pressão constante ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )
- $C_{PAg}$  → Calor específico da água à pressão constante ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )
- $C_A^c$  → Concentração do reagente A
- $C_B^d$  → Concentração do reagente B
- $C_{cAdB}$  → Concentração do produto AB
- d** → Coeficiente de equilíbrio da reação
- D** → Diâmetro (m)
- G** → energia livre de Gibbs
- DE** → Diâmetro externo (m)
- h** → Altura da amostra (m)
- H** → Entalpia (J)
- $H_{CDUT}$  → coef. de contato térmico interface metal-adsorvente ( $W m^{-2}K^{-1}$ )
- $H_{COND}$  → coef. de convecção do fluido refrigerante ( $W m^{-2}K^{-1}$ )

- $H_G \rightarrow$  coef. de convecção do gás de escape ( $W m^{-2}K^{-1}$ )  
 $H_f \rightarrow$  Entalpia final (J)  
 $H_i \rightarrow$  Entalpia inicial (J)  
 $H_L \rightarrow$  Calor latente do adsorbato à temperatura do adsorvente (J/kg)  
 $H_{mf} \rightarrow$  Entalpia de mudança de fase (J)  
 $H_s \rightarrow$  Entalpia de sorção ( J)  
 $K \rightarrow$  Condutividade térmica (  $W m^{-1}K^{-1}$ )  
 $L \rightarrow$  Calor Latente de evaporação ( $J kg^{-1}$ )  
 $L_{lv} \rightarrow$  Calor Latente de líquido-vapor ( $J kg^{-1}$ )  
 $L_s \rightarrow$  Calor Latente de solidificação da água ( $J kg^{-1}$ )  
 $M_g \rightarrow$  Massa do Gelo (kg)  
 $M_a \rightarrow$  Massa adsorvida (kg)  
 $M_{ag} \rightarrow$  Massa da água (kg)  
 $M_{cond} \rightarrow$  Massa do condensador (kg)  
 $M_D \rightarrow$  Massa do Duto (kg)  
 $M_L \rightarrow$  Massa do Leito (kg)  
 $M_M \rightarrow$  Massa do Metanol (kg)  
 $M_s \rightarrow$  Massa do adsorvente ( kg)  
 $n, Wo, k \rightarrow$  Constantes da equação de Dubinin dependentes do par adsorvente/adsorbato  
 $P \rightarrow$  Pressão absoluta (Pa)  
 $P_{ad} \rightarrow$  Pressão no adsorvente (Pa)  
 $P_s \rightarrow$  Pressão de saturação do adsorbato à temperatura do leito adsorvente (Pa)  
 $Q \rightarrow$  Calor ( $J mol^{-1}$ )  
 $Q_c \rightarrow$  Calor de condensação ( $J mol^{-1}$ )  
 $Q_d \rightarrow$  Calor de dissociação ( $J mol^{-1}$ )  
 $Q_e \rightarrow$  Calor de evaporação ( $J mol^{-1}$ )  
 $Q_s \rightarrow$  Calor de sorção ( $J mol^{-1}$ )

$r$	→	Raio ( m )
$R$	→	Constante universal dos gases ( $J \text{ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$S$	→	Entropia (J)
$S_d$	→	Entropia final (J)
$S_i$	→	Entropia inicial (J)
$t$	→	Tempo (s)
$T$	→	Temperatura (K)
$T_a$	→	Temperatura ambiente (K)
$T_d$	→	Temperatura de dissociação (K)
$T_e$	→	Temperatura de evaporação (K)
$T_s$	→	Temperatura de sorção (K)
$T_D$	→	Temperatura do Duto (K)
$T_L$	→	Temperatura do Leite (K)
$T_G$	→	Temperatura do Gelo (K)
$T_{AG}$	→	Temperatura do Água (K)
$T_{\text{cond}}$	→	Temperatura do Condensador (K)
$T_{\text{AMB}}$	→	Temperatura Ambiente (K)
$T_M$	→	Temperatura do Metanol (K)
$T_{\text{LEITOmax}}$	→	Temperatura Máxima do Leite (K)
$U_s$	→	Coef. Global de Troca de Calor Metanol-Gelo ( $W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ )
$U_{\text{MAg}}$	→	Coef. Global de Troca de Calor Metanol-Água ( $W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ )
$U_{\text{MAMB}}$	→	Coef. Global de Troca de Calor Metanol-Ambiente ( $W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ )
$U_{\text{AgAMB}}$	→	Coef. Global de Troca de Calor Água-Ambiente ( $W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ )
$\chi$	→	Concentração de adsorbato no adsorvente
$W_0$	→	parâmetro da equação de Dubinin
$\rho$	→	Massa específica do adsorvente ( $kg \text{ m}^3$ )
$\Delta G^\circ$	→	Energia de formação ( energia livre de Gibbs ) (J)
$\alpha$	→	Coeficiente de dilatação volumétrica ( $K^{-1}$ )

## Apêndice B

### Motor de Combustão Interna Estacionário

Segundo o postulado formulado por Kelvin e Planck (1865), é impossível construir-se uma máquina térmica, que trabalhando em ciclos, produza como único resultado a absorção de calor e a conversão deste em trabalho.

Nos motores de combustão interna, apenas uma pequena parte da energia calorífica fornecida pela queima do combustível é convertida em energia mecânica e a parte restante é rejeitada sob diversas formas:

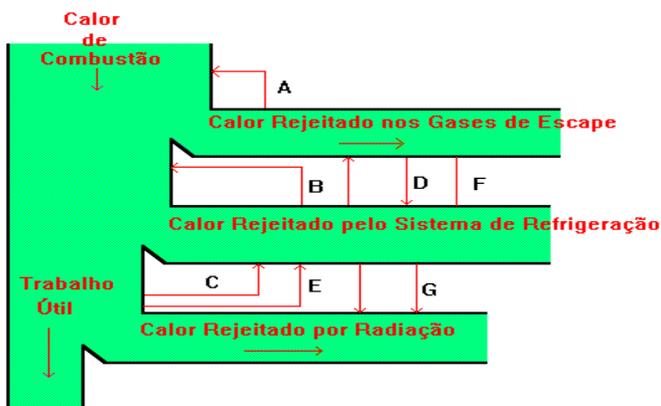


Figura B.1 - Fluxo de calor em um motor de combustão interna.

A Figura B.1 representa o intercâmbio entre as diversas partes do motor, caracterizado por:

A - Calor trocado entre o gás de escape residual no cilindro e a mistura fresca admitida;

B - Calor transferido pelo sistema de refrigeração para a mistura ar combustível no coletor de admissão;

C - Calor equivalente ao trabalho para vencer as resistências passivas transferido aos gases de escape;

D - Calor transferido pelos gases de escape ao meio refrigerante;

E - Calor equivalente ao trabalho para vencer as resistências passivas transferida ao sistema de refrigeração;

F - Calor radiado pelo escape;

G - Calor radiado pelo coletor de admissão.

Janeway apud Santos et al. (op. cit.), fornece os dados referentes ao balanço térmico em motores de combustão interna, conforme as Figuras B.2, B.3, B.4. O motor adotado como base, foi ensaiado por Santos *et al.* (op. cit.), com as seguintes características:

- O motor trabalhando com 50 % da carga total, temos uma temperatura média de gases de escape igual a 743,15 K. Estimando que apenas 35 % da energia disponibilizada pelos gases seja aproveitada, teremos 41,6 kW de energia disponível;

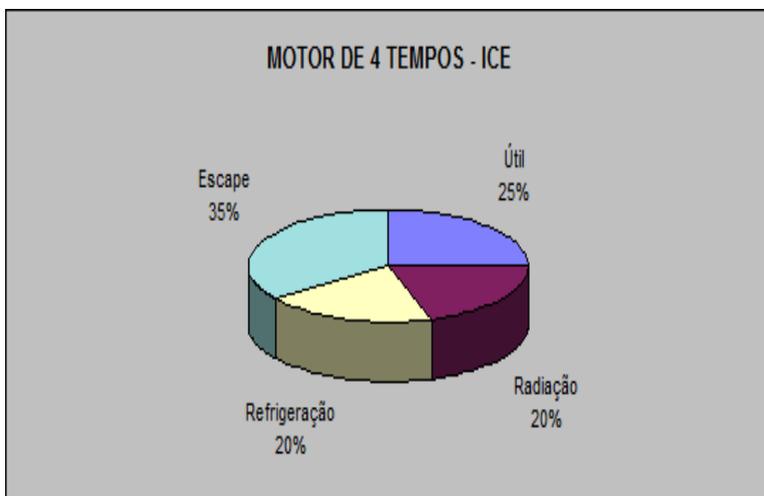
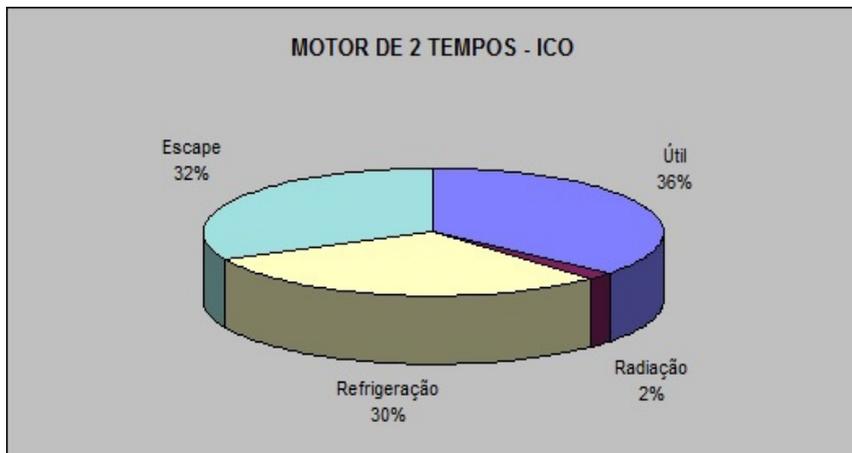


Figura B.2 – Balanço energético de motor de combustão interna de 4 tempos à centelha (Espínola Jr. op cit.).



Figuras B.4 - Balanço energético de motor de combustão interna de 2 tempos à compressão (Espínola Jr. op cit.).

Dados do Motor utilizado:

Marca: GM 261;

Combustível: Álcool etílico 96 GL;

Dados do Dinamômetro – Norma: NB 372

## Apêndice C

### Modelo de Cálculo de Temperatura no Interior de um Leito Adsorativo

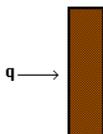


Figura C.2 – Modelo de condução unidimensional no interior de uma amostra (Espínola Jr. op cit.).

A equação de condução de calor no interior da amostra (Figura III.2) é dada por:

$$C \frac{dT}{dt} = q + \frac{d\chi}{dt} m_s q_{st} \quad (C.1)$$

onde:

$$C = m_a C_a + m_s C_s \quad (C.2)$$

$$q_s = m_s q_{st} \frac{d\chi}{dt} \quad (C.3)$$

Diferenciando-se a equação da concentração, idealizado por Dubinin, parcialmente em relação a  $T$  e  $\ln P$ , tem-se:

$$d\chi = \frac{\partial\chi}{\partial \ln(P_{ad})} (d \ln(P_{ad})) + \frac{\partial\chi}{\partial T} (dT) \quad (C.4)$$

fazendo-se a seguinte transformação, temos:

$$d(\ln(P_{ad})) = \frac{\partial \ln(P_{ad})}{\partial \chi} (d\chi) + \frac{\partial \ln(P_{ad})}{\partial T} (dT) \quad (C.5)$$

usando a relação de Clayperon, onde:

$$q_s = -RT^2 \left[ \frac{\partial (\text{Ln}(P_{\text{ad}}))}{\partial T} \right] \quad (\text{C.6})$$

temos:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} = \frac{\frac{\partial \text{Ln}(P_{\text{ad}})}{\partial T} - \frac{q_{\text{st}}}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t}}{\frac{T^{-n}}{nRK^n \chi} \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{\text{ad}}} \right) \right]^{1-n}} \quad (\text{C.7})$$

expandindo, temos:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} = \left\{ \left[ \frac{\partial \text{Ln}(P_{\text{ad}})}{\partial T} \right] - \left[ \frac{q_{\text{st}}}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \right\} T^n nRK^n \chi \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{\text{ad}}} \right) \right]^{n-1} \quad (\text{C.8})$$

substituindo (C.8) em (C.1),temos:

$$C \frac{dT}{dt} = q + \left[ m_s q_{\text{st}} \frac{\text{Ln} \left( \frac{P_{\text{ad}_f}}{P_{\text{ad}_i}} \right)}{z} - m_s q_{\text{st}}^2 \frac{1}{RT^2} \frac{(T_f - T_i)}{z} \right] T^n nRK^n \chi \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{\text{ad}}} \right) \right]^{n-1} \quad (\text{C.9})$$

resolvendo, temos:

$$C \frac{(T_f - T)}{z} = q + \left[ m_s q_{\text{st}} \frac{\text{Ln} \left( \frac{P_{\text{ad}_f}}{P_{\text{ad}_i}} \right)}{z} - m_s q_{\text{st}}^2 \frac{(T_f - T)}{RT^2 z} \right] T^n nRK^n \chi \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{\text{ad}}} \right) \right]^{n-1} \quad (\text{C.10})$$

$$T_f \left( C + m_s q_{\text{st}} T^{n-2} nK^n \chi \left( \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{\text{ad}}} \right) \right)^{n-1} \right) = zq + \left[ m_s q_{\text{st}} \left( \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{\text{ad}}} \right) \right)^{n-1} T^n nRK^n \chi \right] \cdot \quad (\text{C.11})$$

$$\left[ \text{Ln} \left( \frac{P_{\text{ad}_f}}{P_{\text{ad}_i}} \right) + q_{\text{st}} \frac{1}{RT} \right]$$

fazendo:

$$\left( C + m_s q_{st} T^{n-2} n K^n \chi \left( \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right)^{n-1} \right) = \Gamma \quad (\text{C.12})$$

e

$$\left( m_s q_{st} T^n n R K^n \chi \left( \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right)^{n-1} \right) = \Theta \quad (\text{C.13})$$

temos:

$$T_F = \left( \frac{zq}{\Gamma} \right) + \left( \frac{\Theta}{\Gamma} \right) \left[ \left( \text{Ln} \left( \frac{P_{adF}}{P_{ad1}} \right) \right) + q_{st} \frac{1}{RT} \right] \quad (\text{C.14})$$

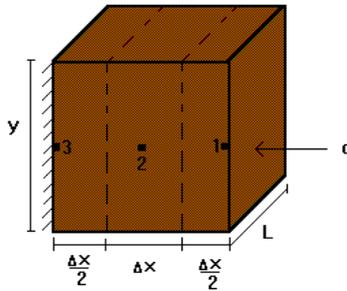


Figura C.3 - Condução bidimensional no interior da amostra em função do tempo (Espínola Jr. op cit.).

A equação de condução de calor no interior do cubo é dada por:

$$C \frac{dT}{dt} = q + q_s \quad (\text{C.15})$$

onde:

$$q = m_s q_{st} \frac{d\chi}{dt}$$

$$C_1 = \rho_s Ly \frac{\Delta x}{2} C_s + \chi_1 \rho_s Ly \frac{\Delta x}{2} C_a = \rho_s Ly \frac{\Delta x}{2} (C_s + \chi_1 C_a) \quad (C.16)$$

$$C_1 = m_{s_1} (C_s + \chi_1 C_a) \quad (C.17)$$

analogamente, temos:

$$C_2 = m_{s_2} (C_s + \chi_2 C_a) \quad (C.18)$$

$$C_3 = m_{s_3} (C_s + \chi_3 C_a) \quad (C.19)$$

onde:

$$m_{s_1} = \rho_s Ly \frac{\Delta x}{2}$$

e deduzido anteriormente, tem-se:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} = \frac{\frac{\partial \text{Ln}(P_{ad})}{\partial T} - \frac{q_{st}}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t}}{\frac{T^{-n}}{nRK^n \chi} \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right]^{1-n}} \quad (C.20)$$

expandindo, tem-se:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} = \left\{ \left[ \frac{\partial \text{Ln}(P_{ad})}{\partial T} \right] - \left[ \frac{q_{st}}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \right\} T^n nRK^n \chi \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right]^{n-1} \quad (C.21)$$

substituindo (C.21) em (C.15), tem-se:

$$C \frac{dT}{dt} = q - Q + m_s q_{st} n T^n RK^n \chi \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right]^{n-1} \left[ \frac{\partial \text{Ln}(P_{ad})}{\partial T} - \frac{q_{st}}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (C.22)$$

resolvendo, tem-se:

$$C_1 \frac{1}{z} (T_{1F} - T_1) = q - \frac{KyL}{\Delta x} (T_{1F} - T_{2F}) + m_{s_1} q_{st} n R T_1^n K^n \chi \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right]^{n-1} \left[ \frac{1}{z} \text{Ln} \left( \frac{P_{adF}}{P_{ad1}} \right) - \frac{q_{st}^2}{RT_1^2} \frac{1}{z} \right] \quad (C.23)$$

$$T_{1F} \left( C_1 + z \frac{KyL}{\Delta x} + m_{s_1} q_{st}^2 n K^n T_1^n \left( \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right)^{n-1} \right) - T_{2F} \left( \frac{1}{z} \frac{KyL}{\Delta x} \right) = C_1 T_1 + q + m_{s_1} q_{st} n R T_1^n K^n \chi \cdot \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right]^{n-1} \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_{adF}}{P_{ad1}} \right) + \frac{q_{st}}{RT_1} \right] \quad (C.24)$$

analogamente, tem-se:

$$T_{2F} \left( C_2 + 2z \frac{K}{\Delta x} + m_{s_2} q_{st} T_2^{n-2} K^n n \chi \left( \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right)^{n-1} \right) - T_{1F} \left( z \frac{K}{\Delta x} \right) - T_{3F} \left( z \frac{K}{\Delta x} \right) = C_2 T_2 + m_{s_2} q_{st} \cdot T_2^n R K^n n \chi \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right]^{n-1} \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_{adF}}{P_{ad1}} \right) + q_{st} \frac{1}{RT} \right] \quad (C.25)$$

$$T_{3F} \left( C_3 + z \frac{K}{\Delta x} + m_{s_3} q_{st} T_3^{n-2} n K^n \chi \left( \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right)^{n-1} \right) - T_{2F} \left( z \frac{K}{\Delta x} \right) = C_3 T_3 + m_{s_3} q_{st} n R K^n T_3^n \chi \cdot \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right]^{n-1} \left[ \text{Ln} \left( \frac{P_{adF}}{P_{ad1}} \right) + q_{st} \frac{1}{RT_3} \right] \quad (C.26)$$

## *Apêndice D*

### **Propriedades dos Componentes do Sistema de Refrigeração.**

A equação da concentração, idealizada por Dubinin, possui coeficientes que são características de cada adsorvente, os quais são obtidos experimentalmente. Dados experimentais obtidos por Pons e Grenier op. cit. nos revela algumas propriedades do par carvão ativado/metanol. Desta forma, temos:

$$\chi(T) = \omega_0 \rho(T) \left[ -D \left( TLn \left( \frac{P_s}{P_{ad}} \right) \right)^n \right] \text{ Eq. de Dubinin}$$

logo:

$$\omega_0 = 425 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{kg}$$

$$D = 5,02 \cdot 10^{-7}$$

$$n = 2,15$$

As propriedades termodinâmicas do metanol, para uma determinada faixa de temperatura, são funções aproximadas por polinômios (BOUBAKRI,1985). A validade desta aproximação está de acordo com o intervalo do limite de temperatura. Sendo assim, temos:

### **Metanol**

Pressão de vapor saturado

$$LnP_{ad} = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3}$$

onde:

$$A = 17,5734$$

$$B = -2312,830$$

$$C = -566750$$

$$D = 4,417860 \cdot 10^7$$

com  $P$  ad expresso em **mbars** e **T** em **Kelvin**.

Calor latente de vaporização

$L(T) = AT^3 + BT^2 + CT + D$  para  $T < 450$  K, tem-se:

$$A = 11,2826 \cdot 10^{-8}$$

$$B = -10,1045 \cdot 10^{-3}$$

$$C = 4,74158$$

$$D = 643,984$$

para  $T > 450$  K, tem-se:

$$A = -29,52760 \cdot 10^{-7}$$

$$B = 4,0608$$

$$C = -1865,467$$

$$D = 28,69488 \cdot 10^3$$

com  $L(T)$  expresso em **kJ kg<sup>-1</sup>** e **T** em **Kelvin**.

Peso Especifico

$\rho(T) = AT^3 + BT^2 + CT + D$  para  $T < 453$  K, tem-se:

$$A = -1,01655 \cdot 10^{-4}$$

$$B = 8,65165 \cdot 10^{-3}$$

$$C = -3,3388$$

$$D = 1283,315$$

e para  $T > 453$  K, tem-se:

$$A = -1,94498 \cdot 10^{-4}$$

$$B = 2,2324 \cdot 10^{-1}$$

$$C = -83,12036$$

$$D = 1,0513 \cdot 10^4$$

com  $\rho(T)$  expresso em **Nm<sup>-3</sup>**.

Coeficiente de expansão térmica do metanol (Leite op. cit.)

$$\alpha = 1,26 \cdot 10^{-3}$$

Os dados abaixo, referentes ao metanol, foram obtidos em PERRY e Chilton (1980).

Viscosidade cinemática

$$\nu = 2,27 \cdot 10^{-7} m^2 / s^{-1}$$

Calor específico a pressão constante

$$C_{P_{\text{METANOL}}} = 2507 J Kg^{-1} K^{-1}$$

Número de Prandt

$$Pr = 2,12$$

Condutividade térmica

$$K = 0,214 W m^{-1} K^{-1}$$

Os dados abaixo foram obtidos em LEITE op. cit..

### **Carvão Ativado**

Calor específico a pressão constante

$$C_{P_{\text{CARVAO}}} = 920 J kg^{-1} K^{-1}$$

Massa específica

$$\rho_{\text{carvao}} = 420 Kg m^{-3}$$

## Água

Calor específico a pressão constante

$$C_{P_{\text{ÁGUA}}}(303.15K) = 4180J \text{ kg}^{-1}K^{-1}$$

$$C_{P_{\text{ÁGUA}}}(273.15K) = 4218J \text{ kg}^{-1}K^{-1}$$

Calor latente de solidificação

$$L_S = 334KJ \text{ kg}^{-1}$$

Condutividade térmica do gelo

$$K_{\text{GELO}} = 2.26W \text{ m}^{-1}K^{-1}$$

## Cobre

Calor específico a pressão constante

$$C_{P_{\text{COBRE}}} = 383J \text{ Kg}^{-1}K^{-1}$$

Massa específica

$$\rho_{\text{COBRE}} = 8795kg \text{ m}^{-3}$$



**JOSÉ ESPÍNOLA JÚNIOR:** Possui graduação em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal da Paraíba/Campus Campina Grande, Mestrado e Doutorado em Engenharia Mecânica (Ciências Térmicas), pela Universidade Federal da Paraíba/Campus João Pessoa. Atualmente é Professor DIV 4 do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe. Pesquisador e Consultor Ad Hoc da FAPITEC-SE Consultor em projetos relacionados à medição da produção e integridade estrutural de petróleo e gás natural. Atuação profissional pautada nas áreas de Processos Térmicos, Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade, Metrologia na Produção de Petróleo, Gás natural e BSW.



**JOSÉ MAURÍCIO GURGEL:** Possui graduação em Engenharia Mecânica, Mestrado em Engenharia Mecânica (Ciências Térmicas) pela Universidade Federal da Paraíba, Doutorado em Ciências Térmicas pela Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)/LIMSI. Atualmente é Professor Associado IV da Universidade Federal da Paraíba, no Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Membro do Comitê de Ciências Térmicas da ABCM (2002/2004) e do Comitê da CAPES de Engenharia III (1999/2012). Atua na área de Engenharia Mecânica, com ênfase na área de Ciências Térmicas, abrangendo temas como Energia Solar, Transferência de Calor, Refrigeração por Adsorção, Determinação de Propriedades Térmicas de Materiais Adsorptivos e Motores de Stirling.