

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALUIZIO DE FREITAS CARVALHO FILHO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ADSORÇÃO À ENERGIA SOLAR UTILIZANDO CARVÃO ATIVADO E ETANOL
COMO PAR ADSORTIVO**

São Luis
2016

ALUIZIO DE FREITAS CARVALHO FILHO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ADSORÇÃO À ENERGIA SOLAR UTILIZANDO CARVÃO ATIVADO E ETANOL
COMO PAR ADSORTIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Estadual
Maranhão, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Jorge de Jesus
Passinho e Silva

São Luis
2016

Carvalho Filho, Aluizio de Freitas.

Modelagem e simulação de um sistema de refrigeração por adsorção à energia solar utilizando carvão ativado e etanol como par adsorativo / Aluizio de Freitas Carvalho Filho. – São Luís, 2016.
97 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Me. Jorge de Jesus Passinho e Silva.

1. Simulação computacional. 2. Ciclo de adsorção. 3. Refrigeração.
4. Energia solar. I. Título.

CDU 621.56: 620.91[662.87+662.754]

ALUIZIO DE FREITAS CARVALHO FILHO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ADSORÇÃO À ENERGIA SOLAR UTILIZANDO CARVÃO ATIVADO E ETANOL
COMO PAR ADSORTIVO

Monografia apresentada junto ao curso de
Engenharia Mecânica da Universidade
Estadual do Maranhão - UEMA, para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovada em: 07 / 12 / 2016

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. Jorge de Jesus Passinho e Silva

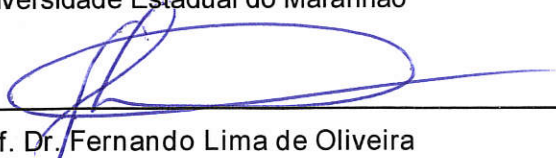
Orientador

Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

Universidade Estadual do Maranhão

A todos aqueles que fazem o certo porque é o certo, sem as ambições mesquinhas que movem os pés de tantos. Àqueles que nenhuma láurea é necessária para engrandecê-los.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meus pais e irmãos. Pois qualquer êxito de algum de nós é tratado como uma conquista coletiva, fruto dos sacrifícios voluntário de uns pelos outros, movidos unicamente pelo amor incondicional recíproco que temos entre nós. Isso, porque nossa união, para nós, representa o princípio fundamental que guia nossas vidas em busca da felicidade compartilhada. E, embora tivermos que viver fisicamente distantes uns dos outros, todo foi em prol de objetivos compartilhados em conjunto e para os quais todos doaram suas contribuições. Quantas vezes minha mãe teve que brilhar tão mais intensamente para que sua luz pudesse alcançar todos seus filhos, em lugares distintos e distantes, com luz forte o suficiente para iluminar nossos passos! Digo que isso só foi possível graças a sua dedicação e atenção mais do que freqüente, mas sim intensamente contínua. Meu pai tentou me ensinar muitas coisas. E, meus irmãos são os melhores que alguém pode ter. Eles iniciaram essa jornada antes de mim, então tiveram maiores dificuldades. E, por ter ser meu irmão, o familiar com quem mais convivi toda minha vida, ele generosamente me ensinou o valor da união acima de tudo, durante todos os dias e, em tudo foi um ótimo referencial. E, minha irmã foi um exemplo de que dificuldades podem ser superadas.

Quero agradecer aos meus amigos Marta dos Santos Diniz e Ivaldo Guimarães Macieira Neto, que são pessoas em quem posso confiar plenamente e que fizeram a diferença na minha vida.

Sinto tanta admiração da Marta pela sua força de vontade ao encarar as injustiças e dificuldades da vida, sua tenacidade e dedicação por fazer as coisas mais perfeitas, sua capacidade singular de compreender as necessidades dos outros e agir ativamente como tantas vezes fez por mim e a outras pessoas. É uma pessoa muito sensível e capaz de perceber as coisas importantes. Como amigo de longa data, a tomo como exemplo e, como namorado, sinto orgulho e felicidade de tê-la próximo. Sem ela os dias seriam menos encorajadores.

O Ivaldo é um homem incomum, sua inteligência é elevada como a dos poucos homens que são capazes de dominar múltiplas áreas do conhecimento simultaneamente e de forma tão plena. Possui um senso de honestidade que é inviolável. Ele é um homem que se dedica as outras pessoas e tem uma humildade de espírito que é inexplicável. É um amigo para toda vida.

Gostaria de agradecer meus tios, Eurides de Freitas, Walter Carvalho e Maria de Lourdes que abriam novas portas na minha vida e foram sempre tão carinhosos. Possibilitaram-me galgar novos rumos e muito contribuíram com o meu sucesso.

Agradeço ao professor e amigo Jorge Passinho com quem a convivência me proporcionou muitos aprendizados. Foi dele que recebi o primeiro convite para fazer pesquisas, o que propiciou o melhoramento de minhas habilidades matemáticas e o desenvolvimento de técnicas experimentais. É um homem pela qual nutro grande respeito e consideração.

Queria lembrar alguns nomes de professores nas quais terei boas recordações como: Lourival Filho, por sua competência e solicitude para discussões técnicas, Núbia Bergê, por sua ótima didática mesmo diante de poucos recursos, Flávio Nunes, por seu esforço e busca por inovações, Ubiraci Nascimento, pela organização e seriedade, Paulo Sérgio, sempre dedicado e, aos professores Wellington Assunção, Abraão Ramos e Fernando Lima que, além das reconhecidas capacidades, sempre me trataram com cordialidade.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último melhorar a humanidade.”

Nikola Tesla

“Sem dúvida, a inexperiência confere pouca coragem e a obrigação produz descontentes.”

Nicolau Maquiavel

RESUMO

Neste trabalho realizou-se o estudo e simulação computacional de um sistema de refrigeração solar por adsorção, com o par adsorativo carvão ativado/etanol, operando nas condições climáticas de São Luís - MA. Um modelo para as condições climáticas de temperatura e irradiação solar horária foi implementado com base nos dados meteorológicos locais. Para as propriedades do fluido refrigerante foram criadas no Matlab funções com este propósito a partir de dados obtidos do *Engineering Equation Software* (EES). Depois foram desenvolvidos no Matlab os algoritmos contendo o método de solução e a modelagem matemática formada por um sistema de equações diferenciais acopladas e não lineares aqui propostas. Após avaliar as temperaturas do ciclo e obter o diagrama de Dühring da simulação, encontrou-se um COP de 0,3574, efeito frigorífico específico de 140,51 kJ/kg e potência média de 329,7 W.

Palavras-Chave: Simulação Computacional, Ciclo de Adsorção, Refrigeração, Energia Solar, Carvão Ativado, Etanol.

ABSTRACT

In this work, it was performed the study and computational simulation of a solar cooling system by adsorption, with activated carbon/ethanol working pairs, operating in the climatic conditions of the São Luís - MA. A model for the climatic conditions as temperature and solar hourly irradiance was implemented based on local meteorological data. For the properties of the refrigerant, Matlab functions were created for this purpose from data obtained from Engineering Equation Software (EES). Then the algorithms containing the solution method and the mathematical modeling formed by nonlinear coupled differential equations system proposed here were developed in Matlab. After evaluating cycle temperatures and obtaining the Dühring diagram of the simulation, we found a COP of 0.3574, specific cooling effect of 140.51 kJ/kg and average power of 329.7 W.

Keywords: Computational Simulation, Adsorption Cycle, Cooling, Solar Energy, Activated Carbon, Ethanol.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_b	Área do leito adsorativo	$[m^2]$
A_c	Área do condensador	$[m^2]$
A_e	Área do evaporador	$[m^2]$
A_{iso}	Área de troca de calor do reservatório térmico	$[m^2]$
COP	Coeficiente de performance	$[-]$
c_b	Calor específico do material do leito	$[J / (kg \cdot K)]$
c_e	Calor específico do material do evaporador	$[J / (kg \cdot K)]$
c_{H20}	Calor específico da água	$[J / (kg \cdot K)]$
c_{rl}	Calor específico do refrigerante (etanol) líquido	$[J / (kg \cdot K)]$
c_{rv}	Calor específico do refrigerante (etanol) vapor	$[J / (kg \cdot K)]$
c_s	Calor específico do sólido adsorvente	$[J / (kg \cdot K)]$
D_o	Constante pré-exponencial	$[m^2 / s]$
D_p	Coeficiente de difusão intra-particular	$[m^2 / s]$
D_{cap}	Diâmetro do tubo capilar	$[m]$
d_e	Densidade do etanol	$[kg / m^3]$
E	Energia característica	$[J / mol]$
E_a	Energia de ativação da adsorção	$[J / mol]$
ϵ	Efetividade da transferência de calor	$[-]$
h_{ar}	Coeficiente de convecção natural do ar	$[W / (m^2 \cdot K)]$
h_b	Coeficiente de convecção do leito adsorativo	$[W / (m^2 \cdot K)]$
h_c	Coeficiente de convecção do condensador	$[W / (m^2 \cdot K)]$
h_{H20}	Coeficiente de convecção entre a água e o evaporador	$[W / (m^2 \cdot K)]$
h_{liq}	Entalpia do liquido saturado	$[J / kg]$
h_{vap}	Entalpia do vapor saturado	$[J / kg]$
L_r	Calor latente do refrigerante	$[J / kg]$
L_{cap}	Comprimento do tubo capilar	$[m]$

M_b	Massa do leito adsorvido	[kg]
M_c	Massa do condensador	[kg]
M_{crl}	Massa de refrigerante líquido no condensador	[kg]
M_e	Massa do evaporador	[kg]
M_{er}	Massa total de refrigerante no evaporador	[kg]
M_{erl}	Massa de refrigerante líquido no evaporador	[kg]
M_{erv}	Massa de refrigerante vapor no evaporador	[kg]
M_{H2O}	Massa de água a ser refrigerada	[kg]
M_s	Massa do sólido adsorvente	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica de água	[kg/s]
P	Pressão	[kPa]
P_o	Pressão de saturação	[kPa]
P_{ad}	Pressão do refrigerante na temperatura de adsorção	[kPa]
P_{eva}	Pressão do refrigerante na temperatura do evaporador	[kPa]
P_e	Pressão no evaporador	[kPa]
P_{de}	Pressão do refrigerante na temperatura de dessorção	[kPa]
P_c	Pressão no condensador	[kPa]
P_{con}	Pressão do refrigerante na temperatura do condensador	[kPa]
P_{rad}	Irradiação solar	[W/m ²]
Q_c	Efeito frigorífico	[J]
Q_{des}	Calor de dessorção	[J]
Q_{st}	Calor de adsorção	[J/kg]
Q_{sh}	Calor sensível do leito	[J]
$Q_{sh,pr}$	Calor sensível do leito no pré-aquecimento	[J]
$Q_{sh,des}$	Calor sensível do leito na dessorção	[J]
R	Constante universal dos gases	[J/(mol·K)]
R_p	Raio da partícula adsorvente	[m]
R_{ter}	Resistência térmica do reservatório	[°C/W]

SCE	Efeito frigorífico específico	[J]
T_{amb}	Temperatura ambiente	[°C]
T_b	Temperatura do leito	[°C]
T_c	Temperatura do condensador	[°C]
T_e	Temperatura do evaporador	[°C]
T_{H_2O}	Temperatura da água	[°C]
x	Título da mistura refrigerante	[–]
W	Concentração de equilíbrio da adsorção	[kg/kg]
W_b	Concentração a ser atingida na adsorção	[kg/kg]
w_b	Concentração instantânea no leito	[kg/kg]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
1.2 Justificativa	19
2. ESTADO DA ARTE	20
2.1 Natureza da Adsorção	20
2.1.1 Adsorção Física ou Fisissorção	20
2.1.2 Adsorção Química ou Quimissorção	20
2.2 Carvão Ativado e o Processo de Ativação	21
2.3 As Isotermas de Adsorção	21
2.4 As Isotermas do Etanol em Carvão Ativado.....	23
2.5 Os Sistemas de Refrigeração por Adsorção	24
2.6 O Sistema de Refrigeração Proposto.....	26
3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS	29
3.1 Análise das Condições Climáticas	29
3.2 O Modelo para a Radiação Média Horária	31
3.3 O Modelo para a Temperatura Ambiental.....	32
4. PROPRIEDADES DO FLUIDO REFRIGERANTE	36
4.1 Funções Polinomiais para as Propriedades do Fluido.....	36
5. MODELAGEM MATEMÁTICA	43
5.1 Modelagem para a Etapa de Adsorção.....	45
5.1.1 Equação da Velocidade de Reação	45
5.1.2 Equação para o Leito Adsorativo	46
5.1.3 Equação para o Evaporador	46
5.1.4 Equação para o Condensador.....	47
5.1.5 Equação para a Água Refrigerada	47
5.1.6 Equação para o Fluxo de Refrigerante no Evaporador.....	47
5.1.7 Equação para o Fluxo de refrigerante no Condensador	48
5.2 Modelagem para a Etapa de Dessorção.....	48
5.2.1 Equação da Velocidade de Reação	48

5.2.2 Equação para o Leito Adsorativo	49
5.2.3 Equação para o Evaporador	49
5.2.4 Equação para o Condensador.....	49
5.2.5 Equação para a Água Refrigerada	50
5.2.6 Equação para o Fluxo de Refrigerante no Evaporador.....	50
5.2.7 Fluxo de Refrigerante no Condensador.....	50
5.3 Modelagem para as Etapas de Aquecimento e de Resfriamento.....	51
5.4 Sistemas de Equações Diferenciais Acopladas e Não Lineares	51
5.5 Ciclo Termodinâmico.....	54
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
7. CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A – Modelagem do Sistema	69
APÊNDICE A.1 – Algoritmo para a Solução do Sistema de Equações.....	69
APÊNDICE A.2 – Modelagem para a Etapa de Adsorção.....	72
APÊNDICE A.3 – Modelagem para a Etapa de Pré-Aquecimento.....	74
APÊNDICE A.4 – Modelagem para a Etapa de Dessorção	76
APÊNDICE A.5 – Modelagem para a Etapa de Pré-Resfriamento	78
APÊNDICE A.7 – Função para a Isoterma de Adsorção	81
APÊNDICE A.8 – Algoritmo para Construção do Diagrama do Dühring.....	82
APÊNDICE A.9 – Função para Calcular o COP e SCE	84
APÊNDICE B – Propriedades do Refrigerante.....	85
APÊNDICE B.1 – Função para Pressão de Saturação	85
APÊNDICE B.2 – Função para a Entalpia do Etanol Líquido	86
APÊNDICE B.3 – Função para a Entalpia do Vapor de Etanol	87
APÊNDICE B.4 – Função para o Calor Específico do Etanol Líquido.....	88
APÊNDICE B.5 – Função para o Calor Específico do Vapor de Etanol.....	89
APÊNDICE C – Modelos Climáticos	90
APÊNDICE C.1 – Função para a Temperatura Diária:	90
APÊNDICE C.2 – Função para a Temperatura Diária na Adsorção	91
APÊNDICE C.3 – Função para a Temperatura Diária no Pré-Aquecimento.....	92
APÊNDICE C.4 – Função para a Temperatura Diária na Dessorção.....	93
APÊNDICE C.5 – Função para a Temperatura Diária no Pré-Resfriamento.....	94
APÊNDICE C.6 – Função para a Radiação Horária.....	95

APÊNDICE C.7 – Função p/ a Radiação Horária na Etapa de Pré-Aquecimento.....	96
APÊNDICE C.8 – Função para a Radiação Horária na Etapa de Dessorção.....	97

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas provenientes dos impactos ambientais, decorrentes da atividade antrópica e do modo de vida moderno, tornaram-se uma preocupação mundo afora que ganha a cada dia mais atenção à medida que novas publicações científicas evidenciam as relações entre as ações humanas e as causas de vários problemas globais.

Em 1974, Mario Molina e Sherwood Rowland, laureados em 1995 com o prêmio Nobel de Química, alertaram que os clorofluorcarbonetos (CFCs) estariam causando a destruição da camada de ozônio e que um simples átomo de cloro liberado da decomposição dos CFCs que chegam na estratosfera pode causar a quebra de 100 mil moléculas de ozônio. (ANDERSEN, 2013).

Após anos de debates científicos, em 1985, um conjunto de nações reuniu-se na Áustria para a Convenção de Viena para debater acerca da proteção da camada de ozônio. E, em setembro de 1987, vários países assinaram o Protocolo de Montreal, que definiu prazos para a redução da produção e consumo de substâncias prejudiciais à camada de ozônio, dentre as quais se encontram os CFCs utilizados nos ciclos de refrigeração de compressão e que apresentam elevado Potencial de Destruição da Camada de Ozônio, designado pela sigla ODP em inglês para *Ozone Depleting Potential*. Os HCFCs (hidroclorofluorcarbonos) são substancialmente menos nocivos à camada de ozônio do que os CFCs. Porém, eles ainda contêm cloro que destrói o ozônio. (MILLER, R.; MILLER, M., 2014).

Com objetivo de substituir os CFCs e HCFCs, os HFCs (hidrofluorcarbonetos) passaram a ser utilizados, uma vez que estes são substâncias orgânicas ausentes de cloro. Mas embora não danifiquem a camada de ozônio, apresentam significativo Potencial de Aquecimento Global, designado pela sigla GWP em inglês para *Global Warming Potential*. Outro fluido refrigerante muito utilizado é a amônia, mas pelas suas características de toxicidade pode ter seu uso desaconselhado e restrito a áreas afastadas de locais densamente povoados, sendo usado apenas em sistemas industriais sob supervisão técnica especializada. (STOECKER; JABARDO, 2002).

Outra problemática do uso em massa da refrigeração é o consumo elétrico. Segundo o Instituto Internacional de Refrigeração (*International Institute of Refrigeration* - IIR), localizado em Paris, estima-se que cerca de 15% da eletricidade

produzida no mundo inteiro seja empregada com refrigeração. E, que em edifícios residenciais e comerciais o consumo de energia pelo uso de ar-condicionado represente o estimado de 45%.

Diferente dos sistemas de compressão a vapor, os de refrigeração por adsorção podem facilmente utilizar fluidos ecologicamente corretos e não requerer o uso de energia elétrica, podendo operar com energia solar ou qualquer fonte térmica que seria desperdiçada como o calor dos gases de uma chaminé.

Além dessas duas grandes vantagens, eles apresentam simplicidade de construção, ausência de partes móveis, controle simples, ausência de vibração, operação silenciosa, baixo custo de operação, ausência de lubrificação, pouca manutenção e são menos sensíveis a impactos. Em contrapartida, apresentam peso e tamanho grande, necessidade de alto vácuo, baixo coeficiente de performance (COP) e baixa potência específica. (WANG et al., 2005; GWADERA et al., 2011).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar mediante simulação computacional o ciclo de refrigeração por adsorção, em regime transiente, operando com energia solar e que utilize como par adsorvente/adsorbato o carvão ativado e o etanol. Considerar as condições climáticas brasileiras como forma de viabilizar a tecnologia à nossa realidade e situação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar as isotermas de adsorção segundo as equações de Dubinin-Astakhov e Dubinin-Radushkevich.
- b) Desenvolver um modelo para as condições climáticas locais para a irradiação e temperatura horária diária com base em dados meteorológicos.
- c) Criar funções no Matlab capazes de retornar valores numéricos para as propriedades do fluido refrigerante com base no *Engineering Equation Software* (EES).

- d) Realizar a modelagem matemática do evaporador, condensador, câmara de sorção, da velocidade de reação e fluxo do refrigerante em cada elemento.
- e) Implementar a modelagem do ciclo no Matlab e solucionar os sistemas de equações diferenciais não lineares acopladas
- f) Avaliar o comportamento e as variações dos fatores como a concentração no leito, as pressões, as temperaturas do ciclo ao longo do tempo.
- g) Avaliar o funcionamento em regime transiente, calcular o coeficiente de performance (COP) obtido e o efeito frigorífico do sistema.

1.2 Justificativa

O principal elemento motivador desse trabalho é buscar tornar a refrigeração uma atividade não poluidora do meio ambiente visando o uso de sistemas de sorção, acreditando na potencialidade brasileira graças suas oportunas condições climáticas quanto a disponibilidade de energia solar.

A viabilização de tal tecnologia que utilize como fluido refrigerante uma substância que não causa danos ao ambiente e nem é tóxica ao ser humana, além de ser largamente produzida no Brasil, como é o etanol, pode colocar o país na dianteira do desenvolvimento sustentável. E, no que concerne ao elemento adsorvedor, o carvão ativado é um produto também não poluente que pode ser produzido sem grandes dificuldades e em larga quantidade e de fontes renováveis.

E, outro fator de grande relevância é que a simulação, no cenário da engenharia e da ciência, tem constituído uma ferramenta amplamente útil em análises e buscas por soluções de uma ampla gama de problemas. As dificuldades do custo financeiro requerido quando comparados com métodos experimentais são significativamente menores, minimizando gastos na pesquisa como a confecção de evaporador, condensador, sistemas de controle, termostato, vacuômetros, tubulações, coletor solar etc. E, a economia de tempo pela não necessidade de se efetuar múltiplos ensaios para minimizar erros de medições instrumentais e outros que podem surgir durante experimentos reais, tornam a técnica de simulação um grande atrativo, considerando que os erros passam a ser de natureza matemática.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Natureza da Adsorção

O fenômeno de interação entre moléculas de um líquido ou vapor com a superfície de um sólido poroso conhecido como adsorção se deve a existência de forças moleculares desbalanceadas na superfície do sólido que se relacionam com forças moleculares do fluido, atraindo suas moléculas ou íons para compensar tais forças residuais. Isto acarreta uma concentração de fluido sobre a superfície do sólido maior que na própria massa fluida. (BANSAL; GOYAL, 2005 apud UDDIN, 2014. p.1).

A adsorção pode ser classificada como adsorção física ou adsorção química dependendo da intensidade e tipo de força que promove o vínculo entre o fluido adsorvido (adsorbato ou adsorvato) e o sólido poroso (adsorvente).

2.1.1 Adsorção Física ou Fisissorção

Ocorre quando as forças entre a superfície do adsorvente e o adsorbato são forças Van der Waals e forças eletrostáticas de indução. Assim, as moléculas estão fracamente ligadas à superfície e os calores de adsorção são comparáveis com os calores de vaporização do adsorbato sendo inferiores aos da adsorção química. A fisissorção é um processo rápido e reversível que não há formação ou quebra de ligações químicas. Pode haver a formação de múltiplas camadas de moléculas adsorvidas e o aumento da temperatura diminui notavelmente a quantidade adsorvida. (ARAÚJO, M. E. 2009. p.5; CASTELLAN, G. 1995. p.462; SCHNEIDER, E. L. 2008. p.19). Esse é o tipo de adsorção na qual se concentra os sistemas de refrigeração por adsorção.

2.1.2 Adsorção Química ou Quimissorção

É o processo de sorção onde acontecem ligações químicas entre o adsorbato e o adsorvente, ocorre à formação de ligações covalentes ou trocas iônicas. É em geral irreversível e apresenta elevado calor de adsorção, comparável a variação de entalpia em uma reação química. Pode processar-se mesmo a altas

temperaturas e não prossegue além da formação de uma única camada (monocamada). (ARAÚJO, M. E. 2009. p.5; CASTELLAN, G. 1995. p.463; SCHNEIDER, E. L. 2008. p.19).

2.2 Carvão Ativado e o Processo de Ativação

O carvão ativado (CA) é um material carbonizado que foi submetido à reação com gases e algumas vezes à adição de produtos químicos, para aumentar a porosidade. Possui estrutura cristalina não grafítica, elevada área superficial e porosidade interna comparável a uma rede de túneis ou canais que são classificados segundo seus tamanhos em: microporos, mesoporos, macroporos. E, segundo a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), os CA apresentam de acordo com essa classificação os seguintes tamanhos dos poros: menores que 2nm, entre 2 e 50 nm e maiores que 50 nm respectivamente. (GONÇALVES, M. 2008. p.6; MARTÍNEZ, J. M. M. 1990. OLIVEIRA, M. P. 2008. p.15).

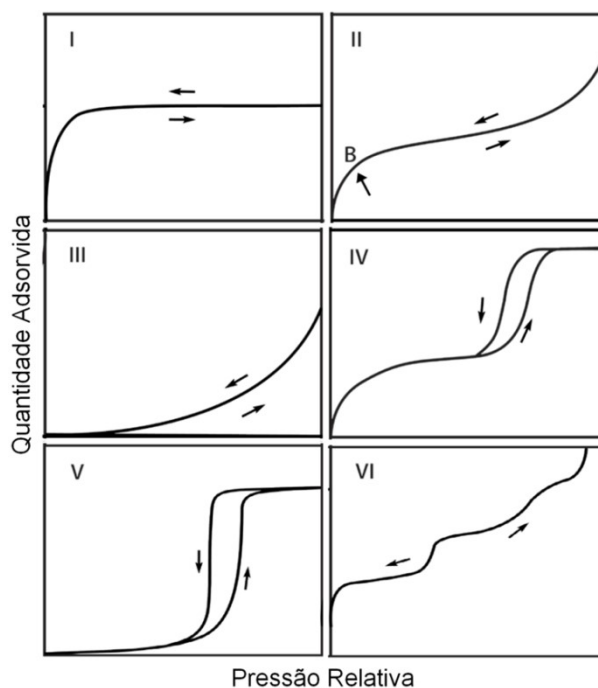
Quanto ao processo de ativação, este ocorre em duas etapas: primeiro a carbonização, em que ocorre a pirólise do material precursor, seguida da ativação propriamente dita. A carbonização deve ocorrer na faixa de temperatura entre 200 e 500°C em atmosfera inerte. Ocorre a remoção de componentes voláteis e a formação da massa de carbono fixa, além da estrutura porosa primária. Já na ativação o material é sujeito à reação de oxidação. O processo de ativação física faz uso dos gases H_2O e CO_2 a temperatura entre 800 e 1000°C. E, o de ativação química, mediante o uso de agentes desidratantes como H_3PO_4 , $ZnCl_2$, H_2SO_4 , KOH . (PUZIY et al., 2007 apud GONÇALVES, 2008. p.4; OLIVEIRA, 2008. p.16).

2.3 As Isotermas de Adsorção

De acordo com Martínez (1990, p.16-20), a quantidade adsorvida de gás por um sólido depende da temperatura e pressão, assim como da natureza do gás e do sólido. Portanto, para um sistema dado, a uma temperatura constante, a variação da quantidade adsorvida com a pressão constitui uma isoterma de adsorção. Essas curvas de adsorção apresentam diferentes formas para as quais foram propostas diversas classificações. A IUPAC adota seis tipos de isotermas, sendo cinco delas

propostas por Brunauer, Deming, Deming e Teller (BDDT). Tais curvas são mostradas na figura 2.1.

Figura 2.1 – Classificação das Isotermas de Adsorção Segundo a IUPAC.



Adaptado pelo autor. Fonte: IUPAC.

Tipo I – Chamada de isoterma de Langmuir corresponde à adsorção em monocamada e característica de materiais microporosos. É o caso típico de carvões ativados e sua interpretação se contempla com a teoria de Polanyi-Dubinin.

Tipo II – Característica de sólidos não porosos ou macroporosos, com formação de mono e multicamadas. A esse tipo foi desenvolvida a teoria de Brunauer, Emmett e Teller (BET).

Tipo III – Ocorre em sólidos não porosos em que a interação entre o adsorvente e o adsorbato é fraca.

Tipo IV – Tem como fator marcante a presença de ciclos de histerese. E, à pressões médias ocorre condensação capilar nos mesoporos.

Tipo V – São menos comuns e de difícil interpretação. Ocorre em sólidos porosos quando há baixa afinidade entre o par adsorvente/adsorbato. É típica da adsorção de vapor de água em carvão à temperatura ambiente.

Tipo VI – Característica da adsorção em multicamadas de gases nobres sobre superfícies altamente uniformes.

2.4 As Isotermas do Etanol em Carvão Ativado

O estudo do comportamento da adsorção do etanol em carvão ativo ou em fibras de carvão ativado tem sido amplamente realizado na última década. Muito em função da possibilidade de aplicação em sistemas de refrigeração solar por adsorção utilizando esse par adsortivo.

Os modelos amplamente utilizados e aceitos para o equilíbrio de adsorção de gases e vapores em sólidos microporosos são as equações de Dubinin - Radushkevich (D-R) e de Dubinin - Astakhov (D-A) que são mostradas abaixo. (HABIB; SAHA. 2013; ROMERO-ANAYA et al., 2014; UDDIN. 2014. p.47; UDDIN et al., 2014).

$$W_b = W_o \cdot \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^2 \right]; \quad (\text{D-R})$$

$$W_b = W_o \cdot \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right]; \quad (\text{D-A})$$

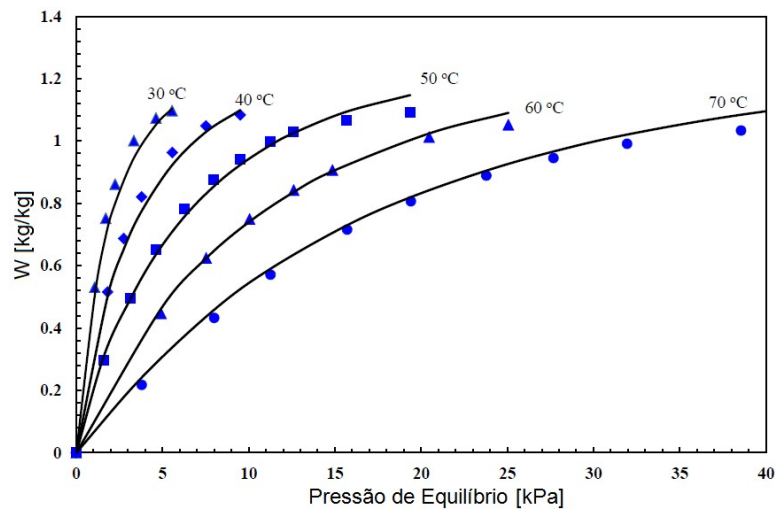
$$A = RT \cdot \ln \left(\frac{P_o}{P} \right)$$

Apesar de vários pesquisadores terem realizado o estudo desse par adsortivo, por uma questão de qualidade dos dados e disponibilidade de informações publicadas por Uddin, El-Sharkawy e Miyazaki, adotou-se como valores para os parâmetros da equação D-A os que foram por estes obtidos para o carvão Maxsorb III. E, que se encontram a abaixo:

$$\begin{aligned} W_o &= 1.2 & [\text{kg/kg}] \\ n &= 1.8 & [-] \\ E &= 139.5 & [\text{kJ/kg}] \\ D_o / r_p^2 &= 1.61 \cdot 10^{-2} & [\text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

E, para esses parâmetros, temos as seguintes isotermas como são mostradas na figura 2.2.

Figura 2.2 – Isoterma de Adsorção do Par Maxsorb III/Etanol

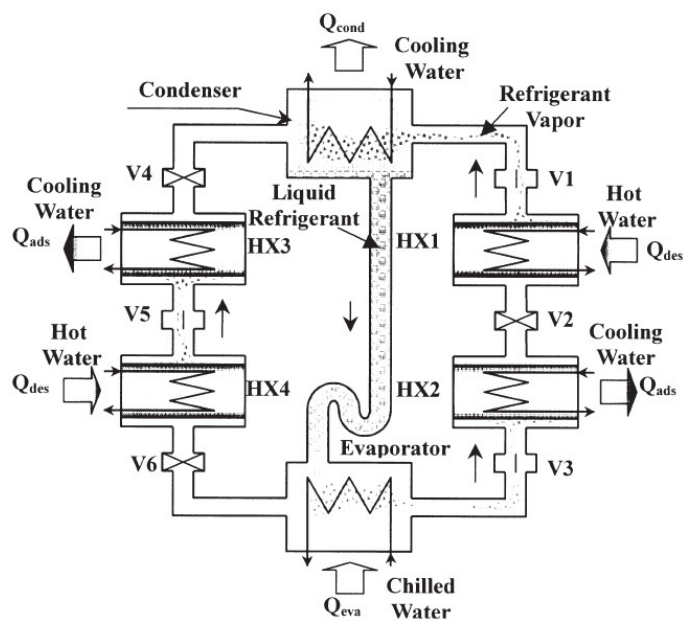


Adaptado pelo autor. Fonte: UDDIN, 2014

2.5 Os Sistemas de Refrigeração por Adsorção

Alguns modelos diferentes de sistemas de adsorção com os mais variados pares adsortivos foram propostos ou com intuito de utilizar fontes de calor mais frias ou com o propósito de alcançar maior eficiência ao ciclo. Saha et al. (2000) propôs um sistema de duplo estágio com o par adsortivo de sílica gel/água, mostrado na figura 2.3, operando com fonte de calor a 55°C e sumidouro a 30°C, atingindo COP de 0,36 e capacidade de resfriamento de 3,2 kW.

Figura 2.3 – Sistema de Adsorção de Duplo Estágio.

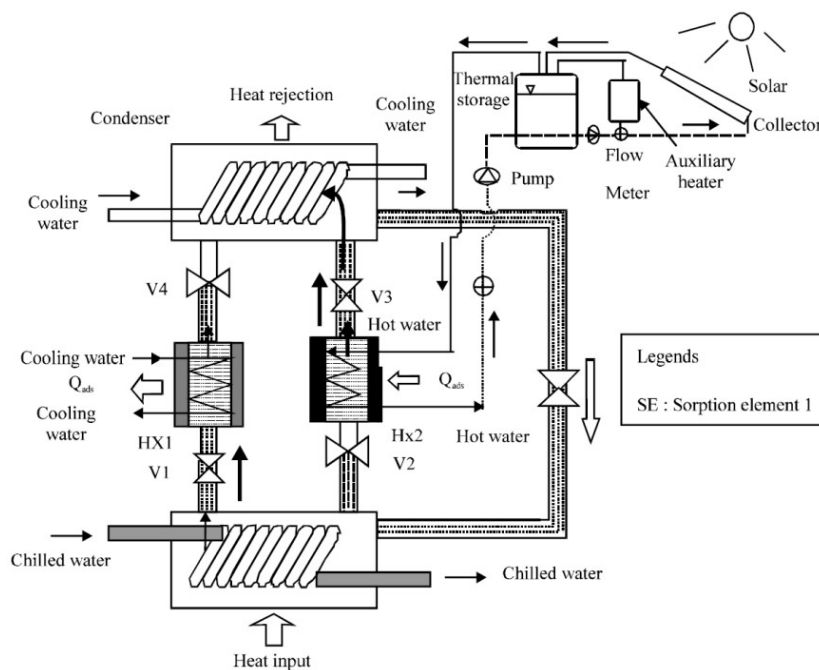


Fonte: SAHA et al., 2000.

Um estudo teórico de um sistema de refrigeração com dois leitos de simples estágio, como mostrado na figura 2.4, para as condições climáticas da Malásia foi realizado por Habib e Saha (2013) mediante simulação computacional. O adsorvente utilizado foi a fibra de carvão ativado e etanol como refrigerante. O resultado foi um COP de 0,30 para a temperatura de regeneração de 65°C e COP de 0,45 para temperatura de 85°C.

Miyazaki et al., (2014) estudou teoricamente o par carvão ativado e etanol, encontrando o COP de 0,48 e a potência específica de refrigeração de 140 W/kg na temperatura de 14°C para a evaporação, 30°C para a adsorção e 80°C para a dessorção.

Figura 2.4 – Sistema de Duplo Leito e Estágio Simples.

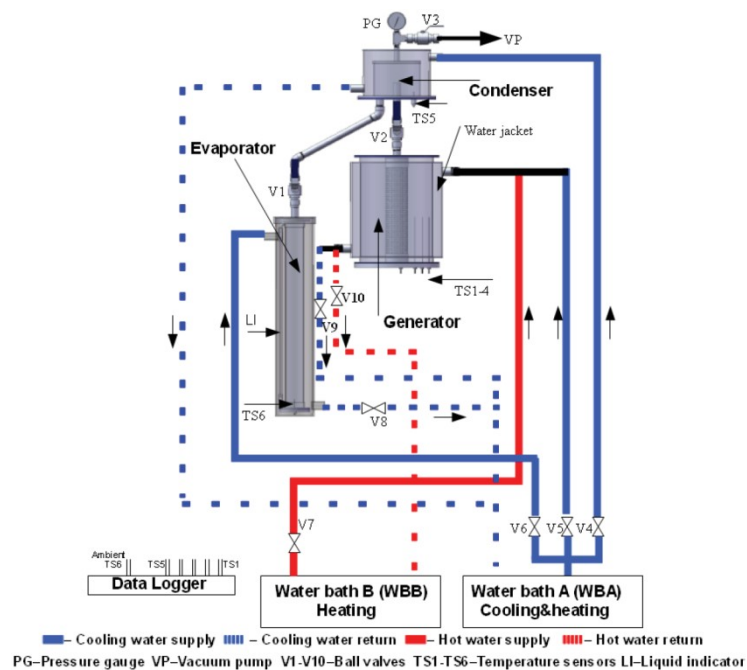


Fonte: HABIB et al., 2013.

Zhao (2011, p.96-97) conduziu experimentos e análise analítica de um sistema, mostrado na figura 2.5, com carvão ativado e metanol como par adsorativo. A temperatura de regeneração foi de até 90°C e a temperatura do evaporador entre -5° e 15°C, obtendo COP entre 0,2 e 0,5.

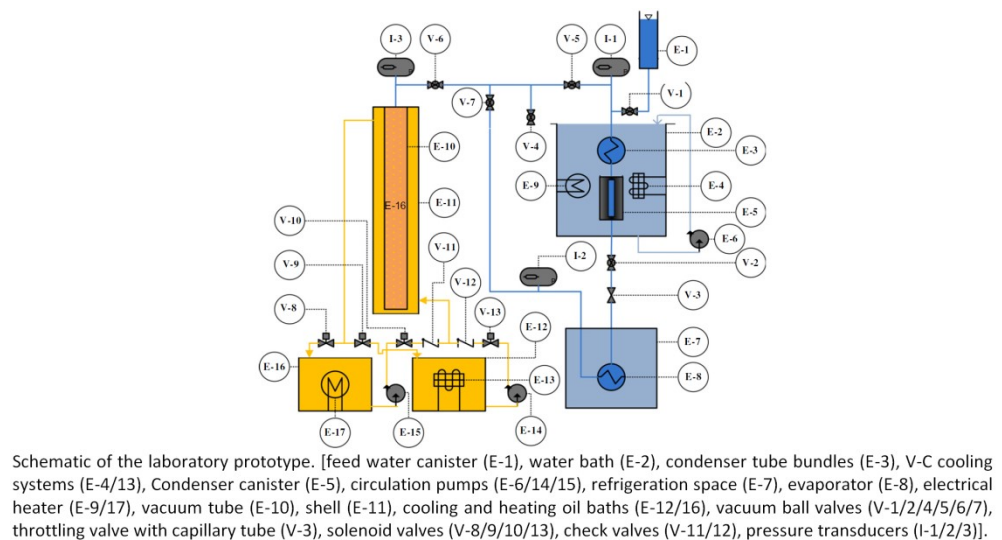
O par zeólita e água foi testado experimentalmente por Solmus et al. (2011) para as condições de temperatura de 45°C para a adsorção, 150°C a dessorção, 30°C a condensação e evaporação entre 10° e 22,5°C. O resultado obtido foi um COP de 0,25 e uma potência específica de refrigeração de 6.4 W/kg.

Figura 2.5 – Sistema de Adsorção com Carvão Ativado e Metanol.



Fonte: ZHAO, 2011.

Figura 2.6 – Sistema de Adsorção com Zeólita e Água.



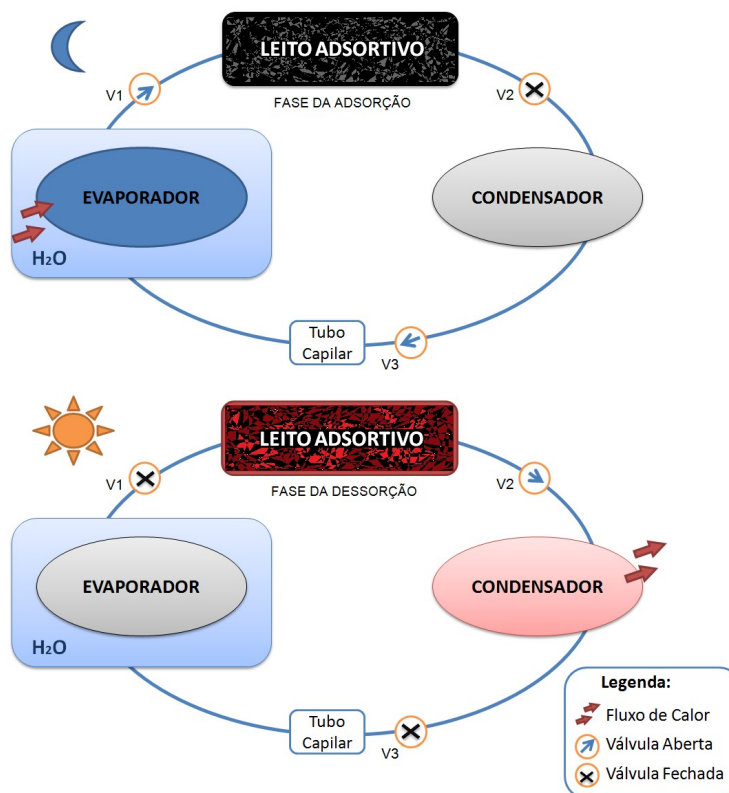
Fonte: SOLMUS et al., 2011.

2.6 O Sistema de Refrigeração Proposto

Como o intuito principal desse trabalho é desenvolver rigorosamente uma modelagem precisa para a simulação do ciclo adsorativo para um par adsorvente/adsorbato relativamente novo na literatura para aplicações em refrigeração, como é o caso do carvão ativado e etanol, optou-se pelo ciclo mais simples possível, sem a configuração de múltiplos estágios ou múltiplos leitos.

Assim, o conjunto é formado apenas por um evaporador, um leito de simples estágio, um condensador e um tubo capilar como mostrado a seguir.

Figura 2.7 – Funcionamento do Sistema Proposto.



Fonte: Autor.

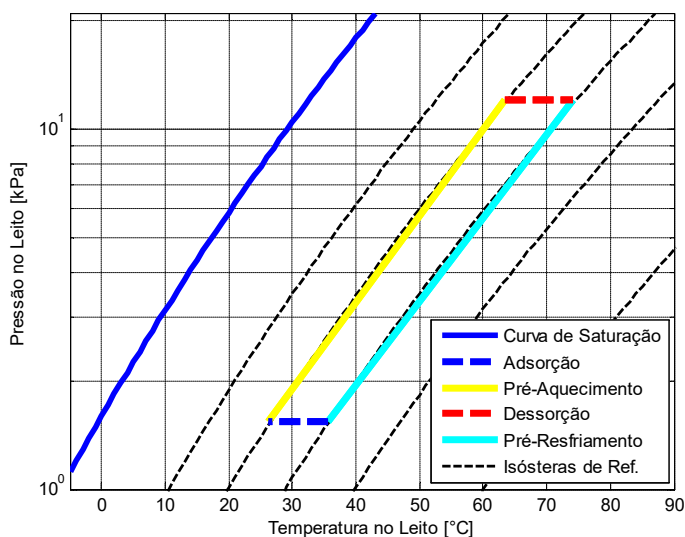
Durante a fase de adsorção, que ocorre no período noturno, somente as válvulas V1 e V3 estão abertas. Assim o fluido do evaporador pode migrar para o adsorvedor bem como o que está contido no condensador pode aos poucos realimentar o evaporador para que este não seque. Na etapa seguinte, a de pré-aquecimento ou simplesmente aquecimento, que ocorre nas primeiras horas do dia, todas as válvulas estão fechadas e o leito começa a aquecer com a radiação solar.

Quando o leito está suficientemente quente, a etapa de dessorção inicia-se com a abertura da válvula V2, mantendo as outras fechadas. Assim, o etanol começa a ser enviado para o condensador já que a concentração no leito para aquela temperatura está acima da condição de equilíbrio definida pela isoterma. Durante esta fase o leito continua a aumentar a temperatura até que a radiação solar disponível começa a cair antes do fim do dia. Então, a V2 é fechada e V3 aberta, iniciando-se a última fase do ciclo, a de pré-resfriamento ou simplesmente resfriamento.

Na última etapa do ciclo, o leito começa a diminuir a temperatura para que na etapa seguinte esteja apto a adsorver o etanol do evaporador e reiniciar o ciclo. A abertura de V3 é para que o condensador, que está a uma pressão maior, comece a reabastecer o evaporador com refrigerante, já que este se encontra relativamente vazio. Assim, no início da noite, somente V1 e V3 passam a ficar aberta reiniciando o ciclo com a fase de adsorção.

Todos esses processos podem ser representados no diagrama Pressão-Temperatura-Concentração, conhecido como diagrama de Dühring e que é mostrado na figura 2.8, onde se vê a curva de saturação do fluido refrigerante, as curvas de concentração constante (isósteras), que servem de referência, e as curvas das quatro etapas do ciclo.

Figura 2.8 – Diagrama Pressão-Temperatura-Concentração Teórico do Ciclo.



Fonte: Autor.

O diagrama acima é o modelo ideal do ciclo. Na prática, se espera alguns desvios, principalmente nas etapas de adsorção e dessorção, já que variações na transferência de calor no leito e nas temperaturas do evaporador e condensador levam ao afastamento do processo teórico. E, como a simulação deve considerar o máximo de fatores da forma mais real possível, espera-se observar nos resultados esses desvios que são conjecturados para um equipamento da realidade.

3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Um dos fatores que mais influenciam o sistema de refrigeração por adsorção solar é justamente as condições climáticas da região na qual o equipamento venha estar em operação. Isso porque as temperaturas atingidas no leito adsorativo dependem diretamente da irradiação instantânea captada pelo leito e das horas de insolação diária disponível. Consequentemente as concentrações no leito e a velocidade de reação são fortemente afetadas.

Das temperaturas ambientais diárias e noturnas da região, assim como da velocidade do vento, dependem os fenômenos de transferência de calor por convecção no leito e no condensador que por sua vez interfere no funcionamento de todo o sistema.

Os dados das condições do clima foram extraídos do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a partir do software livre RADIASOL2 desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

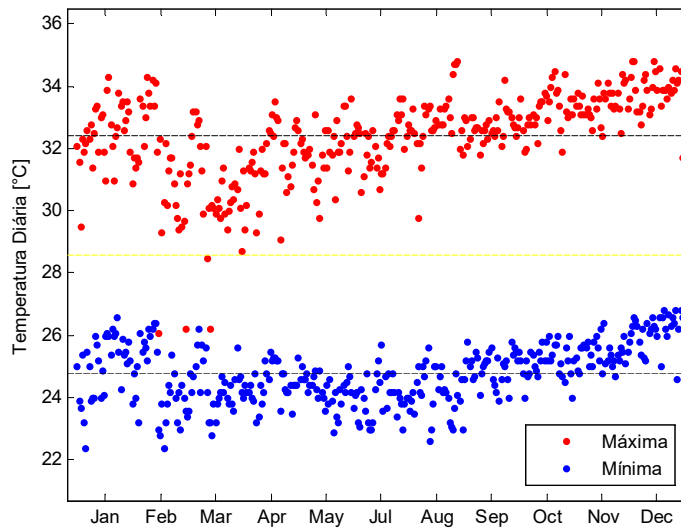
3.1 Análise das Condições Climáticas

O clima de São Luis é caracterizado por temperaturas altas, com sua máxima diária um pouco acima dos 32°C e sua mínima um pouco abaixo dos 25°C como se vê na figura 3.1.

As altas temperaturas do dia são oportunas ao colaborar com o aquecimento do leito, em contrapartida, desfavoráveis ao arrefecimento do condensador, ao suscitar menor transferência de calor, elevando ligeiramente sua temperatura.

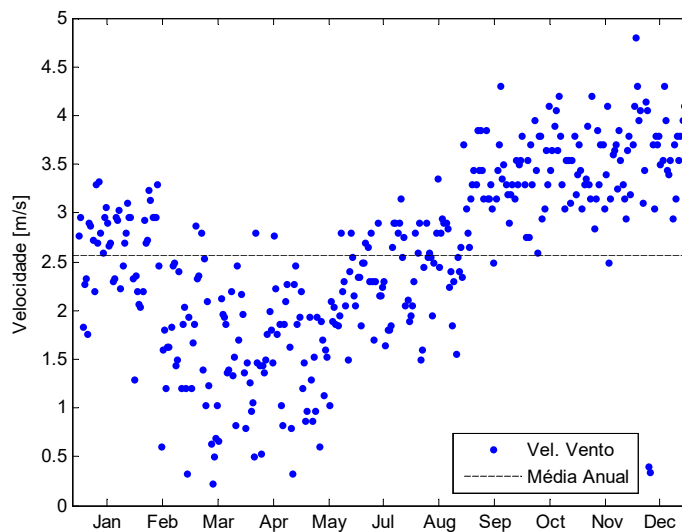
Por se tratar de uma região litorânea do nordeste brasileiro, mais especificamente uma ilha, existe uma presença constante de ventos, como é mostrado na figura 3.2. Valendo ressaltar que rajadas de ventos podem assumir valores consideravelmente maiores e mais freqüentes, principalmente nos últimos meses do ano, o que é propício ao resfriamento do condensador que ocorre naturalmente por convecção sem algum elemento que force fluxo de ar através de seus tubos.

Figura 3.1 – Temperaturas Máximas e Mínimas em São Luis no ano de 2015



Fonte: Próprio autor. Dados: INMET

Figura 3.2 – Velocidade Média do Vento em São Luis no ano de 2015

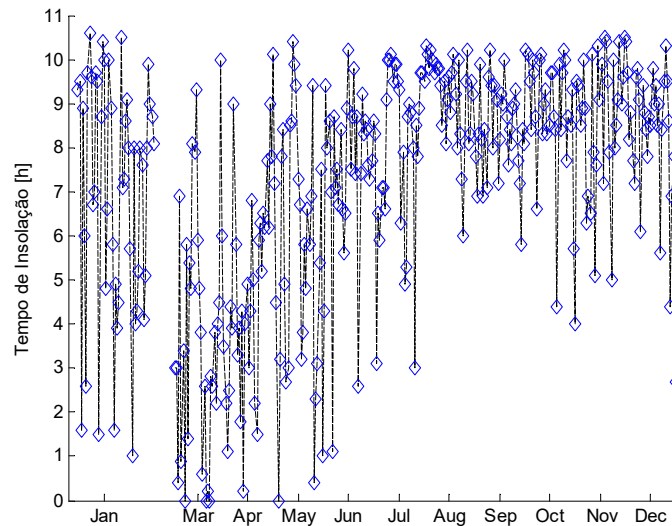


Fonte: Próprio autor. Dados: INMET

As duas características mais relevantes no comportamento do sistema a energia solar são as horas de insolação diárias e a intensidade instantânea de radiação solar. Quanto a estes dois fatores, o Brasil é favorecido com as melhores possíveis, ainda mais na região nordeste. Como é possível observar nas figuras 3.3 e 3.4, São Luis apresenta para os últimos meses do ano uma insolação diária forte de cerca de sete a onze horas e para os primeiros meses apresenta grandes variações decorrentes da nebulosidade do início do período chuvoso. Apresentando valores altos de insolação mensal mesmo no período chuvoso. Salienta-se que o

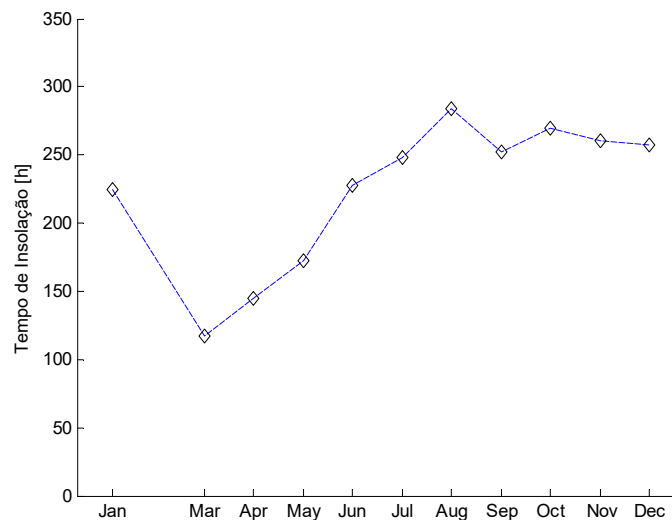
INMET não possui dados disponíveis para alguns dias do mês de fevereiro do ano de 2015.

Figura 3.3 – Insolação Diária em São Luis no ano de 2015



Fonte: Próprio autor. Dados: INMET

Figura 3.4 – Insolação Mensal em São Luis no ano de 2015



Fonte: Próprio autor. Dados: INMET

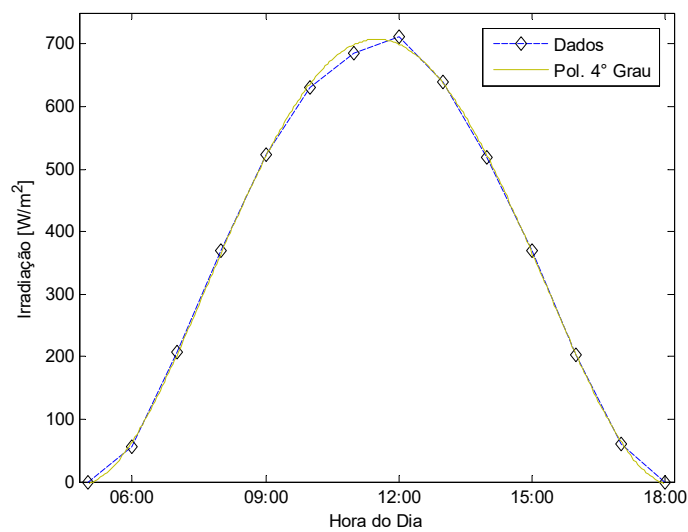
3.2 O Modelo para a Radiação Média Horária

Para a intensidade da irradiação solar horária utilizou-se o RADIASOL2 que além de contar com uma grande quantidade de informações, realiza o cálculo para intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas, poupando tempo e sendo mais confiável ao realizar todas as operações matemáticas envolvendo

trigonometria e modelos de distribuição temporal e espacial que não são o foco deste trabalho.

A radiação horária média foi calculada utilizando os dados, de um ano inteiro, que foram exportados para o Excel e depois para o Matlab onde se encontrou um polinômio de ajuste de quarto grau para correlacionar a intensidade da radiação com a hora do dia. Abaixo, mostra-se o gráfico com os dados e o polinômio de ajuste.

Figura 3.5 – Intensidade da Radiação Horária Média em São Luis



Fonte: Próprio autor. Dados: RADIASOL2

O polinômio de ajuste obtido é:

$$Rad(t) = \begin{cases} a \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d \cdot t + e, & 5 \leq t \leq 18 \\ 0, & t \notin [5, 18] \end{cases} \quad [3-1]$$

Onde:

$$a = 0.36655; \quad b = -16.872; \quad c = 258.98; \quad d = -1492.1; \quad e = 2866.83;$$

3.3 O Modelo para a Temperatura Ambiental

Um fato marcante no comportamento do sistema de refrigeração por adsorção são as influências ocasionadas pela variação de temperatura ambiental ao longo das horas do dias. Isso faz necessário um modelo para prever a temperatura

horária levando em consideração os dados meteorológicos da localidade. Para isso, foi utilizado um modelo desenvolvido pela ASHRAE cuja equação é dada por:

$$T_{amb}(t) = T_{max} - \frac{f(t)}{100} \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad [3-2]$$

Onde T_{max} e T_{min} são as temperaturas máximas e mínimas baseadas nos dados meteorológicos respectivamente e f é um fator definido pela tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fator da equação para a temperatura diária

Hora	f	Hora	f	Hora	f
1	82	9	84	17	3
2	87	10	71	18	10
3	92	11	56	19	21
4	96	12	39	20	34
5	99	13	23	21	47
6	100	14	11	22	58
7	98	15	3	23	68
8	93	16	0	24	76

Fonte: Próprio autor. Dados: ASHRAE

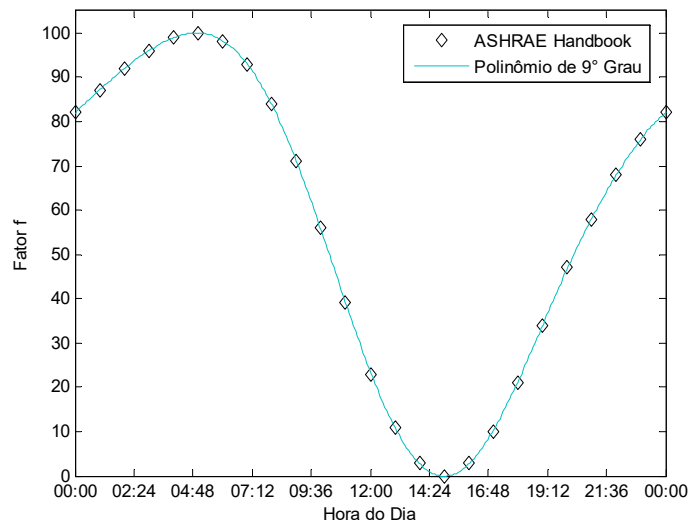
Como o fator f é definido para cada hora e existe um interesse de conhecer a temperatura ao longo de todo o dia, é recomendado, segundo a literatura, a utilização de um polinômio de ajuste de nono grau para correlacionar os valores de f para cada instante do dia. O polinômio disponível na literatura (ISMAIL, 2010) é também fácil de ser encontrado utilizando o Matlab e está definido pela expressão abaixo, cujo gráfico com os valores do fator e a curva de ajuste é mostrado na figura 3.6.

$$f(x) = a \cdot x^9 + b \cdot x^8 + c \cdot x^7 + d \cdot x^6 + e \cdot x^5 + f \cdot x^4 + g \cdot x^3 + h \cdot x^2 + i \cdot x + j \quad [3-3]$$

Onde:

$$\begin{aligned} a &= -2.7512 \cdot 10^{-8}; & f &= 0.11633; \\ b &= 2.8209 \cdot 10^{-6}; & g &= -0.34719; \\ c &= -0.00011422; & h &= 0.32303; \\ d &= 0.0022873; & i &= 5.0908; \\ e &= -0.023254; & j &= 81.963; \end{aligned}$$

Figura 3.6 – Os valores do fator e a curva de ajuste



Fonte: Próprio autor. Dados: ASHRAE

Porém, análises realizadas durante este trabalho, levaram a concluir que este polinômio pode produzir erros ou desvios, caracterizados inclusive por uma aparente descontinuidade entre os valores de x correspondentes aos horários de 23:59 PM e 0:00 AM, quando se cria uma *function* com tal polinômio para calcular os valores de f . Isto porque os coeficientes do polinômio apresentam ordem de grandeza muito variada e distante uns dos outros, assim os arredondamentos computacionais inerentes ao próprio Matlab conduzem a tais desvios. Uma solução ótima e simples para esse problema é fazer uma mudança de variável de x para z como é mostrado abaixo.

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma}, \text{ onde: } \mu = 12, \sigma = 7.3598; \quad [3-4]$$

Assim o polinômio fica:

$$f(z) = a \cdot z^9 + b \cdot z^8 + c \cdot z^7 + d \cdot z^6 + e \cdot z^5 + f \cdot z^4 + g \cdot z^3 + h \cdot z^2 + i \cdot z + j \quad [3-5]$$

$$a = -1.7431; \quad f = -42.724;$$

$$b = -1.2954; \quad g = 123.23;$$

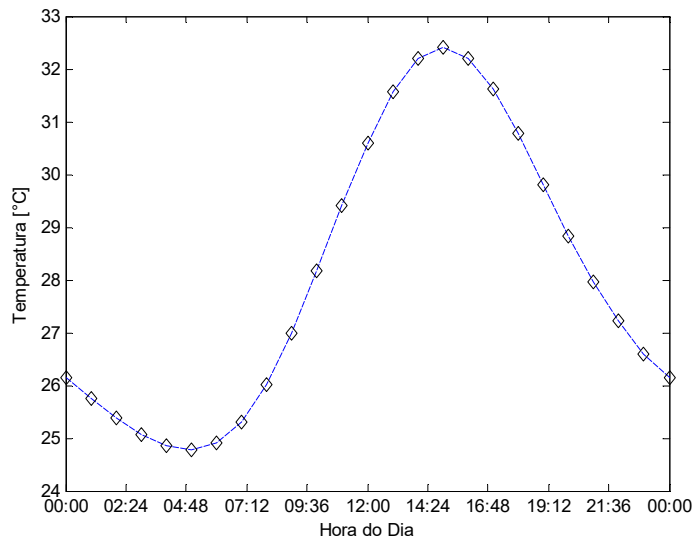
$$c = 16.323; \quad h = 78.087;$$

$$d = 11.572; \quad i = -106.01;$$

$$e = -62.43; \quad j = 23.619;$$

E nota-se que assim os coeficientes têm ordem de grandeza não distante uns dos outros como anteriormente. E, agora o polinômio para o fator f pode ser utilizado no modelo da ASHRAE para encontrar a temperatura horária como é mostrada no gráfico da figura 3.6.

Figura 3.6 – Temperatura horária baseada no modelo da ASHRAE



Fonte: Próprio autor.

Na figura acima é possível ver que a temperatura alcança seu máximo por volta das quinze horas. E, o seu mínimo se dá próximo ao amanhecer, cerca de cinco horas da manhã.

4. PROPRIEDADES DO FLUIDO REFRIGERANTE

Durante o ciclo térmico, as propriedades do fluido são regidas de acordo com as pressões e temperaturas na qual este está submetido. O que não é problema quando estes valores não variam com o tempo, podendo ser obtido a partir de tabelas ou software como o EES. Todavia, durante a simulação que ocorre em regime transiente, os valores das propriedades do fluido refrigerante começam a variar muito à medida que as temperaturas e pressões nos componentes do sistema variam ao longo do tempo. E, caso este comportamento não seja levado em consideração, desvios aparentemente pequenos ou medianos nos valores de trocas de calor e temperaturas, podem ocasionar sinuoso erro no cálculo do COP. Isto, sem considerar a completa impossibilidade de encontrar o valor de equilíbrio, quilos de etanol por quilo carvão, da isoterma durante o ciclo.

Uma vez que a simulação seria realizada no Matlab, e este não possui funções próprias ou banco de dados para retornar o valor de alguma propriedade de um fluido qualquer quando esta é solicitada pelo usuário, se faz indispensável o uso do EES que possui tal capacidade, mas ainda sim não está resolvido o problema de obter o valor de algumas propriedades termodinâmicas atualizadas a cada instante à medida que temperaturas e pressões mudam.

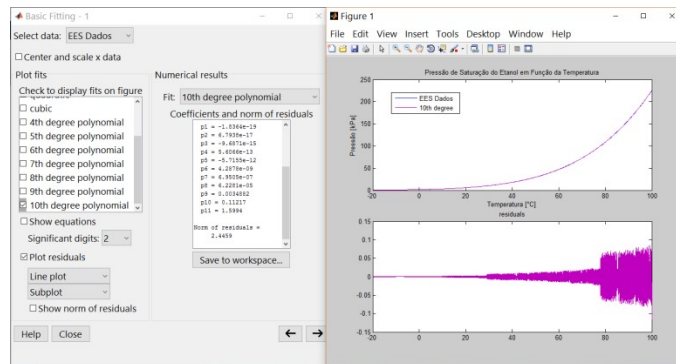
A solução para este empecilho foi utilizar a ferramenta “Parametric Table” do EES para calcular, por exemplo, a entalpia do líquido saturado em uma ampla faixa de valores de temperatura. Os valores obtidos são enviados para uma planilha de Excel para posteriormente serem importados pelo Matlab, onde são plotados (entalpia versus temperatura, como exemplo) e tais valores passam por ajuste polinomial por meio da função “polyfit(x,y,n)” própria do Matlab ou de sua ferramenta “Basic Fitting”, sendo esta última preferida.

4.1 Funções Polinomiais para as Propriedades do Fluido

Das propriedades do fluido, uma das mais valiosas para se efetuar a simulação e os cálculos das isotermas é a pressão de saturação em função da temperatura, já que o equilíbrio na fase de adsorção depende da relação da pressão de saturação do fluido refrigerante na temperatura do evaporador e do leito adsorativo. Na figura 4.1, mostra-se a utilização da ferramenta “Basic Fitting” no

processo de encontrar um polinômio que se ajuste aos dados extraídos do EES para a pressão de saturação do etanol em função da temperatura.

Figura 4.1 – Janela *Basic Fitting* do Matlab

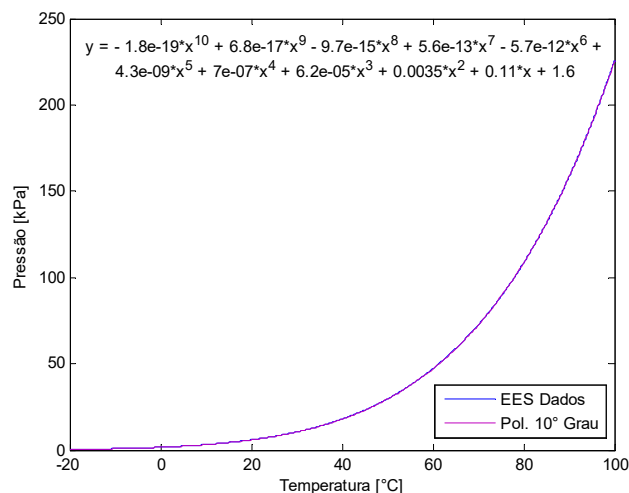


Fonte: Próprio autor.

Na parte superior, encontram-se os dados do EES e a curva polinômial de décimo grau que se ajustam tão bem que somente com o uso do zoom é possível notar pequenos afastamentos. Na parte inferior, vê-se o gráfico dos resíduos ou desvios entre os dados e o polinômio, sendo estes menores que 0,045%.

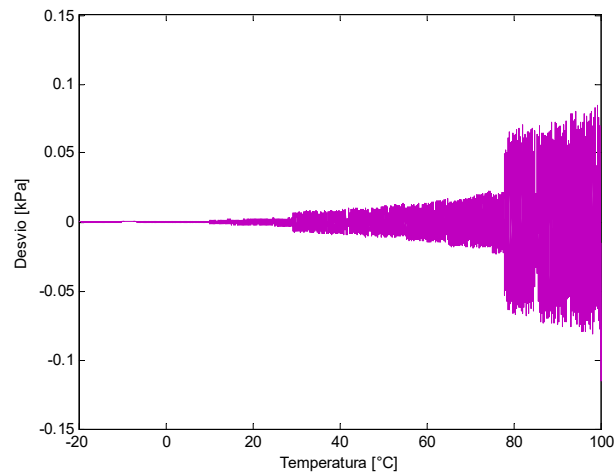
Igual procedimento é realizado para os dados das demais propriedades e para melhor visualização, as próximas figuras mostram apenas os gráficos com as curvas a partir dos dados e do polinômio de ajuste cuja equação é mostrada na parte superior da figura, seguida dos gráficos com os respectivos desvios para as propriedades: pressão de saturação, entalpia do líquido saturado, entalpia do vapor saturado, calor específico do líquido saturado e calor específico do vapor saturado.

Figura 4.2 – Pressão de saturação do etanol em função da temperatura.



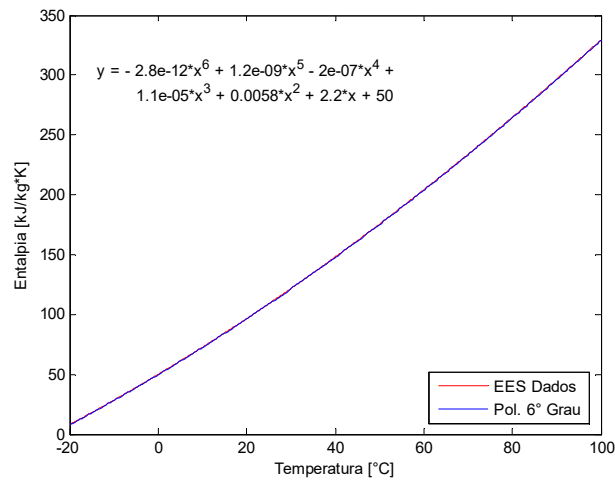
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.3– Desvios do polinômio de ajuste para a pressão de saturação do etanol.



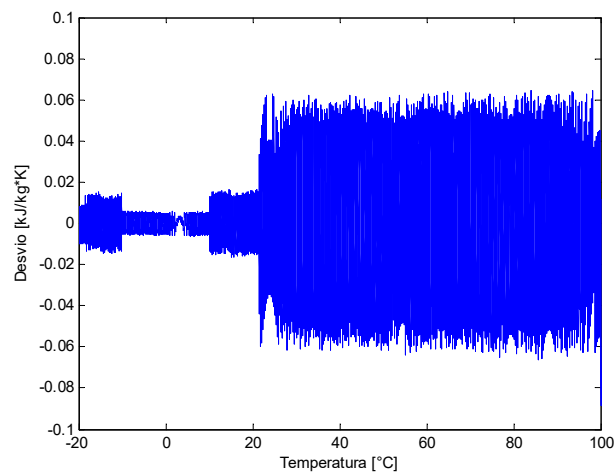
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.4 – Entalpia de líquido saturado para o etanol em função da temperatura.



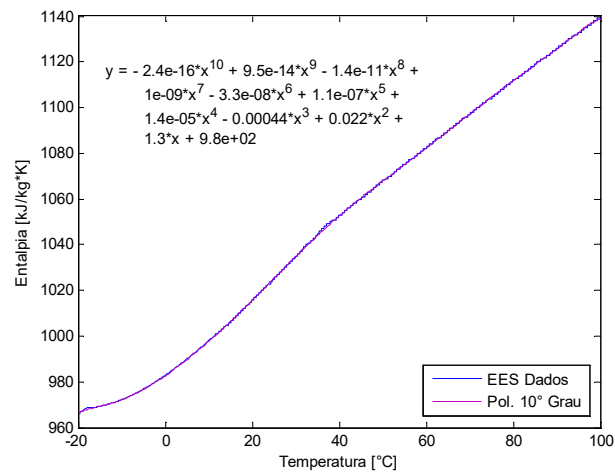
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.5 – Desvios do polinômio para a entalpia de líquido saturado do etanol.



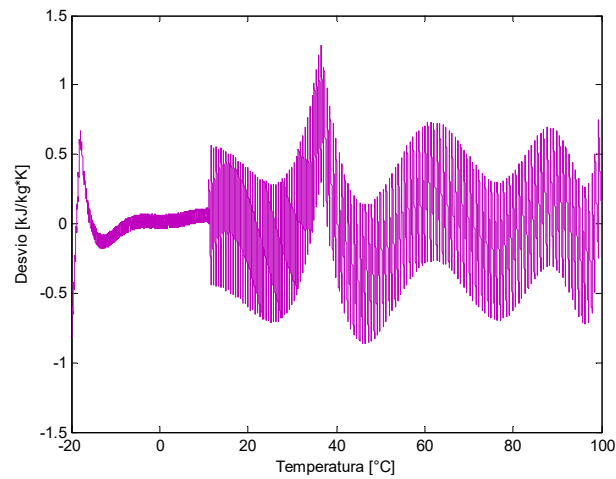
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.6 – Entalpia de vapor saturado para o etanol em função da temperatura.



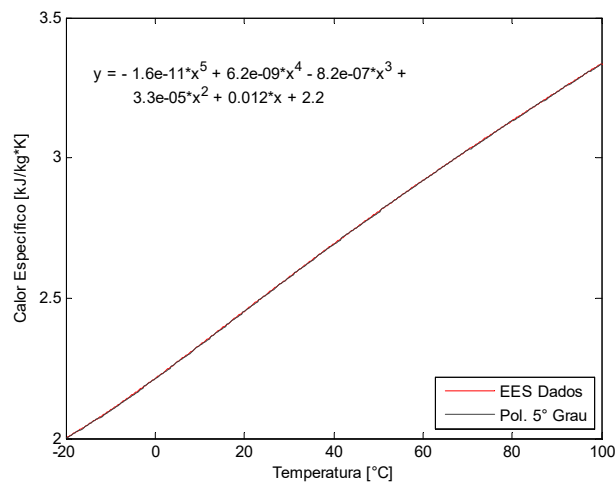
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.7 – Desvios do polinômio para a entalpia de vapor saturado do etanol.



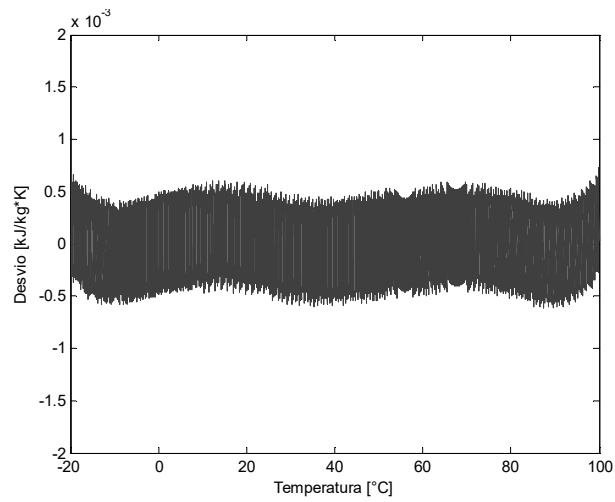
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.8 – Calor específico do líquido saturado em função da temperatura.



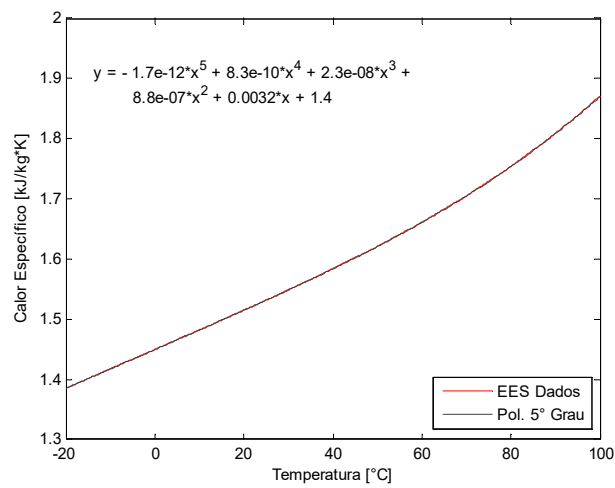
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.9 – Desvios do polinômio para o calor específico do líquido saturado.



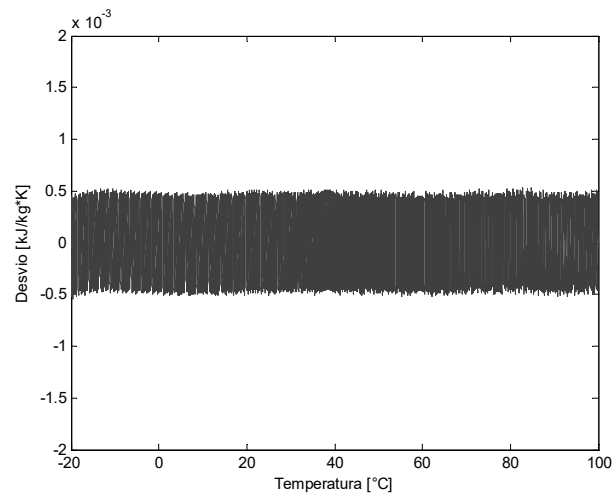
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.10 – Calor específico do vapor saturado em função da temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.11 – Desvios do polinômio para o calor específico do vapor saturado.



Fonte: Próprio autor.

Como é possível perceber a partir dos gráficos, os resíduos ou desvios entre os polinômios de ajuste e os dados provenientes do EES para as propriedades do etanol são tão pequenos que são desprezíveis, o que contribui para uma notável precisão.

Vale ressaltar que a validade para tais equações se dá apenas na faixa de temperatura entre -20 °C e 100 °C na qual estas propriedades foram mapeadas, e que valores fora dessa região podem produzir valores divergentes com a realidade. O aumento dessa faixa de valores se faz desnecessário já que os valores simulados estarão dentro dos limites estipulados e quanto menor a faixa, melhor o ajuste polinomial e a precisão.

Os valores dos coeficientes das funções polinomiais foram mostrados, nos gráficos, com apenas dois dígitos significativos, sendo mostrados abaixo em seus valores plenos. Valendo ressaltar que não foram percebidos desvios significativos em virtude da distância da ordem de grandeza entre alguns coeficientes do mesmo polinômio. E, no Apêndice C estão as “function” criadas no Matlab com estes polinômios.

Polinômio para a pressão de saturação:

$$P_{sat}(T) = aT^{10} + bT^9 + cT^8 + dT^7 + eT^6 + fT^5 + gT^4 + hT^3 + iT^2 + jT + l \quad [4-1]$$

$$\begin{aligned} a &= -1.8364 \cdot 10^{-19}; & e &= -5.7155 \cdot 10^{-12}; & i &= 0.0034882; \\ b &= 6.7938 \cdot 10^{-17}; & f &= 4.2878 \cdot 10^{-09}; & j &= 0.11217; \\ c &= -9.6871 \cdot 10^{-15}; & g &= 6.9505 \cdot 10^{-07}; & l &= 1.5994; \\ d &= 5.6066 \cdot 10^{-13}; & h &= 6.2281 \cdot 10^{-05}; \end{aligned}$$

Polinômio para a entalpia do líquido saturado:

$$h_{liquido}(T) = aT^6 + bT^5 + cT^4 + dT^3 + eT^2 + fT + g \quad [4-2]$$

$$\begin{aligned} a &= -2.7959 \cdot 10^{-12}; & e &= 0.005819; \\ b &= 1.2358 \cdot 10^{-09}; & f &= 2.212; \\ c &= -2.0466 \cdot 10^{-07}; & g &= 49.603; \\ d &= 1.0903 \cdot 10^{-05}; \end{aligned}$$

Polinômio para a entalpia do vapor saturado:

$$h_{\text{vapor}}(T) = aT^{10} + bT^9 + cT^8 + dT^7 + eT^6 + fT^5 + gT^4 + hT^3 + iT^2 + jT + l \quad [4-3]$$

$$\begin{aligned} a &= -2.4236 \cdot 10^{-16}; & e &= -3.3025 \cdot 10^{-08}; & i &= 0.021861; \\ b &= 9.4899 \cdot 10^{-14}; & f &= 1.1205 \cdot 10^{-07}; & j &= 1.3166; \\ c &= -1.4466 \cdot 10^{-11}; & g &= 1.368 \cdot 10^{-05}; & l &= 982.63; \\ d &= 1.0478 \cdot 10^{-09}; & h &= -0.0004397; \end{aligned}$$

Polinômio para o calor específico do líquido saturado:

$$cp_{\text{líquido}}(T) = aT^5 + bT^4 + cT^3 + dT^2 + eT + f \quad [4-4]$$

$$\begin{aligned} a &= -1.632 \cdot 10^{-11}; & d &= 3.3082 \cdot 10^{-05}; \\ b &= 6.1683 \cdot 10^{-09}; & e &= 0.011634; \\ c &= -8.2483 \cdot 10^{-07}; & f &= 2.2119; \end{aligned}$$

Polinômio para o calor específico do vapor saturado:

$$cp_{\text{vapor}}(T) = aT^5 + bT^4 + cT^3 + dT^2 + eT + f \quad [4-5]$$

$$\begin{aligned} a &= -1.7387 \cdot 10^{-12}; & d &= 8.7805 \cdot 10^{-07}; \\ b &= 8.3 \cdot 10^{-10}; & e &= 0.003231; \\ c &= 2.3062 \cdot 10^{-08}; & f &= 1.4495; \end{aligned}$$

5. MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático utilizado neste trabalho sofre influência do que foi proposto por Miyazaki et al. (2014), na qual foi adaptado ao sistema aqui proposto. Isto se deve ao fato que no sistema proposto por Miyazaki, durante a etapa de adsorção, o leito é arrefecido por um fluxo de água próxima à temperatura ambiente e, na etapa de dessorção é aquecido por um fluxo de água quente cuja vazão e temperatura pode ser fixada. Enquanto que no presente trabalho, durante a adsorção, o leito que se encontra acima da temperatura ambiente é resfriado naturalmente por convecção com o ar atmosférico e por radiação, sendo que a troca por radiação é praticamente desprezível comparada com a convecção. E, na etapa de dessorção, o leito é aquecido pela irradiação solar cuja intensidade varia com as horas do dia.

No trabalho de Miyazaki, o condensador é resfriado por fluxo de água, e o evaporador faz o resfriamento de um fluxo controlado de água que entra em contato com sua serpentina, entrando à temperatura ambiente e saindo gelada do evaporador. Enquanto neste, a serpentina do evaporador se encontra dentro de um reservatório térmico que armazena o fluido a ser resfriado, a água, trocando calor com este por convecção natural. E, o condensador sofre arrefecimento por radiação e por convecção natural com o ar atmosférico.

Uma modificação relevante aqui realizada é que além do uso de quatro equações que modelam o evaporador, o leito, o condensador e a velocidade de reação, foram inseridas três equações das quais duas governam as vazões mássicas de entrada e saída de etanol em cada um dos elementos do sistema, isto porque a massa de refrigerante em cada componente não permanece constante durante o ciclo e, uma equação para o volume de controle que envolve a massa de água a ser refrigerada. Durante a adsorção, a massa de etanol cai no evaporador haja vista que o fluxo de saída supera o de entrada, já no condensador, durante a dessorção, a massa de fluido refrigerante aumenta tendo em vista que o fluxo de entrada é maior.

E, outra modificação, advém do fato de Miyazaki ter considerado que toda a massa de etanol presente no evaporador está no estado líquido, porém o fluido no estado de líquido saturado ou líquido resfriado que sai do condensador e sofre o processo de expansão isoentálpica chega ao estágio de baixa pressão como uma

composição de líquido saturado e vapor saturado, ou seja, a mistura apresenta um título, proporção de vapor saturado na mistura. E, como o efeito de resfriamento ocasionado no evaporador provém em quase sua totalidade da mudança de fase do fluido refrigerante de líquido saturado para vapor saturado, faz-se necessário saber quanto é a proporção de vapor saturado já presente no evaporador e que não contribui para o efeito frigorífico. Para isto, foi introduzida uma função que calcula a cada instante o título da mistura que chega ao evaporador com base nas temperaturas do condensador e evaporador.

O modelo matemático desenvolvido por Miyazaki cujo sistema de equações modela a velocidade de reação (VR) e as trocas de calor no leito adsorvente (LA), condensador (CO) e evaporador (EV) respectivamente é mostrado abaixo:

Modelagem de Miyazaki para a etapa de adsorção

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw_b}{dt} = 15 \frac{D_p}{R_p^2} (W_b - w_b) \quad (\text{VR}) \\ (M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b) \frac{dT_b}{dt} = \dot{m}_{ca} c_{ca} \epsilon_{ca} (T_{ca,i} - T_b) + [Q_s + c_{rv} (T_e - T_b)] M_s \frac{dw_b}{dt} \quad (\text{LA}) \\ (M_{crl} c_{rl} + M_c c_c) \frac{dT_c}{dt} = \dot{m}_{cc} c_{cc} \epsilon_{cc} (T_{cc,i} - T_c) \quad (\text{CO}) \\ (M_{erl} c_{rl} + M_e c_e) \frac{dT_e}{dt} = \dot{m}_{ch} c_{ch} \epsilon_{ch} (T_{ch,i} - T_e) - [L_r - c_{rl} (T_c - T_e)] M_s \frac{dw_b}{dt} \quad (\text{EV}) \end{array} \right.$$

Modelagem de Miyazaki para a etapa de dessorção

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw_b}{dt} = 15 \frac{D_p}{R_p^2} (W_b - w_b) \quad (\text{VR}) \\ (M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b) \frac{dT_b}{dt} = \dot{m}_h c_h \epsilon_h (T_{h,i} - T_b) + Q_s M_s \frac{dw_b}{dt} \quad (\text{LA}) \\ (M_{crl} c_{rl} + M_c c_c) \frac{dT_c}{dt} = \dot{m}_{cc} c_{cc} \epsilon_{cc} (T_{cc,i} - T_c) - [L_r + c_{rv} (T_b - T_c)] M_s \frac{dw_b}{dt} \quad (\text{CO}) \\ (M_{erl} c_{rl} + M_e c_e) \frac{dT_e}{dt} = \dot{m}_{ch} c_{ch} \epsilon_{ch} (T_{ch,i} - T_e) \quad (\text{EV}) \end{array} \right.$$

Os índices subscritos 'ca', 'cc', 'ch' e 'h' das equações acima significam respectivamente: água fria para o adsorvedor, água fria para o condensador, água gelada e água quente.

Para a etapa de resfriamento é necessário apenas colocar $dw_b/dt = 0$ no sistema de equações da etapa de adsorção e, para a etapa de aquecimento faz-se o mesmo procedimento, porém no sistema de equações da dessorção.

5.1 Modelagem para a Etapa de Adsorção

5.1.1 Equação da Velocidade de Reação

Esta equação governa a variação da concentração de quilos de etanol por quilos de carvão ativado no leito adsorativo por unidade de tempo, ou seja rege a cinética do fenômeno de adsorção, sendo definida pela expressão:

$$\frac{dw_b}{dt} = 15 \frac{D_p}{R_p^2} (W_b - w_b) \quad [5-1]$$

Onde, D_p é dependente a temperatura de adsorção e definida pela Lei de Arrhenius como $D_p = D_o e^{\frac{-E_a}{RT}}$ (Suzuki, 1990). De tal modo que a equação fica:

$$\frac{dw_b}{dt} = 15 (W_b - w_b) \frac{D_o}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad [5-2]$$

Onde, w_b é a concentração instantânea em um dado momento e W_b é a concentração a ser atingida naquele instante e que depende das temperaturas do leito e do evaporador, sendo governada pela isoterma de Dubinin-Astakhov que já foi discutida anteriormente e é mostrada novamente:

$$W_b = W_o \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right]; \quad A = RT \ln \left(\frac{P_o}{P} \right) \quad [5-3]$$

5.1.2 Equação para o Leito Adsorativo

Admitindo o leito adsorativo como volume de controle na qual se aplica a primeira lei da termodinâmica, onde a energia acumulada por unidade de tempo é igual à diferença de energia que entra e sai do volume de controle. Foi admitido que tanto o sólido adsorvente quanto o material metálico que forma a câmara do leito estão na mesma temperatura. Do lado direito vemos a perda de calor por convecção natural, o ganho de energia pelo fenômeno exotérmico de adsorção e a troca de calor com o vapor que entra no leito vindo do evaporador respectivamente.

$$(M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b) \frac{dT_b}{dt} = h_b A_b (T_{amb} - T_b) + Q_s M_s \frac{dw_b}{dt} + c_{rv} (T_e - T_b) M_s \frac{dw_b}{dt} \quad [5-4]$$

5.1.3 Equação para o Evaporador

Seguido raciocínio similar ao do leito, definido o evaporador como o volume de controle, tem-se do lado direito da equação: o ganho de energia pelo resfriamento da água, a perda por calor latente de evaporação do fluido refrigerante, e o ganho advindo da entrada de fluido refrigerante proveniente do condensador respectivamente.

$$(M_{erl} c_{rl} + M_{erv} c_{rv} + M_e c_e) \frac{dT_e}{dt} = h_{H2O} A_e (T_{H2O} - T_e) - L_r M_s \frac{dw_b}{dt} + c_{rl} (T_c - T_e) \frac{dM_{crl}}{dt} \quad [5-5]$$

As massas de refrigerante no estado de vapor (M_{erv}) e no estado líquido (M_{erl}) no evaporador podem ser substituídas pela massa total de refrigerante no evaporador (M_{er}) e pelo título na mistura (x).

$$M_{erv} = x M_{er}, \quad M_{erl} = (1-x) M_{er}, \quad x(T_c, T_e) = \frac{h_{liq}(T_c) - h_{liq}(T_e)}{h_{vap}(T_e) - h_{liq}(T_e)} \quad [5-6]$$

Assim, equação para o evaporador fica:

$$\left((1-x)M_{er}c_{rl} + xM_{er}c_{rv} + M_e c_e\right) \frac{dT_e}{dt} = h_{H_2O} A_e (T_{H_2O} - T_e) - L_r M_s \frac{dw_b}{dt} + c_{rl} (T_c - T_e) \frac{dM_{crl}}{dt} \quad [5-7]$$

5.1.4 Equação para o Condensador

Neste componente, durante a adsorção, basicamente existe a perda de calor por convecção e por radiação. E, é claro que a massa de refrigerante diminui devido à saída para o evaporador e nenhum fluxo de entrada vindo do leito nessa etapa. Esta diminuição está relacionada ao termo M_{crl} que varia ao longo do tempo.

$$(M_{crl}c_{rl} + M_c c_c) \frac{dT_c}{dt} = h_c A_c (T_{amb} - T_c) + \varepsilon A_c \sigma (T_{amb}^4 - T_c^4) \quad [5-8]$$

5.1.5 Equação para a Água Refrigerada

A água perde calor para o evaporador por convecção natural com o contato com a serpentina do evaporador e recebe calor a partir do ambiente externo através do contato com as paredes do reservatório que possui uma resistência térmica total (R_{ter}).

$$M_{H_2O} c_{H_2O} \frac{dT_{H_2O}}{dt} = h_{H_2O} A_e (T_e - T_{H_2O}) + \frac{(T_{amb} - T_{H_2O})}{R_{ter}} \quad [5-9]$$

5.1.6 Equação para o Fluxo de Refrigerante no Evaporador

Nessa etapa ocorre a saída de refrigerante que é adsorvido pelo carvão ativado e cuja taxa depende da velocidade de reação, em contrapartida, há a entrada de refrigerante vindo do condensador e cuja taxa é função da diferença de pressão entre esses dois componentes e da geometria do tubo capilar que os conecta. Do lado direito da equação se vê a saída de etanol para o leito e a entrada a partir do condensador respectivamente.

$$\frac{dM_{er}}{dt} = -M_s \frac{dw_b}{dt} + d_e \cdot 1000 \frac{\pi (P_c - P_e) D_{cap}^4}{128 \mu L_{cap}} \quad [5-10]$$

5.1.7 Equação para o Fluxo de refrigerante no Condensador

Durante esta etapa, o único fluxo no condensador é de saída de etanol para o evaporador. A vazão mássica com já foi dito, é tratada como sendo função da queda de pressão no escoamento laminar completamente desenvolvido através do tubo capilar.

$$\frac{dM_{crl}}{dt} = -d_e \cdot 1000 \frac{\pi (P_c - P_e) D_{cap}^4}{128 \mu L_{cap}} \quad [5-11]$$

5.2 Modelagem para a Etapa de Dessorção

Para a fase de dessorção, as equações também são provenientes da aplicação da primeira lei da termodinâmica admitindo cada elemento como volume de controle a cada vez como foi feito anteriormente na fase de adsorção, porém considerando as mudanças como o fato do leito passar a receber energia irradiada pelo sol e liberar o etanol pelo processo endotérmico. No condensador ocorre o aumento de temperatura devido a entrada de vapor quente e o ganho por calor latente na condensação deste. No evaporador, o efeito frigorígeno cessa já que o leito passa a não absorver o etanol. E, a velocidade de reação assume valores negativos na propensão a liberar o etanol adsorvido no leito.

5.2.1 Equação da Velocidade de Reação

Uma vez que a temperatura no leito aumenta, a dependência de equilíbrio é a diminuição da concentração, e uma vez que o valor da concentração de equilíbrio da isoterma assume um valor abaixo da concentração no leito naquele mesmo instante, $(W_b - w_b)$ apresenta um valor negativo que leva a diminuição da concentração no leito como forma de atingir o equilíbrio governado pela isoterma de adsorção para aquela temperatura.

$$\frac{dw_b}{dt} = 15 \frac{D_p}{R_p^2} (W_b - w_b) = 15 (W_b - w_b) \frac{D_o}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad [5-12]$$

5.2.2 Equação para o Leito Adsorativo

Uma das características mais importantes neste momento do processo é a absorção da radiação solar cuja intensidade varia ao longo do tempo segundo o modelo já discutido anteriormente. E, como a temperatura do leito está acima da temperatura ambiente, é óbvio que existe uma perda de energia por troca de calor com o ambiente. Além disso, é durante a dessorção que a massa de etanol adsorvida no leito diminui.

$$(M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b) \frac{dT_b}{dt} = P_{rad} A_b + h_b A_b (T_{amb} - T_b) + \varepsilon_b A_b \sigma (T_{amb}^4 - T_b^4) + Q_s M_s \frac{dw_b}{dt} \quad [5-13]$$

5.2.3 Equação para o Evaporador

No evaporador, durante esse estágio do ciclo, não há ocorrência de efeito frigorífico nem variação da massa refrigerante nesse componente já que não há fluxo mássico de refrigerante para o leito e nem proveniente do condensador. Assim sendo, a única troca de calor que possa ocorrer é proveniente da convecção decorrente do contato a água da caixa térmica e a serpentina.

$$((1-x)M_{er} c_{rl} + xM_{er} c_{rv} + M_e c_e) \frac{dT_e}{dt} = h_{H2O} A_e (T_{H2O} - T_e) \quad [5-14]$$

5.2.4 Equação para o Condensador

Com a dessorção em andamento, o condensador passa a receber o fluido proveniente do leito no estado de vapor aumentando sua temperatura e a massa de etanol contida em seu interior. A temperatura mais elevada promove a liberação de calor para o ambiente e assim o fluido sofre mudança de fase e retorna ao estado líquido para ser enviado ao evaporador em outra etapa e reiniciar o ciclo.

$$(M_{crl}c_{rl} + M_c c_c) \frac{dT_c}{dt} = h_c A_c (T_{amb} - T_c) + \varepsilon_c A_c \sigma (T_{amb}^4 - T_c^4) - L_r M_s \frac{dw_b}{dt} - c_{rv} (T_b - T_c) M_s \frac{dw_b}{dt} \quad [5-15]$$

5.2.5 Equação para a Água Refrigerada

A água armazenada na caixa térmica, nesse instante do ciclo, basicamente aumenta gradativamente a temperatura ao receber calor do meio externo através do contato com as paredes do reservatório e transmitindo alguma parcela desse calor à serpentina do evaporador sempre que exista alguma diferença de temperatura entre o evaporador e água.

$$M_{H_2O} c_{H_2O} \frac{dT_{H_2O}}{dt} = h_{H_2O} A_e (T_e - T_{H_2O}) + \frac{(T_{amb} - T_{H_2O})}{R_{ter}} \quad [5-16]$$

5.2.6 Equação para o Fluxo de Refrigerante no Evaporador

Neste momento do ciclo não há fluxo de etanol do evaporador para o leito e nem do condensador para o evaporador, assim o fluxo de refrigerante no evaporador é nulo.

$$\frac{dM_{er}}{dt} = 0 \quad [5-17]$$

5.2.7 Fluxo de Refrigerante no Condensador

A variação de massa de refrigerante no condensador na dessorção é devida unicamente do fluxo proveniente da liberação do etanol no leito adsorativo que é recebido por este componente. É claro que ocorre um aumento da massa de etanol no condensador e que o sinal negativo na frente da equação se deve ao fato de que (dw_b/dt) tem um valor negativo já que a concentração no leito está caindo.

$$\frac{dM_{crl}}{dt} = -M_s \frac{dw_b}{dt} \quad [5-18]$$

5.3 Modelagem para as Etapas de Aquecimento e de Resfriamento

Para estas duas etapas, basta fazer o mesmo procedimento adotado por Miyazaki, fazendo $dw_b/dt = 0$. Isso porque não há variação da concentração nessas duas etapas e as demais equações que regem o pré-resfriamento são as mesmas da fase de adsorção, assim como as do pré-aquecimento são mesmas da dessorção.

A não variação da concentração no leito corresponde ao processo cujo caminho é definido pelas curvas isósteras no diagrama de Dühring.

5.4 Sistemas de Equações Diferenciais Acopladas e Não Lineares

Uma vez deduzidas às equações que governam os fenômenos físicos em todos os componentes do sistema, é possível formar quatro sistemas de equações, um para cada etapa do ciclo: adsorção, pré-aquecimento, dessorção e pré-resfriamento.

Em todos esses sistemas, temos como variável independente o tempo (t) e como variáveis dependentes: a concentração de etanol no leito (w_b), as temperaturas do leito, evaporador, condensador e da água refrigerada (T_b , T_e , T_c , T_{H_2O}), e as massas de etanol no evaporador e condensador (M_{er} , M_{crl}). Formando quatro sistemas com sete variáveis dependentes cada.

Na página seguinte, são mostrados apenas os dois sistemas mais importantes, o da etapa de adsorção e o da etapa de dessorção, já que os sistemas de pré-resfriamento e pré-aquecimento são derivados desses dois com pouca modificação. As equações estão dispostas na mesma sequência na qual foram trabalhadas até aqui.

Sistema com as Equações para a Etapa de Adsorção

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw_b}{dt} = 15(W_b - w_b) \frac{D_o}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} \\ (M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b) \frac{dT_b}{dt} = h_b A_b (T_{amb} - T_b) + Q_s M_s \frac{dw_b}{dt} + c_{rv} (T_e - T_b) M_s \frac{dw_b}{dt} \\ ((1-x) M_{er} c_{rl} + x M_{er} c_{rv} + M_e c_e) \frac{dT_e}{dt} = h_{H_2O} A_e (T_{H_2O} - T_e) - L_r M_s \frac{dw_b}{dt} + c_{rl} (T_c - T_e) \frac{dM_{crl}}{dt} \\ (M_{crl} c_{rl} + M_c c_c) \frac{dT_c}{dt} = h_c A_c (T_{amb} - T_c) + \varepsilon A_c \sigma (T_{amb}^4 - T_c^4) \\ (M_{H_2O} c_{H_2O}) \frac{dT_{H_2O}}{dt} = h_{H_2O} A_e (T_e - T_{H_2O}) + (T_{amb} - T_{H_2O}) / R_{ter} \\ \frac{dM_{er}}{dt} = -M_s \frac{dw_b}{dt} + d_e \cdot 1000 \frac{\pi (P_c - P_e) D_{tubo}^4}{128 \mu L} \\ \frac{dM_{crl}}{dt} = -d_e \cdot 1000 \frac{\pi (P_c - P_e) D_{tubo}^4}{128 \mu L} \end{array} \right.$$

Sistema com as Equações para a Etapa de Dessorção

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw_b}{dt} = 15(W_b - w_b) \frac{D_o}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} \\ (M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b) \frac{dT_b}{dt} = P_{rad} A_b + h_b A_b (T_{amb} - T_b) + \varepsilon_b A_b \sigma (T_{amb}^4 - T_b^4) + Q_s M_s \frac{dw_b}{dt} \\ ((1-x) M_{er} c_{rl} + x M_{er} c_{rv} + M_e c_e) \frac{dT_e}{dt} = h_{H_2O} A_e (T_{H_2O} - T_e) \\ (M_{crl} c_{rl} + M_c c_c) \frac{dT_c}{dt} = h_c A_c (T_{amb} - T_c) + \varepsilon_c A_c \sigma (T_{amb}^4 - T_c^4) - L_r M_s \frac{dw_b}{dt} - c_{rv} (T_b - T_c) M_s \frac{dw_b}{dt} \\ (M_{H_2O} c_{H_2O}) \frac{dT_{H_2O}}{dt} = h_{H_2O} A_e (T_e - T_{H_2O}) + (T_{amb} - T_{H_2O}) / R_{ter} \\ \frac{dM_{er}}{dt} = 0 \\ \frac{dM_{crl}}{dt} = -M_s \frac{dw_b}{dt} \end{array} \right.$$

Em seguida, organizamos e reordenamos as equações conforme aparecem nos algoritmos com a modelagem e que se encontram no Apêndice A.

Sistema de Equações para o Algoritmo da Etapa de Adsorção

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw_b}{dt} = 15(W_b - w_b) \frac{D_o}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} \\ \frac{dM_{er}}{dt} = -M_s \frac{dw_b}{dt} + d_e \cdot 1000 \frac{\pi(P_c - P_e) D_{tubo}^4}{128\mu L} \\ \frac{dM_{crl}}{dt} = -d_e \cdot 1000 \frac{\pi(P_c - P_e) D_{tubo}^4}{128\mu L} \\ \frac{dT_b}{dt} = \frac{h_b A_b (T_{amb} - T_b) + Q_s M_s \frac{dw_b}{dt} + c_{rv} (T_e - T_b) M_s \frac{dw_b}{dt}}{M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b} \\ \frac{dT_e}{dt} = \frac{h_{H_2O} A_e (T_{H_2O} - T_e) - L_r M_s \frac{dw_b}{dt} + c_{rl} (T_c - T_e) \frac{dM_{crl}}{dt}}{(1-x) M_{er} c_{rl} + x M_{er} c_{rv} + M_e c_e} \\ \frac{dT_c}{dt} = \frac{h_c A_c (T_{amb} - T_c) + \varepsilon A_c \sigma (T_{amb}^4 - T_c^4)}{M_{crl} c_{rl} + M_c c_c} \\ \frac{dT_{H_2O}}{dt} = \frac{h_{H_2O} A_e (T_e - T_{H_2O}) + (T_{amb} - T_{H_2O}) / R_{ter}}{M_{H_2O} c_{H_2O}} \end{array} \right.$$

Sistema de Equações para o Algoritmo da Etapa de Dessorção

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw_b}{dt} = 15(W_b - w_b) \frac{D_o}{R_p^2} e^{\frac{-E_a}{RT}} \\ \frac{dM_{er}}{dt} = 0 \\ \frac{dM_{crl}}{dt} = -M_s \frac{dw_b}{dt} \\ \frac{dT_b}{dt} = \frac{P_{rad} A_b + h_b A_b (T_{amb} - T_b) + \varepsilon_b A_b \sigma (T_{amb}^4 - T_b^4) + Q_s M_s \frac{dw_b}{dt}}{M_s c_s + M_s c_{rl} w_b + M_b c_b} \\ \frac{dT_e}{dt} = \frac{h_{H_2O} A_e (T_{H_2O} - T_e)}{(1-x) M_{er} c_{rl} + x M_{er} c_{rv} + M_e c_e} \\ \frac{dT_c}{dt} = \frac{h_c A_c (T_{amb} - T_c) + \varepsilon_c A_c \sigma (T_{amb}^4 - T_c^4) - L_r M_s \frac{dw_b}{dt} - c_{rv} (T_b - T_c) M_s \frac{dw_b}{dt}}{M_{crl} c_{rl} + M_c c_c} \\ \frac{dT_{H_2O}}{dt} = \frac{h_{H_2O} A_e (T_e - T_{H_2O}) + (T_{amb} - T_{H_2O}) / R_{ter}}{M_{H_2O} c_{H_2O}} \end{array} \right.$$

Os quatro sistemas que compõem a modelagem com as equações de governo que regem o sistema de refrigeração por adsorção podem ser classificadas como um sistema de equações diferenciais de primeira ordem acopladas e não lineares.

No que diz respeito à classificação das equações como acopladas se deve ao fato de que em algumas equações ocorre a existência de mais de uma variável dependente. E, quanto a não linearidade, ocorre devido alguns coeficiente das equações não serem funções apenas da variável independente (t), mas funções de variáveis dependentes, como é o caso do título (x) da mistura que depende das variáveis (T_e) e (T_c), como é o caso da concentração (W_b) que depende das temperaturas e assim são outros casos que fornecem situações de não linearidades as equações dos sistemas.

5.5 Ciclo Termodinâmico

Na análise dos fenômenos termodinâmicos, utilizamos o mesmo procedimento desenvolvido por Uddin. Onde Todas as contribuições térmicas calculadas baseiam-se no balanço de calor e massa a partir do diagrama Pressão-Temperatura-Concentração (P-T-W), conhecido como diagrama de Dühring. Tal diagrama é construído após a simulação do ciclo que fornece os valores dessas três propriedades para as condições de operação do equipamento.

O COP do sistema é definido como a razão entre o calor transferido (retirado) do espaço refrigerado e o trabalho para produzir tal transferência. Onde o calor retirado é definido pelo efeito frigorífico (Q_c) e a energia requerida para realizar tal trabalho é a soma das energias que promovem a dessorção (Q_{des}) e o aquecimento sensível do leito (Q_{sh}).

$$COP = \frac{Q_c}{Q_{des} + Q_{sh}} \quad [5-19]$$

Sabendo que o calor sensível está dividido em duas parcelas, uma correspondente a etapa de pré-aquecimento ($Q_{sh,pr}$) e outra a de dessorção ($Q_{sh,des}$).

O calor de dessorção pode ser calculado como:

$$Q_{des} = M_s Q_{st} (W_{\max} - W_{\min}) \quad [5-20]$$

Os calores sensíveis durante o pré-aquecimento e a dessorção são mostrados a seguir, onde T_2 , T_3 e T_4 são as temperaturas no início do pré-aquecimento, início da dessorção e fim da dessorção.

$$Q_{sh,pr} = M_s \int_{T_2}^{T_3} c_s dT + M_s W_{\max} \int_{T_2}^{T_3} C_{p_{ref}} dT + M_b \int_{T_2}^{T_3} c_b dT \quad [5-21a]$$

$$Q_{sh,des} = M_s \int_{T_3}^{T_4} c_s dT + M_s \frac{W_{\max} - W_{\min}}{2} \int_{T_3}^{T_4} C_{p_{ref}} dT + M_b \int_{T_3}^{T_4} c_b dT \quad [5-21b]$$

O efeito frigorífico (Q_c) é calculado com os valores da massa do adsorvente (M_s), na concentração máxima ($W_{\max}$) e mínima ($W_{\min}$) do ciclo, no calor latente de vaporização (Δh_{eva}) e calor específico ($C_{p_{ref}}$) do fluido refrigerante.

$$Q_c = M_s (W_{\max} - W_{\min}) \left[\Delta h_{eva} - \int_{T_{eva}}^{T_{con}} C_{p_{ref}} dT \right] \quad [5-22]$$

Onde, as concentrações são dadas por:

$$W_{\max} = W_o \exp \left[- \left(\frac{RT_{ad}}{E} \ln \left(\frac{P_{ad}}{P_{eva}} \right) \right)^n \right]; \quad W_{\min} = W_o \exp \left[- \left(\frac{RT_{des}}{E} \ln \left(\frac{P_{des}}{P_{con}} \right) \right)^n \right] \quad [5-23]$$

E, considerando, que o efeito frigorífico é o produto entre a massa de adsorvente e o efeito frigorífico específico, designado pelas iniciais do nome em inglês, *SCE* (*Specific Cooling Effect*). Então:

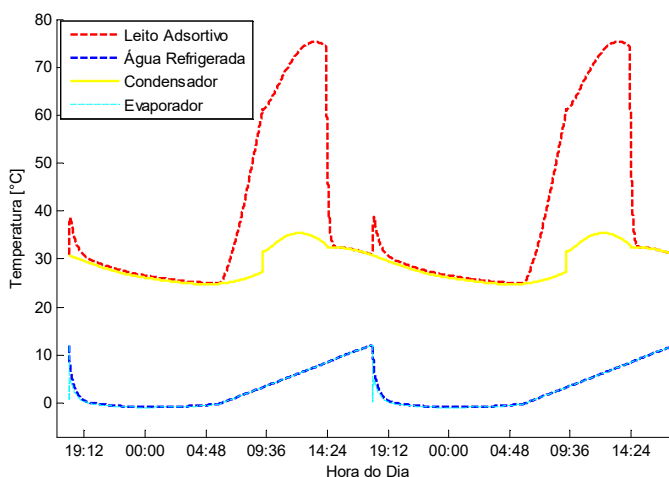
$$COP = M_s \frac{SCE}{Q_{des} + Q_{sh}} \quad [5-24]$$

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao executar algumas vezes o algoritmo, que se encontra no Apêndice A.1, para solucionar o sistema de equações, foi possível ajustar os tempos de duração para cada fase do ciclo. Assim, determinamos que a adsorção durasse toda a noite, das 18:00 às 06:00, o pré-aquecimento iniciasse pela manhã às 06:00 e seguisse até às 09:18, quando o leito atinge temperatura suficiente para dar início a dessorção que dura até às 14:18, momento em que a radiação que aquece o leito começa a decair e a temperatura ambiente está quente demais para promover uma temperatura no condensador que permita que este continue recebendo o etanol do leito, ou seja, é quando o leito atinge a menor concentração possível, então dar-se início a última fase do ciclo, o pré-aquecimento, que vai até às 18:00, quando o ciclo recomeça.

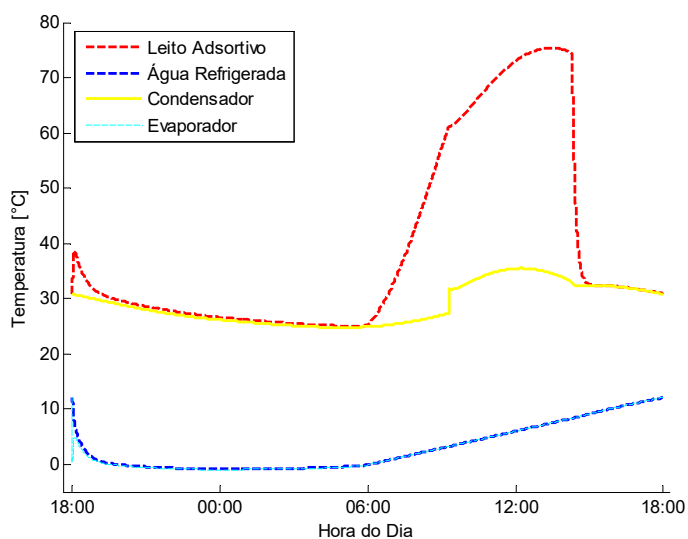
As temperaturas obtidas na simulação são mostradas na figura 6.1 para a duração de dois ciclos e na figura 6.2 para a duração de um ciclo apenas. Considerando que o ciclo inicia-se às 18:00 do dia com a etapa de adsorção. A mínima temperatura alcançada pelo evaporador é de -1°C , que acontece próximo à meia noite. No leito, durante os primeiros minutos da adsorção que é um fenômeno exotérmico, a rápida variação de concentração provoca um aumento de temperatura no leito que chega a 37°C e começa a cair à medida que a taxa de adsorção passa a ser menos acentuada e a temperatura ambiente da noite favorece o arrefecimento do leito.

Figura 6.1 – As Temperaturas nos Componentes ao Longo Dois Ciclos



Fonte: Próprio autor.

Figura 6.2 – As Temperaturas nos Componentes ao Longo do Tempo de Um Ciclo



Fonte: Próprio autor.

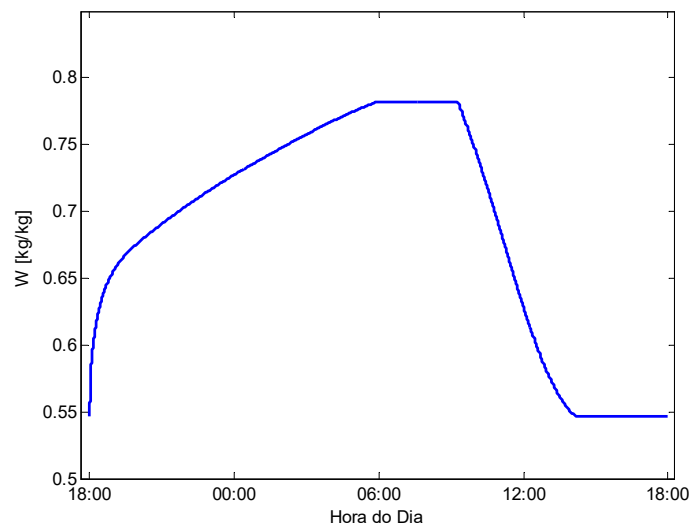
No final da etapa de pré-aquecimento o leito está a 61,2°C, enquanto o condensador a 27,3°C. E, inicia-se a fase de dessorção na qual a liberação do vapor de etanol para o condensador provoca sua elevação de temperatura. Durante esta fase o leito atinge a temperatura máxima de 75,5°C enquanto o condensador está por volta dos 35°C.

A temperatura dos 120 kg de água a ser refrigerada tende a acompanhar a temperatura do evaporador, ficando acima desta alguns poucos graus ou décimos de graus. Como o modelo utilizado desconsidera a mudança de fase da água a 0°C, esta chegaria ao estado de sobrefusão a -0,89°C. A energia retirada da água para chegar a esse estado seria equivalente a necessária para solidificar aproximadamente 1,35 kg desta massa de água.

Agora, a respeito da variação da concentração do leito, cujo gráfico se encontra na figura 6.3, percebe-se que a taxa é elevada no início da adsorção e depois mais moderada. Isso ocorre porque, no início do ciclo, a pressão de saturação do etanol no evaporador está mais elevada do que quando este componente está em pleno funcionamento em temperaturas mais baixas.

Na dessorção, a taxa de concentração é mais constante, uma vez as variações das temperaturas do leito e do condensador são menores quando comparadas com as sofridas pelo leito e o evaporador durante a adsorção. As concentrações máximas e mínimas obtidas foram respectivamente de 0,7818 e 0,5458 kg de etanol por kg de carvão ativado.

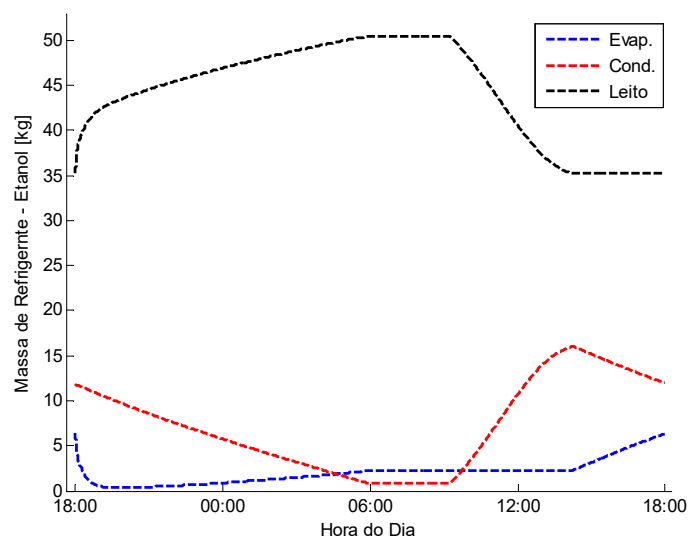
Figura 6.3 – A Concentração no Leito ao Longo de Um Ciclo.



Fonte: Próprio autor.

No gráfico da figura 6.4, é possível ver como a massa de etanol varia em cada componente do sistema ao longo do ciclo. Inicialmente a quantidade de refrigerante no evaporador começa a cair rapidamente, já que está sendo adsorvido pelo leito, mas ao mesmo tempo o condensador repõe parte dessa massa, realimentando o evaporador graças à diferença de pressão que existe entre eles. Durante a dessorção, o condensador passa a receber o etanol proveniente do leito, ficando cheio. E, no pré-resfriamento, o condensador reabastece o evaporador para que este se encontre cheio quando a adsorção começa e o ciclo se reinicie.

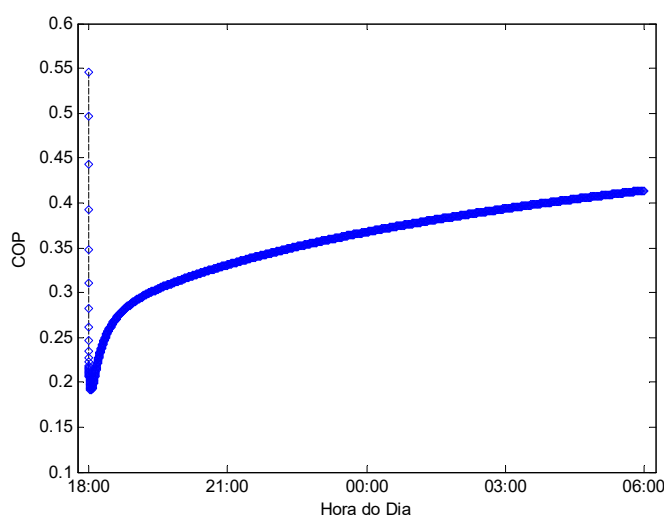
Figura 6.4 – Massa de Etanol em Cada Componente ao Longo de Um Ciclo.



Fonte: Próprio autor.

Uma vez obtido as concentrações e temperaturas do ciclo é possível calcular o COP médio do ciclo e o COP instantâneo, mostrado na figura 6.5, durante o tempo em que ocorre o efeito de refrigeração. Nos primeiros segundos ou minutos do ciclo, o COP instantâneo apresenta valores altos próximos de 0,55 que caem rapidamente até atingir um valor mínimo, isso em virtude da temperatura de evaporação está mais alta no início, e diminuir rapidamente até atingir valores próximos de 0°C quando em funcionamento pleno. E, à medida que a noite prossegue e a temperatura ambiente cai, resfriando o leito, o desempenho aumenta gradativamente. Mais à frente mostraremos o efeito da temperatura de evaporação no coeficiente de performance. Assim, o COP médio encontrado para o ciclo do sistema foi de 0,3574.

Figura 6.5 – COP ao Longo do Tempo de Um Ciclo.

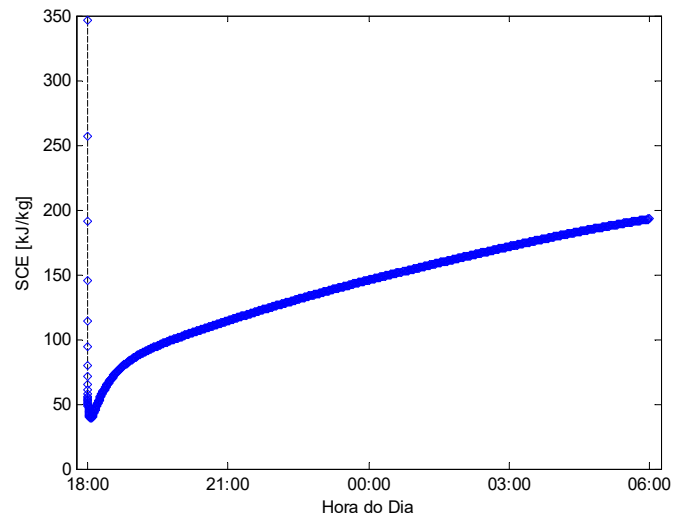


Fonte: Próprio autor.

Para o efeito frigorífico específico, SCE, as considerações feitas ao COP também são válidas quanto os efeitos da temperatura de evaporação e a temperatura ambiente ao longo da noite. O efeito frigorífico específico instantâneo é mostrado na figura 6.6 e, o seu valor médio para o ciclo foi de 140,51 kJ/kg.

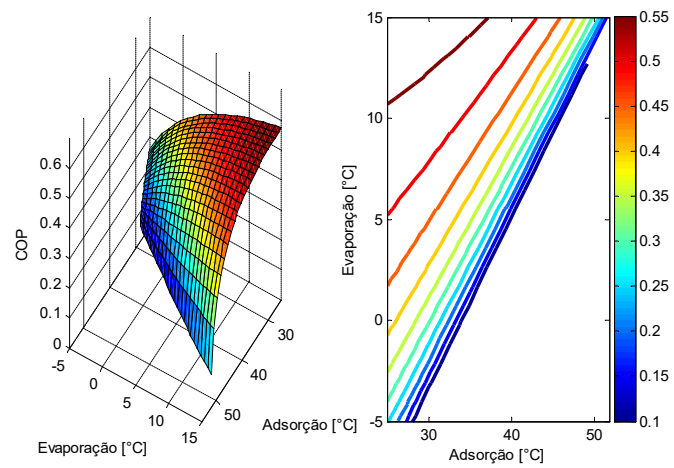
Os efeitos das temperaturas de adsorção e evaporação no COP e no SCE foram investigados, mantendo fixas as temperaturas de dessorção e condensação em $75,4^{\circ}$ e $34,6^{\circ}\text{C}$ respectivamente, valores estes encontrados na simulação. Os resultados para o comportamento do sistema em relação estes parâmetros foram sintetizados nos gráficos das figuras 6.7 e 6.8.

Figura 6.6 – Efeito Frigorífico Específico ao Longo de Um Ciclo.



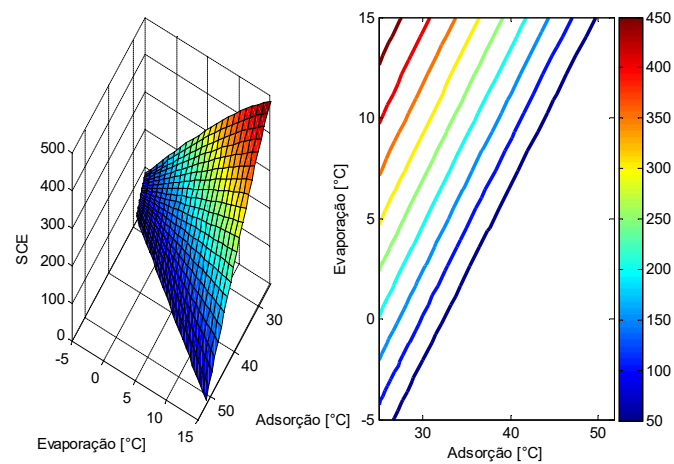
Fonte: Próprio autor.

Figura 6.7 – Efeito das Temperaturas de Evaporação e Adsorção no COP.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6.8 – Efeito das Temperaturas de Evaporação e Adsorção no SCE.



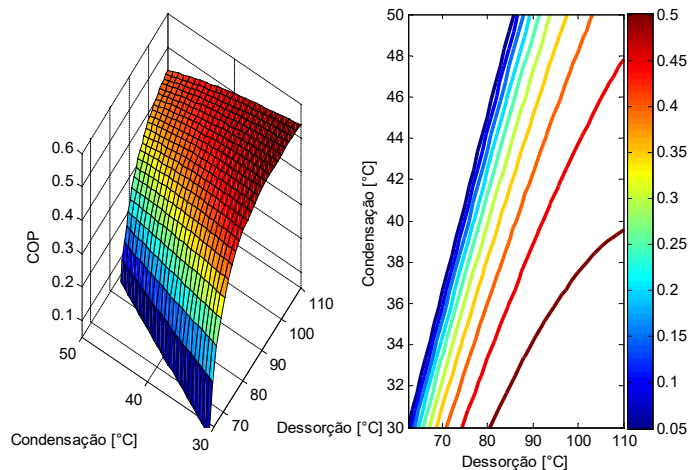
Fonte: Próprio autor.

Como é possível ver nas duas figuras anteriores, o COP e o SCE diminuem com o aumento da temperatura de adsorção e aumentam com a elevação da temperatura de evaporação.

Em seguida, os efeitos das temperaturas de dessorção e condensação no COP e no SCE foram avaliados mantendo as temperaturas de adsorção e evaporação fixas em $27,5^{\circ}\text{C}$ e $-0,5^{\circ}\text{C}$ respectivamente, valores estes condizentes com a faixa de valores encontrados na simulação.

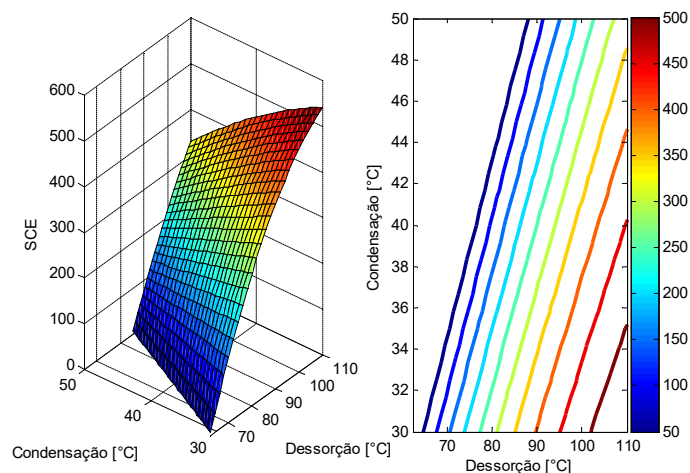
Assim, é possível ver nas figuras 6.9 e 6.10 que o COP e o SCE aumentam com a elevação da temperatura de dessorção e declinam com a elevação da temperatura de condensação.

Figura 6.9 – Efeito das Temperaturas de Condensação e Dessorção no COP.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6.10 – Efeito das Temperaturas de Condensação e Dessorção no SCE.

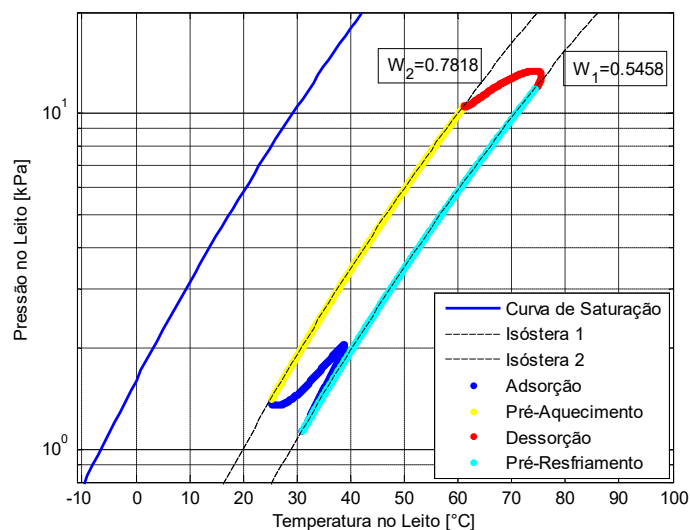


Fonte: Próprio autor.

Uma etapa importante do estudo aqui apresentado é a construção do diagrama Pressão-Temperatura-Concentração (P-T-W), também conhecido como diagrama de Dühring, do ciclo com base nos resultados encontrados na simulação. Isso porque com base nele é possível efetuar os cálculos termodinâmicos do ciclo mais facilmente e comparar graficamente o sistema simulado com os modelos teóricos.

A avaliação do diagrama de Dühring, mostrado na figura 6.11, revela ótima compatibilidade com os modelos teóricos e também apresenta características compatíveis com o ciclo real, como as flutuações das pressões nas curvas de adsorção e dessorção, decorrentes dos complexos processos de trocas de calor e suas variações com o tempo durante nessas fases. Assim, depreende-se que o modelo e simulação estão perfeitamente adequados a teoria e aos fenômenos reais esperados.

Figura 6.11 – Diagrama de Dühring ou Diagrama P-T-W Obtido da Simulação.



Fonte: Próprio autor.

E, após todas essas etapas, calculou-se a potência média durante as doze horas em que ocorre a refrigeração de fato (na fase de adsorção) e, chegamos ao valor de 329,7 W, aproximadamente 1125 BTU/h.

7. CONCLUSÃO

Depreende-se que as condições climáticas brasileiras, em especial na região nordeste, não apenas são viáveis à refrigeração solar, mas plenamente favoráveis, como foi mostrado a partir dos dados meteorológicos analisados e dos resultados provenientes da simulação do sistema de adsorção que levou em consideração os efeitos do clima sobre o funcionamento do equipamento idealizado.

A solução da modelagem matemática está condizente com as respostas esperadas para a realidade a respeito das trocas de calor, temperaturas obtidas, os fluxos de refrigerante através dos componentes e a concentração ao longo do ciclo. O modelo, aqui desenvolvido, também atendeu as exigências de avaliar o comportamento de operação do ciclo diante da variação horária da temperatura e magnitude da radiação instantânea em regime transiente.

A partir de repetidas simulações conseguimos delimitar os tempos de duração para cada etapa do ciclo que se inicia às 18:00 com a adsorção que prossegue por doze horas, seguida do pré-aquecimento que dura até 09:18, quando começa a dessorção que vai até às 14:18 ao se iniciar o pré-resfriamento.

Os valores calculados para o COP de 0,3574 e o efeito frigorífico específico de 140,51 kJ/kg com base os resultados da simulação estão dentro da faixa de valores encontrados teórica e experimentalmente por Uddin (2014), Miyazaki (2014), e outros pesquisadores.

A potência média de 329,7 W, aproximadamente 1125 BTU/h, estimada para a etapa em que ocorre a refrigeração de fato e, considerando que a área ocupada pelo adsorvedor seria de aproximadamente 5,6 m², revela uma das desvantagens do sistema que é o grande tamanho comparado aos sistemas a compressão.

Em síntese, podemos dizer que os sistemas de refrigeração solar por adsorção correspondem uma ótima solução para tornar a refrigeração uma atividade ecologicamente correta, sendo uma alternativa de substituição aos sistemas de compressão que fazem usos de fluidos refrigerantes que podem danar ao meio ambiente e agravar as mudanças climáticas. Constituem, também, um modo de se conseguir a refrigeração movida por energia de fonte limpa e renovável. Mas, em virtude de seu tamanho, talvez esta tecnologia fique restrita a aplicações em lugares como indústrias, hospitais, universidades, centros comerciais etc.

E, como proposta para futuras investigações, sugerimos a avaliação do ciclo segundo cada estação do ano, já que os níveis de irradiação e horas de insolação diária mudam ao longo dos meses e também outras cidades poderiam ser adotadas como referência. Poderia ser avaliado o melhor dimensionamento do condensador e do leito a fim de otimizar os valores do COP e tentar diminuir o tamanho do sistema. E, o mais importante seria efetuar a construção física do sistema aqui proposto para ser testado na realidade.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, Stephen O.; HALBERSTADT, Marcel L.; BORGFORD-PARNELL, Nathan. **Stratospheric Ozone, Global Warming, and the Principle of Unintended Consequences - An Ongoing Science and Policy Success Story**. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013.

ARAÚJO, Maria Elieneide. **Validação Experimental de um Resfriador de Água Operando em Ciclo de Adsorção com Aquecimento Solar Indireto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará. 2009.

BANSAL, Roop Chand; GOYAL, Meenakshi. **Activated Carbon Adsorption**. Boca Raton, USA: CRC Press, 2005.

CASTELLAN, Gilbert W. **Fundamentos de Físico-Química**. Rio de Janeiro: Ltc, 1995.

CRUZ JUNIOR, Orlando Ferreira. **Produção de Carvão Ativado a partir de Produtos Residuais de Espécies Nativas da Região Amazônica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2010.

DO, Duong D., **Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics**. Queensland, Australia: Imperial College Press, 1998.

GONÇALVES, Maraísa. **Preparação de Carvão Ativado e Impregnação com Ferro ou Cromo para Aplicações em Processos de Descontaminação Ambiental**. Tese (Doutorado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais. 2008.

GWADERA, Monika; KUPIEC, Krzysztof. **Adsorption Cooling as an Effective Method Of Waste Heat Utilization**. Czasopismo Techniczne, 2011.

HABIB, Khairul; SAHA, Bidyut B., **Performance Evaluation of Solar Driven Activated Carbon Fiber-Ethanol Based Adsorption Cooling System in Malaysia**. Asian Journal of Scientific Research. 2013.

ISMAIL, Kamal Abdel Radi. **Janelas Térmicas: Modelagem e Aplicações**. Campinas, SP: Ed. do autor, 2010.

OLIVEIRA, Miguel Pinto de. **Obtenção, Caracterização e Aplicações de Carvão Ativado a partir de Carços de Pêssegos**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul. 2008.

MAJEED, Alkhair M. Abdul; SULIMAN, M. Y.; SOPIAN, K., **Weather Effect on the Solar Adsorption Air-conditioning System using Activated Carbon Fiber/Ethanol as Pair of Refrigeration: A Case Study of Malaysia**. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2014.

MARTÍNEZ, José Miguel Martín. **Adsorción Física de Gases y Vapores por Carbones**. Universidad de Alicante. Espanha. 1990. (ISBN 84-86809-33-9).

MIYAZAKI, Takahiko; EL-SHARKAWY, Ibrahim I.; SAHA, Bidyut Baran; KOYAMA, Shigeru. **Optimized Performance of One-Bed Adsorption Cooling System**. International Refrigeration and Air Conditioning Conference - Purdue University. 2014.

MILLER, Rex; MILER, Mark R., **Ar-Condicionado e Refrigeração**. 2. ed. [S.I.]: Gen LTC, 2014.

PONGTORNKULPANICH, Anan. **Dynamic Simulation of Solid Adsorption Solar Refrigerator System with AC/CH₃OH as a Working Pair**. Scientific Research Publishing. 2014.

ROMERO-ANAYA, A. J.; LILLO-RÓDENAS, M. A.; LINARES-SOLANO, A.; **Factors Governing the Adsorption of Ethanol on Spherical Activated Carbons**. Carbon. 2014.

RUTHVEN, Douglas M., **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**. New York: Wiley-Interscience, 1984.

SAHA, Bidyut Baran; EL-SHARKAWY, Ibrahim I.; CHAKRABORTY, Anutosh; KOYAMA, Shigeru; YOON, Seong-Ho; NG, Kim Choon. **Adsorption Rate of Ethanol on Activated Carbon Fiber**. Journal Chemistry Engineering. 2006.

SAHA, B. B.; AKISAWA, A.; KASHIWAGI, T., **Solar/Waste Heat Driven Two-Stage Adsorption Chiller: the Prototype**. Elsevier Science. 2000.

SAHA, Bidyut Baran; SRINIVASAN, Kandadai; NG, Kim Choon. **Possibility and Constraints of Ozone Friendly Working Fluids for Adsorption Refrigeration and Gas Storage Systems. European Conference on Polygeneration**. Tarragona, Spain. 2011.

SCHNEIDER, Luiz Eduardo. **Adsorção de Compostos Fenólicos Sobre Carvão Ativado**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, Paraná, 2008.

SILVA, José de Castro. **Refrigeração Comercial e Climatização Industrial**. [S.l.]: Hemus, 2004.

SOLMOS, Ismail; KAFTANOGLU, Bilgin; YAMALI, Cemil; BAKER, Derek. **Experimental Investigation of a Natural Zeolite–Water Adsorption Cooling Unit**. Elsevier. 2011.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

SUZUKI, Motoyuki, **Adsorption Engineering**. Tokyo, Japan: Kodansha, 1990.

UDDIN, Kutub. **Study on Adsorption Characteristics of Ethanol onto Activated Carbons – Effect of Surface Treatment**. 2014. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy – Kyushu University. Japan, 2014.

UDDIN, Kutub; EL-SHARKAWY, Ibrahim; MIYAZAKI, Takahiko; SAHA, Bidyut Baran; KOYAMA, Shigeru. **Thermodynamic Analysis of Adsorption Refrigeration Cycles Using Parent and Surface Treated Maxsorb III/Ethanol Pairs**. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue University. 2014.

UDDIN, Kutub; EL-SHARKAWY, Ibrahim; MIYAZAKI, Takahiko; SAHA, Bidyut Baran; KOYAMA, Shigeru et al. **Adsorption Characteristics of Ethanol onto Functional Activated Carbons with Controlled Oxygen Content**. Elsevier. 2014.

WANG, R. Z.; OLIVEIRA, R. G., **Adsorption Refrigeration – An Efficient Way to Make Good Use of Waste Heat and Solar Energy**. International Sorption Heat Pump Conference. Denver, USA, 2005.

YANG, Ralph T., **Adsorbents: Fundamentals and Applications**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.

ZHAO, Yongling. **Study of Activated Carbon/Methanol Adsorption Refrigeration Tube and System Integration**. 2011. Thesis for Degree of Master of Engineering Science – University of Adelaide. Australia. 2011.

APÊNDICE A – Modelagem do Sistema

APÊNDICE A.1 – Algoritmo para a Solução do Sistema de Equações

% Esta rotina resolve a modelagem do SISTEMA COMPLETO

clear all, clc

% DURAÇÃO DAS FASES

t_pc = 3.7*3600; % Pre-cooling Time => 14:18 - 18:00

t_ad = 12.0*3600; % Adsorption Time => 18:00 - 06:00

t_ph = (3.7-0.4)*3600; % Pre-heating Time => 06:00 - 09:18

t_de = (4.6+0.4)*3600; % Dessorption Time => 09:18 - 14:18

% CONDIÇÕES INICIAIS DE CONTORNO

wb=0.5466; m_ev = 6.465; m_co = 7.334+4.5; tb=30.90; te=12.07;

tc=30.83; th2o=12.07;

%% SOLUCIONADOR DA MODELAGEM

n(1) = 1;

pa(n(1),1) = wb;

pa(n(1),2) = m_ev;

pa(n(1),3) = m_co;

pa(n(1),4) = tb;

pa(n(1),5) = te;

pa(n(1),6) = tc;

pa(n(1),7) = th2o;

for k=1:1

% ----- ADSORPTION PROCESS -----

to=1:t_ad; % Duração da Etapa

n=size(pa);

no=size(to');

% Valores iniciais da etapa

PVI=[pa(n(1),1) pa(n(1),2) pa(n(1),3) pa(n(1),4) pa(n(1),5) pa(n(1),6) pa(n(1),7)];

clear p

[t,p]=ode23tb('a_b_adsorption',to,PVI);

ti = n(1);

tf = n(1)+no(1)-1;

```
pa(ti:tf,:)=p;
```

```
% ----- PRE-HEATING PROCESS -----
```

```
to=1:t_ph; % Duração da Etapa
```

```
n=size(pa);
```

```
no=size(to');
```

```
% Valores iniciais da etapa
```

```
PVI=[pa(n(1),1) pa(n(1),2) pa(n(1),3) pa(n(1),4) pa(n(1),5) pa(n(1),6) pa(n(1),7)];
```

```
clear p
```

```
[t,p]=ode23tb('b_c_preheating',to,PVI);
```

```
ti = n(1);
```

```
tf = n(1)+no(1)-1;
```

```
pa(ti:tf,:)=p;
```

```
% ----- DESORPTION PROCESS -----
```

```
to=1:t_de; % Duração da Etapa
```

```
n=size(pa);
```

```
no=size(to');
```

```
% Valores iniciais da etapa
```

```
PVI=[pa(n(1),1) pa(n(1),2) pa(n(1),3) pa(n(1),4) pa(n(1),5) pa(n(1),6) pa(n(1),7)];
```

```
clear p
```

```
[t,p]=ode23tb('c_d_desorption',to,PVI);
```

```
ti = n(1);
```

```
tf = n(1)+no(1)-1;
```

```
pa(ti:tf,:)=p;
```

```
% ----- PRE-COOLING PROCESS -----
```

```
to=1:t_pc; % Duração da Etapa
```

```
n=size(pa);
```

```
no=size(to');
```

```
% Valores iniciais da etapa
```

```
PVI=[pa(n(1),1) pa(n(1),2) pa(n(1),3) pa(n(1),4) pa(n(1),5) pa(n(1),6) pa(n(1),7)];
```

```
clear p
```

```
[t,p]=ode23tb('d_a_precooling',to,PVI);
```

```
ti = n(1);
```

```
tf = n(1)+no(1)-1;
```

```

    pa(ti:tf,:)=p;
end
%% PLOTAGEM DOS GRÁFICOS
n=size(pa);
startDate = datenum('01-01-0000 18:00:00'); sd = datenum('01-01-0000 17:40:00');
endDate = datenum('01-02-0000 18:00:00'); ed = datenum('01-02-0000 18:18:00');
xData = linspace(startDate,endDate,n(1));
% TEMPERATURAS:
figure, hold on
plot(xData,pa(:,4),'r--','Linewidth',2), plot(xData,pa(:,7),'b--','Linewidth',2)
plot(xData,pa(:,6),'y','Linewidth',2), plot(xData,pa(:,5),'c--','Linewidth',1)
hold off
axis([sd ed -10 80])
datetick('x','HH:MM','keeplimits')
title('Temperatura do Sistema')
legend('Leito Adsorativo','Água Refrigerada','Condensador','Evaporador')
ylabel('Temperatura [°C]'), xlabel('Hora do Dia')
% CONCENTRAÇÃO:
figure
plot(xData,pa(:,1),'Linewidth',2);
axis([sd ed 0.5 0.85])
datetick('x','HH:MM','keeplimits')
title('Concentração no Leito')
ylabel('W [kg/kg]'), xlabel('Hora do Dia')
% MASSA DE ETANOL NOS COMPONENTES:
figure, Ms = 64.509; hold on
plot(xData,pa(:,2),'b--','Linewidth',2), plot(xData,pa(:,3),'r--','Linewidth',2)
plot(xData,pa(:,1)*Ms,'k--','Linewidth',2), hold off
axis([sd ed 0 53])
datetick('x','HH:MM','keeplimits')
title('Massa de Refrigerante no Evaporador, Condensador e Leito')
legend('Evap.','Cond.','Leito')
ylabel('Massa de Refrigerante - Etanol [kg]'), xlabel('Hora do Dia')

```

APÊNDICE A.2 – Modelagem para a Etapa de Adsorção

```

function dp = a_b_adsorption(t,p)
% Constantes Fundamentais:
R = 8.3144; % Universal Gas Constant [J/(mol*K)]
Ea = 10365; % Ativation Energy of Adsorption [J/mol]
c_rl = 2452; % Cp calor especifico do etanol liquido 20°C [J/kg-k]
c_rv = 1514; % Cp calor especifico do etanol vapor 20°C [J/kg-k]
c_h2o = 4183; % Cp calor especifico da agua liquida 20°C [J/kg-k]
cs = 930; % Cp calor especifico do CA [J/kg-k]
Lr = 920100; % Calor de vaporizacao do etanol 20°C [j/kg-k]
Qs = 1002000; % Adsorption Heat [J/kg]
k_iso = 0.033; % Condutividade termica poliestireno [W/m-k]
de = 797.9; % kg/m3 densidade etanol 20°C
viscosidade = 0.001082; % kg/m-s viscosidade etanol 25°C
% Constantes Arbitrarias:
Ms = 215.03*0.3; % Sorption Material mass [kg]
Mb = 87.93; % Adsorbent bed mass [kg]
Me = 14.029; % Evaporator Mass [kg]
Mc = 21.496; % Condenser Mass [kg]
M_h2o = 120*1.0; % massa de agua na camara fria [kg]
cb = 906.7; % Calor especifico Aluminio 35°C (Bed) [J/kg-k]
ce = 383; % Calor especifico do cobre 20°C (Evaporador) [J/kg-k]
cc = ce; % Calor especifico do cobre 20°C (Condensador) [J/kg-k]
A_b = 17.542; % Area total dos tudos de Aluminio [m2]
A_e = 1.942; % Area de troca do evaporador [m2]
A_c = 4.808; % Area de troca do condensador [m2]
A_iso = 1.625*2.0; % Area lateral do isopor que reveste o evaporador [m2]
h_ar = 18; % coeficiente de convecção natural ar (5-30) [W/m2-k]
h_c = 42.687; % Coeficiente de convecção do condensador [W/m2-k]
h_b = 26.362; % Coeficiente de convecção do leite [W/m2-k]
h_h2o = 750; % Coeficiente de convecção natural agua-evaporador [W/m2-k]
emiss = 0.3; % Emissividade
sigma = 5.6697e-8; % Constante de Stefan-Boltzmann [W/m2-k4]

```

```

T_amb = 26.68; % Temperatura ambiente Noturna [°C]
x_iso = 0.054*0.3; % Espessura da parede de isolamento do evaporador [m]
% resistencia termica do revestimento do evaporador [°C/W]:
R_ter = x_iso/(k_iso*A_iso)+1/(h_ar*A_iso);
D_cap = 0.062*0.0254; % Diametro tubo capilar [m]
L_cap = 2.94+0.18; % Comprimento do tubo capilar [m]
%
% Velocidade de Reacao
dp(1) = 15*(1.61*10^-2)*(W(p(4),p(5)) - p(1))*exp(-Ea/(R*(273+p(4))));
% Vazao de refrigerante no Evaporador
dp(2) = - Ms*dp(1) + de*1000*(pi*(psat_et(p(6)) - ...
    psat_et(p(5)))*D_cap^4)/(128*viscosidade*L_cap);
% Vazao de refrigerante no Condensador
dp(3) = - de*1000*(pi*(psat_et(p(6)) - ...
    psat_et(p(5)))*D_cap^4)/(128*viscosidade*L_cap);
%
% Variacao de Temperatura no Leito Adsorativo
dp(4) = (h_b*A_b*(Tamb_ad(t) - p(4)) + Qs*Ms*dp(1) + c_rv*(p(5) - ...
    p(4))*Ms*dp(1))/(Ms*cs + Ms*c_rl*p(1) + Mb*cb);
% Variacao de Temperatura no Evaporador
dp(5) = (h_h2o*A_e*(p(7) - p(5)) - Lr*Ms*dp(1) + c_rl*(p(6) - p(5))*(-dp(3)))/( ...
    (1-x(p(6),p(5)))*p(2)*c_rl + x(p(6),p(5))*p(2)*c_rv + Me*ce);
% Variacao de Temperatura no Condensador
dp(6) = (h_c*A_c*(Tamb_ad(t) - p(6)) + emiss*A_c*sigma*(Tamb_ad(t)^4 - ...
    p(6)^4))/(p(3)*c_rl+Mc*cc);
% Variacao de Temperatura na H2O
dp(7) = (h_h2o*A_e*(p(5) - p(7)))+(Tamb_ad(t) - p(7))/R_ter)/(M_h2o*c_h2o);
dp = dp';
end

```

APÊNDICE A.3 – Modelagem para a Etapa de Pré-Aquecimento

```
function dp = b_c_preheating(t,p)
```

```
% Constantes Fundamentais:
```

```
R = 8.3144; % Universal Gas Constant [J/(mol*K)]
```

```
Ea = 10365; % Ativation Energy of Adsorption [J/mol]
```

```
c_rl = 2452; % Cp calor especifico do etanol liquido 20°C [J/kg-k]
```

```
c_rv = 1514; % Cp calor especifico do etanol vapor 20°C [J/kg-k]
```

```
c_h2o = 4183; % Cp calor especifico da agua liquida 20°C [J/kg-k]
```

```
cs = 930; % Cp calor especifico do CA [J/kg-k]
```

```
Lr = 920100; % Calor de vaporizacao do etanol 20°C [j/kg-k]
```

```
Qs = 1002000; % Adsorption Heat [J/kg]
```

```
k_iso = 0.033; % Condutividade termica poliestireno [W/m-k]
```

```
de = 797.9; % kg/m3 densidade etanol 20°C
```

```
viscosidade = 0.001082; % kg/m-s viscosidade etanol 25°C
```

```
% Constantes Arbitrarias:
```

```
Ms = 215.03*0.3; % Sorption Material mass [kg]
```

```
Mb = 87.93; % Adsorbent bed mass [kg]
```

```
Me = 14.029; % Evaporator Mass [kg]
```

```
Mc = 21.496; % Condenser Mass [kg]
```

```
M_h2o = 120*1.0; % massa de agua na camara fria [kg]
```

```
cb = 906.7; % Calor especifico Aluminio 35°C (Bed) [J/kg-k]
```

```
ce = 383; % Calor especifico do cobre 20°C (Evaporador) [J/kg-k]
```

```
cc = ce; % Calor especifico do cobre 20°C (Condensador) [J/kg-k]
```

```
A_b = 5.583; % Area superior do leito [m2]
```

```
A_e = 1.942; % Area de troca do evaporador [m2]
```

```
A_c = 4.808; % Area de troca do condensador [m2]
```

```
A_iso = 1.625*2.0; % Area lateral do isopor que reveste o evaporador [m2]
```

```
h_ar = 18; % coeficiente de convecção natural ar (5-30) [W/m2-k]
```

```
h_c = 42.687; % Coeficiente de convecção do condensador [W/m2-k]
```

```
h_b = 7.54; % Coeficiente de convecção do leito [W/m2-k]
```

```
h_h2o = 750; % Coeficiente de convecção natural agua-evaporador [W/m2-k]
```

```
emiss = 0.3; % Emissividade
```

```
sigma = 5.6697e-8; % Constante de Stefan-Boltzmann [W/m2-k4]
```

```

T_amb = 30.49-2; % Temperatura ambiente Diurna [°C]
x_iso = 0.054*0.3; % Espessura da parede de isolamento do evaporador [m]
% resistencia termica do revestimento do evaporador [°C/W]
R_ter = x_iso/(k_iso*A_iso)+1/(h_ar*A_iso);
%
% Velocidade de Reacao
dp(1) = 0;
% Vazao de refrigerante no Evaporador
dp(2) = 0;
% Vazao de refrigerante no Condensador
dp(3) = - Ms*dp(1);
%
% Variacao de Temperatura no Leito Adsorativo
dp(4) = (radiacao_ph(t)*A_b + h_b*(A_b*1.5)*(Tamb_ph(t) - p(4)) + ...
    emiss*(A_b*1.5)*sigma*(Tamb_ph(t)^4 - p(6)^4) + Qs*Ms*dp(1))/(Ms*cs ...
    + Ms*c_rl*p(1) + Mb*cb);
% Variacao de Temperatura no Evaporador
dp(5) = (h_h2o*A_e*(p(7) - p(5)))/((1-x(p(6),p(5)))*p(2)*c_rl + ...
    x(p(6),p(5))*p(2)*c_rv + Me*ce);
% Variacao de Temperatura no Condensador
dp(6) = (h_c*A_c*(Tamb_ph(t) - p(6)) + emiss*A_c*sigma*(Tamb_ph(t)^4 - p(6)^4) ...
    - Lr*Ms*dp(1) - c_rv*(p(4) - p(6))*Ms*dp(1))/(p(3)*c_rl+Mc*cc);
% Variacao de Temperatura na H2O
dp(7) = (h_h2o*A_e*(p(5) - p(7)))+(Tamb_ph(t) - p(7))/R_ter)/(M_h2o*c_h2o);
dp = dp';
end

```

APÊNDICE A.4 – Modelagem para a Etapa de Dessorção

```

function dp = c_d_desorption(t,p)
% Constantes Fundamentais:
R = 8.3144; % Universal Gas Constant [J/(mol*K)]
Ea = 10365; % Ativation Energy of Adsorption [J/mol]
c_rl = 2452; % Cp calor especifico do etanol liquido 20°C [J/kg-k]
c_rv = 1514; % Cp calor especifico do etanol vapor 20°C [J/kg-k]
c_h2o = 4183; % Cp calor especifico da agua liquida 20°C [J/kg-k]
cs = 930; % Cp calor especifico do CA [J/kg-k]
Lr = 920100; % Calor de vaporizacao do etanol 20°C [j/kg-k]
Qs = 1002000; % Adsorption Heat [J/kg]
k_iso = 0.033; % Condutividade termica poliestireno [W/m-k]
de = 797.9; % kg/m3 densidade etanol 20°C
viscosidade = 0.001082; % kg/m-s viscosidade etanol 25°C
% Constantes Arbitrarias:
Ms = 215.03*0.3; % Sorption Material mass [kg]
Mb = 87.93; % Adsorbent bed mass [kg]
Me = 14.029; % Evaporator Mass [kg]
Mc = 21.496; % Condenser Mass [kg]
M_h2o = 120*1.0; % massa de agua na camara fria [kg]
cb = 906.7; % Calor especifico Aluminio 35°C (Bed) [J/kg-k]
ce = 383; % Calor especifico do cobre 20°C (Evaporador) [J/kg-k]
cc = ce; % Calor especifico do cobre 20°C (Condensador) [J/kg-k]
A_b = 5.583; % Area superior do leito [m2]
A_e = 1.942; % Area de troca do evaporador [m2]
A_c = 4.808; % Area de troca do condensador [m2]
A_iso = 1.625*2.0; % Area lateral do isopor que reveste o evaporador [m2]
h_ar = 18; % coeficiente de convecção natural ar (5-30) [W/m2-k]
h_c = 42.687; % Coeficiente de convecção do condensador [W/m2-k]
h_b = 7.54; % Coeficiente de convecção do leito [W/m2-k]
h_h2o = 750; % Coeficiente de convecção natural agua-evaporador [W/m2-k]
emiss = 0.3; % Emissividade
sigma = 5.6697e-8; % Constante de Stefan-Boltzmann [W/m2-k4]

```

```

T_amb = 30.49; % Temperatura ambiente Diurna [°C]
x_iso = 0.054*0.3; % Espessura da parede de isolamento do evaporador [m]
% resistencia termica do revestimento do evaporador [°C/W]
R_ter = x_iso/(k_iso*A_iso)+1/(h_ar*A_iso);
%
% Velocidade de Reacao
dp(1) = 15*(1.61*10^-2)*(W(p(4),p(6)) - p(1))*exp(-Ea/(R*(273+p(4))));
% Vazao de refrigerante no Evaporador
dp(2) = 0;
% Vazao de refrigerante no Condensador
dp(3) = - Ms*dp(1);
%
% Variacao de Temperatura no Leito Adsorativo
dp(4) = (radiacao_de(t)*A_b + h_b*(A_b*1.5)*(Tamb_de(t) - p(4)) + ...
    emiss*(A_b*1.5)*sigma*(Tamb_de(t)^4 - p(6)^4) + ...
    Qs*Ms*dp(1))/(Ms*cs + Ms*c_rl*p(1) + Mb*cb);
% Variacao de Temperatura no Evaporador
dp(5) = (h_h2o*A_e*(p(7) - p(5)))/((1-x(p(6),p(5)))*p(2)*c_rl + ...
    x(p(6),p(5))*p(2)*c_rv + Me*ce);
% Variacao de Temperatura no Condensador
dp(6) = (h_c*A_c*(Tamb_de(t) - p(6)) + emiss*A_c*sigma*(Tamb_de(t)^4 - p(6)^4) ...
    - Lr*Ms*dp(1) - c_rv*(p(4) - p(6))*Ms*dp(1))/(p(3)*c_rl+Mc*cc);
% Variacao de Temperatura na H2O
dp(7) = (h_h2o*A_e*(p(5) - p(7)))+(Tamb_de(t) - p(7))/R_ter)/(M_h2o*c_h2o);
dp = dp';
end

```

APÊNDICE A.5 – Modelagem para a Etapa de Pré-Resfriamento

```

function dp = d_a_precooling(t,p)
% Constantes Fundamentais:
R = 8.3144; % Universal Gas Constant [J/(mol*K)]
Ea = 10365; % Ativation Energy of Adsorption [J/mol]
c_rl = 2452; % Cp calor especifico do etanol liquido 20°C [J/kg-k]
c_rv = 1514; % Cp calor especifico do etanol vapor 20°C [J/kg-k]
c_h2o = 4183; % Cp calor especifico da agua liquida 20°C [J/kg-k]
cs = 930; % Cp calor especifico do CA [J/kg-k]
Lr = 920100; % Calor de vaporizacao do etanol 20°C [j/kg-k]
Qs = 1002000; % Adsorption Heat [J/kg]
k_iso = 0.033; % Condutividade termica poliestireno [W/m-k]
de = 797.9; % kg/m3 densidade etanol 20°C
viscosidade = 0.001082; % kg/m-s viscosidade etanol 25°C
% Constantes Arbitrarias:
Ms = 215.03*0.3; % Sorption Material mass [kg]
Mb = 87.93; % Adsorbent bed mass [kg]
Me = 14.029; % Evaporator Mass [kg]
Mc = 21.496; % Condenser Mass [kg]
M_h2o = 120*1.0; % massa de agua na camara fria [kg]
cb = 906.7; % Calor especifico Aluminio 35°C (Bed) [J/kg-k]
ce = 383; % Calor especifico do cobre 20°C (Evaporador) [J/kg-k]
cc = ce; % Calor especifico do cobre 20°C (Condensador) [J/kg-k]
A_b = 17.542; % Area total dos tudos de Aluminio [m2]
A_e = 1.942; % Area de troca do evaporador [m2]
A_c = 4.808; % Area de troca do condensador [m2]
A_iso = 1.625*2.0; % Area lateral do isopor que reveste o evaporador [m2]
h_ar = 18; % coeficiente de convecção natural ar (5-30) [W/m2-k]
h_c = 42.687; % Coeficiente de convecção do condensador [W/m2-k]
h_b = 26.362; % Coeficiente de convecção do leite [W/m2-k]
h_h2o = 750; % Coeficiente de convecção natural agua-evaporador [W/m2-k]
emiss = 0.3; % Emissividade
sigma = 5.6697e-8; % Constante de Stefan-Boltzmann [W/m2-k4]

```

```

T_amb = 30.49-2; % Temperatura ambiente Noturna [°C]
x_iso = 0.054*0.3; % Espessura da parede de isolamento do evaporador [m]
% resistencia termica do revestimento do evaporador [°C/W]:
R_ter = x_iso/(k_iso*A_iso)+1/(h_ar*A_iso);
D_cap = 0.062*0.0254; % Diametro tubo capilar [m]
L_cap = 2.94+0.18; % Comprimento do tubo capilar [m]
% -----
% Velocidade de Reacao
dp(1) = 0;
% Vazao de refrigerante no Evaporador
dp(2) = - Ms*dp(1) + de*1000*(pi*(psat_et(p(6)) - ...
    psat_et(p(5)))*D_cap^4)/(128*viscosidade*L_cap);
% Vazao de refrigerante no Condensador
dp(3) = - de*1000*(pi*(psat_et(p(6)) - ...
    psat_et(p(5)))*D_cap^4)/(128*viscosidade*L_cap);
% -----
% Variacao de Temperatura no Leito Adsorativo
dp(4) = (h_b*A_b*(Tamb_pc(t) - p(4)) + Qs*Ms*dp(1) + c_rv*(p(5) - ...
    p(4))*Ms*dp(1))/(Ms*cs + Ms*c_rl*p(1) + Mb*cb);
% Variacao de Temperatura no Evaporador
dp(5) = (h_h2o*A_e*(p(7) - p(5)) - Lr*Ms*dp(1) + c_rl*(p(6) - ...
    p(5))*(-dp(3)))/((1-x(p(6),p(5)))*p(2)*c_rl + x(p(6),p(5))*p(2)*c_rv + Me*ce);
% Variacao de Temperatura no Condensador
dp(6) = (h_c*A_c*(Tamb_pc(t) - p(6)) + emiss*A_c*sigma*(Tamb_pc(t)^4 - ...
    p(6)^4))/(p(3)*c_rl+Mc*cc);
% Variacao de Temperatura na H2O
dp(7) = (h_h2o*A_e*(p(5) - p(7))+(Tamb_pc(t) - p(7))/R_ter)/(M_h2o*c_h2o);
dp = dp';
end

```

APÊNDICE A.6 – Função para o Título da Mistura que Chega ao Evaporador

```
function x = x(Tc,Te)
```

```
% x é a razão entre a massa de vapor no evaporador e a massa total de  
% refrigerante no evaporador,  $x = M_{\text{vap}}/(M_{\text{vap}}+M_{\text{liq}})$ .
```

```
% Assumindo que o etanol deixa o condensador no estado de líquido
```

```
% saturado e passa por um processo isentálpico ( $h_{\text{cond}} = h_{\text{evap}}$ )
```

```
% por meio da válvula de expansão até atingir o evaporador.
```

```
% No processo uma parte do fluido se transforma em vapor saturado.
```

```
%  $h_{\text{con}}(T_c) = h_{\text{liq}}(T_e) + x.[h_{\text{vap}}(T_e) - h_{\text{liq}}(T_e)]$ 
```

```
 $x = (h_{\text{liq}}(T_c) - h_{\text{liq}}(T_e)) / (h_{\text{vap}}(T_e) - h_{\text{liq}}(T_e));$ 
```

```
end
```

APÊNDICE A.7 – Função para a Isoterma de Adsorção

```

function y = W(Tad,Teva)
% Parâmetros do CA/Etanol na Equação Dubinin-Astakhov
% Dados Miyazaki:
Wo =1.2;           % kg/kg
n=1.8;             % --
E=6426;            % J/mol
R = 8.3144;        % J/(mol*K)
% Condições de Operação
Peva = psat_et(Teva);
Pad = psat_et(Tad);
y = Wo*exp(-((R*(Tad+273)./E).*log(Pad./Peva)).^n);
end

```

APÊNDICE A.8 – Algoritmo para Construção do Diagrama do Dühring

%% Obter as Curvas do DIAGRAM de DÜHRING com os dados da simulação:

% Parâmetros do CA/Etanol da Equação Dubinin-Astakhov

Wo = 1.23; % kg/kg

n=2; % --

E=138; % kJ/kg

Rg=0.18048; % kJ/kg-K

% Primeiro desenhar a curva de saturação do etanol

figure

ts = [-20:1:110];

ps = psat_et(ts);

semilogy(ts,ps)

grid

hold on

%% Curvas Isósteras de Referência

Tad = 273 + ts; % Temperatura de adsorção em Kelvin

Pad = psat_et(ts);

We = 0.5461; % Curva Isostera

Peva = Pad./(exp((E./(Rg*Tad)).*(log(Wo./We)).^(1/n))));

semilogy(ts,Peva,'-k')

Tad = 273 + ts; % Temperatura de adsorção em Kelvin

Pad = psat_et(ts);

We = 0.7824; % Curva Isostera

Peva = Pad./(exp((E./(Rg*Tad)).*(log(Wo./We)).^(1/n))));

semilogy(ts,Peva,'-k')

%% Curva da Adsorção:

t1=1;

t2=t_ad;

Tad = 273 + pa(t1:t2,4); % Temperatura de adsorção em Kelvin

Pad = psat_et(pa(t1:t2,4)); % Pressão de Saturação na Tad

We = pa(t1:t2,1);

Peva = Pad./(exp((E./(Rg*Tad)).*(log(Wo./We)).^(1/n))));

semilogy(pa(t1:t2,4),Peva,'b.')

```
%% Curva do Pré-Aquecimento:
```

```
t1=t_ad;
t2=t_ad+t_ph-1;
Tad = 273 + pa(t1:t2,4);
Pad = psat_et(pa(t1:t2,4));
We = pa(t1:t2,1);
Peva = Pad./(exp((E./(Rg*Tad)).*(log(Wo./We)).^(1/n)));
semilogy(pa(t1:t2,4),Peva,'y')
```

```
%% Curva da Dessorção:
```

```
t1=t_ad+t_ph;
t2=t_ad+t_ph+t_de-2;
Tad = 273 + pa(t1:t2,4);
Pad = psat_et(pa(t1:t2,4));
We = pa(t1:t2,1);
Peva = Pad./(exp((E./(Rg*Tad)).*(log(Wo./We)).^(1/n)));
semilogy(pa(t1:t2,4),Peva,'r')
```

```
%% Curva do Pré-Resfriamento:
```

```
t1=t_ad+t_ph+t_de;
t2=t_ad+t_ph+t_de+t_pc-3;
Tad = 273 + pa(t1:t2,4); % Temperatura da dessorção em Kelvin
Pad = psat_et(pa(t1:t2,4)); % Pressão de Saturação na Tde
We = pa(t1:t2,1);
Peva = Pad./(exp((E./(Rg*Tad)).*(log(Wo./We)).^(1/n)));
semilogy(pa(t1:t2,4),Peva,'c')
```

```
%%
```

```
axis([-10 80 0.95 15])
```

```
axis([-15 100 0.70 20])
```

```
legend('Curva de Saturação','Isósteras 1','Isósteras 2','Adsorção',...
       'Pré-Aquecimento','Dessorção','Pré-Resfriamento')
```

```
xlabel('Temperatura no Leito [°C]'), ylabel('Pressão no Leito [kPa]')
```

APÊNDICE A.9 – Função para Calcular o COP e SCE

```

function [COP SCE] = cop(Tad,Tde,Teva,Tcon)
% Esta função calcula o COP, SCE do sistema de adsorção com base
% nas (Tad, Tde, Teva, Tcon) temperaturas de adsorção, dessorção,
% evaporador e condensador
%% Dados Necessários
Q_st = 1032; % [kJ/kg] Calor Isótero
Cp_s = 1.375; % [kJ/kg*k] Calor específico do CA
Tc = 61.2213; % DEVE SER EXTRAIDA DA SIMULAÇÃO
%% Fase 1
w_max = W(Tad,Teva); % [kg/kg]
w_min = W(Tde,Tcon); % [kg/kg]
%% Fase 2
Cp_ref = cp_liq(Teva); % [kJ/kg*k] Calor específico do etanol no evaporador
h_vap = hvap(Teva); % [kJ/kg] Entalpia do vapor de etanol no evaporador
h_liq = hliq(Teva); % [kJ/kg] Entalpia do etanol liquido no evaporador
delta_h = h_vap - h_liq; % [kJ/kg] Calor de vaporização do etanol na temp. do evap.
%% Fase 3
% Calor Retirado do Ambiente
SCE = (w_max - w_min).*(delta_h - Cp_ref.*(Tcon - Teva));
% Calor Necessário para Funcionar
Q_des = Q_st.*(w_max - w_min);
Qsh_pr = Cp_s.*(Tc - Tad) + w_max.*Cp_ref.*(Tc - Tad);
Qsh_des = Cp_s.*(Tde - Tc) + 0.5.*(w_max - w_min).*Cp_ref.*(Tde - Tc);
% Peformance
COP = SCE./(Q_des + Qsh_pr + Qsh_des);
end

```

APÊNDICE B – Propriedades do Refrigerante

APÊNDICE B.1 – Função para Pressão de Saturação

```
function [y] = psat_et(x)
```

```
% PRESSÃO DE SATURAÇÃO COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA
```

```
p1 = -1.8364e-19;
```

```
p2 = 6.7938e-17;
```

```
p3 = -9.6871e-15;
```

```
p4 = 5.6066e-13;
```

```
p5 = -5.7155e-12;
```

```
p6 = 4.2878e-09;
```

```
p7 = 6.9505e-07;
```

```
p8 = 6.2281e-05;
```

```
p9 = 0.0034882;
```

```
p10 = 0.11217;
```

```
p11 = 1.5994;
```

```
y = p1*x.^10 + p2*x.^9 + p3*x.^8 + p4*x.^7 + p5*x.^6 + p6*x.^5 + p7*x.^4 + ...
```

```
p8*x.^3 + p9*x.^2 + p10*x + p11 ;
```

```
end
```

APÊNDICE B.2 – Função para a Entalpia do Etanol Líquido

```
function hliq = hliq(t)
% ENTALPIA DO LIQUIDO SATURADO
% NA TEMPERATURA DE SATURAÇÃO
% hliq [kJ/kg*k]
% t    [°C]
p1 = -2.7959e-12;
p2 = 1.2358e-09;
p3 = -2.0466e-07;
p4 = 1.0903e-05;
p5 = 0.005819;
p6 = 2.212;
p7 = 49.603;
hliq = p1*t.^6 + p2*t.^5 + p3*t.^4 + p4*t.^3 + p5*t.^2 + p6*t + p7;
end
```

APÊNDICE B.3 – Função para a Entalpia do Vapor de Etanol

```

function hvap = hvap(t)
% ENTALPIA DO VAPOR SATURADO
% NA TEMPERATURA DE SATURAÇÃO
% hvap [kJ/kg*k]
% t    [°C]
p1 = -2.4236e-16;
p2 = 9.4899e-14;
p3 = -1.4466e-11;
p4 = 1.0478e-09;
p5 = -3.3025e-08;
p6 = 1.1205e-07;
p7 = 1.368e-05;
p8 = -0.0004397;
p9 = 0.021861;
p10 = 1.3166;
p11 = 982.63;
hvap = p1*t.^10 + p2*t.^9 + p3*t.^8 + p4*t.^7 + p5*t.^6 + p6*t.^5 + p7*t.^4 + ...
    p8*t.^3 + p9*t.^2 + p10*t + p11 ;
end

```

APÊNDICE B.4 – Função para o Calor Específico do Etanol Líquido

```
function cp_liq = cp_liq(t)
% CP DO LIQUIDO RESFRIADO COMO
% UMA FUNÇÃO DA TEMPERATURA
% cp_liq [kJ/kg*k]
% t      [°C]
p1 = -1.632e-11;
p2 = 6.1683e-09;
p3 = -8.2483e-07;
p4 = 3.3082e-05;
p5 = 0.011634;
p6 = 2.2119;
cp_liq = p1*t.^5 + p2*t.^4 + p3*t.^3 + p4*t.^2 + p5*t + p6;
end
```

APÊNDICE B.5 – Função para o Calor Específico do Vapor de Etanol

```
function cp_vap = cp_vap(t)
% CP DO VAPOR AQUECIDO COMO
% UMA FUNÇÃO DA TEMPERATURA
% cp_vap [kJ/kg*k]
% t      [°C]
p1 = -1.7387e-12;
p2 = 8.3e-10;
p3 = 2.3062e-08;
p4 = 8.7805e-07;
p5 = 0.003231;
p6 = 1.4495;
cp_vap = p1*t.^5 + p2*t.^4 + p3*t.^3 + p4*t.^2 + p5*t + p6 ;
end
```

APÊNDICE C – Modelos Climáticos

APÊNDICE C.1 – Função para a Temperatura Diária:

```

function Tamb = tamb(x)
% Modelo para temperatura com base nos dados do INMET e modelo da ASHRAE
% Valores de 'x' em horas
x=rem(x,24);
%% Polinômio para o fator 'f':
% where z is centered and scaled:
mu = 12;
sigma = 7.3598;
z = (x-mu)/sigma;
% Coefficients:
p1 = -1.7431; p2 = -1.2954; p3 = 16.323; p4 = 11.572; p5 = -62.43;
p6 = -42.724; p7 = 123.23; p8 = 78.087; p9 = -106.01; p10 = 23.619;
% Norm of residuals =
% 1.0952
f = p1*z.^9 + p2*z.^8 +...
    p3*z.^7 + p4*z.^6 +...
    p5*z.^5 + p6*z.^4 +...
    p7*z.^3 + p8*z.^2 +...
    p9*z + p10 ;
%% Modelo da ASHRAE:
Tmax = 32.40; Tmin = 24.77;
Tamb = Tmax - (f/100)*(Tmax - Tmin);
end

```

APÊNDICE C.2 – Função para a Temperatura Diária na Adsorção

```

function Tamb = Tamb_ad(t)
% Esta função retorna a temperatura ambiental com base nos dados de
% metereologicos das temperaturas máximas e mínimas de um local.
% a entrada "t" está em segundos e deve ser convertida em horas de 0 a 24 h.
x = t/3600; % Converter a entrada em segundos para horas
x = x + 6 + 3.3 + 5 + 3.7; % 18.0 horas após 0:00 AM inicia a adsorção (18:00 PM)
x = rem(x,24); % Para que os valores de horas fiquem entre 0 e 24 sempre.
% where z is centered and scaled:
mu = 12;
sigma = 7.3598;
z = (x-mu)/sigma;
% Coefficients:
p1 = -1.7431;
p2 = -1.2954;
p3 = 16.323;
p4 = 11.572;
p5 = -62.43;
p6 = -42.724;
p7 = 123.23;
p8 = 78.087;
p9 = -106.01;
p10 = 23.619;
% Norm of residuals = 1.0952
f = p1*z.^9 + p2*z.^8 + ...
    p3*z.^7 + p4*z.^6 + ...
    p5*z.^5 + p6*z.^4 + ...
    p7*z.^3 + p8*z.^2 + ...
    p9*z + p10 ;
Tmax = 32.40; Tmin = 24.77;
Tamb = Tmax - (f/100)*(Tmax - Tmin);
end

```

APÊNDICE C.3 – Função para a Temperatura Diária no Pré-Aquecimento

```

function Tamb = Tamb_ph(t)
% Esta função retorna a temperatura ambiental com base nos dados de
% meteorológicos das temperaturas máximas e mínimas de um local
% A entrada "t" está em segundos e deve ser convertida p/ horas de 0 a 24 h.
x = t/3600; % Converter a entrada em segundos para horas
x = x + 6; % 6.0 horas após 0:00 AM inicia o pre-aquecimento (06:00 AM)
x = rem(x,24); % Para que os valores de horas fiquem entre 0 e 24 sempre.
% where z is centered and scaled:
mu = 12;
sigma = 7.3598;
z = (x-mu)/sigma;
% Coefficients:
p1 = -1.7431;
p2 = -1.2954;
p3 = 16.323;
p4 = 11.572;
p5 = -62.43;
p6 = -42.724;
p7 = 123.23;
p8 = 78.087;
p9 = -106.01;
p10 = 23.619;
% Norm of residuals = 1.0952
f = p1*z.^9 + p2*z.^8 + ...
    p3*z.^7 + p4*z.^6 + ...
    p5*z.^5 + p6*z.^4 + ...
    p7*z.^3 + p8*z.^2 + ...
    p9*z + p10 ;
Tmax = 32.40; Tmin = 24.77;
Tamb = Tmax - (f/100)*(Tmax - Tmin);
end

```

APÊNDICE C.4 – Função para a Temperatura Diária na Dessorção

```

function Tamb = Tamb_de(t)
% Esta função retorna a temperatura ambiental com base nos dados de
% meteorológicos das temperaturas máximas e mínimas de um local
% a entrada "t" está em segundos e deve ser convertida em horas de 0 a 24 h.
x = t/3600; % Converter a entrada em segundos para horas
x = x + 6 + 3.3; % 9.3 horas após 0:00 AM inicia a dessorção (09:18 AM)
x = rem(x,24); % Para que os valores de horas fiquem entre 0 e 24 sempre.
% where z is centered and scaled:
mu = 12;
sigma = 7.3598;
z = (x-mu)/sigma;
% Coefficients:
p1 = -1.7431;
p2 = -1.2954;
p3 = 16.323;
p4 = 11.572;
p5 = -62.43;
p6 = -42.724;
p7 = 123.23;
p8 = 78.087;
p9 = -106.01;
p10 = 23.619;
% Norm of residuals = 1.0952
f = p1*z.^9 + p2*z.^8 + ...
    p3*z.^7 + p4*z.^6 + ...
    p5*z.^5 + p6*z.^4 + ...
    p7*z.^3 + p8*z.^2 + ...
    p9*z + p10 ;
Tmax = 32.40; Tmin = 24.77;
Tamb = Tmax - (f/100)*(Tmax - Tmin);
end

```

APÊNDICE C.5 – Função para a Temperatura Diária no Pré-Resfriamento

```

function Tamb = Tamb_pc(t)
% Esta função retorna a temperatura ambiental com base nos dados de
% meteorológicos das temperaturas máximas e mínimas de um local
% a entrada "t" está em segundos e deve ser convertida em horas de 0 a 24 h.
x = t/3600; % Converter a entrada em segundos para horas
x = x + 6 + 3.3 + 5; % 14.3 horas após 0:00 AM inicia o resfriamento (14:18 PM)
x = rem(x,24); % Para que os valores de horas fiquem entre 0 e 24 sempre.
% where z is centered and scaled:
mu = 12;
sigma = 7.3598;
z = (x-mu)/sigma;
% Coefficients:
p1 = -1.7431;
p2 = -1.2954;
p3 = 16.323;
p4 = 11.572;
p5 = -62.43;
p6 = -42.724;
p7 = 123.23;
p8 = 78.087;
p9 = -106.01;
p10 = 23.619;
% Norm of residuals = 1.0952
f = p1*z.^9 + p2*z.^8 + ...
    p3*z.^7 + p4*z.^6 + ...
    p5*z.^5 + p6*z.^4 + ...
    p7*z.^3 + p8*z.^2 + ...
    p9*z + p10 ;
Tmax = 32.40; Tmin = 24.77;
Tamb = Tmax - (f/100)*(Tmax - Tmin);
end

```

APÊNDICE C.6 – Função para a Radiação Horária

```

function y = radiacao(x)
% Calcula a radiação média diária em função da hora do dia
% Esta function deve ser do tipo harmonica com o periodo de 24 h
% A entra de 'x' está em valores de horas
x = rem(x,24); % Usa apenas o resto da divisão do tempo de entrada por 24 h
% Coefficients:
p1 = 0.36655;
p2 = -16.872;
p3 = 258.98;
p4 = -1492.1;
p5 = 2863 + 3.8312; % 3.8312... é p/ y ser > 0 sempre
y = p1*x.^4 + p2*x.^3 + p3*x.^2 + p4*x + p5;
y = y.*((x>5)&(x<18)); % Anula os valores quando nao tem radiacao
end

```

APÊNDICE C.7 – Função p/ a Radiação Horária na Etapa de Pré-Aquecimento

```

function y = radiacao_ph(t)
% Calcula a radiação média diária em função da hora do dia
% Esta function deve ser do tipo harmonica com o periodo de 24 h
% Usa apenas o resto da divisão do tempo de entrada por 24 h
% A entrada 't' é de 1:t_ph
x1 = t/3600; % Converter a entrada em segundos para horas
x1 = x1 + 6; % Este 6 é a hora da manha que começa o pre_cooling
x = rem(x1,24);
% Coefficients:
p1 = 0.36655;
p2 = -16.872;
p3 = 258.98;
p4 = -1492.1;
p5 = 2863 + 3.8312; % 3.8312... é p/ y ser > 0 sempre
y = p1*x.^4 + p2*x.^3 + p3*x.^2 + p4*x + p5;
y = y.*((x>5)&(x<18)); % Anula os valores quando nao tem radiacao
end

```

APÊNDICE C.8 – Função para a Radiação Horária na Etapa de Dessorção

```

function y = radiacao_de(t)
% Calcula a radiação média diária em função da hora do dia
% Esta function deve ser do tipo harmonica com o periodo de 24 h
% Usa apenas o resto da divisão do tempo de entrada por 24 h
% A entrada 't' é de 1:t_ph
x1 = t/3600; % Converter a entrada em segundos para horas
x1 = x1 + 6 + 3.7-0.4; % 6 é a hora que começa o pre_heating, 3.7 é a duração
x = rem(x1,24);
% Coefficients:
p1 = 0.36655;
p2 = -16.872;
p3 = 258.98;
p4 = -1492.1;
p5 = 2863 + 3.8312; % 3.8312... é p/ y ser > 0 sempre
y = p1*x.^4 + p2*x.^3 + p3*x.^2 + p4*x + p5;
y = y.*((x>5)&(x<18)); % Anula os valores quando nao tem radiacao
end

```