

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO PARA PRODUÇÃO
DE GELO, UTILIZANDO ENERGIAS ALTERNATIVAS**

Rogério Gomes de Oliveira
Engenheiro de Alimentos

Orientador: Prof.Dr. Vivaldo Silveira Jr.

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Rogério Gomes de Oliveira aprovada pela Comissão Julgadora em 01 de março de 1999.

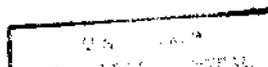
Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Campinas, 01 de março de 1999


Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior
Presidente da Banca

Campinas - SP
1999

99 01426



“Ando devagar porque já tive pressa e levo esse sorriso no rosto porque já chorei demais. Hoje me sinto mais forte, mais feliz, quem sabe? Eu só levo a certeza de que muito pouco eu sei, que nada sei...”

Renato Teixeira e Almir Satter

Agradecimentos:

À uma força maior que não cabe em um nome e que merece todo meu respeito.

Ao meu pai e minha mãe por terem me educado com muito amor e estarem sempre ao meu lado, apoiando me, mesmo sem me compreender, muitas das vezes.

Ao Prof. Dr. Vivaldo pela orientação, apoio e confiança que ele depositou em mim, desde a primeira vez que tive oportunidade de trabalhar com ele, a 6 anos atrás na minha primeira iniciação científica, até a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Lincoln por uma frase que me ajudou muito em alguns momentos difíceis do mestrado, *“Não adianta bater a cabeça na parede porque a parede fica e a cabeça racha...”*

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Satoshi Tobinaga, Prof. Dr. Theo G. Kieckbush, e o suplente Prof. Dr. Luis A. B. Cortez, pelas sugestões apresentadas ao trabalho.

Aos amigos e companheiros que tornam a vida mais agradável, em especial ao amigos que moraram comigo nestes dois anos, pois morar num lugar agradável é essencial para desenvolver um bom trabalho.

Ao Engenheiro Mauro Zackiewickz pelas sugestões apresentadas à tese e pelo empréstimo do microcomputador utilizado nas simulações.

Ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa.

INDICE GERAL

<i>INDICE DE TABELAS</i>	<i>xiii</i>
<i>INDICE DE FIGURAS</i>	<i>xv</i>
<i>NOMECLATURA</i>	<i>xvii</i>
<u>Letras Gregas:</u>	<i>xviii</i>
<u>Subscrito:</u>	<i>xviii</i>
<i>RESUMO</i>	<i>xxi</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xxi</i>
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Produção de efeito frigorífico através de energias alternativas.....	4
3.2 Princípios da adsorção/dessorção.....	9
3.3 Modelo matemático do reator	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 Materiais.....	15
4.2 Métodos	15
4.2.1 <u>Modelagem matemática do processo</u>	15
4.2.2 <u>Características do sistema</u>	22
4.2.3 <u>Hipóteses e justificativas</u>	25
4.2.4 <u>Método numérico de resolução das equações</u>	26
4.2.5 <u>Planejamento fatorial</u>	27
4.2.6 <u>Análise de sensibilidade</u>	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1 Planejamento experimental fatorial Plackett-Burman.....	32

ÍNDICE GERAL

5.1.1 Efeito no COP	33
5.1.2 Efeito na Potência de Refrigeração Relativa	33
5.1.3 Efeito na produção diária de gelo, por kg de adsorvente	34
5.1.4 Efeito no tempo de processo	35
5.2 Planejamento experimental fatorial completo	36
5.2.1 Efeito no COP	37
5.2.2 Efeito no Potência de Refrigeração Relativa	40
5.2.3 Efeito na produção diária de gelo	43
5.2.4 Efeito no tempo de processo	46
5.2.5 Considerações finais	49
5.3 Teste de sensibilidade	51
5.4 Ciclo modificado	53
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	56
6.1 Conclusões	56
6.1.1 Sobre o COP	56
6.1.2 Sobre a Potência de Refrigeração Relativa e a produção diária de gelo por kg de adsorvente	57
6.1.4 Sobre o tempo de processo	57
6.1.5 Sobre o processo modificado	58
6.2 Sugestões	58
BIBLIOGRAFIA	59
APÊNDICE I	63
Fluxograma de resolução das equações do modelo matemático	64
APÊNDICE II	65
Planejamento experimental fatorial Plackett-Burman	65
Planejamento experimental fatorial completo	67
APÊNDICE III	68
Resultado completo dos ensaios 01 à 06 do planejamento experimental Plackett-Burman	68
Resultado completo dos ensaios 07 à 12 do planejamento experimental Plackett-Burman.	70
Gráficos de Clapeyron para os 12 ensaios do planejamento experimental Plackett-Burman	72
APÊNDICE IV	78
Resultado completo dos ensaios 01 à 08 do planejamento experimental fatorial completo.	78

ÍNDICE GERAL

Resultado completo dos ensaios 09 à 16 do planejamento experimental fatorial completo.....	80
Gráficos de Clapeyron para os 16 ensaios do planejamento experimental fatorial completo.	82
Resultado completo dos ensaios 17 à 21, complementares ao planejamento experimental fatorial completo.	90
Resultado completo dos ensaios 22 à 25, complementares ao planejamento experimental fatorial completo.	92
Gráficos de Clapeyron para os 9 ensaios complementares do planejamento experimental fatorial completo.	94
<i>APÊNDICE V</i>	99
<i>APÊNDICE VI</i>	101
<i>APÊNDICE VII</i>	102
<i>APÊNDICE VIII</i>	103
<i>APÊNDICE IX</i>	104
Resultado completo dos ensaios para as análises dos fatores de sensibilidade.....	104
Gráficos de Clayperon para os 4 ensaios da análise dos fatores de sensibilidade.....	106
<i>APÊNDICE X</i>	108
Resultado completo do ensaio de referência e do ensaio modificado.	108
Gráficos de Clayperon para o ensaio de referência e para o ensaio modificado.....	110

INDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1. Variáveis utilizadas no PEP-B.</i>	29
<i>Tabela 2. O valor das variáveis do PEFC nos níveis dos ensaios.</i>	30
<i>Tabela 3. Resultado dos 12 ensaios do PEP-B.</i>	32
<i>Tabela 4. Influência da mudança das variáveis no COP do sistema, pelo PEP-B.</i>	33
<i>Tabela 5: Influência da mudança das variáveis na potência relativa de refrigeração do sistema, pelo PEP-B.</i>	34
<i>Tabela 6: Influência da mudança das variáveis na produção diária de gelo por kg de adsorvente, pelo PEP-B.</i> ..	34
<i>Tabela 7. Influência da mudança das variáveis no tempo do ciclo de refrigeração do sistema, pelo PEP-B.</i>	35
<i>Tabela 8. Resultado dos 16 ensaios do planejamento experimental fracional completo.</i>	36
<i>Tabela 9. Influência da mudança das variáveis no COP do sistema, pelo planejamento experimental fracional completo.</i>	37
<i>Tabela 10. Influência da mudança das variáveis na potência de refrigeração relativa, do sistema, pelo planejamento experimental fracional completo.</i>	40
<i>Tabela 11. Influência da mudança das variáveis na produção diária de gelo por kg de adsorvente, pelo planejamento experimental fracional completo.</i>	44
<i>Tabela 12. Influência da mudança das variáveis no tempo de processo, pelo planejamento experimental fracional completo.</i>	47
<i>Tabela 13. Resultado dos 2 ensaios realizados para avaliar o Fator de Sensibilidade do COP, P.R.R., da produção diária de gelo e do tempo de processo em relação à temperatura do ar.</i>	52
<i>Tabela 14. Fator de Sensibilidade do COP, P.R.R., produção diária de gelo e tempo de processo em função da mudança da temperatura do ar de 20 °C para 35 °C.</i>	52
<i>Tabela 15. Resultado dos 2 ensaios realizados para avaliar a sensibilidade do COP, P.R.R., produção diária de gelo e tempo de processo em relação à temperatura do fluido de aquecimento.</i>	53
<i>Tabela 16. Sensibilidade do COP, potência de refrigeração relativa, da produção diária de gelo e tempo de processo em função da mudança da temperatura do fluido de aquecimento de 70 °C para 100 °C.</i>	53
<i>Tabela 17. Resultado dos 2 ensaios realizados para avaliação do ciclo modificado</i>	54

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema do sistema de refrigeração por adsorção movido a energia alternativa.</i>	7
<i>Figura 2. Diagrama de Clapeyron para um ciclo ideal de adsorção/dessorção.</i>	8
<i>Figura 3: Corte transversal do reator.</i>	24
<i>Figura 4. Variação do COP em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.</i>	38
<i>Figura 5. Variação do COP em função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.</i>	39
<i>Figura 6. Variação do COP em função da temperatura do fluido de aquecimento e da temperatura do ar, com a espessura do leito no nível inferior e a densidade do leito no nível superior.</i>	39
<i>Figura 7. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento espessura do leito, com as demais variáveis no nível zero.</i>	41
<i>Figura 8. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do ar e espessura do leito, com as demais variáveis no nível zero.</i>	42
<i>Figura 9. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do ar e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.</i>	42
<i>Figura 10. Variação da potência de refrigeração relativa em função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.</i>	43
<i>Figura 11. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da espessura do leito e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.</i>	44
<i>Figura 12. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da espessura do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.</i>	45
<i>Figura 13. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.</i>	45
<i>Figura 14. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, função da temperatura do ar e do fluido térmico de aquecimento, com a espessura do leito no nível inferior e a densidade do leito no nível superior.</i>	46
<i>Figura 15. Variação do tempo de processo em função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.</i>	48
<i>Figura 16. Variação do tempo de processo em função da espessura do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.</i>	48
<i>Figura 17. Variação do tempo de processo em função da espessura do leito e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.</i>	49
<i>Figura 18. Variação do tempo de processo em função da temperatura do ar e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.</i>	49
<i>Figura 19. Variação da produção de gelo por kg de adsorvente, função da temperatura do ar e do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.</i>	50
<i>Figura 20: Variação do COP em função da espessura do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.</i>	51

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 21. Variação do COP em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento e da espessura do leite, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 22. Variação do COP em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento e da densidade do leite, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 23. Variação do COP em função da temperatura do ar e da densidade do leite, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 24. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do fluido térmico e densidade do leite, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 25. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do ar e densidade do leite, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 26. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da densidade do leite e da temperatura do fluido térmico, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 27. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da densidade do leite e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 28. Variação do tempo de processo em função da densidade do leite e da temperatura do fluido de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 29. Variação do tempo de processo em função da densidade do leite e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.</i>	<i>103</i>

NOMECLATURA

A	Potencial de adsorção	(Jkg ⁻¹)
A	Área de troca térmica do condensador	(m ²)
Cp	Calor específico	(Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
COP	Coeficiente de Performance.	
D	Parâmetro da microestrutura do adsorvente.	
D'	Razão entre D e β^2	
e	Espessura	
FS	Fator de sensibilidade	
h	Calor de sorção ou entalpia	(Jkg ⁻¹)
h _{solid.}	Entalpia de fusão da água	(Jkg ⁻¹)
L	Comprimento do leito	(m)
m	massa	(kg)
m	Valor médio	
n	fator de ajuste da Equação D-A, variável com o adsorvente e com o adsorvato	
N	Número de ensaios do planejamento experimental	
PEFC	Planejamento experimental fatorial completo	
PEP-B	Planejamento experimental Plackett-Burman	
P.R.R.	Potência de refrigeração relativa	(W kg ⁻¹ _{adsorvente})
P ₁	Pressão do leito de adsorvato/adsorvato comprimido em uma superfície equipotencial	(Pa)
P ₂	Pressão de equilíbrio vapor-adsorvato correspondente a temperatura de saturação (T _{sat.}) do adsorvato no condensador ou evaporador	(Pa)
Q(r)	Calor de sorção em função do raio	(Jkg ⁻¹)
R	Constante universal dos gases	(JkgK ⁻¹)
Resp	Resposta	
R ₁	Anel interno do reator	(m)

NOMECLATURA

R_2	Anel externo do reator	(m)
t	Tempo	(s)
T	Temperatura	(K)
T_{Ft}	Temperatura do fluido térmico	(K)
U	Coefficiente global de transferência de calor	(W m ⁻² K ⁻¹)
1/U	Resistência térmica entre a parede do reator e o leito	(m ² K W ⁻¹)
V	volume	(m ³)
Var	Variável	
W	Volume de adsorvente	(m ³)
Wo	Volume máximo de adsorvente no adsorvato	(m ³)
x	massa adsorvida por unidade de massa do adsorvente anidro, que será denominada <i>uptake</i>	(kg _{adsorvato} kg ⁻¹ _{adsorvente})
xo	<i>uptake</i> máximo	(kg _{adsorvato} kg ⁻¹ _{adsorvente})

Letras Gregas:

β	Coeficiente de afinidade do adsorvato	
ρ	Densidade	(kg m ⁻³)
$\rho(T)$	Densidade em função da temperatura	(kg m ⁻³)

Subscrito:

Ad	Fase de resfriamento e adsorção, no ciclo frigorífico
amb.	Ambiente
c	Condensação
carv.	Carvão ativado
cond.	Condensador
D	Dessorção

NOMECLATURA

E	Evaporação
Evap.	Evaporador
L	Líquido
leito	Leito de adsorvente e adsorvato
NH ₃	Amônia
reator	Conjunto contendo o leito de adsorvente/adsorvato e o corpo metálico do reator
rmetal	Parte metálica do corpo do reator
sat	Saturação
V	Vapor
VL	Vapor-Líquido

RESUMO

Muitos pesquisadores estão empenhados em encontrar alternativas para os refrigeradores convencionais, que além de consumirem energia elétrica, geralmente utilizam refrigerantes poluentes como os CFCs, que destroem a camada de ozônio.

Neste trabalho, propôs-se a modelar e simular, dinamicamente, um sistema produtor de gelo por adsorção/dessorção de amônia em carvão ativado, que pudesse utilizar fontes de energia de diferentes origens, tais como radiação solar ou energia térmica, proveniente da combustão de combustíveis fósseis, de biomassa ou resíduos térmicos.

Para utilizar estas energias, um fluido térmico troca calor com uma fonte energética e o transfere para um reator, contendo carvão ativado e amônia, na etapa de aquecimento (dessorção). O mesmo fluido térmico, a temperaturas mais baixas, é usado na etapa de resfriamento do reator (adsorção).

A modelagem matemática do sistema é constituída pelas equações de estado do leito, segundo teoria de adsorção por preenchimento de volume e pelas equações de balanço de massa e energia, nas diferentes etapas do processo.

Foi utilizado o programa MATLAB 4.2 para resolver as equações diferenciais, integrais e integro-diferenciais obtidas na modelagem, com o método das diferenças finitas.

Avaliou-se através de planejamento fatorial do tipo Plackett-Burman e planejamento fatorial completo, a influência da mudança das variáveis de um nível inferior até um nível superior, no COP, na potência de refrigeração relativa e no tempo de processo, além do que, aplicou-se um estudo de sensibilidade, para verificar variação dessas respostas em relação a uma condição padrão.

Pode-se concluir que para obter bons valores de potência de refrigeração relativa e produção diária de gelo, o reator deve ter uma espessura de cerca de 2 cm.

Temperaturas acima de 25 °C pioram o coeficiente de performance do sistema, a potência de refrigeração relativa e a produção de gelo.

Nas condições de operação de referência conseguiu-se 4 ciclos frigoríficos por dia com produção de gelo diária de aproximadamente 300 g de gelo por kg de adsorvente, enquanto o ciclo modificado produziu aproximadamente 350 g de gelo por kg de adsorvente.

ABSTRACT

Many researchers are involved in finding alternatives for the house refrigerators, that use electrical energy and pollutant refrigerants, like the CFCs, that damage the ozone layer.

This work intends to model and simulate dynamically an ice production system using adsorption/desorption of ammonia on activated charcoal, that can use thermal energy from different sources, like solar radiation, oil fuels and biomass.

To use this energy, a thermic fluid exchanges heat with the energy source and transfers this energy to a reactor that contains activated charcoal and ammonia, in the heating phase (desorption). In the cooling phase (adsorption), we use this same thermic fluid, but at a lower temperature.

The mathematical simulation uses the state equation for the charcoal/ammonia bed, according to the adsorption theory of bulk filling, and heat and mass balance equations, for each part of the system.

The software MATLAB 4.2 was used to solve the differential and integro differential equations developed during the modelling of the system, in terms of the finite difference method.

Using the Plackett-Burman fractional experimental design and a complete fractional experimental design, we could assess in our interested answers, the influence of the changing different variables from a lower level to a higher level on the response of interest.

A sensibility test was applied to some variable to help us to identify which responses more sensitive to a variable change.

With the result from all tests, we could find best refrigerator conditions to produce ice in the shortest time.

To be able to get good values of specific cooling power and daily ice production, the thickness of the adsorbent/desorbent bed must be about 0,8 inch

Temperatures above 25 °C put down the coefficient of performance, the specific cooling power and the daily ice production.

At the standard operations conditions, the ice can be produced 4 times per day with a daily production of 0,3 lb per lb of adsorbent while the modified process produced about 0,35 lb per lb of adsorbent.

1. INTRODUÇÃO

Num país de dimensões continentais como o Brasil, muitas regiões que estão afastadas dos grandes centros urbanos encontram problemas para obter suprimento de energia elétrica, seja por não haver energia disponível ou por esta ser insuficiente para atender a demanda. Neste lugares, as famílias que não dispõem de energia elétrica, não podem utilizar refrigeradores convencionais, o que dificulta a armazenagem de produtos perecíveis, tais como alimentos ou alguns tipos de remédios e vacinas.

O problema de demanda e oferta de energia vem preocupando autoridades de todos os países. Muitos locais no Brasil não possuem energia elétrica e em outros, a demanda em determinados períodos é maior que a oferta. Os refrigeradores são geralmente, responsáveis por 30% do consumo de energia de uma residência, segundo dados da CPFL¹.

Muitas comunidades usam como alternativa, refrigeradores por absorção que utilizam gás de cozinha ou querosene como suprimento de energia, ou compram gelo de cidades longínquas, cuja massa total chega sensivelmente reduzida, devido ao derretimento do mesmo, durante o percurso de entrega.

Os sistemas por absorção não apresentam muita liberdade de escolha da fonte energética ficando restrito ao GLP² ou querosene, uma vez que estas fontes precisam fornecer grande fluxo de calor de maneira constante, e a temperaturas elevadas (acima de 100 °C). A alternativa de comprar gelo em outra localidade é pouco prática e dependendo da distância envolvida, é inviável.

Sistemas de refrigeração movido a energia solar já foram estudados por muitos autores (PONS & GUILLEMINOT,1986; CRISTOPH,1988; SILVEIRA JR.,1990; MEDINI ET AL.,1991; CHO & KIM.,1992; CRISTOPH,1994; TAMAINOT-TELTO & CRISTOPH,1996) e mostraram ser termodinamicamente viáveis para produção de ambientes refrigerados sob condições específicas.

Sendo o Brasil, um país privilegiado em relação a incidência solar, onde praticamente todo território nacional apresenta grande insolação o ano todo, seria vantajoso utilizar a radiação solar como fonte energética.

¹ Companhia Paulista de Força e Luz.

² Gás liquefeito de petróleo.

Um sistema exclusivamente à radiação solar apresenta os inconvenientes de depender muito das condições climáticas do período e de possibilitar apenas um ciclo de refrigeração pelo sistema de dessorção/adsorção, por dia (sistema intermitente), o que limita muito a produção de frio e encarece o custo do equipamento, em relação a sua capacidade de refrigeração.

Uma proposta para resolver estes inconvenientes, de sistemas de refrigeração por energia solar é de utilizar diferentes fontes de energia complementares, tais como, radiação solar ou energia térmica proveniente da queima de combustíveis derivados de petróleo, de biomassa ou outras alternativas.

O sistema de adsorção sólido-vapor não precisa de temperaturas muito altas para funcionar, portanto é adequado para ser modelado e simulado de maneira que possa utilizar diferentes fontes energéticas a baixas temperaturas.

O uso da energia se dá pelo aquecimento de um fluido térmico pela fonte energética, e a transferência deste calor, ao reator contendo o par adsorvente/adsorvato.

A adsorção vem ganhando adeptos em todo mundo, como uma alternativa aos sistemas convencionais de refrigeração, por não utilizar refrigerantes poluentes, como os CFCs que prejudicam a camada de ozônio e por não apresentar partes móveis, o que diminui os trabalhos de manutenção do sistema e o torna silencioso. Outro fator que favorece os sistemas por adsorção é que por trabalhar com temperaturas não tão elevadas quanto os sistemas por absorção, ele pode aproveitar o calor de baixa temperatura (65-100 °C) desperdiçado em muitos processos industriais, por não ser economicamente viável utilizá-lo (CHO & KIM,1992).

2. OBJETIVO

Os objetivos deste projeto foram:

1. Modelar e simular dinamicamente um sistema de refrigeração, por adsorção de amônia em carvão ativado, para a produção de gelo, que possa utilizar mais de uma fonte de energia.

2. Estimar o tempo necessário para que ocorra cada ciclo frigorífico e assim a quantidade de ciclos a ser realizados em um dia, através da modelagem e simulação desse sistema.

3. Avaliar o impacto dos parâmetros de projeto e de operação, no tempo de processo, no COP³, na potência de refrigeração relativa e na produção diária de gelo, por kg de adsorvente, através de planejamento fatorial e análise de sensibilidade.

³Coefficiente de performance, isto é, razão entre o calor absorvido no evaporador pelo fornecido ao reator na fase de dessorção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção de efeito frigorífico através de energias alternativas

As regiões tropicais recebem grande quantidade de radiação solar durante todo o ano, sendo interessante buscar meios de utilizar esta fonte energética, para poupar fontes não renováveis. Esta energia já é utilizada no aquecimento de água e na secagem de grãos, porém para a refrigeração, ela está apenas no nível experimental.

Devido ao baixo preço da energia elétrica, os sistemas que utilizam energia solar, só são economicamente viáveis, onde não haja rede elétrica. Espera-se que com o aumento da demanda energética nos próximos anos, com o incentivo governamental e que com o aumento do número de pesquisas na área, estes sistemas possam se tornar economicamente atrativos, mesmo nos locais onde haja rede elétrica disponível.

Para obter o efeito frigorífico em locais onde não há rede elétrica, tem-se três opções disponíveis no mercado. A primeira é a utilização de aparelhos de refrigeração convencionais e células fotovoltaicas para suprir a energia elétrica requerida por estes aparelhos. A segunda opção é a utilização de geradores de energia, que teriam a mesma finalidade das células fotovoltaicas e a terceira opção seria o uso de refrigeradores por absorção de amônia em água, que geralmente utilizam querosene ou GLP, como fonte energética.

A maior limitação para o uso de células fotovoltaicas, é o alto preço das mesmas; o uso de um gerador fica limitado ao preço do gerador e ao custo de manutenção/funcionamento e para o sistema por absorção líquida, a restrição se dá devido a necessidade de se usar uma fonte energética constante e que atinja altas temperaturas, além de frequentemente precisar de uma bomba para circular a solução pelo sistema e de um termostato para regular precisamente a temperatura (MEUNIER, 1994).

Em nível de pesquisa, existe a opção da absorção de um líquido em um sólido, porém a limitação deste sistema, se dá pela grande variação de volume do sal, utilizado. Um reator contendo este tipo de sal teria que levar em conta estas variações de volume e isto poderia comprometer o contato térmico do leito com as paredes do reator (SILVEIRA JR, 1990).

Segundo MEUNIER (1994), existe a possibilidade de obter refrigeração através de energia solar, utilizando reações químicas em sais, porém é necessário estabilizar o sal com um composto material, baseado em grafite.

Uma opção mais simples para a produção de efeito frigorífico com energias alternativas é o uso de um sistema de adsorção de um vapor em um sólido. MEUNIER (1994) menciona que sistemas deste tipo foram comercializados por um breve período de tempo na França, mas tiveram sua produção suspensa devido ao grande custo do equipamento (US\$1500,00 para uma produção diária de 5,5 kg de gelo).

Uma forma de tornar este tipo de sistema mais atrativo para o mercado, seria diminuir seu custo ou aumentar a sua eficiência e produção. Acredita-se que se tivesse o seu preço reduzido ou sua eficiência aumentada, o sistema por adsorção, seria uma boa alternativa para refrigeração convencional, utilizando energias alternativas, pois não necessita de uma fonte energética constante nem precisa alcançar altas temperaturas para funcionar. Ele apresenta ainda as vantagens de ter uma estrutura aparentemente simples, sem partes móveis, o que torna silencioso e com manutenções menos frequentes.

Há dois tipos de tecnologias disponíveis para a produção de efeito frigorífico por adsorção. Uma delas utiliza coletores planos e baratos, possui um ciclo intermitente, emprega exclusivamente energia solar de forma direta e é tecnicamente bem simples. O outro tipo de tecnologia usa coletores solares por concentração de energia, de alta eficiência, para aquecer um fluido térmico e este, é usado para trocar calor com o sistema. Este sistema tende a ter uma produção maior que o sistema de tecnologia mais simples, porém, devido ao fato de utilizar duas tecnologias (a dos coletores solares e da refrigeração por adsorção), e como estas tecnologias estão ainda em desenvolvimento, o custo de tal equipamento ainda é alto. MEUNIER (1994), prevê que quando forem bem desenvolvidas, estas duas tecnologias podem originar a tecnologia de resfriamento com energia solar, para o próximo século.

Existem inúmeros pares de adsorvente/adsorvato estudados, entre eles pode-se citar o par $\text{CaCl}_2/\text{NH}_3$, $\text{LiCl}/\text{CH}_3\text{NH}_2$, Zeolita-13X/Água, carvão ativado/metanol e carvão ativado/amônia, carvão ativado/R32 e carvão ativado/butano.

Segundo PONS e GUILLEMINOT (1986), o par carvão ativado/metanol é adequado para a produção de gelo pois:

- o metanol evapora a uma temperatura abaixo de 0 °C em condições normais de pressão;

- as moléculas do metanol possuem um pequeno tamanho (4 Å) e podem ser facilmente adsorvidas em microporos com diâmetro menores que 20 Å;
- a entalpia de vaporização do metanol é alta (1102 kJ kg⁻¹).

O carvão ativado, ao contrário da zeolita, não é catalisador da reação de degradação do metanol em água e dimetil éter ao redor de 100 °C (PONS E GUILLEMINOT,1986), é mais barato, pode ser ativado para atender determinadas aplicações e pode ser produzido em qualquer país (CRISTOPH,1988).

Para o caso do uso de energia solar em refrigeração, PONS e GUILLEMINOT (1986), observaram que o COP é maior no sistema carvão ativado/metanol, que em todos os outros sistemas analisados. Entre os sistemas comparados, estão os pares zeolita/água, CaCl₂ /NH₃ e NH₃ /Água, sendo este último, um sistema de absorção.

Entre as desvantagens do uso do metanol, está o fato dele ser tóxico e de apresentar pressão de saturação abaixo da atmosférica à temperatura ambiente, que faz com que qualquer microvazamento comprometa o funcionamento do sistema (CACCIOLLA e RESTUCCIA,1994).

Segundo CRISTOPH (1988), apesar do COP (cerca de 0,5) do par carvão ativado/metanol ser um pouco melhor que o do par carvão ativado/amônia (cerca 0,4), nas condições de operação estudada, este último par pode ser preferível pois, apresenta todas as vantagens descritas para o par com metanol e ao contrário deste, trabalha a pressões acima da atmosférica, o que facilita a construção do refrigerador e faz com que eventuais problemas de vazamento não impeçam o equipamento de continuar funcionando por um certo tempo, se o adsorvato não se esgotar, até que o vazamento seja consertado.

Comparando a amônia, o R32 e o butano como adsorvato e usando o carvão ativado como adsorvente, CRISTOPH (1996), constatou que tanto o R32 como o butano apresentam um COP inferior ao da amônia, nas mesmas condições de operação e também uma menor capacidade de refrigeração.

A vantagem de se usar o R32, está no fato dele ser compatível com o cobre e de não apresentar uma toxicidade tão alta quanto a da amônia. A vantagem de se usar o butano, são as mesmas do R32, porém o COP e capacidade de refrigeração, são menores que as do R32.

Como principais desvantagens ao uso da amônia, estão a sua toxicidade, em caso de vazamento, e o fato dela ser proibida ou ter seu uso limitado em países como Alemanha e Japão

(CACCIOLLA e RESTUCCIA,1994). Estas desvantagens não são tão relevantes para um sistema a ser utilizado no Brasil e preferencialmente em ambientes externos.

O ciclo do sistema de refrigeração por adsorção visto na Figura 1 consiste de:

- uma troca de calor entre o reator e um fluido térmico para que ocorram os fenômenos de adsorção/dessorção;
- uma troca de calor em um condensador para que o refrigerante dessorvido possa condensar, ser coletado em um reservatório e ser transferido para o evaporador;
- uma troca de calor entre o refrigerante contido no evaporador e a água a sua volta, para que ocorra a transformação da água em gelo;

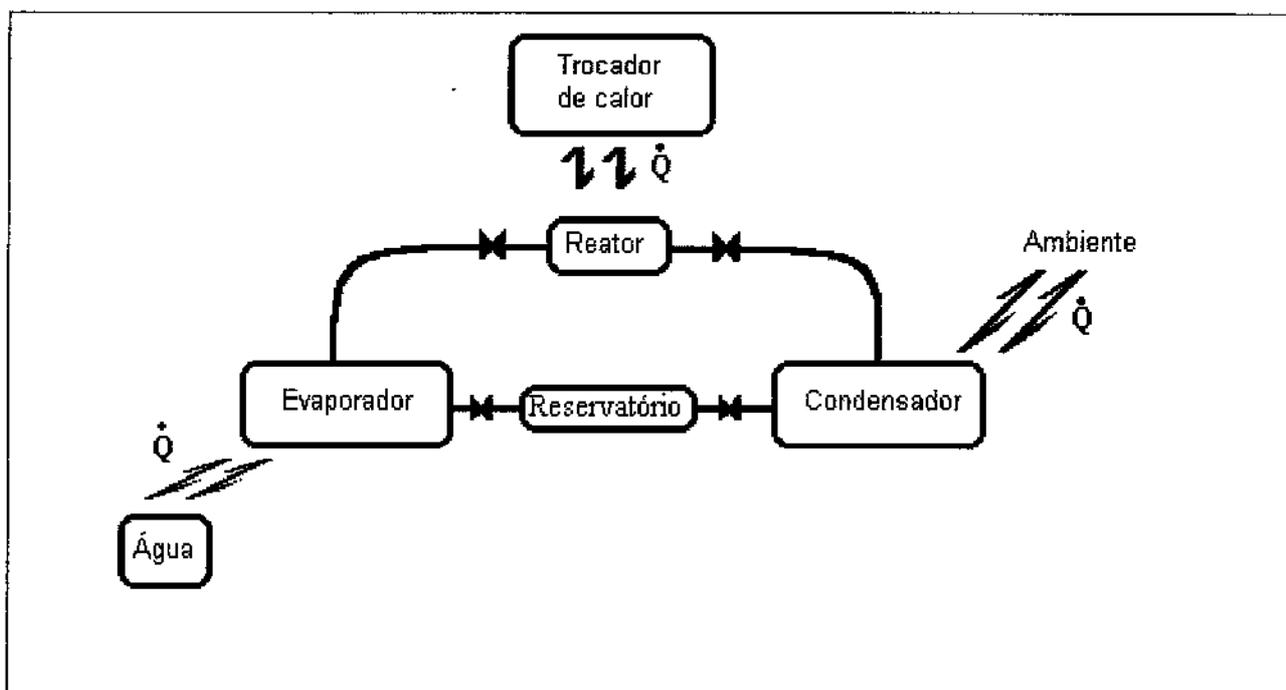


Figura 1. Esquema do sistema de refrigeração por adsorção movido a energia alternativa.

O diagrama de Clapeyron (Figura 2), auxilia no entendimento do ciclo de refrigeração, da seguinte maneira:

1. O reator, inicialmente a uma temperatura T_i , pressão P_i e *uptake*⁴ x_i , troca calor com uma fonte externa, aumentando sua pressão e temperatura, enquanto a massa de refrigerante contida no reator é mantida constante, uma vez que o reator encontra-se fechado.

⁴ Massa adsorvida por unidade de massa do adsorvente anidro.

2. Ao atingir uma pressão P_f igual a pressão de saturação do refrigerante a temperatura do condensador, abre-se a saída do reator e este continua a ser aquecido, porém, agora isobaricamente e transferindo massa de adsorvato para o condensador.
3. Alcançando a temperatura T_f e o *uptake* x_f , cessa-se o fornecimento de calor, fecha-se a válvula de conexão entre o condensador e o reator. O líquido condensado originado da dessorção de refrigerante do reator é transferido para o evaporador.
4. Começa o resfriamento isostericamente do reator, até que ele atinja a temperatura T_a e pressão P_i , que é a pressão de saturação da amônia à temperatura de evaporação. Neste momento é aberta a válvula de comunicação entre o evaporador e o reator e continua-se o resfriamento deste, agora isobaricamente, porém com progressivo aumento da massa de refrigerante adsorvido.
5. Quando o reator atinge a temperatura T_i , fecha-se a válvula de comunicação entre o evaporador e o reator e começa-se um novo ciclo.

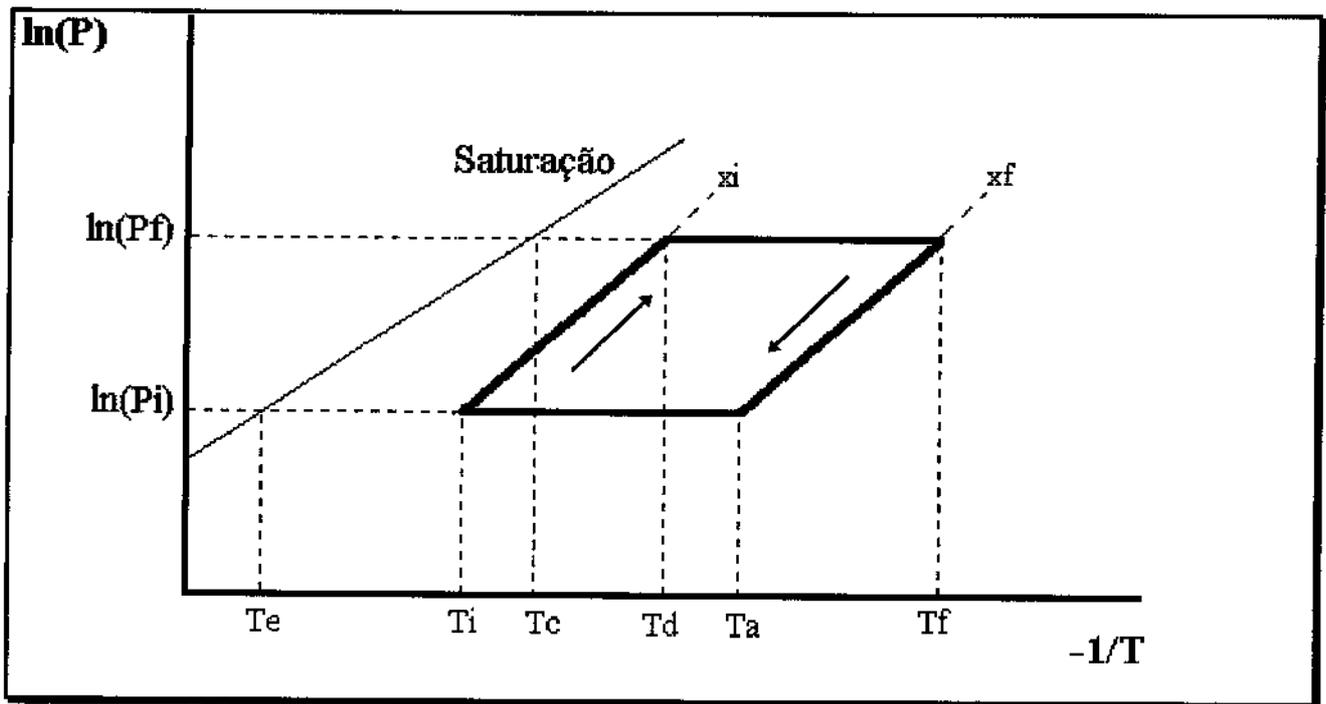


Figura 2. Diagrama de Clapeyron para um ciclo ideal de adsorção/dessorção

A massa dessorvida em cada ciclo é a diferença entre o *uptake* inicial (x_i) e o *uptake* final (x_f), multiplicada pela massa de adsorvente anidro, contido no reator.

Quando o reator volta ao seu estado inicial, ele adsorve a massa que foi dessorvida e quanto maior esta massa, maior será o calor transferido ao evaporador.

O valor da massa ciclada (Δx) está intimamente ligado ao calor absorvido no evaporador. Como a temperaturas mais baixas, o valor de x varia mais rapidamente que em temperaturas mais altas, é mais eficiente começar um ciclo nas temperaturas mais baixa possível, e com isso obter um x_i maior, do que tentar usar temperaturas mais altas para obter um x_f menor.

O COP do ciclo é obtido pela razão entre o calor necessário para aquecer o leito e provocar dessorção e o calor absorvido pelo evaporador. Sabendo-se que a variação do valor de x diminui como aumento da temperatura, uma elevação da temperatura T_f , tende a reduzir o valor do COP.

Para se aumentar a eficiência do sistema, MEUNIER (1982) observou que é importante manter a temperatura de condensação o mais baixo possível, preferencialmente no máximo 5 °C acima da temperatura ambiente. A temperatura do condensador está intimamente ligada a temperatura ambiente, portanto deve-se projetar um condensador que permita a maior troca de calor possível com o meio a sua volta para que a condensação ocorra o mais próximo possível daquela temperatura.

O ciclo de adsorção quando acontece utilizando apenas radiação solar direta, pode ocorrer apenas uma vez por dia, pois necessita de praticamente todo o dia para aquecer o reator e o resfriamento do mesmo só pode ocorrer a noite, quando a temperatura cai. Devido a esta limitação é que surgiu a proposta de usar um fluido térmico para que o reator possa ser aquecido e resfriado varias vezes por dia.

3.2 Princípios da adsorção/dessorção

A adsorção é um fenômeno físico que ocorre quando a força das partículas (átomos ou moléculas) que formam um sólido encontram-se desbalanceadas e atraem uma outra partícula para a sua superfície.

Em compostos microporosos (diâmetro dos poros menor que 2 nm) a adsorção ocorre no interior de canais de dimensões moleculares e não em mono ou multicamadas sobre a superfície do sólido, como ocorre quando este sólido apresenta mesoporos (diâmetro dos poros entre 2 e 50 nm) ou macroporos (diâmetro dos poros maior que 50 nm) (UNIÃO INTERNACIONAL DE QUÍMICA PURA E APLICADA DE 1972 citada por KAJIYAMA, 1993).

O uso de sólidos para remoção de líquidos ou gases, é amplamente utilizado a aproximadamente 2000 anos. O processo de adsorção envolve a separação de uma substância de uma fase, acompanhada de seu acúmulo em outra fase. A adsorção é diferente da absorção pois nesta, a substância que esta numa fase interpenetra a outra fase para formar uma solução.

Segundo DAVIES e LEGROS (1986) citado por BARBOSA (1993), a adsorção ocorre porque as molécula ou átomos que se encontram no interior de um sólido, podem ter suas forças de ligação desbalanceadas e isso provoca a atração de uma outra substância, para a superfície deste sólido.

Estes mesmos autores mencionam que estas forças são também responsáveis pela mudança de estado do vapor, para um estado adsorvido com propriedades muito próximas as do líquido condensado, que fica retido no sólido.

De acordo com RUTHVEN (1984) citado por BARBOSA (1993), estas forças são devido a energia potencial de Van der Waals que contribuem com um calor de adsorção de cerca de 4,2 kJ/mol e forças de interações eletrostáticas que contribuem somente quando existem interações iônicas na adsorção. No caso de uma molécula pequena e bipolar como o metanol, esta contribuição pode chegar a 105-126 kJmol⁻¹.

O estado termodinâmico do leito é função da massa adsorvida, da temperatura e da pressão. Segundo DUBININ (1967), as isosteras⁵ de sorção nos macroporos e os mesoporos do sólido, podem ser descritos adequadamente pelas equações de B.E.T. e Langmuir pois o adsorvato forma mono ou multicamadas na superfície sólida. Nos microporos, não há formação dessas camadas sobrepostas e sim, o preenchimento do volume dos poros do sólido e por poder conter grande quantidade de substância adsorvida, é que estes poros tem papel fundamental na refrigeração por adsorção.

Baseado na hipótese acima, DUBININ (1967), desenvolveu uma teoria de equilíbrio de adsorção de gases e vapores que leva em conta o preenchimento do volume máximo (W_0), e que expressa o volume dos microporos por massa unitária de adsorvente.

Segundo CRISTOPH (1988), a melhor descrição do processo de adsorção de gases e vapor em adsorventes microporosos provém da teoria do potencial de adsorção de Polanyi e da teoria do preenchimento de microporos proposta por Dubinin.

O potencial de adsorção (A), pode ser representado pela equação de trabalho de compressão isotérmico:

⁵ Massa adsorvida constante, com variação de temperatura e pressão.

Segundo CRISTOPH (1988), a melhor descrição do processo de adsorção de gases e vapor em adsorventes microporosos provém da teoria do potencial de adsorção de Polanyi e da teoria do preenchimento de microporos proposta por Dubinin..

O potencial de adsorção (A), pode ser representado pela equação de trabalho de compressão isotérmico:

$$A = RT \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1)$$

Onde:

- P_1 é a pressão do adsorvato comprimido em uma superfície equipotencial, o que é admitido ser igual a pressão de saturação à temperatura T no reator.
- P_2 é a pressão de equilíbrio vapor-adsorvato correspondente a temperatura de saturação ($T_{sat.}$) do adsorvato no condensador ou evaporador, quando o reator encontra-se com a válvula de comunicação com uma dessas duas peças aberta.

De acordo com a teoria de DUBININ-ASTAKHOV, o volume ocupado pelo adsorvato, W, é relacionado com o volume máximo do poro, W_0 , e com o potencial de adsorção da seguinte forma:

$$W = W_0 \exp\left(\frac{-D}{\beta^2 R^2} A^2\right) \quad (2)$$

Onde:

- D é um parâmetro da microestrutura do adsorvente, que decresce proporcionalmente ao crescimento dos microporos do adsorvente;
- β é um coeficiente de afinidade do adsorvato, tomado como sendo a razão do volume molar do adsorvato a uma temperatura determinada, pelo volume molar de um gás de referência, que normalmente é o benzeno. A temperatura utilizada é aquela proposta por CERNÝ (1970);
- R é a constante universal dos gases.

Substituindo a Equação (1) em (2) tem-se:

$$W = W_0 \exp\left(-D\left(\frac{T}{\beta}\right)^2 \left(\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)\right)^2\right) \quad (3)$$

Sendo a massa igual ao produto da densidade ($\rho(T)$) pelo volume, a Equação (3) fica:

$$m = \rho(T)W_0 \exp\left(-D\left(\frac{T}{\beta}\right)^2 \left(\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)\right)^2\right) \quad (4)$$

Dividindo-se ambos os lados da equação pela massa de adsorvente anidro e substituindo o exponencial “2” por um fator “n” para melhorar o ajuste da equação a diferentes adsorventes e adsorvatos tem-se:

$$x = \rho(T)x_0 \exp\left(-\frac{D}{\beta^2} \left(T \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)\right)^n\right) \quad (5)$$

Onde:

- x é a razão da massa do adsorvato por massa do adsorvente anidro, que será denominado *uptake*;
- x_0 é o *uptake* máximo.

A equação de DUBININ-ASTAKHOV (D-A) possui a limitação de não ser termodinamicamente correta perto da saturação, uma vez que o calor de adsorção não tende ao calor de vaporização do adsorvato.

PONS e GRENIER (1986), propuseram uma equação de estado do leito em forma de potencial linearizado, que se adapta bem a situações de simulações de refrigeração por energia solar, quando os dados de pressão, temperatura e o *uptake* são conhecidos, o que não é o nosso caso. Este modelo não tem relação com os parâmetros do adsorvente e do adsorvato utilizados pela Equação D-A .

Dentre essas duas opções, resolveu-se usar a Equação D-A, pois CRISTOPH (1988), diz que para as faixas usuais de $(\ln(P_1/P_2))^2$, utilizadas na refrigeração por adsorção, a Equação D-A, representa bem os valores experimentais, não havendo, portanto, necessidade de se recorrer a outras representações do processo de adsorção de gases e vapor em adsorventes microporosos.

3.3 Modelo matemático do reator

RUTHVEN (1984), analisa sistemas de sorção do tipo batelada e conclui que a taxa de sorção física em uma superfície geralmente é tão rápida que a taxa global do processo é determinada pela resistência à transferência de massa ou calor ao invés de ser controlado pela cinética de sorção.

Em trabalhos experimentais KARAGIORGIAS & MEUNIER (1986), comprovaram que a transferência de calor no interior das partículas não é limitante no processo de sorção.

Em seu experimento, MEUNIER & GUILLEMINOT (1986), partiram da hipótese de que a pressão no leito é uniforme e puderam confirmar esta hipótese através de um sensor diferencial de pressão, colocado no interior e no exterior do leito e que apresentava uma queda de pressão de apenas 50 Pa, quando a pressão do sistema era de 12 kPa. A partir do fato de que a pressão do leito é constante, pode-se dizer que a transferência de massa no interior do leito ocorre suficientemente rápida para permitir que não haja gradiente de pressão.

Para se obter o calor latente de adsorção/dessorção, considera-se que a densidade da amônia é uma função de segundo grau da temperatura do leito, conforme a equação obtida por regressão linear de valores tabelados em STOECKER & JABARDO (1994):

$$\rho(T) = -0,003T^2 + 0,417T + 766,273 \quad (6)$$

Assim a equação de estado do leito adsorvente, segundo D-A, para a amônia, torna-se:

$$x = \left(-0,003T^2 + 0,417T + 766,273 \right) x_0 \exp \left(-D' \left(T \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^n \right) \quad (7)$$

Onde:

- D' é a razão entre D e β^2 .

Derivando-se a Equação (7), em relação à temperatura e utilizando a equação de Clausius Clapeyron (Equação (8)), para a pressão de saturação da amônia à temperatura do leito (P_1), tem-se a Equação (9):

$$\ln(P_1) = 11,70198 - \frac{2792,95}{T} \quad (8)$$

$$\frac{\partial x}{\partial T} = \frac{(-0,006T + 0,417)x}{(-0,003T^2 + 0,417T + 766,273)} + nD'xT^n \left(\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \ln P_2}{\partial T} - \left(\frac{2792,95}{T^2} + \frac{1}{T} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \right) \right) \quad (9)$$

Mantendo-se x constante e rearranjando a Equação (9), fica-se com:

$$\frac{\partial(\ln P)}{\partial T} \Big|_{x=const.} = \frac{2792,95}{T^2} + \frac{1}{T} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) - \frac{(-0,006T + 0,417)}{(-0,003T^2 + 0,417T + 766,273)nD' \left(\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \right)^{n-1} T^n} \quad (10)$$

que igualando com a Equação (11),

$$\frac{\partial(\ln P)}{\partial T} \Big|_{x=const.} = \frac{h}{RT^2} \quad (11)$$

obtém-se o calor de sorção, h .

$$h = \left(\frac{2792,95}{T^2} + \frac{1}{T} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) - \frac{(-0,006T + 0,417)}{(-0,003T^2 + 0,417T + 766,273)nD' \left(\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \right)^{n-1} T^n} \right) RT^2 \quad (12)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- *software* MATLAB 4.2, para resolver as equações que descrevem cada componente do sistema;
- *software* STATISTICA 5.0, para se fazer um planejamento experimental fracional do tipo Plackett-Burman (PEP-B) e um planejamento experimental fatorial completo (PEFC);
- microcomputador Pentium 233MHz.

4.2 Métodos

4.2.1 Modelagem matemática do processo

As equações que reproduzem o balanço de massa e de energia em cada uma das unidades são apresentadas a seguir.

REATOR

Balanço de massa (Fase isostérica)

Para o aquecimento isostérico do reator tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \rho_{carv} V_{Reator} \partial x r \partial \theta \partial r = 0 \quad (13)$$

Aplicando-se a Equação (12) na Equação (9), obtém-se a Equação (14),

$$\frac{\partial x}{\partial T} = nD' x T^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \ln P_2}{\partial T} - \frac{h}{RT^2} \right) \quad (14)$$

que aplicada na Equação (13) e assumindo a hipótese de que não há gradiente de pressão no leito, nem gradiente de temperatura da direção angular, tem-se:

$$\frac{\partial \ln P_2}{\partial T} = \frac{\iint b(x, P, T) \frac{h}{RT^2} r \, d\omega}{\iint b(x, P, T) r \, d\omega} \quad (15)$$

mas,

$$\frac{\partial \ln P_2}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\iint b(x, P, T) \frac{h}{RT^2} r \, d\omega \frac{\partial T}{\partial t}}{\iint b(x, P, T) r \, d\omega} \quad (16)$$

que é igual a:

$$\frac{\partial \ln P_2}{\partial t} = \frac{\iint b(x, P, T) \frac{h}{RT^2} r \, d\omega \frac{\partial T}{\partial t}}{\iint b(x, P, T) r \, d\omega} \quad (17)$$

Onde:

$$b(x, P, T) = nDxT^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \quad (18)$$

A Equação (14) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial x}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = nD' x T^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \ln P_2}{\partial T} - \frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (19)$$

ou

$$\frac{\partial x}{\partial t} = nD' x T^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \ln P_2}{\partial T} - \frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (20)$$

Os resultados das Equações (17) e (20) serão utilizados posteriormente para calcular o calor de sorção em função do raio, na fase isostérica.

Balanco de massa (Fase de dessorção isobárica)

$$\rho_{carv} V_{Reator} \frac{\partial x}{\partial t} = - \frac{\partial m_{NH_3}}{\partial t} \quad (21)$$

Balanço de massa (Fase de dessorção isobárica)

$$\rho_{carv.} V_{Reator} \frac{\partial x}{\partial t} = - \frac{\partial m_{NH_3}}{\partial t} \quad (21)$$

Introduzindo-se a Equação (20) na Equação (21), resulta em:

$$\frac{\partial m_{NH_3}}{\partial t} = \rho_{carv.} V_{Reator} nD' x T^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \left[\frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \ln P_2}{\partial t} \right] \quad (22)$$

O resultado da Equação (22) será utilizado posteriormente para calcular o calor de sorção em função do raio, na fase dessorção.

Balanço de massa (Fase de adsorção isobárica)

$$\rho_{CARV.} V_{Reator} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial m_{NH_3}}{\partial t} \quad (23)$$

Introduzindo-se a Equação (20) na Equação (23), resulta em:

$$\frac{\partial m_{NH_3}}{\partial t} = \rho_{carv.} V_{Reator} nD' x T^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \left[\frac{\partial \ln P_2}{\partial t} - \frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (24)$$

O resultado da Equação (24) será utilizado posteriormente para calcular o calor de sorção em função do raio, na fase adsorção.

Balanço de energia

$$\rho_{carv.} [Cp_{carv.} + xCp_{NH_3}] \frac{\partial T}{\partial t} = k_{leito} \nabla^2 T + Q(r) \quad (25)$$

$$Q(r) = hQ' \quad (26)$$

$$Q' = \rho_{carv.} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (27)$$

Onde:

- O termo h , refere-se ao calor de sorção (deduzido na Equação (12)).
- C_p é calor específico;
- $Q(r)$ é o termo do calor de sorção em função do raio.

Rearranjando a Equação (25), utilizando as Equações (26), (27), (20) e (17), tem-se com o perfil de temperatura no leito para a fase isostérica, calculado pela equação integro-diferencial não linear:

$$\left[\rho_{carv} \left(C_{p_{carv.}} + xC_{p_{NH_3}} + b(x, P, T) \frac{h^2}{RT^2} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = k_{leito} \nabla^2 T + \rho_{carv} h b(x, P, T) \frac{\iint b(x, P, T) \frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} r dr}{\iint b(x, P, T) r dr} \quad (28)$$

Quando a pressão no interior do reator atinge a pressão do condensador, é aberta a válvula de comunicação entre os dois e a pressão no reator fica:

$$P = P_2 \quad (29)$$

Utilizando-se a equação de Clausius Clapeyron, para P_2 , tem-se:

$$\ln(P_2) = 11,70198 - \frac{2792,95}{T_C} \quad (30)$$

A Equação (28) pode ser rescrita usando o termo de pressão da Equação (30), para descrever o perfil de temperatura no leito, na fase de dessorção isobárica:

$$\left[\rho_{carv} \left(C_{p_{carv.}} + xC_{p_{NH_3}} + b(x, P, T) \frac{h^2}{RT^2} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = k_{leito} \nabla^2 T + \rho_{carv} h b(m, P, T) \frac{2792,95}{T_C^2} \frac{\partial T_C}{\partial t} \quad (31)$$

Na fase de adsorção isobárica, tem-se a válvula de comunicação entre o evaporador e o reator aberta e portanto tem-se uma equação semelhante a Equação (31) porém com T_e substituindo T_c .

Condições de Contorno

Considerando-se que há uma resistência térmica entre o fluido de aquecimento/resfriamento e a superfície do leito adsorvente, tem-se as seguintes condições de contorno:

$$-k \frac{dT}{dn} \Big|_{r=R_2} = U_{\text{reator}} (T_{\text{fluido}} - T_{\text{leito}}) \quad (32)$$

$$\frac{dT}{dn} \Big|_{r=R_1} = 0 \quad (33)$$

Onde:

- $1/U_{\text{reator}}$ é a resistência térmica entre a parede do reator e o leito;
- o leito é adiabático no anel interno do reator ($r = R_1$).

Na parte externa do reator tem-se:

$$T(r = R_{2+\Delta R}, t) = T_{Ft} \quad (34)$$

Onde:

- T_{Ft} é a temperatura do fluido térmico.

CONDENSADOR

Balanco de energia

$$m_{\text{Cond.}} C_{p\text{Cond.}} \frac{\partial T_C}{\partial t} = m_{\text{NH}_3} (h_v(T_D) + h_l(T_C)) - U_{\text{Cond.}} A (T_C - T_{\text{amb.}}) \quad (35)$$

Onde:

- $U_{cond.}$ é o coeficiente global de transferência de calor do condensador;
- A é a área de troca térmica do condensador;

Mas:

$$m_{NH3} = \frac{\partial m_{NH3}}{\partial t} \quad (36)$$

E introduzindo a Equação (22) na Equação (35), fica-se com:

$$m_{Cond.} Cp_{Cond.} \frac{\partial T_C}{\partial t} = \rho_{carv.} V_{Reator} nD' x T^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \left(\frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \ln P_2}{\partial t} \right) \quad (37)$$

$$(h_V(T_D) + h_L(T_C)) - UA(T_C - T_{amb.})$$

Utilizando a diferencial da Equação (30) na Equação (37) fica-se com:

$$m_{Cond.} Cp_{Cond.} \frac{\partial T_C}{\partial t} = \rho_{carv.} V_{Reator} nD' x T^n \left(\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)^{n-1} \left(\frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{2792,95}{T_C^2} \frac{\partial T_C}{\partial t} \right) \quad (38)$$

$$(h_V(T_D) + h_L(T_C)) - UA(T_C - T_{amb.})$$

Rearranjando a equação acima, fica-se com a Equação (39),

$$\left(m_{Cond.} Cp_{Cond.} + \rho_{carv.} V_{Reator} b(x, P, T) \frac{2792,95}{T_C^2} (h_V(T_D) + h_L(T_C)) \right) \frac{\partial T_C}{\partial t} = \quad (39)$$

$$\rho_{CARV.} V_{Reator} b(x, P, T) \left(\frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right) (h_V(T_D) + h_L(T_C)) - UA(T_C - T_{amb.})$$

que descreve a variação da temperatura do condensador e consequentemente a variação da temperatura de condensação do adsorvato.

EVAPORADOR

Balço de energia

Considerando como volume de controle o evaporador e a amônia, tem-se:

$$\left(m_{Evap} \cdot Cp_{Evap}\right) \frac{\partial T_E}{\partial t} + \frac{\partial \left(m_{NH_3} Cp_{NH_3} T_E\right)}{\partial t} = U_{Evap} \cdot A \left(T_{Agua} - T_E\right) - h_v \cdot \dot{m}_{NH_3} \quad (40)$$

Mas sabendo que a massa da amônia (m_{NH_3}), no evaporador também varia em função do tempo, fica-se com:

$$\left(m_{Evap} \cdot Cp_{Evap}\right) \frac{\partial T_E}{\partial t} + \left(m_{NH_3} Cp_{NH_3}\right) \frac{\partial T_E}{\partial t} + \left(Cp_{NH_3} T_E\right) \frac{\partial m_{NH_3}}{\partial t} = U_{Evap} \cdot A \left(T_{Agua} - T_E\right) - h_v \cdot \dot{m}_{NH_3} \quad (41)$$

Mas:

$$\frac{\partial m_{NH_3}}{\partial t} = -\dot{m}_{NH_3} \quad (42)$$

E pode-se escrever:

$$Cp_{NH_3} T_E = h_L \quad (43)$$

A partir das Equações (24),(42) e (43), rescreve-se a Equação (41) assim:

$$\left(m_{Evap} \cdot Cp_{Evap} + m_{NH_3} Cp_{NH_3}\right) \frac{\partial T_E}{\partial t} = U_{Evap} \cdot A \left(T_{Agua} - T_E\right) - \left(h_v - h_L\right) \rho_{carv} \cdot V_{Reator} n D' x T^n \left(\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)\right)^{n-1} \left(\frac{\partial \ln P_2}{\partial t} - \frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t}\right) \quad (44)$$

Introduzindo a diferencial da Equação (30) na equação acima, fica-se com:

$$\left(m_{Evap} \cdot Cp_{Evap} + m_{NH_3} Cp_{NH_3}\right) \frac{\partial T_E}{\partial t} = U_{Evap} \cdot A \left(T_{Agua} - T_E\right) + \left(h_v - h_L\right) \rho_{carv} \cdot V_{Reator} n D' x T^n \left(\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)\right)^{n-1} \left(\frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{2792,95}{T_E^2} \frac{\partial T_E}{\partial t}\right) \quad (45)$$

Rearranjando a equação acima, tem-se a Equação (46),

$$\left(m_{Evap.} C_{p_{Evap}} + m_{NH_3} C_{p_{NH_3}} + h_{VL} b(x, P, T) \frac{2792.95}{T_E^2} \right) \frac{\partial T_E}{\partial t} = U_{Evap.} A (T_{Agua} - T_E) + h_{VL} b(x, P, T) \left(\frac{h}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (46)$$

que descreve a variação da temperatura do evaporador e conseqüentemente a variação da temperatura de evaporação do adsorvato.

Considerando como volume de controle a água a ser resfriada, tem-se:

$$m_{Agua} C_{p_{Agua}} \frac{\partial T_{Agua}}{\partial t} = -U_{Evap.} A (T_{Agua} - T_E) \quad (47)$$

Depois que $T_{água}$ atinge 0 °C, a Equação (47) passa a ser:

$$h_{Agua} \frac{\partial m_{Agua}}{\partial t} = -U_{Evap.} A (T_{Agua} - T_E) \quad (48)$$

Onde:

- h_{Agua} , é a entalpia de solidificação da água;

Depois que toda a água se tornar gelo, volta-se a usar a Equação (47) no lugar da Equação (48), mas ao invés de se usar as propriedades da água, usa-se as propriedades do gelo.

4.2.2 Características do sistema

Para resolver as equações obtidas na modelagem, considerou-se que cada uma das partes que compõem o sistema (reator, condensador e evaporador) possuem determinadas características operacionais, dimensionais e físicas descritas a seguir.

Para as características operacionais foram consideradas os seguintes valores:

⇒ no reator:

- A temperatura inicial do leito foi considerada de 5 °C a temperatura do fluido de resfriamento, uma vez que o leito era sempre resfriado até atingir esta temperatura, quando então iniciava-se outro ciclo.
- A temperatura final de dessorção possuía diferença de 5 °C ou 10 °C abaixo da temperatura do fluido de aquecimento.

⇒ no condensador:

- A temperatura inicial de condensação inicial foi considerada como sendo a temperatura ambiente e aumentava de forma inversamente proporcional a capacidade do condensador de dissipar calor.

⇒ no evaporador:

- A temperatura de evaporação foi considerada como sendo próxima de 0 °C, para que houvesse a produção de gelo.

Para as características dimensionais foram considerados os seguintes valores:

⇒ no reator:

- Dois tubos concêntricos, de aço inox, de 10 cm de comprimento, sendo o tubo interno, perfurado, para permitir o escoamento da amônia para o condensador e o retorno dessa, do evaporador (Figura 3).
- O diâmetro dos tubos foi escolhido de tal maneira que possibilitasse a realização do planejamento experimental fatorial completo, tendo como uma das variáveis a espessura do leito.
- O diâmetro interno do tubo interno é de 20 mm e o diâmetro externo é de 26 mm. Considerou-se cinco tubos externos de tamanhos diferentes, uma vez que procurava-se obter a influência da espessura do leito, no funcionamento do sistema.
- O menor dos tubos externos possuía 66 mm de diâmetro interno e 73 mm de diâmetro externo, os demais tubos externos possuíam 86 mm de diâmetro interno e 93 mm de diâmetro externo, 122 mm de diâmetro interno e 129 mm de diâmetro

externo, 156 mm de diâmetro interno e 170 mm de diâmetro externo, 170 mm de diâmetro interno e 184 mm de diâmetro externo.

- No planejamento experimental, foi considerado que existiam 25 reatores em paralelo. Esta consideração foi necessária, uma vez que para certas configurações de ensaio, um reator apenas, não fornecia a quantidade necessária de refrigerante para que houvesse o resfriamento da água até a formação de gelo, para qualquer massa de água assumida.

⇒ no condensador:

- Considerou-se que a troca de calor acontecia com o ar ambiente, sendo esta área, variando entre $0,1 \text{ m}^2$ à 1 m^2 e massa de $0,4$ à 4 kg , respectivamente, sendo construído de aço carbono.

⇒ no evaporador:

- Considerou-se uma área de troca de calor que possibilitasse a armazenagem da amônia dessorvida mais uma reserva de amônia, caso o sistema adsorva mais refrigerante que o dessorvido, no mesmo ciclo e uma massa de água suficiente para produzir gelo e manter a temperatura de evaporação próxima de $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

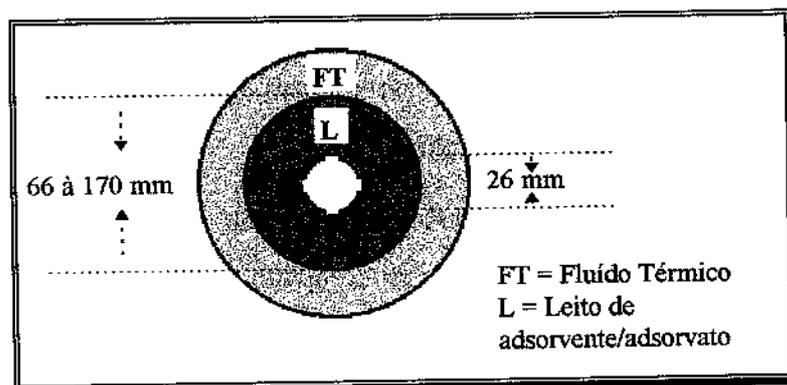


Figura 3: Corte transversal do reator

Para as características físicas foram considerados os seguintes valores:

⇒ no reator:

- Considerou-se duas densidades para o leito, 500 kg m^{-3} e 713 kg m^{-3} , uma vez que também buscava-se verificar a influência desta variável no funcionamento do sistema.

- A condutividade térmica do leito e o coeficiente de transferência de calor entre o leito e a parede estão considerados como função da densidade, cujos valores adotados são: $0,165 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $0,33 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $50 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ e $200 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ respectivamente, conforme TAMAINOT-TELTO & CRISTOPH (1997).
- O carvão ativado escolhido para este estudo foi o carvão usado por CRISTOPH (1996) e possui os seguintes coeficientes de ajustes da Equação D-A: $W_0=3,96 \times 10^4 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$; $n=1,1965$ e $D=3,296 \times 10^{-4}$.

⇒ no condensador:

- O coeficiente de transferência de calor para o condensador foi considerado como $50 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, uma vez que a ordem de grandeza deste termo é de 10^1 a 10^2 , e o calor específico do material, como $465 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Estes dados foram obtidos em HOLMAN (1983).

⇒ no evaporador:

- O coeficiente de transferência de calor para o evaporador foi considerado como $300 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ uma vez que a ordem de grandeza deste termo é de 10^2 a 10^3 , e o calor específico do material, como $465 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Estes dados foram obtidos em HOLMAN (1983).

4.2.3 Hipóteses e justificativas

Neste trabalho, assumiu-se algumas hipóteses, para simular o processo já descrito.

1. A partir da hipótese de que a pressão do leito é constante, por MEUNIER & GUILLEMINOT (1986), pode-se obter o diferencial de pressão do reator, utilizado pelas Equações (22) e (24).
2. Considerou-se um fluxo do fluido térmico, rápido o bastante e um reator pequeno o suficiente para que a temperatura da parede do reator fosse aproximadamente constante na direção axial, e assim, existir um gradiente de temperatura, somente na direção radial.
3. Considerou-se que o processo pode ser modelado, utilizando-se apenas fatores de transferência de calor, tais como condutividade do leito e coeficiente de transferência de calor entre o leito e o fluido de aquecimento, pois a difusão de massa, conforme mostrada por RUTHVEN (1984), não afeta a cinética da reação.

4. A alteração do valor da área do condensador, para o limite inferior, foi tal que apesar de piorar a taxa de dessorção, ainda possibilitaria que a dessorção ocorresse.
5. Não houve acúmulo de massa no condensador, pois considerou-se que tão logo o adsorvato condensasse, este era coletado num reservatório, até o momento de ser transferido ao evaporador.
6. O condensador foi considerado como tendo uma temperatura uniforme, pois esta consideração era suficiente para que pudesse analisar o comportamento do sistema, uma vez que não é escopo deste trabalho analisar a transferência de calor e massa dentro do condensador. A mesma consideração é atribuída para o evaporador e para a água a ser resfriada.
7. Não houve troca de calor entre a água a ser resfriada e o ambiente. O recipiente que continha a água tinha massa desprezível, de forma que o calor trocado no evaporador, era sempre o calor retirado da água, da amônia contida no evaporador e da parte metálica do evaporador.

4.2.4 Método numérico de resolução das equações

Todas as equações diferenciais parciais, foram discretizadas pelo método de diferenças finitas, de acordo com o esquema de CRANK-NICOLSON, conforme mostrado a seguir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(T^{L+\Delta t} - T^L)}{\Delta t} \quad (49)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{(T_{i+\Delta r}^L - 2T_i^L + T_{i-\Delta r}^L + T_{i+\Delta r}^{L+\Delta t} - 2T_i^{L+\Delta t} + T_{i-\Delta r}^{L+\Delta t})}{2(\Delta r)^2} \quad (50)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{(R_2 - (n-1)\Delta r)} \frac{(T_{i+\Delta r}^L + T_{i-\Delta r}^L + T_{i+\Delta r}^{L+\Delta t} + T_{i-\Delta r}^{L+\Delta t})}{4(\Delta r)^2} \quad (51)$$

Os passos de interação utilizados foram de 1, 10 e 60 segundos para o tempo e para o raio foram de 4 ou 5 mm, conforme a espessura do leito. Optou-se por uma passo de tempo variável, num mesmo ensaio pois havia períodos do processo que ocorriam mais rápido e necessitavam de um passo de tempo pequeno, enquanto havia outros períodos do processo que ocorriam mais

MATERIAIS E MÉTODOS

As variáveis escolhidas para a realização do Planejamento Experimental Plackett-Burman (PEP-B), assim como o valor do nível inferior e superior das mesmas, podem ser vistos na Tabela 1.

O PEFC foi realizado para se obter o efeito de cada uma das variáveis e de suas interações nas respostas de interesse. A partir destes efeitos e interações, pode-se então saber como se dá a influência da mudança de determinada variável de um nível inferior a um nível superior, nas diferentes respostas. Os efeitos indicam se a mudança no nível de uma variável faz crescer ou diminuir o valor da resposta, conforme o valor do efeito seja positivo ou negativo.

Tabela 1. Variáveis utilizadas no PEP-B.

Variável	Unidade	Nível inferior (-1)	Nível superior (1)
Espessura do leite	m	0,03	0,065
Temperatura do fluido de aquecimento	°C	80	120
Temperatura do fluido de resfriamento	°C	15	30
Vazão do fluido térmico	m ³ h ⁻¹	0,1	0,5
Área do condensador	m ²	0,1	1
Diferença de temperatura entre o fluido e o leite	°C	5	10
Temperatura do ar	°C	15	35
Densidade do leite	kg m ⁻³	500	713

O número de ensaios do PEFC foi obtido pela seguinte equação:

$$N = 2^{Var} \quad (55)$$

Onde:

- N é o número total de ensaios;
- Var é o número de variáveis independentes.

Tendo realizado o PEFC, acrescentou-se mais 9 ensaios, para obter uma quantidade de resultados suficientes para uma correlação multivariável quadrática do processo.

Estes 9 ensaios que foram acrescentados, representam 1 ensaio realizado no nível intermediário das variáveis, 1 ensaio no nível $-\alpha$ e 1 ensaio no nível $+\alpha$ para cada variável.

MATERIAIS E MÉTODOS

O valor de α para o planejamento experimental fornecido pelo *software* STATISTICA 5.0 foi de 1,48, sendo o nível inferior representado por -1 e o nível superior por +1.

É importante salientar que junto com a variável densidade do leite, está-se avaliando a influência da condutividade térmica do leite e o coeficiente de transferência de calor entre a parede e o leite, uma vez que essas duas variáveis são funções da densidade.

O valor de cada variável independente, nos diferentes níveis pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2. O valor das variáveis do PEFC nos níveis dos ensaios.

	Unidade	$-\alpha$	-1	0	1	α
Densidade do leite	kg m ⁻³	449	500	607	713	764
Espessura do leite	m	0,02	0,03	0,048	0,065	0,072
Temperatura do ar	°C	10,2	15	25	35	39,8
Temperatura do fluido de aquecimento	°C	58	70	95	120	132

Os níveis atribuídos a cada uma das variáveis nos 12 ensaios do PEP-B, nos 16 ensaios do PEFC e nos 9 ensaios complementares, podem ser vistos no apêndice II.

Um teste de sensibilidade foi aplicado, para avaliar a variação de determinada resposta de interesse, em relação a uma condição padrão.

O teste de sensibilidade difere do planejamento experimental, pois neste avaliam-se as respostas em função da variação de todas as variáveis independentes e naquele, avaliam-se as respostas em função da variação de apenas uma variável independente.

O planejamento experimental serve para avaliar quais as variáveis são mais influentes em determinada resposta e o teste de sensibilidade serve para avaliar quais as respostas são mais sensíveis a mudança de determinada variável.

4.2.6 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é realizada pelos ensaios em dois níveis da variável independente, sendo que os valores das variáveis respostas, do primeiro nível, são considerados como referência para a avaliação do Fator de Sensibilidade (FS).

O FS é calculado pela Equação (51), segundo RODRIGUES(1993), e estima a razão da variação percentual do valor da variável resposta pela variação percentual da variável independente.

$$FS = \frac{\frac{\Delta Resp}{Resp_1}}{\frac{\Delta Var}{Var_1}} \quad (56)$$

Onde:

- $Resp_1$ é a resposta no nível inferior.
- Var_1 é a variável no nível inferior.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Planejamento experimental fatorial Plackett-Burman

Realizou-se 12 ensaios segundo metodologia de Plackett-Burman e os resultados das principais variáveis respostas, podem ser visto na Tabela 3. O resultado completo dos 12 ensaios, juntamente com os gráficos de Clapeyron de cada um dos ciclos de refrigeração, podem ser vistos no apêndice III.

Tabela 3. Resultado dos 12 ensaios do PEP-B.

Ensaio	COP	P.R.R. (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	Massa de gelo produzida ⁶ (kg kg ⁻¹ _{adsorvente} dia ⁻¹)	Tempo de processo (minutos)
01	0,08	0,63	0,028	617
02	0,31	3,43	0,728	1377
03	0,27	3,52	0,390	1081
04	0,12	0,13	0,014	4143
05	0,24	4,97	0,530	796
06	0,19	0,49	0,056	5166
07	0,38	1,28	0,122	3631
08	0,22	3,00	0,367	528
09	0,27	0,63	0,073	4805
10	0,16	0,49	0,058	2898
11	0,39	1,52	0,144	4129
12	0,39	3,00	0,296	1293

Analisando separadamente os efeitos das variáveis independentes em cada variável resposta, tem-se:

⁶ Massa de gelo produzida em condições padrões: Temperatura inicial da água de 25 °C, evaporador de alumínio de 2 mm de espessura, formato cilíndrico e volume suficiente para conter a massa de refrigerante dessorvida, mais uma reserva de 10 % dessa massa.

5.1.1 Efeito no COP

Dentre as oito variáveis estudadas, apenas a variação da temperatura do ar entre 15 e 35 °C é significativa na variação do COP, conforme mostrado na Tabela 4, sendo que o aumento da temperatura do ar do nível inferior para o nível superior, representa uma redução do COP de 0,14.

Tabela 4. Influência da mudança das variáveis no COP do sistema, pelo PEP-B.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior do efeito*	Limite superior do efeito*
Temperatura do ar (15-35 °C)	-0,14	0,029	-0,229	-0,044
Temperatura do fluido de aquecimento (80-120 °C)	0,09	0,029	-0,002	0,182
Temperatura do fluido de resfriamento (15-30 °C)	-0,08	0,029	-0,176	0,009
Dif. de temp. fluido/leito (5-10 °C)	-0,05	0,029	-0,146	0,039
Área do condensador (0,1-1 m ²)	-0,02	0,029	-0,109	0,076
Densidade do leito (500-713 kg m ⁻³)	-0,01	0,029	-0,106	0,079
Vazão do fluido térmico (0,1-0,5 m ³ h ⁻¹)	0,01	0,029	-0,082	0,102
Espessura do leito (0,03-0,065 m)	0,00	0,029	-0,092	0,092

5.1.2 Efeito na Potência de Refrigeração Relativa

Pode-se constatar, conforme mostrado na Tabela 5, que a variação da espessura do leito entre 3,0 e 6,5 cm e a variação da temperatura do fluido de aquecimento entre 80 e 120 °C, são as únicas variáveis significativas, para a P.R.R., sendo que a alteração da espessura do leito é cerca de duas vezes mais importante que a alteração da temperatura do fluido de aquecimento.

*Intervalo de 95 % de confiança.

5.1.3 Efeito na produção diária de gelo, por kg de adsorvente

A única variável significativa na produção diária de gelo por kg de adsorvente é a espessura do leito, conforme mostrado na Tabela 6. Verifica-se que, quando a espessura do leito é alterada de 3,0 para 6,5 cm, há uma diminuição da produção diária de gelo de aproximadamente $300 \text{ g kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$.

Tabela 5: Influência da mudança das variáveis na potência relativa de refrigeração do sistema, pelo PEP-B.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior do efeito*	Limite superior do efeito*
Espessura do leito (0,03-0,065 m)	-2,34	0,32	-3,35	-1,32
Temp. do fluido de aquecimento (80-120 °C)	1,22	0,32	0,20	2,24
Temp. do fluido de resfriamento (15-30 °C)	-0,83	0,32	-0,185	0,19
Vazão do fluido térmico (0,1-0,5 m ³ h ⁻¹)	0,63	0,32	-0,39	1,65
Área do condensador (0,1-1 m ²)	-0,62	0,32	-1,63	0,40
Dif. De temp. fluido/leito (5-10 °C)	0,52	0,32	-0,50	1,53
Temperatura do ar (15-35 °C)	-0,47	0,32	-1,49	0,55
Densidade do leito (500-713 kg m ⁻³)	0,12	0,32	-0,90	1,13

Tabela 6: Influência da mudança das variáveis na produção diária de gelo por kg de adsorvente, pelo PEP-B.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior do efeito*	Limite superior do efeito*
Espessura do leito (0,03-0,065 m)	-0,312	0,072	-0,540	-0,084
Temp. do fluido de aquecimento (80-120 °C)	0,189	0,072	-0,039	0,417
Vazão do fluido térmico (0,1-0,5 m ³ h ⁻¹)	0,144	0,072	-0,084	0,372
Temp. do fluido de resfriamento (15-30 °C)	-0,142	0,072	-0,370	0,086
Densidade do leito (500-713 kg m ⁻³)	-0,051	0,072	-0,280	0,177
Dif. De temp. fluido/leito (5-10 °C)	0,023	0,072	-0,205	0,251
Temperatura do ar (15-35 °C)	0,004	0,072	-0,224	0,232
Área do condensador (0,1-1 m ²)	-0,002	0,072	-0,231	0,226

*Intervalo de 95 % de confiança.

5.1.4 Efeito no tempo de processo

As duas variáveis significativas, no tempo de processo, são a espessura e a densidade do leite, sendo a espessura, cerca de 3 vezes mais importante que a densidade do leite, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7. Influência da mudança das variáveis no tempo do ciclo de refrigeração do sistema, pelo PEP-B.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior do efeito*	Limite superior do efeito*
Espessura do leite (0,03-0,065 m)	3180	269	2325	4035
Densidade do leite (500-713 kg m ⁻³)	-878	269	-1733	-22
Área do condensador (0,1-1 m ²)	-463	269	-392	1319
Temp. do fluido de aquecimento (80-120 °C)	316	269	-539	1171
Temperatura do ar (15-35 °C)	-78	269	-934	777
Temp. do fluido de resfriamento (15-30 °C)	-22	269	-877	833
Vazão do fluido térmico (0,1-0,5 m ³ h ⁻¹)	16	269	-839	871
Dif. De temp. fluido/leite (5-10 °C)	14	269	-841	869

Verifica-se que, quando a espessura do leite é alterada de 3 para 6,5 cm, há uma variação de 3180 minutos a mais no tempo do ciclo, sendo que quando a densidade é modificada de 713 para 500 kg/m³, há uma diminuição do tempo de 878 minutos.

Com base nestes resultados selecionou-se as seguintes variáveis independentes, como sendo significativas nas variáveis respostas:

- Temperatura do ar;
- Temperatura do fluido térmico de aquecimento;
- Espessura do leite;
- Densidade do leite.

Assim, estas variáveis independentes serão avaliadas mais detalhadamente pelo PEFC, mostrado a seguir.



5.2 Planejamento experimental fatorial completo

Os resultados das principais variáveis respostas dos 16 ensaios do PEFC, de dois níveis e 4 variáveis, assim como os 9 ensaios complementares realizados nos níveis 0, $-\alpha$ e $+\alpha$, podem ser vistos na Tabela 8. O resultado completo dos 16 ensaios para o PEFC, dos 9 ensaios complementares, assim como os gráficos de Clapeyron de cada um dos ensaios, podem ser vistos no apêndice IV.

Tabela 8. Resultado dos 16 ensaios do planejamento experimental fracional completo.

Ensaio	COP	P.R.R. (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	Massa de gelo produzida ⁷ (kg kg ⁻¹ _{adsorvente} dia ⁻¹)	Tempo de processo (minutos)
01	0,29	0,88	0,086	4222
02	0,28	0,59	0,058	6216
03	0,26	3,67	0,359	920
04	0,26	2,47	0,247	1383
05	0,06	0,09	0,010	2519
06	0,06	0,07	0,007	3606
07	0,05	0,32	0,032	518
08	0,05	0,25	0,025	769
09	0,37	1,33	0,127	2056
10	0,35	0,83	0,083	5934
11	0,35	5,72	0,580	877
12	0,32	3,60	0,370	1324
13	0,33	0,62	0,064	3190
14	0,33	0,41	0,044	4692
15	0,34	2,85	0,294	695
16	0,32	1,84	0,192	1054
17	0,39	1,86	0,082	2226
18	0,22	0,80	0,036	2264
19	0,00	0,01	0,000	1076
20	0,31	1,97	0,089	2496
21	0,31	6,32	0,283	472
22	0,33	0,59	0,026	5219
23	0,31	0,66	0,030	4566
24	0,32	1,56	0,071	1977
25	0,31	1,30	0,060	2337
(Referência)				

⁷Intervalo de 95 % de confiança.

⁷ Massa de gelo produzida em condições padrões: Temperatura inicial da água de 25 °C, evaporador de alumínio de 2 mm de espessura, formato cilíndrico e volume suficiente para conter a massa de refrigerante dessorvida, mais uma reserva de 10 % dessa massa.

Analisando separadamente os efeitos das variáveis independentes em cada variável resposta, tem-se:

5.2.1 Efeito no COP

Assim como no PEP-B, a temperatura do ar, foi apontada pelo PEFC, como o fator que mais interfere no COP do sistema. O PEFC apontou também a importância da temperatura do fluido de aquecimento e da interação desta com a temperatura do ar. A espessura e a densidade do leito também são significativas no COP, mas muito menos que as demais variáveis, assim como a interação entre a espessura do leito e a temperatura do fluido de aquecimento. Na Tabela 9 é mostrado os efeitos das variáveis e das interações destas, no COP.

Tabela 9. Influência da mudança das variáveis no COP do sistema, pelo planejamento experimental fracional completo.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior do efeito*	Limite superior do efeito*
Temperatura do ar (15-35 °C)	-0,18	0,003	-0,183	-0,167
Temp. do fluido de aquecimento (70-120 °C)	0,12	0,003	0,110	0,125
Interação: Temp. ar X Temp. fluido	0,10	0,003	0,092	0,108
Espessura do leito (0,03-0,065 m)	0,02	0,003	0,007	0,022
Densidade do leito (500-713 kg m ⁻³)	0,01	0,003	0,002	0,018
Interação: Temp. fluido X Esp. Leito	0,01	0,003	0,002	0,018
Interação: Temp. ar X Esp. Leito	0,00	0,003	-0,010	0,010
Interação: Temp. ar X Dens. Leito	0,00	0,003	-0,015	0,000
Interação: Temp. fluido X Dens. Leito	0,00	0,003	-0,003	0,013
Interação: Esp. leito X Dens. Leito	0,00	0,003	-0,010	0,005

A alteração da temperatura do ar do nível inferior ao nível superior, provoca uma redução de 58% no valor do COP, em relação ao valor do COP de referência⁸.

* Intervalo de 95 % de confiança.

⁸ Obtido quando todas as variáveis encontram-se no nível zero.

O COP tem um aumento de 0,1 ou de 32% em relação ao COP de referência, quando se considera a interação entre a temperatura do fluido térmico e a temperatura do ar. Portanto apesar da temperatura do ar ter uma influência negativa maior que a influência positiva da temperatura do fluido aquecimento, a interação destes dois fatores resulta numa influência positiva.

Verifica-se pela Figura 4 que a influência da temperatura do ar é maior para valores baixos da temperatura do fluido de aquecimento e que para valores baixos da temperatura do ar, o COP é praticamente constante, não importando a elevação da temperatura do fluido de aquecimento. O COP atinge seus maiores valores para o nível intermediário da temperatura do fluido de aquecimento.

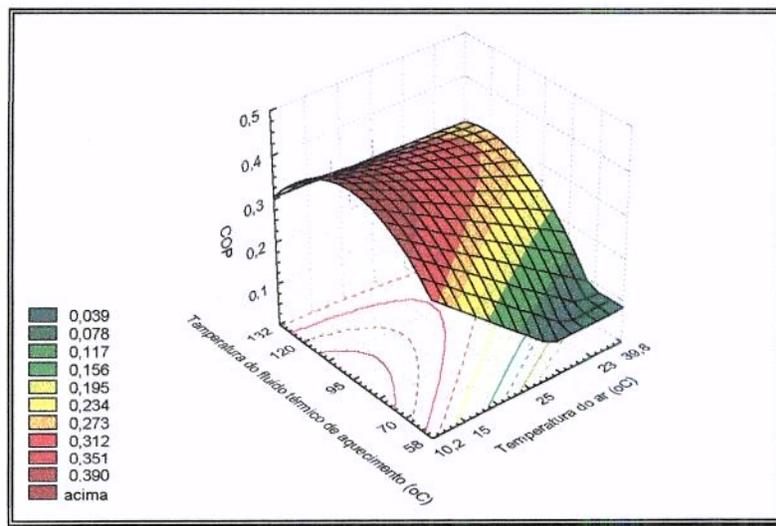


Figura 4. Variação do COP em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.

Pela Figura 5, verifica-se que o COP atinge valores próximos de 0,3, para qualquer valor da densidade e de espessura do leito.

Pela Figura 6, verifica-se que é possível conseguir um COP acima de 0,3, utilizando fluido térmico entre 58 °C e 132 °C, dependendo da temperatura do ar. Caso o ar esteja cerca de 15 °C, é necessário um fluido térmico com temperatura de pelo menos 70 °C, enquanto que se o ar estivesse a 30 °C, a temperatura do fluido térmico necessita estar acima de 95 °C, para resultar neste mesmo valor.

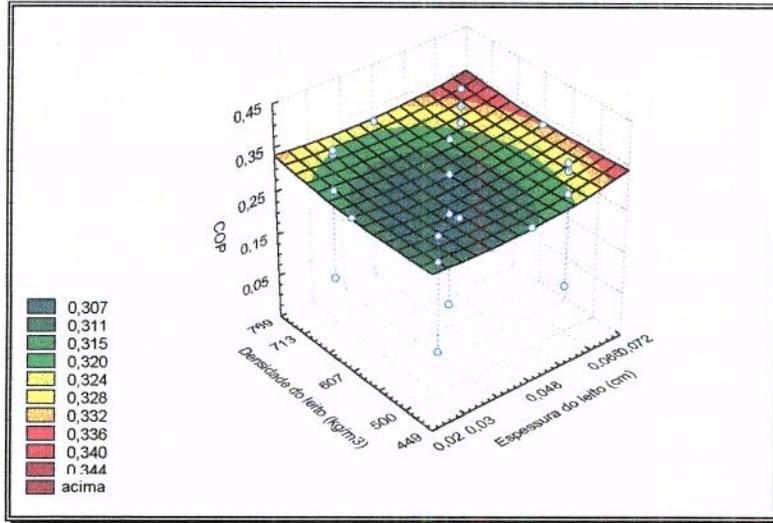


Figura 5. Variação do COP em função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.

No apêndice V pode-se ver as seguintes figuras:

- variação do COP em função da temperatura do fluido de aquecimento e da espessura do leito;
- variação do COP em função da temperatura do fluido de aquecimento e da densidade do leito;
- variação do COP em função da temperatura do ar e da densidade do leito.

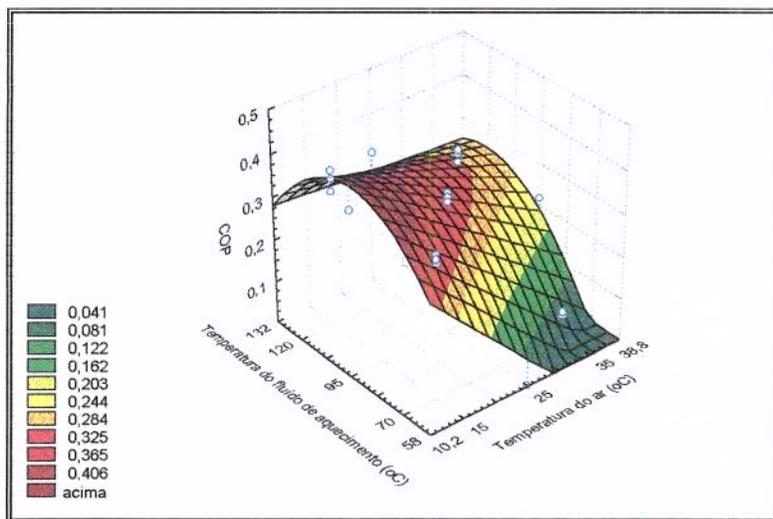


Figura 6. Variação do COP em função da temperatura do fluido de aquecimento e da temperatura do ar, com a espessura do leito no nível inferior e a densidade do leito no nível superior.

5.2.2 Efeito no Potência de Refrigeração Relativa

Tanto no PEP-B, quanto no PEFC, a espessura do leito, foi o fator mais relevante para variar a P.R.R., seguido pela temperatura do fluido de aquecimento.

Pela Tabela 10, observa-se que o PEFC também apontou serem significativos, para a P.R.R. temperatura do ar, a interação da espessura do leito com a temperatura do fluido de aquecimento, a interação da espessura do leito com a temperatura do ar, a densidade do leito, a interação da densidade com a espessura do leito e da densidade com a temperatura do fluido de aquecimento.

Tabela 10. Influência da mudança das variáveis na potência de refrigeração relativa, do sistema, pelo planejamento experimental fracional completo.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior do efeito*	Limite superior do efeito*
Espessura do leito (0,03-0,065 m)	-1,99	0,13	-2,326	-1,649
Temp. do fluido de aquecimento	1,58	0,13	1,242	1,918
Temperatura do ar (15-35 °C)	-1,11	0,13	-1,446	-0,769
Interação: Esp. do leitoX Temp. fluido	-0,97	0,13	-1,308	-0,632
Interação: Esp. do leitoX Temp. ar	0,72	0,13	0,379	1,056
Densidade do leito (500-713 kg m ⁻³)	0,68	0,13	0,339	1,016
Interação: Esp. do leitoX Dens. Leito	-0,42	0,13	-0,761	-0,084
Interação: Temp. fluido X Dens. Leito	0,35	0,13	0,012	0,688
Interação: Temp. ar X Dens. Leito	-0,28	0,13	-0,621	0,056
Interação: Temp. fluido X Temp. ar	0,14	0,13	-0,198	0,478

A alteração da espessura do leito de 3,0 para 6,5 cm, resulta em uma diminuição de aproximadamente 2 W kg⁻¹_{adsorvente}, ou de 153% em relação a P.R.R. de referência⁹, enquanto que a mudança da temperatura do fluido de aquecimento de 70 °C para 120 °C, provoca um aumento de 1,58 W kg⁻¹_{adsorvente} ou de 121% em relação ao P.R.R. de referência. Já a mudança da temperatura do ar de 15 °C para 35 °C, resulta numa diminuição de W kg⁻¹_{adsorvente} ou de 85%.

⁹ Obtido quando todas as variáveis encontram-se no nível zero.

A interação da espessura do leito com a temperatura do fluido de aquecimento, quando estas variáveis passam do nível inferior para o nível superior, resulta numa diminuição de $0,97 \text{ W kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$ na P.R.R., o que representa cerca de 75% em relação à P.R.R. de referência, enquanto que a interação entre a espessura do leito e a temperatura do ar resulta num aumento de $0,72 \text{ W kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$, que corresponde a aproximadamente 55%, em relação à P.R.R. de referência.

As demais variáveis e interações entre variáveis significativas, apesar de contribuir negativamente ou positivamente na P.R.R., tem uma importância menor do que a espessura do leito, temperatura do ar e temperatura do fluido de aquecimento.

Pela Figura 7, pode-se constatar que a potência de refrigeração é mais sensível à temperatura do fluido de aquecimento, quando a espessura do leito é menor, e que esta atinge seu valor máximo quando a temperatura do fluido está no nível superior. Quando a espessura do leito é maior, a qualquer temperatura do fluido de aquecimento, a potência é aproximadamente constante, resultando em seus menores valores.

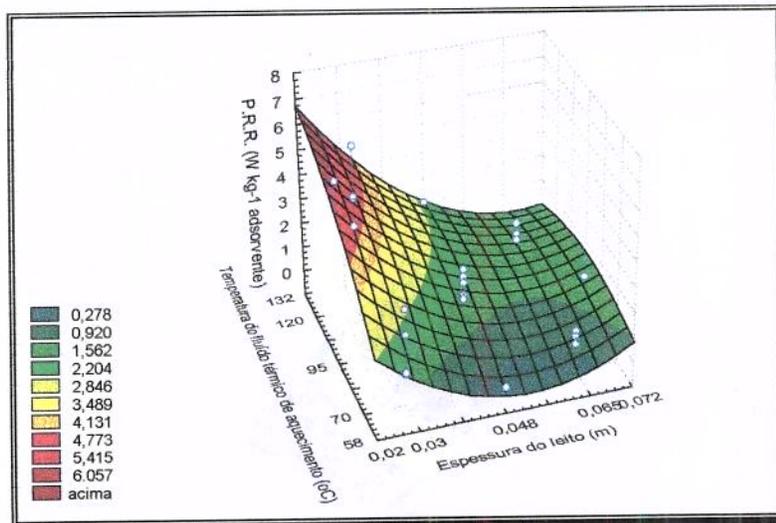


Figura 7. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento espessura do leito, com as demais variáveis no nível zero.

É observado na Figura 8, que a interação da temperatura do ar com a espessura do leito, a P.R.R. é mais sensível, quando a espessura do leito é menor, e que esta atinge seu valor máximo quando a temperatura do ar está no nível inferior. Verifica-se ainda, que quando a espessura do leito é maior, não importa qual a temperatura do ar, a P.R.R. é praticamente constante, atingido seus menores valores.

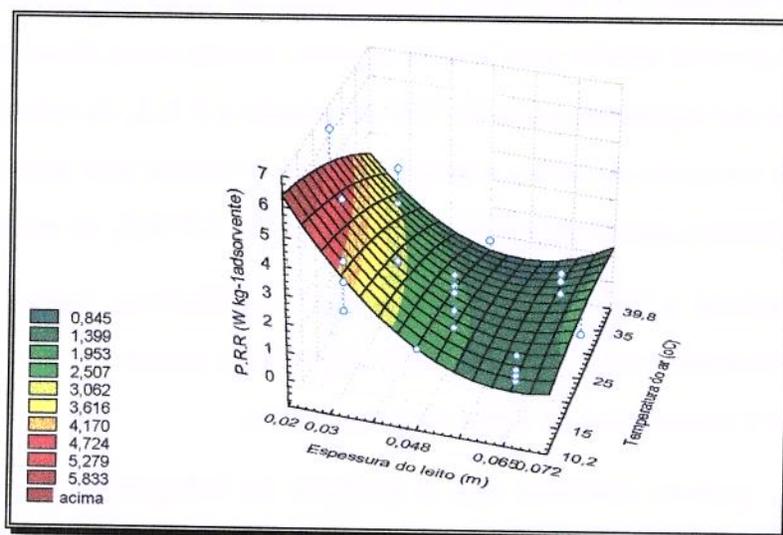


Figura 8. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do ar e espessura do leito, com as demais variáveis no nível zero.

A partir das Figuras 7 e 8, conclui-se que a P.R.R. atinge seus melhores valores quando a temperatura do fluido de aquecimento é máxima e a temperatura do ar é mínima, podendo esta afirmativa ser também observada pela Figura 9.

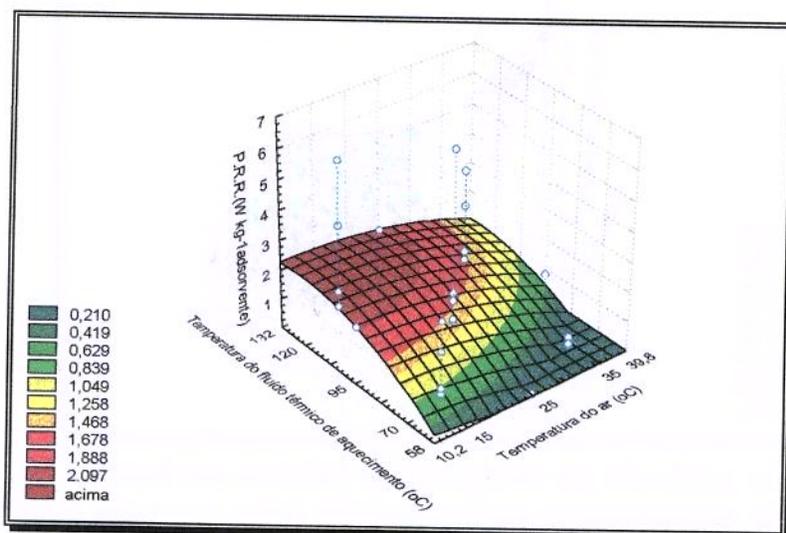


Figura 9. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do ar e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.

Para as temperaturas do ar e do fluido térmico de aquecimento, em seus níveis intermediários, obtém-se, conforme visto na Figura 10, as maiores P.R.R., com a densidade a partir do nível intermediário e a espessura do leito no nível inferior.

No apêndice VI, pode-se ver as seguintes figuras:

- variação da P.R.R. em função da temperatura do fluido de aquecimento e da densidade do leito;
- variação da P.R.R. em função e da temperatura do ar e da densidade do leito.

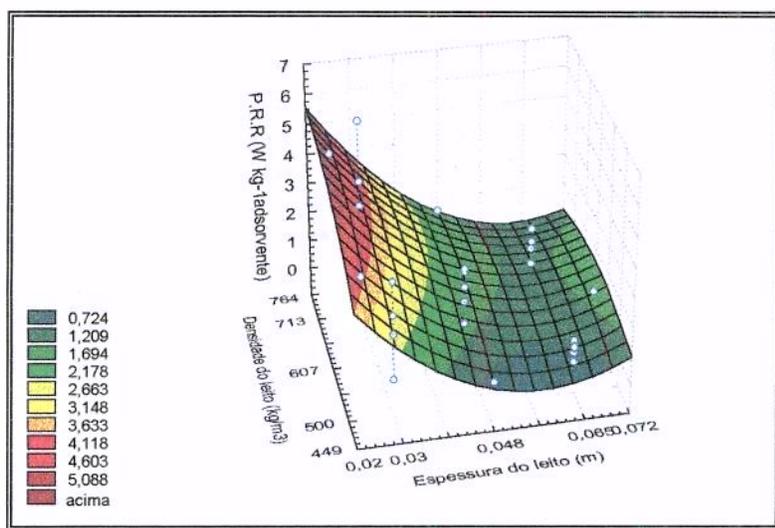


Figura 10. Variação da potência de refrigeração relativa em função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.

5.2.3 Efeito na produção diária de gelo

Os efeitos das variáveis independentes, sobre da produção diária de gelo por kg de adsorvente, obtido pelo PEFC, estão mostrados na Tabela 11. Verifica-se ver, que a interação entre a densidade do leito e a temperatura do ar, a interação entre a densidade do leito e a temperatura do fluido de aquecimento, e a interação entre a temperatura do ar e a temperatura do fluido de aquecimento, não têm efeitos significativos.

Uma alteração da espessura do leito de 3,0 para 6,5 cm, resulta numa diminuição da produção diária de gelo, de aproximadamente 200 g kg⁻¹adsorvente, o que equivale uma redução de aproximadamente 333 % em relação a produção de gelo de referência¹⁰.

Alterando-se a temperatura do fluido de aquecimento de 70 °C para 120 °C, tem-se um aumento na produção diária de gelo, de 155 g kg⁻¹adsorvente, que equivale a um aumento de quase

¹⁰ Obtido quando todas as variáveis encontram-se no nível zero.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

260 % em relação a produção de gelo de referência. Aumentando-se a temperatura do ar de 15 °C para 35 °C, tem-se uma redução na produção de gelo de aproximadamente 190 %.

Aumentando conjuntamente a espessura do leito e a temperatura do fluido de aquecimento, a diminuição na produção de gelo é de 163 %, enquanto que, aumentando-se a espessura do leito conjuntamente com a temperatura do ar, tem-se um aumento de 128 %, apesar da mudança isolada desta duas variáveis ocasionar uma diminuição na produção de gelo.

Tabela 11. Influência da mudança das variáveis na produção diária de gelo por kg de adsorvente, pelo planejamento experimental fracional completo.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior do efeito*	Limite superior do efeito*
Espessura do leito (0,03-0,065 m)	-0,203	0,013	-0,237	-0,169
Temp. do fluido de aquecimento (70-120 °C)	0,155	0,013	0,121	0,189
Temperatura do ar (15-35 °C)	-0,116	0,013	-0,150	-0,082
Interação:Esp. Leito X Temp. fluido	-0,098	0,013	-0,132	-0,064
Interação:Esp. Leito X Temp. ar	0,077	0,013	0,043	0,111
Densidade do leito (500-713 kg m ⁻³)	0,066	0,013	0,032	0,100
Interação: Esp. Leito X Dens. Leito	-0,042	0,013	-0,076	-0,008
Interação:Dens. Leito X Temp. fluido	0,033	0,013	-0,001	0,067
Interação:Dens. leito X Temp. ar	-0,028	0,013	-0,062	0,006
Interação: Temp. fluido X Temp. ar	0,014	0,013	-0,020	0,048

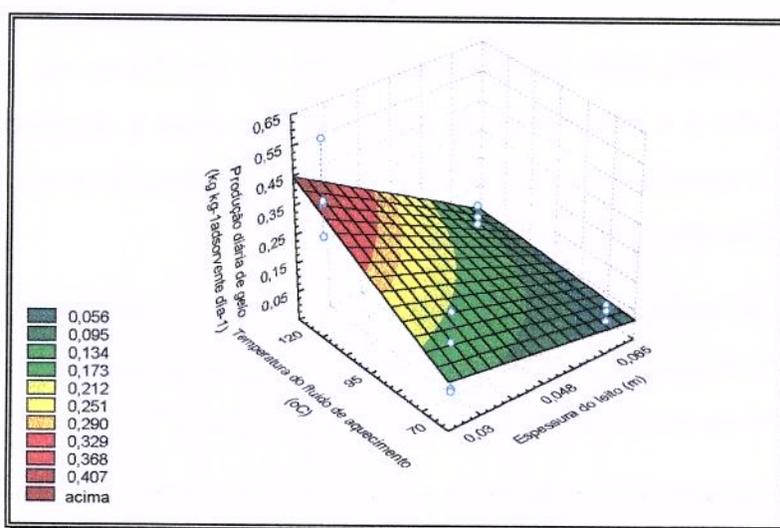


Figura 11. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da espessura do leito e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.

Observa-se nas Figura 11 e a Figura 12 que a produção de gelo é mais sensível as alterações da temperatura do fluido de aquecimento e do ar, respectivamente, quando a espessura do leito está no nível inferior.

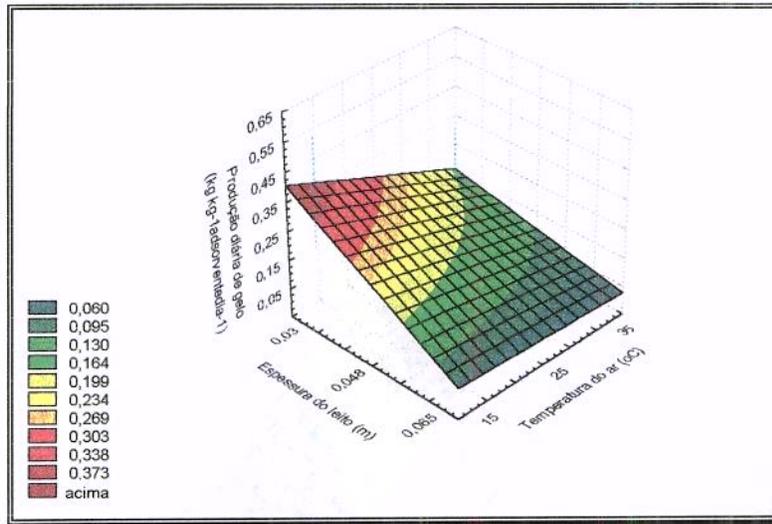


Figura 12. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da espessura do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.

Pela Figura 13, verifica-se que a produção diária de gelo é máxima, para uma espessura de leito no nível inferior e a densidade acima do valor médio. Este resultado foi usado para escolher a configuração dos experimentos utilizada na determinação dos fatores de sensibilidade.

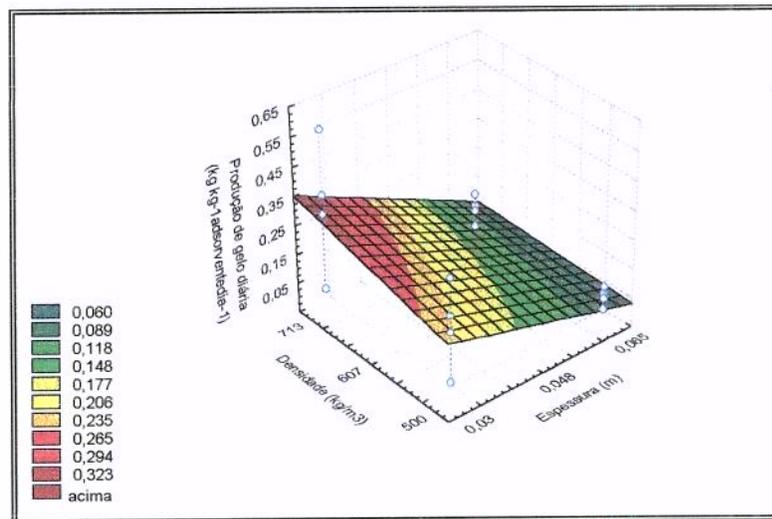


Figura 13. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.

Constata-se pela Figura 14, que para manter uma mesma produção de gelo, tem que se aumentar a temperatura do fluido de aquecimento concomitante à temperatura do ar. Se o ar estivesse a 15 °C seria necessário um fluido de aquecimento a pelo menos 80 °C, para atingir uma produção de 400g de gelo, enquanto que se o ar estivesse a 30 °C, seria necessário um fluido com temperatura acima de 108 °C.

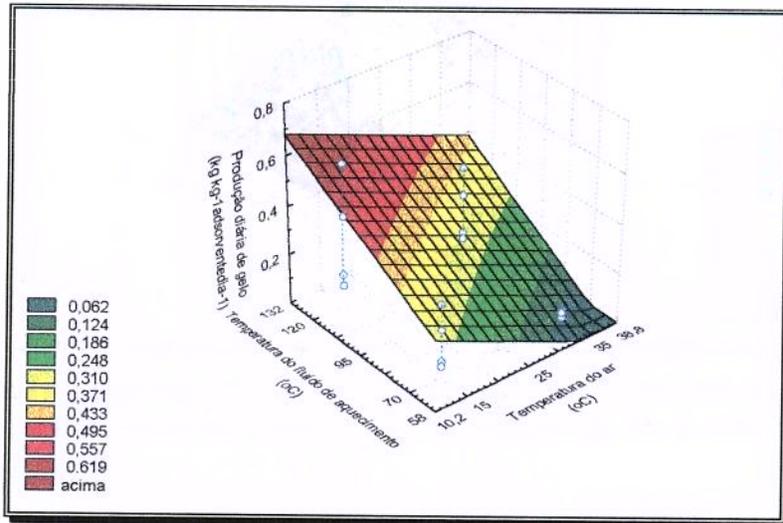


Figura 14. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, função da temperatura do ar e do fluido térmico de aquecimento, com a espessura do leito no nível inferior e a densidade do leito no nível superior.

No apêndice VII pode-se ver as seguintes figuras:

- variação da produção diária de gelo em função da temperatura do fluido de aquecimento e da densidade do leito;
- variação da produção diária de gelo em função da temperatura do ar e da densidade do leito.

5.2.4 Efeito no tempo de processo

Os efeitos das variáveis independentes sobre o tempo de processo, obtido pelo PEFC, são mostrados na Tabela 12. Verifica-se que as variáveis significativas no tempo de processo, são a espessura e a densidade do leito, assim como a interação entre estas variáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A alteração da espessura do leito de 3,0 para 6,5 cm, ocasiona um acréscimo de 3000 minutos no tempo de processo, o que equivale um aumento de 128 % em relação ao tempo de referência¹¹.

Alterando-se a densidade do leito do nível inferior, que corresponde ao leito granular (densidade de 500 kg m⁻³), para o nível superior, que corresponde ao leito compactado (densidade de 713 kg m⁻³), produz uma diminuição de cerca de 1000 minutos no tempo de processo, ou cerca de 43% em relação ao tempo de referência.

Tabela 12. Influência da mudança das variáveis no tempo de processo, pelo planejamento experimental fracional completo.

Variável	Efeito	Desvio Padrão	Limite inferior*	Limite superior*
Espessura do leito (0,03-0,065 m)	3112	313	2307	3917
Densidade do leito (500-713 kg m⁻³)	-1248	313	-2053	-443
Interação: Esp. leito X Dens. Leito	-868	313	-1673	-63
Temp. do fluido de aquecimento (70-120 °C)	736	313	-69	1541
Interação: Temp. fluido X Temp. ar	596	313	-209	1401
Interação:Dens. leito X Temp. fluido	-448	313	-1253	357
Interação:Esp. leito X Temp. fluido	369	313	-436	1174
Interação:Dens. leito X Temp. ar	299	313	-506	1104
Interação:Esp. leito X Temp. ar	131	313	-673	936
Temperatura do ar (15-35 °C)	41	313	-764	846

Observa-se, pela Figura 15, que no nível inferior da espessura do leito, o tempo é mínimo, qualquer que seja a densidade, enquanto que no nível superior da espessura do leito é importante que a densidade do leito seja a maior possível, para conseguir uma redução do tempo de processo.

¹¹ Obtido quando todas as variáveis encontram-se no nível zero.

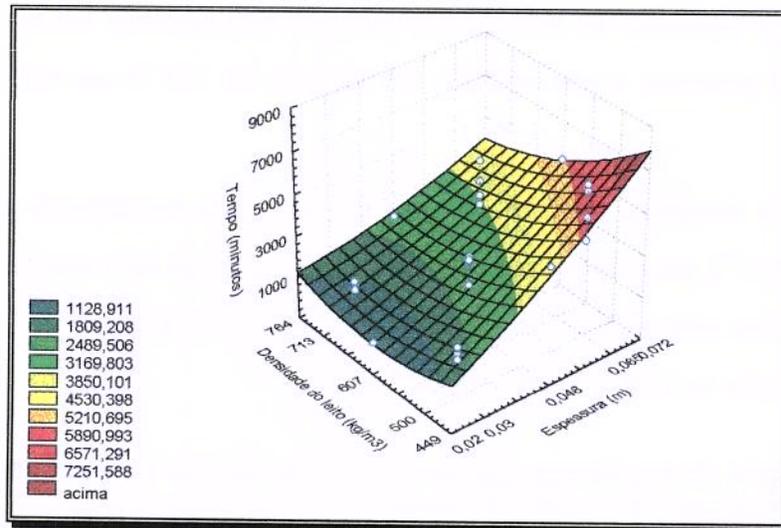


Figura 15. Variação do tempo de processo em função da espessura e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.

Pelas Figuras 16 e 17, observa-se que a temperatura do ar e do fluido de aquecimento respectivamente, não influenciam o tempo de processo para uma mesma espessura do leito, sendo que nos dois casos, o tempo mínimo é conseguido na espessura mínima.

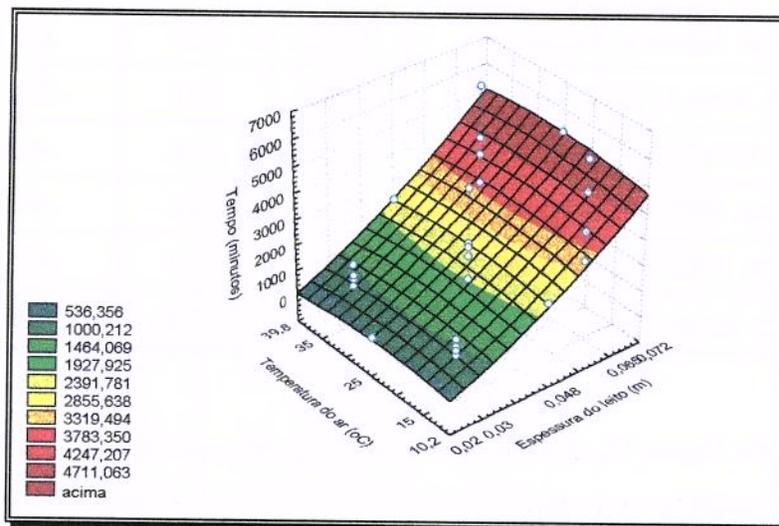


Figura 16. Variação do tempo de processo em função da espessura do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.

No apêndice VIII pode-se ver as seguintes figuras:

- variação do tempo de processo em função da temperatura do fluido de aquecimento e da densidade do leito;
- variação do tempo de processo em função da temperatura do ar e da densidade do leito.

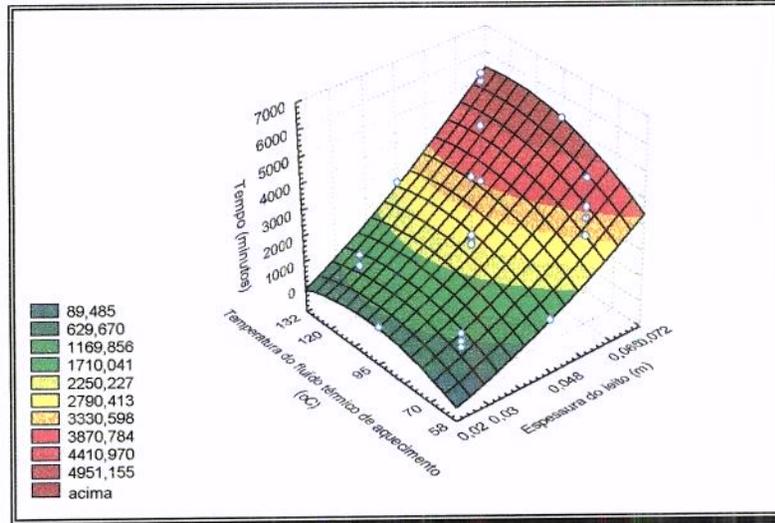


Figura 17. Variação do tempo de processo em função da espessura do leito e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.

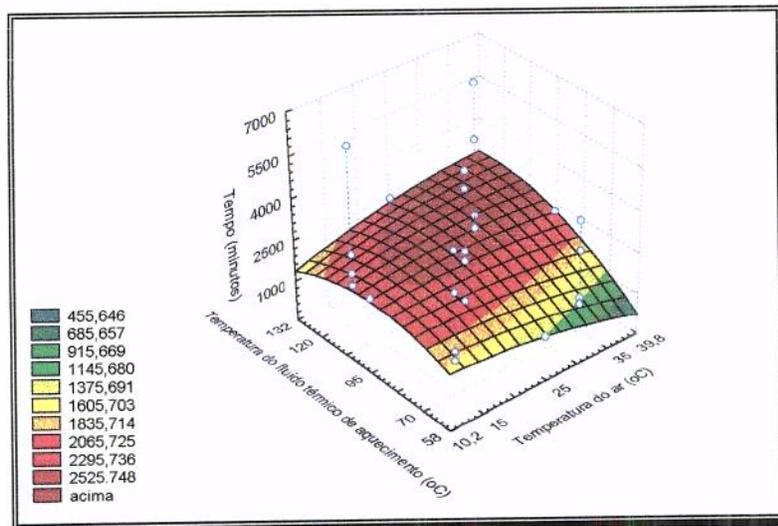


Figura 18. Variação do tempo de processo em função da temperatura do ar e da temperatura do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.

5.2.5 Considerações finais

Analisando-se conjuntamente a Figura 6 e a Figura 14, chega-se a conclusão que nas condições estudadas, para uma produção diária de gelo acima de 400 g de gelo por kg de adsorvente, tem-se um COP de pelo menos 0,3, sendo que o oposto nem sempre é verdadeiro.

Com uma densidade e espessura de leito nos níveis intermediários, observa-se que pelas Figuras 4, 9, 18 e 19, que os maiores P.R.R. e COP são obtidos quando a temperatura do fluido térmico de aquecimento fica entre 90 e 120 °C e a temperatura do ar está até 20 °C, sendo que o COP será cerca de 0,37 e a P.R.R. cerca de 2 W/kg_{adsorvente}. Nessas condições entretanto, o tempo de ciclo é cerca de 42 horas com uma produção diária de gelo de aproximadamente 200 g por kg de adsorvente.

Esta produção é bem inferior a produção de 400 g por kg de adsorvente, obtida quando se tem a densidade no nível superior e a espessura do leito no nível inferior, conforme a Figura 14.

Com a densidade e a espessura do leito nos níveis intermediários, a condição de menor tempo de processo é de cerca de 7 horas e meia, porém a temperatura do ar está no seu nível superior e a temperatura do fluido térmico de aquecimento está no seu nível inferior, ocasionando baixos valores de COP e P.R.R., resultando na produção de gelo diária de 20 g por kg de adsorvente.

Para uma temperatura do ar de até 25 °C e espessura de leito ao redor de 0,02 m, com a temperatura do fluido e a densidade do leito no nível intermediário, obtém-se como observado pelas figuras 8, 16 e 20, uma P.R.R. de 5,2 Wkg⁻¹_{adsorvente} com um COP de 0,33 e tempo de processo de cerca de 9 horas, sendo que a produção diária de gelo resulta em cerca de 300 g kg de adsorvente, conforme a Figura 12.

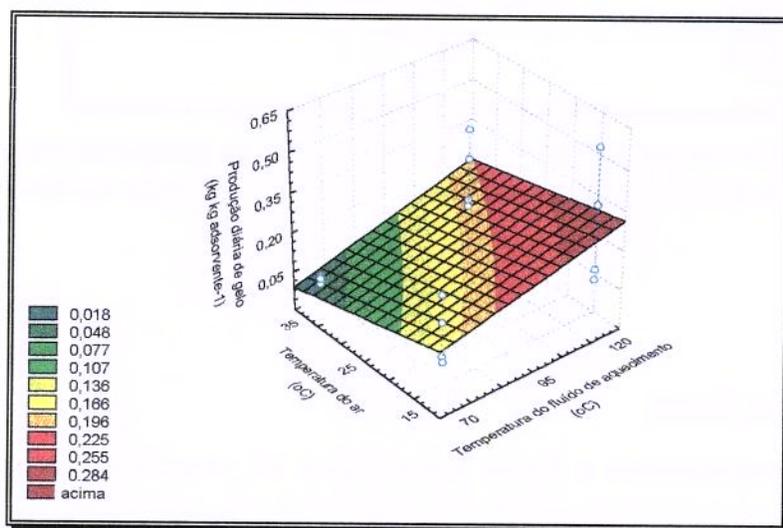


Figura 19. Variação da produção de gelo por kg de adsorvente, função da temperatura do ar e do fluido térmico de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.

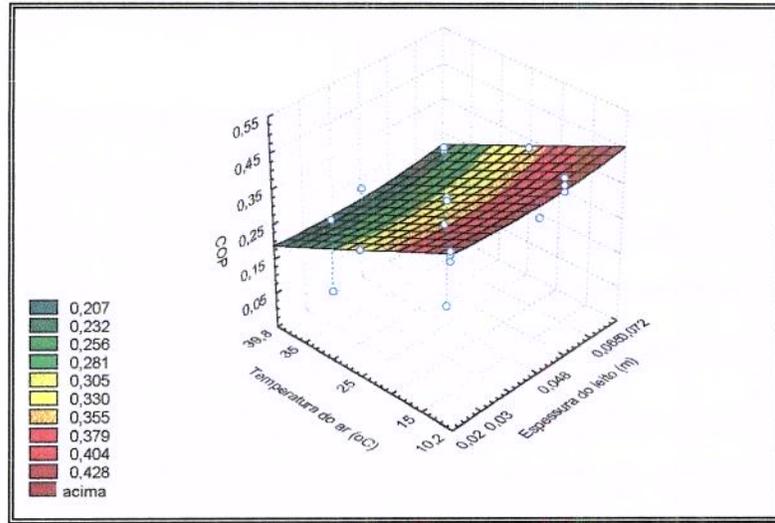


Figura 20: Variação do COP em função da espessura do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.

5.3 Teste de sensibilidade

Devido ao fato do PEFC resultar que pequenos valores da espessura do leito aumentaram a P.R.R. e a produção diária de gelo e possuem baixa influência sobre o COP, realizou-se um estudo de sensibilidade de um leito de pequena espessura, com uma densidade de valor intermediário, variando se a temperatura do ar e posteriormente do fluido térmico de aquecimento.

Configurando um cenário hipotético, cujos valores das variáveis selecionadas foram:

- de 0,02 cm para espessura do leito, que corresponde ao nível $-\alpha$ do PEFC;
- de 607 kg m^{-3} para a densidade do leito, que corresponde ao nível zero do PEFC;
- de $95 \text{ }^\circ\text{C}$ para a temperatura do fluido quando aplicada a análise de sensibilidade em relação à temperatura do ar;
- de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ para a temperatura do ar quando aplicada a análise de sensibilidade em relação à temperatura do fluido de aquecimento.

Tanto a temperatura do ar quanto a do fluido estão no nível zero do PEFC.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que durante o ano a temperatura média do ar oscila entre 20 e 35 °C, nas regiões mais quentes do país, estas duas temperaturas foram utilizados, na análise de sensibilidade das respostas em relação à temperatura do ar.

Utilizando-se água como fluido térmico, cuja temperatura máxima não pode ser superior a 100 °C, e aproveitando-se de um resíduo térmico de qualquer processo para seu aquecimento, estima-se que a temperatura deste fluido térmico não se eleve muito, atingindo valores na ordem de 70 °C. Por esses motivos é que essas duas temperaturas foram as escolhidas para a análise de sensibilidade das respostas, em relação à temperatura do fluido de aquecimento.

Os resultados da análise de sensibilidade das principais variáveis respostas são mostrados na Tabela 13. Na Tabela 14, tem-se os valores dos fatores de sensibilidade, FS, em relação a temperatura do ar.

Tabela 13. Resultado dos 2 ensaios realizados para avaliar o Fator de Sensibilidade do COP, P.R.R., da produção diária de gelo e do tempo de processo em relação à temperatura do ar.

Ensaio	COP	P.R.R. (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	Massa de gelo* (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	Tempo (minutos)
01	0,30	6,84	0,301	438
02	0,20	4,18	0,189	457

Verifica-se pelo FS uma redução no COP de 44 % em relação ao aumento da temperatura do ar de 15 para 35 °C. Obteve-se para a P.R.R uma redução em torno de 52 % e para a produção diária de gelo por kg de adsorvente, a redução foi de 49 %. O tempo foi a única variável que aumentou em relação a alteração da temperatura do ar, sendo este aumento de somente 4 %.

Tabela 14. Fator de Sensibilidade do COP, P.R.R., produção diária de gelo e tempo de processo em função da mudança da temperatura do ar de 20 °C para 35 °C.

	COP	P.R.R.	Massa de gelo	Tempo
FS	-0,44	-0,52	0,49	0,04

* Massa de gelo produzida em condições padrões: Temperatura inicial da água de 25 °C, evaporador de alumínio de 2 mm de espessura, formato cilíndrico e volume suficiente para conter a massa de refrigerante dessorvida, mais uma reserva de 10 % dessa massa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise de sensibilidade das principais variáveis resposta são mostrados na Tabela 15. Na Tabela 16, tem-se o valor do FS, em relação a temperatura do fluido de aquecimento.

Tabela 15. Resultado dos 2 ensaios realizados para avaliar a sensibilidade do COP, P.R.R., produção diária de gelo e tempo de processo em relação à temperatura do fluido de aquecimento.

Ensaio	COP	P.R.R. (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	Massa de gelo* (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	Tempo (minutos)
03	0,13	1,96	0,099	400
04	0,27	6,60	0,293	446

Verifica-se que a temperatura do fluido térmico de aquecimento tem uma influência de 5 à 10 vezes maior que a temperatura do ar. A alteração da temperatura do fluido na faixa estudada resulta um aumento de 5 vezes e meia na P.R.R., de 4 vezes e meia na produção diária de gelo, de duas vezes e meio no COP e de aproximadamente 0,3 vezes no tempo.

Tabela 16. Sensibilidade do COP, potência de refrigeração relativa, da produção diária de gelo e tempo de processo em função da mudança da temperatura do fluido de aquecimento de 70 °C para 100 °C.

	COP	P.R.R.	Massa de gelo	Tempo
FS	2,51	5,52	4,43	0,27

O resultado completo dos 4 ensaios de análise do FS juntamente com os gráficos de Clapeyron para cada um dos ensaios, podem ser vistos no apêndice IX.

5.4 Ciclo modificado

Com o intuito de reduzir mais o tempo do ciclo frigorífico e com isso aumentar a produção de gelo diária, sugeriu-se uma modificação na etapa de aquecimento, onde em lugar de aquecer o leito isostericamente até temperatura T_d (Figura 2), aqueceu-se o leito até a temperatura final T_f e só então abriu-se a válvula de comunicação entre este e o condensador.

Esta modificação foi sugerida ao se observar que, antes de se introduzir a Equação (15), na Equação (24), esta equação pode ser escrita como:

RESULTADOS E DISCUSSÕES

$$\left[\rho_{carv} \left(C_{p_{carv.}} + x C_{p_{NH_3}} + b(x, P, T) \frac{h^2}{RT^2} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = k_{leito} \nabla^2 T + \rho_{carv} h b(x, P, T) \frac{\partial P_{leito}}{\partial t} \quad (57)$$

e dessa forma, um crescimento da variação da pressão, no lado direito da equação, induz a um crescimento da variação da temperatura no lado esquerdo da mesma.

Tanto no ensaio de referência quanto no ensaio com o ciclo modificado, considera-se a temperatura do fluido de aquecimento de 95 °C, a temperatura do ar de 25 °C, a densidade do leite de 607 kg m⁻³ e a espessura do leite de 2 cm. Estes valores escolhidos são os mesmos do nível zero do PEFC, com exceção do valor da espessura do leite, que é o mesmo do nível - α , o menor do PEFC.

Os resultados do ensaio de referência e do ensaio com ciclo modificado estão mostrados na Tabela 17.

Tabela 17. Resultado dos 2 ensaios realizados para avaliação do ciclo modificado

Ensaio	COP	P.R.R. (W kg ⁻¹ adsorvente)	Massa de gelo* (kg kg ⁻¹ adsorvente)	Tempo (minutos)
01 (Referência)	0,27	5,98	0,293	442
02	0,12	6,11	0,348	345

O processo modificado resultou em um tempo reduzido e uma produção de gelo diária aumentada em relação ao processo de referência. O tempo de processo teve uma redução de 22 %, a produção diária de gelo teve um aumento de 19 %, enquanto o COP teve uma redução de 56 %. Esta redução no COP indica que é necessário fornecer mais energia para o reator na fase de aquecimento do leite e dessorção no processo modificado, que no processo de referência.

O tempo do processo de referência foi cerca de 7 horas e meia, enquanto que o tempo do processo modificado foi cerca de 6 horas, indicando que pode-se conseguir até 4 ciclos de refrigeração por dia.

* Massa de gelo produzida em condições padrões: Temperatura inicial da água de 25 °C, evaporador de alumínio de 2 mm de espessura, formato cilíndrico e volume suficiente para conter a massa de refrigerante dessorvida, mais uma reserva de 10 % dessa massa.

CRISTOPH (1994) conseguiu uma produção diária de 211 g de gelo por kg de adsorvente enquanto PONS e GUILLEMINOT (1986) conseguiram uma produção de 280 g por kg de adsorvente, considerando-se que a produção de gelo ocorra nas mesmas condições do nosso experimento. Ambos utilizaram refrigeradores por adsorção aquecido apenas por energia solar, sendo que CRISTOPH (1994) utilizou o par carvão ativado e amônia enquanto PONS e GUILLEMINOT (1986) utilizaram o par carvão ativado e metanol.

Tanto o ciclo de referência (ensaio 01) quanto o ciclo modificado (ensaio 02) produziram mais gelo que os dois ciclos que utilizam apenas energia solar no aquecimento do reator.

O resultado completo do ensaio de referência e do ensaio com o processo modificado, juntamente com os gráficos de Clapeyron para cada um dos ensaios, podem ser vistos no apêndice X.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

Verifica-se que para a P.R.R., produção de gelo e tempo de processo, é fundamental que a espessura do leito esteja no nível inferior, enquanto que para o COP é praticamente indiferente a espessura do leito.

Para uma densidade e espessura de leito no nível intermediário, tem-se o melhor P.R.R., produção diária de gelo e COP, se a temperatura do fluido térmico de aquecimento estiver ao redor de 95 °C e a temperatura do ar estiver até 20 °C.

Nas condições citadas acima, o COP foi em torno de 0,37, a P.R.R. em torno de 2 Wkg⁻¹_{adsorvente}, o tempo de ciclo foi cerca de 42 horas e a produção diária de gelo, cerca de 200 g kg⁻¹_{adsorvente}.

Para a temperatura do ar até 25 °C, a temperatura do fluido de aquecimento de 95 °C, um leito de espessura ao redor de 0,02 m e densidade de 600 kg m⁻³, pode-se obter uma P.R.R. de 5,2 Wkg⁻¹_{adsorvente} com um COP de 0,33 e tempo de processo de cerca de 9 horas, sendo que a produção diária de gelo resultou em cerca de 300 g kg⁻¹_{adsorvente}.

6.1.1 Sobre o COP

A baixas temperaturas do ar, a temperatura do fluido térmico praticamente não interfere no COP, porém a altas temperaturas do ar, é necessário que a temperatura do fluido térmico seja acima de 95 °C para se ter um COP de aproximadamente 0,3.

A densidade e a espessura do leito do leito praticamente não interfere no COP do sistema.

A análise de sensibilidade resultou na redução do COP em 44 % em relação ao aumento da temperatura do ar e um aumento do COP em 251 % em relação ao aumento da temperatura do fluido de aquecimento.

6.1.2 Sobre a Potência de Refrigeração Relativa e a produção diária de gelo por kg de adsorvente

A espessura do leito e a temperatura do fluido de aquecimento são as variáveis mais importantes que afetam a P.R.R. O aumento da espessura do leito reduz a P.R.R. e a produção diária de gelo enquanto o aumento da temperatura do fluido de aquecimento eleva a P.R.R. e a produção diária de gelo.

As reduções da P.R.R. e da produção diária de gelo com o aumento da espessura do leito podem ser minimizadas aumentando-se a temperatura do fluido de aquecimento.

A P.R.R. é mais sensível à mudança na temperatura do fluido de aquecimento e do ar, quando a espessura está no nível inferior e atinge seus mais altos valores, quando a temperatura do ar estiver no nível inferior e a temperatura do fluido de aquecimento no nível superior .

Quando se tem a temperatura do ar e do fluido térmico de aquecimento, no nível intermediário, as melhores P.R.R. e produção diária de gelo são obtidas com a densidade acima do nível intermediário e com a espessura do leito no nível inferior.

Pode-se concluir pelo FS que o aumento na temperatura do ar resulta em uma redução da P.R.R. em torno de 52 % e da produção diária de gelo por kg de adsorvente em torno de 49 %, sendo que o aumento da temperatura do fluido de aquecimento resulta aumentos da P.R.R. de aproximadamente 500 % e da produção de gelo, de 400 %.

6.1.4 Sobre o tempo de processo

As variáveis que possuem efeitos significativos no tempo de processo são a espessura e a densidade do leito, assim como a interação entre estas variáveis.

Para o nível inferior da espessura do leito, a densidade não é tão importante para modificar o tempo de processo, entretanto se espessura do leito está no nível superior é essencial que a densidade seja a maior possível para reduzir o tempo de processo.

O tempo teve um aumento de 4 % em relação à alteração da temperatura do ar, e um aumento de 30 % em relação à alteração da temperatura do fluido de aquecimento, portanto a temperatura do ar praticamente não tem efeito no tempo de processo.

6.1.5 Sobre o processo modificado

O processo modificado teve seu tempo reduzido e sua produção de gelo diária aumentada em relação ao processo de referência. O processo modificado teve uma redução no tempo de 22 %, um aumento na produção diária de gelo de 19 % e um COP reduzido em 56 %, quando comparado ao ciclo de referência

6.2 Sugestões

Uma vez que este trabalho utilizou os parâmetros da Equação D-A, a condutividade do leito, para um carvão inglês (CRISTOPH,1996), e o coeficiente de transferência de calor do fluido para o leito foi obtido em através de literatura (TAMAINOT-TELTO e CRISTOPH,1997), sugere-se:

- realização de experimentos para obtenção destes parâmetros para carvões ativados obtidos no mercado nacional.
- montar um experimento para validar o resultado das simulações.
- simular reatores de maior comprimento, considerando os gradientes de temperatura no sentido axial, para que se possa observar a influência do comprimento do reator e da adição de aletas na produção diária de gelo e no COP.

BIBLIOGRAFIA

1. *Barbosa, G.*, Modelagem e simulação de um refrigerador solar por adsorção física, Tese de mestrado da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, Campinas, 1993.
2. *Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N.*, Transport Phenomena, Wiley Inter. Ed., E.U.A., 1960.
3. *Bruns, R. E.; Scarminio, I. S.; Barros Neto, B.*, Planejamento e Otimização de Experimentos, Editora da Unicamp, 1996.
4. *Cerny, S.; Smiek, M.*, Active Carbon Manufacture Properties and Applications, Elsevier, New York, 1970.
5. *Cho, S.H.; Kim, J.N.*, Modelling of a silica gel/water adsorption-cooling system, Energy, Vol.17 n°9, 1992.
6. *Cleland, A.C.*, Computer subrotines for rapid evaluation of refrigerant thermodynamic properties, Int.J.Refrig., Vol 9, November, 1986.
7. *Cacciola, G.; Restuccia, G.*, Progress on adsorption heat pumps, Heat Recovery Systems & CHP, Vol.14, °4, 1994.
8. *Cristoph, R.E.*, Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling, Solar Energy, Vol.41, n°1, 1988.
9. *Cristoph, R.E.*, Activated carbon adsorption cycles for refrigeration and heat pumping, Carbon, Vol. 27, n°1, 1989.
10. *Cristoph, R.E.*, Ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling, Renewable Energy, Vol.5, 1994.
11. *Cristoph, R.E.*, Evaluation of alternative refrigerant-adsorbent pairs for refrigeration cycles, Applied Thermal Engineering, Vol.16, n° 11, 1996.
12. *Davies, R.A. ; Legros, E.F.*, Odor removal by adsorption on activated carbon. Filtration & Separation, May-June, 1986.
13. *Dubinin, M.M.*, Adsorption in micropores. Journal of colloid and interface science, Vol.23, 1967.

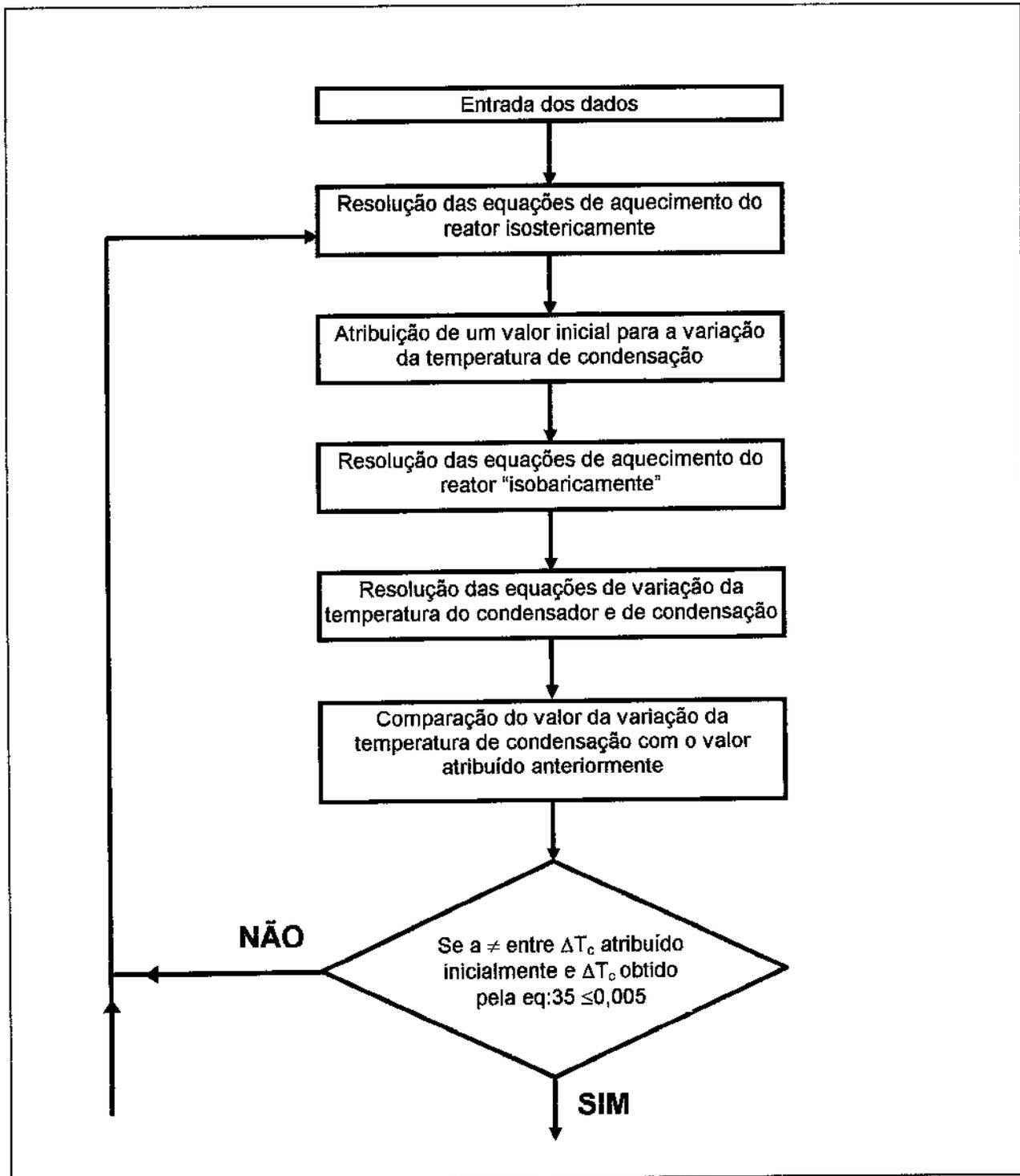
BIBLIOGRAFIA

14. *Guillemot, J. J., Meunier, F., Pakleza, J.*, Heat and mass transfer in a non-isothermal fixed bed solid adsorbent reactor: a uniform pressure-non-uniform temperature case, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 30, nº8, 1987.
15. *Holman, J.P.*, Transferência de Calor, Editora McGraw-Hill, 1983.
16. *Kajiyama, T.*, Levantamento da curva de equilíbrio termodinâmico do par carvão ativado C 119 (Carbomafra) e metanol. Tese de mestrado da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, Campinas , 1993.
17. *Karagiorgias, M.; Meunier, F.* , Etude de la relaxation d'un reacteur à zeolite pendant la desorption éclair provoquée par un échelon de pression, Chem. Eng. Journal, Vol.32 , 1986.
18. *Medini, N., Marmottant, B., El Golli, S., Grenier, Ph.*, Étude d'une machine solaire autonome à fabriquer de la glace, Rev. Int. Froid , Vol.14, Nov. 1991.
19. *Meunier, F.*, Refrigeration par adsorption, RGE, Dezembro de 1982.
20. *Meunier, F.*, Sorption solar cooling, Renewable Energy, Vol.5 part I, 1994.
21. *Perry, R.H.; Green, D.W.*, Perry's Chemical Engineers Handbook, 6° Ed. McGraw-Hill book Company, 1984.
22. *Pons, M.; Guillemot, J.J.*, Design of an experimental solar powered, solid-adsorption ice maker, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.108, 1986.
23. *Pons, M.; Grenier, P.* , A phenomenological adsorption equilibrium law extrated from experimental and theoretical considerations applied to the activated carbon + metanol pair, Carbon.24(5), 1986.
24. *Reid, R.C.; Prausnitz, J.M.; Sherwood, T.K.*, The Properties of Gases and Liquids. E.U.A., Mc Graw Hill Co., 1977.
25. *Rodrigues, M. B.*, Modelagem, simulação e controle de um processo contínuo de purificação de enzimas. Tese de doutorado da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, Campinas , 1993.
26. *Ruggiero, M. A. G.; Lopes, V. L. R.*, Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais, McGraw-Hill, SP, 1988.
27. *Ruthven, D.M.*, Principles of Adsorption and Dessorption Processes. Wiley, 1984.

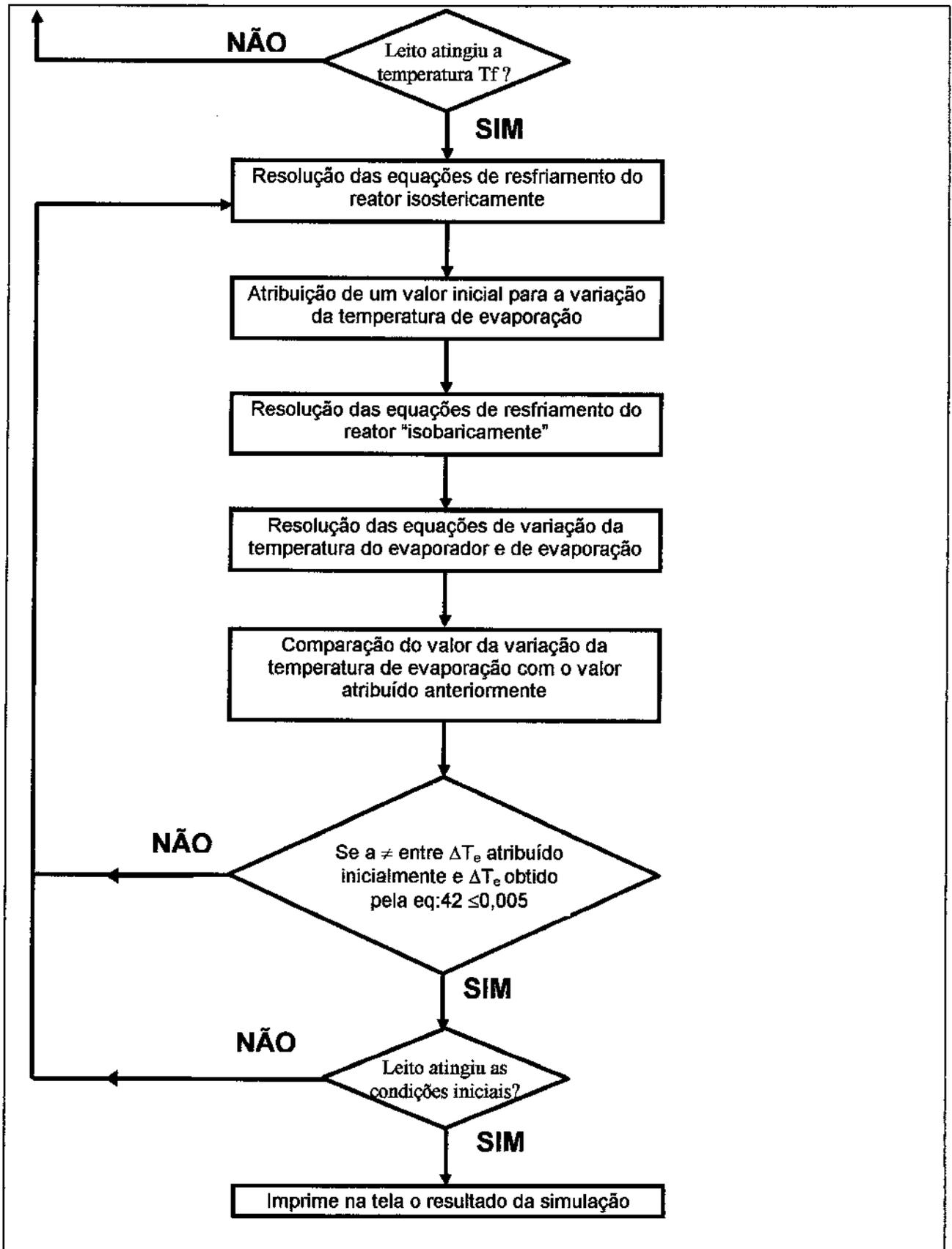
BIBLIOGRAFIA

28. *Silveira Jr, V.*, Montagem e teste de desempenho de um refrigerador solar por adsorção física com produção de gelo. Tese de mestrado da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, Campinas , 1990.
29. *Stoecker, W. F.; Jabardo, J. M.*, Refrigeração Industrial, Editora Edgard Blücher LTDA, 1994.
30. Strategy of Experimentation, Du Pont Company, 1988.
31. *Tamainot-Telto, Z., Cristoph, R. E.*, Adsorption refrigerator using monolithic carbon ammonia pair, Int. J. Refrig., Vol. 20, nº 2, 1997.
33. *Weast, R. C.*, Handbook of Chemistry and Physics. 67^a Ed. C.R.C.PressInc. , 1987.
34. *Wu, J. Y.; Teng, Y.; Wang, R. Z.*, Study of the fundamentals of adsorption systems, Applied Thermal Engineering, Vol. 17, nº 4, 1997.

APÊNDICE I



Fluxograma de resolução das equações do modelo matemático



APÊNDICE II

Planejamento experimental fatorial Plackett-Burman

Ensaio	Temperatura do ar	Temperatura do fluido de aquecimento	Temperatura do fluido de refriamento	Vazão do fluido de aquecimento
01	1	-1	1	-1
02	1	1	-1	1
03	-1	1	1	-1
04	1	-1	1	1
05	1	1	-1	1
06	1	1	1	-1
07	-1	1	1	1
08	-1	-1	1	1
09	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	-1
11	-1	1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1

O nível assumido para cada uma das variáveis independentes, nos 12 ensaios do planejamento experimental fatorial Plackett-Burman.

APÊNDICE II

Ensaio	Diferença entre a temperatura final do leito e o fluido de aquecimento	Espessura do leito	Densidade do leito	Área de condensação
01	-1	-1	1	1
02	-1	-1	-1	1
03	1	-1	-1	-1
04	-1	1	-1	-1
05	1	-1	1	-1
06	1	1	-1	1
07	-1	1	1	-1
08	1	-1	1	1
09	1	1	-1	1
10	1	1	1	-1
11	-1	1	1	1
12	-1	-1	-1	-1

O nível assumido para cada uma das variáveis independentes, nos 12 ensaios do planejamento experimental fatorial Plackett-Burman.

Planejamento experimental fatorial completo

Ensaio	Temperatura do ar	Temperatura do fluido de aquecimento	Espessura do leite	Densidade do leite
01	1	1	1	1
02	1	1	1	-1
03	1	1	-1	1
04	1	1	-1	-1
05	1	-1	1	1
06	1	-1	1	-1
07	1	-1	-1	1
08	1	-1	-1	-1
09	-1	1	1	1
10	-1	1	1	-1
11	-1	1	-1	1
12	-1	1	-1	-1
13	-1	-1	1	1
14	-1	-1	1	-1
15	-1	-1	-1	1
16	-1	-1	-1	-1
17	-1,48	0	0	0
18	1,48	0	0	0
19	0	-1,48	0	0
20	0	1,48	0	0
21	0	0	-1,48	0
22	0	0	1,48	0
23	0	0	0	-1,48
24	0	0	0	1,48
25	0	0	0	0

O nível assumido para cada uma das variável independentes, nos 16 ensaios do planejamento experimental fatorial completo e nos 9 ensaios complementares.

APÊNDICE III

Resultado completo dos ensaios 01 à 06 do planejamento experimental Plackett-Burman

Ensaio	01	02	03	04	05	06
Calor retirado pelo evaporador (kJ kg^{-1} adsorvente)	14,45	152,20	140,88	20,12	142,49	96,73
Potência do evaporador (W kg^{-1} adsorvente)	0,63	3,43	3,52	0,13	4,97	0,49
Potência para aquecer o reator (W kg^{-1} adsorvente)	7,44	10,93	13,11	1,11	20,65	2,57
Potência para resfriar o reator (W kg^{-1} adsorvente)	3,97	8,45	8,38	0,64	12,34	1,35
COP	0,085	0,313	0,269	0,118	0,241	0,190

Temperatura média inicial do leito ($^{\circ}\text{C}$)	20,0	35,0	35,0	35,0	20,0	35,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico" ($^{\circ}\text{C}$)	50,3	66,8	50,4	66,9	51,5	67,3
Temperatura média no fim da dessorção ($^{\circ}\text{C}$)	115,0	75,0	110,0	75,0	110,0	110,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção ($^{\circ}\text{C}$)	35,1	35,2	15,4	35,1	35,8	35,1
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico" ($^{\circ}\text{C}$)	90,7	66,2	110,0	68,1	84,6	101,9
Temperatura média no fim da adsorção ($^{\circ}\text{C}$)	20,0	35,0	35,0	35,0	20,0	35,0
Temperatura da amônia no fim da adsorção ($^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

APÊNDICE III

Ensaio	01	02	03	04	05	06
Uptake inicial (kg kg⁻¹_{adsorvente})	0,166	0,206	0,162	0,166	0,206	0,166
Uptake no início da dessorção (kg kg⁻¹_{adsorvente})	0,166	0,078	0,060	0,166	0,203	0,165
Uptake no fim da dessorção (kg kg⁻¹_{adsorvente})	0,148	0,830	0,166	0,148	0,087	0,086
Massa de amônia dessorvida (kg)	0,17	0,08	0,67	0,41	1,10	1,84
Uptake no início do resfriamento (kg kg⁻¹_{adsorvente})	0,148	0,081	0,060	0,148	0,087	0,086
Uptake no início da adsorção (kg kg⁻¹_{adsorvente})	0,151	0,202	0,060	0,149	0,091	0,088
Uptake no fim da adsorção (kg kg⁻¹_{adsorvente})	0,163	0,801	0,173	0,166	0,204	0,166
Massa de amônia adsorvida (kg)	0,11	6,60	0,74	0,38	1,07	1,81
Massa de carvão (kg)	9,41	6,60	6,60	23,23	9,41	23,23

Tempo de aquecimento "isostérico" (minutos)	3	33	0	168	2	18
Tempo de dessorção (minutos)	633	202	414	1407	316	1848
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	4	33	0	169	3	18
Tempo de adsorção (minutos)	736	349	666	2399	475	3282
Tempo de processo (minutos)	1377	617	1081	4143	796	5166
Número de interações	11771	2189	1749	17392	840	5216

Resultado completo dos ensaios 07 à 12 do planejamento experimental Plackett-Burman.

Ensaio	07	08	09	10	11	12
Calor retirado pelo evaporador (kJ kg⁻¹ adsorvente)	147,67	64,43	116,35	56,31	197,62	127,85
Potência do evaporador (W kg⁻¹ adsorvente)	1,28	3,00	0,64	0,49	1,52	3,01
Potência para aquecer o reator (W kg⁻¹ adsorvente)	3,42	13,96	2,37	3,09	3,85	7,78
Potência para resfriar o reator (W kg⁻¹ adsorvente)	3,06	7,20	1,40	1,47	3,46	6,65
COP	0,375	0,215	0,268	0,159	0,395	0,386

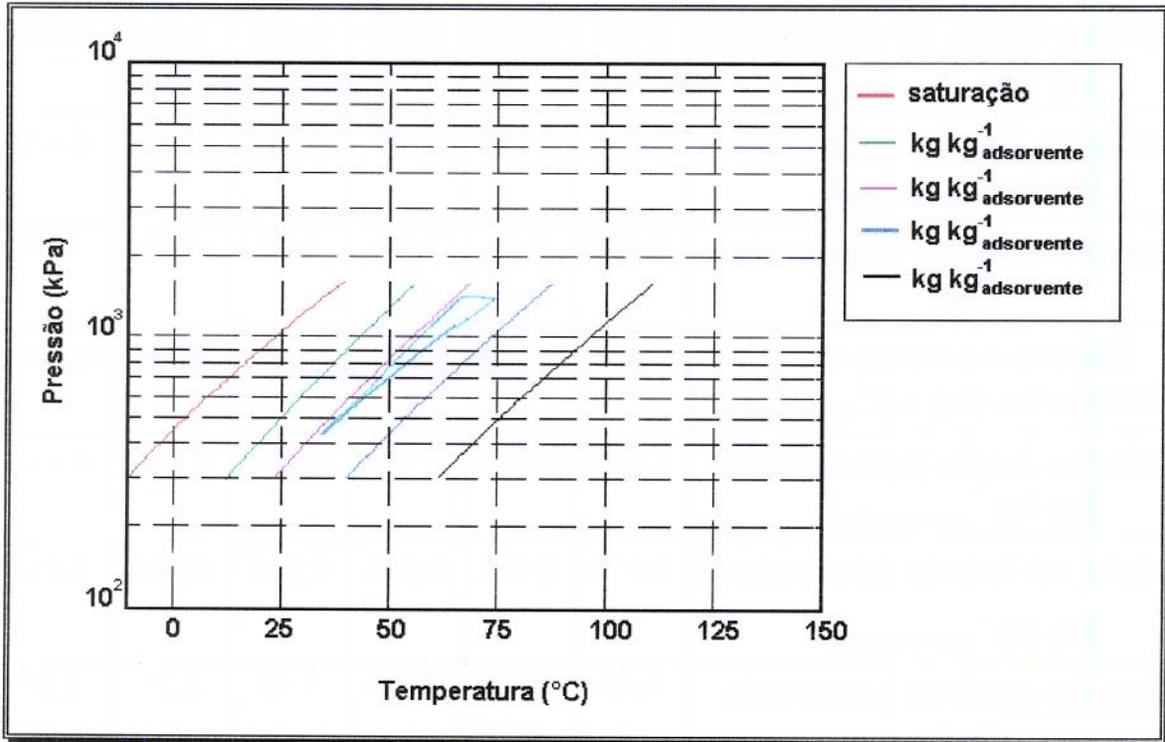
Temperatura média inicial do leito (°C)	35,0	35,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico" (°C)	50,7	49,9	33,8	50,1	35,3	34,3
Temperatura média no fim da dessorção (°C)	115,0	70,0	70,0	70,0	115,0	75,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção (°C)	15,3	15,5	15,2	35,6	15,1	15,2
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico" (°C)	115,0	70,0	70,0	49,2	115,0	75,0
Temperatura média no fim da adsorção (°C)	35,9	35,0	20,0	20,0	21,6	20,0

APÊNDICE III

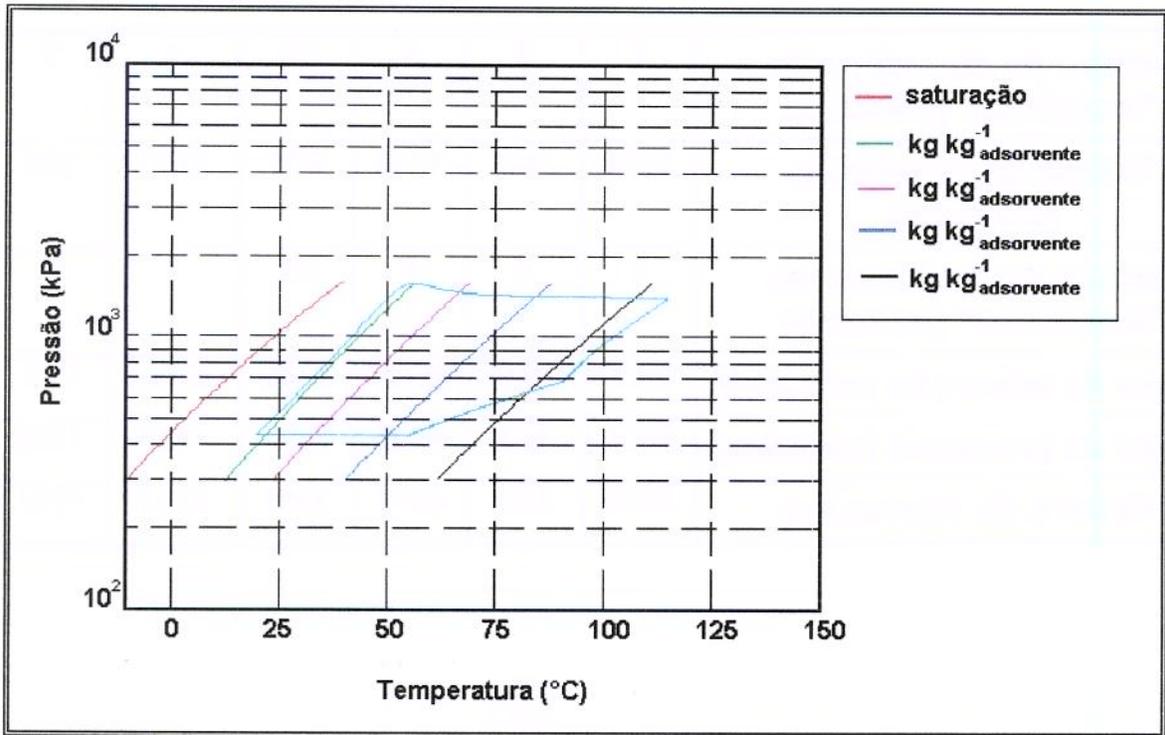
Ensaio	07	08	09	10	11	12
Uptake inicial (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,166	0,166	0,206	0,206	0,206	0,206
Uptake no início da dessorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,164	0,165	0,205	0,206	0,204	0,204
Uptake no fim da dessorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,056	0,122	0,121	0,160	0,056	0,112
Massa de amônia dessorvida (kg)	3,59	0,41	1,96	1,53	4,91	0,61
Uptake no início do resfriamento (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,056	0,122	0,121	0,160	0,056	0,112
Uptake no início da adsorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,056	0,122	0,121	0,161	0,056	0,112
Uptake no fim da adsorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,173	0,173	0,214	0,206	0,213	0,214
Massa de amônia adsorvida (kg)	3,89	0,48	2,15	1,48	5,21	0,67
Massa de carvão (kg)	33,12	9,41	23,23	33,12	33,12	6,60

Tempo de aquecimento "isostérico" (minutos)	2	2	6	28	1	2
Tempo de dessorção (minutos)	1709	168	1743	955	1961	582
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	2	2	6	35	1	2
Tempo de adsorção (minutos)	1918	356	3050	1880	2166	707
Tempo de processo (minutos)	3631	528	4805	2898	4129	1293
Número de interações	3635	890	4817	3381	4133	1297

Gráficos de Clapeyron para os 12 ensaios do planejamento experimental Plackett-Burman.

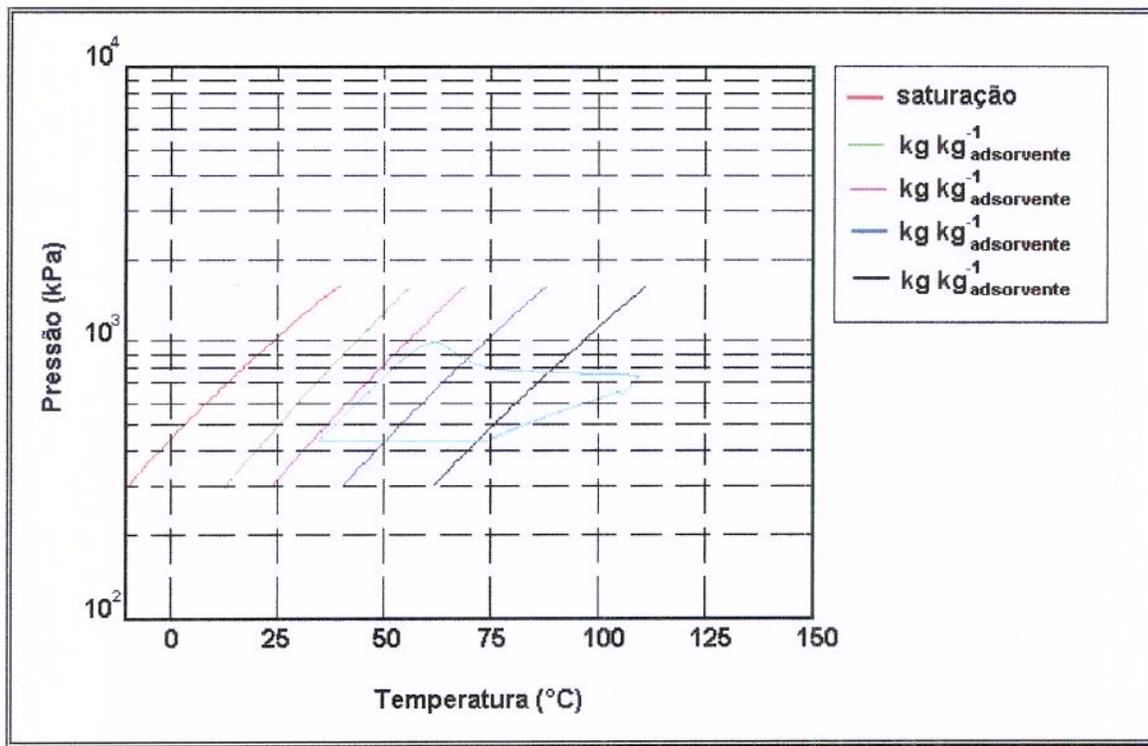


ENSAIO 01

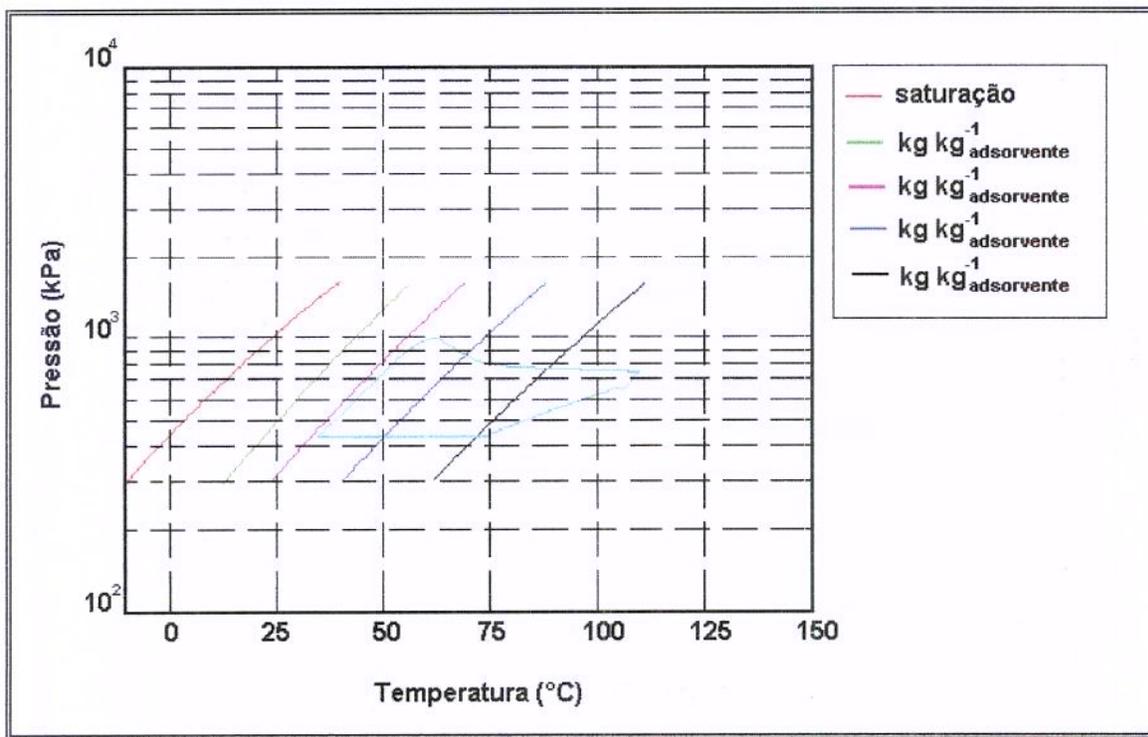


ENSAIO 02

APÊNDICE III

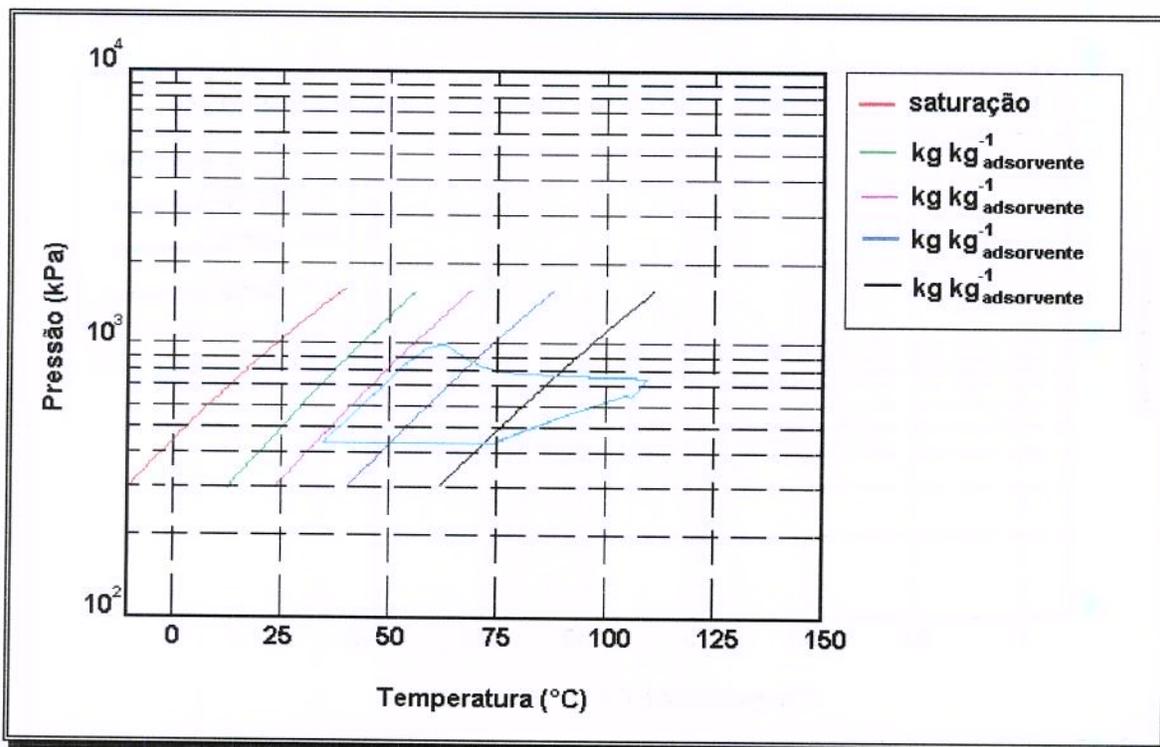


ENSAIO 03

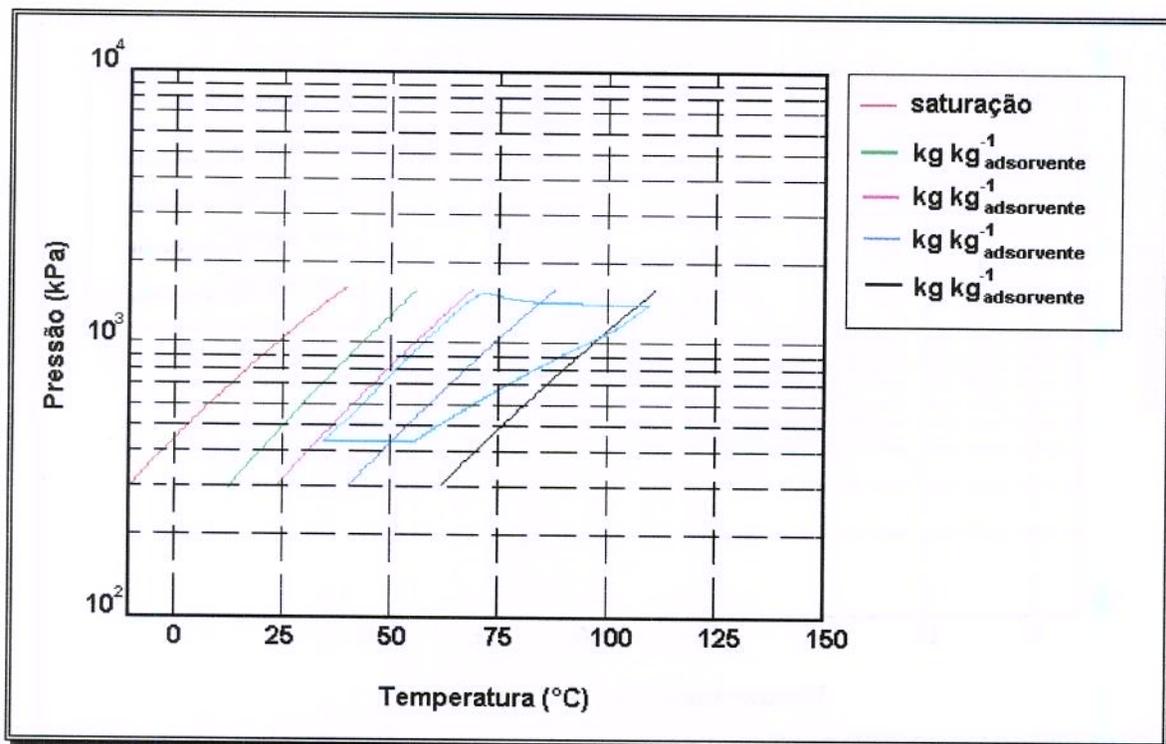


ENSAIO 04

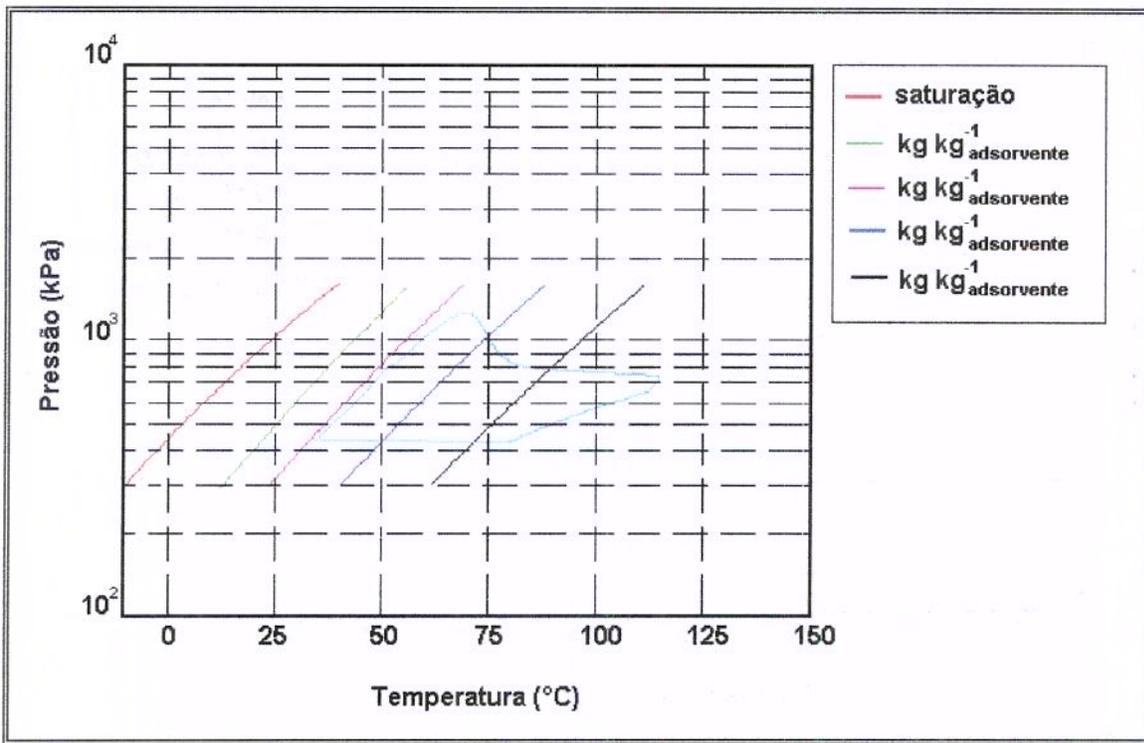
APÊNDICE III



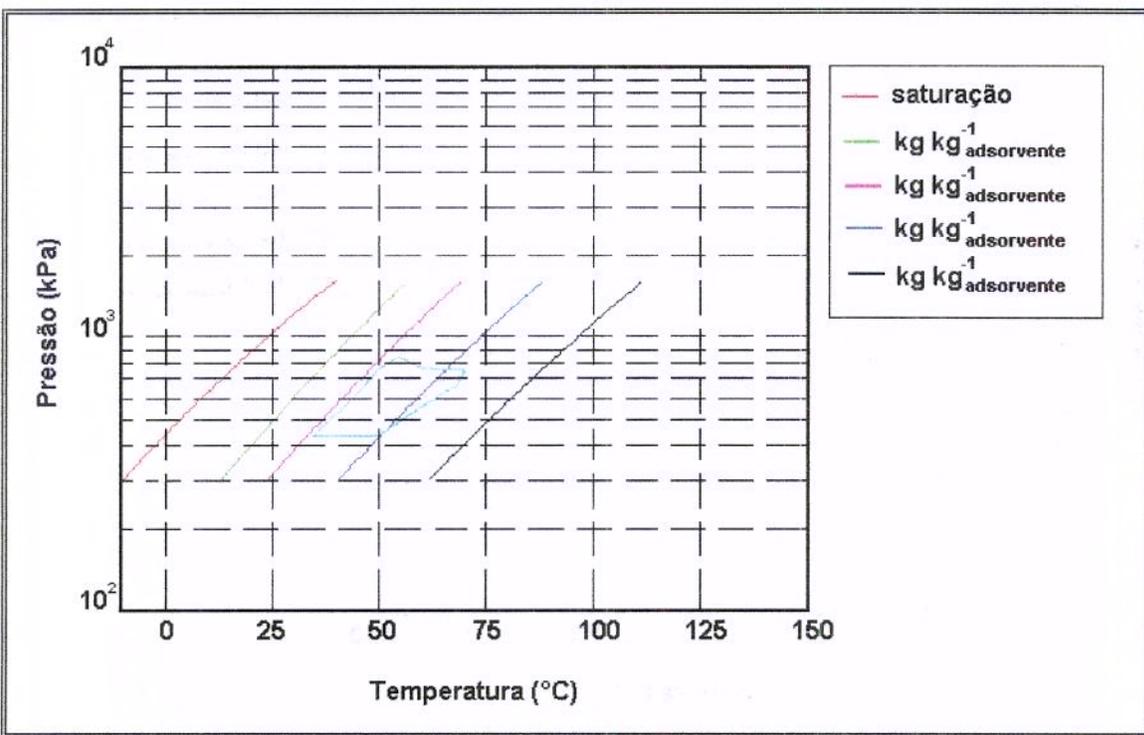
ENSAIO 05



ENSAIO 06

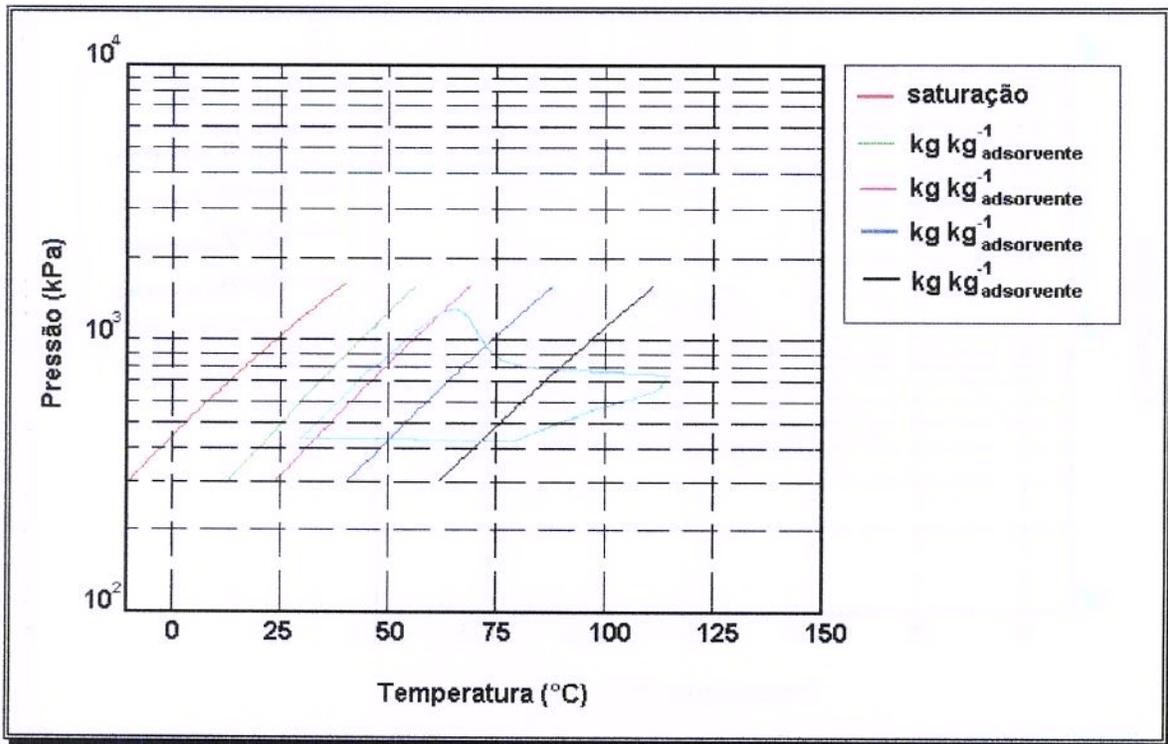


ENSAIO 07

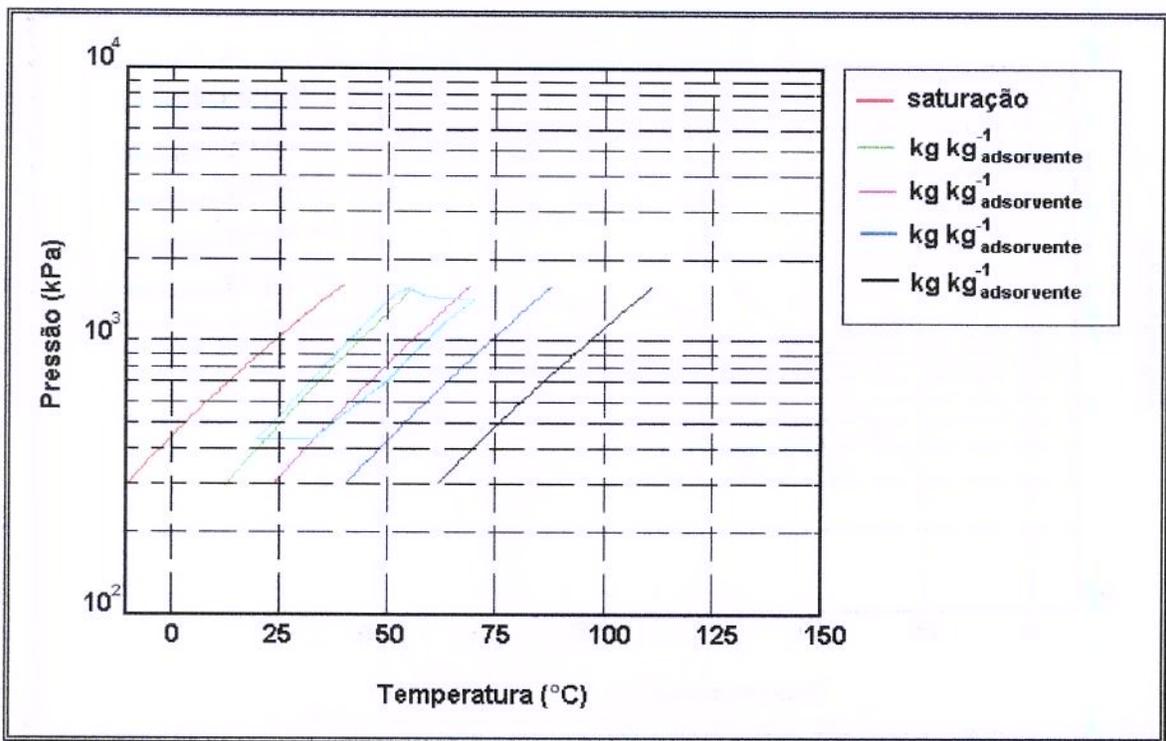


ENSAIO 08

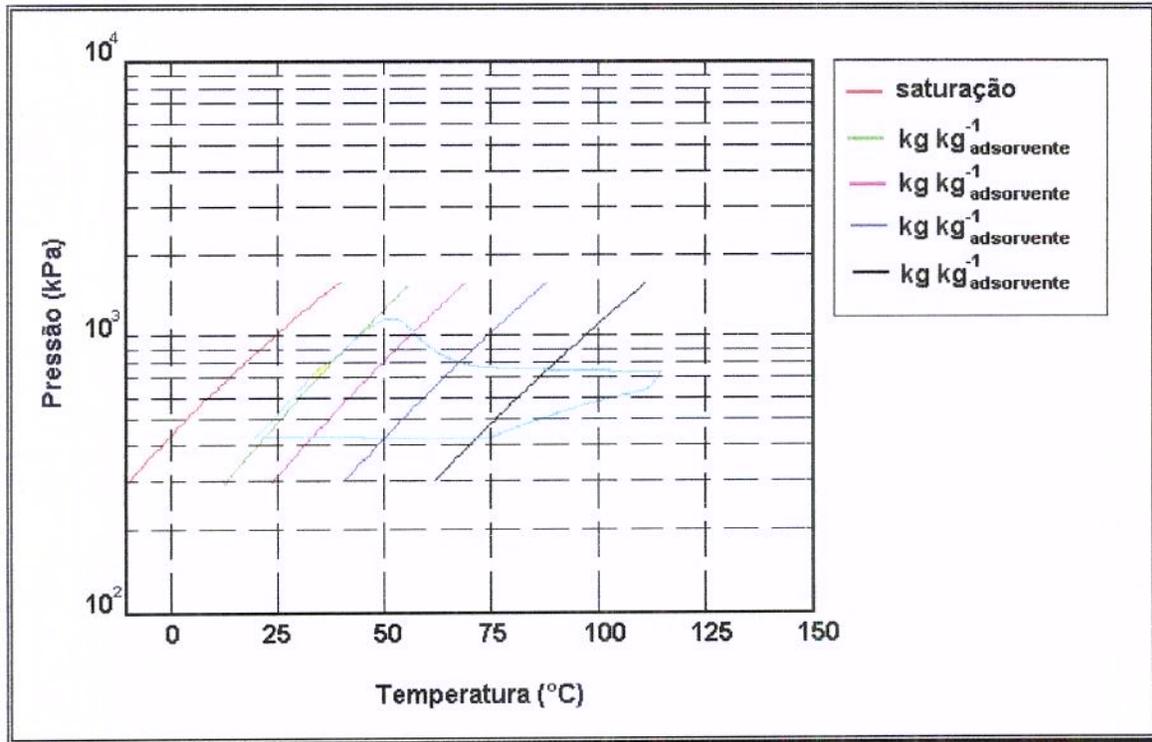
APÊNDICE III



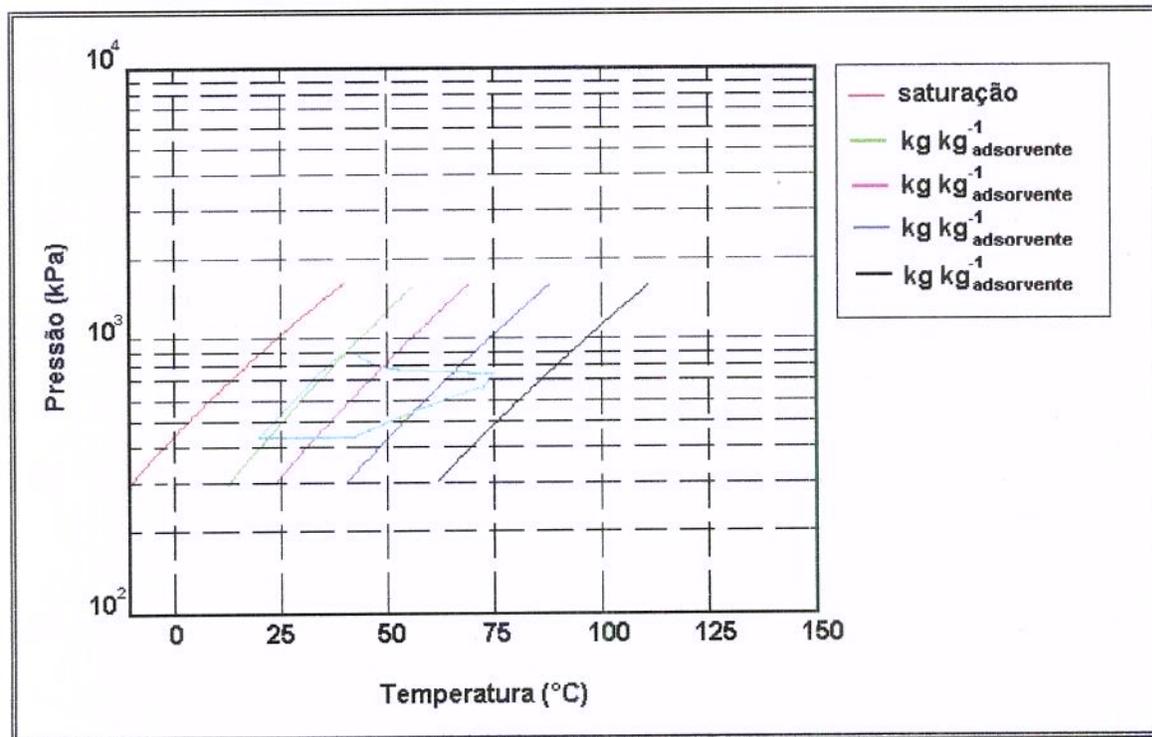
ENSAIO 09



ENSAIO 10



ENSAIO 11



ENSAIO 12

APÊNDICE IV

Resultado completo dos ensaios 01 à 08 do planejamento experimental fatorial completo.

Ensaio	01	02	03	04	05	06	07	08
Calor retirado pelo evaporador (kJ kg ⁻¹ _{adsorvente})	121,67	121,71	112,63	116,44	8,62	9,17	6,40	7,23
Potência do evaporador (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,88	0,59	3,67	2,47	0,09	0,07	0,32	0,25
Potência para aquecer o reator (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	3,02	2,08	14,11	9,61	1,52	1,05	7,09	4,75
Potência para resfriar o reator (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	2,30	1,55	9,96	6,71	0,76	0,55	3,65	2,52
COP	0,292	0,283	0,260	0,257	0,057	0,062	0,045	0,052

Temperatura média inicial do leite (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico" (°C)	61,7	61,6	61,7	61,8	61,3	61,3	61,2	61,3
Temperatura média no fim da dessorção (°C)	115,0	115,0	115,0	115,0	65,0	65,0	65,0	65,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção (°C)	35,3	35,1	35,4	35,2	35,3	35,1	35,4	35,2
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico" (°C)	101,9	102,2	99,3	100,6	53,9	54,1	53,2	53,5
Temperatura média no fim da adsorção (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0

APÊNDICE IV

Ensaio	01	02	03	04	05	06	07	08
Uptake inicial (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Uptake no início da dessorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,178	0,178	0,177	0,177	0,179	0,179	0,179	0,179
Uptake no fim da dessorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,079	0,079	0,079	0,079	0,171	0,171	0,171	0,171
Massa de amônia dessorvida (kg)	3,28	2,30	0,92	0,65	0,27	0,19	0,08	0,06
Uptake no início do resfriamento (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,079	0,079	0,079	0,079	0,171	0,171	0,171	0,171
Uptake no início da adsorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,080	0,080	0,082	0,081	0,172	0,171	0,173	0,172
Uptake no fim da adsorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,178	0,178	0,173	0,176	0,179	0,179	0,178	0,178
Massa de amônia adsorvida (kg)	3,23	2,28	0,86	0,63	0,23	0,17	0,05	0,04
Massa de carvão (kg)	33,12	23,23	9,41	6,60	33,12	23,23	9,41	6,60

Tempo de aquecimento "isostérico" (minutos)	10	15	3	5	261	396	63	99
Tempo de dessorção (minutos)	1910	2760	405	593	606	869	122	180
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	10	17	3	5	265	403	65	101
Tempo de adsorção (minutos)	2292	3424	509	780	1387	1938	268	389
Tempo de processo (minutos)	4222	6216	920	1383	2519	3606	518	769
Número de interações	4287	6321	928	1395	11518	16444	20273	29870

APÊNDICE IV

Resultado completo dos ensaios 09 à 16 do planejamento experimental fatorial completo.

Ensaio	09	10	11	12	13	14	15	16
Calor retirado pelo evaporador (kJ kg ⁻¹ _{adsorvente})	163,93	164,49	168,79	163,55	68,08	67,98	68,12	67,84
Potência do evaporador (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	1,33	0,84	5,73	3,60	0,62	0,42	2,85	1,84
Potência para aquecer o reator (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	3,51	2,41	16,29	11,09	1,86	1,28	8,43	5,69
Potência para resfriar o reator (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	3,11	1,96	13,53	8,63	1,45	0,98	6,70	4,36
COP	0,378	0,346	0,352	0,325	0,334	0,328	0,338	0,324

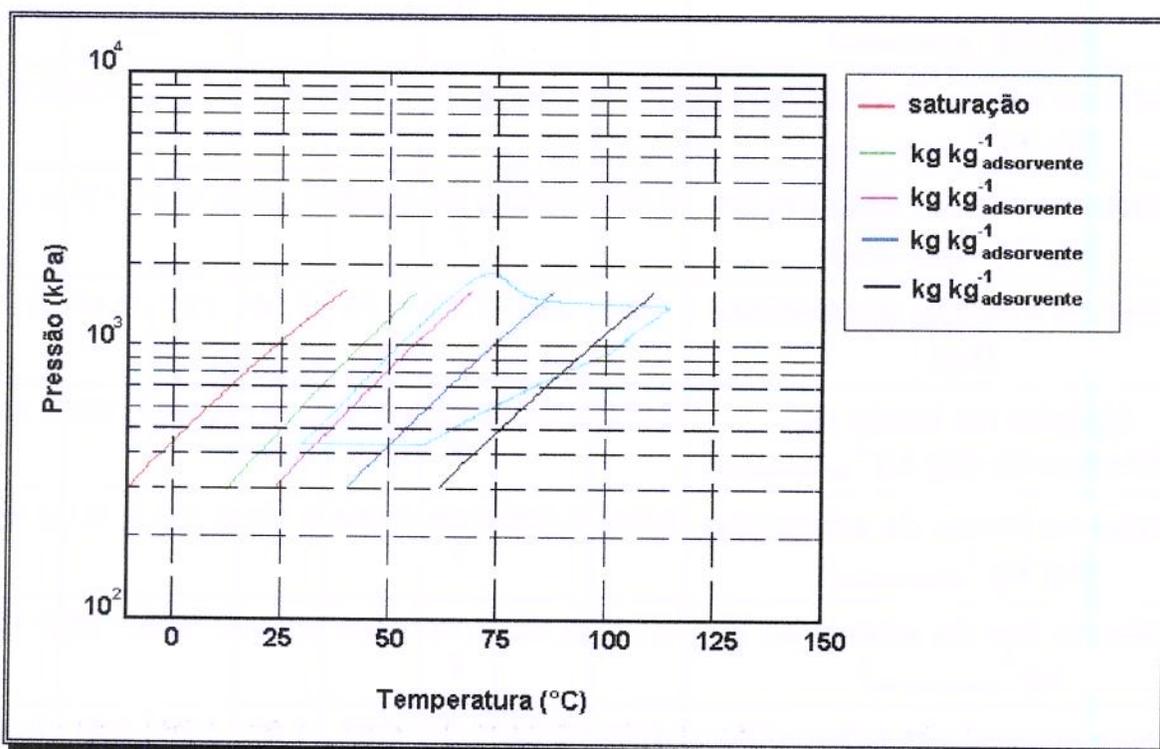
Temperatura média inicial do leito (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico" (°C)	45,4	44,3	48,0	46,2	43,9	43,9	44,2	44,3
Temperatura média no fim da dessorção (°C)	115,0	115,0	115,0	115,0	65,0	65,0	65,0	65,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção (°C)	15,3	15,1	15,4	15,2	15,3	15,2	15,5	15,2
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico" (°C)	115,0	115,0	115,0	115,0	65,0	65,0	65,0	65,0
Temperatura média no fim da adsorção (°C)	31,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0

APÊNDICE IV

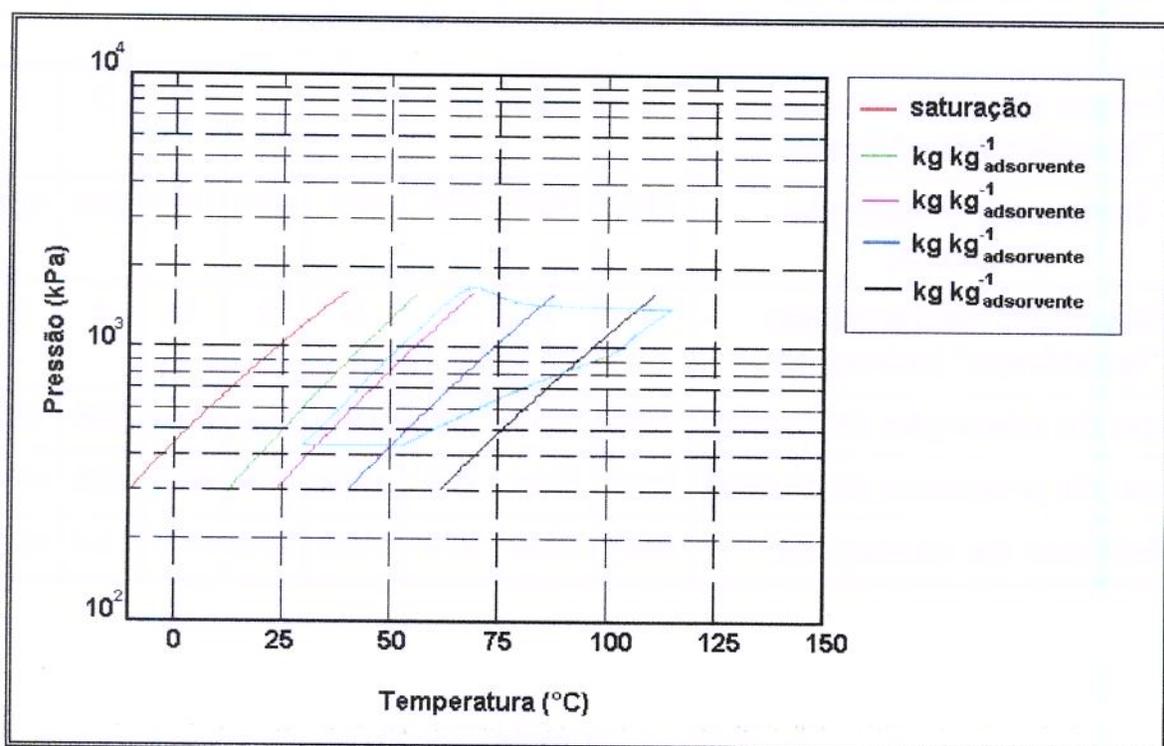
Ensaio	09	10	11	12	13	14	15	16
Uptake inicial (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179
Uptake no início da dessorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,177	0,177	0,174	0,175	0,179	0,179	0,178	0,178
Uptake no fim da dessorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,056	0,055	0,057	0,056	0,131	0,131	0,131	0,131
Massa de amônia dessorvida (kg)	4,02	2,84	1,10	0,79	1,58	1,11	0,44	0,31
Uptake no início do resfriamento (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,056	0,055	0,057	0,056	0,131	0,131	0,131	0,131
Uptake no início da adsorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,056	0,055	0,057	0,056	0,131	0,131	0,131	0,131
Uptake no fim da adsorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,186	0,186	0,192	0,187	0,185	0,185	0,186	0,185
Massa de amônia adsorvida (kg)	4,32	3,04	1,27	0,87	1,80	1,26	0,51	0,36
Massa de carvão (kg)	33,12	23,23	9,41	6,60	33,12	23,23	9,41	6,60

Tempo de aquecimento "isostérico" (minutos)	2	2	0	0	9	14	3	5
Tempo de dessorção (minutos)	1827	2647	386	567	1351	1970	293	435
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	2	2	0	0	9	14	3	5
Tempo de adsorção (minutos)	2056	3283	491	757	1821	2694	396	609
Tempo de processo (minutos)	3887	5934	877	1324	3190	4692	695	1054
Número de interações	3891	5940	879	1326	3209	4722	1101	1679

Gráficos de Clapeyron para os 16 ensaios do planejamento experimental fatorial completo.

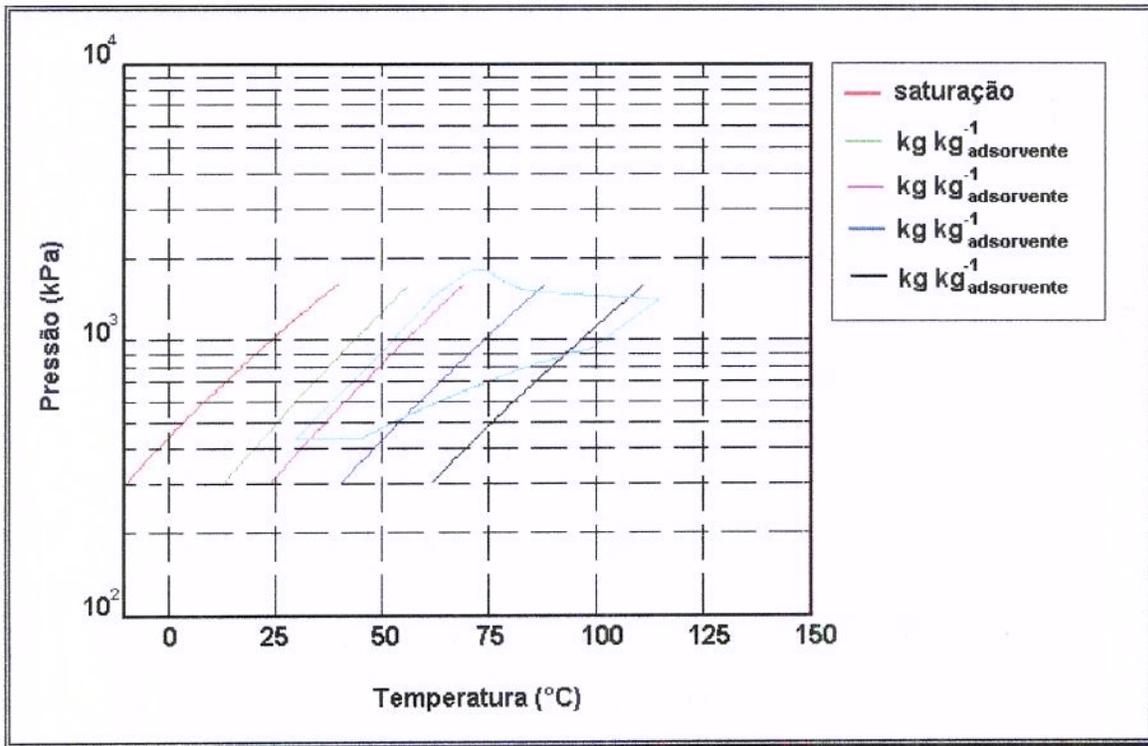


ENSAIO 01

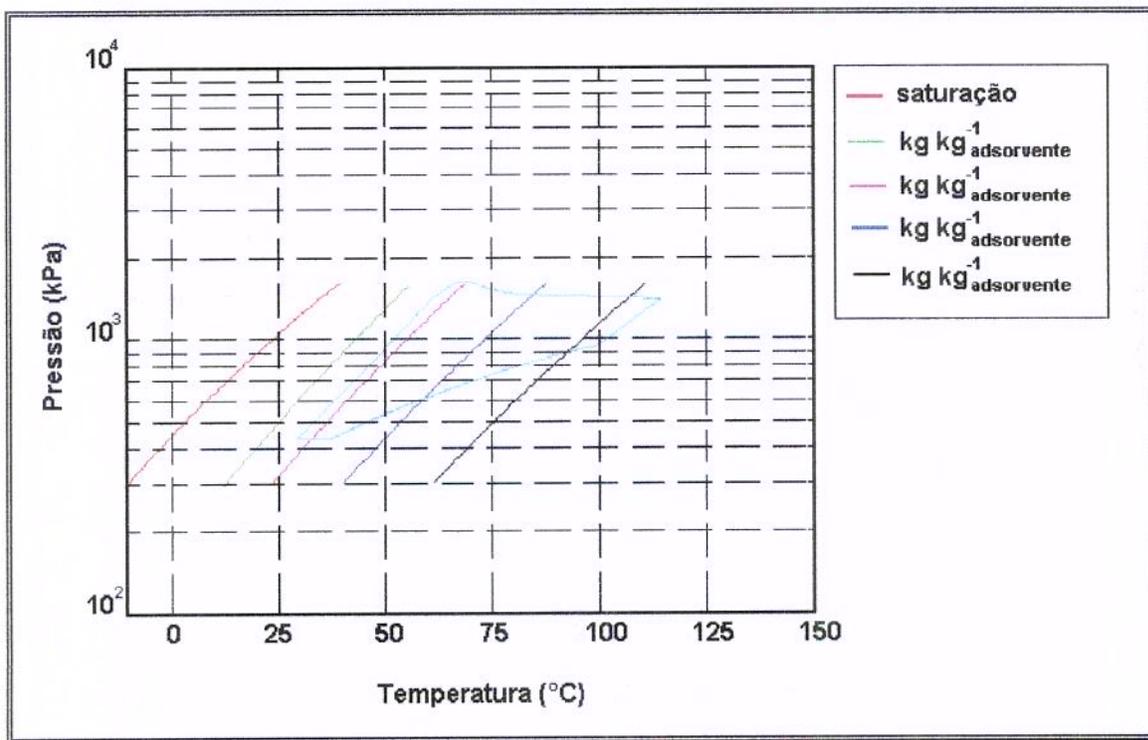


ENSAIO 02

APÊNDICE IV

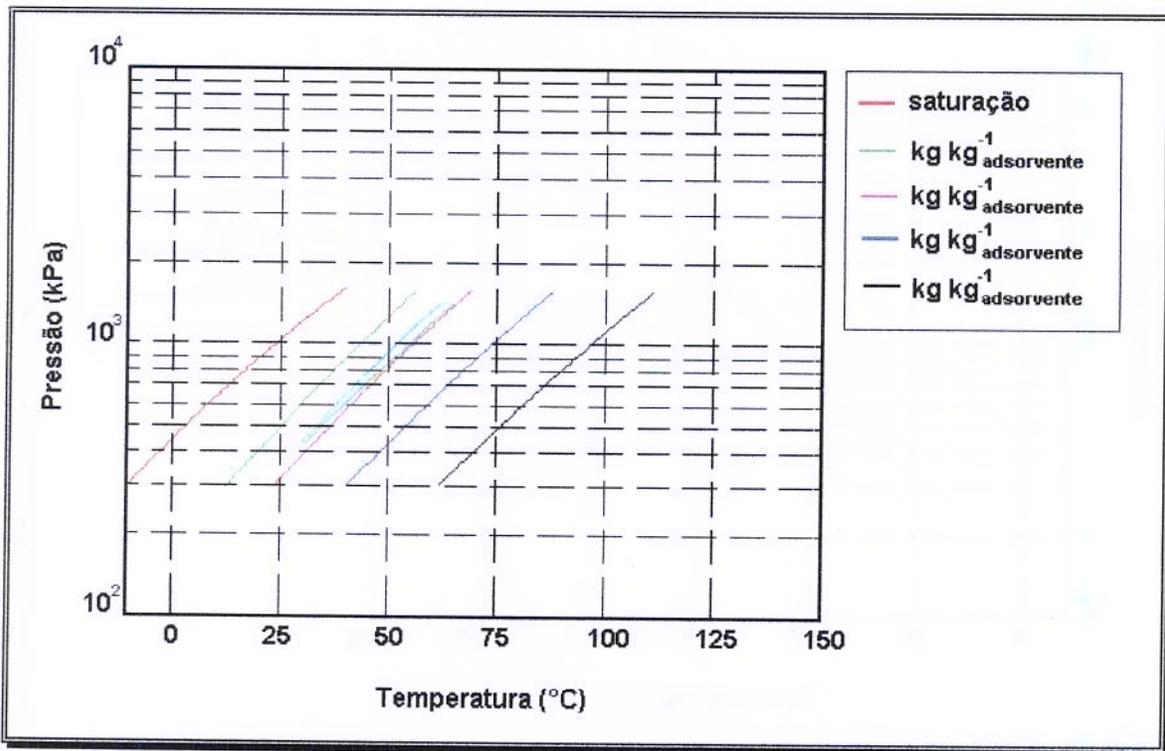


ENSAIO 03

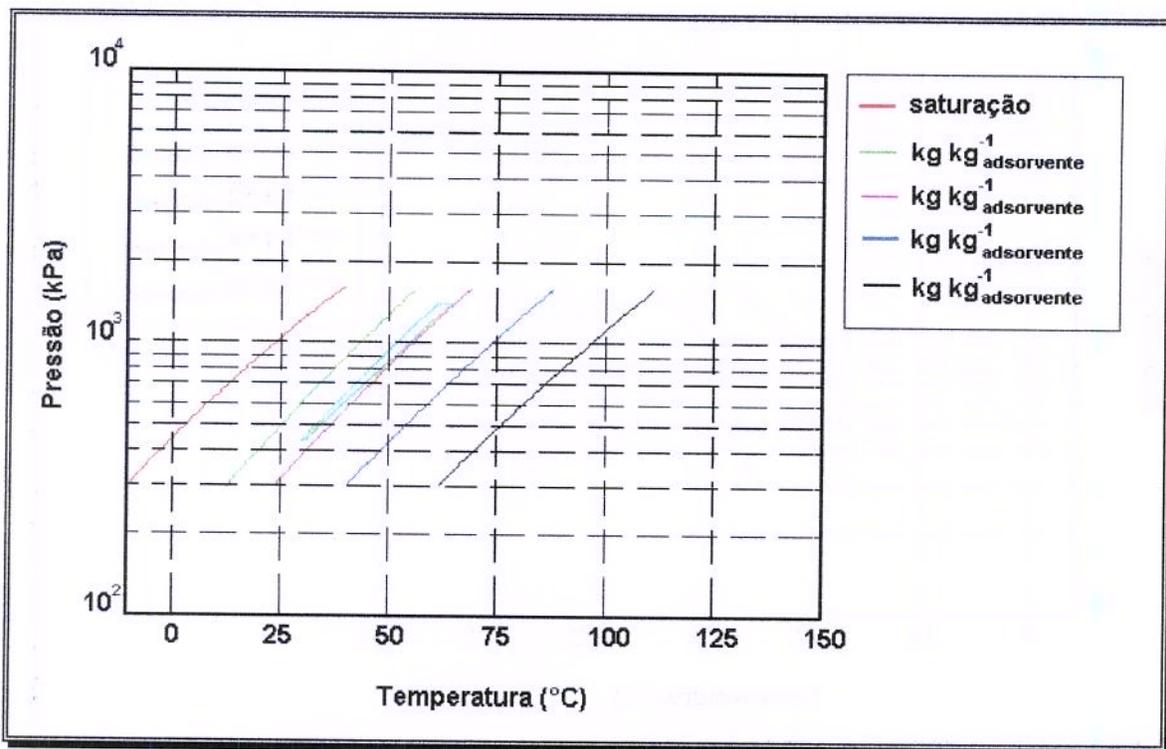


ENSAIO 04

APÊNDICE IV

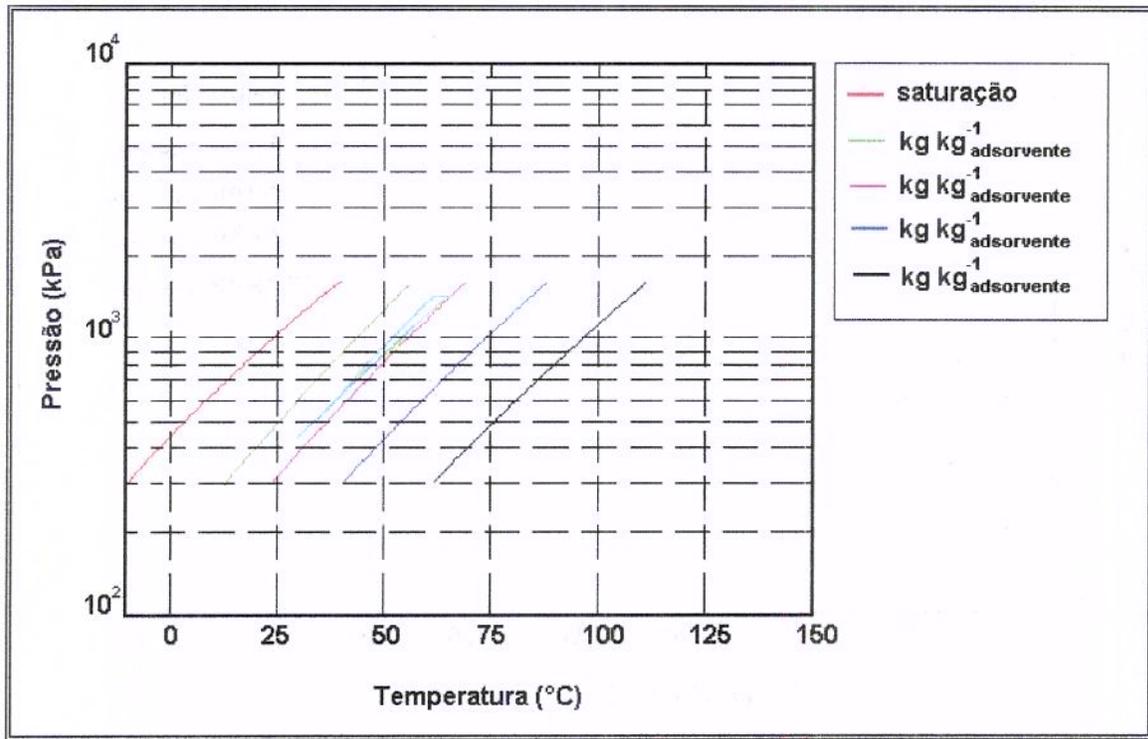


ENSAIO 05

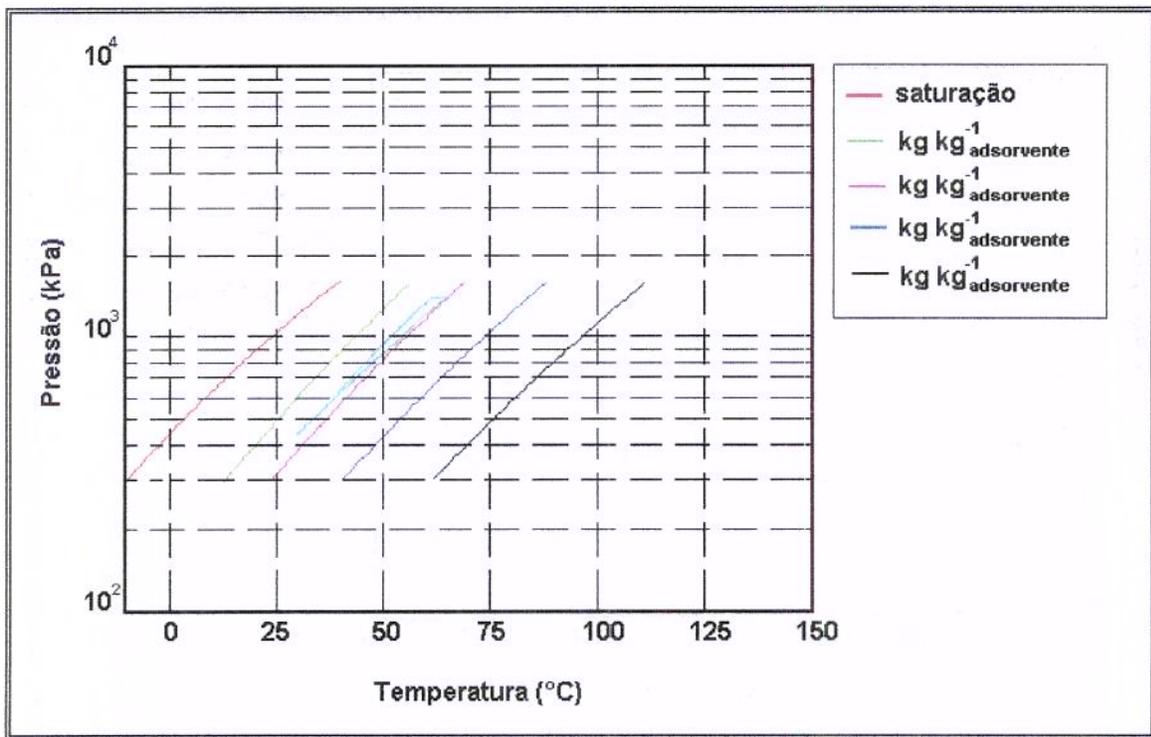


ENSAIO 06

APÊNDICE IV

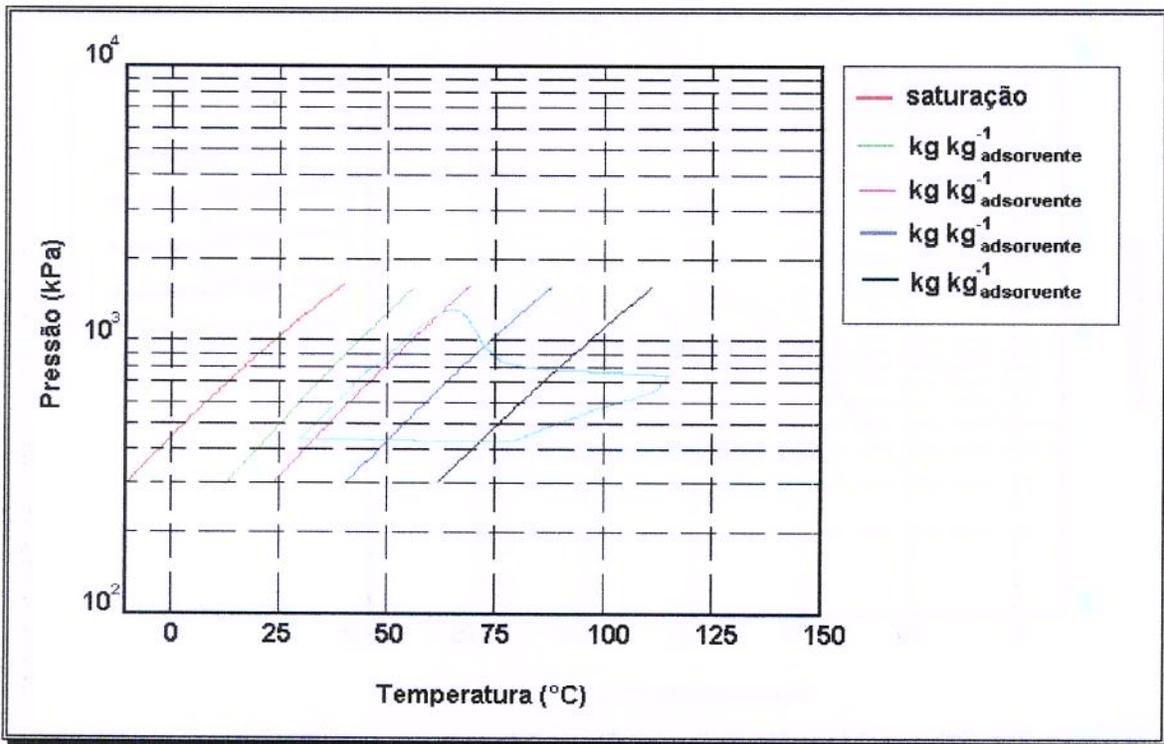


ENSAIO 07

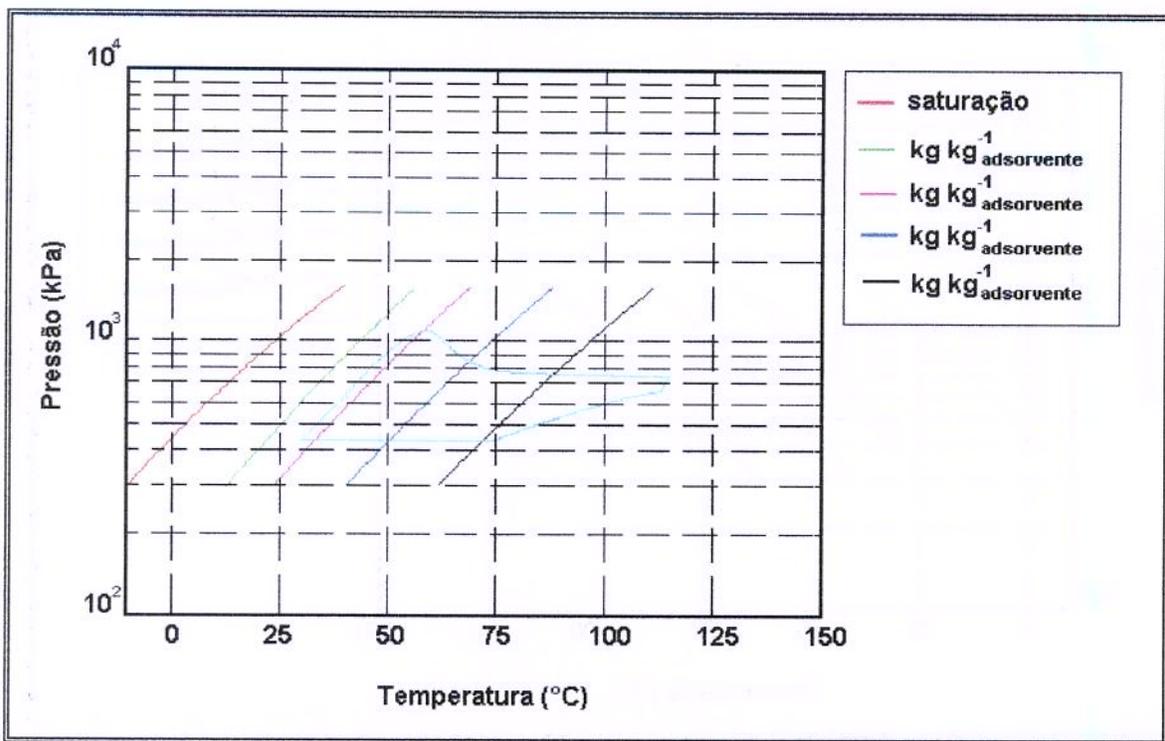


ENSAIO 08

APÊNDICE IV

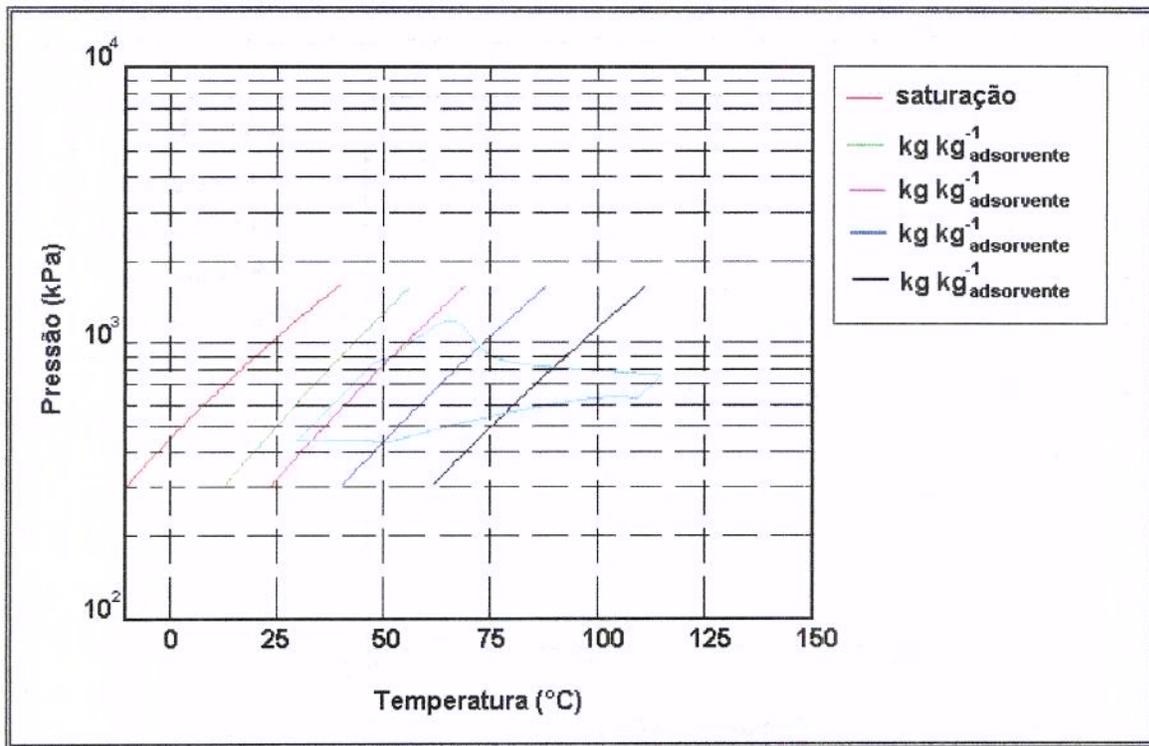


ENSAIO 09

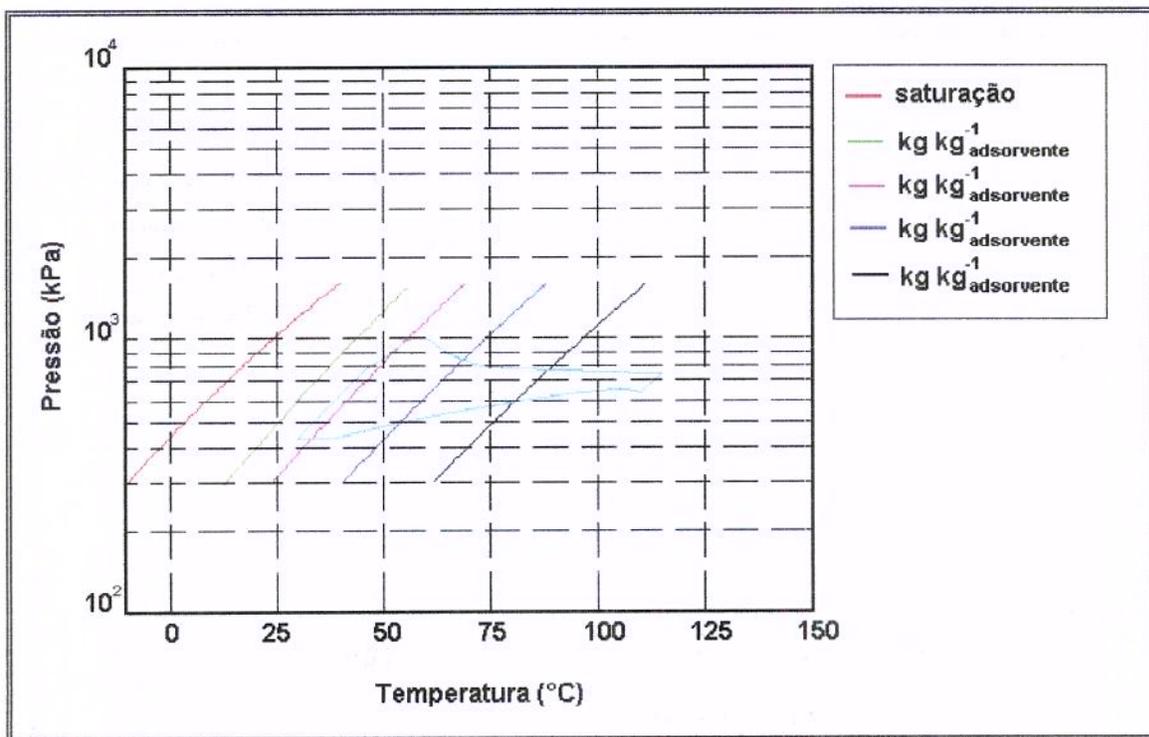


ENSAIO 10

APÊNDICE IV

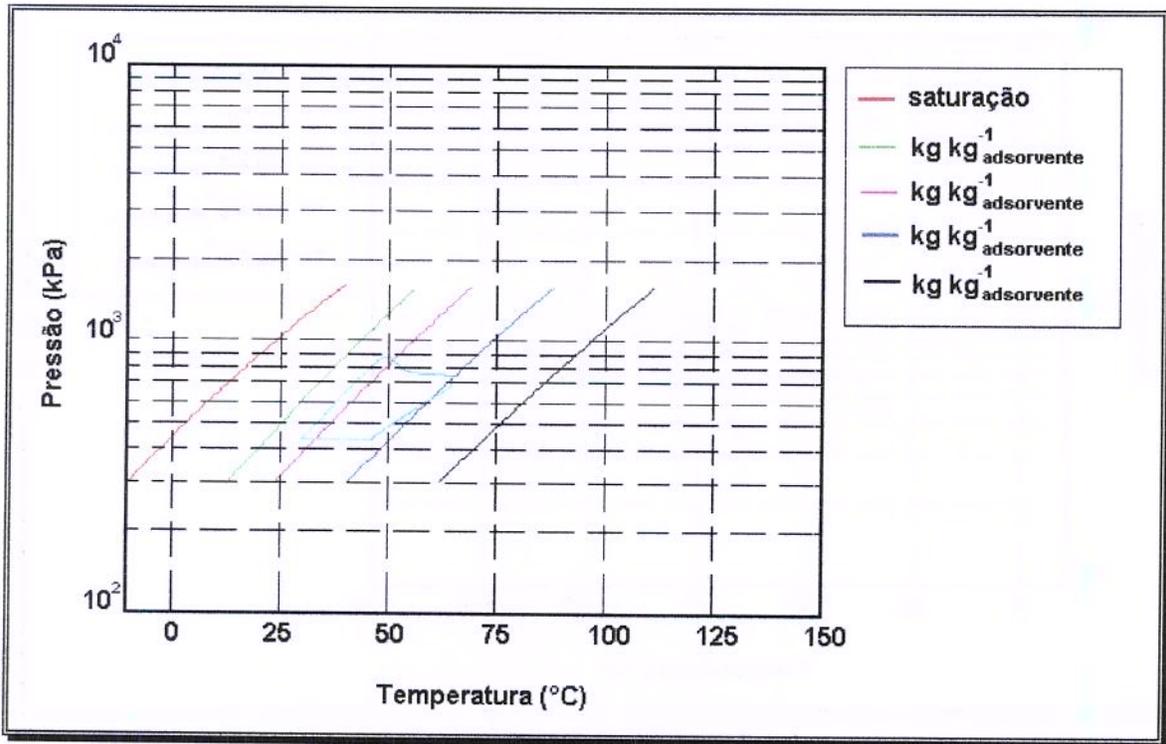


ENSAIO 11

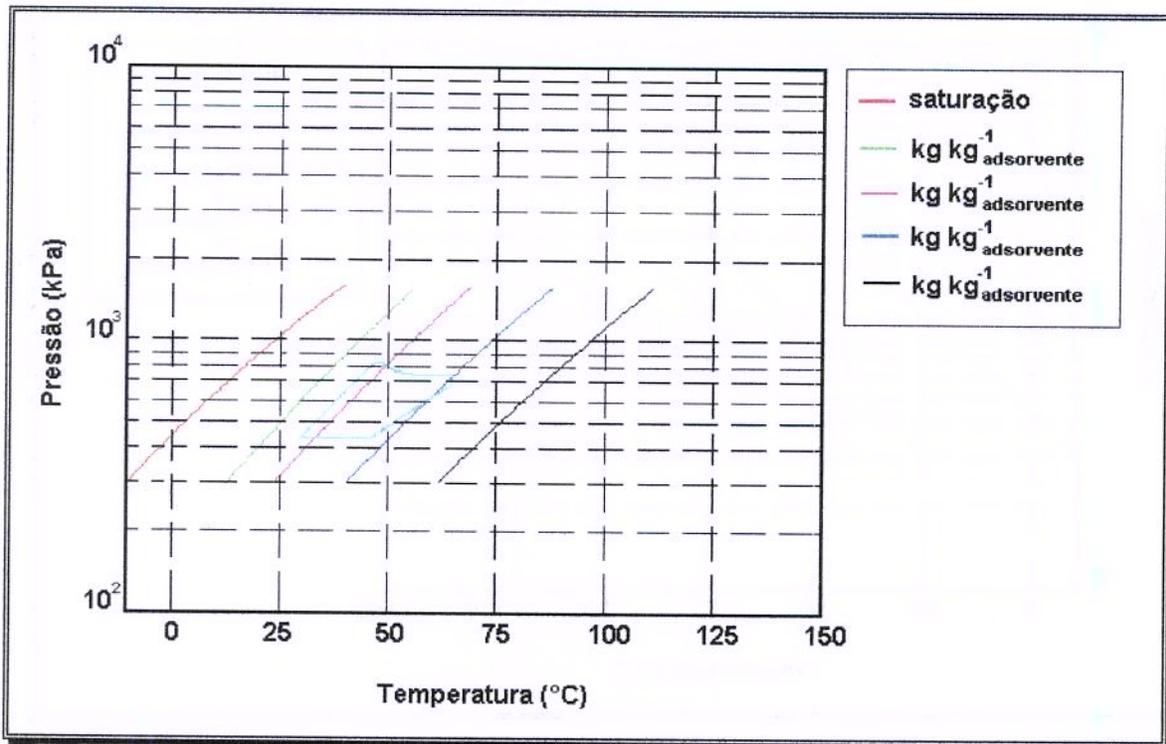


ENSAIO 12

APÊNDICE IV

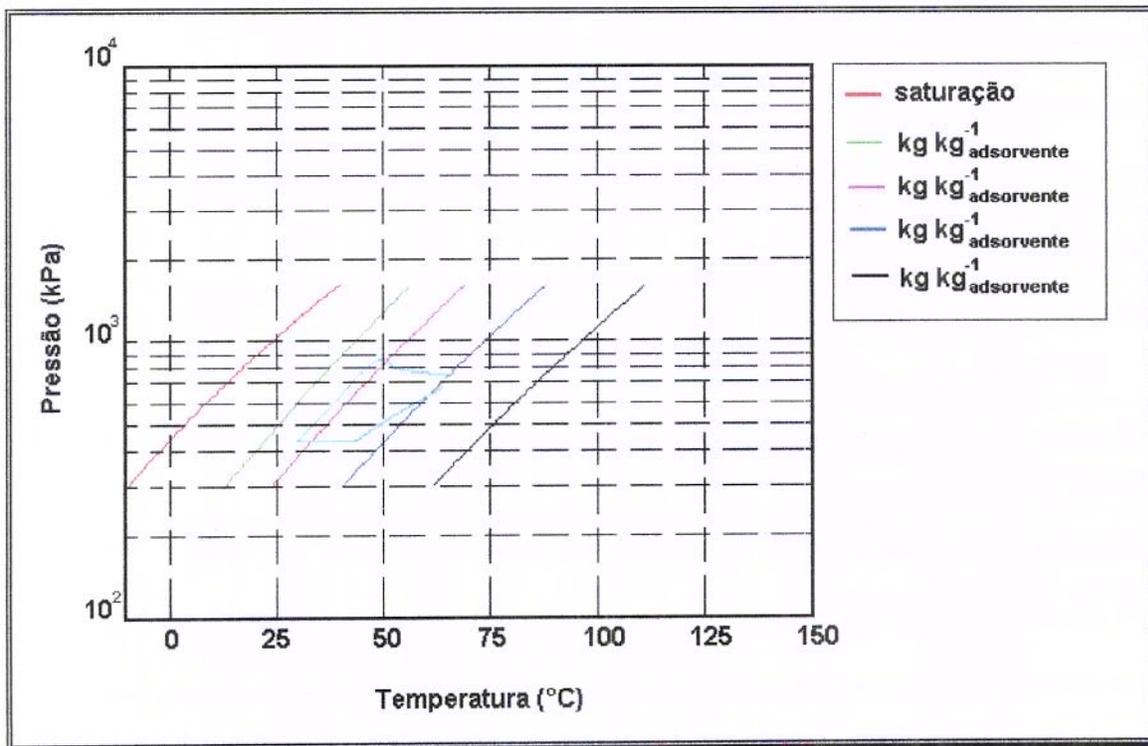


ENSAIO 13

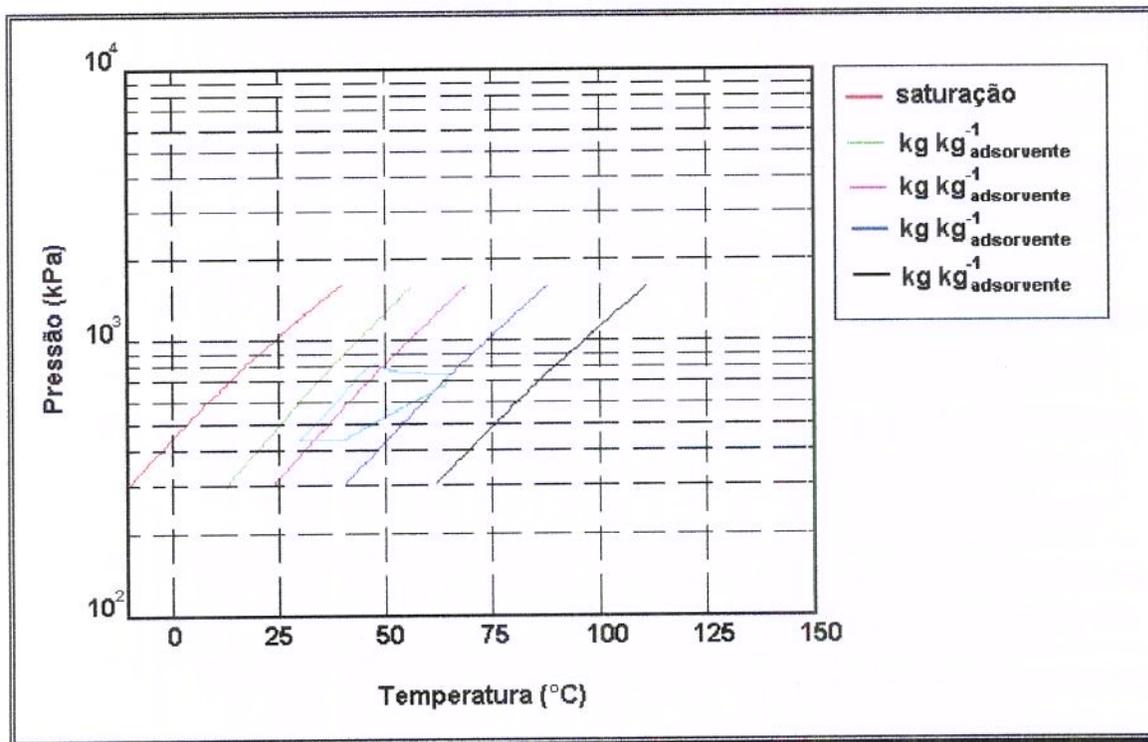


ENSAIO 14

APÊNDICE IV



ENSAIO 15



ENSAIO 16

Resultado completo dos ensaios 17 à 21, complementares ao planejamento experimental fatorial completo.

Ensaio	17	18	19	20	21
Calor retirado pelo evaporador ($\text{kJ kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$)	134,91	62,37	0,36	164,63	101,19
Potência do evaporador ($\text{W kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$)	1,86	0,80	0,01	1,97	6,32
Potência para aquecer o reator ($\text{W kg}_{\text{adsorvente}}^{-1}$)	4,78	3,65	2,85	6,29	20,33
Potência para resfriar o reator ($\text{W kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$)	4,15	2,45	0,85	4,86	15,92
COP	0,390	0,218	0,003	0,313	0,311

Temperatura média inicial do leito ($^{\circ}\text{C}$)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico" ($^{\circ}\text{C}$)	42,0	65,8	52,7	53,1	53,2
Temperatura média no fim da dessorção ($^{\circ}\text{C}$)	90,0	90,0	53,0	127,0	90,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção ($^{\circ}\text{C}$)	10,8	40,3	25,2	25,5	25,8
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico" ($^{\circ}\text{C}$)	90,0	73,6	53,0	127,0	90,0
Temperatura média no fim da adsorção ($^{\circ}\text{C}$)	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Temperatura da amônia no fim da adsorção ($^{\circ}\text{C}$)	-0,1	-0,1	-1,9	-0,1	-0,2

APÊNDICE IV

Ensaio	17	18	19	20	21
<i>Uptake</i> inicial (kg kg _{adsorvente} ⁻¹)	0,179	0,179	0,179	0,179	0,179
<i>Uptake</i> no início da dessorção (kg kg _{adsorvente} ⁻¹)	0,178	0,179	0,179	0,177	0,176
<i>Uptake</i> no fim da dessorção (kg kg _{adsorvente} ⁻¹)	0,080	0,127	0,179	0,053	0,102
Massa de amônia dessorvida (kg)	3,32	1,75	0,01	4,20	0,65
<i>Uptake</i> no início do resfriamento (kg kg _{adsorvente} ⁻¹)	0,080	0,127	0,179	0,053	0,102
<i>Uptake</i> no início da adsorção (kg kg _{adsorvente} ⁻¹)	0,080	0,128	0,179	0,053	0,102
<i>Uptake</i> no fim da adsorção (kg kg _{adsorvente} ⁻¹)	0,187	0,178	0,179	0,185	0,184
Massa de amônia adsorvida (kg)	3,62	1,69	0,01	4,47	0,72
Massa de carvão (kg)	33,87	33,87	33,87	33,87	8,77

Tempo de aquecimento "isostérico"(minutos)	2	26	205	3	2
Tempo de dessorção (minutos)	1018	930	41	1100	203
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	2	28	205	3	2
Tempo de adsorção (minutos)	1204	1279	625	1390	265
Tempo de processo (minutos)	2226	2264	1076	2496	472
Número de interações	2227	2411	50054	2497	473

Resultado completo dos ensaios 22 à 25, complementares ao planejamento experimental fatorial completo.

Ensaio	22	23	24	25
Calor retirado pelo evaporador (kJ kg⁻¹_{adsorvente})	102,16	102,91	103,94	103,37
Potência do evaporador (W kg⁻¹_{adsorvente})	0,59	0,66	1,56	1,30
Potência para aquecer o reator (W kg⁻¹_{adsorvente})	1,80	2,15	4,87	4,16
Potência para resfriar o reator (W kg⁻¹_{adsorvente})	1,46	1,64	3,82	3,21
COP	0,329	0,307	0,320	0,312

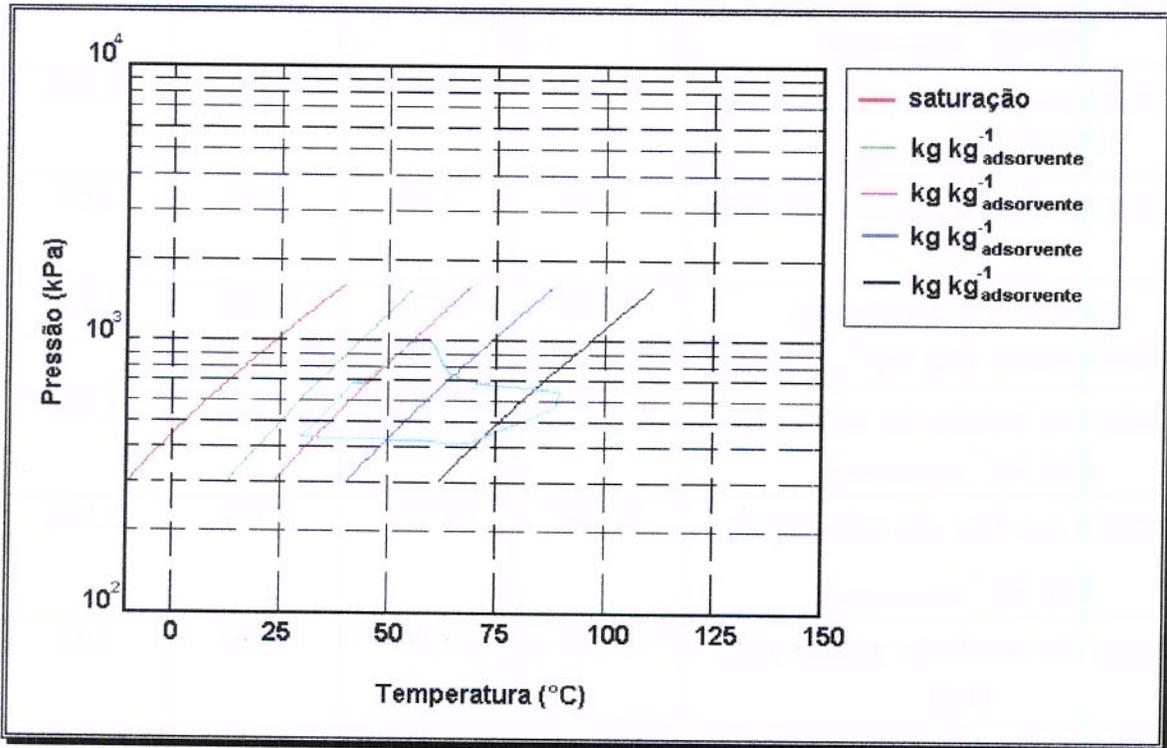
Temperatura media inicial do leite (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico"(°C)	53,4	53,1	53,4	53,5
Temperatura média no fim da dessorção (°C)	90,0	90,0	90,0	90,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção (°C)	25,5	25,2	25,9	25,6
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico"(°C)	90,0	90,0	90,0	90,0
Temperatura média no fim da adsorção (°C)	30,5	30,0	30,0	30,0
Temperatura da amônia no fim da adsorção (°C)	-0,1	-0,0	-0,2	-0,1

APÊNDICE IV

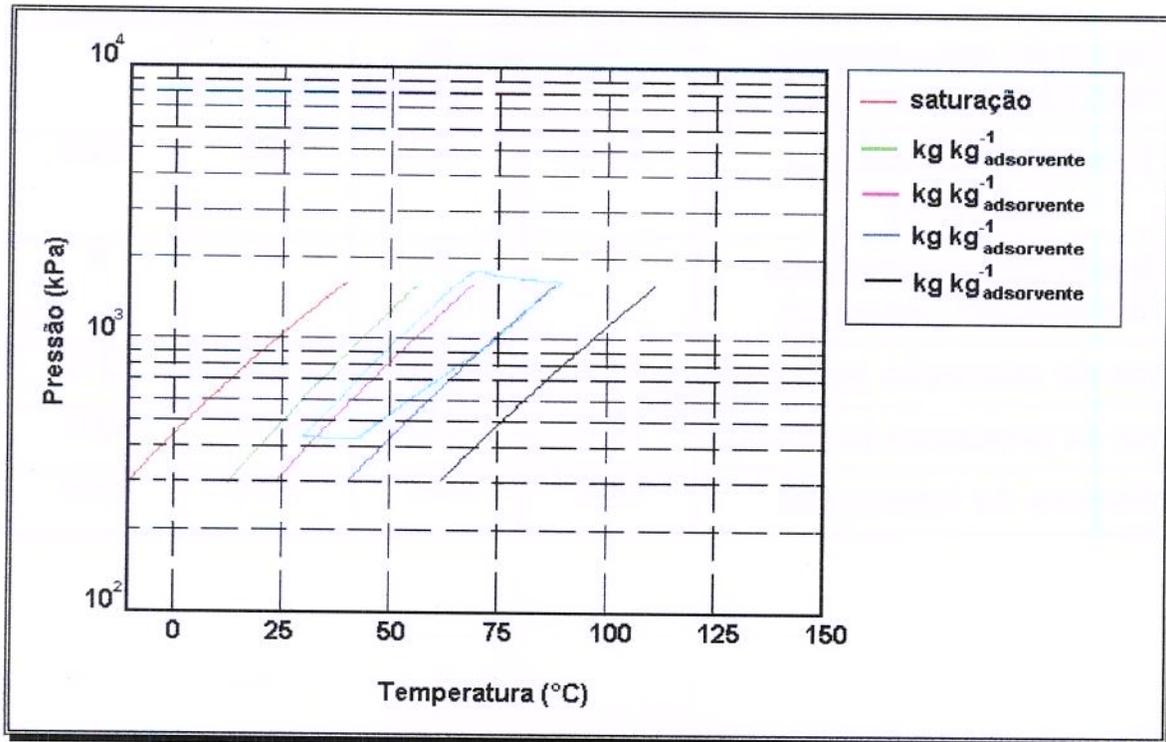
Ensaio	22	23	24	25
<i>Uptake</i> inicial (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,179	0,179	0,179	0,179
<i>Uptake</i> no início da dessorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,178	0,178	0,178	0,178
<i>Uptake</i> no fim da dessorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,102	0,102	0,103	0,102
Massa de amônia dessorvida (kg)	5,10	1,91	3,21	2,57
<i>Uptake</i> no início do resfriamento (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,102	0,102	0,103	0,102
<i>Uptake</i> no início da adsorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,102	0,102	0,103	0,102
<i>Uptake</i> no fim da adsorção (kg kg ⁻¹ _{adsorvente})	0,184	0,185	0,186	0,185
Massa de amônia adsorvida (kg)	5,50	2,08	3,54	2,81
Massa de carvão (kg)	67,28	25,05	42,63	33,87

Tempo de aquecimento "isostérico" (minutos)	14	24	7	8
Tempo de dessorção (minutos)	2329	1938	858	1005
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	14	24	7	8
Tempo de adsorção (minutos)	2862	2580	1105	1316
Tempo de processo (minutos)	5219	4566	1977	2337
Número de interações	5220	4567	1978	2338

Gráficos de Clapeyron para os 9 ensaios complementares do planejamento experimental fatorial completo.

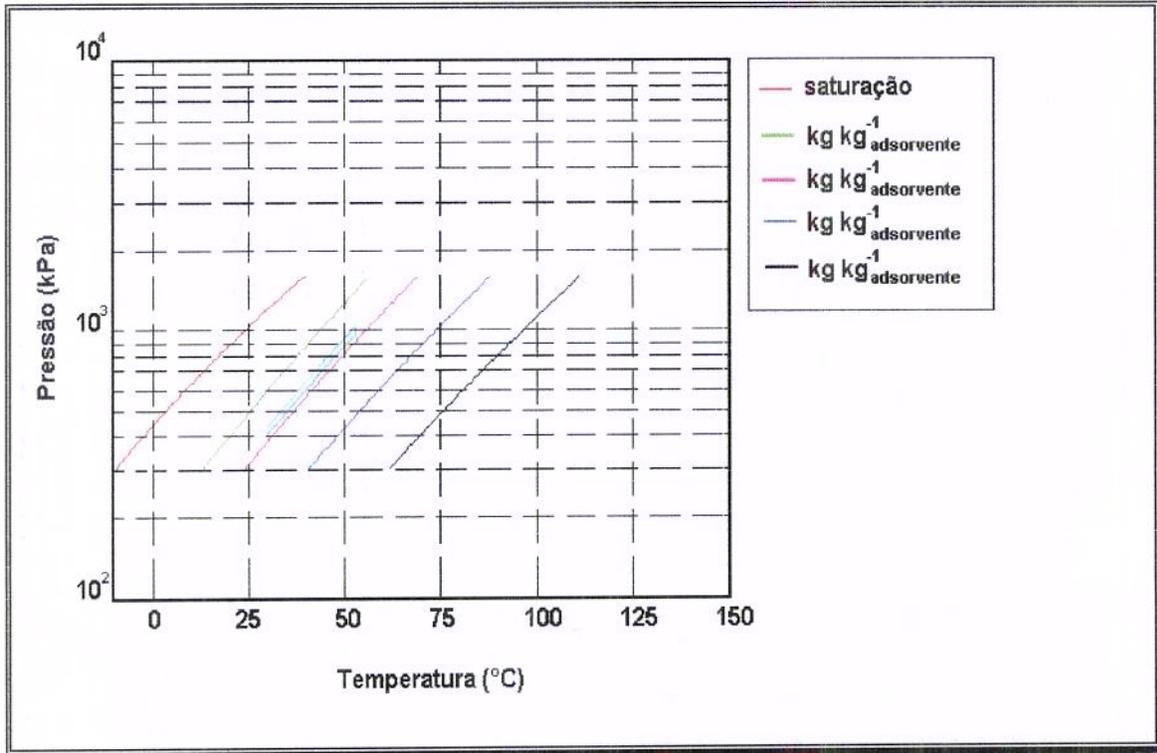


ENSAIO 17

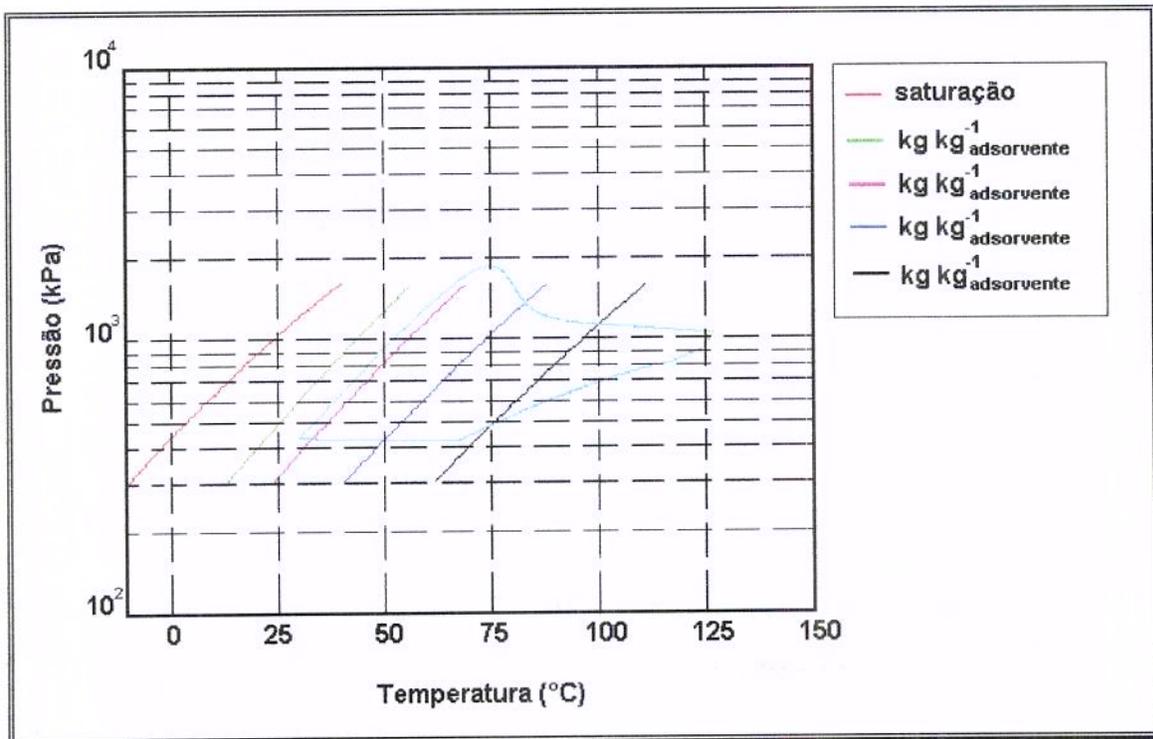


ENSAIO 18

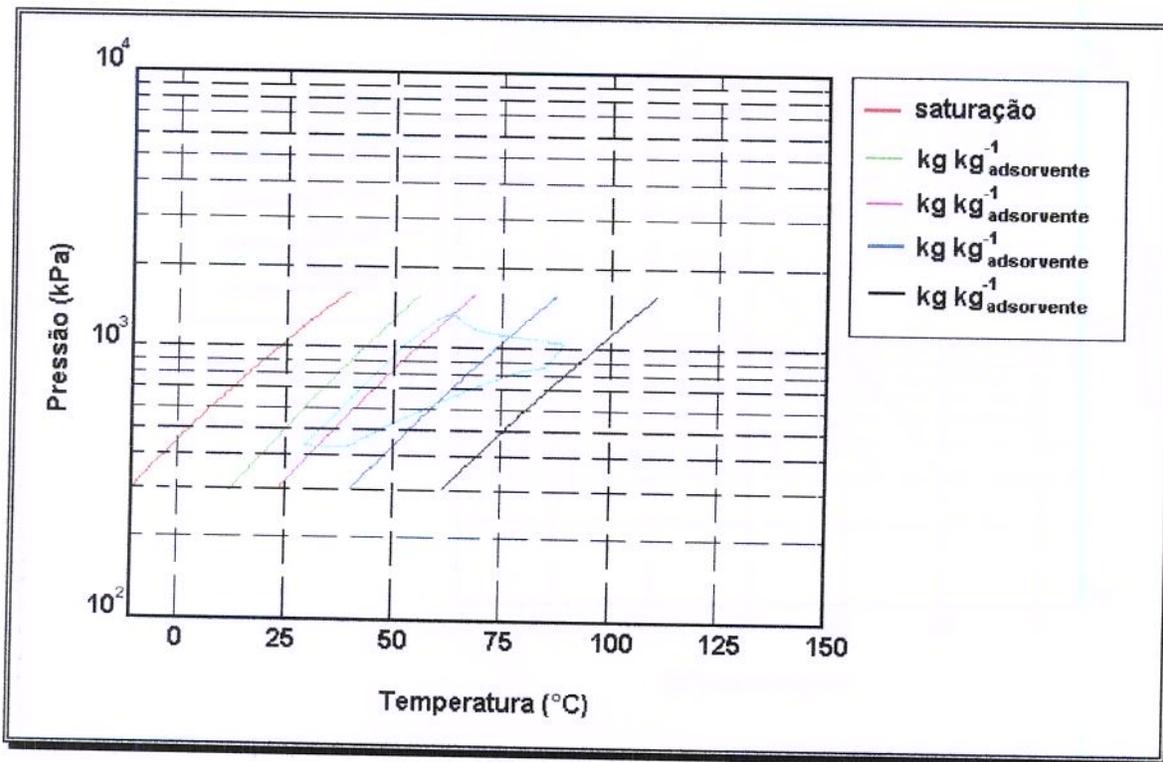
APÊNDICE IV



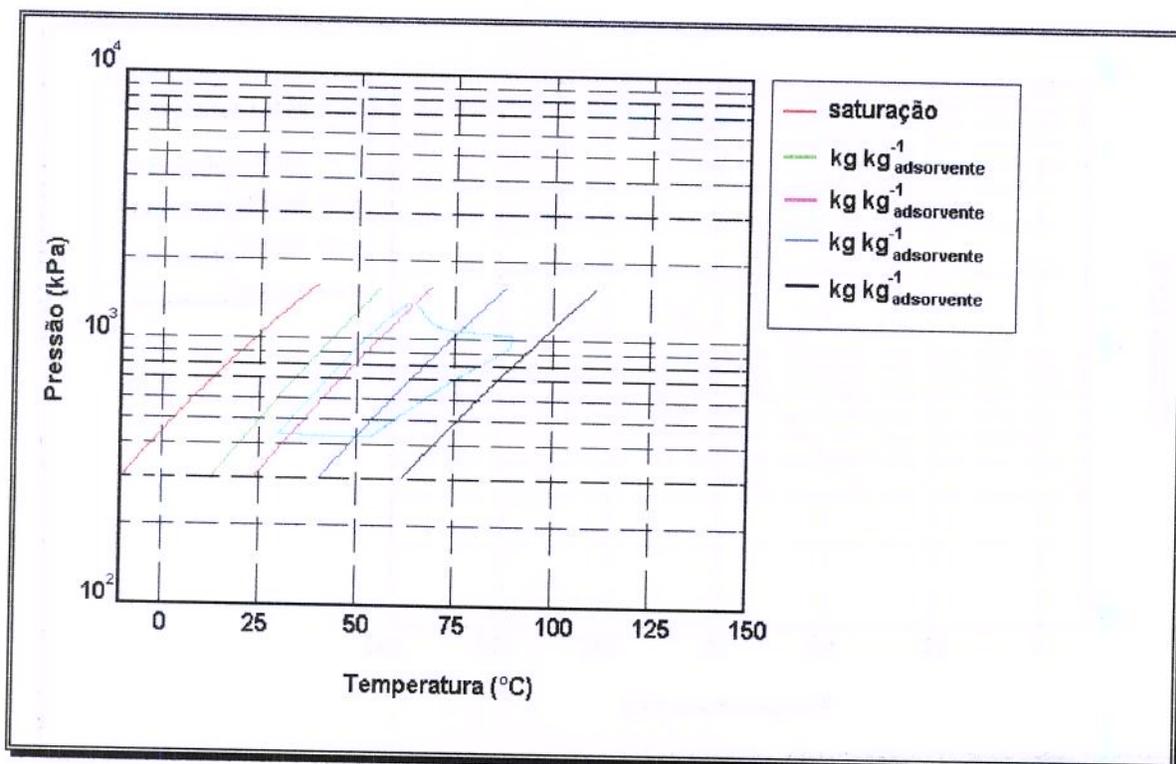
ENSAIO 19



ENSAIO 20

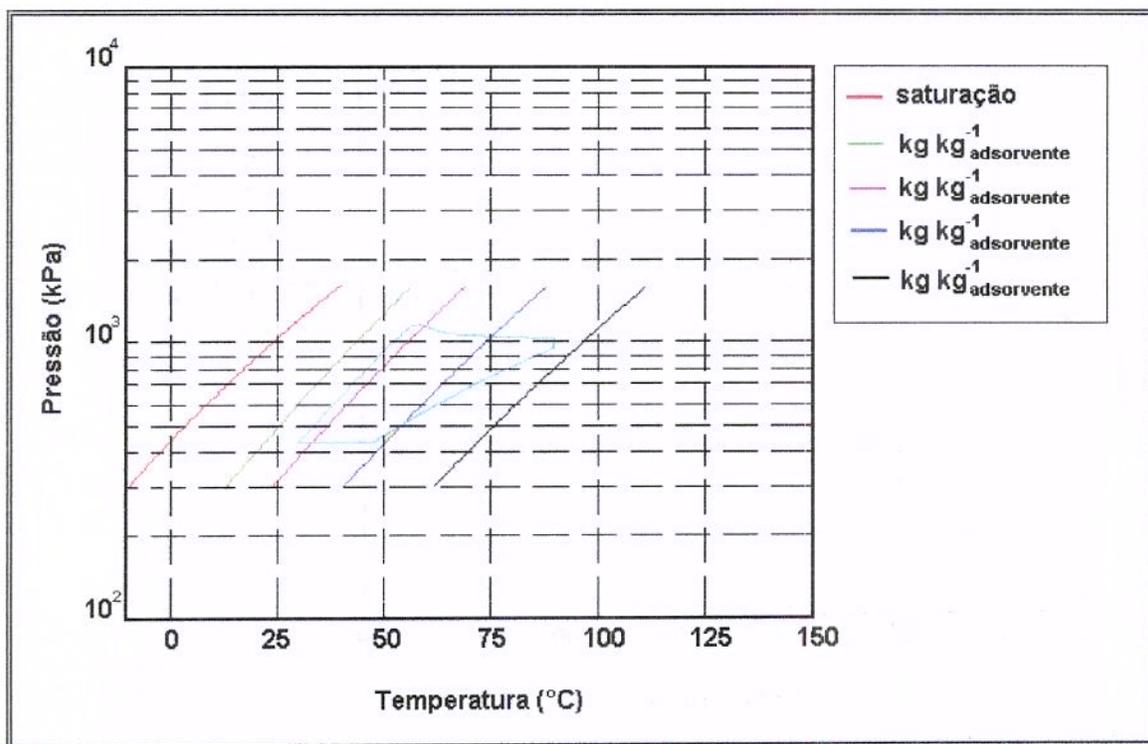


ENSAIO 21

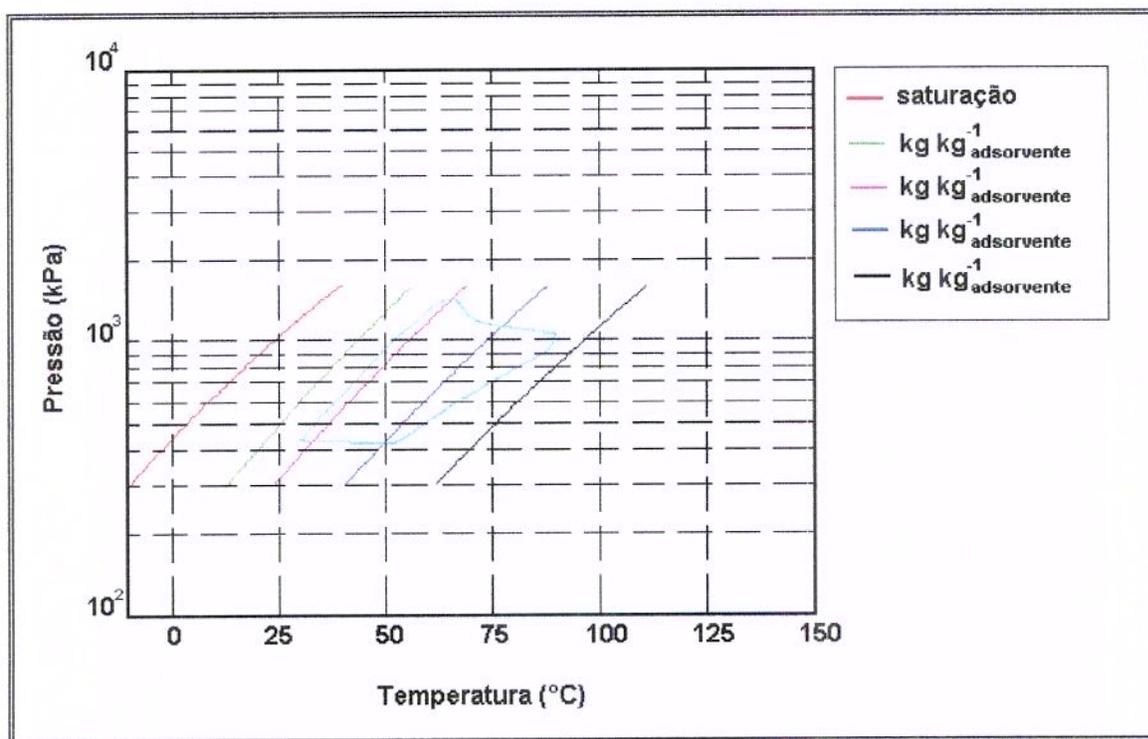


ENSAIO 22

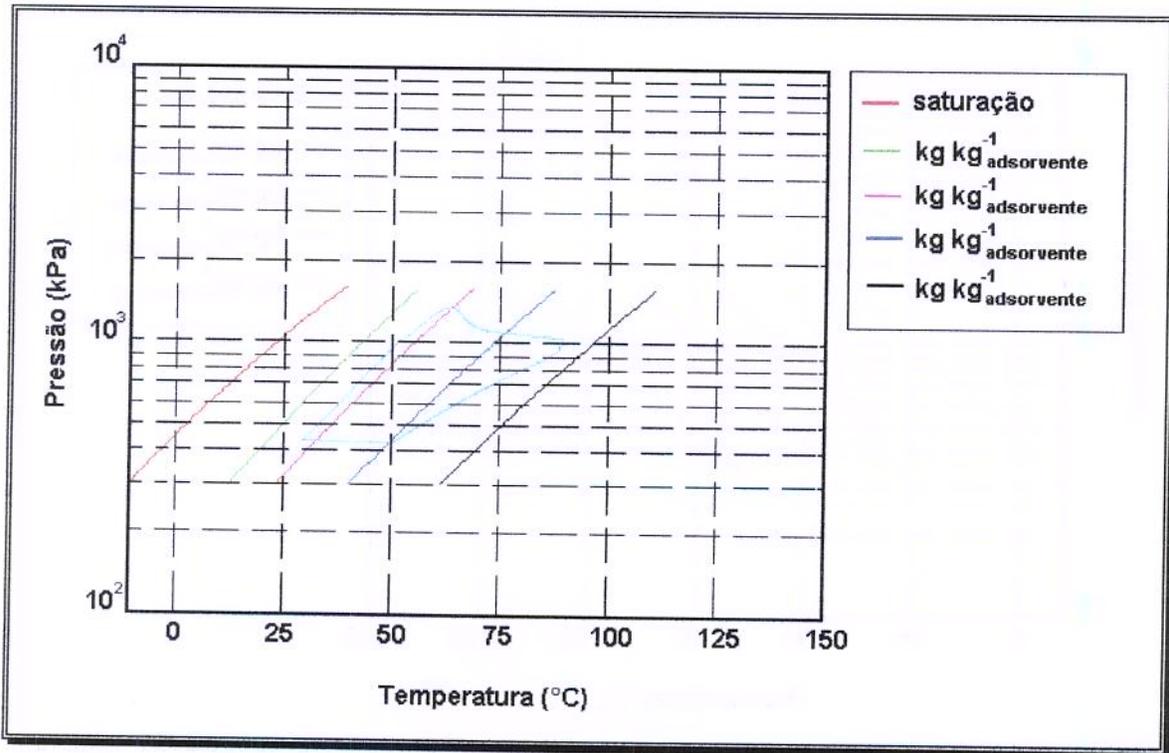
APÊNDICE IV



ENSAIO 23



ENSAIO 24



ENSAIO 25

APÊNDICE V

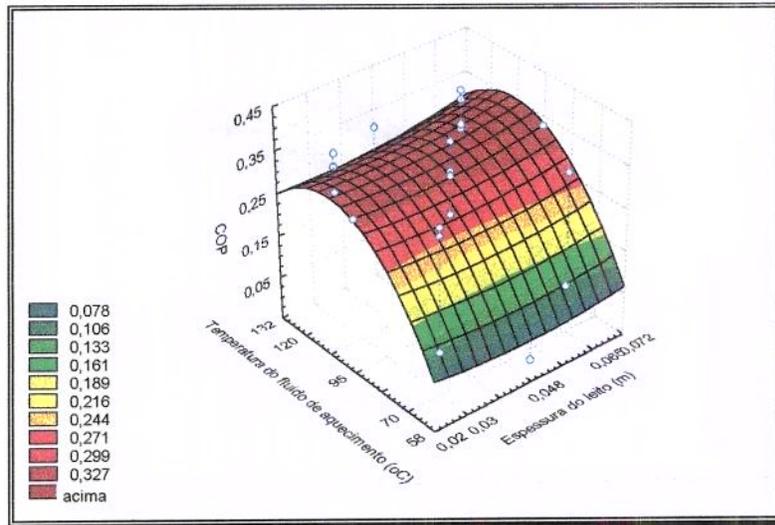


Figura 21. Variação do COP em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento e da espessura do leito, com as demais variáveis no nível zero.

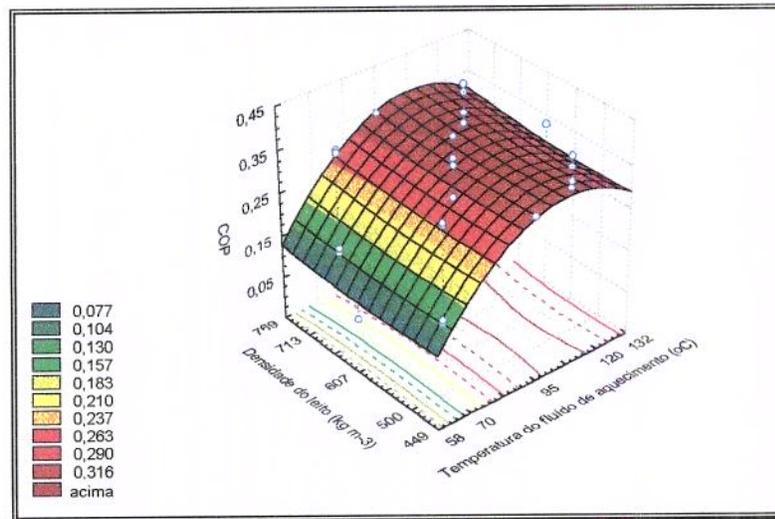


Figura 22. Variação do COP em função da temperatura do fluido térmico de aquecimento e da densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.

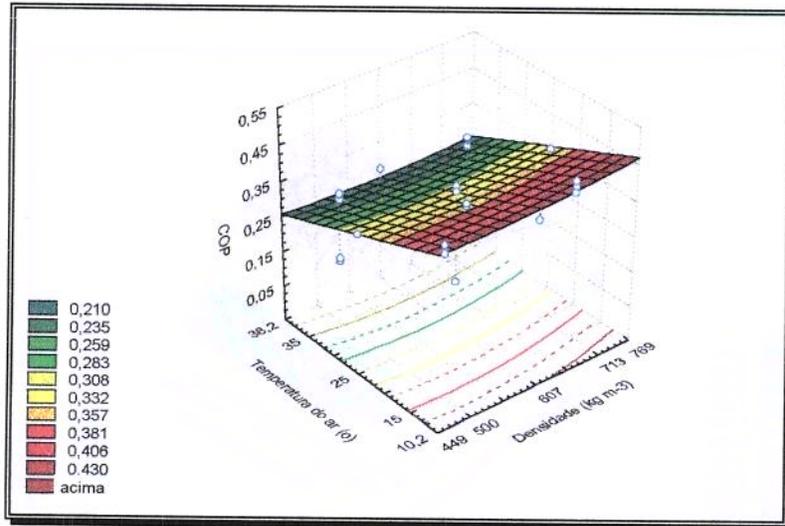


Figura 23. Variação do COP em função da temperatura do ar e da densidade do leite, com as demais variáveis no nível zero.

APÊNDICE VI

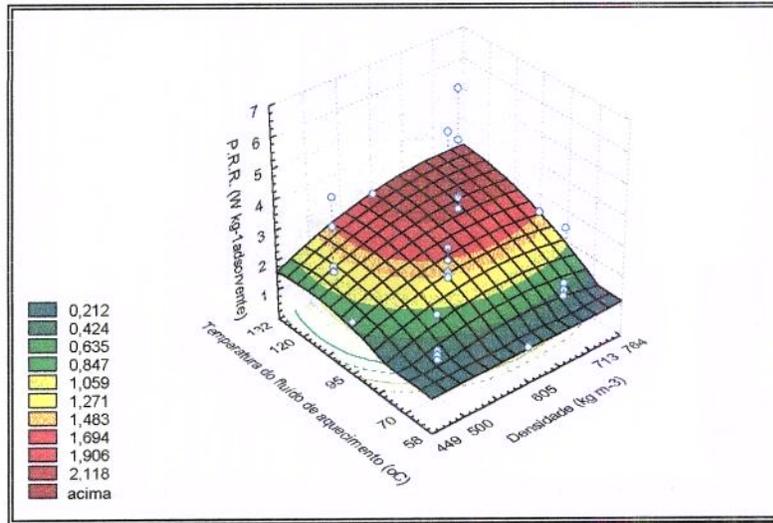


Figura 24. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do fluido térmico e densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.

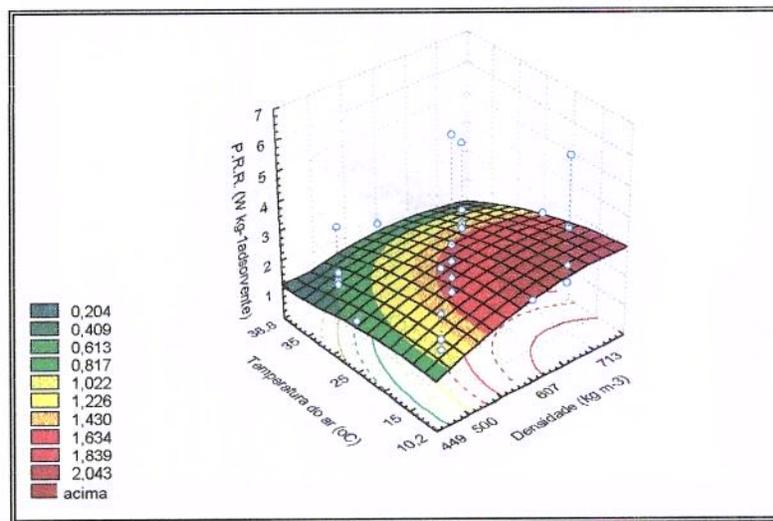


Figura 25. Variação da potência de refrigeração relativa em função da temperatura do ar e densidade do leito, com as demais variáveis no nível zero.

APÊNDICE VII

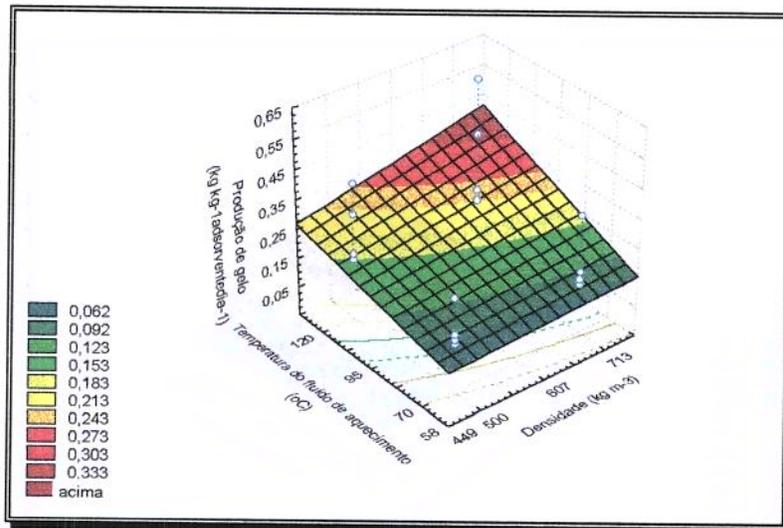


Figura 26. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da densidade do leito e da temperatura do fluido térmico, com as demais variáveis no nível zero.

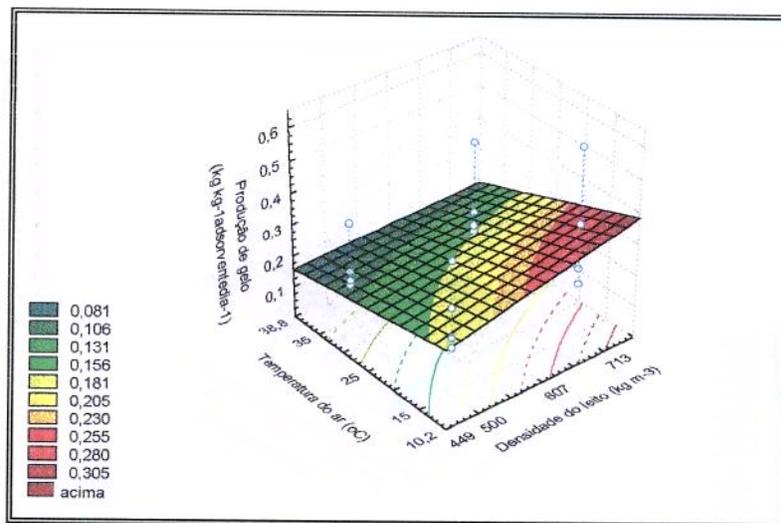


Figura 27. Variação da produção diária de gelo por kg de adsorvente, em função da densidade do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.

APÊNDICE VIII

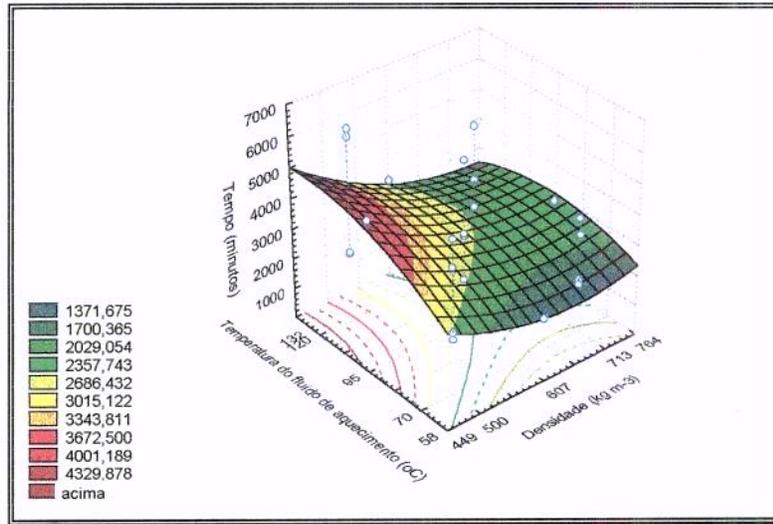


Figura 28. Variação do tempo de processo em função da densidade do leito e da temperatura do fluido de aquecimento, com as demais variáveis no nível zero.

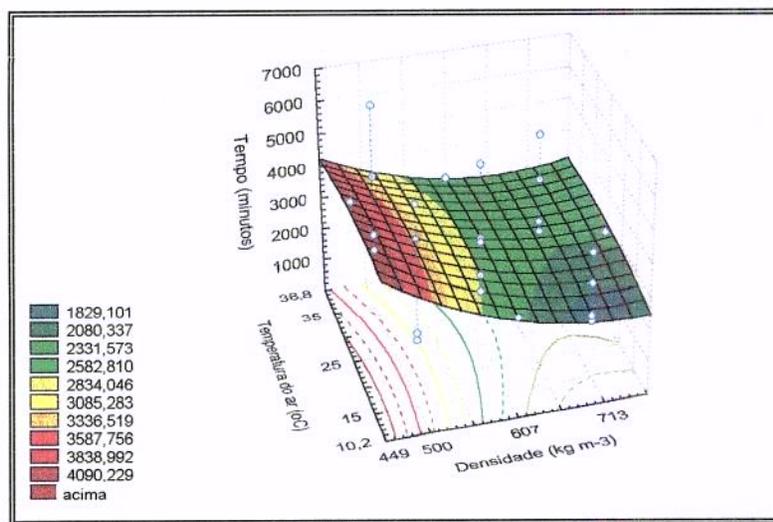


Figura 29. Variação do tempo de processo em função da densidade do leito e da temperatura do ar, com as demais variáveis no nível zero.

APÊNDICE IX

Resultado completo dos ensaios para as análises dos fatores de sensibilidade.

Ensaio	01	02	03	04
Calor retirado pelo evaporador (kJ kg ⁻¹ _{adsorvente})	50,90	34,50	16,09	50,73
Potência do evaporador (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	6,84	4,18	1,96	6,60
Potência para aquecer o reator (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	22,94	20,44	15,21	24,21
Potência para resfriar o reator (W kg ⁻¹ _{adsorvente})	16,76	11,98	6,64	16,70
COP	0,298	0,205	0,129	0,273

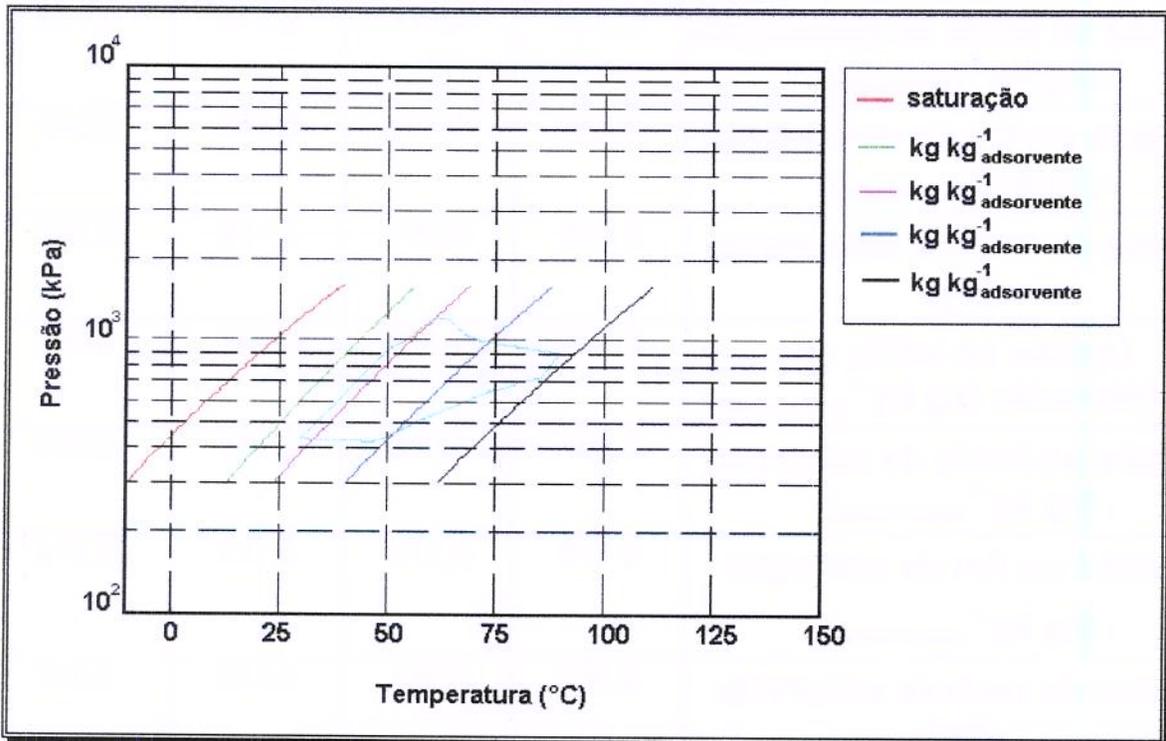
Temperatura média inicial do leito (°C)	30	30	30,0	30,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico" (°C)	50,5	61,5	53,0	57,0
Temperatura média no fim da dessorção (°C)	90,0	90,0	65,0	95,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção (°C)	20,8	35,8	25,9	25,8
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico" (°C)	90,0	90,0	65,0	95,0
Temperatura média no fim da adsorção (°C)	30,0	30,0	30,0	30,0
Temperatura da amônia no fim da adsorção (°C)	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

ANEXO IX

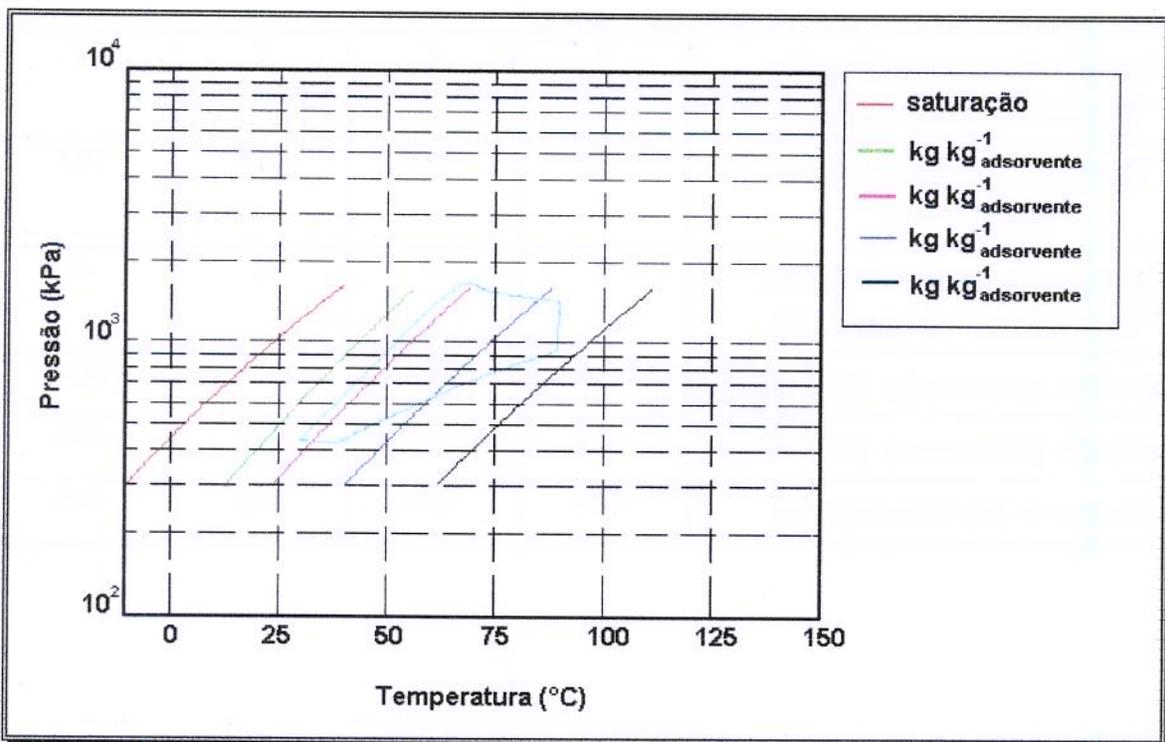
Ensaio	01	02	3	04
<i>Uptake</i> inicial (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,179	0,179	0,179	0,179
<i>Uptake</i> no início da dessorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,175	0,177	0,178	0,176
<i>Uptake</i> no fim da dessorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,094	0,118	0,151	0,093
Massa de amônia dessorvida (kg)	0,355	0,261	0,119	0,362
<i>Uptake</i> no início do resfriamento (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,094	0,118	0,151	0,093
<i>Uptake</i> no início da adsorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,094	0,118	0,151	0,093
<i>Uptake</i> no fim da adsorção (kg kg ⁻¹ adsorvente)	0,175	0,173	0,177	0,174
Massa de amônia adsorvida (kg)	0,357	0,241	0,115	0,357
Massa de carvão (kg)	4,39	4,39	4,39	4,39

Tempo de aquecimento "isostérico" (minutos)	1	4	7	2
Tempo de dessorção (minutos)	189	178	118	187
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	0	0	0	0
Tempo de adsorção (minutos)	248	275	274	256
Tempo de processo (minutos)	438	457	399	445
Número de interações	439	458	400	446

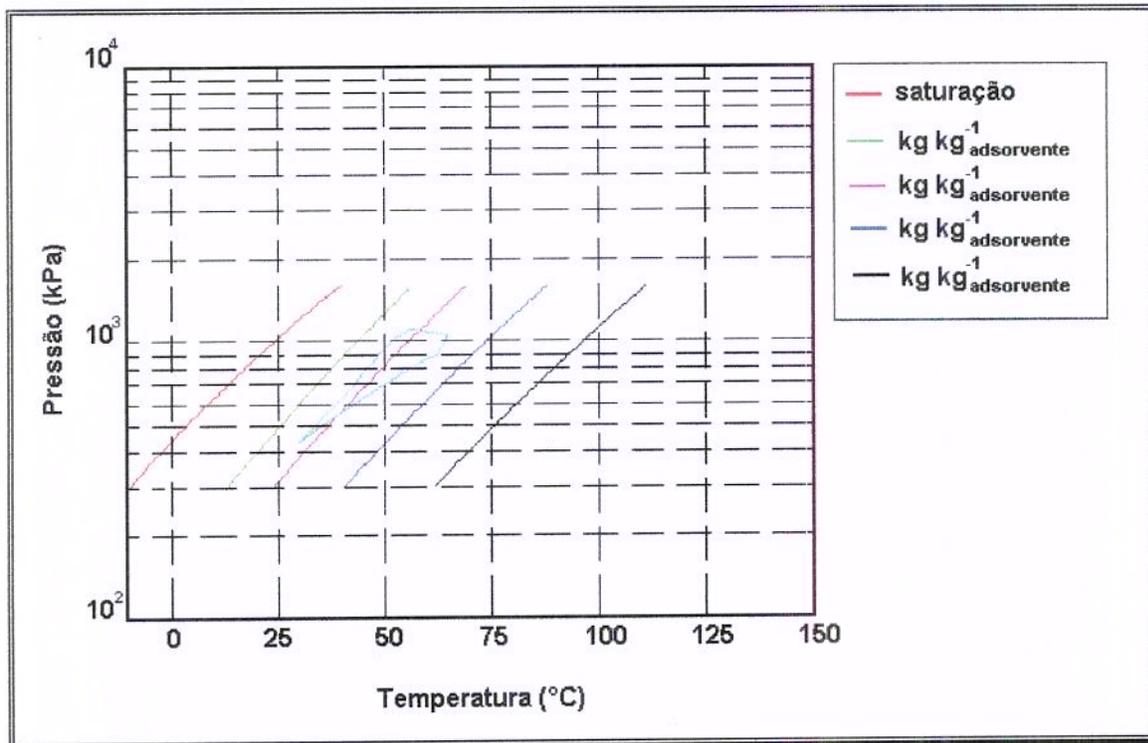
Gráficos de Clayperon para os 4 ensaios da análise dos fatores de sensibilidade.



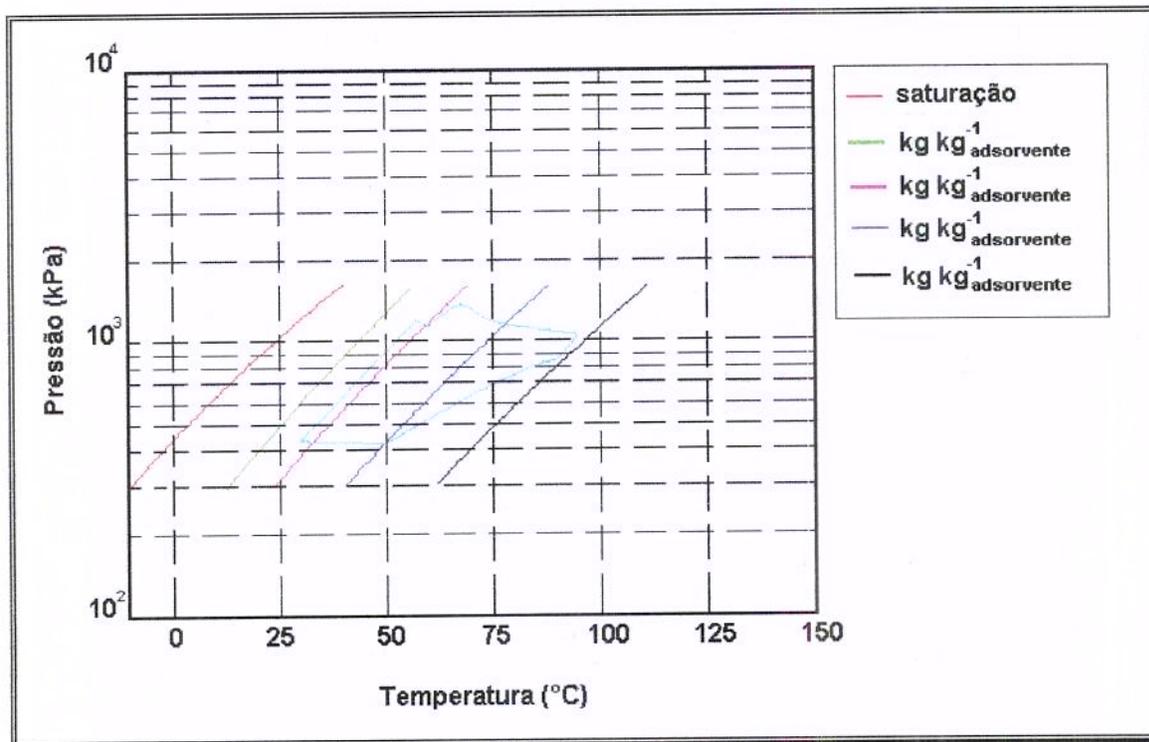
ENSAIO 01



ENSAIO 02



ENSAIO 3



ENSAIO 04

APÊNDICE X

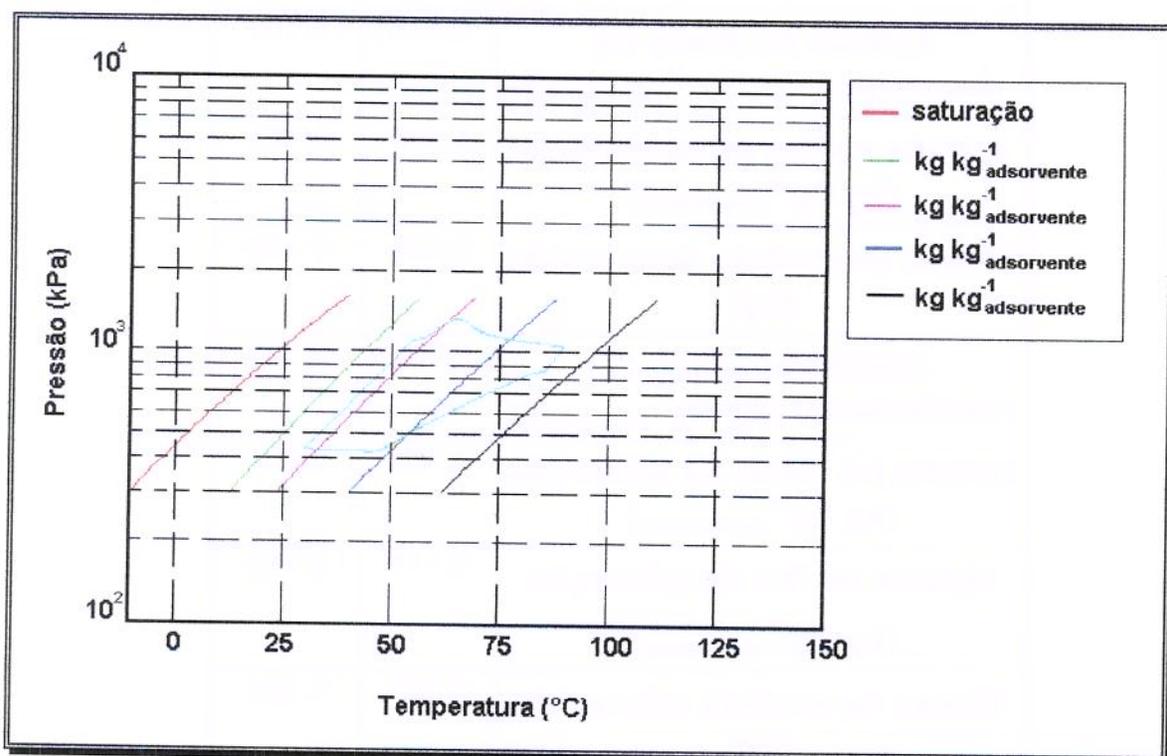
Resultado completo do ensaio de referência e do ensaio modificado.

Ensaio	01	02
Calor retirado pelo evaporador ($\text{kJ kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$)	45,93	46,71
Potência do evaporador ($\text{W kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$)	5,98	6,11
Potência para aquecer o reator ($\text{W kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$)	22,38	48,97
Potência para resfriar o reator ($\text{W kg}^{-1}_{\text{adsorvente}}$)	15,29	15,54
COP	0,267	0,125

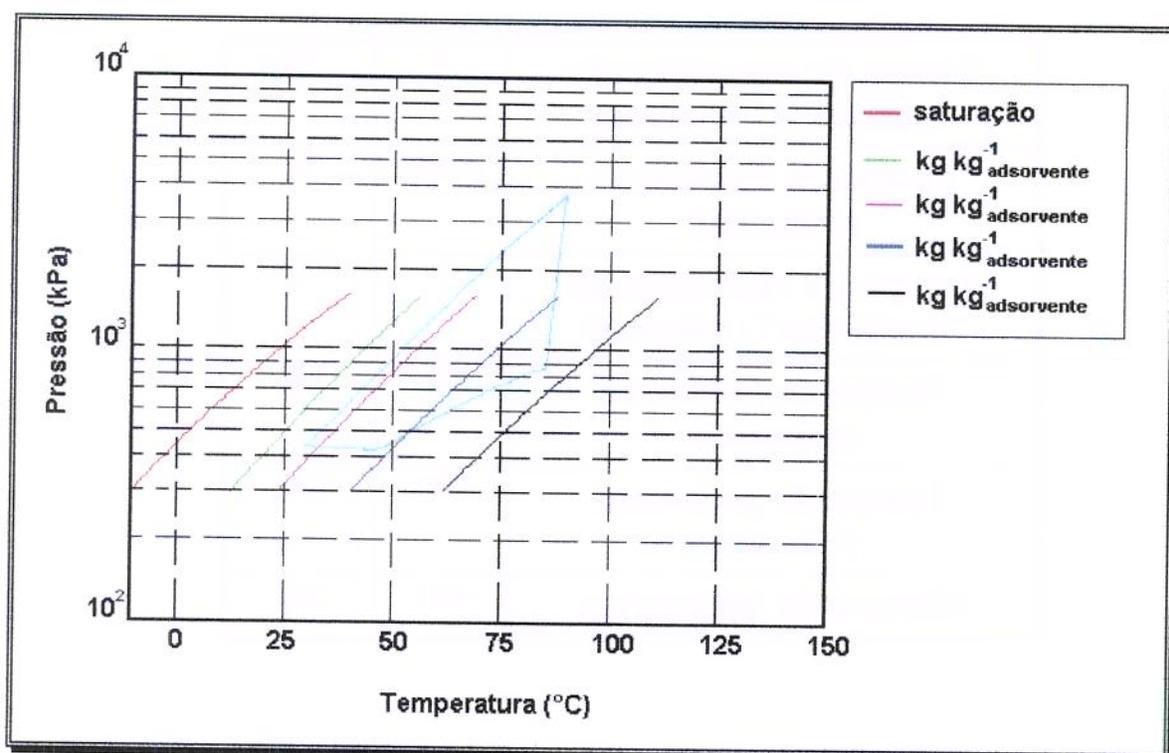
Temperatura média inicial do leito ($^{\circ}\text{C}$)	30,0	30,0
Temperatura média no fim do aquecimento "isostérico" ($^{\circ}\text{C}$)	55,1	90,0
Temperatura média no fim da dessorção ($^{\circ}\text{C}$)	90,0	90,0
Temperatura de condensação no fim da dessorção ($^{\circ}\text{C}$)	25,8	90,0
Temperatura média no fim do resfriamento "isostérico" ($^{\circ}\text{C}$)	90,0	90,0
Temperatura média no fim da adsorção ($^{\circ}\text{C}$)	30,0	30,0
Temperatura da amônia no fim da adsorção ($^{\circ}\text{C}$)	-0,1	-0,1

Ensaio	01	02
<i>Uptake</i> inicial (kg kg⁻¹ adsorvente)	0,179	0,179
<i>Uptake</i> no início da dessorção (kg kg⁻¹ adsorvente)	0,176	0,180
<i>Uptake</i> no fim da dessorção (kg kg⁻¹ adsorvente)	0,102	0,103
Massa de amônia dessorvida (kg)	0,326	0,336
<i>Uptake</i> no início do resfriamento (kg kg⁻¹ adsorvente)	0,102	0,103
<i>Uptake</i> no início da adsorção (kg kg⁻¹ adsorvente)	0,102	0,103
<i>Uptake</i> no fim da adsorção (kg kg⁻¹ adsorvente)	0,175	0,178
Massa de amônia adsorvida (kg)	0,323	0,328
Massa de carvão (kg)	4,39	4,39

Tempo de aquecimento "isostérico"(minutos)	2	90
Tempo de dessorção (minutos)	184	0
Tempo de resfriamento "isostérico" (minutos)	0	0
Tempo de adsorção (minutos)	256	255
Tempo de processo (minutos)	442	345
Número de interações	443	346

Gráficos de Clayperon para o ensaio de referência e para o ensaio modificado.

ENSAIO 01



ENSAIO 02

ERRATA

Pag.35, 2º.parágrafo: Verifica-se que, quando a espessura do leito é alterada de 3 para 6,5 cm, há uma variação de 3180 minutos a mais no tempo do ciclo, sendo que quando a densidade é modificada de 500 para 713 kg/m³, há uma diminuição do tempo de 878 minutos.

Pag.52, Tabela 14: Massa de gelo = -0,49.

Apêndices III, IV, IX, X:

Legenda dos Gráficos de Clapeyron

— 0,20 kg kg⁻¹ adsorvente

— 0,17 kg kg⁻¹ adsorvente

— 0,13 kg kg⁻¹ adsorvente

— 0,09 kg kg⁻¹ adsorvente