



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

**MODELAGEM DINÂMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO
POR ADSORÇÃO APLICADO A VEÍCULOS DE PASSEIO**

AUTORA: AMANDA DE CASTRO ALMEIDA MENDES

Belo Horizonte, 28 de março de 2022

AMANDA DE CASTRO ALMEIDA MENDES

**MODELAGEM DINÂMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO
POR ADSORÇÃO APLICADO A VEÍCULOS DE PASSEIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Pacheco Pujatti

Coorientador: Prof. Márcio Fonte-Boa Cortez

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2022

M538m

Mendes, Amanda de Castro Almeida.

Modelagem dinâmica de um sistema de refrigeração por adsorção aplicado a veículos de passeio [recurso eletrônico] / Amanda de Castro Almeida Mendes. - 2022.

1 recurso online (147 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Fabrício José Pacheco Pujatti.

Coorientador: Márcio Fonte-Boa Cortez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 141-147.

Bibliografia: f. 131-140.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Automóveis - Ar condicionado - Teses. 3. Adsorção - Teses. 4. Modelagem - Teses. I. Pujatti, Fabrício José Pacheco. II. Cortez, Márcio Fonte-Boa. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

MODELAGEM DINÂMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO APLICADO A VEÍCULO DE PASSEIO

AMANDA DE CASTRO ALMEIDA MENDES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Fabrício José Pacheco Pujatti (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Marcio Fonte-Boa Cortez (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Luiz Machado (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dra. Cristiana Brasil Maia (PUC-Minas), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 03 de março de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Fabrício Jose Pacheco Pujatti, Professor do Magistério Superior**, em 25/03/2022, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiana Brasil Maia, Usuário Externo**, em 25/03/2022, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Machado, Vice diretor(a) de unidade**, em 25/03/2022, às 18:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Fonte Boa Cortez, Professor do Magistério Superior**, em 25/03/2022, às 19:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1313113** e o código CRC **B5BC91EC**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Universidade Federal de Minas Gerais, à CAPES, ao CNPQ e ao CTM, que acreditaram no meu potencial e investiram na minha habilidade, permitindo que eu entrasse em um dos mestrados mais concorridos do país, como também aproveitasse todo o material e suporte fornecido aos estudantes.

Agradeço ao meu orientador Prof. Fabrício Pujatti, que me forneceu um novo olhar sobre a área de pesquisa na área automotiva, expandindo meus horizontes para novas oportunidades. Agradeço ao meu co-orientador Prof. Márcio Fonte-Boa, pelo suporte ao longo deste trabalho e pelas novas idéias proporcionadas em todas as reuniões.

Agradeço ao Lucas, que embarcou nessa jornada, me ensinando, com tanta paciência, uma linguagem que eu não conhecia, aplicando métodos numéricos que eu não tinha familiaridade.

Agradeço aos meus pais, Sérgio e Maria do Carmo, que me apoiaram ao longo desta nova jornada, sempre presentes e com bons conselhos a fornecer, mesmo faltando o conhecimento técnico por trás.

Agradeço ao meu noivo, Ricardo, que me apoiou e auxiliou em uma fase tão conturbada, segurando a barra de um casamento a ser organizado enquanto eu mergulhava de cabeça na termodinâmica.

Agradeço aos meus grandes amigos do CTM, que me forneceram dados e base técnica para a formulação correta desta dissertação. Aos meus amigos Anna Camila, Daniella, Gabriela, Guilherme, Felipe, Luísa e Ricardo, que me forneceram conselhos e auxílio quando necessário.

Por fim, agradeço à banca composta pelo meu orientador e co-orientador, além da Profa. Cristiana Maia e do Prof. Luiz Machado que me forneceram uma grande oportunidade de aprendizado e crescimento. Saio deste trabalho mais segura, com mais confiança e conhecimento adquirido, ciente de que o trabalho que tive nestes últimos meses, apesar de difícil, foi extremamente construtivo.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A utilização de sistemas de condicionamento de ar por adsorção em veículos é uma possibilidade de aplicação do calor perdido no processo de combustão em uma tecnologia que favorece o bem-estar do usuário e o desempenho do automóvel. Propõe-se avaliar a viabilidade da aplicação deste sistema em um veículo de passeio considerando as principais características de um refrigerador adsorptivo, através de modelagem numérica dinâmica. Avaliou-se as principais fontes de calor disponíveis, os tipos de ciclo mais comuns, os pares de trabalho com melhores resultados em estudos anteriores e os reatores com melhor desempenho em ambientes em movimento. A partir desta avaliação, elaborou-se um sistema utilizando gases de exaustão como fonte de calor, ciclo de duas camadas, par de trabalho gel de sílica/água e reator do tipo Tubo Aletado. Simulou-se o sistema utilizando um método combinado de Adams e BDF, no ambiente *Colab* do Google. Observou-se que a temperatura de saída de ar do evaporador variou entre 10°C e 22°C, promovendo um ambiente confortável ao usuário. No entanto, os parâmetros de desempenho foram aquém do esperado e não poderiam fornecer competição real aos sistemas de condicionamento de ar clássicos. Concluiu-se que, por apresentar sistemas muito pesados e que ocupam um grande espaço no veículo, além de intermitência significativa e baixos valores de condicionamento efetivo, o sistema poderia ser considerado inviável no momento atual para veículos de passeio.

Palavras-chave: Condicionamento por adsorção. Condicionamento de ar automotivo. Análise conceitual. Modelagem.

ABSTRACT

The use of adsorption air conditioning systems in vehicles is a possibility of applying the heat lost in the combustion process in a technology that favors the well-being of the user and the performance of the car. It was proposed to evaluate the feasibility of applying this system in a passenger vehicle considering the main characteristics of an adsorptive cooler, through dynamic numerical modeling. The main available heat sources, the most common cycle types, the working pairs with the best results in previous studies and the reactors with the best performance in moving environments were evaluated. Based on this evaluation, a system was developed using exhaust gases as a heat source, a two-layer cycle, silica gel/water working pair and a finned tube reactor. The system was simulated using a combined method of Adams and BDF, in Google's Colab environment. It was observed that the evaporator air outlet temperature varied between 10°C and 22°C, promoting a comfortable environment for the user. However, the performance parameters were below expectations and could not provide real competition to classic air conditioning systems. It was concluded that, as it presents very heavy systems that occupy a large space in the vehicle, in addition to significant intermittence and low effective conditioning values, the system could be considered unfeasible at the moment for passenger vehicles.

Keywords: Adsorption conditioning. Automotive air conditioning. Conceptual analysis. Modelling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CICLO DE OPERAÇÃO DE UM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA POR CENTELHA.....	21
FIGURA 2 - SISTEMA DE ARREFECIMENTO VEICULAR.....	23
FIGURA 3 - EMISSÕES DE CO ₂ NA EUROPA.....	26
FIGURA 4 - UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO TÍPICO (ESQUERDA) COMPARADO COM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO À VAPOR (DIREITA)	28
FIGURA 5 - ESQUEMA DE UM CICLO DE ADSORÇÃO COM DUAS CAMADAS	31
FIGURA 6 - TROCADOR DE CALOR DO TIPO ESPIRAL E CASCA E TUBO.....	33
FIGURA 7 - TROCADOR DE CALOR DO TIPO GANCHO	33
FIGURA 8 - TROCADOR DE CALOR DO TIPO TUBO ANULAR.....	34
FIGURA 9 - TROCADOR DE CALOR DO TIPO PLACA ALETADA	35
FIGURA 10 - TROCADOR DE CALOR DO TIPO TUBO ALETADO.....	35
FIGURA 11 - TROCADOR DE CALOR DO TIPO TUBO-PLACA	36
FIGURA 12 - TROCADOR DE CALOR DO TIPO TUBO SIMPLES E TIPO PLACA	37
FIGURA 13 - ESQUEMA DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO AUTOMOTIVO POR ADSORÇÃO PROPOSTO APLICADO ABAIXO DO ASSENTO.....	38
FIGURA 14 - ESQUEMA DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO AUTOMOTIVO POR ADSORÇÃO PROPOSTO, APLICADO NO BAGAGEIRO, COM RADIADOR EXTRA.....	39
FIGURA 15 - ESQUEMA DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO AUTOMOTIVO POR ADSORÇÃO PROPOSTO APLICADO NO BAGAGEIRO, SEM RADIADOR EXTRA	40
FIGURA 16 - ESTRUTURA INTERNA DO CARVÃO ATIVADO.....	45
FIGURA 17 - ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE ÁGUA COM DIFERENTES ZEÓLITAS.....	49
FIGURA 18 - ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE ETANOL COM DIFERENTES MOFs.....	51
FIGURA 19 - DIAGRAMA DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO AUTOMOTIVO	65
FIGURA 20 – AQUECIMENTO DO REATOR 1 E ABERTURA DA VÁLVULA 1	66
FIGURA 21 - RESFRIAMENTO DO REATOR 2 E ABERTURA DA VÁLVULA B.....	66
FIGURA 22 - AQUECIMENTO DO REATOR 2 E, SIMULTANEAMENTE, RESFRIAMENTO DO REATOR 1	67
FIGURA 23 - ESBOÇO DE UM REATOR ADSORTIVO.....	68
FIGURA 24 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE TRABALHO	82
FIGURA 25 - LEIAUTE DA DISPOSIÇÃO DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS PARA O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR POR ADSORÇÃO APLICADO AO INTERIOR DE UM VEÍCULO.....	90
FIGURA 26 - IMAGEM DO MONOCILINDRICO UTILIZADO PARA TESTES	92
FIGURA 27 - FLUXOGRAMA DA SIMULAÇÃO	96
FIGURA 28 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CICLO DE CONDICIONAMENTO DE AR: O REATOR 1	99
FIGURA 29 - TEMPERATURA DO REATOR 1 EM FUNÇÃO DO TEMPO (FASE DE DESORÇÃO).....	101
FIGURA 30 - CONCENTRAÇÃO DO REATOR 1 EM FUNÇÃO DO TEMPO	102
FIGURA 31 - PRESSÃO DE SATURAÇÃO AO LONGO DO TEMPO	102
FIGURA 32 - VAZÃO DE ADSORVATO AO LONGO DO TEMPO	103
FIGURA 33 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CICLO DE CONDICIONAMENTO DE AR: O CONDENSADOR	104

FIGURA 34 - TEMPERATURA DO CONDENSADOR EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	104
FIGURA 35 - TEMPERATURA DE SAÍDA DE AR DO CONDENSADOR EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	105
FIGURA 36 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CICLO DE CONDICIONAMENTO DE AR: O EVAPORADOR.....	106
FIGURA 37 - TEMPERATURA DO EVAPORADOR EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	106
FIGURA 38 - TEMPERATURA DE SAÍDA DO AR NO EVAPORADOR.....	107
FIGURA 39 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CICLO DE CONDICIONAMENTO DE AR.....	108
FIGURA 40 - TEMPERATURA DO REATOR 2 EM FUNÇÃO DO TEMPO (FASE DE ADSORÇÃO).....	109
FIGURA 41 - CONCENTRAÇÃO DO REATOR 2 EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	109
FIGURA 42 - PRESSÃO DE SATURAÇÃO AO LONGO DO TEMPO.....	110
FIGURA 43 - TEMPERATURA DO REATOR 2 EM FUNÇÃO DO TEMPO (COM LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO COMO FLUIDO DE REFRIGERAÇÃO).....	111
FIGURA 44 - CONCENTRAÇÃO DO REATOR 2 EM FUNÇÃO DO TEMPO (COM LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO COMO FLUIDO DE REFRIGERAÇÃO).....	111
FIGURA 45 - CONCENTRAÇÃO DE ÁGUA ADSORVIDA NO GEL DE SÍLICA NO REATOR 1 NO CICLO DE 100 MINUTOS.....	112
FIGURA 46 - TEMPERATURA NO REATOR 1 NO CICLO DE 100 MINUTOS.....	113
FIGURA 47 - TEMPERATURA DO CONDENSADOR NO CICLO DE 100 MINUTOS.....	113
FIGURA 48 - TEMPERATURA DE SAÍDA DE AR DO CONDENSADOR NO CICLO DE 100 MINUTOS.....	114
FIGURA 49 - TEMPERATURA DO EVAPORADOR NO CICLO DE 100 MINUTOS.....	114
FIGURA 50 - TEMPERATURA DE SAÍDA DO AR DO EVAPORADOR NO CICLO DE 100 MINUTOS.....	115
FIGURA 51 - TEMPERATURA DO REATOR 2 NO CICLO DE 100 MINUTOS.....	116
FIGURA 52 - CONCENTRAÇÃO DE ÁGUA ADSORVIDA NO GEL DE SÍLICA NO REATOR 1 NO CICLO DE 300 MINUTOS.....	117
FIGURA 53 - TEMPERATURA NO REATOR 1 NO CICLO DE 300 MINUTOS.....	118
FIGURA 54 - TEMPERATURA DO CONDENSADOR NO CICLO DE 300 MINUTOS.....	119
FIGURA 55 - TEMPERATURA DE SAÍDA DE AR DO CONDENSADOR NO CICLO DE 300 MINUTOS.....	119
FIGURA 56 - TEMPERATURA DO EVAPORADOR NO CICLO DE 300 MINUTOS.....	120
FIGURA 57 - TEMPERATURA DE SAÍDA DO AR DO EVAPORADOR NO CICLO DE 300 MINUTOS.....	121
FIGURA 58 - TEMPERATURA DO REATOR 2 NO CICLO DE 300 MINUTOS.....	122
FIGURA 59 - COP DO SISTEMA.....	123
FIGURA 60 - SCP DO SISTEMA.....	123
FIGURA 61 - CALOR DE DESSORÇÃO NO REATOR 1 AO LONGO DO TEMPO.....	124
FIGURA 62 - CALOR DE ADSORÇÃO NO REATOR 2 AO LONGO DO TEMPO.....	125
FIGURA 63 - CALOR DE CONDENSÇÃO E EVAPORAÇÃO DO SISTEMA.....	125
FIGURA 64 - COMPARAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DO EVAPORADOR AO LONGO DO TEMPO (1) E A TEMPERATURA DO AR NA SAÍDA DO EVAPORADOR AO LONGO DO TEMPO (2).....	126
FIGURA 65 - DIAGRAMA SIMPLES DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO ADSORTIVO COM REATORES EM PARALELO.....	127

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS POLUENTES DERIVADOS DOS GASES DE EXAUSTÃO E SEU EFEITO NA SAÚDE HUMANA	25
TABELA 2 - PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE ANTOINE PARA A PRESSÃO DE SATURAÇÃO DA ÁGUA.....	77
TABELA 3 - CONDIÇÃO DE PRESSÃO DE SATURAÇÃO NOS REATORES	77
TABELA 4 - EFETIVIDADES DOS TROCADORES E CALOR UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.....	78
TABELA 5 - VAZÃO DOS FLUIDOS	78
TABELA 6 - PARÂMETROS DOS FLUIDOS PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA	79
TABELA 7 - TEMPERATURA DOS GASES E DO FLUIDO DE ARREFECIMENTO APÓS TROCA DE CALOR.....	79
TABELA 8 - TABELA DE TEMPERATURAS USADAS NA SIMULAÇÃO.....	80
TABELA 9 - CALORES ESPECÍFICOS DOS FLUIDOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.....	80
TABELA 10 - PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE FREUNDLICH PARA O PAR SÍLICA GEL/ÁGUA.....	80
TABELA 11 - DADOS DE ENTRADA OBTIDOS NA LITERATURA	81
TABELA 12 - RESUMO DOS PRINCIPAIS VALORES DE TEMPERATURA, PRESSÃO E VAZÃO PARA OS MOTORES A GASOLINA E A DIESEL	83
TABELA 13 – PROPRIEDADES PRINCIPAIS DOS PARES DE TRABALHO APLICÁVEIS À ADSORÇÃO.....	84
TABELA 14 - LISTA DE PONTOS POSITIVOS E NEGATIVOS RELATIVOS AO CICLO ÍNTERMITENTE BÁSICO.....	85
TABELA 15 - PONTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DOS PRINCIPAIS MODELOS DE REATORES	86
TABELA 16 - VALORES DE COP, SPC, RAZÃO DE MASSA DE ADSORVEDOR E MASSA DE ADSORVENTE E TEMPERATURA DE SAÍDA ESPERADOS PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO	87
TABELA 17 - RESUMO DAS CONSIDERAÇÕES	89
TABELA 18 - CARACTERÍSTICAS DO MOTOR MONOCILINDRO.....	92
TABELA 19 - CONCENTRAÇÃO QUÍMICO DO COMBUSTÍVEL E0.....	93
TABELA 20 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO MONOCILINDRO.....	93
TABELA 21 - COEFICIENTE DOS GASES DE EXAUSTÃO.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Latinas

A	Área da Superfície do Trocador de Calor (m ²)
A _A	Coeficientes da Equação de Antoine (adimensionais)
B _A	
C _A	
C _{min}	Valor do Fluido de Menor Capacidade Calorífica (adimensional)
C _p	Calor Específico (J/K)
D	Parâmetro da equação de Dubinin-Asthakov (adimensional)
E	Potência Específica de Adsorção (J/mol)
G	Coeficiente Global de Transferência de Calor (W/m ² °C)
g	Aceleração Gravitacional (m/s ²)
H	Parâmetro da Estrutura de Poro do Adsorvente (m)
h	Entalpia (J/kg)
K	Coeficiente de Dubinin-Radushkevich (m ²)
k	Coeficiente de Adsorvente (adimensional)
M	Massa (kg)
<i>m</i>	Vazão Mássica (kg/s)
n	Parâmetro da equação de Dubinin-Asthakov (adimensional)
P	Pressão (Pa)
P _{sat}	Pressão Saturada (Pa)
Q	Calor (J)
<i>Q</i>	Taxa de Transferência de Calor (kg/s)
q	Concentração de Adsorvato no Reator (kg/kg)
R	Constante Geral dos Gases de Clapeyron (J/molK)
T	Temperatura (K)
T _r	Temperatura do Reator (K)
U	Energia Interna (J)
<i>u</i>	Energia Interna Específica (J/kg)
<i>v</i>	Velocidade (m/s)

V	Volume (m ³)
W	Trabalho (J)
\dot{W}	Potência (W)
x	Equilíbrio de Adsorção (kg/kg)
z	Cota (m)

Letras Gregas

β	Coeficiente de Afinidade (°)
ε	Relação de Efetividade (adimensional)
ϵ	Potencial de Adsorção (J/mol)
ρ	Densidade (kg/m ³)

Subscritos

ads	Adsorção
adsn	Adsorvente
adv	Adsorvato
c	Compressor
co	Condensador
des	Dessorção
e	Entrada
ev	Evaporador
f	Fluido
ff	Fluido Frio
fq	Fluido Quente
g	Gerador
isos	Isostérico
l	Adsorvatos Não Referenciados
lr	Líquido Refrigerante Adsorvido
m	Morta
max	Máxima
mem	Membrana
o	Operacional

orv	Orvalho
ref	Refrigeração
s	Saída
sat	Saturação
VC	Volume de Controle
v	Vapor
0	Adsorvato nos Poros

Abreviações

COP	Coeficiente de Desempenho
MOF	Estrutura Metal Orgânica
SCP	Capacidade de Refrigeração Específica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	INTRODUÇÃO AO VEÍCULO AUTOMOTOR.....	21
2.1.1	DESAFIOS ENCONTRADOS ATUALMENTE PELA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA 24	
2.2	TERMODINÂMICA ASSOCIADA AO CICLO DE REFRIGERAÇÃO.....	27
2.2.1	CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO	27
2.2.2	TIPOS DE REATORES PARA O CICLO ADSORTIVO.....	32
2.2.3	A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA EM UM VEÍCULO.....	37
2.2.4	A IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO DE AR.....	40
2.3	OS PARES DE TRABALHO TÍPICOS DO SISTEMA ESTUDADO	42
2.3.1	CARVÃO ATIVADO	44
2.3.2	GEL DE SÍLICA.....	47
2.3.3	ZEÓLITAS	48
2.3.4	ESTRUTURA METAL – ORGÂNICA E NOVAS PREPOSIÇÕES.....	50
2.4	MÉTODOS NUMÉRICOS.....	53
2.5	ESTADO DA ARTE.....	56
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
3	MODELAGEM MATEMÁTICA DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO	64
3.1	O MODELO	67
3.2	VARIÁVEIS	76
3.2.1	PRESSÃO DO SISTEMA	77
3.2.2	EFETIVIDADE DOS TROCADORES DE CALOR.....	77
3.2.3	PROPRIEDADES DOS FLUIDOS RESPONSÁVEIS PELA TROCA DE CALOR 78	
3.2.4	PROPRIEDADES DO ADSORVENTE E ADSORVATO	80

4	METODOLOGIA.....	82
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	83
4.1.1	PARÂMETROS DE ENTRADA DO SISTEMA.....	83
4.1.2	PARES DE ADSORÇÃO APLICADOS AO SISTEMA.....	84
4.1.3	TIPOS DE CICLO DE ADSORÇÃO.....	85
4.1.4	TIPOS DE REATOR ADSORTIVO.....	86
4.1.5	PARAMETROS DE SAÍDA DO SISTEMA.....	87
4.1.6	ESCOLHA DO SISTEMA.....	88
4.2	PREMISSAS RELATIVAS AO SISTEMA.....	90
4.3	MOTOR.....	91
4.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA IMPLEMENTADA.....	94
4.4.1	DIAGRAMA DE BLOCO.....	94
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
5	RESULTADOS.....	99
5.1	CICLO EM SATURAÇÃO.....	99
5.1.1	REATOR 1.....	99
5.1.2	CONDENSADOR.....	103
5.1.3	EVAPORADOR.....	105
5.1.4	REATOR 2.....	107
5.2	CICLO REDUZIDO.....	111
5.2.1	REATOR 1.....	112
5.2.2	CONDENSADOR.....	113
5.2.3	EVAPORADOR.....	114
5.2.4	REATOR 2.....	116
5.3	CICLO EFICIENTE.....	117
5.3.1	REATOR 1.....	117
5.3.2	CONDENSADOR.....	118
5.3.3	EVAPORADOR.....	120
5.3.4	REATOR 2.....	122
5.4	PARÂMETROS DE DESEMPENHO.....	122

5.5	DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS	126
6	CONCLUSÕES.....	128
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
	ANEXO A.....	141
	ANEXO B.....	145

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes evoluções humanas foi a invenção do automóvel e dos sistemas de refrigeração. Cidades e países se tornaram mais próximos com os carros e caminhões criados, rotas eram feitas de maneira mais rápida e o transporte expandiu entre as camadas da sociedade, não se relegando aos mais ricos, se tornando verdadeiramente público. A criação da geladeira e do freezer permitiu a conservação prolongada de alimentos e medicamentos, garantindo a saúde da população, e a criação dos sistemas de ar-condicionado garantiam o conforto térmico dos seres humanos e a garantia de funcionamento de sistemas eletrônicos.

No entanto, como quase tudo que existe, seus impactos são sentidos, igualmente, de maneira negativa. Para o funcionamento destas tecnologias, demanda-se energia, cuja disponibilidade está, a cada dia, mais limitada, especialmente por conta de ser baseada, majoritariamente, em fontes não renováveis.

Adicionalmente, o setor de transportes é responsável pelo consumo de mais da metade da demanda global de petróleo e um quarto das emissões de CO₂ (Miller *et al.*, 2017). Veículos automotores também são alguns dos responsáveis pela poluição do ar e diversos problemas de saúde vistos em grandes metrópoles e centros urbanos.

Os sistemas de ar-condicionado, quando aplicados a automóveis, utilizam a potência mecânica produzida pelo motor para acionar o compressor e dar continuidade ao ciclo. Por isso, não só o sistema está ligado à queima de combustível intrínseca ao veículo, mas também é responsável pelo aumento de carga sobre o motor e, conseqüentemente, o consumo médio de combustível.

Tais pontos críticos em termos de emissões, perda de calor e sua correlação com problemas ambientais foram fundamentais para a criação de teorias de desenvolvimento sustentáveis e de políticas mundiais e locais. Baseado nessa teoria, muitos pesquisadores perceberam que era possível inovar e transformar produtos em lucro, enquanto se respeita o meio ambiente.

No Brasil, a primeira política de desenvolvimento sustentável focado em veículos foi o PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores), em 1986, definindo os primeiros limites de emissão para veículos leves (Mendes, 2018). Em 2017, o programa foi substituído pelo Inovar-Auto, com o objetivo de não só definir limites de emissões, mas também criar competitividade no setor

automotivo, investir na produção de veículos econômicos e seguros e em P&D. Por fim, atualmente, o programa em voga é o chamado ROTA2030, criado para defender novas metas de eficiência, P&D, inclusão de novos recursos de segurança e outros aspectos sustentáveis nos automóveis (Mendes, 2018).

Assim, os sistemas de exaustão e o projeto dos motores foram otimizados, de modo que uma menor quantidade de partículas poluentes sejam emitidas para o meio ambiente e queima seja melhorada, perdendo a quantidade mínima de energia possível em forma de calor, incrementando o desempenho e a eficiência dos motores e do veículo como um todo.

No entanto, sistemas de ar-condicionado automotivos ainda são dependentes da queima contínua de combustível para fornecer energia ao compressor, enquanto calor se perde para o ar atmosférico. Essa é uma das várias razões pela qual seria interessante a pesquisa de novos métodos de refrigeração, mais sustentáveis e eficientes se comparados aos sistemas por compressão-vapor.

Entre estas novas possibilidades, os sistemas de refrigeração acionados termicamente são uma boa solução para reduzir a emissão de gases poluentes e reutilizar boa parte do calor perdido durante a combustão, enquanto fornece uma temperatura confortável para o usuário, como, por exemplo, o ciclo de refrigeração por adsorção (Rezk *et al.*, 2014).

Esse ciclo consiste de um trocador de calor denominado de reator, que, ao ser aquecido, opera como um compressor convencional. A fonte de calor utilizada para o aquecimento pode ter várias origens, que nas aplicações em automóveis, provém do calor perdido durante o processo de combustão dentro do motor, seja através dos gases de exaustão e/ou do sistema de arrefecimento.

Ele pode trabalhar em diferentes temperaturas, o que permite que ele seja alimentado tanto por gases de exaustão quanto pelo sistema de arrefecimento automotivo, mantendo um grau de condicionamento de ar mesmo em baixas rotações. É, também, praticamente silencioso, com poucas partes móveis, simples de se construir e não requer muita manutenção, sendo fácil de manter e evitando custos extras para serviços durante a revisão (Rezk *et al.*, 2014).

No entanto, a tecnologia ainda apresenta alguns desafios, especialmente devido à intermitência do ciclo e sua baixa eficiência, que ainda é menor que a de sistemas de

compressão a vapor devido às propriedades limitantes dos pares de trabalho adsorventes-adsorvatos.

A continuidade do sistema é dependente da quantidade de reatores no ciclo e a geometria deste é restrita não só pelos exemplares disponíveis no mercado, como também pela disposição no veículo.

Fatores como a fonte de calor utilizada, as grandes variações de pares de trabalho que podem ser usados, os diferentes e complexos tipos de ciclo que podem ser testados e emparelhados, os tipos de reatores disponíveis no mercado e a possibilidade de personalização destes, se correlacionam e são determinantes para a melhoria de sua eficiência e continuidade.

Tais fatores, quando bem escolhidos, com consciência da relação entre estes e como se afetam, podem otimizar o processo e torná-lo mais adaptado a um sistema veicular.

Assim, de modo a determinar o melhor sistema para aplicação em veículos, analisaram-se quatro fatores importantes para a escolha correta: a fonte de calor, os pares de trabalho, os ciclos térmicos e tipos de reatores, analisados e escolhidos entre as diversas opções existentes.

A partir daí, estabeleceu-se o sistema mais interessante para aplicação em um automóvel e ele foi testado através de simulação numérica, de modo a se determinar o possível sucesso no condicionamento de ar e os aspectos que podem ser melhorados ou alterados para torná-lo viável na produção de grande escala comercial.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Pretende-se, neste trabalho, caracterizar um sistema de climatização por adsorção automotivo, considerando os principais fatores relevantes para esse sistema (fonte de calor, pares de trabalho, tipo de ciclo e modelos de reatores), e avaliar a sua viabilidade técnica, considerando o seu desempenho e a sua interferência no veículo.

Os objetivos específicos:

- Analisar as principais características adequadas ao sistema de condicionamento de ar por adsorção aplicado a veículos e as relações entre eles;

- Propor um sistema a ser analisado em novos estudos, de modo a se verificar resultados teóricos mais próximos daqueles desejados;
- Simular numericamente o sistema escolhido de modo a determinar a possibilidade de sucesso deste tipo de ciclo em um veículo;
- Avaliar as possíveis modificações que podem ser feitas à simulação e qual impacto teria ao sistema.
- Determinar a viabilidade do sistema estudado considerando o cenário tecnológico e econômico atual.

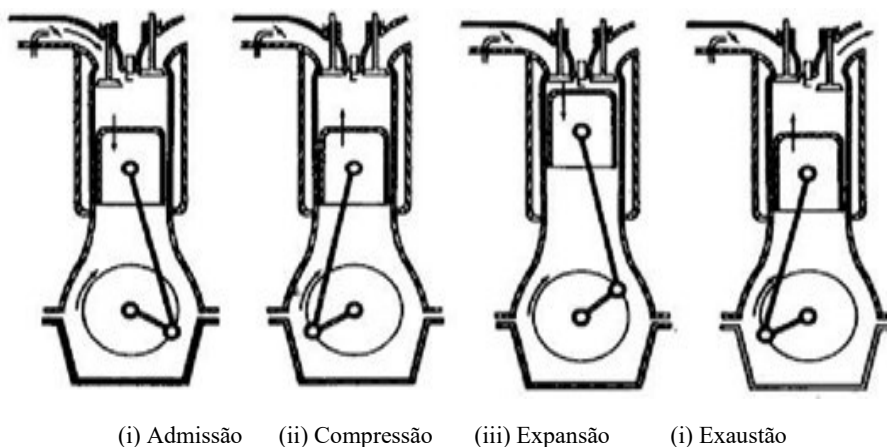
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se, na primeira seção, uma revisão sobre o funcionamento dos motores de combustão interna e os combustíveis utilizados nestes, bem como sobre as perdas de calor e desafios atuais em termos de desempenho e emissões de gases provenientes da combustão. Na sequência, destacam-se os princípios termodinâmicos e características próprias do ciclo de adsorção escolhido como tema para este trabalho. Por fim, são apresentados os principais pares de trabalho utilizados no processo de refrigeração adsortiva, os fundamentos de simulação numérica e as possibilidades envolvidas.

2.1 INTRODUÇÃO AO VEÍCULO AUTOMOTOR

De acordo com Ganesan (2008), os motores de ignição por centelha são o tipo mais comum de motor utilizado em veículos hoje em dia. Nele, o ciclo de operação do pistão é completo após 4 ciclos ou duas revoluções completas do virabrequim (Figura 1), nesta ordem: (i) admissão; (ii) compressão; (iii) expansão e (iv) exaustão.

Figura 1 - Ciclo de operação de um motor a combustão interna por centelha



Fonte: Ganesan (2008)

Na admissão, o pistão encontra-se no Ponto Morto Superior (PMS) dentro do cilindro, descendendo para o Ponto Morto Inferior (PMI), trazendo para a câmara a mistura fresca de combustível e ar. Durante a compressão, a mistura dentro da câmara é comprimida pelo pistão do PMI até o PMS, quando uma centelha é introduzida e inicia

o processo da combustão da mistura de combustível e ar dentro do cilindro, aumentando tanto a pressão quanto a temperatura na câmara de combustão (Heywood, 2018).

Após o PMS da compressão, inicia-se o tempo de expansão, no qual os gases em combustão se expandem, empurrando o pistão para baixo e produzindo trabalho útil no eixo virabrequim. Por fim, durante a exaustão, a válvula de exaustão é aberta e os gases queimados são bombeados para fora do cilindro através do movimento do pistão desde o PMI até o PMS, instante no qual inicia-se um novo tempo de admissão.

Além de desenvolvimentos em termos de motores, que se estenderam ao longo dos séculos, a partir do século XX, as antigas carroças foram sendo aperfeiçoada em busca de aerodinâmica, criando automóveis cujo assoalho e a carroceria eram mais baixos que o eixo das rodas. Lentamente, os automóveis foram deixando de ter uma importância meramente prática, de transporte do ponto A ao ponto B, para também se tornarem veículos bonitos, eficientes e velozes, que poderiam ser adquiridos por todos, graças a Henry Ford (AEAARP, 2016).

Por fim, atualmente, busca-se otimizar o veículo como um sistema e não só seu motor de combustão interna, visando melhorar seu desempenho e eficiência, enquanto se busca aproveitar, a maior parcela de energia proveniente da queima de combustível. Mesmo com todas as melhorias envolvidas e o avanço tecnológico, o calor produzido na combustão continua sendo perdido para o ambiente através de dois sistemas principais, que serão tratados a seguir.

A temperatura de pico durante a combustão dentro da câmara pode atingir valores próximos a 2500K e as temperaturas máximas que os metais dessa região conseguem alcançar sem alterar sua geometria e suas propriedades são limitadas a valores bem inferiores, necessitando, portanto, de refrigeração da parte superior da câmara de combustão (cabeçote), nas paredes do cilindro e no pistão (Heywood, 2018).

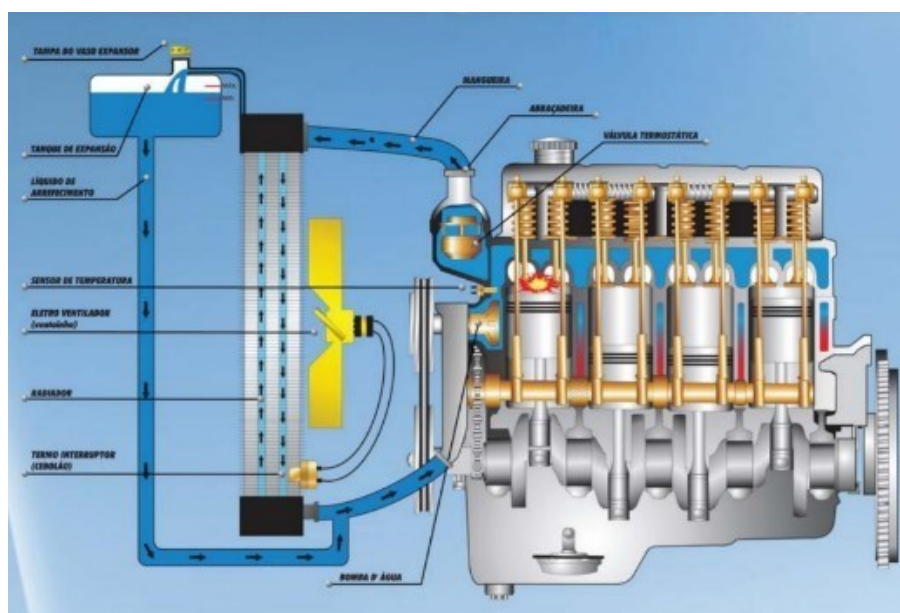
Assim, o motor como um todo está submetido a diversas regiões de fluxo de calor que deve ser controlado de modo a se evitar danos aos seus componentes e sistemas. Desta maneira, a transferência de calor dentro de um motor a combustão interna impacta o desempenho do motor, sua eficiência e suas emissões (Heywood, 2018).

O controle da transferência de calor em um motor será dado, portanto, pelo sistema de arrefecimento (Figura 2). Como explica o informativo do Sindirepa (2012), um líquido de arrefecimento circula sobre pressão em galerias internas no motor,

trocando calor e indo para o radiador, onde libera calor para o ambiente, resfriando o líquido e permitindo que continue a circulação.

Assim, Zucchi (2012) lista alguns requerimentos que devem ser obtidos pelo sistema de arrefecimento, tais como: dissipar calor suficiente durante toda e qualquer operação do motor, manter temperaturas críticas, reduzir tempo necessário para atingir a temperatura ideal do motor para partida a frio, entre outros.

Figura 2 - Sistema de arrefecimento veicular



Fonte: Sindirepa - SP (2012)

Em relação às temperaturas médias do sistema de arrefecimento variam em relação à carga aplicada no motor, sendo que as temperaturas para o sistema à compressão são menores, variando entre 89°C e 94°C (Iskandar, 2011). Para motores a centelha, a temperatura ótima estaria entre 90°C e 105°C (Silva, 2019).

O sistema de arrefecimento é pressurizado, buscando-se aumentar a temperatura de ebulição do fluido e, conseqüentemente, a sua capacidade de transportar energia ainda no estado líquido, favorecendo a operação do trocador de calor (radiador) devido ao maior gradiente térmico entre os fluidos de trabalho. Para um motor de ignição a centelha, a pressão interna do sistema varia entre 1,0 e 1,4 bar (Iskandar, 2011).

A vazão do líquido de arrefecimento no sistema depende da rotação do motor, visto que a bomba que promove a circulação forçada deste fluido é acionada pelo eixo virabrequim, variando de 0,2 a 1,0 kg/s (Papais, 2013).

Após a perda de calor evidenciada no sistema de arrefecimento automotivo, o outro sistema em que se perde calor advindo da combustão é o sistema de exaustão. Por este sistema, os produtos da combustão são direcionados para pós-tratamento nos conversores catalíticos (catalisadores), onde se reduzem as concentrações dos gases poluentes e para o sistema de atenuação acústica (abafadores de ruído), onde se minimiza a pressão sonora do ruído advindo da combustão.

Como afirmado por Heywood (2018), a temperatura de um gás de exaustão em um motor a centelha pode variar de 300°C a 400°C em marcha lenta e pode chegar a 900°C em cargas e rotação elevadas.

Devido aos diferentes componentes do sistema de exaustão e seus princípios de funcionamento, os gases sofrem um efeito chamado de contrapressão, promovendo uma restrição à saída destes gases do sistema e que pode promover a sua retenção na câmara de combustão e levar a perdas de potência e eficiência. Em média, a pressão média de um coletor de exaustão é cerca de 55 mbar para um motor a compressão e é ligeiramente inferior à este valor em motores de ignição por centelha devido à natureza do combustível (Squaiella, 2010).

Devido ao princípio de conservação de massa, a vazão dos gases de exaustão será equivalente à soma da vazão de ar e a vazão de combustível na admissão. Ganesan (2008) admite que, em motores por centelha, normalmente observa-se um aumento da vazão mássica de ar com o aumento da rotação, podendo variar de 0,006 kg/s a 0,015 kg/s (Serpa *et al.*, 2019).

Alguns resultados obtidos em pesquisas que mediram o escoamento no coletor de exaustão viram vazões dos gases de exaustão variando entre 0,03 e 0,04 kg/s, dependendo da carga, para um motor a compressão (Brito *et al.*, 2014).

2.1.1 DESAFIOS ENCONTRADOS ATUALMENTE PELA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Heywood (2018) explica que os motores de combustão interna são as principais fontes de poluição urbana no mundo. O seu gás de exaustão contém óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, monóxido de carbono, além de compostos orgânicos que não foram completamente queimados, tais como os hidrocarbonetos e materiais particulados.

Cámara (2015) afirma que, de acordo com a Organização Mundial de Saúde, em 2012 cerca de 3,7 milhões de mortes foram atribuídas à poluição atmosférica no mundo.

A principal fonte de materiais particulados nas zonas urbanas da União Europeia são os veículos, sendo a maioria à compressão, utilizando Diesel como combustível.

Desta maneira (Cámara, 2015), cerca de 90% da população europeia está exposta a níveis de poluição alarmantes para a saúde (Tabela 1), sendo que um terço deste valor está acima do permitido por lei. Ao longo dos anos, a indústria conseguiu diminuir esses valores colocando filtros no escapamento do veículo, além de outras estratégias que inclusive impactaram, de maneira positiva, na sua eficiência.

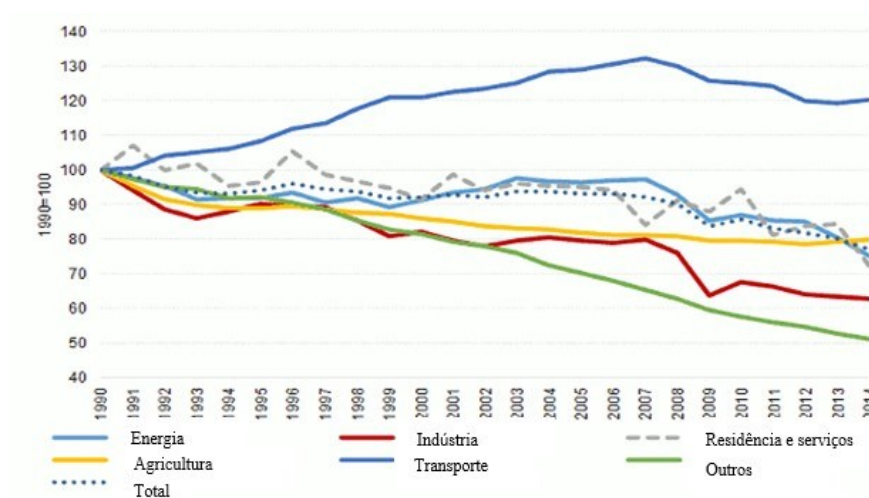
Tabela 1 - Principais poluentes derivados dos gases de exaustão e seu efeito na saúde humana

Poluentes	Efeitos na saúde
CO (monóxido de carbono)	Diminui a capacidade do sangue de transportar O ₂ e pode causar sufocação
SO ₂ (dióxido de enxofre)	Altamente solúvel em água, sendo absorvido pelas mucosas do corpo humano. Na atmosfera, transformam-se em sulfatos, que causam a chuva ácida.
MP (material particulado)	As partículas podem atingir as vias respiratórias, dificultando a troca de gases no pulmão, agravando quadros alérgicos.
HC (hidrocarbonetos)	Podem irritar as mucosas do corpo humano. Adicionalmente, alguns componentes são carcinogênicos (como o benzeno).
NO ₂ (dióxido de nitrogênio)	Atinge a periferia do pulmão, sendo extremamente tóxico.

Fonte: Silva, Moacir Ferreira da. Emissão de metais por veículos automotores e seus efeitos à saúde pública. 2007

Regulamentações aplicadas pela União Europeia, Japão e Estados Unidos obrigam a diminuição de emissões, principalmente de CO₂, elevando a pressão sobre a indústria automotiva (Kastensson, 2013). Na Europa, por exemplo, está sendo limitado a emissão de CO₂ para 130g/km até 2015 e para 95 g/km até 2020, o que é significativo para a região, cujo principal protagonista na emissão de dióxido de carbono é o setor de transportes (Figura 3).

Figura 3 - Emissões de CO2 na Europa



Fonte: EEA

De acordo com o U.S. Department of Energy (2015), cerca de 1/3 dos gases poluentes emitidos nos Estados Unidos são originários dos meios de transporte e os veículos automotores são responsáveis por cerca de 85% do consumo de petróleo em território americano. Assim, a busca por melhorar a eficiência destes motores está intimamente ligada com melhora de custos e economia de combustíveis.

Atualmente, a indústria automotiva melhorou o desempenho dos veículos ao diminuir o tamanho do motor e aumentar sua potência (U.S. Department of Energy, 2015). No entanto, ainda restam muitas oportunidades para se melhorar a eficiência dos motores e reduzir suas emissões. Tais motores apresentam altas taxas de perda de calor durante a combustão/expansão, limites estruturais dentro do motor que controlam a pressão dentro do cilindro, energia derivada dos gases de escape mal explorados e fricções mecânicas.

Os problemas não se resumem na alteração da tecnologia a fim de se melhorar a eficiência do combustível e reduzir as emissões de gases poluentes (Gatti Junior & Barbosa, 2012). Também se torna necessária a mudança de valores e costumes dos consumidores, além de fortalecimento de regulamentações e do desenvolvimento da indústria como um todo.

2.2 TERMODINÂMICA ASSOCIADA AO CICLO DE REFRIGERAÇÃO

Como definido por Borgnakke & Sonntag (2013), durante um processo de aquecimento ou resfriamento, transfere-se energia de um sistema para o outro (massa), ocasionando mudança nas condições iniciais, estas expressas por propriedades termodinâmicas.

Para se entender, propriamente, o ciclo de refrigeração, deve-se entrar em alguns aspectos relativos a suas propriedades, leis fundamentais, ciclos ideais e os diferentes métodos aplicados.

2.2.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO

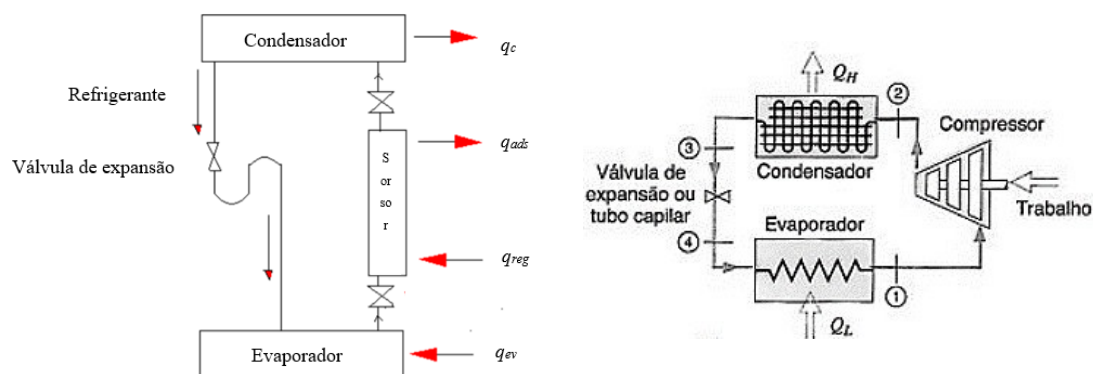
O ciclo é composto por uma camada de adsorvente, chamado sorsor, em contato com o adsorvato, um condensador, um evaporador e uma válvula de expansão, muito parecido com o ciclo de refrigeração por compressão de vapor (Elsheniti *et al.*, 2018). O sorsor contém um adsorvente, que é um material extremamente poroso, com grande superfície interna.

Knaebel (2004) elucida que os poros podem ser classificados como microporos ($dp < 20\text{Å}$), mesoporos ($20\text{Å} \leq dp < 500\text{Å}$), e macroporos ($dp \geq 500\text{Å}$). Materiais que apresentam diferentes classificações de poros podem afetar o processo de adsorção, pois aumentam ou diminuem a área de contato, influenciando a quantidade de material adsorvido.

O adsorvente se conecta ao adsorvato através de algo conhecido como “Propriedade adsortiva”, o que permite que eles funcionem como um refrigerante neste ciclo (Knaebel, 2004). É por isso que os adsorventes e os adsorvatos são estudados em pares e o sucesso e eficiência do ciclo dependem da sua interação.

As opções de adsorventes e adsorvatos disponíveis para o uso em um sistema de refrigeração adsortivo são vastas e com inúmeras possibilidades de combinação entre eles. Além disso, as propriedades críticas destes, que determinam a viabilidade de um sistema, são tão dependentes do pareamento correto e das condições iniciais do sistema, que optou-se por discutir os pares mais conhecidos e o futuro dos adsorventes em uma seção a parte.

Figura 4 - Um sistema de refrigeração por adsorção típico (esquerda) comparado com um sistema de refrigeração por compressão à vapor (direita)



Fonte: Kumar & Kapilan (2020) e Borgnakke & Sonntag (2013)

O ciclo por adsorção é muito semelhante ao ciclo por compressão de vapor (Figura 4), o mais utilizado em sistemas de ar-condicionado e refrigeração em geral. Este ciclo, descrito por Borgnakke & Sonntag (2013), é composto por um compressor, condensador, uma válvula de expansão ou um tubo capilar e um evaporador. O compressor trabalha o fluido, aumentando a sua pressão, permitindo que este execute as trocas de calor fundamentais no condensador e no evaporador.

No ciclo, o sorsor é aquecido (q_{reg}) de modo a liberar o adsorvato, o que acarreta um aumento na pressão local (Rezk *et al.*, 2014). A temperatura se eleva continuamente até que o condensador é conectado aos sorsor, permitindo que o adsorvato liberado em forma de vapor condense, liberando calor (q_c) e viaje até o evaporador, onde o adsorvato recebe calor do meio (q_{ev}).

Com uma baixa concentração de adsorvato, o sorsor libera calor (q_{ads}), fazendo com que a temperatura do reator caia. Enquanto esfria, o sorsor é conectado ao evaporador e volta a adsorver o adsorvato, refrigerando o ambiente através do processo de evaporação (Rezk *et al.*, 2014).

A eficiência do ciclo de refrigeração por adsorção, como demonstrada por Gwadera & Kupiec (2011) é dada através do COP e da capacidade de refrigeração (SCP - *specific cooling capacity*, em inglês).

Assim sendo, o COP pode ser dado como visto na Equação 1:

$$COP = \frac{Q_{ev}}{Q_{ads} + Q_{des}} \quad (1)$$

sendo,

Q_{ev} o calor absorvido no evaporador

Q_{ads} o calor perdido durante o processo de adsorção

Q_{des} o calor ganho durante o processo de dessorção (ou seja, quando o adsorvato foi liberado do adsorvente)

No entanto, em sistemas por adsorção, tal medida não é tão eficaz, devido às trocas de calor dentro do reator, o que torna necessário a adição de outro parâmetro.

Assim, utiliza-se o SCP, que se relaciona com a massa do adsorvente e a quantidade de calor retirado do ambiente, se mostrando mais sensível em determinar o real valor de eficiência do sistema (Abdullah *et al.*, 2011).

Já o SCP é dado pela Equação 2:

$$SCP = \frac{W_{ref}}{M_{adsn}} \quad (2)$$

sendo,

W_{ref} a potência de refrigeração

M_{adsn} a massa de adsorvente

Adicionalmente, o SCP se relaciona com outro aspecto fundamental do estudo de sistemas de refrigeração por ciclo de adsorção, especialmente quando aplicado a veículos: a compactidade (Dhabi *et al.*, 2019). Quanto maior o SCP, mais compacto o sistema.

O SCP pode ser aumentado pelo aumento de adsorvato no sistema, pela diferença de entalpia e pela diminuição do tempo de ciclo (Hamdy *et al.*, 2015). Ainda assim, seu aumento é limitado pelo que é chamado de “massa morta” do sistema, ou seja, massa que não atua no processo de adsorção e, portanto, não afeta a troca de calor (Lambert & Jones, 2014).

Por isso que, ao se adicionar mais reatores (adsorvedores) no sistema, melhora-se a intermitência do processo e seu COP, deixando-o mais contínuo, mas diminui o SCP, pois aumenta-se a massa morta presente (Lambert & Jones, 2014).

É a partir dos problemas relacionados com esta “massa morta” que se propõe outro parâmetro importante: a razão da massa de adsorvedor e a massa de adsorvente (Maeda *et al.*, 2018). Assim, quanto maior a razão, maior será a massa total do adsorvedor em relação à massa do adsorvente, demonstrando que existe muito mais “massa morta” presente que massa ativa no processo de adsorção.

Assim, um dos grandes objetivos dos pesquisadores é criar um sistema com COP e SPC altos, enquanto a razão de adsorvedor por massa de adsorvente seja baixa, resfriando o ambiente para a temperatura determinada em projeto (Sharafian & Bharami, 2014).

O ciclo de refrigeração pode ser dividido em ciclos intermitentes e contínuos, sendo que o ciclo intermitente de camada única é o mais básico e o primeiro tipo deste ciclo usado na indústria (Wolak, 2016).

Um ciclo de camada única tem baixa eficiência e funciona de maneira intermitente, o que torna o processo mais lento (Gwadera & Kupiec, 2011). Por essas diversas razões, outros tipos de ciclo foram criados, de modo a se aumentar a eficiência do processo e torná-lo mais rápido.

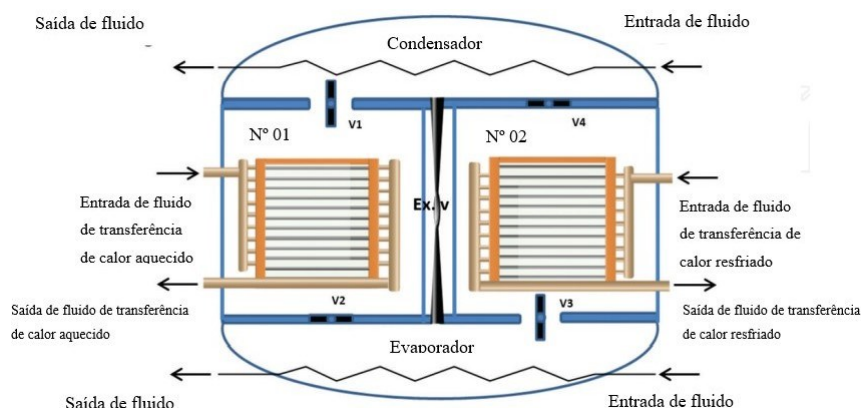
Um destes é o ciclo de recuperação de calor, como citado por Gwadera & Kupiec (2011), que utiliza o calor que seria perdido durante o resfriamento do sorsor para ajudar a pré-aquecer o adsorvente, posteriormente, o que pode aumentar a eficiência em 25%.

Outro seria o ciclo de recuperação de massa, que usa temperaturas e pressões máximas onde ocorre a dessorção e temperaturas e pressões mínimas onde ocorre a adsorção (Gwadera & Kupiec, 2011). As duas áreas estão conectadas, permitindo que mais adsorvato seja adsorvido. Tal ciclo pode ser utilizado com um ciclo de recuperação de calor, apresentando ainda melhor eficiência, ao trabalhar com uma maior variedade de temperaturas no sistema.

O ciclo de duas camadas (Figura 5), mais complexo, apresenta dois adsorvedores, interligados, os quais passam por quatro ciclos distintos de operação: pré-aquecimento, aquecimento (dessorção), pré-resfriamento e resfriamento (adsorção). Tais ciclos são repetidos em série e apresentam os mesmos componentes de um sistema de uma camada (um condensador, um evaporador e uma válvula de expansão), com a diferença de apresentar quatro válvulas e dutos conectores.

Assim, enquanto um fluido quente é utilizado para aquecer o primeiro adsorvedor, o fluido resfriado é utilizado para resfriar o segundo adsorvedor. Depois, o fluido quente é usado no segundo adsorvedor e vice e versa (Elsheniti, 2018).

Figura 5 - Esquema de um ciclo de adsorção com duas camadas



Fonte: Elsheniti (2018)

A partir do momento em que se adiciona um adsorvedor ao ciclo simples, torna mais propícia a utilização de métodos de recuperação de calor e massa, já que sempre haverá um adsorvedor quente resfriando e um frio esquentando, possibilitando a recuperação de calor perdido no ambiente (Elsheniti, 2018).

Conforme são adicionados adsorvedores em um ciclo (transformando-o em um Ciclo de Múltiplas Camadas), além do processo se tornar mais contínuo, também se torna mais complexo, já que o tempo de adsorção ótimo não é múltiplo do número de adsorvedores extras (Wang *et al.*, 2016). Portanto, deve-se ter muito cuidado ao se estudar um ciclo de múltiplas camadas, pois sua continuidade pode ser afetada pela projeção do tempo do processo.

O ciclo de múltiplos estágios também utiliza de mais de um adsorvedor, no entanto, os processos de dessorção e adsorção de cada adsorvedor são conectados de modo que os requisitos de temperatura para a fonte de calor utilizada sejam reduzidos, muitas vezes utilizando-se de outras camadas de adsorção como condensadores (Wang *et al.*, 2016).

O ciclo de adsorção muitas vezes é confundido com o de absorção (Pang *et al.*, 2013), atualmente mais estudado e mais presente no dia a dia do consumidor médio brasileiro.

No entanto, eles apresentam três diferenças básicas: materiais, estado das substâncias e leiaute (Pang *et al.*, 2013). No ciclo por absorção, uma solução conhecida como “base” é usada para diluir o vapor de refrigerante, deixando-o mais fraco. Essa base é, então, regenerada quando o refrigerante começa a evaporar com o calor

adicionado ao sistema. Além disso, o absorvedor e o gerador estão, normalmente, em dois compartimentos diferentes, com um trocador de calor entre eles.

Ciclos por absorção, no geral, têm sido mais estudados e pesquisados nos últimos anos devido ao fato de que tal ciclo gera uma maior capacidade de refrigeração a partir de recuperação de calor se comparado com o ciclo por adsorção, sendo, portanto, uma tecnologia mais madura (Ji *et al.*, 2015). No entanto, o sistema é bem maior e mais complexo, fazendo com que seja mais complicado de inseri-lo em pequenos espaços, como é o caso de veículos automotores.

Para Wang *et al.* (2014), o ciclo por adsorção (especialmente utilizando adsorventes sólidos) é muito simples de se construir e apresenta baixo custo. Além disso sua aplicação é muito interessante em veículos, pois é uma tecnologia compacta que funciona sem muitos problemas em ambientes com vibrações, mudanças de eixo e pancadas (Ji *et al.*, 2015).

2.2.2 TIPOS DE REATORES PARA O CICLO ADSORTIVO

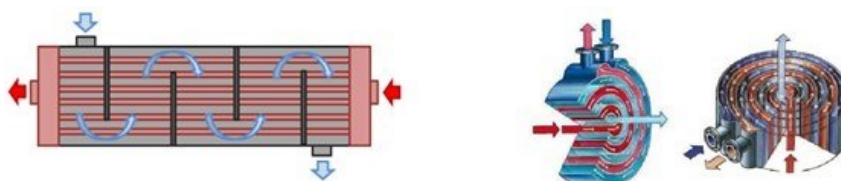
Os reatores, ou adsorvedores, utilizados no ciclo de refrigeração por adsorção, muitas vezes, são trocadores de calor simples. Afinal, o calor advindo da fonte de calor escolhida deve entrar em contato com o adsorvato ligado ao adsorvente e esquentá-lo, de modo a transformá-lo em vapor, aumentando a pressão do ambiente e iniciando, efetivamente, o ciclo. Alguns modelos podem ser vistos como a seguir:

a) Placa Espiral, Casca-e-Tubo e Gancho

No caso do trocador de calor tipo Placa Espiral (Figura 6), o fluido de transferência de calor passa por entre as aletas, enquanto o adsorvente preenche os espaços em espiral (Wang *et al.*, 2014). Sua estrutura é compacta, o que permite a melhor distribuição de calor, apresenta alta densidade do fluxo de calor, além de necessitar de poucos incrementos de área de modo a se aumentar o volume interno. Adicionalmente, é um sistema barato e fácil de ser fabricado.

No caso do trocador tipo Casca-e-Tubo (Figura 6), o fluido do lado do tubo é o meio de troca de calor, sendo que o adsorvente está no lado da casca (Wang *et al.*, 2014). O sistema apresenta uma casca extra, que previne vazamentos devido a altas pressões. Por isso, muitas vezes, é escolhido para ser utilizado com pares de trabalho do tipo carvão-ativado e amônia.

Figura 6 - Trocador de calor do tipo Espiral e Casca e Tubo

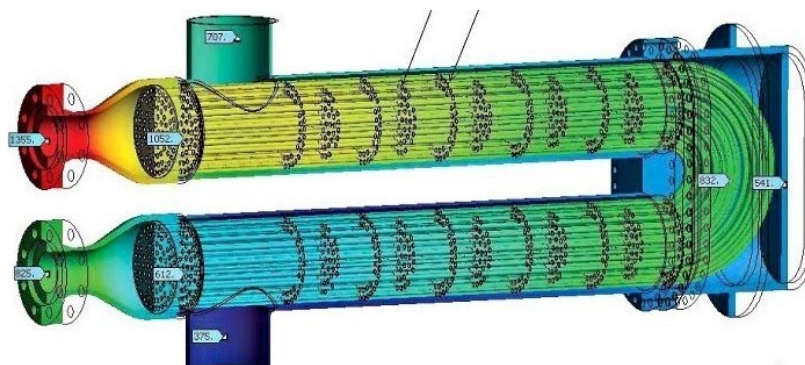


Fonte: Sharafian & Bahrami (2014) e <https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/trocadores-de-calor-espirais>

O que diferencia um trocador de calor do tipo Casca-e-Tubo e um trocador do tipo Gancho são seus fechos (Black, 2000). Os fechos deste último permitem que o feixe de tubos em seu interior seja removível, permitindo, portanto, a expansão de sua capacidade térmica sem a necessidade de se trocar juntas (Figura 7).

Estes apresentam maiores valores de COP e protege o sistema de vazamentos, como o trocador Casca-e-Tubo (Maeda *et al.*, 2018).

Figura 7 - Trocador de calor do tipo Gancho



Fonte: <http://www.usa.brauntechnologies.com/specialty-exchangers/hairpin>

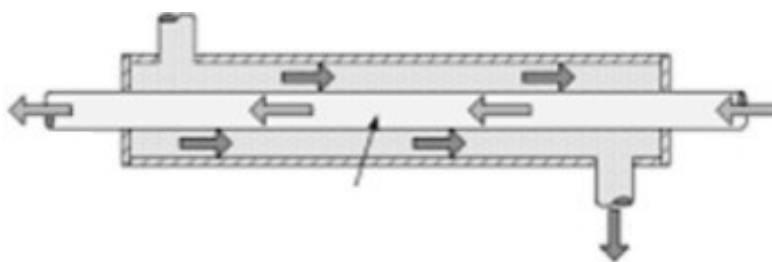
No entanto, normalmente, tais trocadores de calor não são considerados na aplicação em automóveis (Sharafian & Bharami, 2014). A razão de massa do adsorvedor em relação ao adsorvente utilizado é muito alta, o que faz com que o sistema seja denso e ocupe muito espaço, espaço que é extremamente limitado pelas dimensões do veículo.

Além disso, seus resultados para SCP são relativamente baixos, apesar dos altos valores de COP (Sharafian & Bharami, 2014). Como o COP é uma medida imprecisa para sistemas de refrigeração por adsorção, dá-se preferência para aqueles trocadores de calor que apresentam altos resultados para o SCP.

b) Tubo Anular

O trocador de calor tipo Tubo Anular (Figura 8) apresenta o adsorvente dentro dos tubos internos, sendo que o fluido de troca de calor passa pelo tubo externo. Esse tipo de *design* de adsorvedores trabalha bem com baixas capacidades de refrigeração (Sharafian & Bharami, 2014). Assim, para que este tipo de reator obtenha sucesso para refrigerar um automóvel, seriam necessário vários adsorvedores.

Figura 8 - Trocador de calor do tipo Tubo Anular



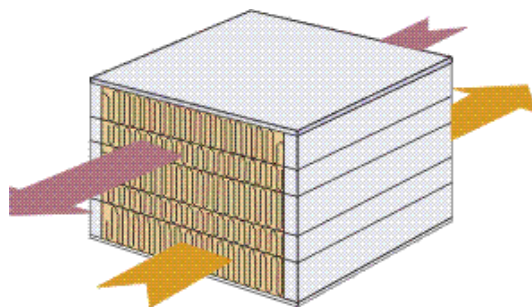
Fonte: www.kau.edu.sa

c) Placa Aletada

O trocador de calor tipo Placa Aletada (Figura 9) faz com que o fluido passe pelas aletas, enquanto o adsorvente se encontra dentro das placas (Sharafian & Bharami, 2014). Pode-se chegar a valores de COP próximos de 0,36 com este *design*, além de SCP entre próximo de 75 W/kg e razão da massa de adsorvedor e adsorvente média de 5,5.

Tal placa, devido à sua geometria, apresenta grande quantidade de unidades que precisam ser empilhadas uma em cima das outras para um bom resultado do processo e, devido à vibração veicular, apresenta dificuldades em ser selada a vácuo, o que impede o uso de tal *design* com certos pares de trabalho, como é o caso de carvão-ativado com metanol e amônia (Sharafian & Bharami, 2014).

Figura 9 - Trocador de calor do tipo Placa Aletada



Fonte: <http://www.thermopedia.com/content/1036/>

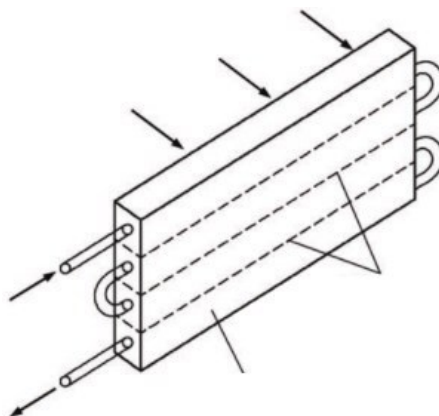
d) Tubo Aletado

Neste caso, os tubos estão preenchidos por adsorvente, enquanto o fluido de transferência atravessa as aletas (Figura 10). Pode-se chegar a valores de COP entre 0,25 e 0,37 com este *design*, além de SCP entre 80 e 150 W/kg e razão da massa de adsorvedor e adsorvente entre 3,45 e 3,6, variando com o tipo de par de trabalho utilizado (Sharafian & Bharami, 2014).

O uso de Tubo Aletado em sistemas de refrigeração por adsorção não é ideal (Sharafian & Bharami, 2014). Ao se utilizar um trocador de calor padrão, aumenta-se a massa e o volume do adsorvedor, para que esse chegue à capacidade de refrigeração necessária.

Por isso, muitas vezes, prefere-se criar Tubos Aletados adaptados para a situação de reaproveitamento de calor, podendo-se chegar a valores superiores de SCP e menores razões se comparados com o tipo padrão.

Figura 10 - Trocador de calor do tipo Tubo Aletado



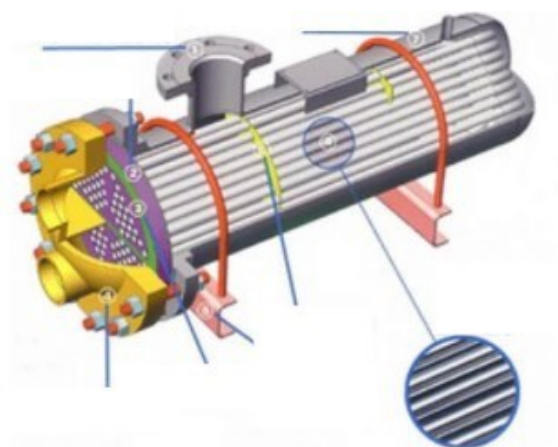
Fonte: Long *et al.* (2016)

e) Tubo-Placa

Semelhante ao tubo aletado, tal trocador de calor é mais compacto do que o anterior (Sharafian & Bharami, 2014). Seus resultados para COP, SCP e razão são bem semelhantes ao do Tubo Aletado.

No entanto, por necessitar que o adsorvato seja capaz de penetrar no interior do sistema, a resistência à transferência de massa no reator aumenta significativamente, tornando somente o uso com carvão-ativado e amônia viável, afinal, tal sistema apresenta altas pressões capazes de fluir o adsorvato com facilidade para seu interior (Figura 11).

Figura 11 - Trocador de calor do tipo Tubo-Placa



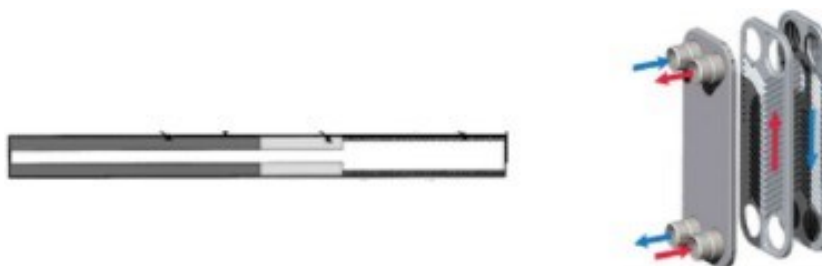
Fonte: <https://www.steeljrv.com/process-for-connecting-heat-exchange-tube-and-tube-plate-in-shell-and-tube-heat-exchanger.html>

f) Tubo Simples e Placa

Tanto o trocador tipo Tubo Simples quanto o trocador tipo Placa (Figura 12) funcionam de maneira muito semelhante ao Tubo Anular e a Placa Aletada (Sharafian & Bharami, 2014). Esses dois tipos de trocadores de calor não são recomendáveis de se utilizar em veículos automotores.

Apesar de ter um alto SCP, a razão entre a massa do adsorvedor e a massa do adsorvente é muito alta, o que inviabiliza seu uso ao tornar o sistema muito pesado e fora das dimensões necessárias para um veículo.

Figura 12 - Trocador de calor do tipo Tubo Simples e tipo Placa



Fonte: Sharafian & Bharami (2014)

2.2.3 A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA EM UM VEÍCULO

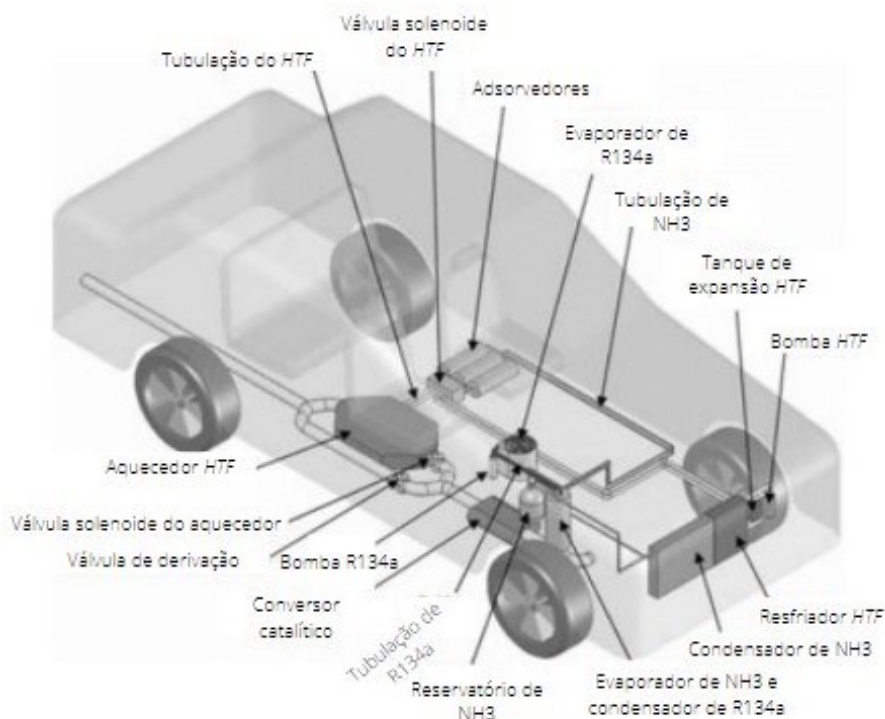
Uma das grandes limitações do sistema de condicionamento de ar por adsorção, atualmente, é o seu tamanho. Necessita-se, para manter o sistema contínuo, de mais de um reator e, muitas vezes, para permitir uma refrigeração condizente com o proposto, necessita-se de uma grande quantidade de adsorvente e adsorvato, transformando o reator em um equipamento grande e pesado.

Isso é uma inconveniência quando aplicado a automóveis, que apresentam um espaço disponível limitado, considerando que se pretende manter um ambiente confortável para o motorista e seus passageiros.

Ainda assim, é possível embutir o sistema dentro de tal espaço limitado, aproveitando alguns espaços subutilizados ou diminuindo áreas, como é o caso do espaço de bagageiro.

Lambert e Jones (2005), por exemplo, sugerem dispor dos reatores embaixo do banco do motorista, enquanto o aquecedor dos reatores estaria diretamente abaixo do banco do passageiro (Figura 13).

Figura 13 - Esquema do sistema de condicionamento automotivo por adsorção proposto aplicado abaixo do assento



Fonte: Lambert e Jones (2005)

Haas et al. (2019) aproveitou o espaço do bagageiro de um veículo do tipo *hatch*, dispondo dos reatores, dispositivos de aquecimento e tanque de combustível auxiliar nesta área.

Magnetto *et al.* (2011) uniu ambos os conceitos, embutindo os reatores no bagageiro, enquanto que outros dispositivos críticos (como é o caso do trocador de calor de ar e o radiador extra necessário para se resfriar o líquido de arrefecimento utilizado nos reatores), foram dispostos embaixo do volante e no para-choque do veículo, respectivamente (Figura 14).

Figura 14 - Esquema do sistema de condicionamento automotivo por adsorção proposto, aplicado no bagageiro, com radiador extra



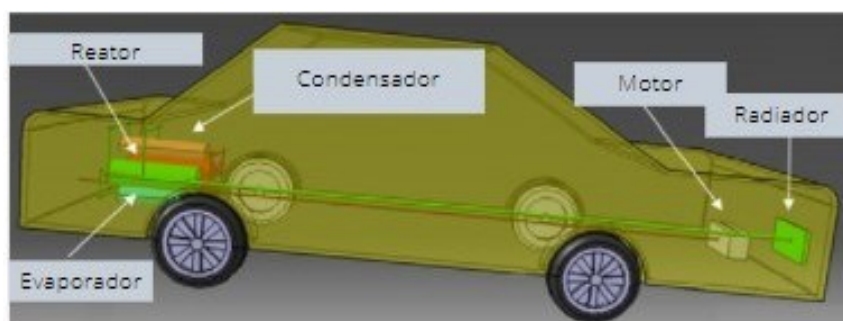
Fonte: Magnetto *et al.* (2011)

Destaca-se que, no caso do trabalho de Magnetto *et al.* (2011), escolheu-se utilizar o líquido de arrefecimento como o fluido de resfriamento do reator, necessitando que se melhorasse o trocador de calor responsável pela expulsão do calor para o ambiente ou combinasse o sistema em mais de um radiador.

Outras opções de líquido são possíveis, como é o caso do R134a ou da água. No entanto, o líquido de arrefecimento evita a inclusão de um volume extra de líquido, pois já está presente no veículo. Neste mesmo raciocínio, o combustível utilizado no motor seria um fluido interessante para se utilizar, apesar de que não foram encontrados estudos aplicando esta alternativa no sistema de refrigeração por adsorção.

A aplicação dos reatores no bagageiro é uma constante na maior parte dos estudos experimentais, demonstrando a predileção dos pesquisadores e a simplicidade de tal leiaute, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Esquema do sistema de condicionamento automotivo por adsorção proposto aplicado no bagageiro, sem radiador extra



Fonte: Ali e Chakraborty (2015)

Ainda assim, a grande maioria dos trabalhos experimentais consistem de testes em bancada, o que permite esquematizar livremente o sistema, posicionando os equipamentos de acordo com a ordem do ciclo. Somente em algumas pesquisas, que estão validando modelos comprovadamente viáveis em bancada, que se questiona e elabora um plano de alocação do sistema de refrigeração por adsorção e outros materiais extras que poderão ser necessários (como um trocador de calor mais potente, um reservatório de fluido para troca de calor ou um radiador extra).

2.2.4 A IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO DE AR

Atualmente, como afirma Santos (2005), as pessoas estão cada vez mais passando mais tempo se deslocando dentro de um automóvel, muitas vezes trabalhando ou estudando enquanto fazem isso.

Um automóvel está sujeito à uma grande incidência solar e insolação adicional por conta dos bancos em seu interior (Santos, 2005). As saídas de ar são pequenas e o espaço confinado prejudica a circulação de ar.

Antigamente, o sistema de ar-condicionado automotivo era considerado um luxo (Itao, 2005). Afinal, o conforto térmico conseguia ser promovido com o uso de janelas basculantes, quebra ventos e entradas de ar (Santos, 2005), garantindo o conforto, mas também a segurança do usuário, ao impedir que insetos e outros elementos estranhos entrassem no veículo.

Atualmente, em um mundo cada vez mais perigoso, o uso do sistema de condicionamento de ar otimizou não só o conforto térmico, como também garantiu segurança do ocupante .

Isso se deve ao fato de o sistema de ar-condicionado do veículo permitir que as janelas permaneçam fechadas, coibindo o ataque de ladrões (Itao, 2005).

A atenção dos motoristas também é impactada pelo uso do sistema de condicionamento de ar. Ao se reduzir o estresse térmico do motorista, derivado de mudanças constantes de temperatura, permite-se que este se concentre completamente ao trânsito local (Itao, 2005). Adicionalmente, mantendo o motorista a temperaturas entre 18,5°C e 21,5°C, abaixo da condição de conforto, garante a atenção do motorista por estar sentindo um pouco de frio.

O sistema de condicionamento de ar, portanto, fornece conforto térmico suficiente para que o automóvel se torne um ambiente tranquilo e agradável para o usuário que o frequenta.

Como destacado por Gaziolla e Gomes (2010), a importância do ar-condicionado automotivo é incrementada em países tropicais como o Brasil, garantindo uma temperatura confortável em regiões como o Norte e Nordeste cujas temperaturas elevadas se mantém ao longo do ano todo ou até mesmo no Sudeste, onde os verões são marcados por chuvas e calor intenso.

No entanto, para a realidade brasileira, muitas vezes, o acréscimo do sistema de ar-condicionado como item de série no veículo aumenta significativamente o custo do automóvel, muitas vezes inviabilizando a compra deste ou forçando o usuário a comprar um veículo sem o sistema acoplado, colocando tanto o usuário quanto terceiros em risco (Itao, 2005).

Desta maneira, é interessante para as montadoras de automóveis elaborarem sistemas de condicionamento de ar que sejam acessíveis para a realidade brasileira, permitindo que uma maior camada da população desfrute dos benefícios trazidos pelo sistema, mas que, ao mesmo tempo, funcionem de acordo com o projetado.

Para se projetar tal sistema corretamente, portanto, deve-se considerar o conforto térmico destinado ao usuário, que é dependente de vários fatores, tais como idade, saúde e nível metabólico (Stoecker & Jones, 1985). O mesmo ambiente que parece ser confortável para uma pessoa saudável pode ser desconfortável para uma pessoa doente, por exemplo.

Também de acordo com Stoecker & Jones (1985), não se deve ignorar as características do envoltório que se pretende climatizar, de modo a fornecer um ambiente seguro e confortável para aqueles que irão utilizá-lo.

2.3 OS PARES DE TRABALHO TÍPICOS DO SISTEMA ESTUDADO

A adsorção pode ser dividida em processos físicos e químicos (Wang *et al.*, 2014). A adsorção física ocorre a partir dos princípios da força de Van der Waals entre as moléculas do adsorvente (a substância sólida que adsorve o líquido refrigerante) e do adsorvato (adsorvido pela substância porosa, responsável pelo processo de refrigeração em si).

A adsorção química se baseia na reação entre o adsorvato e a superfície das moléculas do adsorvente (Wang *et al.*, 2014). Neste caso, somente uma camada de adsorvato reage com o adsorvente químico e os adsorventes e adsorvatos não conseguem manter seu estado original.

Os adsorventes compósitos, como descritos por Wang *et al.* (2014), são adsorventes químicos combinados com meios porosos, com o objetivo de melhorar o desempenho de transferência de calor e massa dos adsorventes químicos originais (Sharafian & Bahrami, 2014).

A escolha do tipo de adsorção ideal e dos adsorventes e adsorvatos (também conhecidos como pares de trabalho) é extremamente importante, pois o resultado do processo de adsorção depende das propriedades do par, em conjunto (Younes *et al.*, 2016).

Para o ciclo de refrigeração por adsorção, uma grande quantidade de adsorvato (também conhecido como líquido refrigerante) precisa mudar de estado durante a sequência de processos, necessitando de um grande calor latente de vaporização, de modo a aumentar a capacidade de refrigeração do ciclo (Younes *et al.*, 2016). Além disso, o adsorvato não pode se transformar em sólido nas temperaturas e pressões consideradas ao longo do ciclo e não podem ser tóxicos, inflamáveis ou perigosos de qualquer maneira.

Outra propriedade que normalmente substitui ou é acrescentado ao calor latente de vaporização é o calor isostérico, que é medido com um método indireto e auxilia ao apresentar outras propriedades de superfície dos adsorventes, determinando a

homogeneidade ou heterogeneidade deste e a distribuição da energia de adsorção (Giraldo *et al.*, 2019).

No entanto, não existem adsorvatos com todas as características descritas anteriormente, necessitando que sejam escolhidas as qualidades necessárias, dependendo da característica do sistema. Os refrigerantes mais comuns são amônia, água e metanol (Wang *et al.*, 2014).

Normalmente, é preferível adsorvatos com alta densidade, pelo fato de o adsorvente possuir microporos que não variam de volume. Assim, a massa adsorvida pelos poros seria maior, beneficiando o sistema (Capdevielle, 2018). Também é preferível um material com dimensões moleculares pequenas, baixa viscosidade (de modo a facilitar sua difusão no adsorvente), alta condutividade térmica e baixo calor específico.

Elsheniti *et al.* (2018) destaca que bons adsorventes devem ter um grande alcance de valores de capacidade de adsorção (considerando a variação de temperaturas que existe) e grandes transferências de massa e calor.

Apesar de materiais mais porosos adsorverem maiores quantidades de adsorvatos, essa maior capacidade de adsorção gera condutividades térmicas mais baixas, limitando o desempenho do sistema de refrigeração (Fernandes *et al.*, 2014).

Por isso, muitas vezes, deve-se escolher entre a alta porosidade (e a rápida difusão de vapor) e a alta densidade (e sua boa condutividade de calor). Por todos esses motivos, os adsorventes são considerados o “caminho crítico” do sistema de refrigeração por adsorção (Maeda *et al.*, 2018).

Adicionalmente, Abdullah *et al.* (2011) mencionam que os pares de trabalho não podem reagir quimicamente entre si e devem ser, preferencialmente, de fácil acesso e consideravelmente baratos.

Os tipos mais comuns de adsorventes físicos são o carvão ativado, gel de sílica e zeólitas e novos materiais, como os MOFs (Estruturas Metais – Orgânicas).

Por fim, deve-se considerar a temperatura da fonte de calor, as características desejadas no sistema de refrigeração, além das propriedades e afinidades vistas anteriormente, juntamente com custo e disponibilidade no mercado (Fernandes *et al.*, 2014).

O processo de adsorção pode ser demonstrado por equações específicas que podem ser agrupadas em (Wang *et al.*, 2014):

- Equações para razão de adsorção: por apresentar muitas considerações, tais equações são mais utilizadas durante os estágios iniciais de pesquisa.
- Equações termodinâmicas para processos de adsorção: é considerada a melhor maneira de apresentar o equilíbrio do processo de adsorção
- Equações de adsorção organizadas para o processo de condensação do adsorvato vapor no microporo.

Dubinin e Astakhov adaptaram a equação de distribuição de Gauss, obtendo-se a Equação 3, que pode ser utilizada para qualquer tipo de adsorvente com um diâmetro de poro uniforme (Wang *et al.*, 2014):

$$x = x_0 \exp\left(-\left(\frac{\epsilon}{E}\right)^n\right) \quad (3)$$

sendo,

x : Equilíbrio de Adsorção (kg/kg)

ϵ : Potencial de Adsorção (J/mol)

n : Constante entre 2 e 6, dependendo do par de trabalho escolhido e como será aplicado o sistema

E : Potência específica de adsorção

Assim, a equação simplificada de Dubinin-Astakhov determina as concentrações de adsorventes e adsorvatos, além da capacidade adsortiva do sistema. Tal equação é utilizada na maior parte dos estudos, por ser adaptada aos principais adsorventes utilizados atualmente (como carvão-ativado, sílica gel e zeólitas), sofrendo mínimas modificações conforme necessário e o tipo de adsorvato aplicado.

Assim, sua aplicação acaba se tornando ideal em qualquer tipo de sistema adsortivo, por ser relativamente genérica e auxiliar na determinação do desempenho do ciclo.

A seguir, apresentam-se alguns dos adsorventes mais utilizados em sistemas de refrigeração e os adsorvatos que são aplicados com estes.

2.3.1 CARVÃO ATIVADO

Vários materiais a base de carbono podem ser definidos como carvão ativado, sendo eles bem porosos e apresentando grande área superficial interna (Abdullah *et al.*, 2011). Para produzi-lo é necessário carbonizar o material a alta temperatura, em uma

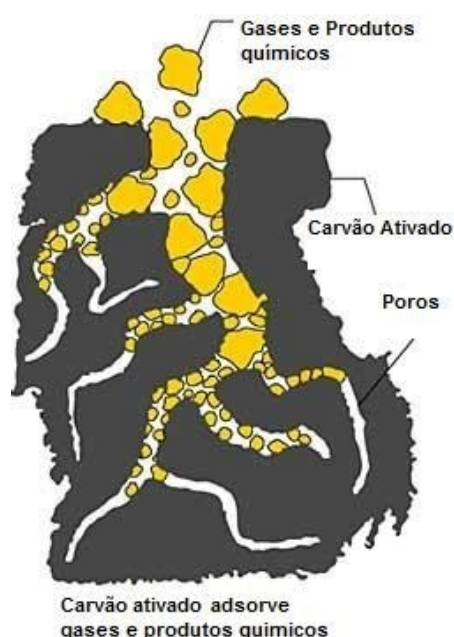
atmosfera inerte. Depois disso, o produto é ativado através de um método que pode ser físico ou químico.

Além do carvão produzido de madeira, turfa e carvão de pedra, resíduos lignocelulósicos (como a casca de coco, de arroz ou da despolpa do café) também tem sido utilizados, o que torna seu uso mais sustentável ao minimizar impactos ambientais, e reduzir custos, por reaproveitar diversos rejeitos industriais (Pereira *et al.*, 2008).

Em geral, o carvão ativado (Figura 16), em geral, tem uma grande área específica (Elsheniti *et al.*, 2018). A superfície total do carvão é coberta por uma matriz apolar (ou de baixa polaridade) de óxidos e material inorgânicos, levando a um baixo calor de adsorção se comparado com outros adsorventes (Elsheniti *et al.*, 2018).

Tal valor é bom para o COP do sistema, considerando que o maior consumo de calor é durante a regeneração dos pares, devido ao valor do calor de adsorção. O carvão-ativado também tem uma alta taxa de reatividade da superfície, um bom tamanho de poros e grande área superficial. No entanto, tem baixa condutividade térmica.

Figura 16 - Estrutura interna do carvão ativado



Fonte: <https://www.snatural.com.br/filtro-agua-carvao-ativado/> (Acesso em 07/10/2020 às 11:35)

O carvão ativado é uma das substâncias mais usadas como adsorvente, pois sua porosidade e área superficial podem ser controladas com sucesso (Dabrowski, 2001). Alguns dos pares mais comuns são: carvão ativado/metanol, carvão ativado/etanol,

carvão ativado/R134a, carvão ativado/amônia, carvão ativado/dióxido de carbono, entre outros.

O par carvão ativado/amônia, conforme demonstrado por Elsheniti *et al.* (2018), apresenta temperaturas de adsorção em torno de 40°C e tem uma alta pressão de trabalho (Fernandes *et al.*, 2014). Vale destacar, também, que o tempo de ciclo de um sistema com carvão ativado e amônia é de 840 segundos (Ramji *et al.*, 2014).

Além disso, o par exige temperaturas de regeneração superiores a 150°C. No entanto, um dos grandes problemas deste par é sua toxicidade, o forte cheiro de amônia, sua natureza corrosiva e baixa capacidade de adsorção.

O par carvão ativado/metanol tem uma grande capacidade cíclica de adsorção, (Elsheniti *et al.*, 2018). Pode ser usado com baixas temperaturas de regeneração, enquanto a sua temperatura de adsorção é limitada a 40°C (Fernandes *et al.*, 2014). Ademais, o par é caracterizado por baixos calores de adsorção, baixo ponto de congelamento, alto calor latente de vaporização do metanol.

Destaca-se, igualmente, as pressões de trabalho próximas a 10 kPa e o tempo de ciclo de 1200 segundos (Ramji *et al.*, 2014). No entanto, o metanol apresenta alta periculosidade e toxicidade, o que acaba estimulando o uso de etanol (Fernandes *et al.*, 2014).

O par de trabalho preferido para sistemas de ar-condicionado foi determinado, através de simulação, como carvão ativado/água (Ramji *et al.*, 2014). Apresentou temperaturas de regeneração inferiores a 150°C, pressões de trabalho em torno de 50 kPa, tempo de ciclo de 960 segundos e temperaturas de adsorção inferiores a 50°C (Chairunnisa *et al.*, 2020).

Comparada com o metanol e a amônia, o par com água conquistou efeito de resfriamento ideal (Ramji *et al.*, 2014).

R134a é um tipo de refrigerante muito comum, usado no ciclo à compressão de vapor, no qual, atualmente, sua aplicação, no ciclo de adsorção, também está sendo estudada (Rezk *et al.*, 2014).

John *et al.* (2017) estudaram o uso de refrigerantes comercialmente utilizados, como o R1234yf, R1234ze (E), R450A, R290, R600a, R744, e o R717, igualmente utilizados em ciclos à compressão de vapor como adsorvatos em ciclos de refrigeração solar por adsorção. Eles perceberam que estes refrigerantes apresentam um grande potencial, especialmente nos termos de suas capacidades de adsorção.

Apesar dos bons resultados e da pesquisa continua, estes refrigerantes ainda não foram aplicados em sistemas disponíveis no mercado (Rezk *et al.*, 2014). Adicionalmente, destaca-se que carvão ativado com diferentes tipos de butano e CO₂ também obtiveram resultados promissores (Shabir *et al.*, 2020).

2.3.2 GEL DE SÍLICA

O gel de sílica é um dióxido de silicone sintético amorfo, apresentando superfície extremamente granular e porosa (Elsheniti *et al.*, 2018). De acordo com Jiayou (2003), este óxido é produzido mediante a aplicação de ácido silícico em uma solução concentrada de silicato de sódio por ácido clorídrico, em condições controladas, apresentando a fórmula SiO₂nH₂O (Cevallos, 2012).

Sua temperatura de regeneração é baixa, tornando-o uma das melhores alternativas ao usar no ciclo de adsorção com fonte de calor perdido (Elsheniti *et al.*, 2018).

O material apresenta uma afinidade de adsorção de vapor de água de cerca de 40% de seu peso (Shabir *et al.*, 2020). O calor de adsorção é maior se comparado ao do carvão ativado/metanol. Sua capacidade máxima de adsorção é considerada baixa (Wang *et al.*, 2014).

O gel de sílica pode ser dividido em dois grupos distintos em relação ao tamanho de seus poros: densidade regular, quando o poro tem 2 nm de diâmetro (tipo RD), e baixa densidade (tipo LD), quando o poro tem diâmetros entre 15 e 20 nm (Rezk *et al.*, 2014).

Atualmente, o gel de sílica de alta densidade ou supermicroporoso (tipo HD) pode ser encontrado com tamanhos de poro entre 1 e 2 nm. Esse tipo de material permite que o ciclo de adsorção aconteça em diferenças de temperaturas pequenas, adsorvendo quase 3 vezes mais se comparado com géis de sílica de densidade regular.

O gel de sílica também pode ser dividido em tipo A e B, considerando o tamanho e distribuição de seus poros (Cevallos, 2012). A sílica gel tipo A tem poros entre 2 e 13 nm, enquanto o tipo B apresenta poros de, somente, 7 nm, em uma distribuição diferenciada e mais afastada de poros. Por apresentarem distribuição de poros diferenciada, os diferentes tipos de géis de sílica também apresentam isotermas de adsorção de vapor de água diferenciados.

Um dos pares mais comuns é o gel de sílica/água, especialmente quando aplicado em sistemas de ar-condicionado (Wang *et al.*, 2016).

O ponto de congelamento da água pode ser considerado um problema, fazendo com que seja melhor a utilização do par em sistemas com altas taxas de fluxo de água resfriada (Rezk *et al.*, 2014). Refrigeradores com gel de sílica – água, como descritos por (Hamdy *et al.* (2015), podem ser aquecidos por água acima de 55°C, atingindo temperaturas entre 5 e 15°C e tempo de ciclo de 800 segundos (Wang *et al.*, 2016).

Nota-se que para este par, a capacidade de refrigeração é aumentada com a diminuição do tempo do ciclo, embora o processo se torne mais longo e com um COP melhor (Singh & Dhingra, 2019). Igualmente, com a diminuição da temperatura de condensação, aumenta-se a capacidade de refrigeração e o COP.

Um refrigerador por adsorção movido a sílica gel/água com recuperação de calor e massa foi comercialmente bem-sucedido na década de 80, ainda sendo produzido, nos dias de hoje, pela HIJC USA, Inc (Wang *et al.*, 2016). A companhia Macom tem produzido refrigeradores funcionando com pares de adsorção sílica gel/água desde 2003 (Wolak & Kraszewski, 2016). No mesmo país, a empresa Tokai Optical Co., de Nagoya, introduziu sistema adsorção associado utilizando o calor perdido de um motor a compressão, também em 2003, demonstrando o futuro promissor da tecnologia e o bom uso deste adsorvente.

2.3.3 ZEÓLITAS

A zeólita é um cristal silicato de alumina com microporos formados por álcalis (Elsheniti *et al.*, 2018). É o único material cristalino com poros bem definidos, com regiões muito ácidas na sua superfície, o que permite que este seja um tipo superior de catalisador de craqueamento.

Existem mais de 180 tipos de estruturas diferentes para zeólitas, de acordo com Rezk *et al.* (2014), que adsorvem vapor de água a diferentes taxas (Rezk *et al.*, 2014).

Estes poros são mais uniformes do que aqueles presentes em outros adsorventes (Shabir *et al.*, 2020) e apresenta alta seletividade e pode separar os materiais baseado no tamanho e formato de suas moléculas, como uma peneira (Elsheniti *et al.*, 2018), processo este reversível, o que torna possível a reutilização de zeólitas até o seu

desgaste, que é mais demorado que de outros adsorventes (Sharafiam & Bharami, 2014).

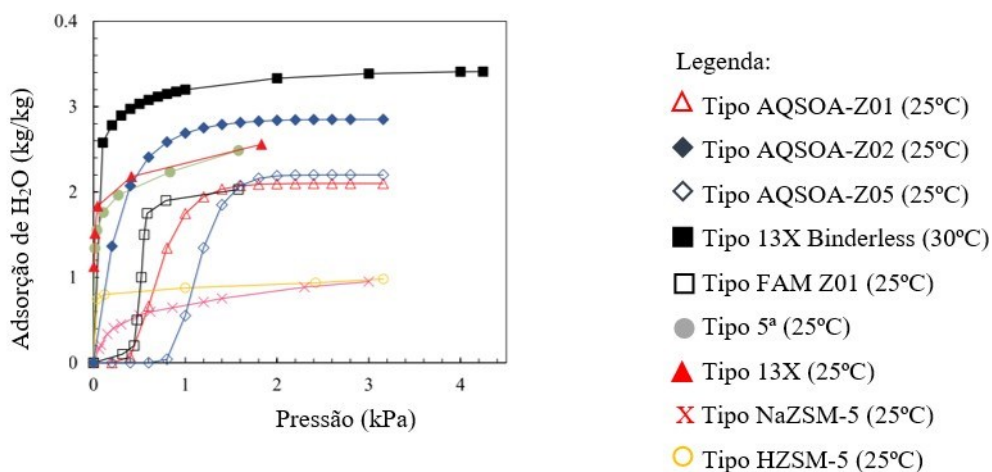
Como descrito por Machado & Bergmann (2011), normalmente, zeólitas são produzidas em uma microescala, enquanto também é possível criar cristais uniformes de zeólitas em uma nano-escala (dimensões entre 10 e 500 nm). Eles apresentam grande área superficial e grande quantidade de áreas de adsorção. Percebe-se em diversas pesquisas que a capacidade de adsorção de nano-zeólitas é maior do que de microzeólitas.

Além disso, Sharafiam & Bharami (2014) afirmam que, tanto a zeólita quanto o gel de sílica apresentam grandes densidades de adsorvente, se comparado com carvão ativado.

Ao se utilizar zeólitas naturais, normalmente aplica-se uma grande quantidade do material adsorvente, pois somente uma pequena quantidade de adsorvato é desorvida com o aumento de temperatura (Fernandes *et al.*, 2014).

Esse fato faz com que o adsorvente tenha um custo mais elevado que outros materiais também utilizados (Singh & Dhingra, 2019). Na Figura 17, é possível ver algumas isotermas de água com diferentes zeólitas:

Figura 17 - Isotermas de adsorção de água com diferentes zeólitas



Fonte: Shabir et al (2020)

Nota-se, portanto, que tanto para altas pressões quanto para baixas pressões, uma das melhores zeólitas para se utilizar em termos de adsorção de água é o tipo 13X Binderless, seguido pelo tipo AQSOA-Z02 (especialmente a pressões médias) e o tipo

13X, a baixas pressões. Pode-se observar, também, que a adsorção de água da zeólita é inferior à mesma vista pela sílica gel.

Como afirmado anteriormente por Elsheniti *et al.* (2018) para o gel de sílica, o par com zeólita (normalmente zeólita/água) tem um grande alcance de temperaturas de regeneração, enquanto trabalha com temperaturas de adsorção de cerca de 70°C (Fernandes *et al.*, 2014). O calor de adsorção é maior do que o de gel de sílica/água, permitindo que o COP seja baixo. Adicionalmente, sua transferência de calor é baixa e tempo de ciclo longo, de cerca de 1200 segundos (Hamdy *et al.*, 2015).

Zeólitas também podem ser pareadas com CO₂ (Shabir *et al.*, 2020). No entanto, nestes casos, ela é, majoritariamente, utilizada para a captura de CO₂, sua separação e purificação do ambiente.

De acordo com Dabrowski (2001), a pesquisa de zeólitas, atualmente, está focada em catalisadores. O material é extremamente promissor na catalise da produção de produtos químicos especiais e pode, também, ser usada como enzimas sintéticas.

2.3.4 ESTRUTURA METAL – ORGÂNICA E NOVAS PREPOSIÇÕES

Como descrito por Elsheniti *et al.* (2018) estrutura metal – orgânica (também conhecido como MOF, do inglês, *Metal – Organic Framework*) são um novo tipo de estrutura, muito promissor para catalise, separação de gases ou armazenamento, apresentando uma grande porosidade, cerca de 50% do volume total de seu material cristalino (Shabir *et al.*, 2020).

MOFs tem uma grande flexibilidade arquitetural e maior controle sobre seus poros se comparado com materiais inorgânicos como as zeólitas e os géis de sílica, sendo mais estáveis, com áreas de adsorção molecular bem definidas e grandes áreas superficiais (Rezk *et al.*, 2014).

Adicionalmente, eles são menos hidrofílicos se comparados com os géis de sílica e as zeólitas, fazendo com que eles liberem mais vapor de água nas mesmas pressões de trabalho (Rezk *et al.*, 2014).

Existem diversas maneiras de se sintetizar MOFs (Anumah *et al.*, 2019): métodos solvo e não solvo-térmico, eletroquímico, por microondas, químico-mecânico e sono-químico.

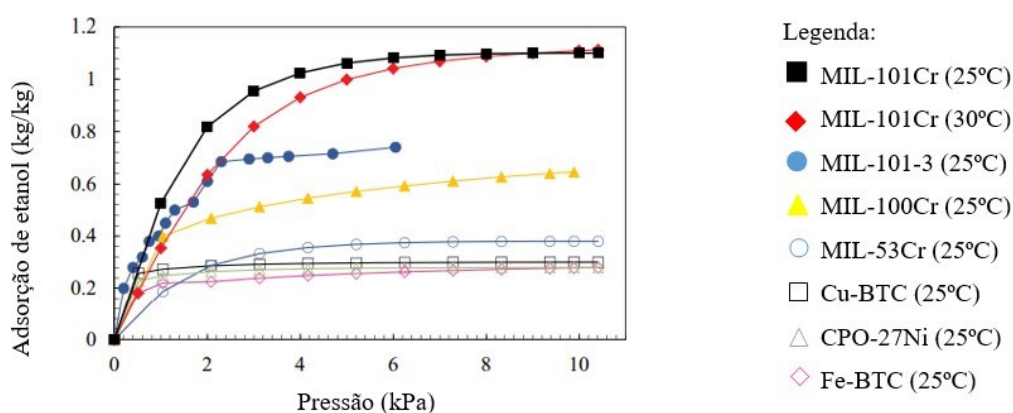
Como descrito por Rezk *et al.* (2014), MOFs apresentam, basicamente, dois componentes principais: ligações orgânicas, sendo os mais comuns os carboxilatos orgânicos (Shabir *et al.*, 2020).

Salienta-se que eles tem, no geral, uma maior capacidade de adsorção de qualquer refrigerante, se comparado com outros adsorventes estudados, o que melhora o desempenho do refrigerador significativamente (Shi, 2015).

Como é comum para qualquer novo material, e considerando todas as suas propriedades, muitos estudos que pesquisam bombeamento de calor por adsorção (utilizando-o na refrigeração), têm utilizado MOFs como adsorventes, abrindo um campo que antes era muito restrito devido à capacidade de adsorção limitada do gel de sílica, zeólitas e carvão ativado (Elsheniti *et al.*, 2018).

Alguns MOFs usados são o MIL-101 ou MIL-101(Cr), CPO-27(Ni), SAPO-34 e outras variações (Figura 18). Eles podem ser utilizados com água, etanol, metanol e outros.

Figura 18 - Isotermas de adsorção de etanol com diferentes MOFs



Fonte: Shabir *et al.* (2020)

Um MOF muito comum que é usado, com sucesso, utilizado com o etanol é o MIL-101Cr (MIL, do inglês, *Material Institute Lavoisier*), apresentando um dos melhores resultados de adsorção a 30°C, sendo que apresentou melhores resultados a 25°C (Shabir *et al.*, 2020).

Além dos MOFs, estão sendo estudadas estruturas chamadas de AIPOs (aluminofosfatos) e SAPOs (sílico-aluminofosfatos). Eles se parecem muito com zeólitas, tanto que muitas vezes são chamados de “materiais zeotipos”, apresentando estrutura e poros muito parecidos (Wang *et al.*, 2014).

Os AIPOs têm um volume de poro intracristalino moderado. Muitos apresentam excelente estabilidade térmica, pois começam a calcificar somente entre 400 e 600°C. Por terem uma síntese mais complexa, eles são mais caros que zeólitas ou sílica gel (Wang *et al.*, 2014).

Ao trocar o fosfato por sílica, cria-se os SAPOs, adsorvente com estrutura mais eficiente e propriedades de adsorção mais parecidas com os de aluminosilicatos (Wang *et al.*, 2014).

Tanto os AIPOs quanto os SAPOs apresentam uma afinidade à água inferior se comparada com a de zeólitas, mas maior se comparada à de sílica gel (Wang *et al.*, 2014).

Outro ramo de tecnologia que surgiu foi a nanociência e a nanotecnologia, trazendo materiais que não só impactam positivamente na nossa qualidade de vida, como permitem a conservação do meio ambiente (Machado & Bergmann, 2011). Isso é visto no uso de nanomateriais na forma de nanoadsorventes, como é o caso de dendrímeros, nanozeólitas, nanocompósitos baseados em hidretos metálicos e estruturas carboníferas como os nanotubos de carbono.

Dendrímeros são formados pela união de moléculas de polímeros (Machado & Bergmann, 2011). Eles apresentam um centro, onde outras moléculas podem ser presas, e ramos. São muito pequenos (10 a 20 nm), o que os tornam ideais no processo de purificação de água.

Os nanotubos de carbono (ou CNT, do inglês, *Carbon Nanotubes*) podem ser considerados como tendo somente uma única dimensão, devido a seu pequeno diâmetro e alta razão comprimento/diâmetro, normalmente sendo insolúvel em diversos líquidos (Machado & Bergmann, 2011).

Eles podem formar uma parede simples (estas apresentando maior área superficial, normalmente) ou paredes múltiplas, que podem determinar diversas características de seus poros. Ademais, as suas propriedades também dependem da superfície interna e externa. A curvatura do grafeno, por exemplo, pode influenciar na menor ou maior capacidade de adsorção.

2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS

Atualmente, utilizam-se dois métodos diferentes para a resolução de problemas matemáticos na engenharia, sendo eles os métodos analíticos e os métodos numéricos.

Na maior parte das situações cotidianas, usa-se métodos analíticos: ao se calcular o troco de uma compra, os juros de um empréstimo, o imposto sobre um produto, etc. Normalmente, todos esses problemas apresentam, em comum, um mesmo aspecto: excesso de informações. Normalmente, todas as variáveis envolvidas na análise do problema são dadas previamente e, se não, podem ser obtidas com facilidade através de um cálculo simples.

No entanto, ao chegar em áreas que envolvem fenômenos físicos complexos, muitas vezes tais problemas estão envoltos de fenômenos não-lineares, que tornam quase impossível a descoberta do resultado de maneira analítica. Assim, nestes casos, utiliza-se métodos numéricos como ferramenta para a sua resolução (Cunha & Castro, 2010).

As técnicas desenvolvidas para as soluções numéricas envolvem uma grande quantidade de cálculos que, nos dias atuais, são auxiliadas por calculadoras digitais ou, como na maior parte dos casos, por linguagem computadorizada programável, que apresentam ferramentas algébricas, numéricas e gráficas.

Dentre os métodos numéricos, pode-se analisar dois tipos diferentes de métodos, sendo o método direto (ou exato) e o método indireto (ou iterativo).

O método direto (Cunha & Castro, 2010) fornecem uma solução exata através de um número finito de operações aritméticas.

Normalmente o mais simples dentre os métodos, foram os primeiros criados para resolução de problemas numéricos, justamente por não necessitar, quase que obrigatoriamente, do auxílio digital de calculadoras ou computadores.

No entanto, apresentam grande instabilidade de dados, se comparados com os métodos indiretos.

O método indireto (Cunha & Castro, 2010) parte de uma aproximação e gera uma sequência de iterações, convergindo para a solução exata, em certas condições.

Apesar de ser matematicamente mais complexo, apresenta menor instabilidade, pois consegue desenvolver resultados em que, para o método direto, seriam necessários passos de tempo extremamente pequenos (e impraticáveis por sua condição própria) para manter os erros limitados (Cunha & Castro, 2010).

Vários matemáticos e estudiosos vem formulando métodos numéricos, ao longo dos anos, para a solução de equações diferenciais ordinárias. O primeiro criado foi o Método de Euler (Maioli, 2015). Sendo um método direto, é preciso tomar um passo h e saber o tempo final t para dar-se início às iterações, utilizando a fórmula (Equação 04):

$$x_{n+1} = x_n + hf(t_n, x_n) \quad (04)$$

Sendo,

$$x_n = x(t_n) \text{ e } t_n = t_0 + nh$$

Por ser um método antigo, apresenta um erro bem grande, que pode ser diminuído com a utilização do Método de Euler Melhorado. Tal método aumenta a ordem utilizada, consistindo das Equações 05 e 06 (Maioli, 2015):

$$x'_{n+1} = x_n + hf(t_n, x_n) \quad (05)$$

$$x_{n+1} = x_n + h \left[\frac{f(t_n, x_n) + f(t_{n+1}, x'_{n+1})}{2} \right] \quad (06)$$

Outro método muito utilizado é o de Runge-Kutta (Sterza & Brandi, 2016), um dos mais populares atualmente, sendo que a sua versão em quarta ordem é muito utilizada para obter soluções aproximadas de valor inicial, podendo ser implícito ou explícito.

Tal método consiste em comparar um Polinômio de Taylor, avaliando continuamente a função a cada passo. O RK4 (Runge-Kutta de 4ª Ordem) pode ser dado como visto na Equação 08:

$$y_{n+1} = y_n + h[c_1K_1 + c_2K_2 + c_3K_3 + c_4K_4] \quad (08)$$

Sendo,

c_1, c_2, c_3 e c_4 constantes a serem determinadas como visto nas Equações 09, 10, 11 e 12:

$$K_1 = f(x_n, y_n) \quad (09)$$

$$K_2 = f(x_n + \alpha_1h, y_n + \beta_1hK_1) \quad (10)$$

$$K_3 = f(x_n + \alpha_2h, y_n + \beta_2hK_1 + \beta_3hK_2) \quad (11)$$

$$K_4 = f(x_n + \alpha_3h, y_n + \beta_4hK_1 + \beta_5hK_2 + \beta_6hK_3) \quad (12)$$

Outro método bem conhecido, derivado de Runge-Kutta, é o método conhecido como Radau IIA, que se trata, simplesmente, de um método implícito de Runge-Kutta de 5ª ordem. Tal metodologia avalia duas estratégias diferentes, calculando dois

possíveis comprimentos de passo e escolhendo o menor. No entanto, quando os passos prévios apresentam uma tendência a aumentar ou diminuir, o novo passo é recalculado utilizando uma equação específica para cada caso (Pessanha *et al.*, 2005).

Outro método possível é o chamado BDF. É uma metodologia multi-passo muito utilizada para resolver EDAs rígidas. As suas fórmulas são projetadas a partir de um processo de interpolação de pontos, baseado na combinação linear dos polinômios de Lagrange. Normalmente, utiliza-se uma fórmula explícita para o estágio e uma implícita no corretor, sendo, portanto, um método híbrido (Pessanha *et al.*, 2005).

Por fim, o LSODA é uma metodologia que implementa, automaticamente o método de Adams preditor-corretor para sistemas não rígidos e o método BDF para sistemas rígidos, com detecção automática de rigidez e comutação. Apresenta, como benefício, a simplicidade, por se tratar de um sistema explícito, mas sendo extremamente estável, por ter a detecção de instabilidade automática herdada do método BDF (Ishibashi, 2016).

Todos esses métodos podem ser aplicados em diferentes tipos de programa com linguagens diferentes, como C, C++, Java, Perl, REXX, Tcl e Python. No entanto, é interessante destacar os benefícios do Python, linguagem relativamente antiga e que, atualmente, continua sendo uma das preferidas para a resolução de métodos numéricos.

Python é uma linguagem extremamente eficiente, fazendo mais funções sem necessidade de muitas linhas de código. Sua sintaxe é simples, fornecendo ao usuário um código “limpo”, fácil de ler e de entender (Matthes, 2016).

Tal linguagem não é própria de um programa fechado, mas pode ser utilizada em qualquer ambiente, como em aplicativos para desktop com interfaces gráficas ou ambientes online, como é visto com o Colab do Google, atualmente.

Ela oferece inúmeras bibliotecas e módulos, o que facilita na hora da aplicação dos métodos numéricos pois não exige a elaboração do método no código para executá-lo. Só resta ao usuário “chamar” uma função das inúmeras bibliotecas disponíveis e o programa será executado corretamente.

Por ser um código aberto, qualquer pessoa ou organização consegue contribuir com e utilizar da linguagem, permitindo que seja executado e analisado em qualquer lugar, sem o risco de ser controlado por licenças caras e difíceis de serem adquiridas.

Assim, o uso da linguagem Python atrelada a um dos inúmeros métodos numéricos vistos anteriormente permite determinar o sucesso de um sistema de refrigeração por adsorção teórico de maneira simples e eficiente.

2.5 ESTADO DA ARTE

Os estudos relativos ao sistema de refrigeração por adsorção estiveram presentes no campo científico por muito tempo, obtendo mais sucesso em algumas áreas que outras, como é o caso da sua aplicação junto com painéis solares, principalmente em residências e em prédios de escritórios, como concluíram Pang *et al.* (2013).

No entanto, é possível encontrar pesquisas relacionadas ao calor perdido em motores de combustão interna desde a década de 90 e sua presença no campo acadêmico vem crescendo continuamente, conforme a evolução da tecnologia.

Como observou-se na análise de trabalhos ao longo dos últimos vinte anos, no começo do século, já se reconhecia o calor perdido de motores de combustão e como ele poderia ser utilizado em sistemas de refrigeração adsorptivos, reduzindo o consumo de combustível e mantendo sua manutenção relativamente simples.

Zhang (2000), por exemplo, estudou o sistema de refrigeração adsorptivo movido por calor perdido de um motor a diesel, utilizando zeólita 13X e água como pares de trabalho e tubo duplo aletado como reator.

O COP do sistema foi 0,38, valor baixo se comparado com um sistema convencional por compressão, que apresenta valores mínimos de 1,8, podendo ser otimizado com o uso de princípios de recuperação de calor. Por outro lado, tal método poderia aumentar a complexidade do sistema. O SCP igualmente apresentou valores considerados baixos (25,7 W/kg), que poderia ser melhorado com a otimização do tipo de adsorvente utilizado.

Gui *et al.* (2002) definiram os indicadores de desempenho de uma bomba de calor por adsorção reversível regenerativa, usando como pares carvão-ativado e metanol e calor de exaustão de um motor de combustão interna como fonte de calor. Apesar de não se ter calculado precisamente o COP do sistema, a temperatura de evaporação foi determinada em 9°C, o que poderia fornecer um bom efeito de resfriamento para uma cabine pequena.

Lu *et al.* (2004) desenvolveram um sistema de ar condicionado usando zeólita e água como par de trabalho, sendo movido por gases de exaustão de uma locomotiva. Tal sistema alcançou um COP de 0,21, menor que o de Zhang (2000). Adicionalmente, obtiveram uma variação de temperatura entre 4 e 6°C, em condições de temperatura ambiente a 25°C, e apresentaram alguns problemas para resfriar o reator, de modo a se iniciar, propriamente, a fase de adsorção.

Lambert e Jones (2005) desenvolveram uma análise completa da situação atual relativa à aplicação de sistema de condicionamento de ar por adsorção em automóveis, considerando seus benefícios e os desafios futuros.

Concluíram que os sistemas de condicionamento de ar por adsorção são menores e mais leves que aqueles por absorção e podem ser usados na indústria automotiva como um substituto aos aquecedores tradicionais.

De acordo com este estudo, o sistema pode reduzir o consumo de combustível em 12% a 17%, quando em uso, com um desempenho semelhante ao de sistemas por compressão, eliminando o consumo de potência extra pela inexistência de partes mecânicas no ciclo. O formato e o volume das peças não é, necessariamente, um problema, acreditando-se que eles podem ser inseridos em um veículo de passeio: os sorsores estariam logo abaixo do assento do motorista, enquanto o aquecedor estaria debaixo do assento do passageiro e o refrigerador estaria ao lado do radiador (Lambert e Jones, 2005).

Assim, o sistema é menor e mais leve que outros tipos de sistema movidos a calor, o que beneficiaria seu uso em espaços com dimensões limitadas. No entanto, inovações ainda seriam requeridas para melhorar o sistema, como a necessidade de tecnologias exóticas e materiais diferentes para conseguir chegar em um desempenho compatível com a realidade (Lambert e Jones, 2005).

No final da década, Wang e Oliveira (2006) revisaram as possibilidades de uso do sistema de refrigeração por adsorção. Para eles, seu uso juntamente com calor perdido de exaustão só poderia ter sucesso com locomotivas ou ônibus, considerando o volume e massa dos componentes necessários para o seu funcionamento.

No começo da nova década, vários estudos começaram a focar na aplicação do sistema de refrigeração adsorção com veículos elétricos.

Yang (2010) analisou três diferentes tipos de ciclo por adsorção (ciclo de duas camadas contínuo, ciclo de recuperação de massa adiabático e ciclo de recuperação

isotérmica) movidos pelo calor perdido de células de combustível de um veículo, utilizando carvão-ativado e metanol como pares de trabalho. Foi destacado que o COP de todos os ciclos caiu com a razão de capacidade de calor, enquanto a função de recuperação de massa é desacelerada pelo aumento de temperatura da fonte de calor. Assim, o melhor ciclo, neste caso, seria o ciclo de recuperação de massa isotérmica.

Haas *et al.* (2019) projetaram um sistema de refrigeração adsorptivo com um aquecedor auxiliar para veículos elétricos.

Ao instalar um aquecedor elétrico em um EV, o consumo de bateria aumenta em 30%, enquanto o controle de temperatura geral reduz a eficiência deste em 50% (Haas *et al.*, 2019). O aquecedor auxiliar consistia de um pequeno tanque de bioetanol montado em um Renault Zoe, de pequeno porte e com espaço interno restrito. Ele proveu ar resfriado durante o verão, deixando a temperatura de cabine em 15°C, e ar aquecido durante o inverno, deixando a cabine a 9°C.

Em revisão feita por Hassan *et al.* (2020), observa-se que as células de combustível não só são compactas e sem partes móveis, gerando baixa necessidade de manutenção e alta confiabilidade, como demonstram uma maior eficiência de combustíveis e redução as emissões e apresentam alguns desafios relativos ao armazenamento de hidrogênio e sua entrada no mercado.

Ao mesmo tempo, a utilização de sistemas de refrigeração híbridos também é uma possibilidade em um futuro próximo (Hassan *et al.*, 2020). Tais sistemas consistem do uso conjunto de um resfriador por compressão de vapor e um resfriador por adsorção, de modo a aumentar a eficiência combinada do sistema.

Nota-se o número crescente de estudos focados em novos tipos de pares de trabalho, que poderiam contribuir para a melhora do desempenho do sistema, como se vê a seguir.

Hu *et al.* (2009) propuseram um novo compósito de zeólita com espuma de alumínio e água para ser usado em um sistema com recuperação de massa, movido por gases de exaustão de modo a aumentar a transferência de calor e massa previstos. Notou-se que o novo compósito conseguiu melhorar tanto o COP e o SCP, se comparado com o par zeólita/água normal, considerando o mesmo cenário de recuperação de massa. No entanto, o modo de condução e as condições de funcionamento do motor devem ser levados em consideração, já que isso afeta a performance do sistema de condicionamento de ar. Assim, tal sistema seria mais

adaptável a veículos conduzidos em rodovias, como é visto com ônibus intermunicipais e caminhões.

Lim e Abdullah (2010) investigaram as propriedades do carvão-ativado baseado em casca de palma e a possibilidade de aplicação em sistemas de condicionamento de ar automotivo adsorptivos. O COP foi de 0,19 e o SCP foi 396,6 W/kg. Apesar do COP ser baixo, considerando-se os valores padrão dos sistemas a compressão, o SCP foi alto, se comparado com outros estudos. Ainda assim, a temperatura do ar variou entre 20,7 °C e 25,2°C, o que poderia prover conforto para o usuário.

Abdullah *et al.* (2011) revisaram o futuro da refrigeração por adsorção em automóveis e suas limitações atuais. Foi apontado que a maior parte dos adsorventes atuais tem baixa capacidade adsorptiva/desorptiva, o que poderia levar a sistemas maiores que o espaço delimitado para os componentes e a sua, conseqüente, dificuldade de instalação em automóveis. Adicionalmente, tais capacidades levam à baixas taxas de transferência de calor e tempo de ciclo longo. Adsorvatos também apresentam baixo calor latente e altos pontos de ebulição que diminuem o efeito de refrigeração almejado. Foi previsto, também, que, no futuro, o sistema poderia chegar em COPs entre 0,5 e 0,8, além de SCPs maiores que 1000 W/kg.

Critoph *et al.* (2011) estudaram um sistema de ar-condicionado automotivo por adsorção usando um reator de sorção compacto com carvão-ativado e amônia. Os resultados foram significantes, se comparados com estudos anteriores. O COP foi de 0,22, o que é muito baixo, no entanto foi capaz de alcançar SCP de 800 W/kg, significativamente maior que os outros valores conseguidos. A temperatura do evaporador foi bem baixa, chegando a 2,5°C, o que poderia prover um alto grau de resfriamento.

Magnetto *et al.* (2011) analisaram um sistema móvel de ar-condicionado adsorptivo utilizando sílica gel e água como par de trabalho, operando com o calor perdido de um motor de caminhão. O COP variou, dependendo da condição imposta ao motor, de 0,3 a 0,5. Deu-se ênfase que a quantidade de calor perdido disponível no circuito de arrefecimento já era suficiente para mover o sistema e produziria calor o suficiente para deixar o condutor confortável. No entanto, ainda seria necessário maior redução do volume e peso, além de aplicação direta de condensação e evaporação.

Vasta *et al.* (2012) focaram em um sistema móvel adsorptivo montado em um caminhão, com reatores em duas camadas e pares de trabalho zeólita e água. Apesar de

ter dimensões maiores e ser mais pesado que outros modelos previamente estudados, consegue-se ajustá-lo corretamente na cabine do caminhão. Alcançou COP entre 0,25 e 0,45 e SCP entre 300 e 600 W/kg, ambos ótimos valores para o sistema, provendo ar frio a 9°C para a cabine.

Pang *et al.* (2013) revisaram o desenvolvimento da tecnologia adsorativa aplicada em sistema de ar-condicionado. Concluíram que a aplicação de calor perdido derivado de coletores solares ainda era o tipo de fonte de calor que mais era estudada e analisada por pesquisadores ao redor do mundo e que assim continuaria no futuro próximo, por conta da sua simplicidade e facilidade de adaptação em ambientes como residências e condomínios.

Sharafian e Bahrami (2014) analisaram os tipos de reatores disponíveis para o uso em veículos e os avaliou, baseado em fatores de desempenho (como SCP, razão de adsorvedor para adsorvente e COP), para o melhor tipo de reator.

Observaram que o melhor COP atingido foi de 0,43 com o par de trabalho sílica gel e água e o melhor modelo foi o tubo aletado, trabalhando com soluções a base de sílica gel. Tais valores chegam a ser compatíveis com a previsão dada por Abdullah *et al.* (2011), de um COP entre 0,5 e 0,8 e SCP maior que 1 kW/kg.

De acordo com levantamento feito por Rezk *et al.* (2014), o tipo de adsorvente também impacta na eficiência do sistema de refrigeração ao longo da utilização do veículo: dependendo da aplicação do veículo, a produção de calor varia continuamente ao longo da trajetória. Assim, escolhendo o par correto, consegue-se aumentar os limites de temperatura de regeneração necessários.

Ramji *et al.* (2014) analisaram um protótipo com três diferentes pares de trabalho (carvão-ativado/metanol, carvão-ativado/amônia e carvão-ativado/água), de modo a determinar o par de trabalho ótimo para este caso. Mostraram que o par carvão-ativado/água produziu a melhor refrigeração, com um COP de 0,58 e temperatura de ar refrigerado de 12°C.

Hamdy *et al.* (2015) revisaram as últimas pesquisas feitas no tópico, destacando os pares de trabalho mais usados, suas temperaturas de trabalho, SCPs e COPs dos sistemas. Ainda, concluíram que muita pesquisa é necessária, especialmente para a melhoria do SCP e do COP, enquanto diminuiu-se os custos e torna a tecnologia mais competitiva.

Ali & Chakraborty (2015) apresentaram um sistema de dois estágios indiretos com recuperação de calor de exaustão de um motor automotivo com zeólita e água, sílica-gel/água e CaCl_2 (cloreto de cálcio) -em sílica gel/ água. O COP máximo foi da zeólita, com 0,38 e SCP de 0,42 W/kg, enquanto o COP e SCP da sílica-gel/água foi de 0,35 e 0,36 W/kg, respectivamente. Já os valores para CaCl_2 -em sílica gel/água foi de 0,32 e 0,35 W/kg, apresentando o menor tempo de ciclo e, portanto, sendo a melhor opção. No entanto, ainda seria melhor utilizar materiais sintéticos porosos, como MOFs e compósitos.

Semprini *et al.* (2017) apresentaram um sistema de refrigeração por adsorção usando gás de exaustão derivado da combustão como fonte de calor do reator, com zeólita/água, gerando ar refrigerado a 12°C. No entanto, a transferência de calor dentro do adsorvente e a estanqueidade a vácuo ainda precisa ser otimizada, de modo a tornar o sistema mais eficiente em um menor ciclo temporal.

Benrajesh & Rajan (2017) projetaram e construíram um sistema de ar-condicionado adsorativo, usando carboneto de cálcio e água como par de trabalho, em um ciclo de dois estágios. Chegou-se a um COP alto de 1,068 e SCP de 10,66 W/kg, valor abaixo da curva esperada de 100 W/kg, abaixando a temperatura da cabine somente em 5°C.

Maeda *et al.* (2018) descrevem que, para um sistema sílica-gel/água utilizando o sistema de arrefecimento veicular como fonte de calor, a capacidade de refrigeração ficou entre 0,8 e 0,9 kW, com temperatura média de saída de 12,5°C. Em um sistema zeólita/água utilizando fonte de calor provinda de gases de exaustão, realizaram o ciclo de condicionamento de ar com capacidades de refrigeração entre 1 e 2,3 kW, conseguindo reduzir a temperatura no interior do caminhão testado em 6°C.

O SCP e o COP do ciclo de refrigeração por adsorção é ainda muito baixo, mesmo com os desenvolvimentos industriais, como a criação de dutos de vapor compactos, melhoria no *design* de válvulas, trocador de calor adsorvedor, o uso de válvulas de expansão no lugar de sifões e a introdução de adsorventes à base de compósitos (Maeda *et al.*, 2018).

O custo ainda é elevado, apesar de que a relação entre o custo do sistema de refrigeração e o preço total do veículo é considerado um segredo comercial. Adicionalmente, o sistema encontra um novo problema, conforme eles são colocados em veículos: a questão da motricidade. Alguns desafios como vibrações, impactos e

altas temperaturas ao redor começam a aparecer, o que pode afetar a confiabilidade do processo (Maeda *et al.*, 2018).

Tiwari (2019) analisou os principais desafios em um sistema de refrigeração adsorptivo e propôs soluções, com dois reatores, dois condensadores e um evaporador, com carvão-ativado e amônia. O COP alcançado foi de 0,45 e, apesar de ser um sistema pesado, seria possível de adaptá-lo a um caminhão.

Vasta *et al.* (2020) apresentaram dois diferentes tipos de modos de retenção de frio em um sistema móvel de refrigeração: um com um adsorvedor pelotizado preenchido por zeólita e outro um compósito adsorptivo baseado em uma estrutura de alumínio porosa e um tipo de cobertura de MOF (do inglês, *Metal Organic Framework*). O compósito apresentou menores tempos de ciclo, apesar de também ter picos de descarga, nos quais o calor provido é perdido para o ambiente.

Cao *et al.* (2020) estudaram o efeito dos materiais dos reatores em um sistema de refrigeração adsorptivo utilizando sílica-gel/água. Três materiais foram investigados (alumínio, cobre e aço inoxidável), esperando-se um desempenho térmico superior para o cobre. No entanto, os testes não confirmaram tal expectativa devido à densidade do material. Como foi visto, o reator de alumínio apresentou um COP superior ao esperado (0,518) e o SCP melhor (221 W/kg) se comparado com o reator de cobre.

Alklaibi & Lior (2021) analisaram a reutilização de calor perdido de um motor a diesel em um sistema conjunto de ciclo de adsorção e absorção para refrigeração. O sistema por adsorção obteve um COP entre 0,125 a 0,6 e SCP entre 0,016 e 0,6 kW/kg_{ads}, além de não ter impactos significativos sobre a emissão de gases.

Mendes *et al.* (2022) analisaram os principais fatores que afetam um sistema de condicionamento de ar adsorptivo aplicado a um veículo e determinaram como o sistema iria se comportar e os resultados que ia fornecer a partir da combinação de parâmetros. Desta forma, estabeleceu-se que o sistema mais interessante seria um sistema utilizando gases de exaustão, por sílica gel/água em um ciclo de múltiplas camadas com recuperação de calor e massa e trocador de calor tubo aletado.

Nota-se, a partir do estudo da literatura relativa a sistemas de condicionamento de ar em veículos nos últimos vinte anos, que o interesse neste tipo de sistema é crescente e bons resultados vêm sendo obtidos continuamente.

Mesmo com COPs inferiores ao sistema de compressão-vapor, o sistema é capaz de refrigerar o habitáculo, fornecendo uma condição de conforto (temperatura) ao

usuário. Apesar de serem sistemas mais pesados e maiores que o sistema de compressão-vapor, eles conseguem ser inseridos perfeitamente na carroceria dos veículos, não afetando o espaço interno de passageiros e motoristas.

Ainda assim, é um sistema que precisa ser continuamente estudado e melhorado, principalmente na questão dos pares de trabalho disponíveis, a possibilidade de ciclos a serem operados e os reatores que permitem a melhor troca de calor.

Uma tabela resumo dos estudos citados neste capítulo está apresentada no Anexo A, ao final do texto.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fundamentação teórica foi elaborada com a intenção de mostrar os aspectos que influenciam o sistema de condicionamento de ar por adsorção. Listou-se todos os trabalhos passados que estudaram o sistema no campo automotivo e as evoluções tecnológicas decorrentes. Posteriormente, identificou-se as possíveis fontes de calor, sendo estas os gases de exaustão e o sistema de arrefecimento automotivo, com suas diferenças dependendo do combustível utilizado e da carga do motor em questão.

Além disso, determinou como se dá o ciclo básico de adsorção, os fatores de desempenho deste e as possíveis combinações de reatores que geram diferentes ciclos. Também, determinou-se as características requisitadas para os pares de trabalho e as possíveis combinações, considerando a interação entre eles e os resultados obtidos no passado. Por fim, analisou-se o que seriam os métodos numéricos, suas diferenças e suas possibilidades, alinhadas com a linguagem de programação. No Capítulo 4, apresenta-se a metodologia, esta que foi elaborada e baseada na revisão apresentada.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO

No estudo termodinâmico de ciclos de refrigeração são aplicadas a 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica. A 1ª Lei da Termodinâmica descreve a conservação de energia em sistemas termodinâmicos.

A partir desta lei, como afirmado por Borgnakke & Sonntag (2013), pode-se obter a equação da energia (Equação 13), como uma versão simplificada da 1ª Lei da Termodinâmica para um volume de controle:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} + \dot{W}_{vc} + \dot{m}_e \left(u + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \dot{m}_s \left(u + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (13)$$

sendo,

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ o fluxo de energia no volume de controle

\dot{Q}_{vc} a taxa de transferência de calor no volume de controle

\dot{W}_{vc} a potência (trabalho por unidade de tempo) no volume de controle

\dot{m}_e a vazão mássica na entrada de um volume de controle

\dot{m}_s a vazão mássica na saída de um volume de controle

u a energia interna específica de uma substância no volume de controle

V velocidade

g a aceleração gravitacional

z a cota

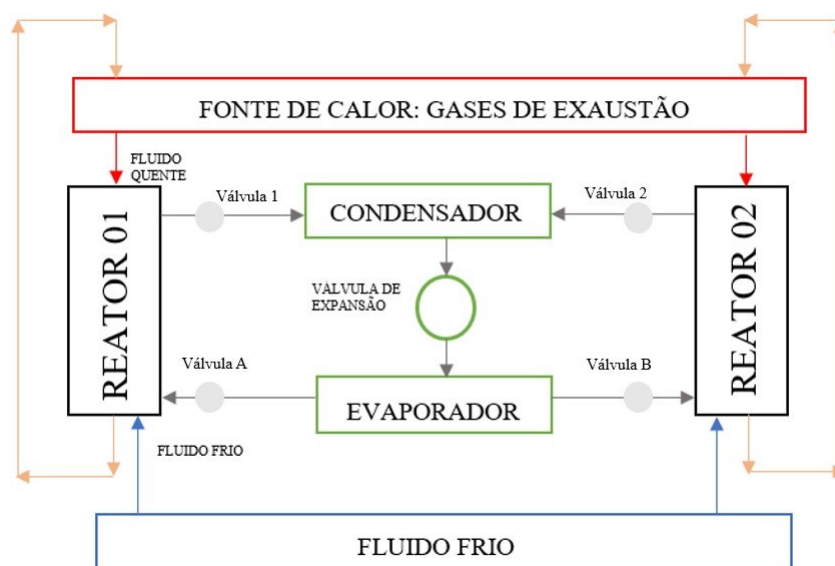
Seguindo o determinado pela 1ª Lei, a 2ª Lei determina, em termos simples, que os processos só podem ocorrer em um determinado sentido e não no oposto (Borgnakke & Sonntag, 2013). O primeiro enunciado (Kelvin-Planck) declara que é impossível construir uma máquina, operando em um ciclo termodinâmico, que produza efeitos que não o levantamento de um peso e a troca de calor com o ambiente. Assim sendo, seria impossível uma máquina térmica exercer um trabalho igual ao calor recebido, sendo 100% eficiente.

O segundo enunciado (Clausius) afirma ser impossível construir uma máquina que opere em um ciclo que seja limitada à troca de calor de um corpo frio para um quente. Ou seja, é impossível criar um refrigerador que funcione sem receber,

primeiramente, calor para o seu funcionamento, exigindo, sempre, um COP (Coeficiente de Desempenho) menor que infinito.

Para se estabelecer as equações que regem o sistema é importante entender como se dá a proposta básica de um sistema de condicionamento de ar adsorptivo de duas camadas, por meio de um diagrama esquemático, apresentado na Figura 19:

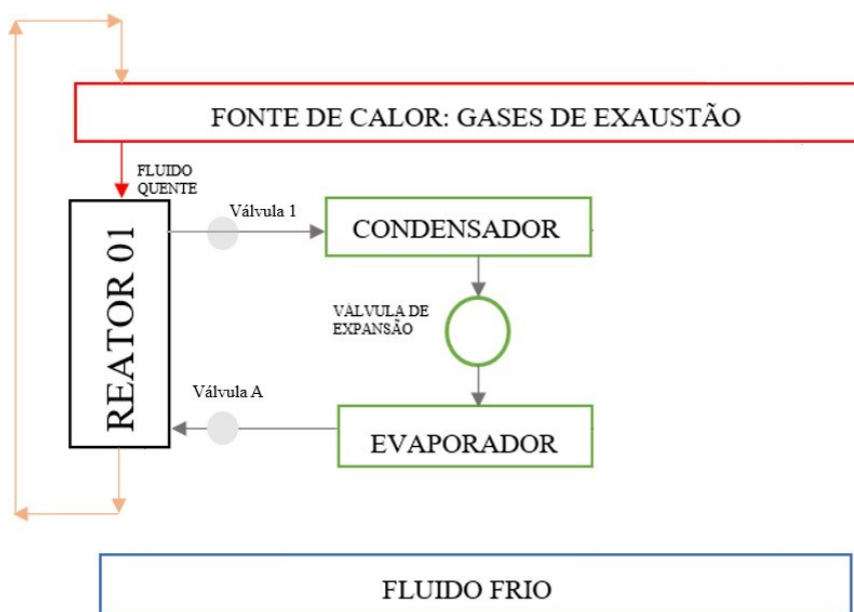
Figura 19 - Diagrama do sistema de climatização automotivo



Fonte: o Autor

No sistema de condicionamento de ar por adsorção com dois reatores nota-se dois fenômenos ocorrendo simultaneamente. O reator 1 é aquecido, permitindo que o adsorvato seja dessorvido do adsorvente. A válvula de ligação 1, entre o Reator e o Condensador, então se abre, permitindo que o vapor dessorvido seja condensado (Figura 20):

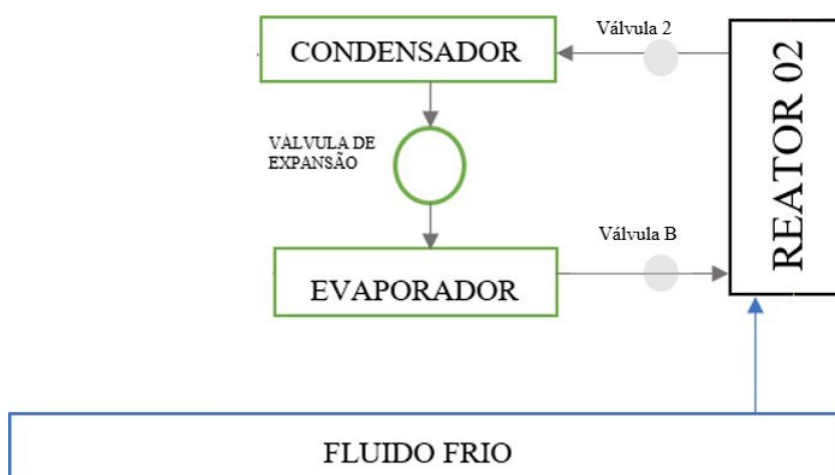
Figura 20 – Aquecimento do reator 1 e abertura da válvula 1



Fonte: o Autor

Simultaneamente, o Reator 2 está sendo resfriado. Assim que finalizada a evaporação destinada no evaporador, uma válvula de ligação entre o Reator e o Evaporador é conectada, de modo que o vapor seja adsorvido no reator refrigerado (Figura 21):

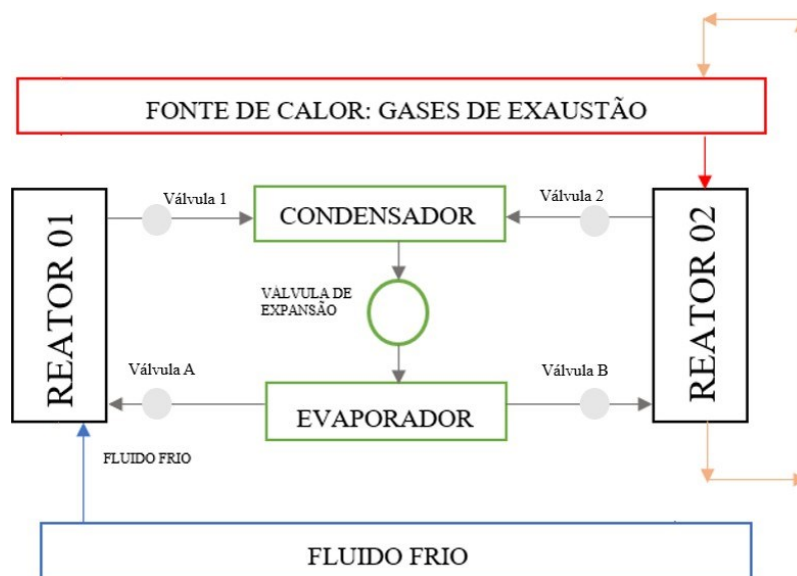
Figura 21 - Resfriamento do reator 2 e abertura da válvula B



Fonte: o Autor

Desta maneira, assim que o Reator 2 esteja com todo o vapor adsorvido na sua superfície, inicia-se o aquecimento deste, enquanto o Reator 1, sem adsorvato, é resfriado (Figura 22):

Figura 22 - Aquecimento do reator 2 e, simultaneamente, resfriamento do reator 1



Fonte: o Autor

Em laranja, destaca-se o caminho feito pelo líquido responsável pelo aquecimento dos reatores e início do processo de refrigeração. Em azul, observa-se a trajetória do fluido escolhido para resfriar o reator, de modo que o ciclo de adsorção/dessorção seja executado. Por fim, em cinza, observa-se a trajetória do adsorvato entre os componentes responsáveis pelo processo de climatização.

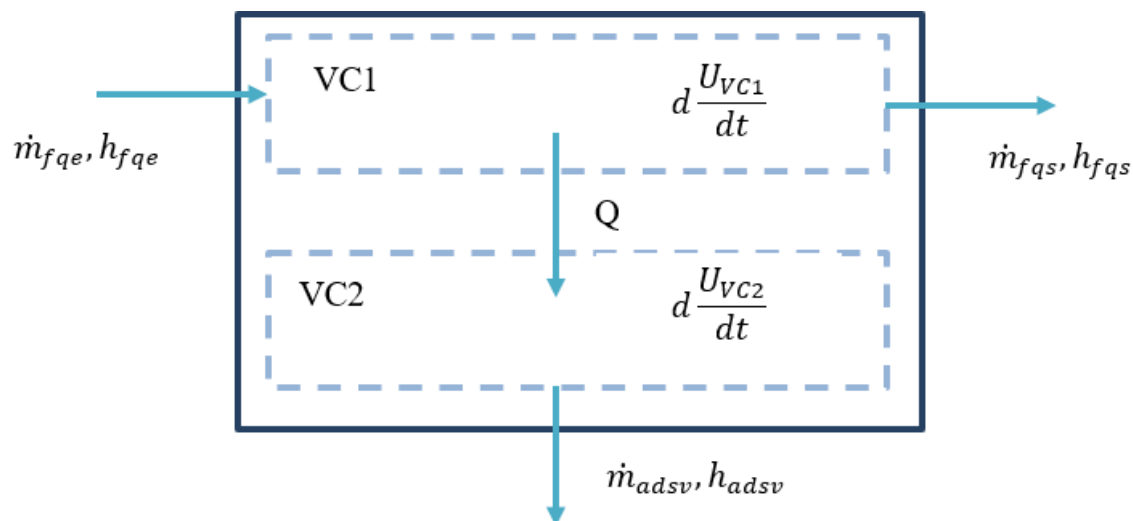
Com um modelo básico do sistema a ser estudado em vista, deve-se aplicar as equações de calor e massa que passa pelos reatores, de modo a se determinar ou prever os possíveis resultados empíricos, de maneira comparativa ao que foi feito por Rodrigues (2013).

3.1 O MODELO

O reator, representado pela linha azul escura (Figura 23), é composta por dois volumes de controle: VC1 e VC2. O volume de controle VC1 é definido pela região onde está o fluido de trabalho escolhido que absorve o calor dos gases de exaustão. Já o

volume de controle VC2 é definido pela região onde estão presentes as massas metálicas (mortas), o adsorvente e o adsorvato, que recebem calor do fluido de trabalho.

Figura 23 - Esboço de um reator adsortivo



Fonte: o Autor

sendo,

$\frac{dU_{VC1}}{dt}$ o fluxo de energia interna no volume de controle 1

$\frac{dU_{VC2}}{dt}$ o fluxo de energia interna no volume de controle 2

Q o calor trocado entre os volumes de controle

$\dot{m}_{f_{qe}}$ a vazão mássica do fluido de trabalho quente na entrada do volume de controle

$h_{f_{qe}}$ a entalpia do fluido de trabalho quente na entrada do volume de controle

$\dot{m}_{f_{qs}}$ a vazão mássica do fluido de trabalho quente na saída do volume de controle

$h_{f_{qs}}$ a entalpia do fluido de trabalho quente na saída do volume de controle

\dot{m}_{adsv} a vazão mássica do adsorvato na saída do volume de controle

h_{adsv} a entalpia do adsorvato na saída do volume de controle

Algumas considerações devem ser feitas, de modo que tal sistema simplificado se aproxime o melhor possível da condição real:

- Trabalho considerado desprezível nas fronteiras do sistema e dos volumes de controle

- Variações de energia cinética e potencial desprezíveis
- As temperaturas e pressões dentro do reator são uniformes
- As eventuais perdas de carga nas tubulações condutoras do fluido de trabalho são desprezíveis
- O calor isostérico de adsorção, o calor latente de condensação e de evaporação são constantes
- Todas as propriedades termodinâmicas do adsorvato quando adsorvido são tratados como se na fase líquida

Assim, trabalhando-se a 1ª Lei da Termodinâmica, obtêm-se a Equação 14:

$$\frac{dU}{dt} = Q - W + \sum m_e \cdot h_e - \sum m_s \cdot h_s \quad (14)$$

sendo,

$\frac{dU}{dt}$ o fluxo de energia interna no volume de controle

Aplicando as condições de contorno para o volume de controle VC1, transforma-se a Equação 14 na Equação 15:

$$\frac{dU_{VC1}}{dt} = -Q + m_{f_{qe}} \cdot h_{f_{qe}} - m_{f_{qs}} \cdot h_{f_{qs}} \quad (15)$$

Cuja energia interna é dada pela Equação 16:

$$U_{VC1} = M_f \cdot C_{Pf} \cdot T_{fq} \quad (16)$$

sendo,

M_f a massa do fluido de trabalho

C_{Pf} o calor específico do fluido de trabalho

T_{fq} a temperatura do fluido de trabalho quente

Aplicando na Equação 15, obtêm-se a Equação 17:

$$\frac{d(M_f \cdot C_{Pf} \cdot T_{fq})}{dt} = -Q + m_{f_{qe}} \cdot h_{f_{qe}} - m_{f_{qs}} \cdot h_{f_{qs}} \quad (17)$$

Considerando no VC1 o fluido está em regime permanente (Equação 18) e permitindo que as vazões mássicas de entrada e saída se igualem (Equação 19) é possível obter a Equação 20 a partir da Equação 17:

$$\frac{d(M_f \cdot C_{Pf} \cdot T_{fq})}{dt} = 0 \quad (18)$$

$$\dot{m}_{f_{qe}} = \dot{m}_{f_{qs}} = \dot{m}_{f_q} \quad (19)$$

$$-Q = \dot{m}_{f_q}(h_{f_{qs}} - h_{f_{qe}}) \quad (20)$$

Como no volume de controle VC2 a vazão mássica é nula (Equação 21), é possível simplificar a Equação 14:

$$\dot{m}_e = 0 \quad (21)$$

$$\frac{dU_{VC2}}{dt} = Q + m_{adsv} \cdot h_{adsv} \quad (22)$$

A energia interna pode ser dada pela Equação 23:

$$U_{VC2} = M_m \cdot C_{Pm} \cdot T_{ads} + M_{adsn} \cdot C_{Padsn} \cdot T_{ads} + M_{adsv} \cdot u_{adsv} \quad (23)$$

sendo,

M_m a massa morta no volume de controle

C_{Pm} o calor específico da massa morta

T_{ads} a temperatura de adsorção

M_{adsn} a massa de adsorvente no volume de controle

C_{Padsn} o calor específico do adsorvente no volume de controle

M_{adsv} a massa de adsorvato no volume de controle

u_{adsv} a energia interna específica do adsorvato no volume de controle

Derivando-se a Equação 23 em relação ao tempo, obtêm-se a Equação 24:

$$\frac{dU_{VC2}}{dt} = (M_m \cdot C_{Pm}) \frac{dT_{ads}}{dt} + (M_{adsn} \cdot C_{Padsn}) \frac{dT_{ads}}{dt} + M_{adsv} \frac{du_{adsv}}{dt} + u_{adsv} \frac{dM_{adsv}}{dt} \quad (24)$$

A massa de adsorvato em VC2 pode ser dada pela Equação 25:

$$M_{adsv} = q \cdot M_{adsn} \quad (25)$$

sendo,

q a concentração de massa de adsorvato no volume de controle VC2

Assim, de acordo com a Equação 26:

$$m_{adsv} = \frac{dM_{adsv}}{dt} \quad (26)$$

Substituindo a Equação 26 e a Equação 24 na Equação 22, obtêm-se a Equação 27:

$$Q + \frac{dM_{adsv}}{dt} \cdot h_{adsv} = (M_m \cdot C_{Pm}) \frac{dT_{ads}}{dt} + (M_{adsn} \cdot C_{Padsn}) \frac{dT_{ads}}{dt} + M_{adsv} \frac{du_{adsv}}{dt} + u_{adsv} \frac{dM_{adsv}}{dt} \quad (27)$$

Somando a Equação 27 com a Equação 20, têm-se a Equação 28:

$$\frac{dM_{adsv}}{dt} \cdot h_{adsv} = m_{fq} (h_{fqs} - h_{fqs}) + M_{pm} \cdot C_{pm} \left(\frac{dT_{ads}}{dt} \right) + M_{adsn} \cdot C_{padsn} \left(\frac{dT_{ads}}{dt} \right) + M_{adsv} \frac{du_{adsv}}{dt} + u_{adsv} \frac{dM_{adsv}}{dt} \quad (28)$$

Desenvolvendo a Equação 28 para a Equação 29 e Equação 30, nessa ordem:

$$-\dot{m}_{fq}(h_{fqs} - h_{fqs}) = \left(M_{pm} \cdot C_{pm} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + \left(M_{adsn} \cdot C_{padsn} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + M_{adsv} \frac{du_{adsv}}{dt} - \frac{dM_{adsv}}{dt} \cdot h_{adsv} + u_{adsv} \frac{dM_{adsv}}{dt} \quad (28)$$

$$-\dot{m}_{fq}(h_{fqs} - h_{fqs}) = \left(M_{pm} \cdot C_{pm} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + \left(M_{adsn} \cdot C_{padsn} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + M_{adsv} \frac{du_{adsv}}{dt} + \frac{dM_{adsv}}{dt} (u_{adsv} - h_{adsv}) \quad (29)$$

Considerando que, de acordo com a Equação 29:

$$u_{adsv} - h_{adsv} = Q_{isos} \quad (30)$$

sendo,

Q_{isos} o calor isostérico de adsorção, que é constante

É possível substituir a Equação 30 na Equação 29, como visto na Equação 31:

$$-\dot{m}_{fq}(h_{fqs} - h_{fqs}) = \left(M_{pm} \cdot C_{pm} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + \left(M_{adsn} \cdot C_{padsn} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + M_{adsv} \frac{du_{adsv}}{dt} + \frac{dM_{adsv}}{dt} \cdot Q_{isos} \quad (31)$$

Substituindo a Equação 22 na Equação 25, tal como demonstrado pela Equação 32:

$$\frac{dM_{adsv}}{dt} = \frac{d(q \cdot M_{adsn})}{dt} = M_{adsn} \frac{dq}{dt} \quad (32)$$

E, em seguida, substituindo a Equação 32 na Equação 29, como pode ser visto na Equação 33:

$$-\dot{m}_{fq}(h_{fqs} - h_{fqs}) = \left(M_{pm} \cdot C_{pm} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + \left(M_{adsn} \cdot C_{padsn} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + q \cdot M_{adsn} \frac{du_{adsv}}{dt} + Q_{isos} \cdot M_{adsn} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (33)$$

Pode-se aplicar a condição em que as propriedades termodinâmicas do adsorvato quando adsorvido são praticamente iguais aos da fase líquida, na forma da Equação 34:

$$\frac{du_{adsv}}{dt} = \frac{dC_{padsv} \cdot T_{ads}}{dt} = C_{padsv} \frac{dT_{ads}}{dt} \quad (34)$$

sendo,

C_{padsv} o calor específico do adsorvato

Substituindo a Equação 34 e a Equação 22 na Equação 33, obtêm-se a Equação 35:

$$-\dot{m}_{fq}(h_{fqs} - h_{fqe}) = (M_m \cdot C_{pm}) \frac{dT_{ads}}{dt} + (M_{adsn} \cdot C_{padsn}) \frac{dT_{ads}}{dt} + q \cdot M_{adsn} \cdot C_{padsv} \frac{dT_{ads}}{dt} + Q_{isos} \cdot M_{adsn} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (35)$$

Para se desenvolver o lado esquerdo da Equação 31, deve-se considerar o reator como um trocador de calor e aplicar o Método da Efetividade (Incropera *et al.*, 2008), pois conhece-se somente as temperaturas de entrada do volume de controle. A efetividade é função do número de unidades de transferência (NUT), que varia com o design do trocador de calor e, portanto, o desenvolvimento da equação varia com o modelo escolhido e sua respectiva efetividade.

O NUT pode ser determinado como visto na Equação 36:

$$NUT = \frac{GA}{C_{min}} \quad (36)$$

sendo,

G, o coeficiente global de transferência de calor

A, a área da superfície do trocador de calor

C_{min} , o valor do fluido de menor capacidade calorífica

Pelo fato de ter sido escolhido um Trocador de Calor de Tubos Aletados como o modelo que melhor se adaptaria às condições do sistema. Considerando a tabela apresentada no Anexo B, que descreve todos os valores de Cr para cada tipo de trocador de calor presente no mercado, nota-se que não há nenhum tipo de relação singular e única para este caso, determinando-se sua relação de efetividade, portanto, como sendo equivalente a Cr=0 (todos os trocadores).

Assim, a relação de efetividade será dada pela Equação 37:

$$\varepsilon = 1 - e^{\left(\frac{-G_{ads} A_{ads}}{C_{min}}\right)} \quad (37)$$

Expandindo C_{min} , como visto na Equação 38:

$$C_{min} = \dot{m}_{fq} \cdot C_{p_f} \quad (38)$$

Substituindo a Equação 38 na Equação 37, obtendo-se a Equação 40:

$$\varepsilon = 1 - e^{\left(\frac{-G_{ads} A_{ads}}{\dot{m}_{fq} \cdot C_{p_f}}\right)} \quad (40)$$

Sabendo que é possível expandir a relação de entalpias, como é visto na Equação 41:

$$\dot{m}_{fq}(h_{fqe} - h_{fqs}) = Q = \varepsilon \cdot \dot{m}_{fq} \cdot C_{pf} \cdot (T_{fq} - T_{ads}) \quad (41)$$

Pode-se reescrever a Equação 35 como a Equação 42:

$$\varepsilon \cdot \dot{m}_{fq} \cdot C_{pf} \cdot (T_{fq} - T_{ads}) = \left(M_m \cdot C_{pm} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + \left(M_{adsn} \cdot C_{padsn} \right) \frac{dT_{ads}}{dt} + q \cdot M_{adsn} \cdot C_{padsv} \frac{dT_{ads}}{dt} + Q_{isos} \cdot M_{adsn} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (42)$$

Deve-se considerar, também, que a adição de reatores (adsorvedores) ao sistema irá alterar a disposição de volumes de controle e, portanto, a Equação 40 deverá ser adaptada a cada caso.

Desta forma, para um sistema com 2 reatores, adapta-se a Equação 40 de acordo com o reator modelado.

Reator 1:

Como este reator, no momento inicial, se encontra na fase de regeneração, o mesmo está recebendo calor da fonte externa de modo a evaporar o adsorvato localizado na superfície do adsorvente e promovendo a movimentação deste adsorvato até o condensador e iniciando o processo de refrigeração. A equação de calor e massa que descreve este instante de operação está descrita pela Equação 43, sendo T_r relativo à temperatura do reator durante a regeneração do adsorvato.

$$\varepsilon_1 \cdot \dot{m}_{fq} \cdot C_{pf} \cdot (T_{fq} - T_{r1}) = \left[M_{adsn} \cdot (C_{padsn} + C_{padsv} \cdot q_1) + M_m \cdot C_{pm} \right] \frac{dT_{r1}}{dt} + Q_{isos} \cdot M_{adsn} \cdot \frac{dq_1}{dt} \quad (43)$$

Reator 2:

Este reator, concomitantemente ao Reator 01, estaria passando pela fase de adsorção, ou seja, sendo resfriado (perdendo calor ao ambiente), de tal modo que o adsorvato seja recolhido de volta à superfície do adsorvente. A equação de calor e massa que descreve este instante de operação está descrita pela Equação 44, sendo T_r relativo à temperatura do reator durante a adsorção do adsorvato.

$$Q_{isos} \cdot M_{ads} \cdot \frac{dq_2}{dt} = \varepsilon_2 \cdot \dot{m}_{ff} \cdot C_{pff} \cdot (T_{r2} - T_{ff}) + \left[M_{adsn} \cdot (C_{padsn} + C_{padsv} \cdot q_2) + M_m \cdot C_{pm} \right] \frac{dT_{r2}}{dt} + M_{adsn} \cdot \frac{dq_2}{dt} \cdot C_{pv} \cdot (T_{r2} - T_{ev})$$

(44)

Assim, os reatores estão em momentos distintos do processo de adsorção. Quando, normalmente, em um processo simples, se esperaria o reator esfriar naturalmente de modo a se iniciar um novo ciclo, com dois reatores, não é necessário completar esta etapa, podendo transformar o sistema em um processo praticamente contínuo ao reverter-se o fluxo entre os reatores, a partir do acionamento de suas válvulas.

Condensador:

Saindo do Reator 01, o adsorvato passa para o condensador no qual, a uma temperatura constante (T_c), é condensado, indo em direção à válvula de expansão. Assim, o vapor de adsorvato sofre uma mudança de fase, perdendo calor para um fluido secundário que trabalha com o objetivo de resfriar o condensador. A equação de calor e massa (Equação 45), portanto, neste componente, poderá ser trabalhada como se segue:

$$Q_{co} + m_s h_s = m_e h_e \quad (45)$$

Expandindo-a de modo a ficar como apresentada pela Equação 46:

$$Q_{co} + (M_m C_m) \frac{dT_{co}}{dt} = [C_{pv} (T_{r1} + T_{co}) + L.T_{co}] M_{adsn} \frac{dq_1}{dt} \quad (46)$$

Como o condensador também é um tipo de trocador de calor, aplica-se a Equação 47:

$$Q_{co} = m_{ff} \cdot C_{pf} \cdot \varepsilon \cdot (T_{co} - T_{ff}) \quad (47)$$

Assim, substituindo a Equação 47 na Equação 46, obtêm-se a Equação 48:

$$m_{ff} \cdot C_{pf} \cdot \varepsilon \cdot (T_{co} - T_{ff}) + (M_m C_m) \frac{dT_{co}}{dt} = [C_{pv} (T_{r1} + T_{co}) + L.T_{co}] M_{adsn} \frac{dq_1}{dt} \quad (48)$$

Evaporador:

O adsorvato, então, em sua forma líquida, passa para a válvula de expansão, na qual é expandido, sem que ocorra mudança de fase. Passa, então, para o evaporador, no qual, a absorver calor do ambiente, muda de fase, finalmente, evaporando. A equação de calor e massa (Equação 49), portanto, neste componente, poderá ser trabalhada como se segue:

$$Q_{ev} + \dot{m}_e h_e = \dot{m}_s h_s \quad (49)$$

Expandindo-a de modo a se obter a Equação 50:

$$Q_{ev} + M_{adsn} \cdot \frac{dq_1}{dt} \cdot C_{pf} \cdot (T_{co} - T_{ev}) = M_{adsn} \frac{dq_2}{dt} \cdot L \cdot T_{ev} + M_{m \cdot pm} C \frac{dT_{ev}}{dt} \quad (50)$$

Como o evaporador também é um tipo de trocador de calor, aplica-se a Equação 51:

$$Q_{ev} = \dot{m}_{fg} \cdot C_{pf} \cdot \varepsilon \cdot (T_{fg} - T_{ev}) \quad (51)$$

Assim, substituindo a Equação 51 na Equação 49, obtêm-se a Equação 52:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{fg} \cdot C_{pf} \cdot \varepsilon \cdot (T_{fg} - T_{ev}) + M_{adsn} \cdot \frac{dq_1}{dt} \cdot C_{pf} \cdot (T_{co} - T_{ev}) = \\ M_{adsn} \frac{dq_2}{dt} \cdot L \cdot T_{ev} + M_{m \cdot pm} C \frac{dT_{ev}}{dt} \end{aligned} \quad (52)$$

O Processo de Adsorção:

Deve-se considerar, também, o processo de adsorção interno ao reator, onde se aplica a equação de Dubinin-Astakhov, como visto anteriormente na Revisão Bibliográfica. Tal equação pode ser alterada para se adaptar à concentração de adsorvato no reator, como pode ser visto na Equação 53:

$$q = q_0 \exp \left(- \left(\frac{g}{E} \right)^n \right) \quad (53)$$

Expandindo-se a equação a partir de Dubinin-Astakhov na Equação 54:

$$q = q_0 \exp \left(- \left(\frac{RT \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)}{E} \right)^n \right) \quad (54)$$

Arrumando, devidamente, os termos, obtêm-se a Equação 55:

$$q = q_0 \exp \left(- \left(\frac{R}{E} \right)^n \left[T \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right) \quad (55)$$

Considera-se D como a Equação 56:

$$D = \left(\frac{R}{E} \right)^n \quad (56)$$

Assim, calcula-se a Equação 57:

$$q = q_0 \exp \left(-D \left[T \ln \left(\frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right) \quad (57)$$

As constantes para o par sílica-gel/água são determinados experimentalmente, e variam de acordo com o tipo de sílica gel utilizado. Por apresentar, usualmente, valores de n muito próximos de 1, para pares de sílica-gel e água, costuma-se considerar $n = 1$ e aproximar a equação de Dubinin-Astakov na equação do tipo Freundlich, como pode ser visto na Equação 58:

$$q = q_0 \left(\frac{P}{P_{sat}} \right)^{\frac{R}{nT}} \quad (58)$$

Por fim, necessita-se dos valores da pressão de saturação do adsorvato, neste caso o adsorvato escolhido, a água. Para isso, utiliza-se a equação de Antoine (Equação 59):

$$\ln P = A_1 - \left(\frac{B_A}{T_{sat} + C_A} \right) \quad (59)$$

sendo,

A_A , B_A e C_A parâmetros da equação

T_{sat} , a temperatura de saturação no condensador

Portanto, observa-se quatro equações diferenciais ordinárias e quatro incógnitas (T_{r1} , T_{r2} , T_{co} e T_{ev}), além de duas concentrações de adsorvato nos reatores distintas (q_1 e q_2), dependentes das pressões de saturação respectivas. Tais equações só serão passíveis de resolução através de ajuda de um computador, por simulação numérica.

3.2 VARIÁVEIS

Considerando as equações vistas anteriormente, algumas variáveis são necessárias para que seja possível desenvolver a simulação e obter resultados.

A seguir, lista-se algumas variáveis e equações que auxiliaram na determinação das pressões do sistema, da efetividade dos trocadores de calor utilizados (reatores, condensador e evaporador), das propriedades dos fluidos utilizados no processo de troca de calor dos componentes e, por fim, as propriedades dos próprios adsorvatos e adsorventes utilizados no processo de adsorção.

3.2.1 PRESSÃO DO SISTEMA

Para o cálculo da pressão saturada que varia com a temperatura que será utilizada para a determinação da concentração de água na sílica gel, é necessário aplicar os Parâmetros da equação de Antoine, como visto na Tabela 11:

Tabela 2 - Parâmetros da equação de Antoine para a pressão de saturação da água

A_A	B_A	C_A
4,6543	1435,264	-64,848

Fonte: NIST (2021)

Os reatores 1 e 2 estão em condições de temperatura e, portanto, pressão distintas. A pressão do reator 1 aumenta conforme o tempo e a temperatura, enquanto que o reator 2, que se resfria continuamente, diminui a pressão conforme a queda de temperatura.

Outro ponto que deve ser considerado é que, ao aquecer o fluido com os gases de exaustão, em muitas condições de carga, o sistema terá que se desenvolver a temperaturas em que, a pressão ambiente, a água não poderia ser liberada em forma de vapor.

Desta maneira, o sistema terá que ter um controle de pressão sobre ele, garantindo condições subatmosféricas, de modo que a água consiga ser liberada em forma de vapor a temperaturas abaixo de 100°C.

Considerou-se, então, a pressão de entrada do reator 1 equivalente à pressão da água saturada a 28,96°C, enquanto que para o reator 2 considerou-se a pressão de saturação a 87°C, como se vê na Tabela 11:

Tabela 3 - Condição de pressão de saturação nos reatores

Reator	P inicial (KPa)	T inicial (°C)
1	12	50
2	55	87

Fonte: Borgnakke & Sonntag (2013)

3.2.2 EFETIVIDADE DOS TROCADORES DE CALOR

Durante a simulação foram considerados quatro trocadores de calor distintos, sendo dois representados pelos Reatores 1 e 2, um sendo o condensador e um sendo o evaporador. A primeira alternativa adotada para se calcular as efetividades destes

trocadores foi utilizar o coeficiente global de calor. No entanto, para se chegar aos valores respectivos de coeficientes globais de calor, deve-se considerar diversas trocas de calor em relação ao espaço e meios, o que traz um grau de complexidade maior do que o esperado, especialmente quando já se efetua uma modelagem dinâmica em relação ao tempo. Assim, optou-se por utilizar valores médios de efetividade encontrados na literatura, como se verá na Tabela 13:

Tabela 4 - Efetividades dos trocadores e calor utilizados na simulação

Trocador de calor	Efetividade
Reator 1 ⁽¹⁾	0,4
Reator 2 ⁽¹⁾	0,4
Condensador ⁽²⁾	0,8
Evaporador ⁽²⁾	0,4

Fonte: (1) Tay (2014), (2) Santos & Tribess (2005)

3.2.3 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS RESPONSÁVEIS PELA TROCA DE CALOR

A vazão de etilenoglicol foi alcançada a partir de sua proporção no sistema de arrefecimento em relação à vazão de gases obtida de maneira experimental.

Tanto para o condensador quanto para o evaporador, os valores de vazão foram retirados da literatura (Santos & Tribess, 2005), sendo o fluido preferido, ar, levando em conta a proporção correta para a vazão de adsorvato que passa pelo sistema. Em resumo, a tabela de vazão poder ser vista na Tabela 14:

Tabela 5 - Vazão dos fluidos

Fluido	Vazão (kg/h)
Solução de etilenoglicol e água 50%	411
Combustível E0	411
Ar (condensador)	114
Ar (evaporador)	27

Fonte: O Autor

A vazão de combustível, descrita acima, também foi obtida de maneira proporcional à vazão de etilenoglicol e seu calor específico, comparativamente com os dados fornecidos para o combustível do tipo E0. Notou-se que a vazão é extremamente alta e analisou-se o impacto desta vazão e suas possíveis alternativas no capítulo de Resultados.

A temperatura do ar utilizado no condensador e evaporador e do combustível E0 foi considerada como equivalente à temperatura ambiente observada (27°C). Para a solução de etilenoglicol e água 50% foi necessário fazer cálculos, considerando a troca de calor da solução e os gases de exaustão.

Utilizando o Método da Efetividade, primeiro determinou-se qual seria o C_{\min} da relação entre o fluido e o gás.

Para isso calcula-se o C_{sol} e o C_{gases} , como se segue nas Equações 60 e 61:

$$C_{\text{sol}} = cp_{\text{sol}} * \dot{m}_{\text{sol}} \quad (60)$$

$$C_{\text{gases}} = cp_{\text{gases}} * \dot{m}_{\text{gases}} \quad (61)$$

Os valores dos parâmetros usados são como se segue na Tabela 15, utilizando-se a metodologia de Coskun *et al.* (2009) para o cálculo do calor específico dos gases de exaustão (Apêndice B):

Tabela 6 - Parâmetros dos fluidos para cálculo da temperatura

Fluido	Calor Específico (kJ/kgK)	Vazão (kg/h)
Solução	3,678 ⁽¹⁾	411 ⁽²⁾
Gases	2,136 ⁽²⁾	1,87 ⁽²⁾

Fonte: (1) The Engineering ToolBox (2021), (2) O Autor

Assim, efetuando-se os cálculos, observou-se que C_{\min} seria C_{gases} , aplicando, para o cálculo da temperatura da solução após troca de calor, a seguinte formulação (Equação 62):

$$T_{\text{gases saída}} = \frac{s * C_{\text{gases}} * (T_{\text{escape}} - T_{\text{sol}})}{C_{\text{sol}}} + T_{\text{sol}} \quad (62)$$

Desta maneira, observa-se, Tabela 16 com os valores de temperatura encontrados para os gases e para os fluidos após a troca de calor, utilizando a Equação 62:

Tabela 7 - Temperatura dos gases e do fluido de arrefecimento após troca de calor

Rotação	Temperatura dos gases após troca de calor [K]	Temperatura dos gases após troca de calor [°C]	Temperatura do líquido de arrefecimento após troca de calor [K]	Temperatura do líquido de arrefecimento após troca de calor [°C]
2000	417,2	144,2	330,818	57,81799
2000	424,6	151,6	360,9371	87,93712
2500	433,6	160,6	376,9645	103,9645
3000	439	166	396,9732	123,9732
3500	444,6	171,6	415,3902	142,3902
4000	450,2	177,2	437,8156	164,8156

5000	458,2	185,2	495,1455	222,1455
------	-------	-------	----------	----------

Fonte: O Autor

De forma resumida, apresenta-se na Tabela 17 os valores adotados para cada uma das temperaturas:

Tabela 8 - Tabela de temperaturas usadas na simulação

Fluido	Temperatura (°C)
Solução de etilenoglicol e água 50%	87
Ar (condensador)	27
Ar (evaporador)	27
E0	27

Fonte: O Autor

Todos os valores de calor específicos foram obtidos na literatura para suas respectivas temperaturas, como apresentado na Tabela 18:

Tabela 9 - Calores específicos dos fluidos utilizados na simulação

Fluido	Calor Específico (kJ/kgK)
Solução de etilenoglicol e água 50%	3,678 ⁽¹⁾
Ar (condensador)	1,004 ⁽²⁾
Ar (evaporador)	1,004 ⁽²⁾
E0	2,080 ⁽²⁾

Fonte: (1) The Engineering Toolbox (2021), (2) Borgankke & Sonntag (2013)

3.2.4 PROPRIEDADES DO ADSORVENTE E ADSORVATO

Para se calcular a concentração de adsorvato adsorvido na sílica gel, é utilizada uma adaptação da equação de Freundlich, como apresentado no tópico 4.2. A Tabela 19 apresenta os parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 10 - Parâmetros da equação de Freundlich para o par sílica gel/água

q ₀	N (E/RT)
0,552	1,6

Fonte: Cho & Kim (1992)

Por fim, alguns dos dados envolvendo o reator propriamente dito foram recolhidos da literatura, especificamente do trabalho experimental de Cho & Kim (1992), como se segue na Tabela 20:

Tabela 11 - Dados de entrada obtidos na literatura

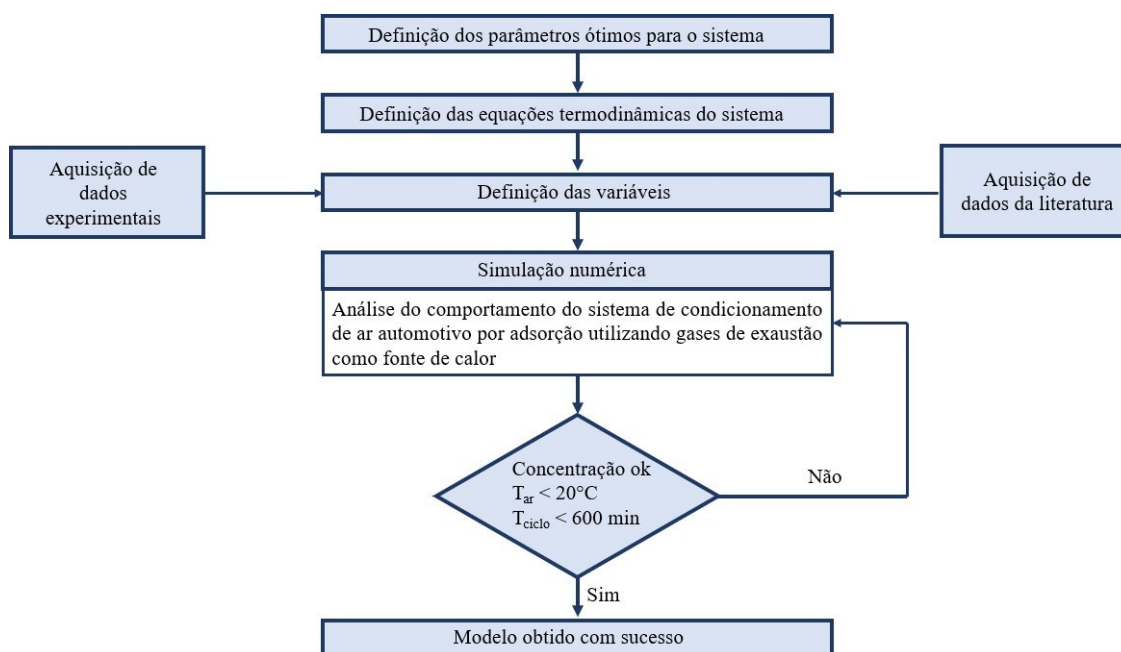
Parâmetro	Valor
Massa de adsorvente	110 kg
Calor específico do adsorvente	$920 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
Calor específico do adsorvato	$4204 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
Massa morta do reator	665 kg
Calor específico de vapor	$1866 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
Calor isostérico	$2,8 \text{ MJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
Calor latente	$2,41 \text{ MJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$

Fonte: Cho & Kim (1992)

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho pode ser dividida em grandes etapas, como pode ser ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma da metodologia de trabalho



Fonte: o Autor

Iniciou-se pela definição dos fatores relevantes para o estudo do sistema de refrigeração por adsorção aplicado em automóveis. Esses fatores foram divididos em cinco grupos (parâmetros de entrada, pares de trabalho, ciclos, tipos de reatores e parâmetros de saída), de modo que fosse possível entender melhor a correlação entre eles e suas propriedades, para, por fim, escolher aqueles que gerariam melhores resultados em um veículo.

Em seguida, definiu-se as equações que regem o ciclo e que seriam necessárias durante a sua simulação numérica através de uma modelagem matemática do sistema, identificando, simultaneamente, as variáveis cuja determinação seria necessária para a obtenção de resultados.

Com conhecimento das variáveis que seriam relevantes, buscaram-se os dados relativos ao processo de combustão interna do motor, dando-se preferência a dados

experimentais, mais condizentes com as condições reais enfrentadas pelo sistema. Em paralelo, outros dados, como massa de adsorvato e adsorvente, entre outros, foram adquiridos, recolhidos da literatura atual e calculados conforme necessário.

Com todas as variáveis determinadas, elaborou-se a simulação, primeiramente utilizando dados recolhidos da bibliografia para validação do seu comportamento para, posteriormente, lançar os dados recolhidos para este trabalho, especificamente.

Estabeleceu-se, baseado nos resultados divulgados em trabalhos posteriores, que, para considerar a simulação como bem-sucedida, seriam estabelecidos alguns critérios:

- As concentrações do reator 1 e 2 deveriam diminuir e aumentar proporcionalmente, alcançando as concentrações máximas e mínimas determinadas na literatura;
- A temperatura inicial do ar condicionado deveria ser menor que 20°C;
- O tempo total até saturação deveria ser menor que 600 minutos.

Tais pontuações seriam os critérios de convergência da simulação e, se por acaso, algum não fosse obedecido, o sistema deveria ser reanalisado.

No entanto, caso estes critérios não fossem respeitados, o modelo deveria ser reajustado, conforme necessário, através da utilização de diferentes líquidos refrigerantes e vazões correspondentes. **CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A partir dos parâmetros discutidos a seguir, a análise de suas características e o entendimento da relação existente entre eles, pode-se determinar aqueles mais propícios para a aplicação em veículos automotores. PARÂMETROS DE ENTRADA DO SISTEMA

Dentre os trabalhos apresentados notou-se que, entre os motores de combustão interna utilizados como diferentes fontes de calor, os resultados apresentados eram distintos entre si para os parâmetros de eficiência SCP e COP. Assim, pode-se dizer que a origem da fonte de calor e a capacidade calorífica do combustível afetam os resultados do sistema, por apresentarem características distintas de temperatura, pressão e vazão de trabalho (Tabela 2).

Tabela 12 - Resumo dos principais valores de temperatura, pressão e vazão para os motores a gasolina e a diesel

	Exaustão	Arrefecimento
Temperatura	300 – 900 °C	90 – 105 °C
Pressão	Menor que 55 mbar	1,0 – 1,4 bar
Vazão	0,08 – 0,1 kg/s	0,6 kg/s

Fonte: O autor

Uma fonte de calor que apresenta uma maior faixa de temperatura pode apresentar um ciclo de adsorção mais rápido, além de permitir a aplicação de pares de adsorção que suportam altas temperaturas ou que funcionam de forma mais adequada a baixas temperaturas, gerando um resfriamento significativo.

Tal escolha pode afetar também o método escolhido para o processo de adsorção. Com temperaturas e vazões maiores, pode-se preferir aquecer um meio (como um líquido), que irá entrar em contato com o reator e prover o calor necessário para o processo. Com fontes de calor de menor intensidade, pode-se preferir utilizá-la diretamente no sistema, de modo a minimizar as perdas de calor.

4.1.2 PARES DE ADSORÇÃO APLICADOS AO SISTEMA

Observou-se que pares de trabalho aplicados em sistemas cuja fonte de calor era derivada de calor perdido na exaustão também apresentavam valores de COP e SCP distintos. Assim, para os mesmos parâmetros de entrada, certos pares apresentavam propriedades consideradas mais adequadas à aplicação pretendida, como descrito na Tabela 3.

Tabela 13 – Propriedades principais dos pares de trabalho aplicáveis à adsorção

Pares de Trabalho	Temperatura de Regeneração	Temperatura de Adsorção	Pressão de trabalho	Custo	Disponibilidade	Tempo de ciclo
Carvão Ativado/ Amônia	Maior que 150°C	40°C	1600 kPa	baixo	alta	840 segundos por ciclos
Carvão Ativado/ Metanol	100°C a 120°C	40°C	Cerca de 10 kPa	baixo	alta	1200 segundos por ciclo
Carvão	Abaixo de	Menores que	Cerca de	Muito	Muito alta	960

Ativado/ Água	150°C	50°C	50 kPa	baixo		segundos por ciclo
Carvão Ativado/ R134a	Cerca de 90°C	20 a 60°C	Máximo de 1000 kPa	Médio baixo	Médio alta	1200 segundos por ciclo
Carvão Ativado/ R32	Cerca de 80°C	30°C	1670 kPa	Médio baixo	Médio alta	550 segundos por ciclo
Sílica Gel/ Água	50 a 150°C	Acima de 50°C	20 kPa	Médio baixo	Médio alta	900 segundos por ciclo
Zeólita / Água	70 a 250°C	Acima de 70°C	750 kPa	Médio alto	Médio alta	Cerca de 1200 segundos por ciclo

Fonte: O Autor

Normalmente escolhe-se pares que trabalham em temperaturas abrangentes, pressões abaixo de 1000 kPa e que não sejam tóxicos. Entender a relação do custo e disponibilidade com os pares de trabalho é fundamental. Assim, optou-se por retirar os MOFs do estudo, por ainda terem pequena abrangência e serem extremamente caros, o que torna inviável sua aplicação no mercado.

Por fim, o tempo de ciclo permite que se entenda tanto a necessidade de manutenção do sistema e sua viabilidade ao ser aplicado na indústria, visto que um sistema que necessite da troca constante dos adsorventes se torna inviável economicamente, quanto a sua capacidade em transformar um sistema tradicionalmente intermitente em um sistema mais contínuo, ao se reduzir o tempo de ciclo.

Normalmente, escolhe-se pares que apresentam tempo de ciclo mais curtos, por estimularem o processo e transformarem o sistema em praticamente contínuo.

4.1.3 TIPOS DE CICLO DE ADSORÇÃO

O tipo de ciclo, com a fonte de calor correta e o melhor par de trabalho é extremamente importante para o estudo de refrigeração por adsorção. Afinal, este irá determinar a transitividade do sistema e sua eficiência, otimizando o projeto além dos outros fatores determinantes, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 14 - Lista de pontos positivos e negativos relativos ao Ciclo Intermitente Básico

Ciclo Intermitente Básico (ou Ciclo de Camada Única)	
Pontos Positivos	Pontos Negativos

Muito simples	Baixa eficiência
Comum de se ver na indústria	Intermitente
Fácil de ser controlado	Demorado
Ciclo de Recuperação de Calor	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Reutiliza o calor perdido no resfriamento	A quantidade de calor recuperada é limitada
Aumenta eficiência em 25%	Necessita de componentes extras
Ciclo de Recuperação de Massa	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Aumenta a quantidade de adsorvato adsorvido	Necessita de componentes extras
Trabalha em extremos de temperatura e pressão	Precisa aumentar a pressão artificialmente
Ciclo de Múltiplas Camadas	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Melhor utilizado com ciclos de recuperação	Mais complexo
Ciclo mais contínuo	Continuidade relacionada com tempo do ciclo
Ciclo de Múltiplos Estágios	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Requisitos de temperatura mais reduzidos	O mais complexo dos ciclos vistos
Auxilia na capacidade de adsorção do sistema	Ocupa muito espaço

Fonte: O Autor

Ciclos de múltiplas camadas e múltiplos estágios geram sistemas mais complexos e mais pesados, que podem diminuir significativamente a eficiência do processo. Assim, muitas vezes, de modo a compensar os reatores e etapas extras, utiliza-se adsorventes menos densos e etapas de recuperação de calor e massa, de modo a diminuir o peso e tamanho do sistema, aumentando sua capacidade, além de garantir que a menor quantidade de calor possível será perdida para o meio.

Ciclos básicos, simples e intermitentes, podem ter seu desempenho melhorado com a utilização de reatores modelados especialmente ao processo, além da utilização de adsorventes com maior capacidade adsorvativa e fontes de calor que fornecem maiores temperaturas ao sistema.

4.1.4 TIPOS DE REATOR ADSORTIVO

Alguns trabalhos também destacaram que, para uma mesma condição, utilizando-se os mesmos pares de trabalho, o sistema poderia gerar resultados diferentes, baseando-se somente no modelo escolhido para o sistema.

Tabela 15 - Pontos positivos e negativos dos principais modelos de reatores

Placa Espiral

Pontos Positivos	Pontos Negativos
Simple e Barato	Denso e ocupa muito espaço
Alta Densidade de Fluxo de Calor	Baixo SCP
Casca-e-Tubo e Gancho	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Fácil Expansão	Baixo SCP
Protege de vazamentos	Denso
Tubo Anular	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Bom para aqueles com baixa capacidade de refrigeração	Necessidade de vários reatores
Placa Aletada	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
COP perto de 0,36 e SCP próximo de 75 W/kg	Difícil de selar à vácuo
Tubo Aletado	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
COP perto de 0,37 e SCP próximo de 150 W/kg	Grande massa e volume
Tubo Chapa	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Mais compacto	Alta resistência a transferência de massa
Tubo Simple e Placa	
Pontos Positivos	Pontos Negativos
Altos valores de SCP	Muito pesado e fora das dimensões necessárias

Fonte: O Autor

Para uso em veículos, o espaço requisitado é limitado, além de que o peso do veículo, em sua totalidade, afeta o seu desempenho. Por fim, por se tratar de um objeto que se move, aspectos como a motricidade e a vibração no interior do equipamento devem ser considerados.

Assim, deve-se evitar reatores que estejam empilhados, necessitem de vários adsorvedores para funcionamento completo ou ocupem um grande volume sem impactar, significativamente, na continuidade do processo ou na sua eficiência.

4.1.5 PARAMETROS DE SAÍDA DO SISTEMA

Percebe-se que os valores de COP e SCP permitem que se preveja a eficiência do sistema e sua possível viabilidade, em face da competição direta com o sistema por compressão-vapor. Adicionalmente, a compacidade determinada tanto pela razão adsorvedor/adsorvente como pelo SCP garante um sistema menor, mais leve e com mais área disponível para a refrigeração em si (Tabela 6).

Tabela 16 - Valores de COP, SPC, razão de massa de adsorvedor e massa de adsorvente e temperatura de saída esperados para um sistema de refrigeração por adsorção

COP	SPC	Razão adsorvedor e	Temperatura de
-----	-----	--------------------	----------------

		adsorvente	Saída
0,3 a 0,4	80 a 150 W/kg _{adsorvente}	2 a 5 kg/kg	8 a 16 °C

Fonte: O Autor

Em muitos casos, pode-se obter bons resultados em termos de eficiência e chegar a temperaturas finais semelhantes a outros dispositivos, no entanto, o sistema é pouco compacto, pesado e grande, inviável de ser estabelecido em um veículo.

Em outros casos, o sistema pode apresentar parâmetros de eficiência relativamente baixos, mas é um sistema pequeno, leve e com uma boa razão de massa. A princípio, pode-se considerar não o utilizar, considerando que existem outros sistemas que apresentam melhor eficiência. No entanto, neste momento, deve-se considerar os inúmeros outros fatores que tornam um sistema de climatização por adsorção interessante: custo de produção, simplicidade, sustentabilidade, entre outros.

Assim, os parâmetros de eficiência, embora extremamente importantes, não podem ser analisados separadamente, mas sempre em conjunto com outros fatores.

4.1.6 ESCOLHA DO SISTEMA

A partir dos dados apontados nas seções anteriores, pode-se destacar alguns pontos fundamentais para a escolha de sistemas mais adaptados a veículos.

Decidiu-se escolher os motores de ignição por centelha e a energia perdida pelos gases de exaustão derivados deste como fonte de calor por apresentarem maiores temperaturas e, portanto, um maior percentual de calor perdido se comparado com outros tipos.

Escolhe-se o par de adsorção gel de sílica/água por ser relativamente acessível, de fácil aquisição, além de apresentar temperatura de adsorção relativamente baixa, o que gera um ciclo rápido. É um par atóxico e que não sofreria grandes perdas com um eventual vazamento. Ademais, seus benefícios conseguem compensar a possível massa extra e proporcionar um bom começo para os estudos deste tipo de refrigeração.

Opta-se por um ciclo de múltiplas camadas, preferencialmente com dois reatores, de modo a não deixar o sistema complexo demais, mantendo uma massa menor e um sistema compacto, ao mesmo tempo incrementando a continuidade do processo.

Decidiu-se por adotar os tubos aletados ao processo de adsorção, por permitirem melhores resultados enquanto apresentando maior compacidade.

Assim, o processo de adsorção será possível de ser realizado em um reator simples, com menor massa e estável, que não necessita de complementos ou estruturas complexas de modo a funcionar perfeitamente, evitando possíveis danos devido à motricidade do espaço onde estará localizado.

O ideal seria objetivar-se alcançar COP maior que 0,4, um SCP maior que 150 W/kg e uma razão de massa menor que 2, de modo a aumentar a eficiência e a compacidade do sistema, ainda que garantindo uma boa continuidade e troca de calor.

Para um primeiro teste deve-se buscar valores coincidentes com o que foi visto na literatura, variando entre 0,2 e 0,3 para o COP, SCP entre 70 e 100 W/kg e razões próximas de 4 ou 5.

Portanto, adotou-se inicialmente um sistema que utiliza como fonte de calor os gases de exaustão de um motor a combustão por centelha, cujo par de trabalho é sílica-gel/água, apresentando um ciclo de múltiplas camadas (com, no mínimo, dois reatores) e tubos aletados padrão como modelo de reatores.

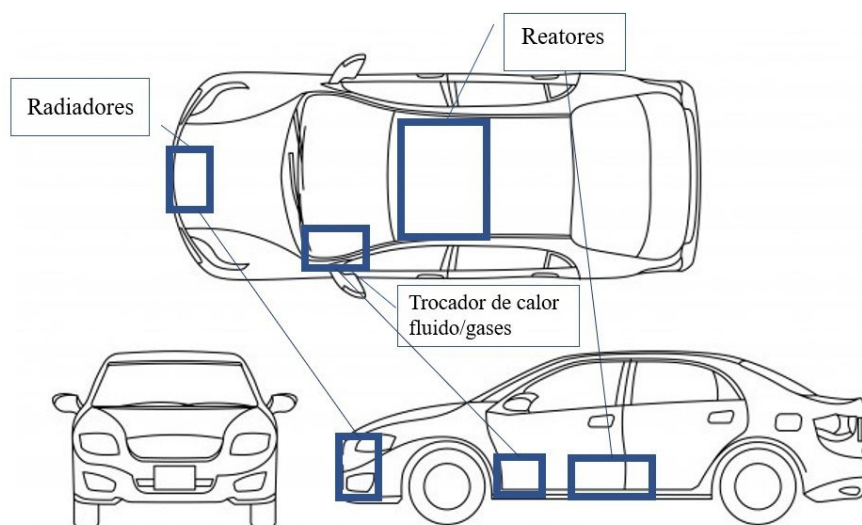
Tabela 17 - Resumo das considerações

Parâmetros de Entrada	Pares de Trabalho	Tipos de Ciclo	Modelos de Reatores	Parâmetros de Saída
Motores a centelha Gases de exaustão	Sílica-gel/água	Ciclo de múltiplas camadas	Tubos aletados	COP maior que 0,4 SCP maior que 150 W/kg Razão de massas menor que 2

Fonte: O Autor

Intenciona-se implantar tal sistema em um veículo de passageiros. Para isto, decidiu-se dispor dos equipamentos necessários para o ciclo da seguinte maneira, baseado em estudos prévios (Figura 25):

Figura 25 - Leiaute da disposição de equipamentos críticos para o funcionamento do sistema de condicionamento de ar por adsorção aplicado ao interior de um veículo



Fonte: Adaptado de Mendes *et al.* (2021)

Com este leiaute determinado e com o auxílio do diagrama do ciclo, é possível determinar as equações termodinâmicas que governam o sistema, as variáveis que deverão ser determinadas e os coeficientes que devem ser considerados para a aplicação destas equações em uma simulação numérica.

4.2 PREMISSAS RELATIVAS AO SISTEMA

Algumas premissas foram consideradas de modo que o sistema estudado fosse capaz de ser desenvolvido em um ambiente numérico e fornecesse resultados próximos à realidade.

O Gel de Sílica, como visto na seção 4.3.2, não é capaz de aguentar altas temperaturas (cerca de 300°C), sem se desnaturar e afetar o processo de adsorção permanentemente.

Desta maneira, o ideal não seria aplicar os gases de exaustão diretamente sobre o reator para o seu aquecimento, mas sim usar um meio para este fim.

Considerando que o espaço do veículo é reduzido e a adição de massa deve ser bem considerada, o melhor fluido para o aquecimento do reator seria uma solução de etilenoglicol-água 50%, ou seja, líquido de arrefecimento, o mesmo utilizado para a troca de calor do motor.

Além de já ser um meio presente no veículo, naturalmente, ele pode se mostrar útil em certas situações como marcha lenta, pois pode acrescentar calor ao meio e permitir o funcionamento dos reatores mesmo nessa condição.

Outro ponto que deve ser considerado é o resfriamento do reator. Seguindo as mesmas considerações, os fluidos mais indicados para tal processo seriam o líquido de arrefecimento ou o próprio combustível veicular.

Ambos estão presentes naturalmente no veículo e apresentam boa capacidade de troca de calor. Portanto, ambos foram testados e seus resultados apresentados na seção subsequente.

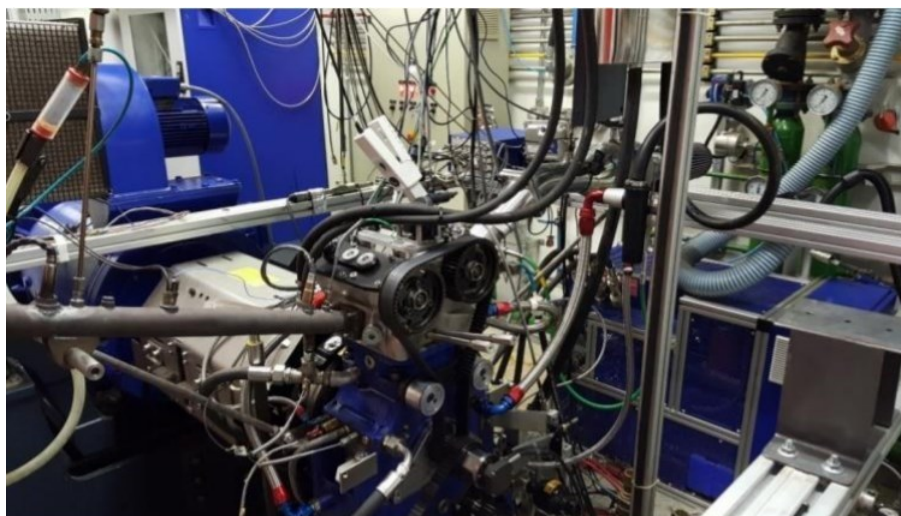
A vazão do fluido utilizado para aquecimento ou resfriamento do motor deve ser analisada. Como o mesmo reator deve ser, ora aquecido, ora resfriado, o fluido deve ser não só desviado do reator, mas a sua vazão deve ser controlada, dependendo das condições de carga do motor que afetam a própria vazão e temperatura dos gases de exaustão.

Dessa maneira, optou-se por utilizar uma válvula de três vias para controle desta vazão na entrada e na saída do coletor do líquido de arrefecimento usado para o aquecimento do reator e do tanque de combustível usado no resfriamento do reator, além de ser usado para o controle de vazão de adsorvato entre os componentes do sistema.

4.3 MOTOR

O motor que foi utilizado na obtenção de dados experimentais foi o Monocilíndrico de Pesquisa (SCRE – do inglês, *Single Cylinder Research Engine*), apresentando quatro válvulas, aspirado e com sistema de injeção direta (Figura 26):

Figura 26 - Imagem do monocilindrico utilizado para testes



Fonte: Vaz, 2018

O motor conta com duas válvulas de admissão e a mesma quantidade de válvulas de exaustão. Apresenta-se, na Tabela 9, maiores especificações do motor:

Tabela 18 - Características do motor monocilindro

Fator	Descrição
Motor	AVL 5496 - Monocilíndrico
Volume deslocado	454,16 cm ³
Número de válvulas	4
Pressão de injeção de combustível	80bar
Temperatura de injeção do combustível	20°C
Duração da admissão	230°
Lubrificação	Óleo a 90°C
Arrefecimento	Água a 90°C

Fonte: Vaz, 2018

Os combustíveis podem ser denominados pela letra “E” seguido de valores, como é o caso de E0, E22 e E100. Tais simbologias representam, através da numeração, a porcentagem, em volume de etanol anidro em mistura com a gasolina. No caso do E0, seria gasolina pura padrão L6, enquanto E22, a mistura mais utilizada no Brasil, seria 22% de etanol anidro em solução com gasolina padrão e, por fim, E100 seria etanol hidratado com 4% de água.

Para a obtenção de dados experimentais, foi utilizado para a combustão, combustível do tipo E0. Na Tabela 8, segue a concentração química do combustível:

Tabela 19 - Concentração químico do combustível E0

Combustível	%C	%H	%S	%N	%O	%M	%Fuligem	Densidade (kg/m ³)	PCI (MJ/kg)
E0	86,2	12,8	1,0	0	0	0	0	0,76	43,623

Fonte: Morvay & Gvozdenac (2008)

O motor utilizado para obtenção dos dados experimentais foi testado em bancada dinamométrica, em diferentes condições de carga e rotação, apresentadas na Tabela 10, a uma temperatura ambiente de 27°C, considerando o experimento feito a uma altura em relação ao nível do mar de 852 metros.

Manteve-se as condições de operação as mais constantes possíveis, pois a intenção da simulação não era observar as condições transientes do motor, mas uma condição específica, constante, sob mesma rotação e carga.

Optou-se por escolher uma condição de operação permanente para o motor, a 2000 rpm e 8,44 bar de potência indicada, enquanto os reatores e trocadores de calor funcionam de maneira transiente com o tempo.

Desta maneira, seria possível averiguar se, em condições de baixa velocidade, em condições análogas a enfrentadas em um trânsito urbano na cidade de Belo Horizonte, o sistema de condicionamento de ar automotivo por adsorção seria o suficiente para deixar confortável o habitáculo do usuário.

Na Tabela 10, observa-se a tabela resumida das condições de operação do motor monocilindro:

Tabela 20 - Condições de operação do monocilindro

Combustível	Regime de rotação (rpm)	Carga bmep (bar)	Carga nimep (bar)	Vazão comb [kg/h]	Vazão ar [kg/h]	Pressão [bar]	Tadm [°C]	Tescape [°C]
E0	1250	4	4,420953333	0,58	8,6	0,92	27	526
E0	1500	6	6,336324333	0,97	14,3	0,92	27	597
E0	2000	4	4,512360167	1,01	15	0,92	27	613
E0	2000	8	8,4461	1,87	27,4	0,92	27	650
E0	2500	8	8,654920667	2,16	31,6	0,92	27	695
E0	3000	6	6,840384	2,06	30,5	0,92	27	702
E0	3000	8	8,816004	2,53	37,8	0,92	27	722
E0	3500	8	8,927046333	2,89	42,7	0,92	27	750
E0	4000	8	8,960722	3,31	48,5	0,92	27	778

Fonte: Vaz, 2018

4.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA IMPLEMENTADA

Optou-se por utilizar a linguagem Python, uma das mais utilizadas, por se mostrar intuitiva e completa, sem necessidade de licença para seu funcionamento.

O ‘*Colaboratory*’ ou ‘*Colab*’, espaço utilizado para executar a simulação desenvolvida neste trabalho, foi criado pelo *Google* com o objetivo de permitir escrever código Python diretamente do navegador, sem necessidade de configurações iniciais, acesso gratuito aos GPUs da *Google* para ‘rodar’ o código e fácil compartilhamento através da nuvem.

Entre as várias possibilidades de métodos numéricos disponíveis, deu-se preferência ao método conhecido como LSODA, por ser um método mais simples, explícito e, ao mesmo tempo, ser capaz de controlar o ruído gerado muito bem, controlando automaticamente o seu passo.

4.4.1 DIAGRAMA DE BLOCO

Apesar da elaboração do código de simulação ser bem intuitiva, ainda assim precisa seguir uma ordem lógica, de modo que os resultados sejam corretos e não sejam evidenciados erros de sintaxe. A Figura 27 demonstra o resumo do diagrama de bloco da simulação.

O primeiro passo é determinar a concentração de adsorvato em sílica gel e a temperatura do reator 1. Tais fatores são dependentes do tempo e, em um primeiro momento será determinado dq_1/dt e dTr_1/dt .

Obtendo tais valores, a derivação será realizada através da função “edo”, necessitando que os valores estejam arranjados em forma matricial, na qual será determinado o intervalo de tempo e será escolhido um valor inicial arbitrário para se iniciar o processo iterativo.

Assim, prossegue-se para a solução, função esta que recolhe os resultados obtidos pela função de equações ordinárias, aplicando o intervalo de tempo e o método numérico selecionado.

Considerando o processo teórico que deve ser efetuado no Reator 1, podem ser estabelecidos dois parâmetros para determinação do prosseguimento da simulação ou rearranjo, caso necessário: a concentração de água na sílica gel deve diminuir com o

tempo, conforme o reator é aquecido, e a temperatura do reator deve aumentar conforme o tempo.

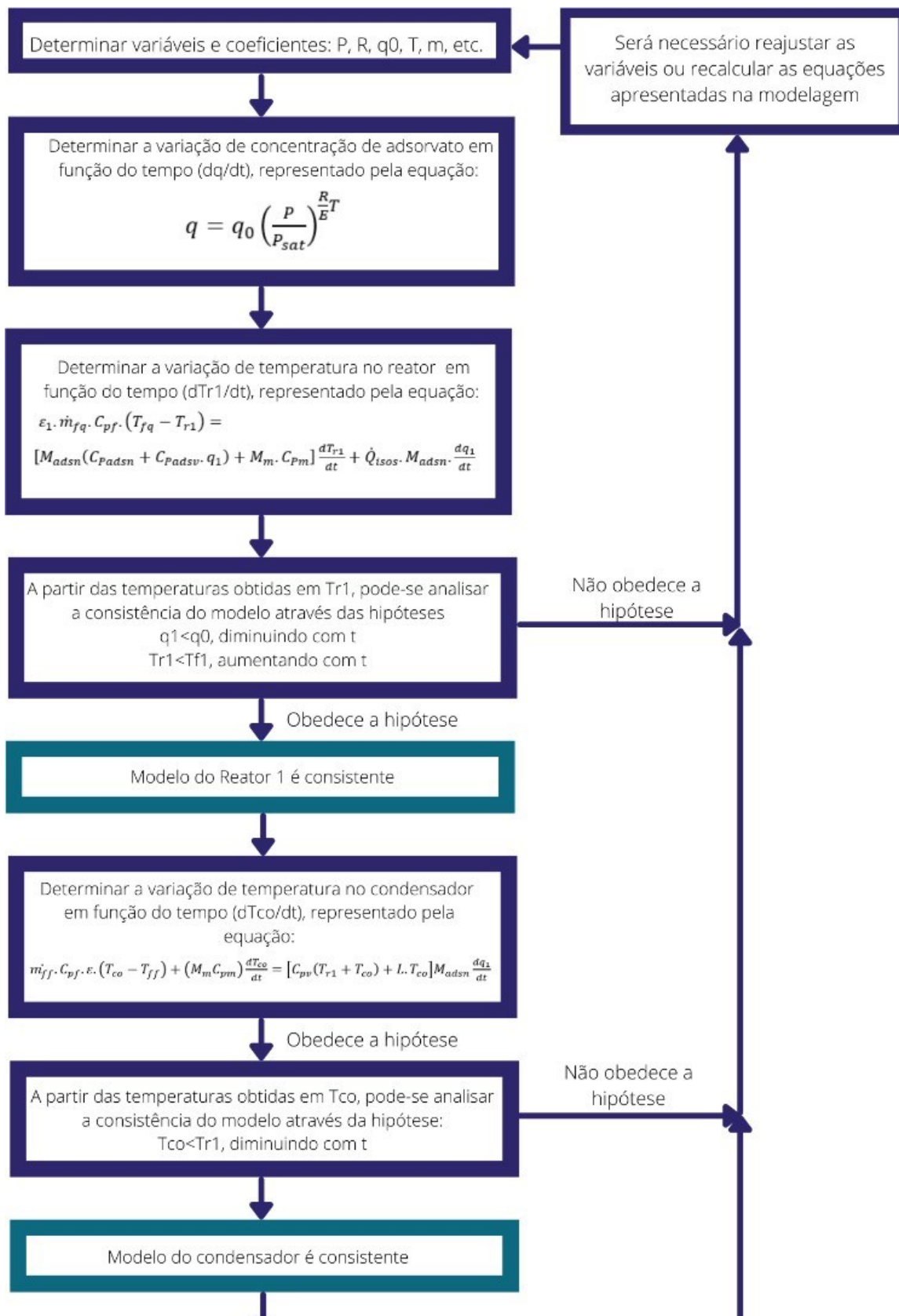
Caso isso não ocorra, deve-se retornar para o momento de aplicação de variáveis e desenvolvimento de equações diferenciais, garantindo que as equações utilizadas estão corretas e que sejam utilizadas as variáveis que forneçam resultados dentro dos parâmetros estabelecidos.

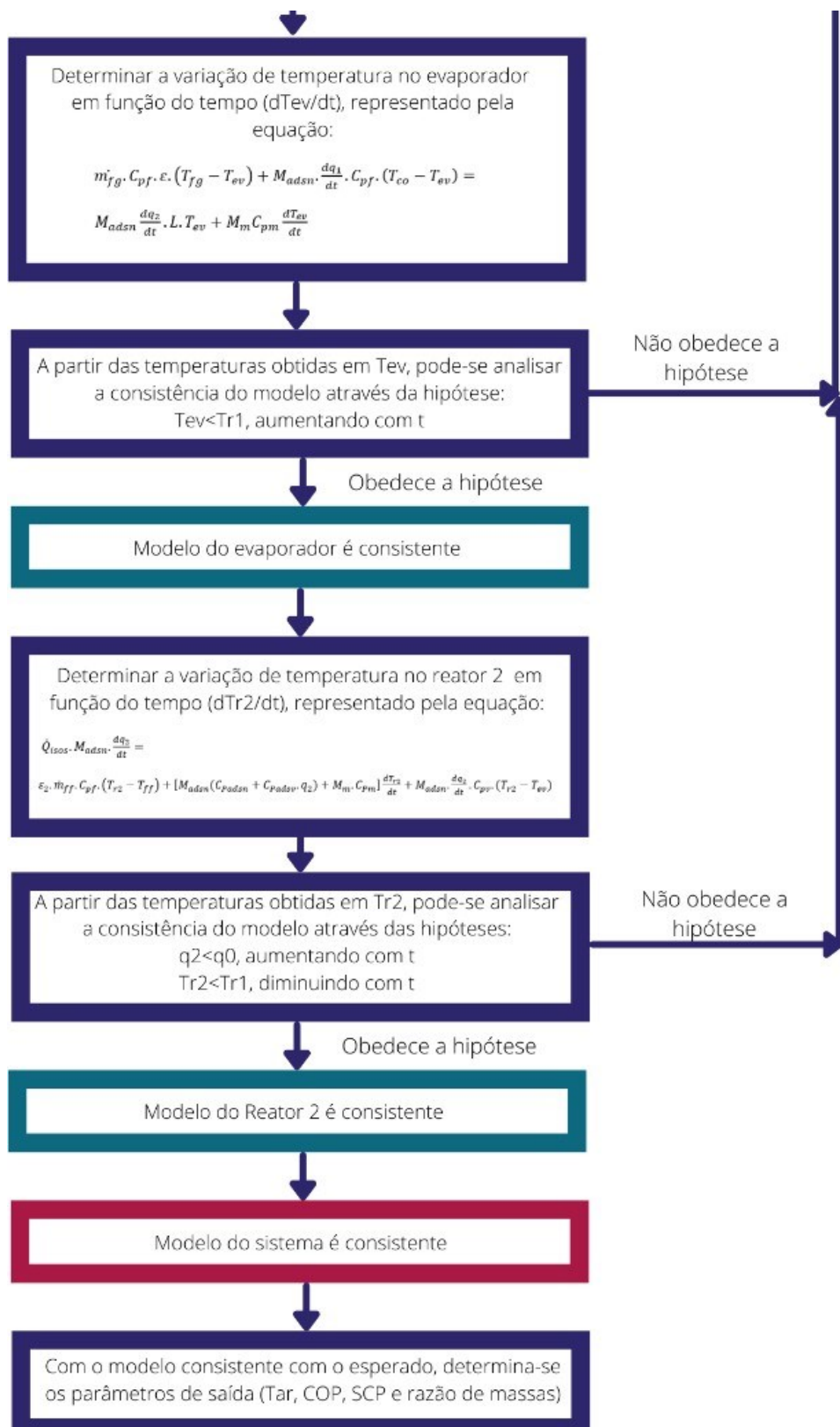
Obedecendo esse parâmetro, determina-se a função de temperatura do condensador, dependente do tempo, dada como dT_{co}/dt . Da mesma maneira que foi efetuada para o Reator 1, a derivação se dará por meio da função “edo” e o intervalo de tempo e método numérico selecionado será aplicado na solução.

Para garantir que o sistema esteja funcionando conforme determinado teoricamente, estabelece-se que a temperatura do condensador deve ser menor que a temperatura do Reator 1 e ela deve reduzir continuamente com o tempo.

De maneira semelhante ao que ocorreu com o Reator 1, caso os parâmetros não fossem obedecidos, deve-se visitar as variáveis e equações matemáticas. Sendo obedecido, prossegue-se para determinação dos valores do evaporador.

Figura 27 - Fluxograma da simulação





Assim, determina-se a função de temperatura do evaporador (dT_{ev}/dt). Como foi efetuado para os dois componentes anteriores, será feita a derivação das equações termodinâmicas determinadas anteriormente através da função “edo”, aplicando-se o intervalo de tempo e método numérico selecionado.

Estabelece-se que a temperatura do evaporador deve ser sempre inferior à temperatura do Reator 1 e esta deve aumentar continuamente, conforme o tempo. Caso estes parâmetros não fossem obedecidos, reanalisar as equações e propriedades das variáveis. Caso contrário, pode-se prosseguir para o início de um novo ciclo, através do Reator 2.

Deve-se estabelecer a temperatura do Reator 2, variável através do tempo, dada como dTr_2/dt . A derivação das equações termodinâmicas se dará por meio da função “edo”, aplicando-se o intervalo de tempo e método numérico selecionado.

O reator 2 é analisado, e define-se, como parâmetro, que o comportamento deve ser apresentado como o inverso do Reator 1. Assim, a concentração de água na sílica gel deve aumentar continuamente com o avanço do tempo e a temperatura do reator deve diminuir continuamente. Caso tal determinação não seja aplicada, deve-se realizar nova análise das equações e variáveis.

Caso contrário, com todos os passos funcionando corretamente, estabelece-se que a simulação está válida e pode-se calcular os parâmetros de desempenho do sistema.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada neste capítulo foi utilizada para o modelamento numérico de um sistema de condicionamento de ar automotivo por adsorção. Os dados experimentais adquiridos para o motor monocilíndrico fornecem os valores necessários para a determinação da temperatura e vazão do fluido quente que irá aquecer os reatores em etapas distintas. Os dados calculados ou retirados da literatura permitiram realizar uma simulação, cujo diagrama de bloco foi determinado, considerando os fatores de operação do sistema proposto.

Os resultados obtidos durante as simulações serão abordados no próximo capítulo.

5 RESULTADOS

Essa seção apresenta os resultados obtidos para o sistema de condicionamento de ar automotivo por adsorção que foi modelado matematicamente e simulado numericamente, em uma condição específica de operação do motor de 2000 rpm e 8,44 bar de Pressão Média Efetiva Indicada, enquanto os reatores e trocadores de calor funcionam de maneira transiente com o tempo, a partir da quantidade de energia perdida pelo motor nesta condição.

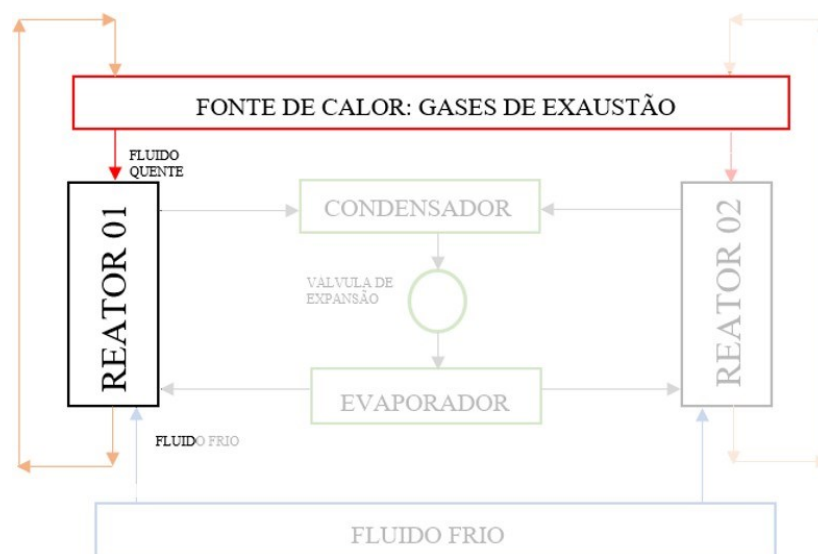
5.1 CICLO EM SATURAÇÃO

Neste primeiro momento, será analisado o ciclo até a sua saturação, de modo que, posteriormente, seja identificado e aplicado o momento ótimo para o revezamento de reatores e início de um novo ciclo, mantendo-se a continuidade do processo e garantindo-se o conforto térmico do usuário.

5.1.1 REATOR 1

Para se iniciar o processo de dessorção (Figura 28), é necessário que o reator seja aquecido por um fluido quente derivado da fonte de calor escolhida.

Figura 28 - Diagrama esquemático do ciclo de condicionamento de ar: o Reator 1



Fonte: O Autor

Para a simulação, optou-se por usar um fluido intermediário para obter o calor advindo dos gases de exaustão e aquecer o Reator 1.

Como foi visto no Capítulo 4, a temperaturas superiores a 200°C para a maior parte das sílicas comercializáveis, o grupo silanol que compõe a sua superfície é condensado e se transforma em água. Tal fato é prejudicial ao sistema, pois a condensação deste grupo diminui a quantidade de poros superficiais, reduzindo, igualmente, a quantidade de adsorvato a ser adsorvido, conseqüentemente afetando o desempenho do sistema.

Ao se utilizar um fluido intermediário de mesma composição do líquido de arrefecimento automotivo, em caso de baixas cargas e rotações, que diminuem a temperatura dos gases de exaustão, o líquido de arrefecimento poderia ser utilizado para auxiliar o processo de aquecimento do Reator 1.

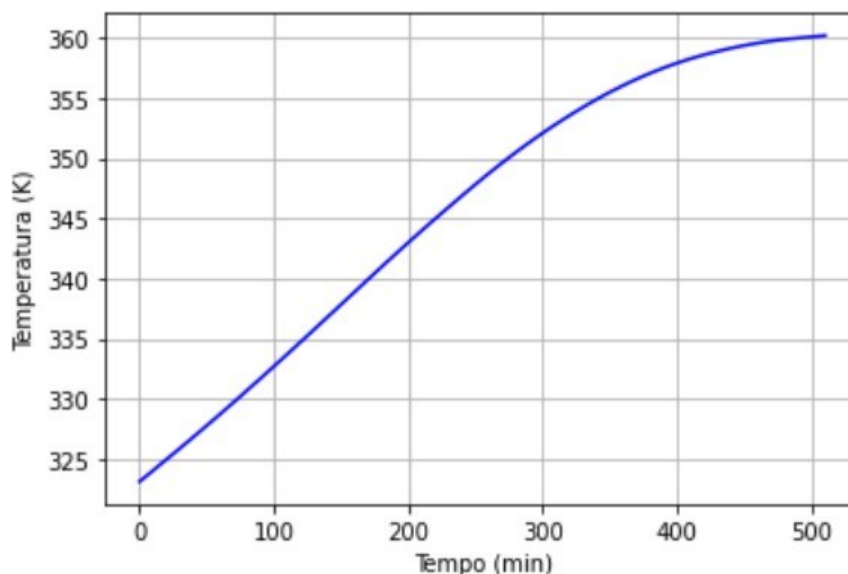
Desta maneira, etilenoglicol 50% em solução com água foi utilizado para trocar calor com gases de exaustão a 650°C (2000 rpm), sendo enviado para trocar calor com o Reator a 87,9°C, enquanto os gases de exaustão saem para o ambiente a 151,6°C, como visto na Tabela 17.

Sabe-se que, teoricamente, fornecendo calor derivado da fonte correta, o Reator 1, iria, lentamente se aquecer. Esse aquecimento iria desorver o adsorvato (a água) adsorvida no adsorvente (sílica gel), lentamente, até que o máximo de água fosse retirado da superfície porosa, podendo ser enviado, portanto, ao condensador.

Tal processo, em um ambiente fechado, iria variar com a temperatura e a pressão de saturação, liberando, portanto, o adsorvato a alta pressão, como ocorre com o fluido refrigerante de um sistema compressão-vapor.

Durante a simulação, percebe-se que tal comportamento reflete a realidade, como se percebe na Figura 29.

Figura 29 - Temperatura do Reator 1 em função do tempo (fase de desorção)

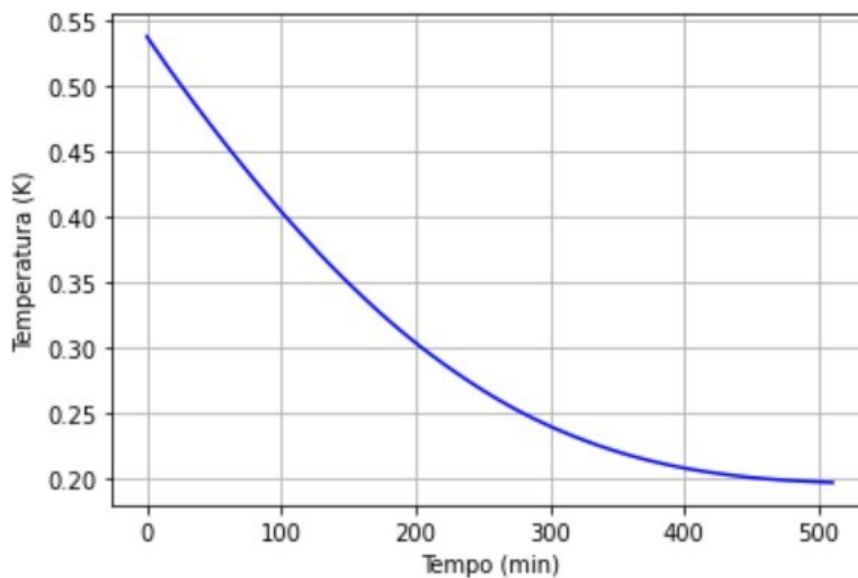


Fonte: O Autor

O mesmo fenômeno de temperaturas e pressões é confirmado na simulação. Sabe-se que a taxa de concentração (Figura 30) de água na sílica gel é dependente da pressão do sistema e a pressão de saturação calculada por Antoine, esta dependente da temperatura. Considerando o Reator um ambiente fechado, sabe-se que, conforme este trocador de calor é aquecido, aumentando a temperatura, eleva-se a pressão de saturação em relação à pressão controlada no Reator, favorecendo a desorção da água da sílica gel.

Ao longo do tempo, de modo a manter a desorção a concentrações cada vez maiores, o reator deve ser continuamente aquecido, garantindo que o quociente entre a pressão do sistema e a pressão de saturação seja cada vez maior. No entanto, conforme vai caindo a concentração de água na sílica, a velocidade de aquecimento passa a não ser suficiente para desorver toda a água faltante, deslocando o equilíbrio do sistema e mantendo uma porcentagem de água retida no adsorvente.

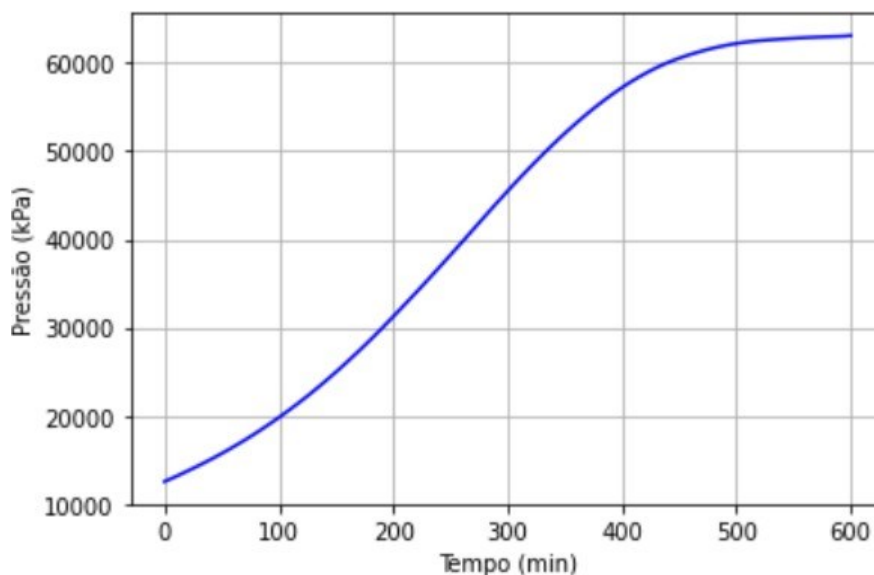
Figura 30 - Concentração do Reator 1 em função do tempo



Fonte: O Autor

Tal efeito também é visto com a variação de pressão interna ao Reator (Figura 31), que aumenta continuamente até se manter em equilíbrio com o meio. Como foi comentado na metodologia, o sistema se encontra em condições subatmosféricas de modo a garantir que a água seja liberada na forma de vapor a temperaturas abaixo de 100°C.

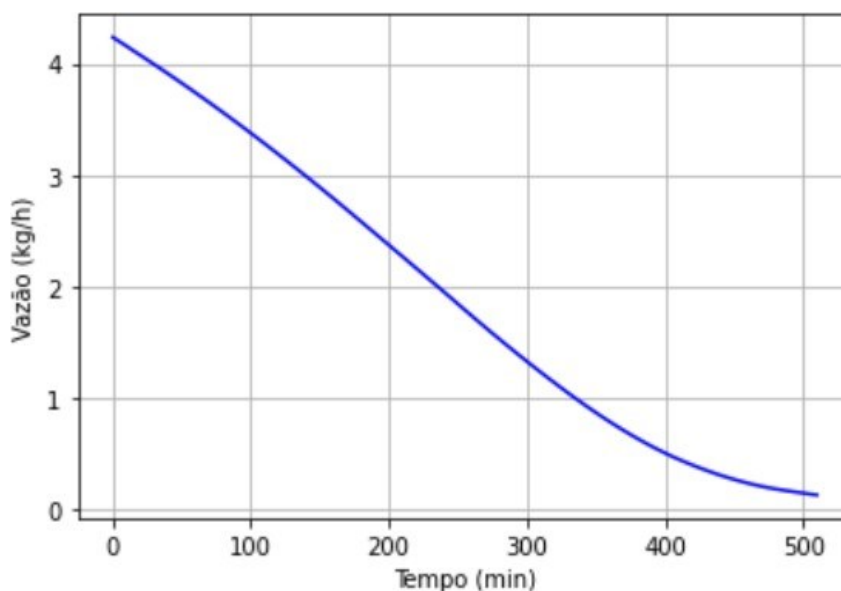
Figura 31 - Pressão de saturação ao longo do tempo



Fonte: O Autor

Assim, como notado anteriormente, a vazão de água desorvida (Figura 32) da sílica gel é dependente da massa de adsorvente e da concentração deste ao longo do tempo. Da mesma maneira que a taxa de dessorção vai decaindo ao longo do tempo até se estabilizar a alta temperatura e pressão, garantindo o equilíbrio do sistema liquido-vapor, a vazão reflete este comportamento. Assim, o sistema inicia o aquecimento e fornece uma alta vazão de adsorvato ao sistema, que vai decaindo conforme se torna mais difícil a dessorção final do adsorvato da sílica gel no Reator 1. Por fim, a vazão se estabiliza a valores tão baixos que, efetivamente, pode-se considerada, praticamente, nula.

Figura 32 - Vazão de adsorvato ao longo do tempo



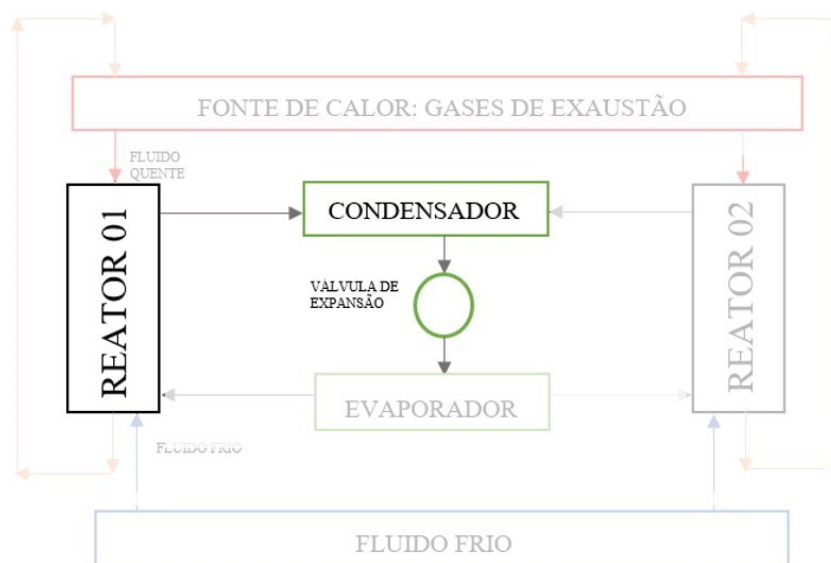
Fonte: O Autor

Assim, é interessante evitar que isto ocorra, o que favoreceria a intermitência do processo. O ideal seria identificar o momento em que a queda de vazão é significativa e promover a troca de reatores neste momento, garantindo uma vazão renovada, além da aplicação de uma válvula de 3 vias.

5.1.2 CONDENSADOR

O condensador (Figura 33), teoricamente, troca calor com o ambiente, sendo arrefecido pelo fluido a alta vazão que passa por ele. Isto ocorre através da mudança de fase do adsorvato, de vapor para líquido.

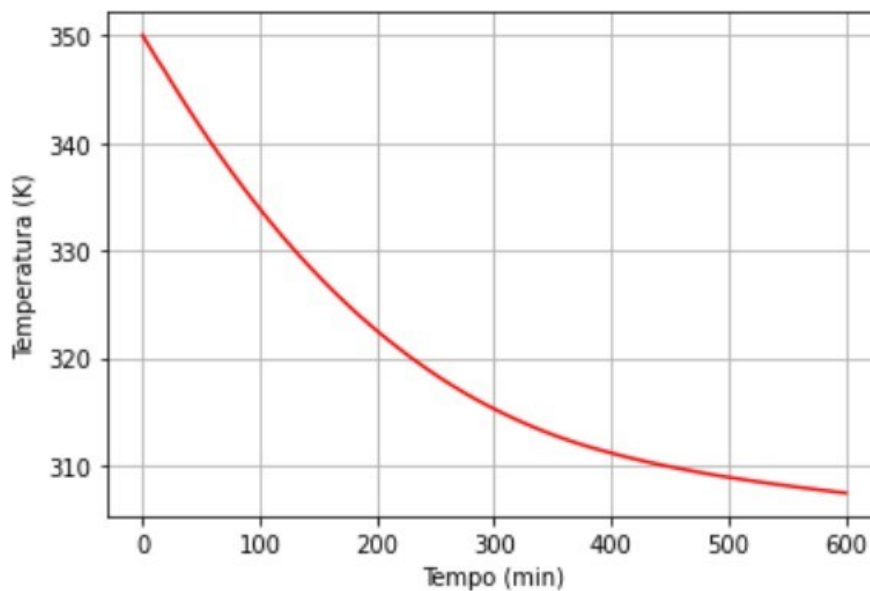
Figura 33 - Diagrama esquemático do ciclo de condicionamento de ar: o Condensador



Fonte: O Autor

Para a simulação, considerou-se que o fluido que troca calor com o condensador seria ar, como é comum no caso de ar-condicionado automotivo (Figura 34).

Figura 34 - Temperatura do condensador em função do tempo



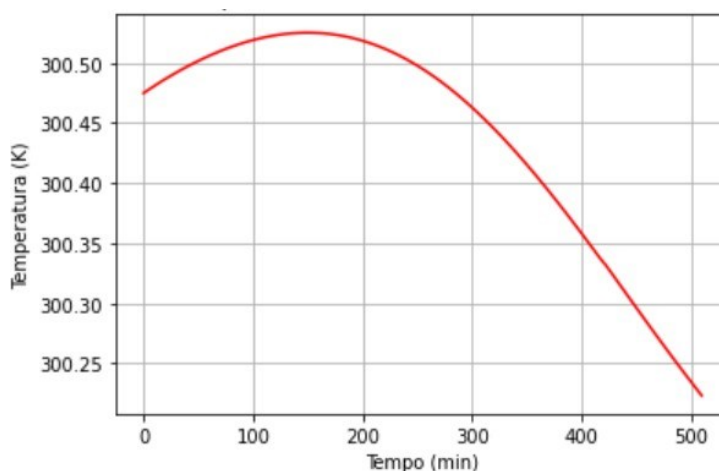
Fonte: O Autor

Observa-se que no caso do sistema de condicionamento de ar automotivo por adsorção, a temperatura de saída do ar não é muito alta, estando a poucos graus Celsius acima da temperatura ambiente testada (Figura 35).

Considerou-se, ao longo do tempo, que a vazão de ar que passa pelo condensador seria constante. No entanto, como se observa na Figura 35, por volta dos 200 minutos de ciclo a vazão de adsorvato já é muito inferior à vazão de ar do condensador.

Assim, o sistema aos poucos vai se saturando de ar, para a pouca quantidade de adsorvato que passa por ele, fazendo com que, eventualmente, pare de condensar propriamente o adsorvato e estabilize a uma baixa temperatura.

Figura 35 - Temperatura de saída de ar do condensador em função do tempo

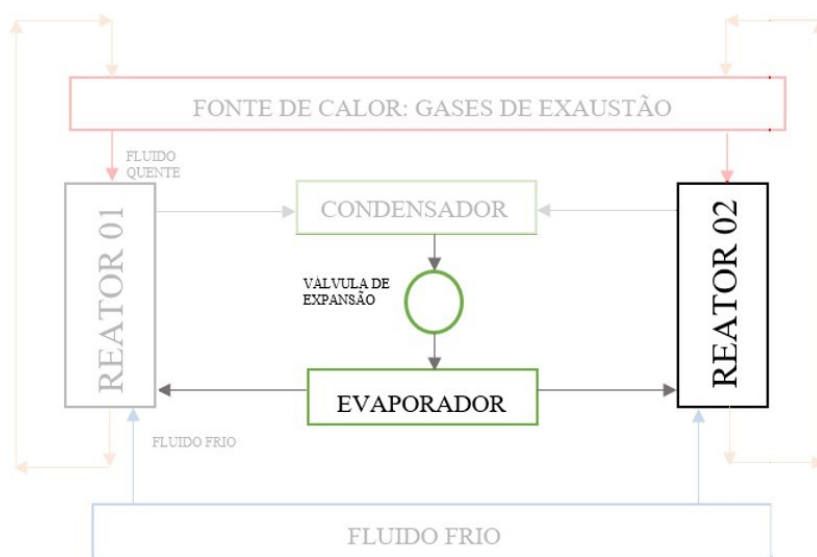


Fonte: O Autor

5.1.3 EVAPORADOR

O evaporador (Figura 36) pode ser definido como um trocador de calor que é aplicado a um sistema com o objetivo de remover calor de um ambiente. O líquido refrigerante entra no evaporador como uma mistura de líquido-vapor, saindo tanto como vapor superaquecido ou se mantendo bifásico, mas aquecido.

Figura 36 - Diagrama esquemático do ciclo de condicionamento de ar: o Evaporador

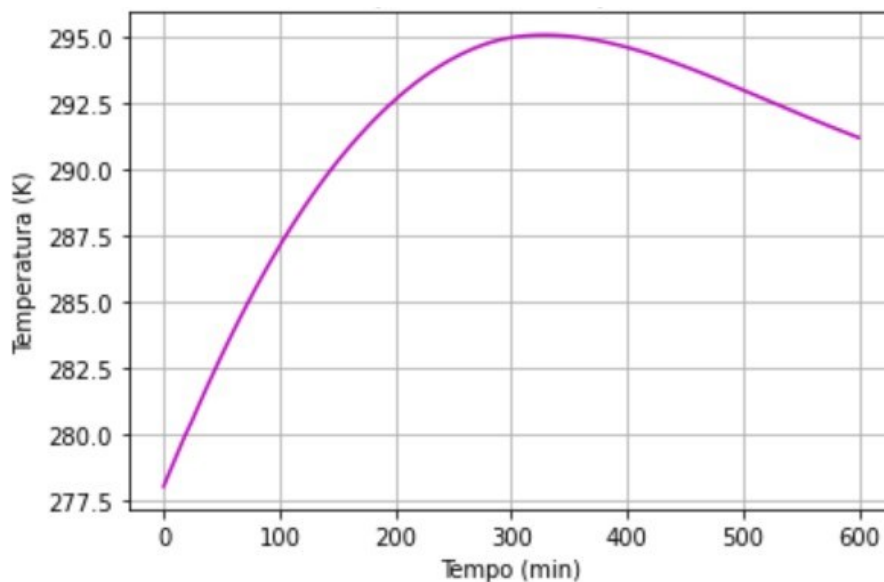


Fonte: O Autor

Usualmente, da mesma maneira que vista no condensador, o fluido mais utilizado para esta troca de calor é o ar, fluido este que foi considerado na simulação.

Seu comportamento também pode ser confirmado na Figura 37:

Figura 37 - Temperatura do evaporador em função do tempo

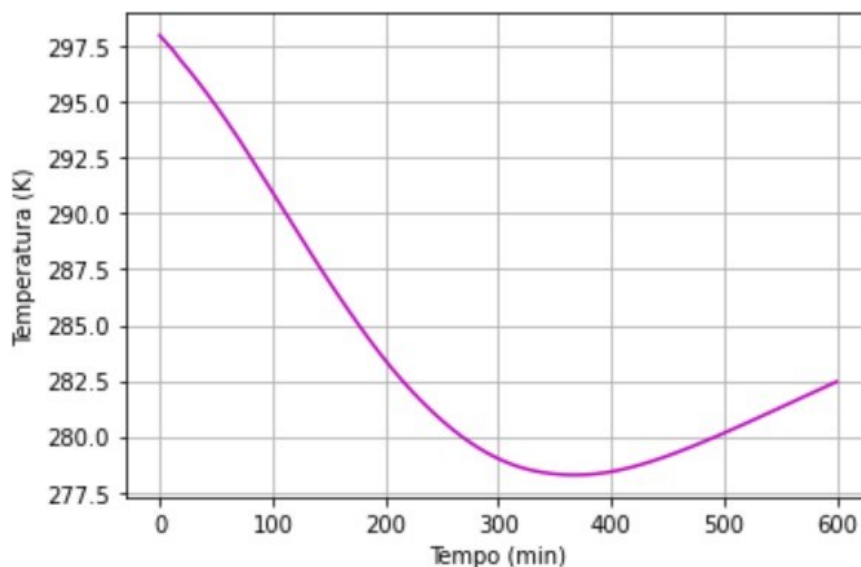


Fonte: O Autor

Ressalta-se que o evaporador inicia a uma temperatura inferior à temperatura ambiente por conta do dispositivo de expansão aplicado ao sistema, que expande o fluido e permite que este mude de estado a baixas temperaturas.

A partir da temperatura do evaporador, pode-se calcular a temperatura de saída do ar que é usado para resfriar o habitáculo (Figura 38).

Figura 38 - Temperatura de saída do ar no evaporador



Fonte: O Autor

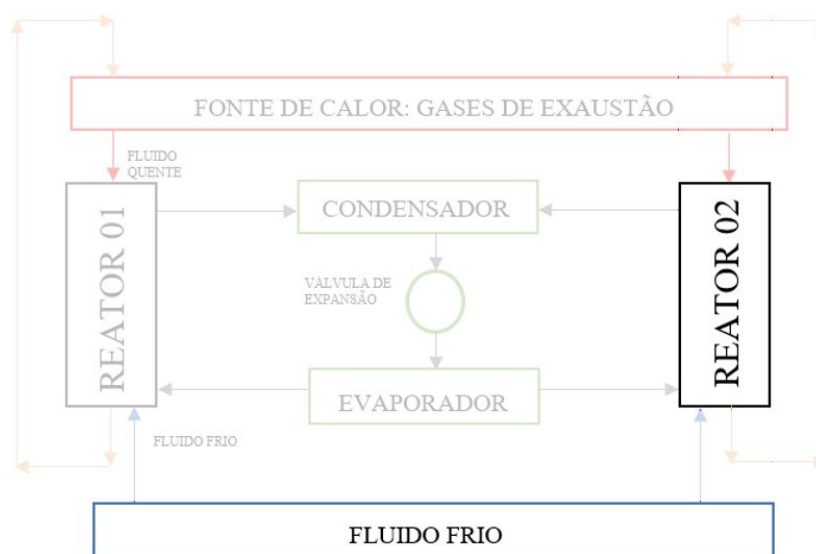
Nota-se, que, da mesma maneira que o condensador, ao longo do tempo, a eficiência do evaporador vai caindo, conforme a vazão de adsorvato vai diminuindo e o sistema vai se saturando.

No entanto, destaca-se que, até o momento de declínio de sua eficiência, por volta dos 300 minutos, a temperatura de saída do ar é condizente com o que deve ser proporcionado para deixar o habitáculo em uma temperatura confortável, variando de 7 a 10°C.

5.1.4 REATOR 2

Finalizando o ciclo (Figura 39), para que se ocorra a adsorção da água de volta na sílica gel, é necessário que o reator seja resfriado por um fluido frio à escolha.

Figura 39 - Diagrama esquemático do ciclo de condicionamento de ar:
O Reator 2

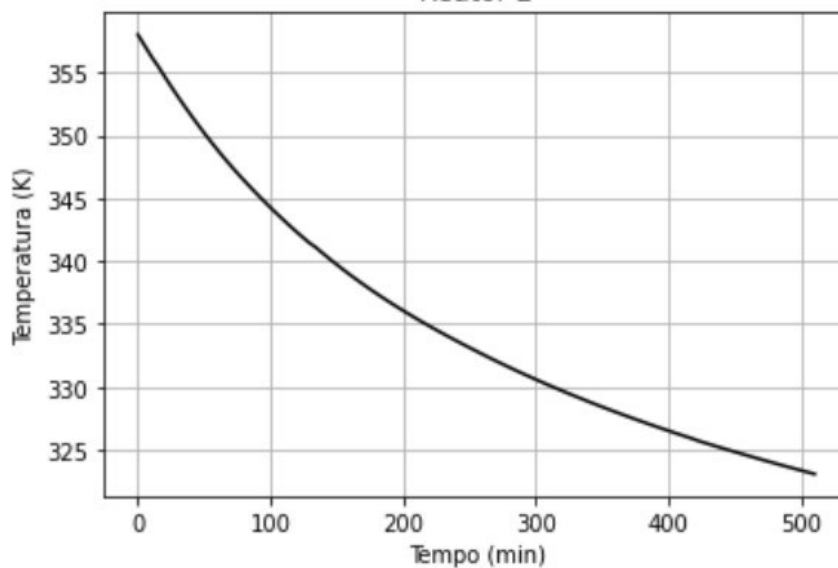


Fonte: O Autor

Uma das opções mais interessantes para se resfriar o reator 2 seria o próprio combustível utilizado para o motor veicular. Isso beneficiaria não só o reator, que seria resfriado até a temperatura necessária para se iniciar o processo de adsorção, como aumentaria a temperatura do combustível, favorecendo o processo de combustão em condições específicas.

Assim, por fim, ao se retirar calor do Reator 2, este, iria, lentamente se resfriar. Esse processo iria permitir a nova adsorção do adsorvato (a água), até que o máximo de água possível fosse admitida na superfície porosa. Nota-se que o comportamento é recorrente e previsível (Figura 40).

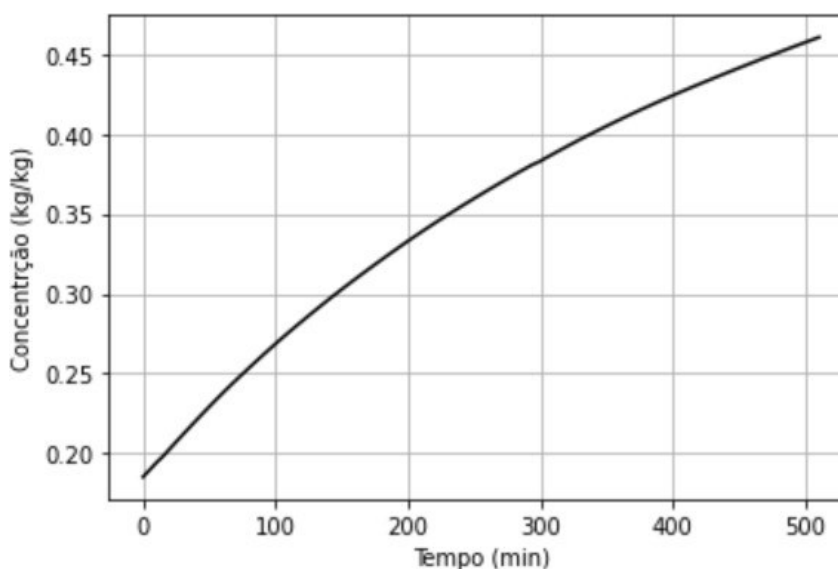
Figura 40 - Temperatura do Reator 2 em função do tempo (fase de adsorção)



Fonte: O Autor

Observa-se, também, que a concentração na sílica-gel se comporta como idealizado teoricamente (Figura 41), aumentando progressivamente conforme se resfria o reator, chegando à sua melhor concentração na temperatura de adsorção ideal (cerca de 50°C).

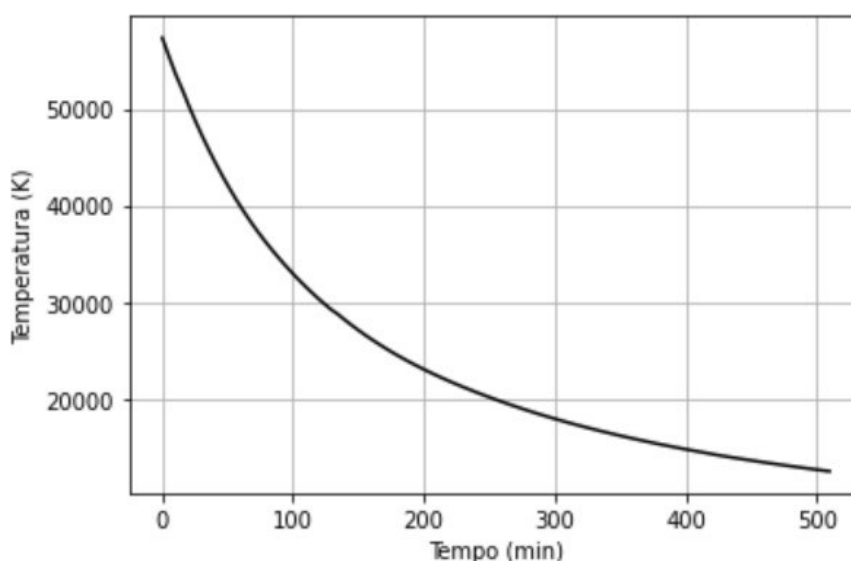
Figura 41 – Concentração do Reator 2 em função do tempo



Fonte: O Autor

Por fim, observa-se também o comportamento do reator 2, com a pressão decaindo conforme a sua temperatura também decai (Figura 42).

Figura 42 - Pressão de saturação ao longo do tempo



Fonte: O Autor

No entanto, para se obter resultados tão bons, a vazão de gasolina necessária para resfriar é na ordem de 400 kg/h, o que seria inviável na aplicação desse sistema em um veículo automotor urbano.

Isso se deve ao fato de que, para se manter essa vazão com a quantidade de combustível disponível em um carro, o líquido teria que estar circulando continuamente pelo sistema e não poderia ficar muito tempo armazenado no tanque.

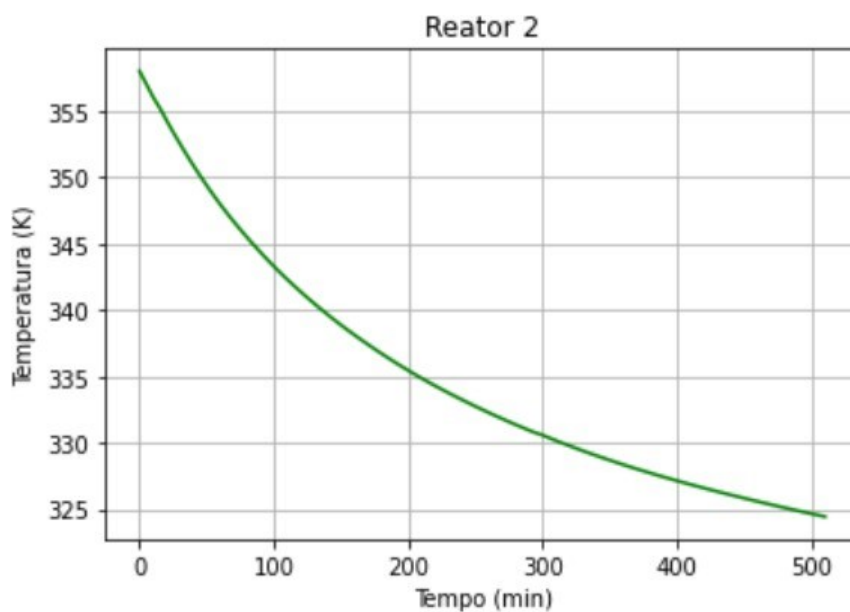
Adicionalmente, mesmo que fosse viável retornar uma quantidade suficiente de combustível para se realizar a combustão dentro do motor, o usuário teria que manter um nível sempre alto de gasolina disponível no tanque, o que oneraria financeiramente, esse dispositivo para o usuário como também tornaria desagradável e complicada a tarefa de mantê-lo.

Portanto, sugere-se, para manter tal sistema viável, utilizar o mesmo líquido de arrefecimento utilizado no Reator 1 para seu aquecimento. Seria possível resfriar, pelo menos parcialmente, tal líquido através de uma serpentina dentro do tanque de combustível, aquecendo o combustível, como previsto, enquanto o mantém disponível para uso.

Além disso, o líquido não precisa ser resfriado até temperatura ambiente, sendo necessário somente chegar a 40°C para fornecer a refrigeração necessária para o Reator.

A seguir, observa-se os resultados para o Reator 2 considerando o líquido de arrefecimento resfriado a 40°C como fluido responsável, à mesma vazão (Figura 43).

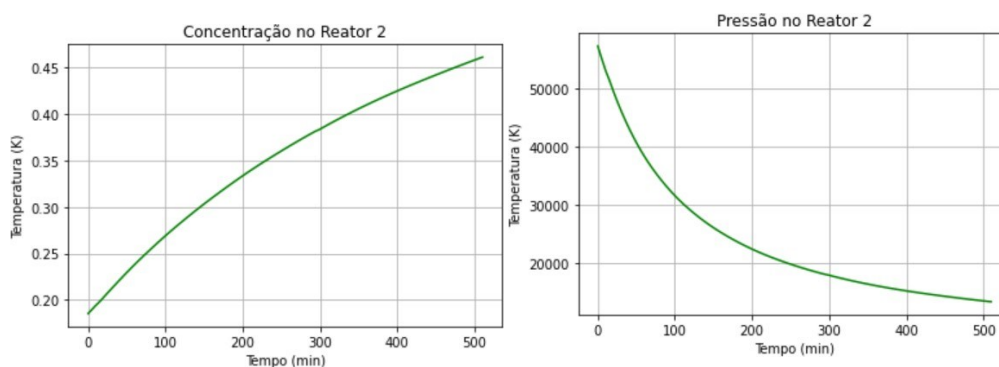
Figura 43 - Temperatura do Reator 2 em função do tempo (com líquido de arrefecimento como fluido de refrigeração)



Fonte: O Autor

Nota-se que até o comportamento de concentração do adsorvato no adsorvente e de pressão no reator é próxima ao esperado (Figura 44).

Figura 44 - Concentração do Reator 2 em função do tempo (com líquido de arrefecimento como fluido de refrigeração)



Fonte: O Autor

5.2 CICLO REDUZIDO

É ideal que o ciclo aplicado no veículo seja rápido e eficiente, capaz de manter o conforto térmico do motorista ao longo de um trajeto padrão em um centro urbano, algo

em torno de 60 a 90 minutos, considerando o trânsito enfrentado e trajetória enfrentada pelo motorista.

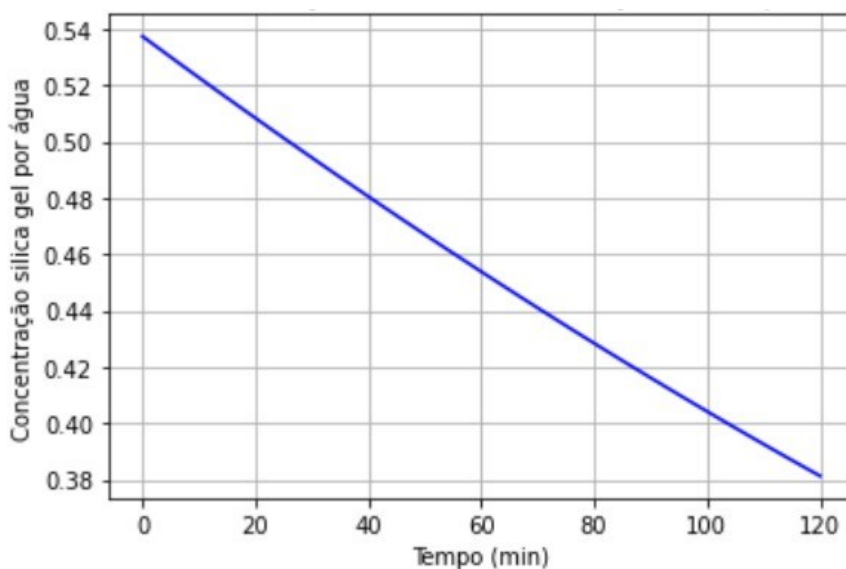
Observou-se anteriormente que, em seu ciclo de saturação, a eficiência dos componentes começa a decair por volta dos 100 minutos. Desta maneira, é ideal que a inversão dos reatores ocorra neste mesmo momento.

5.2.1 REATOR 1

Observa-se que, ao se inverter o ciclo por volta de 100 minutos, ainda há uma certa quantidade de água adsorvida na sílica gel, como se nota na Figura 45. Apesar de o ciclo conseguir performar como esperado, o ideal seria que todo o adsorvato possível fosse desorvido neste intervalo de tempo, ressaltando-se que sempre haverá uma certa quantidade de água adsorvida na sílica gel por conta das relações químicas existentes entre os materiais.

Desta maneira, para o ciclo, pode ser preferível a troca do par por outro que apresente maior capacidade de dessorção em um menor tempo.

Figura 45 - Concentração de água adsorvida no gel de sílica no Reator 1 no ciclo de 100 minutos

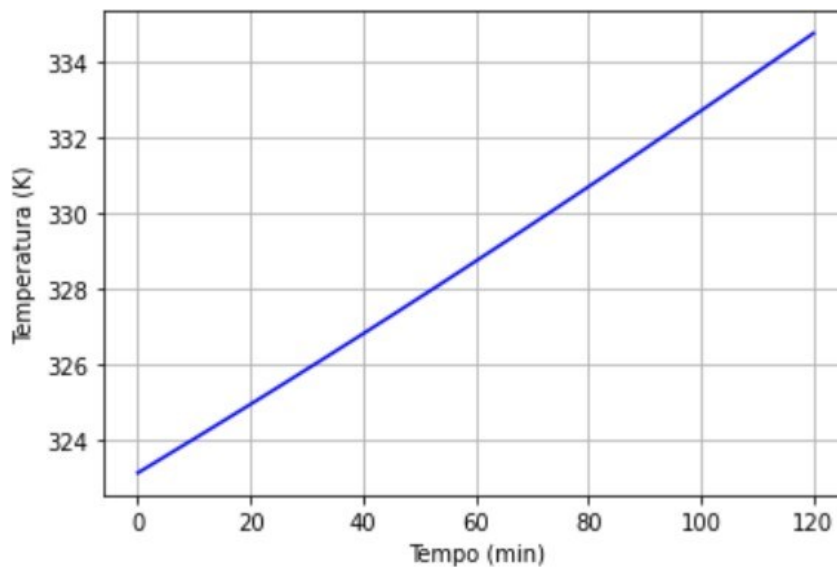


Fonte: O Autor

Outro ponto que merece destaque é a temperatura. Pouco do calor cedido pela troca de calor dos gases de exaustão/fluido de arrefecimento é efetivamente aproveitado no ciclo de 100 minutos, no entanto, isso não é, efetivamente, um problema pois o par

de trabalho gel de sílica/água consegue executar o processo a temperaturas relativamente baixas, como é possível ver na Figura 46.

Figura 46 - Temperatura no Reator 1 no ciclo de 100 minutos

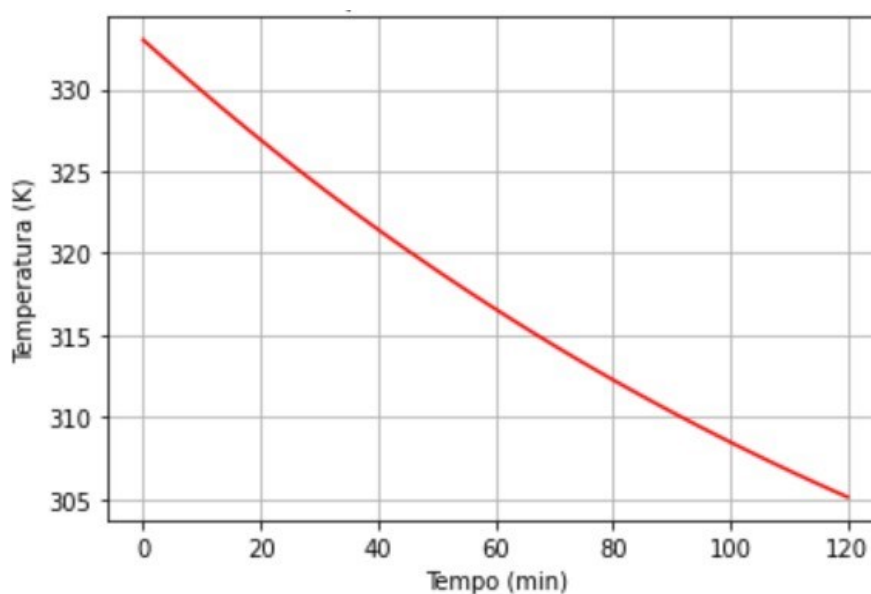


Fonte: O Autor

5.2.2 CONDENSADOR

O condensador, por receber a água a temperaturas inferiores, se resfria e chega a temperaturas próximas da temperatura ambiente de uma maneira muito mais rápida (Figura 47).

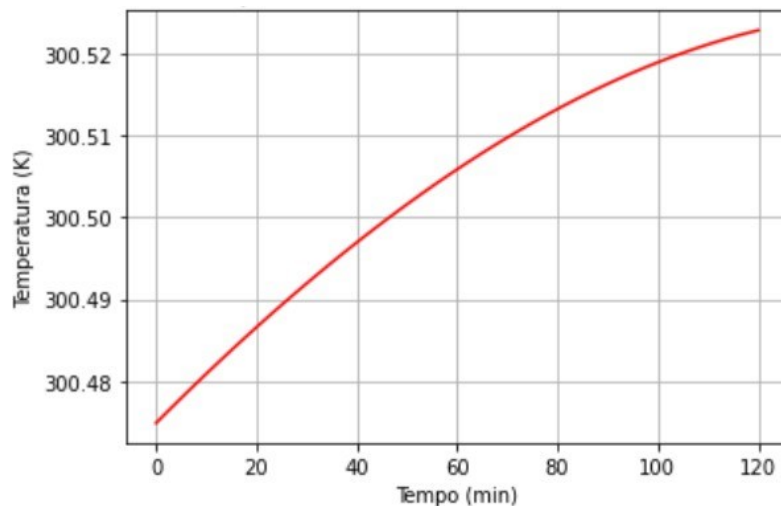
Figura 47 - Temperatura do Condensador no ciclo de 100 minutos



Fonte: O Autor

Da mesma maneira, a temperatura de saída de ar do condensador, que é naturalmente elevada, nessa situação, é pouco aquecida, apresentando uma diferença de décimos de grau celsius em relação à temperatura ambiente (Figura 48).

Figura 48 - Temperatura de saída de ar do condensador no ciclo de 100 minutos

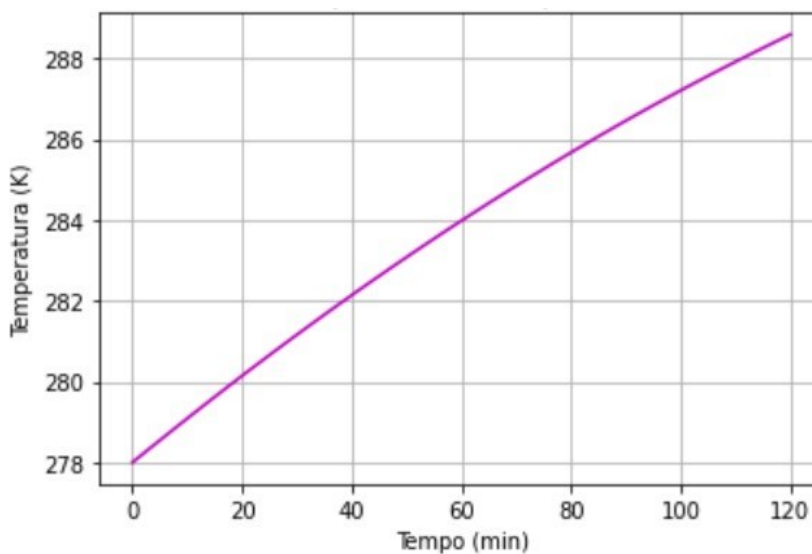


Fonte: O Autor

5.2.3 EVAPORADOR

O comportamento do evaporador praticamente não se altera com o ciclo curto de 100 minutos. Na Figura 49 observa-se o aquecimento do evaporador, como previsto teoricamente.

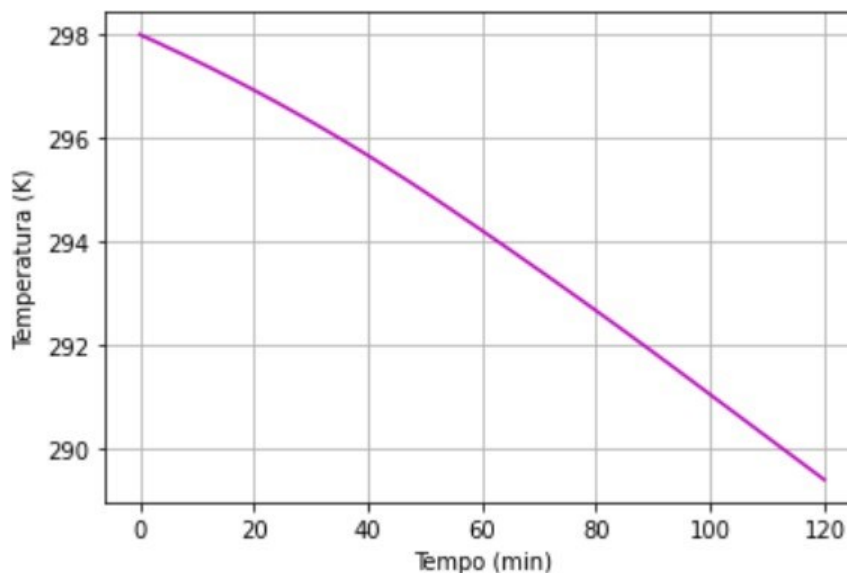
Figura 49 - Temperatura do Evaporador no ciclo de 100 minutos



Fonte: O Autor

No entanto, destaca-se que, ao se encurtar o ciclo de adsorção, a refrigeração ideal requerida não é alcançada (Figura 50). Assim, nota-se que a temperatura irá variar de 25 a 15°C, temperaturas elevadas que não são capazes de garantir o mesmo conforto térmico gerado por um sistema de compressão convencional.

Figura 50 - Temperatura de saída do ar do Evaporador no ciclo de 100 minutos



Fonte: O Autor

Desta maneira, pode ser interessante parear o sistema de adsorção com um sistema alternativo para otimizar a temperatura de saída do ar. Uma opção seria um resfriador evaporativo.

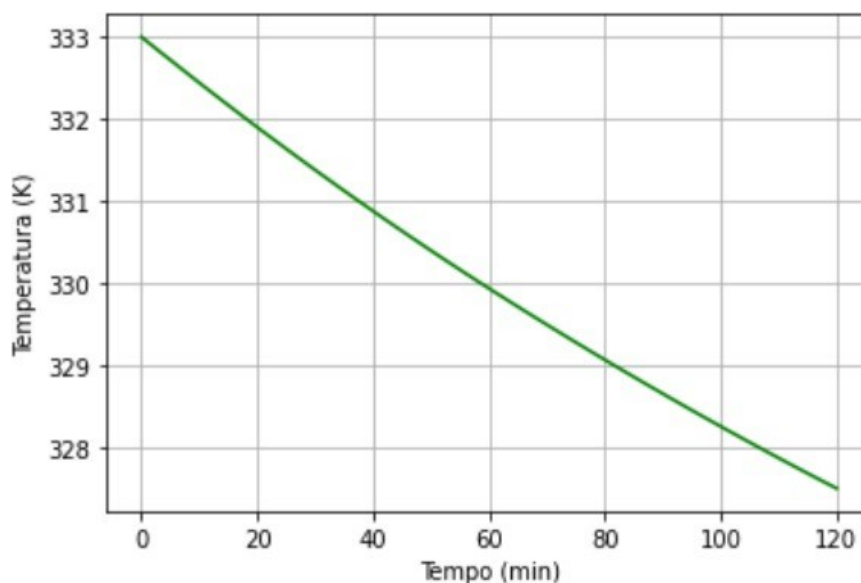
Tal sistema é composto por uma carcaça que apresenta, no seu interior, uma colmeia de fibra de celulose umedecida por água. O ar saído do evaporador do ciclo de adsorção irá passar por esta colmeia e trocará calor com a água, evaporando-a enquanto o ar é refrigerado ainda mais.

Apesar de ser mais um componente a se acrescentar ao veículo, tal componente pode garantir a eficiência e o conforto térmico buscado pelos usuários, ao mesmo tempo em que se aproveita o calor perdido no processo de combustão para manter o processo básico do condicionamento de ar.

5.2.4 REATOR 2

Para o reator 2, considerando a aplicação de líquido de arrefecimento para sua refrigeração, nota-se que será necessário um tempo maior que o ciclo de 100 minutos para resfriar o reator até a temperatura necessária para se reiniciar o ciclo (Figura 51).

Figura 51 - Temperatura do reator 2 no ciclo de 100 minutos



Fonte: O Autor

Desta maneira, observa-se que haverá um período de tempo no qual não haverá refrigeração, pois será necessário esperar o reator 2 chegar na temperatura desejada. Pode-se contornar este problema ao se utilizar um líquido de arrefecimento mais refrigerado ou ao se aplicar, neste intervalo de tempo, um sistema por compressão reduzido.

A adição de reatores, transformando o ciclo de duas camadas em um ciclo de múltiplas-camadas, iria contornar o problema de maneira mais eficiente, podendo até mesmo reduzir o tempo de ciclo de 100 minutos, mantendo a eficiência deste.

No entanto, ao se acrescentar reatores ao veículo, aumenta-se o espaço ocupado por estes e o peso sobre a carcaça, podendo afetar o desempenho do motor. Desta maneira, é preferível manter o ciclo mais simples e procurar contornar o problema de continuidade com outras alternativas.

5.3 CICLO EFICIENTE

Observou-se no ciclo reduzido que, apesar de ter uma alta eficiência em um intervalo curto de tempo, a continuidade ainda era afetada negativamente, necessitando-se de um tempo de recuperação prolongado, na qual o sistema não estaria resfriando o ambiente, para poder reiniciar os reatores em suas temperaturas e pressões de trabalho.

Desta forma, é necessário estudar mais um ciclo, o qual, apesar de mais longo, evita-se a falha na continuidade do processo. Observando-se o processo de climatização pelo ciclo adsorativo, nota-se que o ciclo, por volta dos 300 minutos, começa a iniciar um processo de platô de saturação, demonstrando que sua capacidade adsorativa atingiu o limite eficaz do processo.

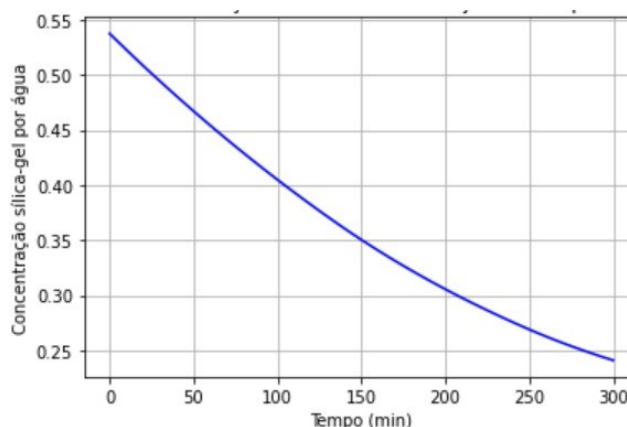
Assim, estabeleceu-se, para este ciclo, um limite de 300 minutos para a troca dos reatores e a regeneração do processo.

5.3.1 REATOR 1

Invertendo-se o ciclo em 300 minutos, observa-se que a maior parte da água adsorvida na sílica gel já foi desorvida (Figura 52) e o processo de dessorção já se encontrava a caminho de um platô.

Como mencionado anteriormente, ainda haverá, necessariamente, uma quantidade de água adsorvida, que não será liberada e esta pequena porcentagem deve ser considerada nos estudos e cálculos do ciclo de adsorção.

Figura 52 - Concentração de água adsorvida no gel de sílica no Reator 1 no ciclo de 300 minutos



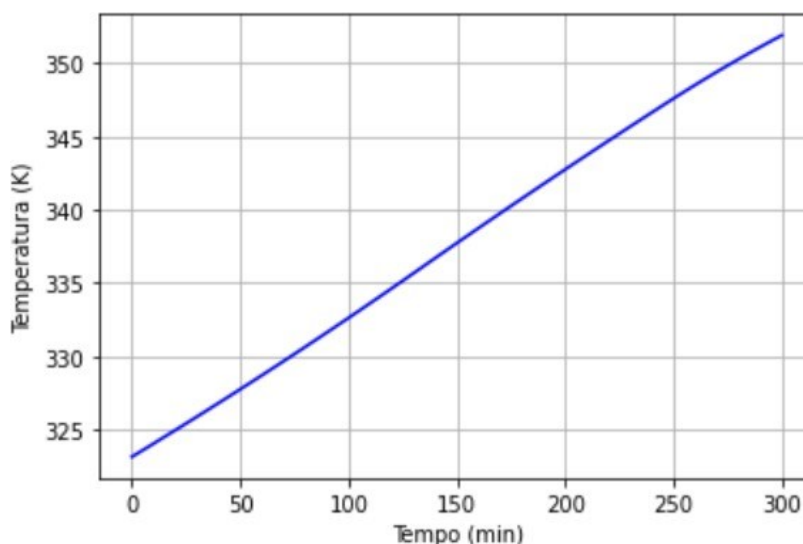
Fonte: O Autor

A quantidade de calor cedido para o ciclo de 300 minutos é maior do que se observou para o de 100 minutos (Figura 53), apesar de ainda ser bem inferior ao que se nota para o ciclo até a saturação e o que se é desejado para se aproveitar, completamente, a capacidade térmica dos gases de exaustão.

No entanto, como foi visto para o ciclo de 100 minutos, o sistema é perfeitamente capaz de trabalhar nestas temperaturas, pelo fato da sílica gel conseguir adsorver/desorver a temperaturas relativamente baixas.

Ainda assim, destaca-se que, por conta das temperaturas relativamente amenas para o ciclo de 300 minutos, não seria necessário o uso de um fluido intermediário para a troca de calor entre adsorvente e gases de exaustão. Desta forma, seria possível a aplicação direta dos gases, aproveitando-se, em sua completude, a capacidade térmica que seria perdida para o ambiente.

Figura 53 - Temperatura no Reator 1 no ciclo de 300 minutos



Fonte: O Autor

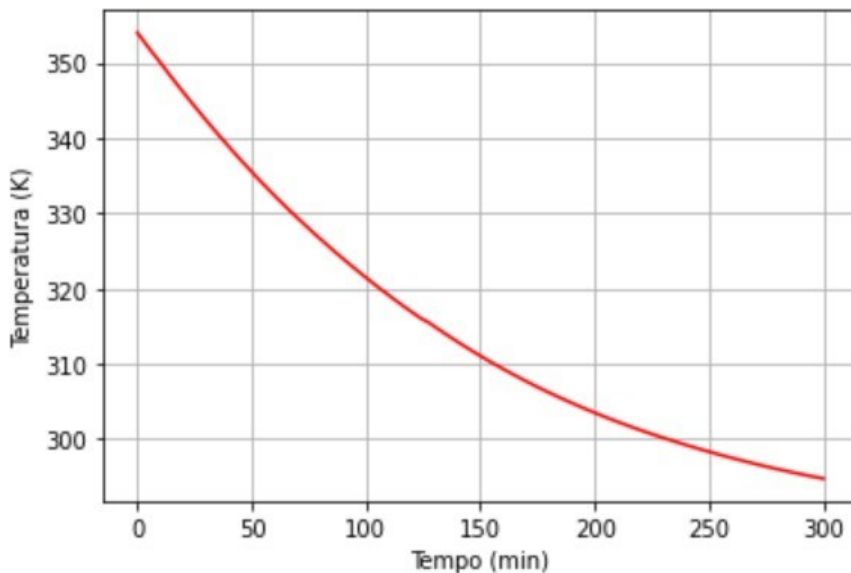
5.3.2 CONDENSADOR

Nota-se que, para o ciclo de 300 minutos, o condensador recebe a água a uma temperatura superior que o visto para o ciclo de 100 minutos, o que permite que o condensador demore mais para trocar calor com o ambiente e conseguir se resfriar.

No entanto, é importante ressaltar que, ao contrário do que se esperaria, por estar em um ciclo que é 3 vezes mais longo que o ciclo de 100 minutos, a proporção com que se resfria o condensador não é a mesma.

Assim, mesmo para um tempo de ciclo mais longo, a taxa de refrigeração somente é ligeiramente superior (Figura 54).

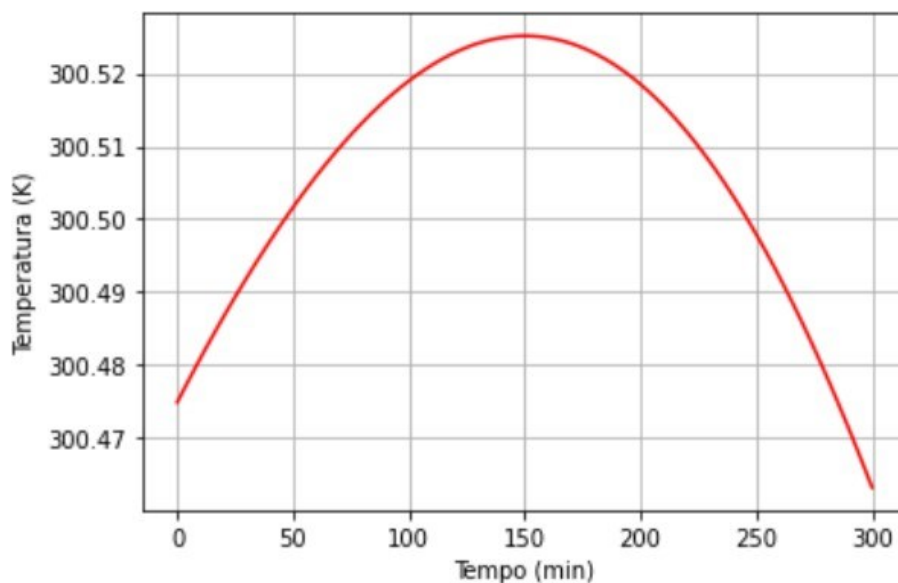
Figura 54 - Temperatura do Condensador no ciclo de 300 minutos



Fonte: O Autor

Já a temperatura de saída do ar do condensador, como visto para o ciclo de saturação, somente se eleva alguns décimos de graus celsius, logo saturando por volta dos 150 minutos e iniciando um processo reverso (Figura 55).

Figura 55 - Temperatura de saída de ar do condensador no ciclo de 300 minutos



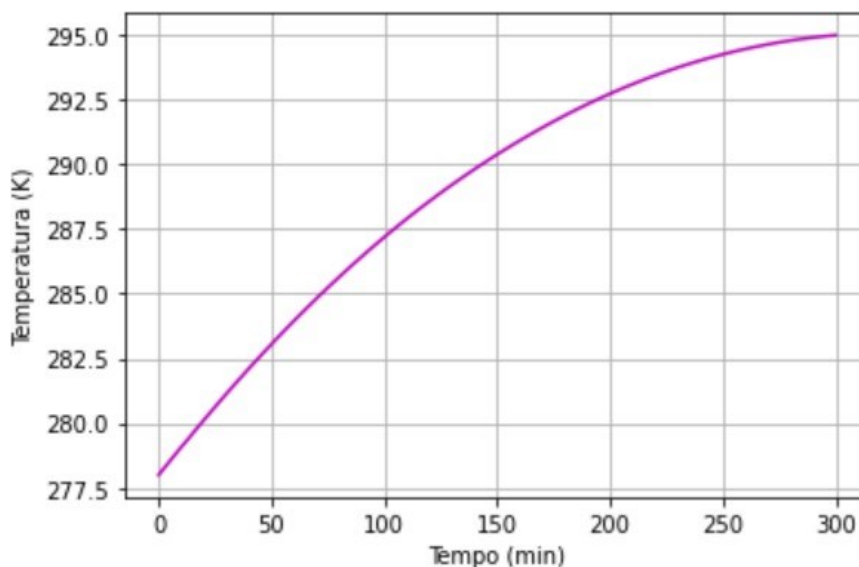
Fonte: O Autor

5.3.3 EVAPORADOR

De maneira semelhante ao que foi visto para o ciclo curto de 100 minutos, o comportamento do evaporador para o ciclo de 300 minutos é bem parecido (Figura 56), sendo que o evaporador consegue alcançar temperaturas superiores ao final do ciclo.

Como ocorre com o condensador, a proporção de variação de temperatura relação ao ciclo reduzido e o ciclo eficiente não segue a proporção temporal e, conforme a duração do ciclo, menor a eficiência na troca de calor.

Figura 56 - Temperatura do Evaporador no ciclo de 300 minutos

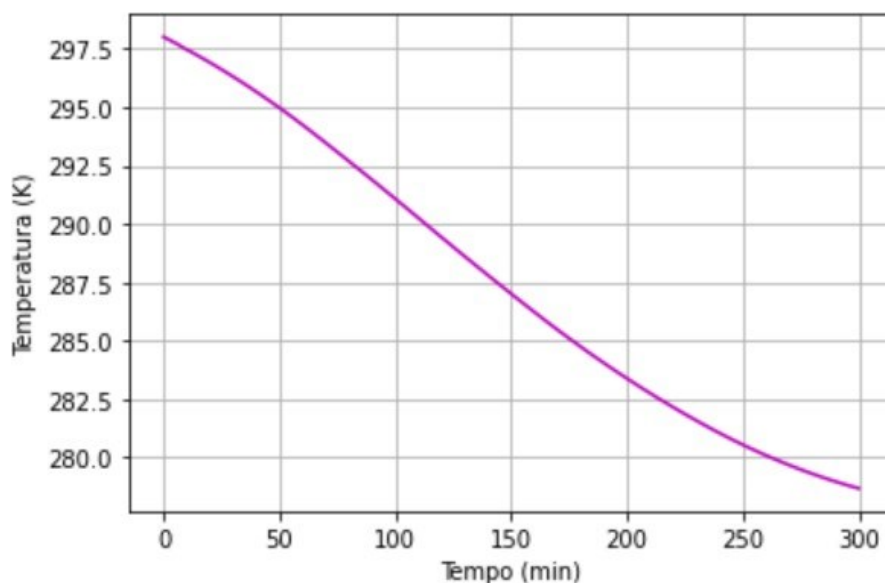


Fonte: O Autor

No entanto, destaca-se que, ao se prolongar o ciclo até 300 minutos, é possível alcançar temperaturas de saída do ar do evaporador mais baixas que as alcançadas no ciclo reduzido (Figura 57).

Este ciclo também apresenta o benefício de não iniciar um processo de aquecimento do ar na saída do evaporador por conta da saturação do equipamento, pois sua atuação é encerrada de modo a se reverter os reatores e se iniciar um novo ciclo.

Figura 57 - Temperatura de saída do ar do Evaporador no ciclo de 300 minutos



Fonte: O Autor

No entanto, é importante destacar que nessas condições, mesmo sendo possível trazer conforto térmico para o habitáculo, o processo, para se alcançar o objetivo almejado, permanece bastante demorado.

Desta maneira, considerando a disposição e características estudadas neste trabalho, seria interessante que o sistema atuasse em veículos que ficassem com o motor em funcionamento por uma grande extensão de tempo, como é o caso de ônibus intermunicipais e caminhões de transporte.

Desta maneira, além de garantir tempo suficiente para que o ciclo forneça as temperaturas ideais para climatização do ambiente, tais veículos maiores poderiam suportar cargas superiores advindas de reatores extras, além de garantir mais espaço para sua disposição caso necessário.

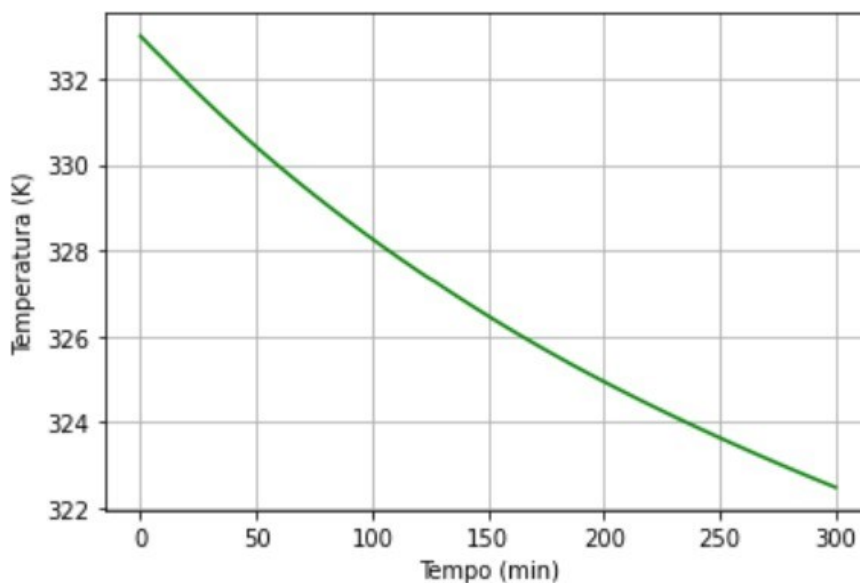
Tal aplicação pode até mesmo permitir o desenvolvimento de transporte de cargas climatizadas, como ocorre com flores, alguns tipos de grãos e obras de arte.

Normalmente tais cargas não precisam ser completamente refrigeradas, necessitando somente de um ambiente com temperatura controlada para garantir sua integridade até o destino e o sistema de climatização por adsorção poderia garantir essa condição sem percalços.

5.3.4 REATOR 2

Analisando como no caso do ciclo reduzido (considerando a aplicação do líquido de arrefecimento como fluido refrigerante do reator), observa-se que o sistema alcança temperaturas inferiores a 50°C dentro do espaço de funcionamento determinado (Figura 58).

Figura 58 - Temperatura do reator 2 no ciclo de 300 minutos



Fonte: O Autor

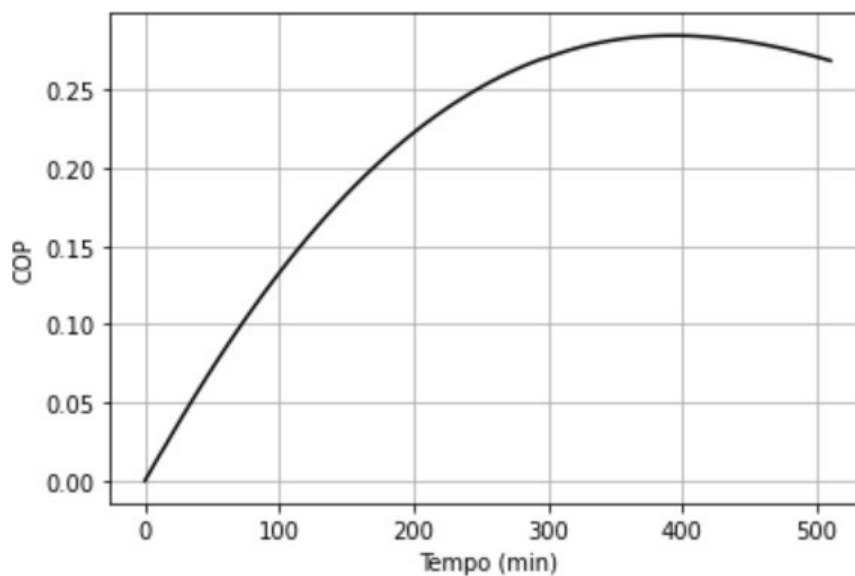
O sistema, nesta configuração, poderá ser aplicado de maneira contínua, não havendo o período de tempo sem refrigeração, no qual se espera o reator chegar à temperatura esperada para se iniciar um novo ciclo.

Deste modo, não há necessidade de se utilizar alternativas concomitantemente ao ar-condicionado adsortivo para melhorar a eficiência do sistema.

5.4 PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Analisando alguns parâmetros de desempenho, nota-se que estes são coerentes com o que foi visto na literatura. O COP variou de 0,05 a 0,27, sendo que o seu valor médio foi de 0,17, inferior ao que se esperava, considerando a literatura analisada (Figura 59).

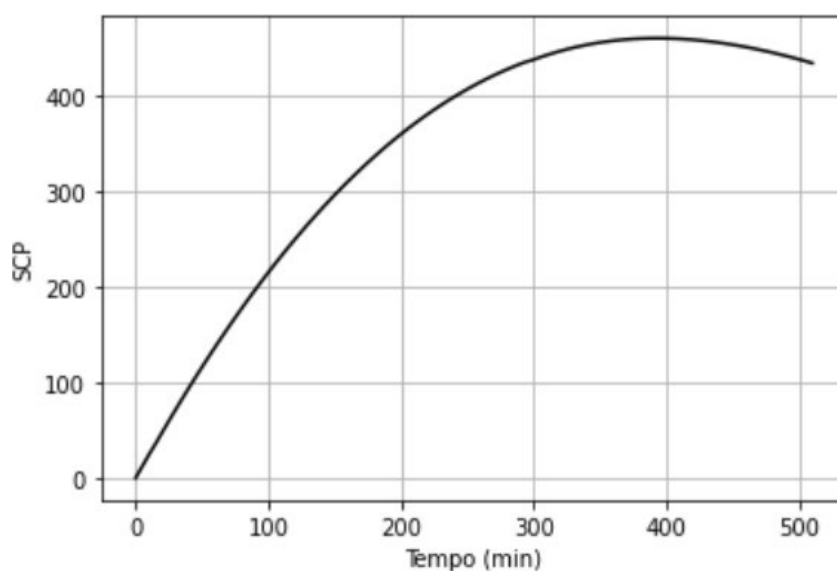
Figura 59 - COP do sistema



Fonte: O Autor

De maneira semelhante, o SCP calculado se mostrou em uma ordem parecida com o que foi visto na literatura, variando de 100 a 450 W/kg, sendo o seu valor médio foi de 280 W/kg, maior do que o esperado na metodologia (Figura 60), demonstrando uma grande eficiência se comparado a outros sistemas previamente estudados.

Figura 60 - SCP do sistema



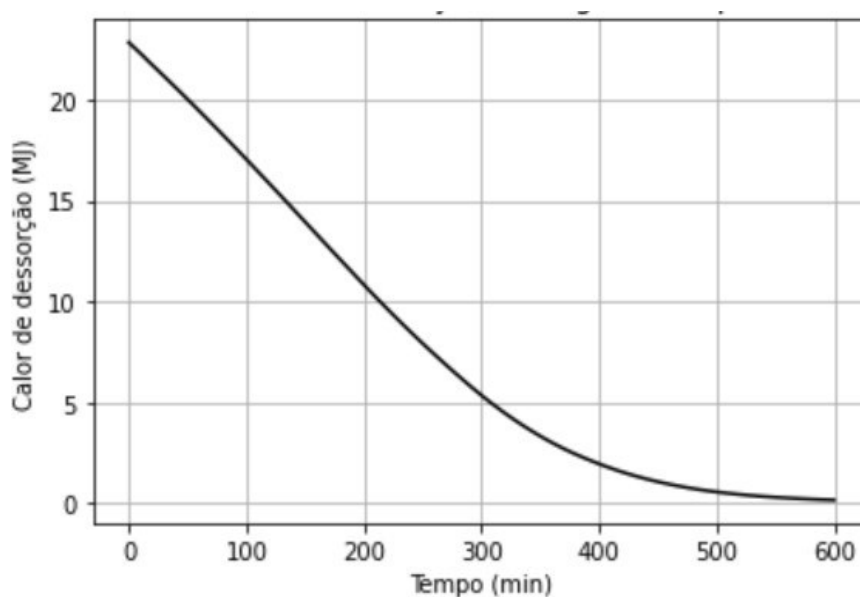
Fonte: O Autor

Por fim, o sistema apresentou uma razão de adsorvedor/adsorvente de 5,05, superior ao que se esperava na metodologia, evidenciando falta de compacidade e um sistema pesado e grande.

Tal condição era esperada, pois aplicou-se reatores de caráter industrial, com carcaça de ferro fundido e aletas de alumínio, a partir de informações obtidas na literatura. No entanto, considerando a tecnologia atual, seria possível a utilização de reatores mais leves, totalmente de alumínio, que aumentariam a compacidade do sistema ao mesmo tempo em que reduz a área ocupada e o peso extra aplicado sobre o motor.

Em relação às suas trocas térmicas durante o ciclo de saturação, nota-se que o calor de dessorção vai caindo ao longo do tempo, demonstrando a saturação do ambiente e a impossibilidade de dessorver mais água (Figura 61). Como visto nos demais ciclos, tal fenômeno pode ser impedido através da troca ou revezamento de reatores em um determinado tempo.

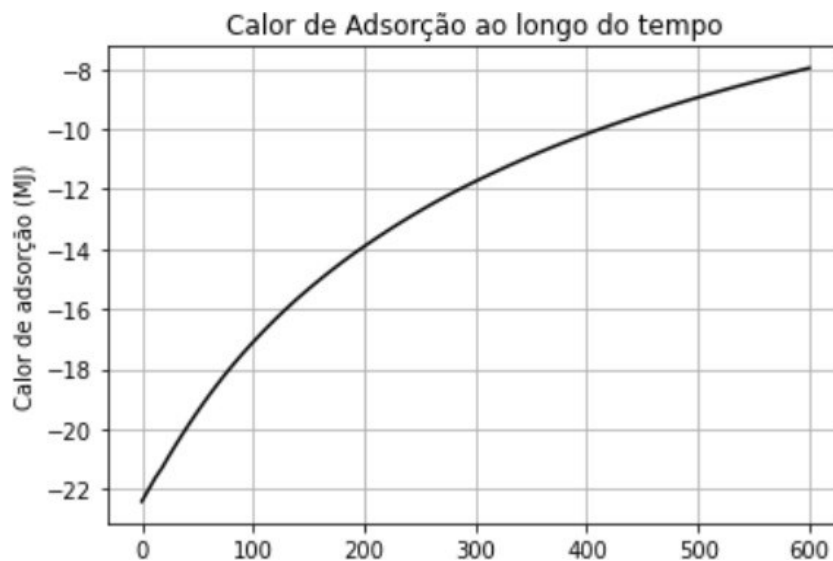
Figura 61 - Calor de Dessorção no Reator 1 ao longo do tempo



Fonte: O Autor

O mesmo se dá para o Calor de Adsorção do Reator 2, que se satura a partir do momento que a sílica gel não consegue mais adsorver água para a sua superfície. Assim, o calor vai se estabilizando até não ter mais nenhuma troca térmica significativa (Figura 62).

Figura 62 - Calor de Adsorção no Reator 2 ao longo do tempo

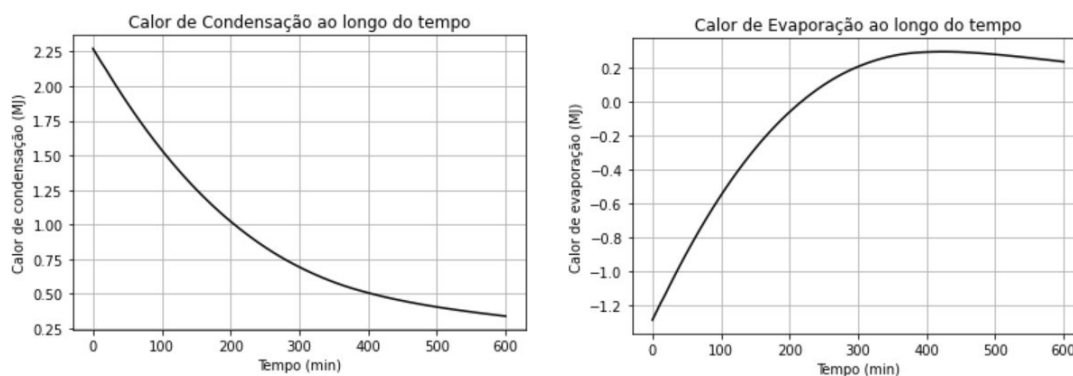


Fonte: O Autor

Observa-se que o calor de condensação e evaporação são inferiores (Figura 63) aos valores do calor de dessorção e adsorção, evidenciando o alto gasto térmico necessário para se separar a água da superfície porosa da sílica gel.

De maneira semelhante ao que foi visto com os reatores, o condensador e o evaporador vão se saturando lentamente ao longo do tempo, conforme a vazão de adsorvato decai e as pressões internas dos trocadores de calor se alteram, impedindo-os de realizar o trabalho indicado e justificando a necessidade de interromper o seu funcionamento ou se iniciar um novo ciclo.

Figura 63 - Calor de condensação e evaporação do sistema

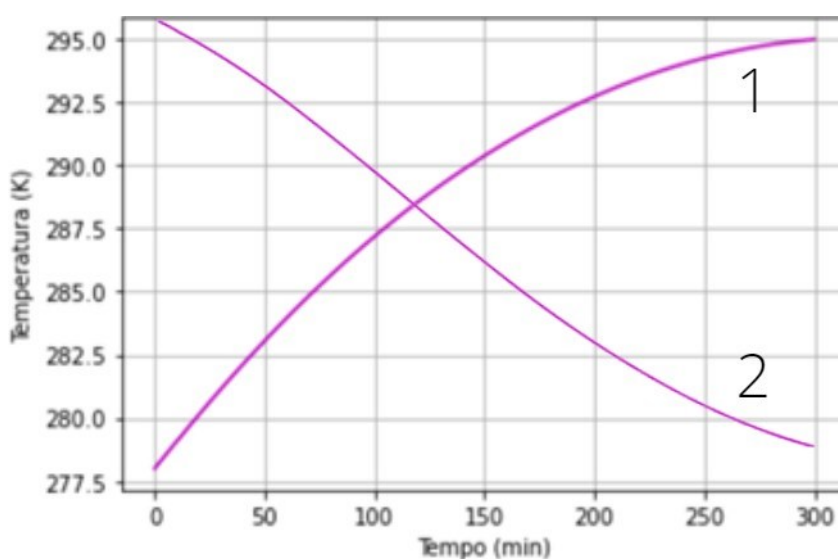


Fonte: O Autor

5.5 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Analisando-se os ciclos anteriores, observa-se que o evaporador e o condensador se portaram muito bem, sendo que somente a saturação do sistema é vista no fluido em contato com o adsorvato ao longo do tempo.

Figura 64 – Comparação entre a temperatura do evaporador ao longo do tempo (1) e a temperatura do ar na saída do evaporador ao longo do tempo (2)



Fonte: O Autor

Como esperado e visto na literatura, a temperatura de saída do ar no evaporador é maior do que a esperada em sistema de condicionamento de ar por compressão-vapor (abaixo de 5°C). Tal condição pode ser contornada com a aplicação de um resfriador evaporativo em paralelo, garantindo que o ar recém-saído do evaporador troque mais calor com a água contida nele e aumente a capacidade de refrigeração no habitáculo.

No entanto, considerando tudo que foi apresentado, percebe-se que a configuração atual estudada, apesar de gerar resultados dentro do esperado, não é a ideal.

Assim, se propõe, para maiores estudos futuros, uma nova configuração, na qual se aplicaria quatro reatores menores, de alumínio, que funcionariam de maneira semelhante ao sistema com dois reatores. No entanto, ao invés de se revezar entre os quatro reatores, haveria dois reatores cujos adsorventes estariam em completa saturação com água e dois cujos adsorventes estariam completamente secos.

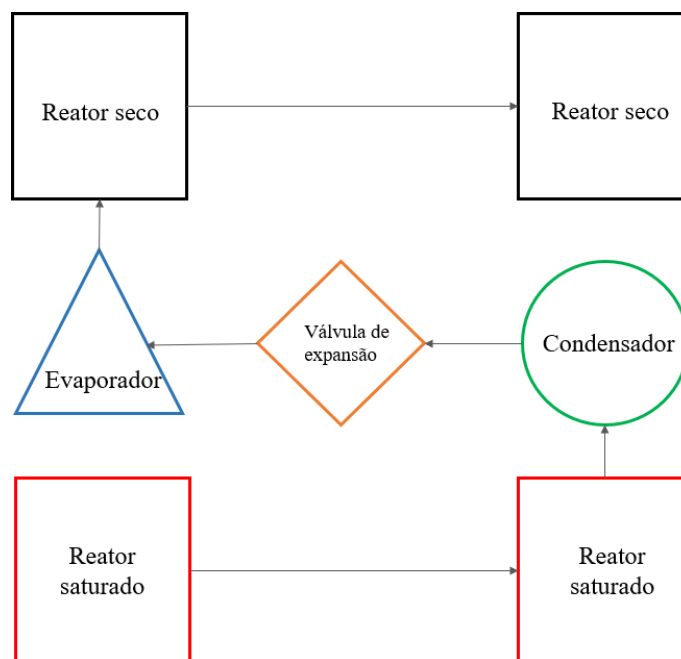
Assim que o reator seco começasse a saturar de água a maiores temperaturas advindas do evaporador, o adsorvato seria desviado para o outro reator seco, garantindo que uma maior quantidade de água seja adsorvida e aproveitada no ciclo.

Além disso, os reatores saturados de água e os secos não teriam comunicação entre si, fornecendo um processo cruzado, com temperaturas mais estáveis e com processo de aquecimento e resfriamento reduzido.

Ao se utilizar reatores de alumínio, seria possível reduzir o tamanho e o peso ocupado no espaço disponível do veículo, enquanto mantendo a mesma massa de adsorvente e garantindo resultados semelhantes aos analisados.

Um diagrama simples do sistema pode ser visto a seguir (Figura 65):

Figura 65 - Diagrama simples de um sistema de climatização adsortivo com reatores em paralelo



Fonte: O Autor

6 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho procurou-se entender o sistema de refrigeração por adsorção, os fatores que o afetam e como eles impactam os resultados desejados.

Notou-se que tais fatores determinantes (fonte de calor, pares de trabalho, tipo de ciclo e tipo de reator) relacionam entre si e podem melhorar ou afetar negativamente o desempenho do sistema.

Considerando esta condição, elaborou-se uma metodologia de estudo de um sistema de condicionamento de ar automotivo por adsorção, de modo que os melhores fatores fossem escolhidos para ele, baseados em suas características e propriedades, sendo posteriormente simulado em um ambiente numérico, de modo a se determinar o possível sucesso e modificações necessárias no futuro.

A necessidade de um fluido intermediário para aquecer o reator em ciclos longos ainda é um mal necessário para a maior parte dos adsorventes, de modo a evitar desgastes antes do esperado no material e manter a integridade do processo por mais tempo.

Apesar da existência de outros adsorventes que sobreviveriam a maiores temperaturas, são adsorventes recentes e inovadores, pouco usados e de difícil acesso, tanto em termos de custo e disponibilidade, o que tornaria inviável a sua aplicação em sistemas comercializáveis.

Tal necessidade é contornada em ciclos interrompidos (como visto com o Ciclo Reduzido e o Ciclo Eficiente), que impedem que os reatores cheguem a altas temperaturas que poderiam ser prejudiciais aos adsorventes. Apesar de não se aproveitar, em sua completude, a capacidade de adsorção do sistema, nestes casos é possível efetuar o processo de refrigeração como esperado.

Ademais, pela concentração no reator variar conforme a temperatura, a vazão do adsorvato pelo sistema também irá variar, evidenciando a intermitência do sistema. No caso de dois reatores, vistos neste trabalho, a intermitência seria reduzida, mas ainda seria significativa, especialmente por conta do longo tempo necessário para que o ciclo inicie o seu processo de “produção de frio”.

O interesse principal neste trabalho era encontrar um modo de manter o aquecimento e resfriamento dos reatores sem necessitar a aplicação de novos

equipamentos e novos fluidos que aumentariam o peso do veículo, o espaço ocupado dentro da cabine e, por consequência, impactaria no desempenho do motor.

Uma solução para este fato foi utilizar de líquidos já presentes no veículo, como foi o caso do líquido de arrefecimento. Para resfriar o Reator 2, portanto, seria interessante utilizar o combustível, nesse caso, a gasolina, como meio para diminuir sua temperatura. Ademais, a aquisição de calor pelo combustível otimizaria a combustão e diminuiria a emissão de poluentes.

No entanto, para efetuar o que se pretendia, a vazão necessária era muito alta e não seria viável, especialmente quando se necessita que o combustível fique, em grande parte, armazenado e pronto para uso no tanque.

Assim, optou-se por manter o uso do líquido de arrefecimento, que pode trocar calor, após aquecer o reator, com o combustível dentro do tanque. Isso otimizaria a combustão e, ao mesmo tempo, manteria o combustível no tanque, enquanto o reator correto seria resfriado posteriormente.

Em caso de altas temperaturas, além da troca de calor com o combustível, pode-se passar o líquido brevemente pelo radiador, já presente no veículo. Pelo fato de a sílica-gel iniciar a adsorção a partir de 50°C, não seria necessário refrigerar o líquido até temperatura ambiente e, portanto, o radiador não ficaria sobrecarregado.

Observou-se, principalmente, que o sistema se comportou conforme esperado teoricamente, disponibilizando ar ao habitáculo a temperaturas capazes de gerar conforto térmico ao usuário em um ciclo de curta duração.

Em condições ideais (Ciclo Eficiente – Fig. 64), o sistema liberaria ar entre 7°C e 10°C, o que permitiria um ambiente confortável para o usuário durante o verão. Tais temperaturas seriam alcançadas em um tempo longo (300 minutos de ciclo), o que seria incompatível com o modo de uso de veículos de passeio em ambientes urbanos.

Em um ciclo reduzido de 100 minutos, alcançou-se temperaturas mínimas de saída do ar superiores, em torno de 25 e 15°C, o que permitiria algum conforto térmico ao usuário, mas não daria a mesma sensação que um sistema de condicionamento de ar convencional.

Ademais, os parâmetros de desempenho do sistema, especialmente o COP e a Razão Adsorvedor/Adsorvente, foram aquém do esperado na metodologia. Somente o SCP superou as expectativas, obtendo valores maiores do que visto na literatura.

Destaca-se assim, que, apesar de funcionar de maneira correta, o sistema permanece muito lento, contribuindo com temperaturas agradáveis, incapaz de refrigerar, verdadeiramente, o ambiente, tornando-o incapaz de ser utilizado no cenário proposto nesse trabalho.

Deste modo, sugere-se que, enquanto tais sistemas não sejam passíveis de utilização no mercado, estes sejam utilizados conjuntamente a sistemas de compressão-vapor, reduzindo a carga imposta ao motor pelo compressor e auxiliando no condicionamento de ar.

Seria interessante, também, a aplicação de um sistema com quatro reatores em paralelo, que garantiriam tempos de regeneração mais reduzidos e temperaturas mais estáveis, além de evitar que os reatores comuniquem-se em fases distintas do processo.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos neste trabalho e a análise vista anteriormente, é possível sugerir alguns tópicos para trabalhos futuros:

- Simulação de um sistema de quatro reatores em paralelo
- Realizar a simulação do sistema de refrigeração com valores adaptáveis de vazão no condensador e evaporador, conforme variação da vazão do adsorvato.
- Realizar teste de bancada com o sistema simulado e comparar os resultados de desempenho, de modo a se determinar se há variação significativa entre os resultados obtidos teoricamente com aqueles verificados na prática.
- Simular o sistema com diferentes pares de trabalho, especialmente com adsorventes do tipo MOF, de modo a determinar se o impacto sobre seu desempenho seria tão significativo a ponto de compensar os custos altos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEAARP - Associação de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Ribeirão Preto. O automóvel e a engenharia. *In: AEAARP. Painel*. Ribeirão Preto: AEAARP, 2016. p. 5 - 11.

ABDULLAH, Mohammad Omar; TAN, Ivy Ai Wei; LIM, Leo Sing. Automobile adsorption air-conditioning system using oil palm biomass-based activated carbon: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 4, p. 2061 – 2072, maio. 2011.

ALI, Syed Muztuza; CHAKRABORTY, Anutosh. Thermodynamic Modelling and Performance Study of an Engine Waste Heat Driven Adsorption Cooling for Automotive Air-conditioning. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 90, p. 54 – 63, nov. 2015.

ALKLAIBI, A. M.; LIOR, N. Waste heat utilization from internal combustion engines for power augmentation and refrigeration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 152, p. 1 – 21, set. 2021.

ANUMAH, Abdulraheem; LOUIS, Hitler; SAUD-UZ-ZAFAR; HAMZAT, Adejoke T.; AMUSAN, Oluwatobi O.; PIGWEH, Amos I.; AKAKURU, Ozioma U.; ADELEYE, Aderemi T.; MAGU, Thomas O. Metal-Organic Frameworks (MOFs): Recent Advances in Synthetic Methodologies and Some Applications. **Chemical Methodologies**, Ilam, v. 3, n. 3, p. 283 – 305, maio. 2019.

BENRAJESH, P.; RAJAN, A. John. Design and Analysis of a Two-Stage Adsorption Air Chiller. **Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering**, Chennai, v. 197, p. 01 – 10, Jul. 2017.

BLACK, Byron. Why to Consider Using a Hairpin Heat Exchanger. **Process Heating**, Troy, 1º de Novembro de 2000. Industrial Heat Exchangers. Disponível em: <<https://www.process-heating.com/articles/86928-why-to-consider-using-a-hairpin-heat-exchanger>>. Acesso em: 24 de dezembro de 2020.

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard. E. *Fundamentos da Termodinâmica*. São Paulo: Blucher, 2013.

BRITO, Cristiano H. G.; ANDRADE, Guilherme F.; SODRÉ, José R. Análise do Perfil de Temperaturas no Gás de Exaustão de um Motor pelo Método das

Diferenças Finitas. *In*: CMAC - SUL, 2014, Curitiba, **Proceedings...** São Carlos: SBMAC, 2014, p. 6.

CÁMARA, Gonzalo de las Casas. Un paso atrás en la contaminación del aire: novedades en automoción. **Gaceta Sanitária**, Barcelona, v. 29, n. 2, p. 152, Mar./Abr. 2015.

CAO, Ngoc Vi; DUONG, Xuan Quang; LEE, Woo Su; PARK, Moon Yong; CHUNG, Jae Dong; HONG, Hiki. Effect of heat exchanger materials on the performance of adsorption chiller. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Seoul, v. 34, n. 5, p. 2217 - 2223, mar. 2020.

CAPDEVIELLE, C. T.; PARDINI, I. N.; IZUMIDA, K. A.; SILVA, R. M. V.; FRANCO, I. C. Refrigeração sustentável: utilização do processo de adsorção. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, v. 4, n. 1, dez. 2018.

CEVALLOS, Oscar Rodrigo Fonseca. **Adsorption Characteristics of Water and Silica Gel System for Desalination Cycle**. Orientador: Prof. Kim Choon. 2012. 72 f. Dissertação (MSc) - Universidade Rei Abdullah de Ciência e Tecnologia, Thuwal, 2012.

CHAIRUNNISA, MIKSIK, Frantisek, MIYAZAKI, Takahiko, THU, Kyaw, MIYAWAKI, Jin, NAKABAYASHI, Koji, WIJAYANTA, Agung Tri, RAHMAWATI, Fitria. Enhancing water adsorption capacity of acorn nutshell based activated carbon for adsorption thermal energy storage application. **Energy Reports**, v. 6, n. 7, p. 255 - 263, dez. 2020.

CHO, S. H.; KIM, J. N. **Modeling of a Silica Gel/Water Adsorption-Cooling System**, Amsterdam, Energy, v. 17, n. 9, p. 829 - 839, set. 1992.

COSKUN, C.; OKTAY, Zuhai; ILTEN, Nadir. A new approach for simplifying the calculation of flue gas specific heat and specific exergy value depending on fuel composition. **Energy**, Amsterdam, v. 34, n. 11, p. 1898 - 1902, nov. 2009.

CRITOPH, Robert E.; METCALF, Steven J.; TAMAINOT-TELTO, Zacharie. Proof of Concept Car Adsorption Air-Conditioning System Using a Compact Sorption Reactor. **Heat Transfer Engineering**, Milton Park, v. 31, n. 11, p. 950 - 956, out. 2010.

CUNHA, Francisco Gêvane Muniz; CASTRO, Jânio Kléo de Sousa. *Calculo Numérico*. Fortaleza: MEC, 2010.

DABROWSKI, A. Adsorption - from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 93, n. 1 - 3, p. 135 - 224, out. 2001.

DHABI, Jaspalsinh B.; SHUKLA, Ajitkumar N.; DASH, Sukanta Kumar. Compact Adsorption Cooling System: An Evaluation. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, India, v. 8, n. 8S3, p. 382 - 391, jun. 2019.

ELSHENITI, M. B.; ELSAMNI, O. A.; AL-DADAH, R. K.; MAHMOUD, S.; ELSAYED, E.; SALEH, K. Adsorption Refrigeration Technologies. *In*: GHENAI, Chaouki. **Sustainable Air Conditioning Systems**. Londres: IntechOpen, 2018, p.73 - 95.

FERNANDES, M. S.; BRITES, G. J. V. N.; COSTA, J. J.; GASPAR, A. R.; COSTA, V. A. F. Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 39, p. 102 -123, nov. 2014.

GANESAN, Vellaichamy. *Internal Combustion Engines*. New Delhi: Tata McGrawl-Hill, 2008.

GATTI JUNIOR, Wilian; BARBOSA, Ana Paula Franco Paes Leme. A Evolução da Tecnologia de Motores: Um Estudo Preliminar. *In*: XV SEMEAD, 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Seminários em Administração da FEA-USP, 2012.

GAZIOLLA, Helio; GOMES, Rodrigo Daniel. **Sistema de Climatização Automotivo**. Orientador: Prof. Emersson Martins. 2010. 57 f. TCC (Graduação) - Curso em Tecnologia em Eletrônica Automotiva, Faculdade de Tecnologia de Santo André, Santo André, 2010.

GIRALDO, Liliana; RODRIGUEZ-ESTUPIÑÁN, Paola; MORENO-PIRAJÁN, Juan Carlos. Isosteric Heat: Comparative Study between Clausius-Clapeyron, CSK and Adsorption Calorimetry Methods. **Processes**, Basel, v. 7, n. 4, p. 1 - 25, abr. 2019.

GUI, Y. B.; WANG, R. Z.; WANG, W.; WU, J. Y.; XU, Y. X. Performance modeling and testing on a heat-regenerative adsorptive reversible heat pump. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 22, p. 309 - 320, ago. 2002.

GWADERA, Monika; KUPIEC, Krzysztof. Adsorption cooling as an effective method of waste heat utilization. **Technical Transactions**, Cracow, v. 8, p. 61 - 70, 2011.

HAAS, Sebastian; WEIHERER, Stefan; WALTER, Michael S. J. Design of an Adsorption Refrigeration Machine with an Auxiliary Heater for CO₂-Neutral Air-Conditioning of E-Vehicles. *In*: LITTLEWOOD, John; HOWLETT, Robert J.;

CAPOZZOLI, Alfonso; JAIN, Lakhmi C. **Sustainability in Energy and Buildings**. Singapura: Springer, 2019, p. 651 - 664.

HAMDY, Mohamed; ASKALANY, Ahmed A.; HARBY, K.; KORA, Nader. An overview on adsorption cooling systems powered by waste heat from internal combustion engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 51, p. 1223 - 1234, nov. 2015.

HASSAN, Ahmed A.; ELWARDANY, Ahmed E.; OOKAWARA, Shinichi; AHMED, Mahmoud; EL-SHARKAWY, Ibrahim I. Integrated adsorption-based multigeneration systems: A critical review and future trends. **International Journal of Refrigeration**, Amsterdam, v. 116, p. 129 - 145, ago. 2020.

HEYWOOD, John B. *Internal Combustion Engines Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 2018.

HU, Peng; YAO, Juan-Juan; CHEN, Ze-Shao. Analysis for composite zeolite/foam aluminum-water mass recovery adsorption refrigeration system driven by engine exhaust heat. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 50, p. 255 - 261, out. 2008.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ISKANDAR, Marco Antonio. **Análise e projeto de um sistema de controle de arrefecimento de um motor Diesel, visando à redução de emissões e consumo de combustível**. Orientador: Prof. Dr. Alberto Adade Filho. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

ISHIBASHI, Hiroyuki Marcelino. **Estudo de Estratégias de Simulação do Modelo Dinâmico do Reator de Hidrotratamento a Parâmetros Distribuídos**. Orientador: Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes. 2016. 47 f. TCC - Curso em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ITAO, Danilo Carreira. **Estudo de um sistema alternativo de ar condicionado automotivo baseado na aplicação de tubos de vórtice utilizando o conceito de regeneração energética**. Orientador: Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr. 2005. 114 f. TCC (Mestrado Profissionalizante) - Curso em Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

JI, Y.; WANG, X.; LI, X. Research on waste refrigeration method of diesel generator. *In: THE 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINERY, MATERIALS SCIENCE AND ENERGY ENGINEERING, 2015, Wuhan, Anais...* Singapura: World Scientific, 2015.

JIAYOU, Qiu. **Characterization of silica-gel water vapor adsorption and its measuring facility**. Orientadores: Prof. Yap Christopher e Prof. Ng Kim Choon. 2003. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Nacional de Cingapura, Cingapura, 2003.

JOHN, Michael; KIMAMBO, Cuthbert Z. M.; EIKEVIK, Trygve M.; NYDAL, Ole J.; KIHEDU, Joseph. Potential Application of Commercial Refrigerants as Adsorbate in Adsorption Refrigeration System. *In: ISES Solar World Congress, 2017, Abu Dhabi, Anais...* Freiburg im Breisgau: ISES, 2017.

KASTENSSON, Asa. Developing lightweight concepts in the automotive industry: taking on the environmental challenge with the SaNatt project. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 66, n. 1, p. 337-346, mar. 2014.

KNAEBEL, Kent S. *Adsorbent Selection*. Maryland: University of Maryland, Baltimore County, 2004.

LAMBERT, M. A.; JONES, B. J. Automotive adsorption air conditioner powered by exhaust heat. Part 1: conceptual and embodiment design. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, Thousand Oaks, v. 220, n. 7, p. 959 - 972, jul. 2006.

LIM, Leo Sing; ABDULLAH, Mohammad Omar. Experimental Study of an Automobile Exhaust Heat-Driven Adsorption Air-Conditioning Laboratory Prototype by Using Palm Activated Carbon-Methanol. **HVAC & R Research**, London, v. 16, n. 2, p. 221 - 231, fev. 2011.

LU, Y. Z.; WANG, R. Z.; JIANZHOU, S.; XU, Y. X.; WU, J. Y. Practical experiments on an adsorption air conditioner powered by exhausted heat from a diesel locomotive. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 24, p. 1051 - 1059, out. 2004.

MACHADO, Fernando Machado; BERGMANN, Carlos Pérez. Materials for Adsorbent Applications. *In: BERGMANN, Carlos Pérez e ANDRADE, Mônica Jung de. Nanostructured Materials for Engineering Applications*. Berlim: Springer, 2011, p. 141 - 155.

MAEDA, Shinnosuke; THU, Kyaw; MARUYAMA, Tomohiro; MIYAZAKI, Takahiko. Critical Review on the Developments and Future Aspects of Adsorption Heat Pumps for Automobile Air Conditioning. **Applied Sciences**, Basel, v. 8, n. 11, p. 1 - 24, out. 2018.

MAIOLI, Gabrielle. **Métodos Numéricos para Equações Diferenciais Ordinárias**. Orientador: Profa. Dra. Suzete Maria Silva Afonso. 2015. 67 f. Dissertação (Mestrado Profissional) - Curso de Matemática, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2015.

MAGNETTO, Daniela; BOER, Robert de. A Mobile Air Conditioning System Operated by the Engine Waste Heat. **SAE International**, Warrendale, 2011-01-0135, abr. 2011.

MATTHES, Eric. *Curso Intensivo de Python*. São Paulo: Novatec, 2016.

MENDES, Amanda de Castro Almeida. **Estímulos à Adoção de Veículos Híbridos e Sua Aplicabilidade no Brasil**. Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Pacheco Pujatti. 2018. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

MENDES, Amanda de Castro Almeida, PUJATTI, Fabrício José Pacheco, CORTEZ, Márcio Fonte Boa. Conceptual Design of an Adsorption Refrigeration System Applied to Vehicles. **International Journal of Refrigeration**, Amsterdam, v. 135, p. 60 - 74, dez. 2021.

MILLER, J., DU, L., KODJAK, D. Impacts of World-Class Vehicle Efficiency and Emissions Regulations in Select G20 Countries. **The ICCT**, Washington, p. 1 - 16, jan. 2017.

MORVAY, Z. K.; GVOZDENAC, D. D. Fundamentals for Analysis and Calculation of Energy and Environmental Performance. *In: Applied Industrial Energy and Environmental Management*. Chichester: Wiley, 2008, p. 429.

NIST. Water. **NIST Chemical Handbook**. Disponível em: <<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185>>. Acesso em: 30 de junho de 2021.

PANG, S. C.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; HAZRAT, M. A. Liquid absorption and solid adsorption system for household, industrial and automobile applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 28, p. 836 - 847, dez. 2013.

PAPAI, Rafael Oliveira. **Cálculo de vazão de ar mínima no radiador de um automóvel**: estudo de caso. Orientador: Ms. João Carlos Martins Coelho. 2013. 33 f. Monografia (Pós-Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2013.

PESSANHA, José E. O.; PORTUGAL, Carlos; PAZ, Alex A. Técnicas de Solução de Sistemas de Equações Diferenciais e Algébricas: Aplicação em Sistemas de Energia Elétrica. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 16, n. 3, p. 359 - 372, set. 2005.

PEREIRA, Elaine; OLIVEIRA, Luiz C. A.; VALLONE, Andréa; SAPAG, Karim; PEREIRA, Márcio. Preparação de carvão ativado em baixas temperaturas de carbonização a partir de rejeitos de café: utilização de FeCl_3 como agente ativante. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 6, p. 1296 - 1300, jul. 2008.

RAMJI, H. R.; LEO, S. L.; TAN, I. A. W.; ABDULLAH, M. O. Comparative study of three different adsorbent-adsorbate working pairs for a waste heat driven adsorption air conditioning system based on simulation. **International Journal of Recent Research and Applied Studies**, Salem, v. 118, n. 2, p. 109 - 121, fev. 2014.

REZK, Ahmed; ELSAYED, Ahmed; MAHMOUD, Saad; AL-DADAH, Raya. Adsorption Refrigeration. *In*: PETROVA, Victoria M. **Advances in Engineering Research**. New York: Nova Science Pub, 2014. p. 21 - 64.

RODRIGUES, Vicente Moreira. **Simulação computacional de um sistema de refrigeração de adsorção acionado por gases quentes de exaustão**. Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Figueiredo. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SANTOS, Eduardo Oliveira dos. **Dimensionamento e Avaliação do Ciclo de Refrigeração de Sistema de Climatização Automotivo**. Orientador: Prof. Dr. Arlindo Tribess. 2005. 131 f. TCC (Mestrado Profissionalizante) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SEMPRINI, Simone; ASENBECK, Sebastian; KERSKES, Henner; DRUCK, Harald. Experimental and numerical investigations of an adsorption water-zeolite heat storage for refrigeration applications. *In*: 11th International Renewable Energy Storage Conference, 2017, Dusseldorf, **Anais... Energy Procedia**, 2017.

SERPA, Eric Corrêa Alonso; RANGEL, Ygor Peixoto; OLIVEIRA, Bárbara Ferreira de; ALVARENGA, Silas das Dores de; SILVA, Silvio Eduardo Teixeira Pinto

da. Avaliação da performance de um motor de combustão interna do ciclo otto utilizando gasolina e uma mistura gasolina-etanol. **Revista Perspectivas Online: Ciências Exatas e Engenharia**, Campo dos Goytacazes, v. 09, n. 26, p. 01 - 21, dez. 2019.

SHABIR, Faizan; SULTAN, Muhammad; MIYAZAKI, Takahiko; SAHA, Bidyut B.; ASKALANY, Ahmed; ALI, Imran; ZHOU, Yuguang; AHMAD, Riaz; SHAMSHIRI, Redmond R. Recent updates on the adsorption capacities of adsorbent-adsorbate pairs for heat transformation applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 119, p. 1 - 37, mar. 2020.

SHARAFIAN, Amir; BAHRAMI, Majid. Assessment of adsorber bed designs in waste-heat driven adsorption cooling systems for vehicle air conditioning and refrigeration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 30, p. 440 - 451, fev. 2014.

SHI, Baosheng. **Development of an MOF based adsorption air conditioning system for automotive application**. Orientador: Prof. Raya Al-Dadah. 2015. 227 f. Tese (PhD) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Birmingham, Birmingham, 2015.

SILVA, Felipe Augusto Rocha da. **Modelagem do sistema de arrefecimento de veículos automotores: Efeitos do controle do eletro ventilador na eficiência do sistema**. Orientador: Prof. Dr. Ricardo Poley Martins Ferreira. 2019. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SINGH, Sohan; DHINGRA, Sunil. Thermal performance of a vapour adsorption refrigeration system: an overview. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW FRONTIERS IN ENGINEERING, SCIENCE & TECHNOLOGY (NFEST), 2, 2019, Anais...* Kurukshetra: IOP Publishing, 2019, p. 1 - 14.

SQUAIELLA, Lucas Lázaro Ferreira. **Efeitos do Sistema de Recirculação dos Gases de Escape no Controle de Emissões de NOx em Motores a Diesel**. Orientador: Cristiane Aparecida Martins. 2010. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

STERZA, Rafael de Lima; BRANDI, Analice Costacurta. **Comparação entre métodos numéricos: Runge-Kutta de quarta ordem e previsor-corretor**, Bauru, v. 7, p. 12 - 22, dez. 2016.

STOECKER, Wilbert F.; JONES, Jerold W. *Refrigeração e Ar-Condicionado*. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.

TAY, N. H. S.; BELUSKO, M.; CASTELL, A.; CABEZA, L. F.; BRUNO, F. An effectiveness-NTU technique for characterizing a finned tubes PCM system using a CFD model. **Applied Energy**, v. 131, p. 377 - 385, jul. 2014.

THE ENGINEERING TOOLBOX. Ethylene Glycol Heat - Transfer Fluid. **The Engineering Toolbox**. Disponível em: < https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html>. Acesso em: 25 de julho de 2021.

TIWARI, Harish U. Adsorption Based Cooling for Vehicle Cabinets. **International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology**, Dharmapuri, v. 3, n. 10, p. 1 - 5, out. 2019.

VASTA, Salvatore; FRENI, Angelo; SAPIENZA, Alessio; COSTA, Fabio; RESTUCCIA, Giovanni. Development and lab-test of a mobile adsorption air-conditioner. **International Journal of Refrigeration**, Amsterdam, v. 35, p. 701 - 708, abr. 2012.

VASTA, Salvatore; PALOMBA, Valeria; LA ROSA, Davide; BONANNO, Antonino. Adsorption Cold Storage for Mobile Applications. **Applied Sciences**, v. 10, n. 6, p. 2044 - 2062, mar. 2020.

WANG, R. Z.; OLIVEIRA, R. G. Adsorption refrigeration - An efficient way to make good use of waste heat and solar energy. **Progress in energy and combustion science**, Amsterdam, v. 32, n. 4, ago. 2006.

WANG, Ruzhu; WANG, Liwei; WU, Jingyi. *Adsorption Refrigeration Technology: Theory and Application*. Cingapura: Wiley, 2014.

WANG, R. Z.; PAN, Q. W.; XU, Z. Y. Solar-powered adsorption cooling systems. In: WANG, R. Z. e GE, T. S. **Advances in Solar Heating and Cooling**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016, p. 299 - 328.

WOLAK, Eliza. The cooling effect by adsorption-desorption cycles. **E3S Web of Conferences**, Les Ulis, v. 14, p. 1 -10, mar. 2017.

WOLAK, Eliza; KRASZEWSKI, Stefan. An overview of adsorptive processes in refrigeration systems. **E3S Web of Conferences: Energy and Fuels 2016**, Les Ulis, v. 10, p. 1 - 6, out. 2016.

YANG, Pei-zhi. Thermodynamic Analysis and Performance Study for Adsorption Refrigeration Cycle Driven by a Fuel Cell Electric Vehicle Waste Heat. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 39, n. 7, p. 523 - 538, jul. 2010.

YOUNES, Mohamed M.; EL-SHARKAWY, Ibrahim I.; KABEEL, A. E.; SAHA, Bidyut Baran. A review on adsorbent-adsorbate pairs for cooling applications. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 114, p. 394 - 414, mar. 2017.

ZHANG, L. Z. Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 20, p. 103 - 114, 2000.

ZUCCHI, Enrico. **Aproveitamento de energia térmica dos gases do sistema de exaustão**. Orientador: Prof. MSc. Fernando Fusco Rovai. 2012. 34 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

ANEXO A

A.1 Estado da Arte

Paper	Características	Desempenho	Comentários
Zhang (2000)	Movido por calor perdido de um motor a diesel, usando como poar zeólita/água e tubo aletado duplo como reator	COP: 0.38 SCP: 25.7 W/kg	SCP pode ser melhorado com a otimização de adsorventes
Gui <i>et al.</i> (2002)	Usando carvão-ativado e metanol e calor perdido do motor de combustão interna	T_{ev} : 9°C	Temperatura de conforto em uma cabine pequena.
Lu <i>et al.</i> (2004)	Usando zeólita/água como par e movida por gases de exaustão de uma locomotiva	COP: 0.21 Reduziu a temperatura em 4 a 6°C	Problema vistos na diminuição ad temperatura do reator
Lambert & Jones (2005)	Revisão da literatura	-	O sistema é menor e mais leve que outros tipos movidos a calor. Ainda necessita de novas tecnologias e materiais para melhorar seu desempenho.
Wang & Oliveira (2006)	Revisão da literatura		O único uso viável, utilizando calor perdido, seria com locomotivas e ônibus, devido ao volume e massa de seus componentes.
Yang (2010)	Três diferentes tipos de ciclos movidos por calor perdido da célula de combustível, usando carvão ativado e metanol.	O COP de todos os ciclos diminui com a razão de capacidade calorífica.	O melhor caso foi com recuperação isotérmica de massa.
Haas <i>et al.</i>	Refrigeração por	T_{ev} : 15°C	

(2019)	adsorção com aquecedor auxiliar para veículos elétricos		
Hu <i>et al.</i> (2009)	Novo compósito zeólita/espuma de alumínio com água e usado com recuperação de massa em um sistema movido por gases de exaustão	Melhorou o COP e o SCP comparado a uma zeólita/água	O modo de dirigir e as condições de funcionamento do motor devem ser levados em consideração, já que isso afeta o desempenho do ar-condicionado.
Lim & Abdullah (2010)	Investigou as propriedades do carvão ativado a base de óleo de palma e sua aplicação.	COP: 0.19 SCP: 396.6 W/kg $T_{ar} = 20.7^{\circ}C$ e $25.2^{\circ}C$	
Abdullah <i>et al.</i> (2011)	Revisou o future do sistema adsorativo para veículos e sua presente limitação		Foi previsto que, no future, o sistema seria capaz de alcançar um COP de 0,5 a 0,8 e SCP maior que 1000 W/kg.
Critoph <i>et al.</i> (2011)	Utiliza reator sortivo com carvão ativado e amonia como par.	COP: 0.22 SCP: 800 W/kg $T_{ev} = 2.5^{\circ}C$	
Magnetto <i>et al.</i> (2011)	Utilizando gel de sílica/água como par de trabalho, operado por calor perdido advindo de um motor de caminhão ou similar.	COP: 0.3 - 0.5.	Entretando, ainda precisa de maiores reduções de volume e peso, como aplicação de condensação direta e evaporação.
Vasta <i>et al.</i> (2012)	Ar-condicionado adaptado a um caminhão, com reator de duas camadas e zeólita/água como par	COP: 0.25 - 0.45 SCP: 300 - 600 W/kg $T_{ev} = 9^{\circ}C$	
Pang <i>et al.</i> (2013)	Revisa o desenvolvimento da tecnologia adsorativa aplicada a refrigeração e ar-condicionado		A aplicação de refrigeração movido por energia solar ainda é o tipo de sistema que mais recebia atenção
Sharafian & Bahrami	Analizou os tipos de		

(2014)	reatores disponíveis para seu uso		
Ramji <i>et al.</i> (2014)	Protótipo com três pares de trabalho diferentes (carvão-ativado e metanol, carvão-ativado e amônia e carvão-ativado e água)	Carvão-ativado/água: COP: 0.58 T_{ar} : 12°C.	
Hamdy <i>et al.</i> (2015)	Revisou a literature		Ainda se necessita melhorar o SCP e o COP, enquanto diminui custos e melhora a tecnologia para competir com outros sistemas.
Ali & Chakraborty (2015)	Dois Estágios indiretos movidos por gases de exaustão com recuperação, operando com zeólita/água, gel de sílica/água e $CaCl_2$ -gel de sílica/água	Zeólita: COP: 0.38 SCP: 0.42 W/kg Gel de sílica: COP: 0.35 SCP: 0.36 W/kg Compósito: COP: 0.32 SCP: 0.35 W/kg	Seria melhor usar materiais sintéticos porosos, como MOFs e compósitos
Semprini <i>et al.</i> (2017)	Zeólita/água usando gases de exaustão como aquecimento do reator	T_{ar} : 12°C.	A transferência de calor dentro da camada porosa ainda precisa ser otimizada.
Benrajesh & Rajan (2017)	Utiliza carboneto de cálcio/água em um ciclo de dois estágios.	COP: 1.068 SPC: 10.66 W/kg, Cai a temperatura em 5°C.	
Tiwari (2019)	Dois reatores, dois condensadores, um evaporador movido por carvão-ativado/amônia	COP: 0.45	
Vasta <i>et al.</i> (2020)	Reator pelletizado com zeólitas e outro com compósito baseado em um alumínio poroso		O compósito apresenta tempo de ciclo menor
Cao <i>et al.</i> (2020)	Efeito do material do reator sobre um sistema com Gel de	Alumínio: COP: 0.518 SCP: 221 W/kg	

	sílica/água		
--	-------------	--	--

ANEXO B

B.1 Relações de Efetividade de Trocadores de Calor, adaptado de Incropera *et al.* (2008)

Configuração do Escoamento	Relação
Tubos Concêntricos	
Escoamento paralelo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Escoamento contracorrente	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT} \quad (C_r = 1)$
Casco e Tubos	
Um passe no casco (2,4, ... passes nos tubos)	$\varepsilon_1 = 2 \{1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2}\}^{-1} \times \frac{1 + \exp[-(NUT)_1((1 + C_r^2)^{1/2})]}{1 - \exp[-(NUT)_1((1 + C_r^2)^{1/2})]}$
n Passes no casco (2n, 4n, ... passes nos tubos)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$
Escoamento cruzado (passe único)	
Dois fluídos não-misturados	$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_r}\right) (NUT)^{0,22} \{ \exp[-C_r(NUT)^{0,78}] - 1 \}\right]$
C_{\max} (misturado), C_{\min} (não-misturado)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r}\right) (1 - \exp\{-C_r[1 - \exp(-NUT)]\})$
C_{\min} (misturado), C_{\max} (não-misturado)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1}\{1 - \exp[-C_r(NUT)]\})$
Todos os trocadores ($C_r=0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$

B.2 Desenvolvimento Matemático para Cálculo do Calor Específico dos Gases de Combustão

Para se calcular, teoricamente, o valor do calor específico dos gases de exaustão, utiliza-se a formulação desenvolvida por Coskun *et al.* (2009), que depende da composição química do combustível, fator lambda e temperatura dos gases.

O equacionamento pode ser dado na forma da Equação 63:

$$c_{pg} = \frac{c_{pC}}{a_C + b_n + c_H + d_s} \quad (63)$$

Sendo que c_{pC} é o calor específico do CO_2 e a, b, c e d são coeficientes utilizados para o modelo.

Cada coeficiente é determinado de acordo com a concentração de elementos químicos e temperatura dos gases, como se vê a seguir:

$$a_c = \frac{3,667 * K_C}{m_{gases}} \quad (64)$$

$$b_n = \frac{b_m}{b_{cp}} \quad (65)$$

$$b_m = \frac{0,767 * (2,9978 * K_H - 0,3747 * K_O + 0,3747 * K_S + K_C) * (11,445) + K_N}{m_{gases}} \quad (66)$$

$$b_{cp} = 0,9094 + 1,69 * 10^{-4} * T - \frac{11135}{T} \quad (67)$$

$$c_H = \frac{c_m}{c_{cp}} \quad (68)$$

$$c_m = \frac{8,938 * K_H + K_M}{m_{gases}} \quad (69)$$

$$c_{cp} = 0,5657 - 6,68 * 10^{-6} * T - \frac{10465}{T^2} \quad (70)$$

$$d_s = \frac{d_m}{d_{cp}} \quad (71)$$

$$d_m = \frac{2 * K_S}{m_{gases}} \quad (72)$$

$$d_{cp} = e^{2,679 - \frac{151,16}{T} - 0,289 \ln(T)} \quad (73)$$

$$c_{pC} = 0,1874 * 1,000061^T * T^{0,2665} \quad (74)$$

Considera-se que a vazão de gases de exaustão será compatível com a vazão de ar do sistema e a composição química do combustível E0, como visto na seção 5.4.1. Obteve-se, então, os resultados para cada coeficiente e para o calor específico dos gases de exaustão, como pode ser visto na Tabela 20.

Tabela 21 - Coeficiente dos gases de exaustão

T [K]	cpCO2	Ac	Bm	Bcp	Bn	Cm	Ccp	Ch	Dm	Dcp	Ds	cp gases [KJ/kgK]
760	1,149	0,702	2,437	1,019	2,393	0,254	0,543	0,469	0,004	1,756	0,003	0,322
799	1,168	0,368	1,275	1,027	1,242	0,133	0,544	0,245	0,002	1,748	0,001	0,630
870	1,200	0,221	0,767	1,042	0,736	0,080	0,546	0,147	0,001	1,732	0,001	1,086
852	1,192	0,351	1,219	1,038	1,174	0,127	0,546	0,233	0,002	1,736	0,001	0,678
886	1,207	0,211	0,731	1,045	0,670	0,0762	0,547	0,140	0,001	1,728	0,001	1,149
923	1,223	0,115	0,400	1,052	0,380	0,042	0,547	0,076	0,001	1,720	0,0004	2,136
968	1,242	0,100	0,347	1,061	0,327	0,036	0,548	0,066	0,001	1,709	0,0004	2,517
975	1,245	0,104	0,360	1,062	0,338	0,038	0,548	0,068	0,001	1,707	0,0004	2,437
995	1,253	0,084	0,290	1,066	0,272	0,030	0,549	0,055	0,001	1,707	0,0003	3,048
1023	1,265	0,074	0,257	1,072	0,240	0,027	0,549	0,049	0,001	1,700	0,0003	3,486
1051	1,276	0,065	0,226	1,077	0,210	0,024	0,549	0,043	0,0004	1,690	0,0002	4,009
1091	1,292	0,049	0,171	1,084	0,158	0,018	0,550	0,032	0,0003	1,680	0,0002	5,389

Fonte: O Autor