



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado - Doutorado -

**SISTEMA DE CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DA
SIMULAÇÃO DINÂMICA DOS PROCESSOS DE SORÇÃO E
DESSORÇÃO EM CICLOS DE REFRIGERAÇÃO POR
ADSORÇÃO FÍSICA**

Por

Moacir Martins Machado

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor.

MOACIR MARTINS MACHADO

**SISTEMA DE CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DA
SIMULAÇÃO DINÂMICA DOS PROCESSOS DE SORÇÃO E
DESSORÇÃO EM CICLOS DE REFRIGERAÇÃO POR
ADSORÇÃO FÍSICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor.

Orientadores : Professor Dr Francisco Antônio Belo

Professor Dr Antonio Pralon Ferreira Leite

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M149s Machado, Moacir Martins.

Sistema de controle e instrumentação da simulação
dinâmica dos processos de sorção e dessorção em ciclos
de refrigeração por adsorção física / Moacir Martins
Machado. - João Pessoa, 2008.

201 f. : il.

Orientação: Francisco Antônio Belo, Antonio Pralon
Ferreira Leite.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Refrigeração por adsorção. 2. Refrigerador -
Protótipo - Simulação. 3. Instrumentação virtual. I.
Belo, Francisco Antônio. II. Leite, Antonio Pralon
Ferreira. III. Título.

UFPB/BC

CDU 621.56(043)

SISTEMA DE CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO DINÂMICA DOS PROCESSOS DE SORÇÃO E DESSORÇÃO EM CICLOS DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO FÍSICA

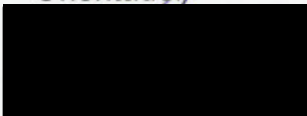
por


Moacir Martins Machado

Tese aprovada em 26 de maio de 2008

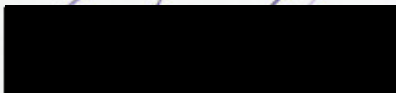
Período letivo 2008.1

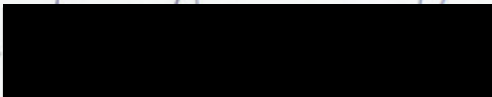

Prof. Dr. FRANCISCO ANTÔNIO BELO
Orientador


Prof. Dr. ANTÔNIO PRALON FERREIRA LEITE
Orientador


Prof. Dr. CARLOS ANTÔNIO CABRAL DOS SANTOS
Examinador Interno


Prof. Dr. SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA
Examinador Interno


Prof. Dr. FRANCISCO MARCONI CAVALCANTI DE LIMA
Examinador Externo


Prof. Dr. MARCELO BEZERRA GRILO
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Moisa, que desde há muito tempo incentiva e apóia todas as minhas ações relacionadas ao estudo.

Dedico também à minha esposa, Iracema, que suportou minhas longas ausências, com muita compreensão, e sempre me destinou muito afeto e carinho.

Dedico, ainda, às minhas filhas do coração Marília e Larissa de quem tive que subtrair muitas horas de convívio familiar.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores professores Francisco Antônio Belo e Antonio Pralon Ferreira Leite, pela competência, dedicação e a amizade que o convívio ameno propiciou.

Aos amigos e professores do Laboratório de Automação Industrial do CEFETPE: José Neves Cruz, Osglay Izidio da Silva e José Otávio Maciel, que assumiram as minhas aulas durante o período em que permaneci na Universidade Federal da Paraíba.

Aos amigos e também professores, Leonaldo José Lira do Nascimento e Rodrigo Ronelli Duarte de Andrade, pessoas de caráter ilibado, com quem tive a oportunidade conviver. Foram vários os momentos em que suas observações pertinentes levaram-me a solucionar complexos problemas relacionados ao trabalho de tese. Em muitas outras ocasiões, pude contar com seus prudentes aconselhamentos.

Aos técnicos do Laboratório de Energia Solar (LES) da Universidade Federal da Paraíba, nominados a seguir.

Técnico em mecânica, João de Deus Nunes Junior: profissional de comprovada experiência, diligente, ativo, e sempre capaz de apontar o melhor caminho a ser seguido diante de uma situação complicada. Exerce com maestria o seu ofício.

Técnico em eletrônica, Diógenes Montenegro: jovem profissional que domina, dentre outras coisas, a simulação de circuitos eletrônicos e a prototipagem de placas de circuito impresso. Competente na resolução de problemas que lhe são afetos, procura encontrar diversas maneiras para resolvê-los. Exerce com galhardia o seu mister.

Técnico em mecânica, Sérgio Pessoa de Lima Marques: profissional hábil, metódico, e que realiza com esmero as tarefas que lhe são atribuídas. Exerce com proficiência o seu trabalho.

A CAPES, pelo apoio financeiro durante a maior parte deste trabalho de tese.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1INTRODUÇÃO.....	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1 REFRIGERAÇÃO SOLAR POR ADSORÇÃO.....	6
2.2 A PESQUISA EM ADSORÇÃO NO BRASIL.....	10
2.3 TRABALHOS PESQUISADOS.....	11
3 PRINCÍPIOS DA ADSORÇÃO EM MICROPOROS.....	35
3.1 ADSORÇÃO EM MICROPOROS.....	35
3.1.1 O carvão ativado.....	37
3.2 DETERMINAÇÃO DO ESTADO TERMODINÂMICO PARA PROCESSOS DE ADSORÇÃO EM MATERIAIS MICROPOROSOS.....	39
3.3 OS ADSORVENTES E ADSORVATOS UTILIZADOS NOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO.....	42
3.4 ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM CICLO BÁSICO DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO.....	43

3.5 PROCESSOS CÍCLICOS DE ADSORÇÃO.....	47
3.5.1 Regeneração por temperatura.....	47
4 CIRCUITOS ELETRÔNICOS DESENVOLVIDOS PARA O SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE.....	49
4.1 CONDICIONADOR DE SINAIS.....	49
4.2 CIRCUITO ELETRÔNICO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO....	57
4.3 CIRCUITO ELETRÔNICO DE CONTROLE DE POTÊNCIA.....	60
5 SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DO ADSORVEDOR.....	67
5.1 INTRODUÇÃO.....	67
5.2 SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA PARA O AQUECEDOR RESISTIVO.....	68
5.2.1 Aquecedor resistivo.....	70
5.2.2 Sensor termorresistivo.....	70
5.2.3 Circuito eletrônico condicionador de sinal.....	72
5.2.4 Circuito eletrônico do atuador.....	72
5.2.5 Módulo de comunicação de rede.....	72
5.2.6 Módulo de entradas analógicas.....	73
5.2.7 Módulo de saídas analógicas.....	74
5.3 PROJETO DO CONTROLADOR.....	74
5.3.1 O controlador PID implementado no LabVIEW.....	76
5.3.2 Sintonia do controlador PID.....	78
6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
6.1 MATERIAS E MÉTODOS.....	82
6.2 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS DO APARATO EXPERIMENTAL	82
6.2.1 O sistema de alimentação do adsorvato.....	83
6.2.2 O adsorvedor ou reator.....	84
6.2.3 evaporador/condensador.....	86
6.2.4 O sistema de trocador de calor convectivo de gelo.....	89
6.3 CARCTERIZAÇÃO FÍSICA DOS ELEMENTOS DO SISTEMA.....	91

6.3.1 Caracterização física do adsorvente e do adsorvato.....	91
6.3.2 Caracterização física do leito adsortivo.....	92
6.4 GRANDEZAS MEDIDAS.....	93
6.4.1 Medidas de pressão interna do sistema.....	94
6.4.2 Medidas de temperatura.....	95
6.4.3 Medidas de pressão.....	101
6.4.4 Medidas da massa do adsorvato dessorvido e adsorvido durante o ciclo de refrigeração.....	103
6.4.5 Sistema de aquisição de dados.....	105
6.4.6 A instrumentação do protótipo.....	106
6.5 CONDIÇÕES OPERACIONAIS.....	108
6.5.1 Depuração do leito adsortivo.....	109
6.6 INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO.....	114
 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	 116
7.1 RESULTADOS.....	116
7.1.1 Variações temporais das temperaturas dos tubos do adsorvedor.....	117
7.1.2 Variação da massa ciclada de metanol.....	120
7.1.3 Os ciclos experimentais de refrigeração.....	122
7.1.4 Coeficiente de performance (COP).....	124
7.2 DISCUSSÕES.....	126
7.2.1 Variação de temperatura do adsorvente.....	126
7.2.2 Considerações sobre a diferença da variação da massa ciclada de metanol...	126
7.2.3 Os ciclos experimentais de refrigeração.....	128
7.2.4 Coeficientes de performance (COP).....	129
 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	 132
 REFERÊNCIAS.....	 134

ANEXO A – PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE ESTADO DO PAR CARVÃO ATIVADO AC-35/METANOL E PROPRIEDADES DOS COMPONENTES.....	139
APÊNDICE A - DIMENSIONAMENTO DA ÁREA E DO VOLUME DO EVAPORADOR/CONDENSADOR.....	140
APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DO CONDENSADOR.....	144
APÊNDICE C - DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DO EVAPORADOR.....	146
APÊNDICE D – DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO LEITO ADSORTIVO.....	148
APÊNDICE E – CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA DOS Pt-100.....	151
APÊNDICE F – PRINCÍPIOS DA SUPERVISÃO E CONTROLE.....	155

RESUMO

Este trabalho descreve o projeto e a construção de um protótipo de refrigerador por adsorção física que utiliza o par carvão ativado-metanol. O metanol circula em um sistema fechado e sob vácuo. O protótipo do refrigerador adsorativo é constituído por três partes principais, a saber: (1) reator, adsorvedor tubular de aço inox com leito adsorativo de carvão ativado; (2) condensador/evaporador em um único componente; (3) tubulação de aço inox e mangueira flexível para interligar o adsorvedor ao condensador/evaporador. Para a dessorção do fluido refrigerante empregou-se o método de regeneração por temperatura (Thermal Swing Adsorption - TSA). Desenvolveu-se um aquecedor resistivo, que envolve o reator, e realiza a dessorção do metanol. O evaporador apóia-se sobre uma balança semi-analítica que está interligada a um computador. Foi projetado, simulado, montado e validado diversos circuitos eletrônicos utilizados no protótipo do refrigerador. Todo o aparato experimental é supervisionado e controlado por um programa computacional especialmente desenvolvido. Utilizou-se a instrumentação virtual, implementada em um computador, para substituir a maior parte dos equipamentos necessários à medição e ao controle do sistema. As medidas da temperatura e da pressão do leito adsorativo são realizadas em tempo real. Uma balança semi-analítica interligada ao computador é utilizada para medir, em tempo real, a massa de álcool durante o ciclo termodinâmico de adsorção/dessorção. Adotou-se o algoritmo PID (proporcional/integral/derivativo), como estratégia de controle. O PID faz parte do programa computacional desenvolvido. A coleta dos dados experimentais e suas respectivas correlações possibilitam determinar os parâmetros da equação de Dubinin-Astakhov, que representa o equilíbrio termodinâmico do par adsorativo empregado. O estado termodinâmico, definido pela temperatura e pressão do leito adsorativo, bem como a quantidade de metanol adsorvida em cada ciclo, são supervisionados em tempo real, por um programa computacional idealizado no ambiente gráfico de programação denominado LabView.

Palavras chaves – Refrigeração por adsorção; Refrigerador - Protótipo - Simulação; Instrumentação virtual.

ABSTRACT

This work describes the project and the construction of a refrigerator prototype for physical adsorption that uses the pair charcoal activate-methanol. The methanol circulates in a closed system and under vacuum. The prototype of the adsorptive refrigerator is constituted by three main parts: (1) reactor of stainless steel with activated charcoal; (2) condenser/evaporator in a single component; (3) piping of stainless steel and flexible hose. The regeneration method for the adsorbate is Thermal Swing Adsorption - TSA. A resistive heater was projected, that involves the reactor, and it accomplishes the desorption of the methanol. The evaporator is on the semi-analytical scale that is linked to a computer. It was projected, simulated, mounted and validated several electronic circuits used in the refrigerator. The experiment is supervised and controlled by a computational program. The virtual instrumentation was used to substitute most of the equipments used for measurement and control of the system. The measures of the temperature and of the pressure of the adsorptive bed are accomplished in real time. A semi-analytical scale is used to measure, in real time, the mass of alcohol during the thermodynamic. The used controller was PID (proportional/integral/derivative). The collection of the experimental data and their respective correlations make possible to determine the parameters of the equation of Dubinin-Astakhov, that it represents the pair's used adsorptive thermodynamic balance. The thermodynamic state, defined for the temperature and pressure of the adsorptive bed, as well as the amount of methanol in each cycle, they are supervised in real time, for a program computational idealized in the graphic atmosphere of programming denominated LabView.

Key words - Cooling for adsorption; Refrigerator - Prototype - Simulation; Virtual instrumentation.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Dentre as alternativas para se obter ambientes refrigerados, em substituição aos sistemas convencionais de compressão a vapor, podem-se citar os sistemas de refrigeração por adsorção. A tecnologia tradicional de refrigeração (ciclo de absorção) apresenta alguns problemas com relação aos impactos ambientais. Já os sistemas de refrigeração por adsorção são considerados como um tipo de sistema que não agride o meio ambiente (por não utilizar refrigerantes poluentes, como os CFCs que prejudicam a camada de ozônio). A tecnologia empregada nos sistemas de adsorção requer menor quantidade de componentes que a do ciclo de absorção. Os sistemas de adsorção têm, também, outras características que os tornam interessantes, não necessitando de dispositivos de expansão e redutores de pressão (o que diminui os trabalhos de manutenção e o custo operacional), não utilizam bomba de solução (o que os tornam silenciosos), podem ser acionados diretamente por uma fonte energética de baixo poder calorífico (tais como energia solar e resíduos térmicos oriundos de processos industriais) e podem prescindir do uso da eletricidade (sendo uma boa alternativa para o uso mais racional da energia elétrica).

A adsorção é um fenômeno físico que ocorre devido ao desbalanceamento entre as forças de interação de partículas (átomos ou moléculas) que formam um sólido e aquelas de um fluido que se encontra em contato com este sólido. Em compostos microporosos (diâmetro do poro menor que 4 nm) a adsorção ocorre no interior de canais de dimensões

moleculares e não apenas em mono ou multicamadas sobre a superfície do sólido, como ocorre quando este sólido apresenta meso ou macro poros (poros maiores que 4 nm). No processo de adsorção, os microporos do adsorvente são preenchidos com moléculas do adsorvato, sem que haja mudança em seu volume. Em um sistema de refrigeração por adsorção, o adsorvente contido em um reator tem seus microporos preenchidos pelos vapores do refrigerante saturado provenientes do evaporador. A vaporização do refrigerante ocorrida no evaporador ocasiona o efeito frigorífico desejado. O fenômeno ocorre devido à conjunção de gradientes térmicos e de pressão.

Os sistemas de adsorção utilizados para refrigeração são estudados há muitos anos por vários autores e um grande número de refrigeradores foram construídos e mostraram ser termodinamicamente viáveis para produção de ambientes refrigerados sob condições específicas. A literatura mostra que é muito importante analisar precisamente o desempenho de um ciclo de adsorção, baseado em uma determinação exata do comportamento do adsorvente-adsorvato. É muito importante uma compreensão exata da influência das circunstâncias de operação, bem como as características dos pares trabalhados e as características dos reatores no desempenho do sistema. Isto inclui, também, a avaliação da massa do refrigerante que se desloca a cada ciclo, o calor isotérico de adsorção ou dessorção, bem como de sua dependência em relação aos fatores anteriormente mencionados. O coeficiente de desempenho, COP, é o critério escolhido para a avaliação do desempenho do ciclo como forma de mostrar a influência das variáveis que atuam no sistema, não obstante o projeto de uma máquina.

A maioria dos autores escolheu as teorias de Polanyi, a de Dubinin-Radushkevich e a de Dubinin-Astakhov como as melhores teorias disponíveis para descrever o ciclo de adsorção. Nessas referências, entretanto, muitas simplificações às teorias foram realizadas de forma empírica e propostas em seus modelos matemáticos. Além disso, a influência detalhada de diversos parâmetros no desempenho de um ciclo não foi suficientemente discutida. Sendo assim é importante que mais aparatos experimentais sejam desenvolvidos com o intuito de melhor descrever e quantificar os fenômenos envolvidos em ciclos de refrigeração adsortivos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho possui 7 capítulos, um anexo e seis apêndices, que são descritos a seguir.

O capítulo 1 é esta introdução.

No capítulo 2 realiza-se uma breve revisão histórica dos sistemas térmico-solares para produção de frio. Traça-se o marco da refrigeração por adsorção no Brasil, bem como se situa as pesquisas nesta área até a presente data neste país. Por último relata-se o estado da arte, compreendido nos últimos dez anos, relativo aos trabalhos que tratam de sistemas de refrigeração adsorptivos; mas que utilizam principalmente energia solar para regeneração do adsorvente, que possuem ciclo intermitente (ou seja, sem recuperação de calor) e que utilizam, preferencialmente, o par carvão ativado-metanol.

No capítulo 3 define-se a adsorção física e a adsorção química. Define-se, também, o que é carvão ativado e aborda-se o fenômeno da adsorção que ocorre em seus microporos. Comenta-se a equação de Dubinin-Astakhov que é utilizada para descrever, de forma matemática, o comportamento de um meio adsorvente durante os processos de adsorção e dessorção, pois apresenta a concentração da fase adsorvida em função da temperatura e pressão do meio. Aborda também, os pares de adsorvente/adsorvato mais utilizados em refrigeração por adsorção. Faz-se a análise de um ciclo básico de refrigeração por adsorção tendo-se como base o diagrama de Clapeyron. Classificam-se, com relação à regeneração, os processos cíclicos de adsorção que utilizam leitos fixos preenchidos com adsorventes em forma de grão. Descreve-se o processo de regeneração por temperatura ou Thermal Swing Adsorption (TSA), por conta de sua utilização na regeneração de leitos fixos preenchidos com adsorvente.

O capítulo 4 descreve cada um dos três circuitos eletrônicos projetados para este trabalho. 1- O *circuito eletrônico denominado condicionador de sinal* converte a grandeza física resistência elétrica, do sensor termorresistor Pt-100, em um sinal de tensão elétrica analógico e variante no tempo em função da temperatura. 2- O *circuito eletrônico amplificador de instrumentação, com saída transistorizada*, controla uma tensão elétrica

continua na faixa de 0-10 volts. Esta tensão é entregue a um conjunto de três ventiladores que têm sua velocidade de rotação alterada em função da tensão elétrica aplicada em seus terminais. 3- O *circuito eletrônico de controle de potência* recebe um sinal elétrico, do tipo analógico na faixa de 0-10 volts, e como resultado controla a fase da tensão alternada de 220Vca que é aplicada ao aquecedor resistivo envolvente, controlando, assim, a quantidade de calor gerada pelo mesmo. Apresenta simulações, testes e validações dos circuitos eletrônicos desenvolvidos.

No capítulo 5 descreve-se o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura para o aquecedor elétrico resistivo aplicado ao adsorvedor do sistema de refrigeração por adsorção física. Nomina-se as características técnicas do aquecedor resistivo. Descreve-se cada um dos componentes físicos constituintes do sistema, tais como: 1- aquecedor resistivo propriamente dito; 2- sensor termorresistivo de platina; 3- circuito eletrônico condicionador de sinal; 4- atuador ou circuito eletrônico de controle de potência do tipo controle de fase tiristorizado; 5- módulo de comunicação de rede; 6- módulo de entrada de tensão analógica com 16 canais; 7- módulo de saída de tensão analógica com 8 canais. Define-se as especificações de desempenho para o controlador PID utilizado no projeto. Descreve-se o algoritmo modificado para o controlador PID implementado no software LabVIEW. Descreve-se o desenvolvimento experimental para determinar os valores iniciais do ganho proporcional K_p , tempo integral T_I e o tempo derivativo T_D do controlador PID. Compara-se os requisitos de desempenho especificados para o controlador do processo com o resultado real observado durante o ciclo adsorativo.

No capítulo 6 apresenta-se os materiais, os equipamentos e métodos utilizados no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho. Descreve-se o sistema automatizado para: o controle e monitoramento da temperatura de aquecimento e resfriamento do leito adsorativo; o monitoramento da pressão do leito adsorativo e o monitoramento da massa de adsorvato transportada durante o fenômeno da adsorção/dessorção. Determina-se a porosidade e a densidade de empacotamento do leito adsorativo. Descreve-se: 1- as partes constituintes do aparato experimental; 2- como são mensuradas as grandezas físicas temperatura, pressão e massa durante o ciclo de refrigeração; 3- o sistema de aquisição de dados utilizado; 4- os passos necessários à inicialização do ciclo de refrigeração; 5- a interface gráfica do usuário.

No capítulo 7 conclui-se o relatório com uma análise de todo o trabalho realizado. Apresenta-se as contribuições efetuadas e sugestões para trabalhos futuros.

O anexo A descreve os parâmetros da equação de estado do par carvão ativado AC-35/metanol e as propriedades do aço inoxidável empregado no sistema.

Os apêndices A, B, C, D e E, tratam respectivamente: do dimensionamento da área e do volume do evaporador/condensador; do dimensionamento térmico do condensador; do dimensionamento térmico do evaporador; da determinação da porosidade e da densidade de empacotamento do leito adsortivo; do procedimento de calibração dos sensores termorresistivos Pt-100.

O apêndice F define a supervisão e o controle aplicados a um sistema que é capaz de traçar as estratégias de controle e fazer: a aquisição, o gerenciamento e o tratamento de dados de um processo. Descreve os componentes físicos, básicos, de um sistema de supervisão e controle. Define a terminologia básica aplicada a sistemas de controle de processos. Descreve os tipos de controles em malha aberta e em malha fechada. Descreve os algoritmos de controle tradicionais, P, PI, PD e PID e suas representações matemáticas. Descreve os métodos heurísticos de Ziegler-Nichols e o de Basilio-Matos, utilizados para a determinação da sintonia dos parâmetros do controlador PID aplicado ao sistema de controle proposto neste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO DE LITERATURA

2.1. REFRIGERAÇÃO SOLAR POR ADSORÇÃO

Sistemas térmico-solar utilizam o calor do sol para produzir o efeito frigorífico. Para isto, coletores solares convertem a luz do sol em calor e este calor é convertido em frio em uma máquina de refrigeração.

Existem diferentes tipos de coletores solares para diversas faixas de eficiência. Dependendo do projeto ótico, um coletor solar pode ser classificado como coletor com concentrador ou coletor sem concentrador.

A história de concentradores solares data de muito tempo atrás, do tempo de Arquimedes com o seu “espelho ardente”. Diz-se que ele utilizou-se de espelhos de bronze supostamente para focalizar luz solar para queimar navios romanos no século 3 A.C. O mesmo tipo de coletor solar foi utilizado para os cálculos sobre aquecimento solar realizado por Augustin Mouchot no Congresso Mundial de Paris em 1878 (THÉVENOT, 1979).

Coletores solares com concentradores, que são “espelhos” com geometria curvilínea, são utilizados para melhorar a eficiência dos coletores solares, direcionando a luz do sol para uma área restrita. A referida área terá sua temperatura elevada e para lá deslocar-se-á um fluido de transferência de calor que é bombeado para ser aquecido. O coletor solar com concentrador pode ser equipado com dispositivos para seguir o movimento do sol.

Coletores solares sem concentrador não têm uma superfície refletiva para concentrar a luz do sol. O primeiro coletor solar do mundo deste tipo é atribuído ao cientista suíço Horace de Saussure por sua invenção denominada de “caixa quente solar” no ano de 1760. Ele construiu uma caixa de madeira coberta com uma placa de vidro. A caixa exposta ao sol para que a luz solar penetrasse na cobertura de vidro para aquecer o interior. Ele compreendeu que seu experimento podia ter uma importante aplicação prática pois era pequeno, econômico e fácil de confeccionar (KIM, 2007).

Esta “caixa quente solar” foi o protótipo dos aquecedores solares de água implementados desde o século dezenove (BUTTI e PERLIN, 1980 apud KIM, 2007). Um coletor solar sem concentrador tem um absorvedor o qual é usualmente uma placa de metal pintada de preto com um caminho para o fluido de transferência de calor, tudo dentro de uma caixa de material isolante e com cobertura de vidro.

Independentemente do tipo de coletor, a superfície absorvente pode ser coberta com um material seletivo que tem uma absorção alta para o espectro solar e baixa emitância para radiação infravermelha. O espaço entre o absorvente e a cobertura de vidro também pode ser evacuado para minimizar as perdas de calor.

Coletores solares sem concentrador são predominantes no mercado de coletor solar. Entre eles, os coletores solares de placa plana são os mais comuns, e consistem de um absorvedor metálico em um recipiente isolado e com cobertura de placa(s) de vidro. A Figura 2.1 descreve o sistema de coletor solar sem concentrador.

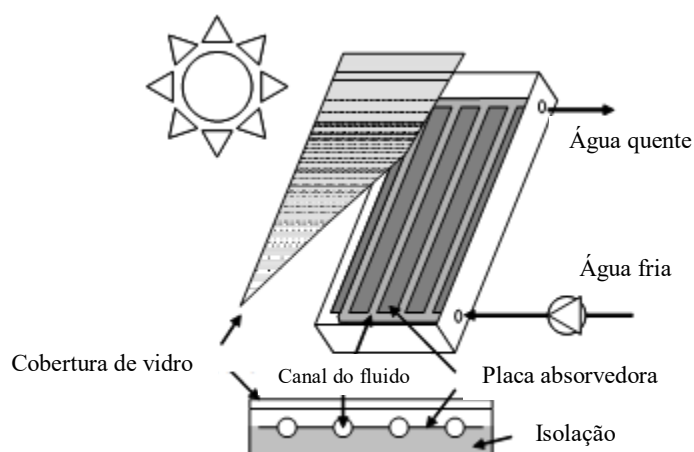


Figura 2.1 Sistema de coletor solar sem concentrador.

Foi Faraday em 1848 um dos primeiros a descrever os princípios da adsorção de vapor por um adsorvente sólido. Contudo a história da refrigeração solar data de 1878 quando o matemático francês Augustin Mouchot demonstrou seus cálculos sobre refrigeração solar com a máquina de refrigeração absortiva, projetada por Edmond Carré, para produzir gelo e que foi apresentada no Congresso Mundial em Paris (THÉVENOT, 1979). Conta-se que o público presente ficou surpreso com o aparente paradoxo de produzir gelo a partir da luz solar.

Dieng e Wang (2001) citam que Miller (1929) apresenta um estudo que é uma revisão bibliográfica de vários sistemas adsortivos que utilizam o par adsorvente-adsorvato de sílica gel-dióxido de enxofre.

No ano de 1966 foi construída e testada uma casa solar. A casa incluía um chiller solar e situava-se na cidade de Queensland na Austrália (Ziegler, 1998) .

Observa-se pelo exposto acima que a utilização dos princípios da adsorção para a produção do efeito frigorífico vem de longa data.

Acredita-se que uma das principais vantagens do refrigerador solar adsortivo sobre os convencionais por compressão mecânica seja a de que ele não necessita de energia elétrica para funcionar.

Refrigeradores baseados em processos de sorção diferem dos sistemas de compressão de vapor pelo fato de que a energia necessária ao seu funcionamento é essencialmente de origem térmica. A Figura 2.2 ilustra um sistema de refrigeração solar por adsorção.

O refrigerador solar adsortivo quando comparado a outras alternativas que têm por princípio os processos de sorção, apresenta a vantagem de não precisar de coluna de retificação e tampouco há necessidade de se evitar o fenômeno de cristalização, como no caso da absorção líquida, ele também não sofre alterações de volume durante a formação do produto, como no caso da absorção sólida.

O refrigerador adsortivo apresenta também as seguintes outras vantagens competitivas em relação ao ciclo de compressão de vapor: operação silenciosa (pela ausência de compressor mecânico); utiliza fluidos refrigerantes não agressivos ao meio ambiente; manutenção reduzida (pelo fato de não possuir peças móveis); o evaporador

não é contaminado por óleo, mantendo sua capacidade de troca térmica; e na insuficiência da energia solar poder ser acionado termicamente por calor de rejeição industrial, por gases de descarga de motores de combustão interna, e também por combustíveis como o gás natural.

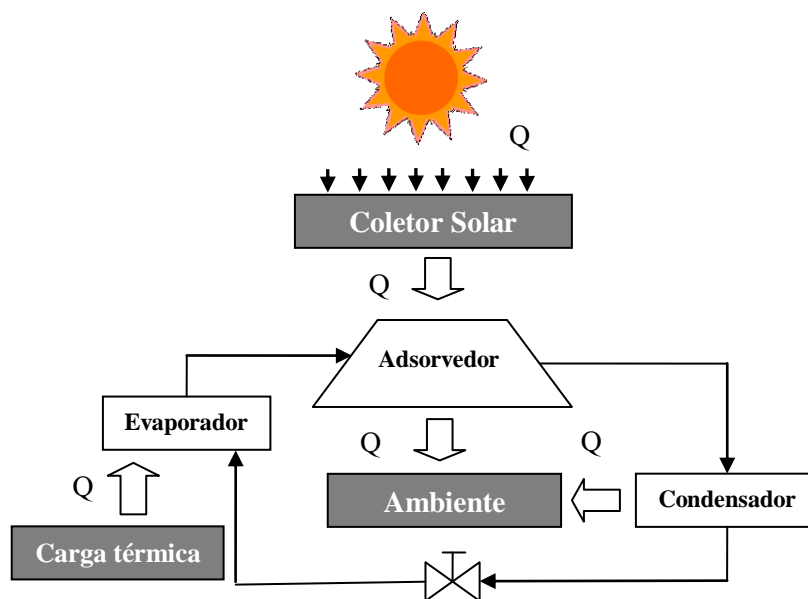


Figura 2.2. Sistema de refrigeração solar por adsorção.

Como desvantagens dos refrigeradores adsorptivos, podemos citar: os baixos valores de coeficientes de performance (razão entre o calor necessário para aquecer o leito adsorptivo e provocar a dessorção e o calor absorvido pelo evaporador), a intermitência de seu funcionamento, os longos períodos requeridos para a obtenção do efeito frigorífico (necessita-se praticamente de todo o dia para aquecer o reator e o resfriamento do mesmo só pode ocorrer a noite, quando a temperatura cai), além dos custos que envolvem a fabricação e montagem ainda serem elevados.

O problema da demanda e oferta de energia têm preocupando as autoridades constituídas de vários países. Muitos locais no Brasil, e em outras plagas, não possuem energia elétrica ou ainda a demanda em determinados períodos é maior que a oferta.

Em regiões remotas ou em propriedades rurais não eletrificadas algumas comunidades chegam a adquirir gelo em cidades longínquas. A massa de gelo, neste caso, chega sensivelmente reduzida, devido ao derretimento do mesmo durante o percurso de

entrega. Como alternativa a este procedimento, nem sempre prático e por vezes inviável, resta a estas comunidades carentes a utilização de refrigeradores por absorção alimentados a gás liquefeito de petróleo - GLP (o gás de cozinha)- ou querosene como suprimento de energia. Os sistemas por absorção não representam muita liberdade de escolha da fonte energética ficando restrito ao GLP ou ao querosene, uma vez que estas fontes precisam fornecer grande fluxo de calor de modo constante e a temperaturas superiores a 100°C. Logo, o uso de refrigeradores alimentados com GLP ou querosene tem um custo considerável. Some-se a isto a atual preocupação com os desafios ambientais e o crescimento sustentável, como um conjunto de razões suficientes para a continuidade das pesquisas da refrigeração solar por adsorção no Brasil e no mundo.

2.2. A PESQUISA EM ADSORÇÃO NO BRASIL

O marco das pesquisas em adsorção no Brasil remontam ao ano de 1983, quando Paulo Vodianitskaia, orientado pelo professor Rogério Pinheiro Klüppel, desenvolveu o seu trabalho experimental de Mestrado intitulado: Desenvolvimento Experimental de um Refrigerador Solar a Adsorção Utilizando o Par Adsorativo Sílica gel-Água. A dissertação de mestrado foi concluída e apresentada no ano de 1984. Esta dissertação foi realizada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB, em João Pessoa. Vodianitskaia, em sua dissertação, avaliou experimentalmente um pequeno refrigerador, usando o par gel de sílica-água e um adsorvedor-coletor solar multitubular com cobertura de vidro simples, construído com tubos de cobre. A temperatura mínima alcançada no evaporador foi de 5°C, comprovando sua viabilidade técnica para a conservação de alguns produtos agropecuários, como leite e hortaliças e, embora não citado pelo autor, também se prestaria para a conservação de vacinas (VODIANITSKAIA, 1984).

Nos anos 90 as pesquisas experimentais foram interrompidas, basicamente por falta de financiamento por parte das agências de fomento. Apenas dois registros de pesquisa aplicada em refrigeração solar por adsorção no país foram encontradas na década de 1990. Um estudo consiste em uma dissertação de mestrado realizada na Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP. Nesse trabalho foi avaliado um refrigerador para fabricação

de gelo, usando o par carvão ativado DEION-metanol e um coletor multitubular, obtendo-se 2,8 kg/m²dia a uma temperatura de 0°C (SILVEIRA JÚNIOR, 1990).

Em 1999, um protótipo de refrigerador solar adsorativo foi instalado no LES destinado à fabricação de gelo, usando o par carvão ativado AC35-metanol e um coletor multitubular (LEITE *et al.*, 2007). Os testes desenvolvidos nesse protótipo resultaram na elaboração de uma dissertação de mestrado (ANDRADE, 2004), onde foi analisado o componente adsorvedor-coletor solar, e em uma tese de doutorado (GRILO, 2004), que analisou o sistema refrigerador como um todo.

No laboratório de automação e controle de processos de alimentos da Universidade Estadual de Campinas, um protótipo de refrigerador adsorativo para produção de gelo foi testado por Oliveira (2004) o que resultou em sua tese de doutorado. O refrigerador utiliza o par carvão ativado-amônia, oferecendo flexibilidade quanto aos ciclos frigoríficos operados, podendo utilizar diferentes fontes de calor para regenerar o adsorvente,

Mais recentemente, o grupo Labensol, da Universidade Estadual de Feira de Santana em conjunto com a Universidade Federal da Bahia, desenvolveu e testou um protótipo de refrigerador adsorativo utilizando o par carvão ativado-metanol, com um adsorvedor-coletor solar multitubular (LIMA, A.A. *et al.*, 2007).

2.3. TRABALHOS PESQUISADOS

A bibliografia a seguir, listada em ordem cronológica, versa sobre sistemas de adsorção utilizados em refrigeração solar. Com relação aos autores dos projetos de pesquisa, acrescentou-se o item que identifica a instituição na qual os pesquisadores estavam vinculados quando desenvolveram seus respectivos trabalhos. Também relaciona-se os pesquisadores e seus trabalhos com o país onde foram desenvolvidas as pesquisas.

Excetuando-se a primeira referência deste levantamento, relacionou-se nesta revisão alguns dos trabalhos produzidos nos últimos dez anos. Estes trabalhos versam sobre sistemas de refrigeração adsorptivos, como já se disse antes, mas que utilizam principalmente energia solar para regeneração do adsorvente, que possuem ciclo intermitente, ou seja, sem recuperação de calor, e que utilizam, preferencialmente, o par carvão ativado-metanol.

1-Vodianitskaia, P. J. (1984): Trata-se de uma referência precursora sobre o uso de um adsorvedor multitubular em um sistema de refrigeração solar, na qual descreve um pequeno refrigerador experimental, empregando o par gel de sílica e água, destinado à conservação de leite e hortaliças. A temperatura mínima registrada no evaporador foi de 5°C.

- **Laboratório de Energia solar, Departamento de Engenharia mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba.**

2-Critoph, R. E. et al., (1997): Nesta nota técnica, a performance de um refrigerador solar adsorptivo é estudado experimentalmente para três configurações de coberturas solar: com vidro simples, com vidro duplo e com vidro simples e material isolante transparente (MIT). O coletor consiste de 15 tubos de aço com superfície seletiva contendo carvão ativado granular como adsorvente com amônia como refrigerante. A superfície do coletor possui uma área de 1,43 m² e contem 17 kg de carvão. Os resultados para cada configuração são apresentados e os respectivos COP solar são 0,061, 0,071 e 0,065.

- **Department of Engineering, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, U.K.**
- **Mechanical Engineering, University of Zimbabwe, MP 167 Mount Pleasant, Harare, Zimbabwe.**

3-Teng, Y. et al., (1997): Desenvolvem um modelo térmico baseado na equação de Dubinin-Radushkevich e em uma análise termodinâmica. Neste modelo as propriedades físicas das variáveis temperatura, calor específico do par de trabalho e calor isostérico de dessorção ou adsorção são particularmente considerados. Utilizam o par carvão ativado do

tipo YK-metanol para realizar simulações computacionais para investigar as relações entre o COP dos ciclos e as características específicas do par trabalhado assim como as condições de operação do sistema. Concluem que os resultados das simulações fornecem um resultado aproximado das complexas relações existentes entre os parâmetros de sistemas de adsorção.

- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, People's Republic of China.**

4-Hu, E. J. (1998): Estuda a decomposição do metanol em ciclos de refrigeração adsorptivos com o par carvão ativado-metanol, o que pode provocar essa decomposição e as conseqüências para o funcionamento do sistema quando isso ocorre. Utiliza um aquecedor elétrico para determinar as temperaturas em que ocorrem as dissociações e informa que nas faixas de pressão de 0,02 a 2 bar e de temperatura entre -10 e 110°C , onde trabalham a maior parte dos equipamentos de refrigeração movidos a energia solar, a ocorrência da dissociação do metanol é pouco provável. No entanto, mesmo nessas faixas de temperatura e pressão, a longo prazo pode ocorrer presença de resíduos e gases indesejáveis se forem utilizados tubos de cobre ou alumínio no equipamento.

- **Gippsland School of Engineering, Monash University, Churchill 3842, Australia.**

5-Restuccia, G., Cacciola, G. (1999): Descrevem um experimento onde dois sistemas de adsorção são considerados: um com o par zeólita-água e outro carvão ativado-metanol. Um novo leito adsorptivo para o par zeólita-água é projetado e testado. O sistema com duplo reator opera por sucessão periódica. A performance do sistema é testada para sistemas de aquecimento ambiente e para ar condicionado e, são comparados os sistemas carvão-metanol e zeólita-água. Os autores comprovam que se consegue ciclos mais rápidos com o par zeólita-água.

- **Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Recerche sul Metodi e Processi Chimici per la Transformazione e L'Accumulo dell'Energia, Messina, Italy.**

6-Sumathy, K., Zhongfu, L. (1999): Descrevem as características e o funcionamento de um refrigerador solar adsorativo, usando o par carvão ativado e metanol. Utiliza um condensador refrigerado a ar, daqueles que são usados em ciclos de compressão de vapor. A finalidade principal do trabalho é comparar a eficiência do sistema operando com três tipos de carvão produzidos localmente através da empresa chinesa Xiao Yi Activated Carbon Industry, respectivamente denominados CHK-3, CJK-2, ZX-5. Baseado nos experimentos realizados, o carvão CHK-3 é considerado o melhor, mas não são apresentadas as propriedades desse carvão.

- **Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong.**

7-Boubakri, A., et al., (2000): Resultados experimentais e de simulações de um novo tipo de refrigerador solar adsorativo testado em Agadir, Marrocos, são apresentados. São construídas e testadas duas unidades denominadas MS e MEAR, ambas usando o par carvão ativado-metanol. O protótipo denominado MEAR utiliza um anteparo de radiação, posicionado entre o adsorvedor e o condensador. O resultado dos testes são apresentados em várias curvas de variação das propriedades ao longo do tempo e foi possível identificar o comportamento dos coeficientes de transferência de calor na parte frontal e na base do componente adsorvedor/condensador. Em um apêndice são apresentados o equacionamento matemático do refrigerador e o fluxograma de blocos do programa computacional usado na simulação.

- **ERBEM, Institut Universitaire de Technologie, Rue de la Raperie, 93290 Tremblay, France.**
- **CNRS-LIMSI, BP 133, 91403 Orsay Cedex, France.**
- **CNAM-IFFI, 292, Rue St Martin, 75141 Paris Cedex, France**

8-Anyanwu, E. E., et al., (2001): Apresentam a simulação numérica de um refrigerador solar adsorativo que usa o par carvão ativado-metanol. Apresentam também várias hipóteses simplificadoras para facilitar a elaboração do programa computacional. Os resultados numéricos obtidos foram usados para dimensionar um protótipo na cidade de Nsukka, Nigéria.

- **Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology, P.M.B. 1526, Owerri, Imo State, Nigeria**

9-Dieng, A. O., Wang, R. Z. (2001): Esse trabalho apresenta uma revisão atualizada, consistente e didática sobre ciclos de adsorção aplicados à refrigeração, ar condicionado e bombas de calor. Apresenta os principais trabalhos já publicados e discute as alternativas tecnológicas disponíveis, com enfoque nos sistemas de refrigeração usados para fabricação de gelo. Tem um amplo estudo sobre a utilização do metanol como refrigerante nesses ciclos, chamando a atenção para sua incompatibilidade com o cobre e sua ação fortemente corrosiva sobre o alumínio. Isto justifica a utilização dos aços inox em ciclos onde o metanol é o adsorbato o que infelizmente contribui para elevar o custo de fabricação do equipamento, uma vez que o custo desse aço especial ainda é comparativamente alto.

- **Institute of refrigeration and cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, People's Republic of China.**

10-Li, M., Wang, R. Z. (2002): Avaliam a importância de vários parâmetros construtivos e meteorológicos que contribuem para aumentar o desempenho de um refrigerador solar adsorativo. Os principais parâmetros construtivos no adsorvedor-coletor solar são: uso de aletas, efeito da resistência térmica de contato, efeito da condutividade térmica do adsorvente, efeito da densidade do adsorvente, efeito do número de coberturas de vidro do coletor e do uso de superfície seletiva. Os parâmetros meteorológicos avaliados foram os seguintes: efeito da intensidade da radiação solar incidente, efeito da temperatura do condensador e efeito da temperatura do evaporador. Conclui que a performance do refrigerador solar pode ser conseguida com aumento na densidade de empacotamento do adsorvente, a utilização de coberturas de vidro duplo, usar tinta seletiva, bem como o uso de aletas para melhorar a transferência de calor.

- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030, People's Republic of China**

11-Li, M., et al., (2002): Nesse trabalho é avaliado o comportamento de um coletor solar desenvolvido para funcionar como adsorvedor em um sistema de refrigeração solar adsortivo para produzir gelo. Os testes do coletor solar são realizados com uso de um aquecedor térmico que utiliza lâmpadas de quartzo. Os resultados obtidos comprovam prioritariamente a não uniformidade da transferência de calor no leito adsortivo e que é possível usar energia solar para aplicações em sistemas de refrigeração, desde que algumas especificidades sejam consideradas no projeto dos componentes principais (coletor, condensador e evaporador).

- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, People's Republic of China.**

12-Anyanwu, E. E., Ezekwe, C. I. (2003): Apresentam os resultados dos testes do protótipo, ao qual se refere o trabalho anterior (Anyanwu, E. E., et al., 2001). Trata-se, portanto, de um protótipo construído para testes, cujos resultados servirão para aperfeiçoar e validar o programa computacional em desenvolvimento. A finalidade desse refrigerador é produzir temperaturas no evaporador na faixa de 4 a 16°C para conservação de frutas, vegetais e vacinas. Suas principais características são a área do adsorvedor-coletor solar de 1,2 m², condensador a água com tubos de aço, evaporador com tubos de cobre, massa de água no evaporador 3 kg e o carvão ativado usado é o AC-35. Os resultados obtidos foram: variação de temperatura entre a adsorção e a dessorção de 18,5 a 34°C, quantidade máxima de energia retirada no evaporador de 266,8 kJ m⁻², temperatura máxima de regeneração de 100°C, temperatura média de condensação de 35°C, duração do período de dessorção de 6 h, período de adsorção de 12 h, temperatura mínima do metanol no evaporador -10°C, temperatura mínima do gelo de -5°C, massa de carvão ativado 60 kg e coeficiente de performance global de 0,11. O sistema se comportou como previsto na simulação dinâmica.

- **Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology, P.M.B 1526, Owerri, Nigeria.**

- **Department of Mechanical Engineering, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria.**

13-Boubakri, A. (2003): Apresenta as características construtivas de um novo refrigerador solar adsorativo, com a finalidade de produzir gelo, que utiliza o par carvão ativado-metanol. Nessa máquina, um condensador a ar é acoplado ao adsorvedor e venezianas são implementadas na parte lateral do adsorvedor, as quais são abertas no período noturno para aumentar a eficiência do processo de adsorção: graças à essa inovação, foi verificado um aumento de cerca de 10% no rendimento dessa etapa. Muitas referências bibliográficas são apresentadas, quase todas contempladas nessa tese.

- **Institute Universitaire de Technologie, Rue de la Raperie, Tremblay 93290, France.**

14-Buchter, F., et al., (2003): Apresentam as características e os testes de um protótipo construído e testado em Burkina-Faso. Comparam os resultados obtidos com os de uma máquina construída pela empresa BLM, anteriormente testada na mesma localidade. As principais características do protótipo testado são apresentadas, destacando-se o uso de superfície seletiva (Maxorb) no adsorvedor que utiliza 40 kg de carvão ativado do tipo 40, fabricado pela empresa CECA e metanol como adsorbato. Os principais resultados dos testes são apresentados através de uma comparação entre o ciclo realmente obtido com o ciclo teórico e também são apresentadas as curvas representativas dos testes, que obtêm COP entre 0,9 e 0,13 para uma quantidade de energia solar incidente variando entre 19 e 25 MJ m⁻².

- **EIVD, 1 Route de Cheseaux, CH-1400 Yverdon-les-Bains, Switzerland.**
- **CNRS-LIMSI, BP 133, F-91403 Orsay cedex, France.**

15-Li, M., Wang, R.Z. (2003): Neste trabalho é apresentada a simulação numérica de um refrigerador solar adsorativo de coletor solar plano e que utiliza o par carvão ativado-metanol. Este modelo computacional analisa a transferência de calor e massa no leito

adsortivo com a finalidade de otimizar um sistema de refrigeração solar adsortivo construído e diversas vezes testado no Instituto de Refrigeração e Criogenia da Universidade Shanghai Jiaotong, em Shanghai. A radiação solar nos testes experimentais foi simulada com lâmpadas de quartzo. Os resultados experimentais serviram para validar o modelo e os resultados calculados estão em boa concordância com os experimentos. A massa de gelo produzida experimental foi de 7,8 kg e a simulada foi de 8 kg, enquanto o COP experimental foi de 0,132 e o simulado de 0,125.

- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, People's Republic of China.**

16-Anyanwu, E. E. (2003): Este é o primeiro de dois trabalhos desenvolvidos com o título Review of solid adsorption solar refrigerator. Neste primeiro, Anyanwu apresenta os ciclos de refrigeração onde são apresentadas as características e as principais vantagens e desvantagens comparativas decorrentes da utilização dos principais fluidos refrigerantes, como a água, os clorofluorcarbonos, a amônia e os álcoois. Recomenda estudos técnicos com novos pares adsortivos e de ciclos com recuperação de calor como alternativa para baixar custos e tornar as máquinas de refrigeração adsortivas competitivas comercialmente. Apresenta também dados que qualificam a área de conservação de vacinas em regiões remotas como sendo a de maior potencial para se empregar os refrigeradores adsortivos em desenvolvimento, finalmente, apresenta uma relação de empresas que já produzem comercialmente refrigeradores adsortivos e fotovoltaicos no mundo.

- **Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology, P.M.B. 1526, Owerri, Imo State, Nigeria**

17-Anyanwu, E. E. (2004): Este é o segundo artigo de uma série de dois trabalhos de uma revisão sobre refrigeradores solar por adsorção sólida. Nesse artigo, os princípios e teorias da adsorção sólida são apresentados bem como a performance de vários ciclos de adsorção solar. O COP é utilizado como critério para seleção de pares adsorvente/adsorbato. A

realização prática de sistemas de refrigeração adsorptivos é classificada por categorias de acordo com as faixas de pressão de operação do adsorbato como sistemas de baixa ou alta pressão e as mais pertinentes características de construção são descritas. São apresentados modelos de equilíbrio de adsorção em acordo com as propriedades de adsorção dos pares adsorvente/adsorbato e agem como equações de estado em modelos analíticos da máquina citadas.

- **Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology, PMB 1526, Owerri, Imo State, Nigeria.**

18-Andrade, R.R.D. (2004): Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. O protótipo de refrigerador solar adsorptivo instalado no LES/UFPB é constituído por três componentes básicos, o adsorvedor-coletor solar, o condensador e o evaporador. Este estudo se concentrou no adsorvedor-coletor solar, que é o principal componente do sistema, pois é o responsável pela circulação do fluido refrigerante. Foi realizada uma avaliação teórico-experimental do ciclo termodinâmico do adsorvedor, que tem configuração multitubular. A esse adsorvedor foram acopladas coberturas de material isolante transparente (MIT) e refletores de perfil semi-cilindrico. A partir de medições de temperatura em vários componentes do adsorvedor-coletor solar, foram determinados os rendimentos térmicos horários, obtendo-se um valor médio de cerca de 65% para um dia de céu predominantemente limpo.

- **Laboratório de Energia solar, Departamento de Engenharia mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba.**

19-Grilo, M. B. (2004): Tese de doutorado em Engenharia Mecânica desenvolvida no LES que trata do dimensionamento, desenvolvimento e funcionamento protótipo de refrigerador solar para fabricação de gelo baseado em adsorção de par carvão ativado-metanol. Ciclos experimentais foram obtidos em testes com condições meteorológicas diferentes, especialmente relativo ao grau de cobertura das nuvens. O sistema foi testado na cidade de

João Pessoa (7°8'S, 34°50'WG), durante o período de outubro-dezembro 2003. Durante um dia típico de céu claro, a temperatura de regeneração alcançou facilmente 100°C, a massa de metanol condensada foi de 3 kg, e a máquina produziu 6 kg de gelo a uma temperatura de -3,3°C, para uma irradiação solar diária incidente no plano de captação de 23,7 MJ m⁻². O coeficiente de performance solar líquido (COP) para esse ciclo foi de 0.085. Os resultados obtidos são comparados com os de protótipos testados em Paris (França), em Monastir (Tunísia) e em Agadir (Marrocos), usando o mesmo par adsorativo.

- **Laboratório de Energia solar, Departamento de Engenharia mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.**

20-Khattab, N. M. (2004): Apresenta a descrição e operação de um módulo de refrigerador solar adsorativo de baixo custo construído no Centro Nacional de Pesquisa do Cairo, Egito, que utiliza como par adsorativo um tipo de carvão produzido neste centro e metanol. O módulo é formado por um tubo de vidro modificado de espessura 0,003 m. Constituindo o leito adsorativo encontra-se 0,6 kg de carvão granulado misturados a 0,2 kg de pequenos pedaços de aço, utilizados para melhorar a condutividade térmica do carvão. O condensador é um tubo de vidro de 0,5 m de comprimento e 0,015 m de diâmetro. O evaporador é um cilindro de vidro com 0,05 m de diâmetro e contendo 0,2 kg de metanol. O módulo foi testado com diferentes configurações de refletores acoplados ao adsorvedor, sendo cada refletor plano construído de madeira e coberto com uma de chapa de alumínio. O leito adsorativo chegou a atingir uma temperatura máxima de 120°C durante o inverno e de 133°C no verão. A produção diária de gelo foi de 6,9 e 9,4 kg m⁻² e o COP solar líquido de 0,136 e 0,159 para as duas épocas do ano.

- **Solar Energy Department, National Research Center, El-Behoth (Tahrir) street, Cairo, Egypt.**

21-Li, M., et al. (2004): O trabalho traz um estudo de um refrigerador solar adsorativo que utiliza o adsorvente carvão ativado e como adsorbato utiliza o metanol e o etanol. O coletor

solar é plano e possui uma área de $0,94 \text{ m}^2$. A radiação solar é simulada a partir de lâmpadas de quartzo. Os resultados experimentais mostram que o efeito refrigerante com o par carvão ativado/metanol é superior ao efeito produzido pelo par carvão ativado/etanol. A performance do refrigerador adsorptivo utilizando o metanol é aproximadamente 3/4 vezes mais alto que quando utilizando o etanol como fluido refrigerante.

- **School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650092, People's Republic of China.**
- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, People's Republic of China.**

22-Li, M., Sun, C.J. et al. (2004): Neste trabalho um fabricante de gelo sem válvulas e sem partes móveis é apresentado. O protótipo é formado por um adsorvedor-coletor solar plano, por um condensador a ar aletado e um evaporador formado por uma série de células trapezoidais, constituindo uma área de troca de $0,28 \text{ m}^2$. O par adsorptivo utilizado é carvão ativado-metanol e os resultados experimentais indicam uma boa performance do sistema em funcionamento, alcançando uma produção de 6 a 7 kg de gelo em condições de laboratório, quando a energia radiativa foi cerca de 17 a 20 MJ m^{-2} . Nestas condições o COP deste sistema foi de 0,13 a 0,15. Os resultados do sistema testado ao ar livre demonstraram uma produção de gelo de 4 kg e um COP de 0,12 para uma insolação recebida pelo coletor de 16-18 MJ m^{-2} .

- **School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650092, People's Republic of China.**
- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, People's Republic of China**

23-Oliveira, R. G. (2004): Tese de doutorado em Engenharia de Alimentos pela Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, Campinas, São Paulo. É construído um protótipo de sistema de refrigeração por adsorção para produção de gelo que utiliza

diferentes fontes de calor para regenerar o adsorvente. O par adsortivo escolhido foi o carvão ativado/amônia. O sistema frigorífico foi modelado numericamente e a simulação em diferentes condições de operação e de projeto do sistema mostrou que a utilização do ciclo em duplo estágio com recuperação de vapor de refrigerante produz maior potência de refrigeração útil e COP do que a utilização dos demais ciclos. Construiu-se o protótipo do sistema modelado que utiliza como fonte de energia o vapor de fluido térmico produzido em uma caldeira elétrica. Utilizando-se o ciclo em duplo estágio com recuperação de vapor de refrigerante e temperatura de geração de 85 °C, é possível produzir cerca de 48 kg de gelo por dia, se a fonte de energia for apenas a caldeira. Caso o protótipo utilizasse a radiação solar como fonte energética, a produção de gelo seria de até 6,7 kg.

- **Laboratório de Automação e Controle de Processos de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia de alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.**

24-Afonso, M. R. A., Silveira Jr., V. (2005): Os autores desenvolveram um pequeno protótipo de refrigerador adsorativo e mensuraram a temperatura e a pressão para diferentes massas de água no adsorvente (silica gel). Eles comprovaram que os dados experimentais estavam harmônicos com a equação de Dubinin-Astakhov (dados com coeficiente de regressão, $R^2=0,991$) e com a equação de Freundlich (dados com coeficiente de regressão, $R^2=0,993$).

- **Faculdade de Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.**

25-Anyanwu, E.E., Ogueke, N.V. (2005): Os autores apresentam um procedimento termodinâmico para a análise de sistemas de refrigeração por adsorção sólida. Aplica-se a primeira e segunda leis da termodinâmica para determinação de dois parâmetros de performance que são usados para a obtenção de uma relação da eficiência termodinâmica de sistemas que operam com os pares adsorativos carvão ativado/metanol, carvão

ativado/amônia e zeólita/água. Os resultados obtidos mostram que para a produção de gelo o par carvão ativado/amônia é preferível que o par carvão ativado/metanol, com os máximos COP solar líquido possível determinados de 0,19 e 0,16, respectivamente. Em todos os casos o sistema utiliza um coletor solar plano e foi verificada uma forte dependência das temperaturas de adsorção e condensação.

- **Mechanical Engineering Department, Federal University of Technology, P.M.B. 1526, Owerri, Imo State, Nigeria.**

26-Ceballos, C. M., et al. (2005): os autores realizaram uma montagem experimental de pequeno porte de um sistema de refrigeração por adsorção, utilizando o par carvão ativado-metanol. Coletaram os dados de temperatura, pressão e concentração de metanol no carvão ativado durante a dessorção. Os testes possibilitaram o levantamento das curvas denominadas isósteras. Obtiveram a correlação Dubinin-Radushkevich para o par trabalhado e cujo coeficiente de correlação foi $R^2 = 0,9998$. Foi possível calcular, também, o coeficiente de afinidade, D, do referido par.

- **Instituto de Energia, Faculdade de Minas, Universidade Nacional de Colômbia, Medellin Cr. 80 N 65-223. Medellin.**

27-Lemmini, F., Errougani, A. (2005): Neste artigo os autores apresentam o refrigerador solar adsortivo que utiliza o par carvão ativado AC35/metanol, construído e testado no laboratório solar da Faculdade de Ciências de Rabat, Marrocos. O coletor solar é plano, construído em cobre, com uma capacidade de armazenamento de 14,5 kg de carvão ativado e com área de $0,7225 \text{ m}^2$. No seu interior possui aletas retangulares que auxiliam na condução do calor. O condensador e o evaporador também são construídos em cobre. O condensador utilizado é a ar, possui uma área de troca de calor de $7,5 \text{ m}^2$ e tem um volume de 2,8 litros. O evaporador tem uma área de troca de calor de $0,61 \text{ m}^2$. Resultados de vários testes são apresentados para os dias mais diversos. A temperatura mais baixa alcançada no evaporador foi de $-5,6 \text{ }^\circ\text{C}$, para uma irradiação diária de 27.308 MJ/m^2 . O COP solar

encontrado ficou entre 0,043, num dia de chuva com intervalos de sol, e 0,078, para um dia de céu limpo.

- **Laboratoire d’Energie Solaire, Université Md V, Faculté des Sciences, Rabat B.P. 1014, Morocco.**

28-Wang, R.Z.; Oliveira, R.G. (2005): Este trabalho apresentado na International Sorption Heat Pump Conference 2005, traz uma revisão sobre protótipos de refrigeração por adsorção obtidos desde o término dos anos setenta. As aplicações incluem fabricantes de gelo e ar condicionado. Os protótipos apresentados são construídos para utilizar energia solar ou calor de rejeito como fontes principais de calor. A tecnologia atual de refrigeração solar por adsorção permite uma produção de gelo diária de entre 4 e 7 kg m⁻² de coletor solar com um COP solar entre 0.10 e 0.15.

- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030, People’s Republic of China.**

29-Wang, S.G., et al. (2005): Este trabalho traz uma revisão de literatura sobre o progresso recente dos adsorventes consolidados na utilização em sistemas adsortivos. Um número considerável de tecnologias de adsorventes é discutida.

- **School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China.**
- **Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University 1954 Huanshan Road, Shanghai 200030, China.**

30-Khattab, N.M. (2006): Um modelo matemático é desenvolvido para simular e otimizar a performance de um módulo de refrigerador solar adsortivo que utiliza o par carvão ativado -metanol. O módulo é o mesmo do trabalho já mencionado (KHATTAB, 2004), e é

mais uma referência de um refrigerador solar adsorativo que utiliza um concentrador solar para aumentar a captação de energia solar pelo coletor solar, especialmente em clima frios. Este aumento varia de 10% para clima quente para 30% para clima frio. Pequenos pedaços de aço são misturados ao carvão granulado para melhorar a condutividade térmica do carvão, numa proporção de 1:3. É encontrado que a dessorção aumenta em 3% para meses quentes e cerca de 19% para os meses mais frios. A produção de gelo foi otimizada passando a 0,25 kg/dia, para um COP de 0,1558.

- **Solar Energy Department, National Research Center, El-Behoth (Tahrir) street, Cairo, Egypt.**

31-Alghoul, M.A., et al. (2007): Traz uma revisão sobre as diversas finalidades dos sistemas solares adsorativos, que podem ser utilizados como refrigeradores ou como aquecedores de água. Dividido basicamente em duas partes, a primeira apresenta uma revisão sobre os principais tipos de adsorventes e adsorbatos, descrevendo a escolha desses pares, e ainda descrevendo os leitos adsorvedores utilizados. A segunda parte traz uma revisão sobre a tecnologia de refrigeração solar adsorativa. Destaca os refrigeradores que utilizam o par carvão ativado-metanol.

Physics Department/Institute of Advanced Technology, University Putra Malaysia 43400 Serdang, Selangor, Malaysia.

32-Anyanwu, E.E., Ogueke, N.V. (2007): Neste trabalho é apresentada uma análise transiente de um refrigerador solar adsorativo que utiliza o par carvão ativado-metanol. O modelo numérico é desenvolvido em elementos finitos e se baseia nas equações de transferência de calor e massa no leito adsorativo, transferência de calor no coletor solar multitubular, e na termodinâmica do processo adsorativo. O COP calculado foi 9% do valor medido.

- **Mechanical Engineering Department, Federal University of Technology, P.M.B. 1526, Owerri, Nigeria.**

33-Gonzalez, M.; Rodriguez, L.R. (2007): O trabalho versa sobre um sistema de refrigeração solar adsorativo com concentradores solar do tipo (CPC). O protótipo trabalha com o par carvão ativado-metanol e a superfície absorvedora de radiação solar é parcialmente exposta. A outra porção é isolada no período de aquecimento e fica exposta no período de resfriamento. As características geométricas do CPC proposto, bem como do protótipo são apresentadas. O sistema foi testado no verão de 2005, na cidade de Burgos, Espanha, e apresentou um COP solar entre 0,078 e 0,096.

- **Departamento de Física, Universidad de Burgos, Avda. Cantabria s/n, 09006 Burgos, Spain.**

34-Leite, A.P.F., et al. (2007): Publicação que apresenta os resultados do protótipo de um refrigerador solar adsorativo instalado no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal da Paraíba, LES/UFPB. O par adsorativo utilizado é o carvão ativado-metanol. O adsorvedor-coletor solar é de configuração multitubular. Ele possui coberturas de material isolante transparente e concentradores cilíndricos acoplados. O evaporador também tem configuração multitubular. O condensador utiliza água. Para um dia de céu claro, a produção de gelo foi de $6,05 \text{ kg m}^{-2}$, o que implica em um COP solar de 0,085.

- **Solar Energy Laboratory, Federal University of Paraiba, 58051-900, João Pessoa, PB, Brazil.**
- **Laboratoire du Froid, Conservatoire National des Arts et Métiers, 75141, Paris Cedex 03, France.**

35-Lemmini, F., Errougani, A. (2007): Apresentam um refrigerador adsorativo que utiliza o par carvão ativado AC35-metanol. O refrigerador foi construído e testado no laboratório solar da Faculdade de Ciências de Rabat, na capital do Marrocos. Os resultados mostram que o refrigerador teve um bom desempenho em Rabat, que apresenta um clima mediterrâneo. A unidade produziu frio até mesmo em dias nublados e chuvosos e as

temperaturas alcançadas pelo coletor solar-adsorvedor chegaram a 111°C em dias com uma irradiação muito alta. O COP ficou entre 5 e 8% para uma irradiação entre 12.000 e 28.000 kJ m⁻² e para temperaturas ambiente média de 20 °C.

- **Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Laboratoire d’Energie Solaire B.P. 1014, Rabat, Morocco.**

36-Lima, A.A., et al. (2007): Trabalho da Universidade estadual de Feira de Santana (UEFS) em conjunto com a Universidade Federal da Bahia (UFBA), e que apresenta um protótipo de geladeira solar adsorviva utilizando o par carvão ativado-metanol. O adsorvedor-coletor solar é composto por dois tubos de cobre preenchidos com 1 kg de carvão ativado. O condensador é constituído por um tubo de cobre com 34 aletas e o evaporador também é formado por um tubo de cobre de mesma dimensão do tubo do adsorvedor e encontra-se encerrado em uma caixa de isopor. O COP do protótipo é de 0,015, e, segundo os autores, pode ser melhorado aumentando-se a área eficaz do condensador.

- **Instituto de Física, Departamento de Física Geral da Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.**
- **Laboratório de Física, Departamento de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Bahia, Brasil.**

A Tabela 2.1 apresenta a relação dos trabalhos consultados, correlacionando-os com o país onde as pesquisas foram desenvolvidas.

Tabela 2.1 Relação dos trabalhos consultados e países onde se desenvolveram as pesquisas.

PAÍS	TRABALHOS	TOTAL
Austrália	Hu, E. J. (1998)	01
Brasil	Vodianitskaia, P. J. (1984) Andrade, R.R.D. (2004) Grilo, M. B. (2004) Oliveira, R. G. (2004) Afonso, M. R. A., Silveira Jr., V. (2005)	07

	Leite, A.P.F., <i>et al.</i> (2007)	
	Lima, A.A., <i>et al.</i> (2007)	
Colômbia	Ceballos, C. M., <i>et al.</i> (2005)	01
Egito	Khattab, N. M. (2004) Khattab, N.M. (2006)	02
Espanha	Gonzalez, M.; Rodriguez, L.R. (2007)	01
França	Boubakri, A., <i>et al.</i>, (2000) Boubakri, A. (2003) Buchter, F., <i>et al.</i>, (2003) Leite, A.P.F., <i>et al.</i> (2007)	04
Hong Kong	Sumathy, K., Zhongfu, L. (1999)	01
Inglaterra	Critoph, R. E. <i>et al.</i>, (1997)	01
Itália	Restuccia, G., Cacciola, G. (1999)	01
Malásia	Alghoul, M.A., <i>et al.</i> (2007)	01
Marrocos	Lemmini, F., Errougani, A. (2005) Lemmini, F., Errougani, A. (2007)	02
Nigéria	Anyanwu, E. E., <i>et al.</i>, (2001) Anyanwu, E. E., Ezekwe, C. I. (2003) Anyanwu, E. E. (2003) Anyanwu, E. E. (2004) Anyanwu, E.E., Ogueke, N.V. (2005) Anyanwu, E.E., Ogueke, N.V. (2007)	06
Suiça	Buchter, F., <i>et al.</i>, (2003)	01
Rep. Popular da China	Teng, Y. <i>et al.</i>, (1997) Dieng, A. O., Wang, R. Z. (2001) Li, M., Wang, R. Z. (2002) Li, M., <i>et al.</i>, (2002) Li, M., Wang, R.Z. (2003) Li, M., Huang, H.B., <i>et al.</i> (2004) Li, M., Sun, C.J. <i>et al.</i> (2004) Wang, R.Z.; Oliveira, R.G. (2005) Wang, S.G., <i>et al.</i> (2005)	09
Zimbabwe	Critoph, R. E. <i>et al.</i>, (1997)	01

A Figura 2.3 apresenta o gráfico que relaciona os países onde foram realizadas as pesquisas e a quantidade de trabalhos pesquisados. Já a Figura 2.4 apresenta o gráfico que relaciona o ano de publicação e a quantidade de trabalhos pesquisados.

A Tabela 2.2 apresenta os dados mais relevantes coletados da revisão da literatura.

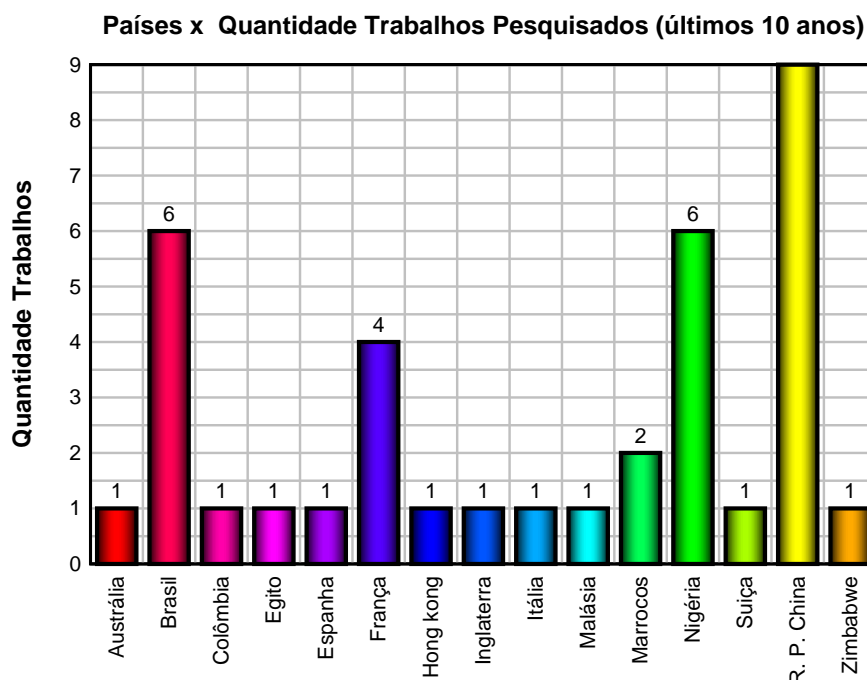


Figura 2.3 Gráfico que relaciona os países onde foram realizadas as pesquisas e a quantidade de trabalhos pesquisados.

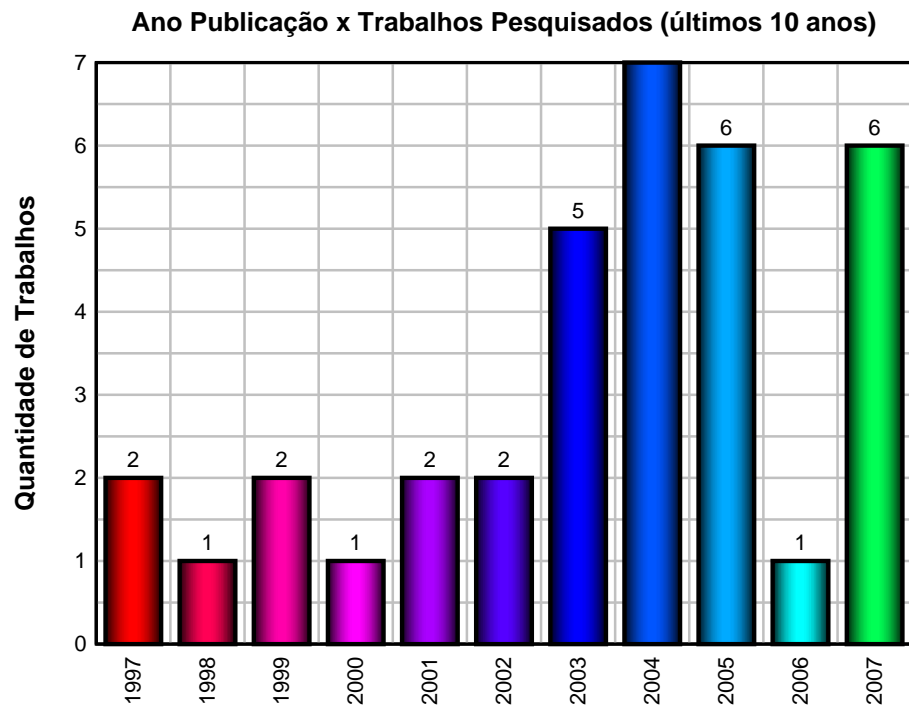


Figura 2.4 Gráfico do ano de publicação versus a quantidade de trabalhos pesquisados.

Tabela 2.2 Dados relevantes coletados da revisão da literatura

Trabalho	Simulação Numérica	Simulação + Validação	Aplica-ção Real	Par adsorativo	COP	Medição Massa Metanol adsorvida
Critoph, R. E. <i>et al.</i>, 1997	----	X	-----	CA-Amônia	0,061/0,065/0,071	Recipiente+sonda capacitiva
Teng, Y. <i>et al.</i>, 1997	X	-----	-----	CA-Metanol	0,60 e 0,80	-----
Hu, E. J. 1998	----	X	-----	CA-Metanol	-----	Recipiente de vidro
Restuccia, G., Cacciola, G., 1999	X	validado em trabalho anterior	-----	CA-Metanol	Ar condicionado 0,52 a 0,59. Bomba de calor 1,52 a 1,547	-----
Sumathy, K., Zhongfu, L. 1999	-----	-----	X	CA-Metanol	0,10 e 0,12	Estimada pela equação de Dubinin-Radushkevitch
Boubakri, A., et al., 2000	X	X	-----	CA-Metanol	0,15 até 0,36	-----
Anyanwu, E. E., <i>et al.</i>, 2001	X	-----	-----	CA-Metanol	0,018 até 0,062	-----
Li, M., Wang, R. Z., 2002	X	-----	-----	CA-Metanol	0,116/0,145/0,163	Calculada
Li, M., <i>et al.</i>, 2002	-----	X	-----	CA-Metanol	0,120 até 0,147	Recipiente de vidro
Anyanwu, E. E., Ezekwe, C. I. 2003	-----	-----	X	CA-Metanol	0,11 a 0,15	Recipiente de vidro
Boubakri, A. 2003	-----	-----	X	CA-Metanol	Estimado 0,12 (ainda não medido)	-----
Buchter, F., et al., 2003	-----	-----	X	CA-Metanol	0,087 e 0,131	Recipiente de vidro

Trabalho	Simulação Numérica	Simulação + Validação	Aplicação Real	Par adsorativo	COP	Medição Massa Metanol adsorvida
Li , M., Wang, R.Z. 2003	-----	X	-----	CA-Metanol	Simulado 0,125 Experimental 0,132	Calculada
Andrade, R.R.D. 2004	X	-----	X	CA-Metanol	0,60	Recipiente de vidro
Grilo, M. B. 2004	X	-----	X	CA-Metanol	0,60	Recipiente de vidro
Khattab, N. M. 2004	X	-----	X	CA-Metanol	0,136 e 0,159	Evaporador de Vidro Graduado
Li, M., et al. 2004	X	-----	X	CA-Metanol CA-Etanol	0,105 a 0,113 0,029 a 0,034	Calculada
Li, M., Sun, C.J. et al. 2004	-----	X	X	CA-Metanol	Lâmpada- 0,14 a 0,15 Solar- 0,12 a 0,13	Calculada
Oliveira, R. G. 2004	X	-----	X	CA-Amônia	Ciclo convenc. 0,06 Ciclo Rec. Calor 0,08 e 0,10 Ciclo duplo estágio com Rec. Calor 0,08	Visor nível no Evaporador
Afonso, M. R. A., Silveira Jr., V. 2005	-----	X	-----	Silica gel-água	-----	Recipiente de vidro

Trabalho	Simulação Numérica	Simulação + Validação	Aplicação Real	Par adsorativo	COP	Medição Massa Metanol adsorvida
Anyanwu, E.E., Ogueke, N.V. 2005	X	-----	-----	Zeólita-água CA-Amônia CA-Metanol	min= 0,29 máx= 0,30 min= 0,16 máx= 0,19 min= 0,13 máx= 0,16	Calculada
Ceballos, C. M., et al. 2005	-----	X	-----	CA-Metanol	Cálculos para ciclo ideal 0,2 a 0,59	Evaporador graduado
Lemmini, F., Errougani, A. 2005	-----	-----	X	CA-Metanol	0,043 até 0,078	Calculada
Khattab, N.M. 2006	X	-----	-----	CA-Metanol	0,146 a 0,1558	Estimada pela equação de Dubinin-Radushkevitch
Anyanwu, E.E., Ogueke, N.V. 2007	-----	validado com base aplicação real anterior	-----	CA-Metanol	Valores calculados: Dia 1=0,016 Dia2=0,0145 Dia3=0,0137	Estimada pela equação de Dubinin-Astakhov
Gonzalez, M.; Rodriguez, L.R. 2007	-----	X	X	CA-Metanol	0,078 e 0,096.	Estimada pela equação de Dubinin-Astakhov
Leite, A.P.F., et al. 2007	-----	-----	X	CA-Metanol	0,085	Recipiente graduado de vidro
Lemmini, F., Errougani, A. 2007	-----	-----	X	CA-Metanol	0,02 e 0,08	Calculada
Lima, A.A., et al. 2007	-----	X	-----	CA-Metanol	0,015	Calculada

A Figura 2.5 traz um resumo dos trabalhos apresentados neste capítulo, com relação aos índices percentuais acerca da metodologia utilizada para a medição da massa de metanol adsorvida/dessorvida durante um ciclo.

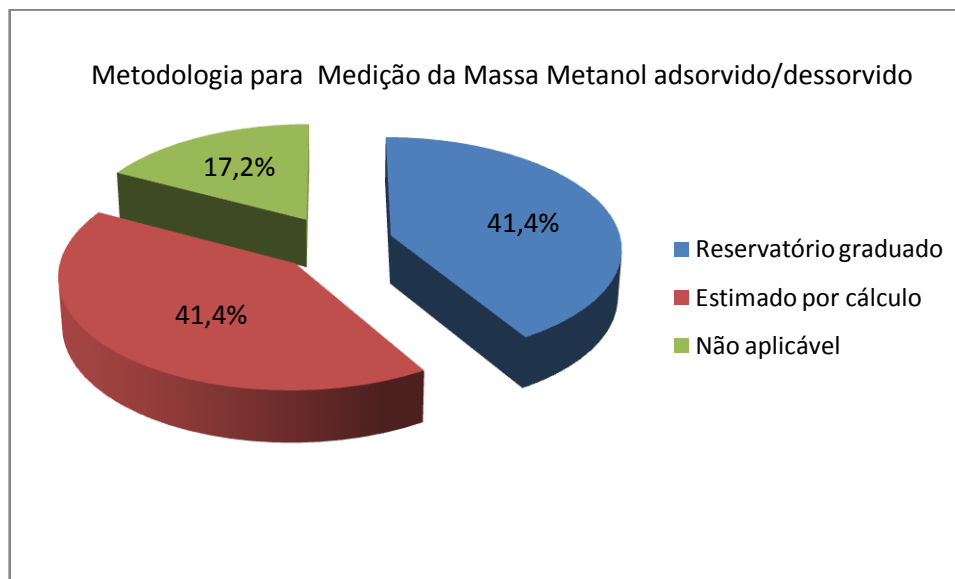


Figura 2.5 Metodologias utilizadas para a medição da massa de metanol adsorvida/dessorvida durante um ciclo.

CAPÍTULO III

PRINCÍPIOS DA ADSORÇÃO EM MICROPOROS

3.1 ADSORÇÃO EM MICROPOROS

Define-se adsorção como a capacidade que possui um corpo de reter, de forma seletiva, as moléculas de um fluido. O fenômeno da adsorção caracteriza-se pela existência de uma fase sólida denominada adsorvente e de uma fase fluida, denominada adsorvato. Não existe qualquer miscibilidade entre a fase sólida e a fase fluida.

A adsorção é na maioria dos casos um fenômeno exotérmico, desenvolvendo-se até o equilíbrio dinâmico ser atingido, obtendo-se a saturação da interface sólido-fluido e a uniformidade da concentração na fase fluida.

Quando ocorre a adsorção de um gás em um meio sólido, verifica-se a liberação de uma determinada quantidade de calor devido à condensação do fluido e a formação de uma fase adsorvida. Este calor é denominado de *calor isotérico*. A intensidade do calor liberado no processo depende do par adsorvente-adsorvato.

A regeneração da fase sólida implica na alteração do estado de equilíbrio obtido na etapa de adsorção, esta nova etapa é denominada de dessorção. A dessorção dar-se-á através de uma ação externa ao sistema, podendo ser de natureza mecânica, térmica ou química.

No que concerne a interação entre as fases sólida e fluida, a adsorção é comumente classificada como fisissorção e quimissorção. A primeira dá-se unicamente por meio de

uma força motriz de natureza física entre adsorvente e adsorvato. As moléculas no interior do sólido estão sujeitas a forças de ligação de igual carga, em todas as direções, enquanto nas moléculas da superfície, estas forças podem estar desbalanceadas. Para que haja um equilíbrio das forças de ligação nesta superfície, é necessário que uma outra molécula se ligue espontaneamente a esta superfície, ocasionando o fenômeno da fisissorção. Estas forças de ligação são chamadas de forças de Van der Waals (DAVIES e LEGROS, 1986; GUILLEMINOT et al., 1995). No fenômeno da fisissorção não são formadas novas substâncias. A fisissorção é caracterizada como um fenômeno reversível.

Na quimissorção, forças de covalência entre as moléculas do fluido e as da fase sólida estabelecem reações químicas. Há formação de novas substâncias a partir da interação química entre o adsorvente e o adsorvato. O fenômeno da quimissorção é freqüentemente um processo irreversível.

A quantidade de um dado gás adsorvido por um determinado sólido será tanto maior quanto maior for a área da interface, e depende também das variáveis pressão e temperatura. Para a descrição quantitativa do equilíbrio de adsorção teremos que relacionar n_a , quantidade de substância adsorvida no equilíbrio por unidade de massa do adsorvente (mol.g^{-1}), com pressão de equilíbrio na camada adsorvida (p) e a temperatura utilizada (T): assim temos que $n_a = f(p, T)$. Uma das alternativas para o equilíbrio da adsorção é que com a temperatura constante obtém-se uma isoterma de adsorção, $n_a = f(p)$, (ou quando a temperatura é inferior à temperatura crítica $n_a = f(p/p_s)$, em que p_s é a pressão de saturação de vapor do adsorvato). Esta é a forma usual de se representar o equilíbrio de adsorção.

O exame de numerosos resultados experimentais permite classificar as isotermas de equilíbrio de adsorção em seis tipos característicos (GREGG e SING, 1982). Cada um dos seis tipos de isoterma está associado a um determinado mecanismo de adsorção. Na Figura 3.1 apresenta-se a isoterma do tipo I (por ser esta a que mais diretamente interessa a este trabalho).

Os autores, acima citados, através de observação de isotermas experimentais do tipo I, concluem que estas caracterizam-se pela existência de um patamar, que começa a definir-se a partir de pressões relativas baixas. Correspondem ao mecanismo de adsorção

em microporos e são características de sólidos essencialmente microporosos e com áreas externas desprezíveis, como é o caso de muitos carvões ativados e zeólitas. O patamar corresponde ao enchimento completo dos microporos, portanto a altura do patamar é proporcional ao volume de microporos.

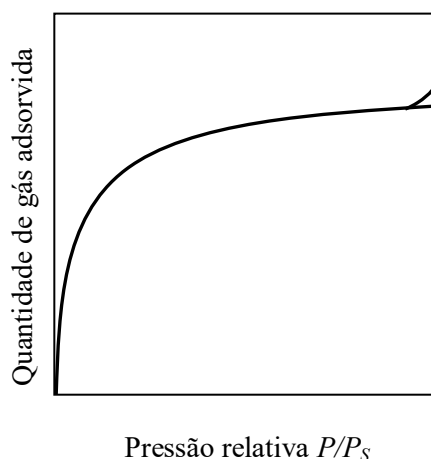


Figura 3.1. Isotherma de equilíbrio de adsorção, do tipo I (GREGG e SING, 1982).

3.1.1 O Carvão Ativado

O termo carvão ativado, num sentido mais amplo, inclui uma grande gama de materiais amorfos baseados em carvão e preparados para ter uma elevada porosidade (isto é, com cavidades, canais e interstícios, com a medida associada à profundidade maiores que à largura). Na Figura 3.2 observa-se o esquema representativo de diversos tipos de poros em um material. O poro destacado com uma seta é o tipo mais encontrado em carvões ativados.

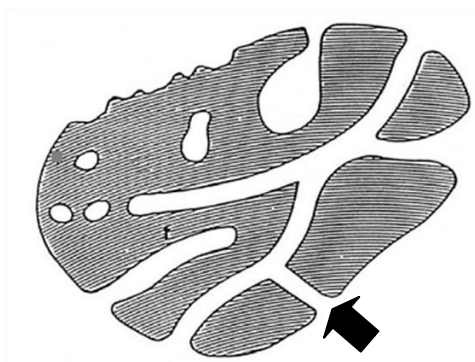


Figura 3.2. Esquema representativo da classificação de poros em um material (ROUQUEROL, 1994).

O poro indicado pela seta é classificado: (1) quanto a sua acessibilidade a um fluido externo, como um poro aberto (canal contínuo de comunicação com a superfície externa do corpo); (2) quanto a sua forma, como um poro do tipo fenda. Convém ressaltar que a descrição real de um sólido poroso não é simples, posto que podem existir diferentes formatos de poros no mesmo material (ROUQUEROL, 1994).

O carvão ativado pode ser produzido sob forma granular ou pulverizada. O granulado é caracterizado por apresentar uma ampla superfície interna, e poros de pequenas dimensões; o pulverizado possui normalmente poros de dimensões relativamente maiores e pequena superfície interna.

O objetivo da ativação é o aumento do volume de poros, assim como ampliar o número de poros que já foram produzidos durante a carbonização e a criação de adicional porosidade (PIS et al., 1998).

Carvões ativados comerciais são produzidos de materiais orgânicos ricos em carbono, como carvão vegetal, madeira, cascas, caroços, piches e coques. A escolha do precursor, ou produto, é largamente dependente da sua viabilidade, custo e pureza. Porém a aplicação do produto e o processo de manufatura são considerações importantes.

Na maior parte das utilizações de material poroso, o tamanho de poros é o mais importante. Tamanho de poros tem um significado preciso quando o formato geométrico do poro é bem conhecido ou definido. No entanto, o tamanho máximo de um poro, para a maioria dos fenômenos em que os sólidos porosos estão relacionados, é a da menor dimensão que, na ausência de outra medição mais precisa, se refere à largura de poros.

As propriedades adsorptivas do carvão ativado são essencialmente atribuídas a sua elevada área superficial, alto grau de reatividade superficial, efeito de adsorção e tamanho de poros favoráveis - o que faz com que sua área interna fique acessível - amplo grau de adsorção e força mecânica (EVERETT, 1972). Os carvões ativados mais utilizados comercialmente possuem de $800 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ a $1500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Esta área é composta principalmente de microporos, que têm diâmetros menores que 2nm. A partícula de carvão ativado é compreendida de uma complexa rede de poros que são classificados como microporos, aqueles com diâmetros menores que 2nm; mesoporos, os que têm diâmetros entre 2 e 50nm; e macroporos, que são os poros com diâmetros maiores que 50nm (IUPAC, 1985;

ROUQUEROL, 1994). Os macroporos não contribuem muito para a área superficial, mas agem como condutos para a passagem do fluido adsorvido ao interior da superfície dos mesoporos e microporos onde a adsorção ocorre com maior frequência. A distribuição do tamanho de poros depende do tipo de matéria prima e do método de manufatura do carvão.

A capacidade adsortiva aproximada de um carvão pode ser medida pela determinação experimental de isotermas de adsorção.

Os sólidos microporosos são materiais de grande interesse devido a sua alta capacidade adsorvente para praticamente qualquer tipo de gás ou líquido. Estes sólidos têm a propriedade de possuir um grande número de poros com diâmetro de abertura menores que 2 nanômetros, e conseqüentemente, possuem altas áreas superficiais específicas.

Os sólidos microporosos se caracterizam por terem uma elevada energia de superfície, devido à superposição energética que provém das paredes internas dos poros. Esta interação energética é muito maior no caso dos microporos que em qualquer outro caso de porosidade com maior diâmetro de abertura do poro. Este fenômeno de superposição energética melhora a interação do sólido microporoso com as moléculas do adsorvato, distorcendo desta forma a isoterma de adsorção, especialmente em baixas pressões relativas, aumentando o volume adsorvido.

Esta característica dá ao material microporoso propriedades particulares, pois reúne as condições primordiais para a adsorção: elevada energia de superfície devido ao fenômeno de superposição, e elevada capacidade de armazenar quantidade de adsorvente devido ao somatório do volume de todos os poros contidos no sólido.

3.2 DETERMINAÇÃO DO ESTADO TERMODINÂMICO PARA PROCESSOS DE ADSORÇÃO EM MATERIAIS MICROPOROSOS

O estado termodinâmico do leito adsortivo é função da massa adsorvida, da temperatura e da pressão. Segundo Dubinin (1967) os macroporos e os mesoporos do sólido podem ser descritos adequadamente pelas equações de Brunauer-Emmet-Teller

(Equação 3.1 e Equação 3.2), pois o adsorvato forma mono ou multicamadas na superfície do sólido.

$$W_1 = \left(\frac{W_m C (p/p_0)}{(1-p/p_0) [1+(C-1)p/p_0]} \right) \quad (3.1)$$

onde W_1 é a massa adsorvida, W_m é massa adsorvida em uma monocamada, p é a pressão de equilíbrio na camada adsorvida, p_0 é a pressão de adsorvato na temperatura utilizada, C é uma constante adimensional dada por:

$$C \approx \exp \left(\frac{E_D - E_l}{RT} \right) \quad (3.2)$$

onde E_D é a energia para a dessorção de um átomo adsorvido na superfície exposta, e E_l é a energia de dessorção para um átomo adsorvido na superfície do líquido.

Nos microporos, não há formação dessas camadas sobrepostas e sim, o preenchimento do volume destes poros. Devido à quantidade de adsorvato que pode ser adsorvida nestes microporos, eles têm papel fundamental em sistemas de refrigeração por adsorção.

Segundo Cristoph (1988), a melhor descrição do processo de adsorção de gases e vapor em adsorventes microporosos provém da teoria do potencial de Polanyi, onde o potencial de adsorção, A , pode ser representado pela equação de trabalho de compressão isotérmico.

$$A = RT_{Leito} \ln \left(\frac{P_{Sat}}{P_{Leito}} \right) \quad (3.3)$$

onde P_{Sat} é a pressão de saturação do adsorvato à temperatura do leito adsortivo; T_{Leito} , é a temperatura do leito adsortivo e P_{Leito} é a pressão no interior deste leito; R é a constante relativa aos gases ideais.

De acordo com a teoria de Dubinin-Astakhov, descrita por Huber et al. (1978), a dupla propôs uma equação para processos de adsorção em materiais microporosos com distribuição polimodal das dimensões de poro. Esta função característica, comprovada experimentalmente por Passos (1986), descreve o comportamento de um meio adsorvente durante os processos de adsorção e dessorção, apresentando a concentração da fase adsorvida em função da temperatura e pressão do meio. O volume ocupado pelo adsorvato, W , é relacionado com o volume máximo do poro, W_0 , e com o potencial de adsorção da forma apresentada na Equação 3.4:

$$W = W_0 \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \quad (3.4)$$

Onde E é a energia livre característica do par e contém implicitamente os parâmetros relativos a microporosidade do adsorvente e à afinidade do adsorvato pelo adsorvente.

Huber et al. (1978), mencionam que em adsorventes carbonáceos, n é geralmente menor que 2 e segundo Critoph (1988), este parâmetro melhora o ajuste da equação aos valores experimentais, mas não tem nenhum significado físico direto.

Substituindo a Equação 2.3 em 2.4 tem-se :

$$W = W_0 \exp \left(- \left(\frac{R}{E} \right)^n \left(T_{Leito} \ln \left(\frac{P_{Sat}}{P_{Leito}} \right) \right)^n \right) \quad (3.5)$$

Multiplicando-se ambos os lados da Equação 2.5 pela densidade do adsorvato, obtém-se:

$$X = W_0 \cdot \rho_l(T) \exp \left(- D \left(T_{Leito} \ln \left(\frac{P_{Sat}}{P_{Leito}} \right) \right)^n \right) \quad (3.6)$$

onde as constantes $\left(\frac{R}{E} \right)^n$ foram substituídas pela constante D (*coeficiente de afinidade*); X é a massa adsorvida por unidade de massa do adsorvente; W_0 é a capacidade máxima de adsorção (volume de adsorvato/massa de adsorvente); T_{Leito} é a temperatura do leito

adsorvente; P_{sat} é a pressão de saturação do adsorvato no interior do adsorvedor; n é um parâmetro característico do par adsorvente-adsorvato; e $\rho_l(T)$ é a densidade, ou massa específica, do adsorvato líquido em função de uma determinada temperatura T .

3.3 OS ADSORVENTES E ADSORVATOS UTILIZADOS NOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO

Os adsorventes utilizados podem ser divididos, segundo sua afinidade por compostos polares, em hidrofílicos e hidrofóbicos. Segundo Srivastava e Eames (1998), os adsorventes hidrofílicos apresentam maior afinidade por substâncias polares, como a água, enquanto os adsorventes hidrofóbicos apresentam maior afinidade por gases e compostos oleosos. Os adsorventes hidrofílicos mais utilizados em bombas de calor e sistemas de refrigeração são a sílica-gel e a zeólita sendo que o adsorvente hidrofóbico mais utilizado é o carvão ativado.

Os pares de adsorvente/adsorvato mais utilizados em refrigeração são os pares carvão ativado/amônia (CRITOPH, 1994; MILES e SHELTON, 1996; TAMAINOT-TELTO e CRITOPH, 1997; VASILIEV et al. 1999; OLIVEIRA, 2004), carvão ativado/metanol (VODIANITSKAIA, 1984; PASSOS, 1986; PONS e GUILLEMINOT, 1986; SILVEIRA JUNIOR, 1990; MEDINI et al., 1991; HEADLEY et al., 1994; HU, 1996; LUO e FEIDT, 1997; WANG et al., 1998; WANG et al. 1999; WANG, 2000; LI et al., 2003; GRILO, 2004; WANG e OLIVEIRA, 2005), sílica-gel/água (KLÜPPEL e GURGEL, 1988; CHUA et al., 1998) e zeólita/água (POYELLE et al., 1999). Os dois primeiros pares foram utilizados para a produção de gelo, enquanto os outros dois foram utilizados para resfriamento de água ou ar condicionado.

Devido à solidificação da água a 0°C, tanto a sílica-gel quanto a zeólita, que são adsorventes hidrofílicos e utilizam água como adsorvato, somente podem ser utilizadas em ciclos de refrigeração por adsorção onde a temperatura mínima do evaporador seja superior a 0°C.

Com relação ao par zeólita-metanol, existe a possibilidade de catálise de uma reação dissociativa do adsorvato. Pons e Guillemnot (1986) dizem que em temperaturas em

torno de 100°C a zeólita catalisa a dissociação do metanol em água e dimetil-éter, o que degrada o processo de adsorção.

Vale ressaltar, mais uma vez, que Hu (1998), comprovou que o metanol em contato com os metais cobre ou o alumínio, degradava-se (formando dimetil-éter, metoximetil-metil-éter e etanol), mesmo em temperaturas consideradas baixas (da ordem de 110°C).

Estudos demonstram que sob as mesmas condições um sistema frigorífico que utilize carvão ativado-amônia (BOUGARD e VERONIKIS, 1992) apresenta uma quantidade de massa adsorvida por unidade de massa adsorvente cerca de 2,4 vezes inferior à que seria obtida com carvão ativado-metanol.

3.4 ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM CICLO BÁSICO DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO

Um sistema básico de refrigeração por adsorção é apresentado na Figura 3.3. No reator, situado na parte central da Figura 3.3, é onde acontecem os fenômenos de dessorção e adsorção. Na parte inferior da Figura 3.3 observa-se um trocador de calor que na etapa de dessorção é utilizado como condensador e na etapa de adsorção tem a função de evaporador. Também são necessários uma fonte de calor e um módulo resfriador, os quais estão conectados ao reator. Sempre que a fonte de calor estiver ligada o módulo resfriador estará desligado e vice-versa. Além disso, são necessários tubos e outros acessórios para interligar os equipamentos do sistema.

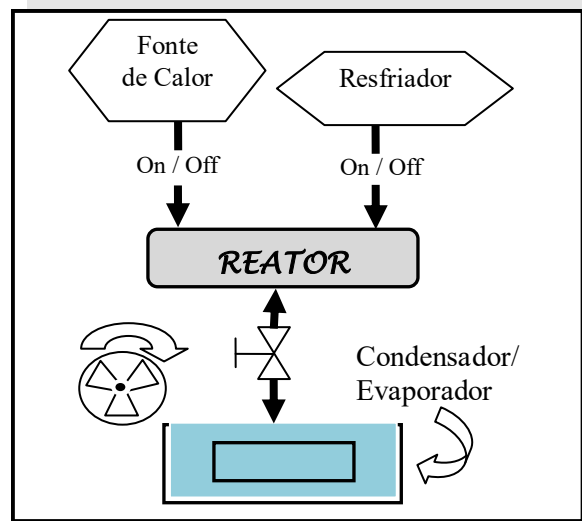


Figura 3.3. Esquema de um sistema básico de refrigeração por adsorção, utilizando um único módulo com a função ora de condensador ora de evaporador.

O processo de dessorção e adsorção, que acontece dentro do reator do sistema, é usualmente representado em um diagrama de Clapeyron, conforme a Figura 3.4. Este diagrama é baseado na equação do mesmo nome (Equação 3.7), utilizada para obtenção da pressão de saturação de um fluido em função de sua temperatura.

$$\ln(P_{sat}) = B - \frac{C}{T_{sat}} \quad (3.7)$$

No diagrama de Clapeyron da Figura 3.4, que representa um ciclo ideal de adsorção/dessorção, pode-se identificar a variação da concentração mássica de adsorvato no adsorvente em função da pressão e da temperatura no leito adsortivo. A pressão do sistema é indicada em escala logarítmica na ordenada do gráfico e a temperatura é representada na forma $-1/T$ na abscissa do mesmo.

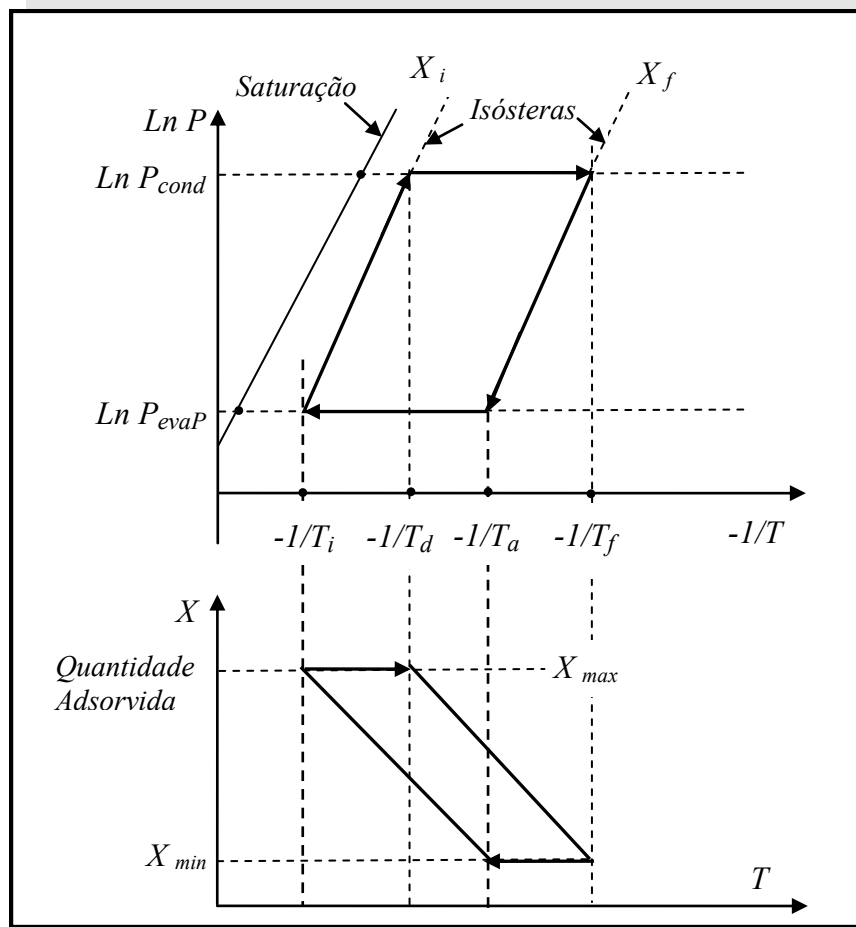


Figura 3.4. Diagrama de Clapeyron para um ciclo ideal de adsorção/dessorção.

A primeira linha diagonal à esquerda na Figura 3.4 representa as condições de equilíbrio de pressão e temperatura do adsorvato puro. Cada uma das demais linhas diagonais, denominadas de isósteras, representa uma condição na qual é constante a concentração mássica de adsorvato no adsorvente. Quanto mais próxima uma isóstera está da linha que representa a condição de saturação do adsorvato, maior é a concentração mássica do adsorvato no adsorvente. Conforme se aumenta a temperatura do leito isobaricamente, tem-se uma diminuição da concentração mássica de adsorvato no adsorvente.

Considerando-se que o reator encontra-se na condição inicial de temperatura T_i e pressão P_{evap} , o ciclo começa a partir do momento em que certa quantidade de calor passa a ser fornecida ao reator. A temperatura do reator e a pressão no seu interior aumentam e a concentração mássica de refrigerante no adsorvente se mantém constante, uma vez que o

escoamento daquele para o condensador encontra-se interrompido, pois a válvula que bloqueia este escoamento está fechada.

Quando a pressão dentro do reator atinge um valor aproximadamente igual à pressão de saturação do refrigerante à temperatura do condensador, P_{cond} , a válvula que bloqueia o escoamento de refrigerante entre o reator e o condensador é aberta. A partir deste momento a pressão do reator passa a ser aproximadamente igual à pressão de saturação do refrigerante à temperatura de condensação, isto é, as pressões no reator e no condensador tornam-se praticamente iguais.

A temperatura do reator aumenta, enquanto calor lhe é fornecido, e a concentração de refrigerante no leito adsorativo diminui, pois o calor fornecido ao reator também promove a dessorção do refrigerante (na temperatura T_d) e este passa a escoar para o condensador, trocando calor com o meio de resfriamento do condensador. De maneira mais simples, a troca de calor ocorre por convecção natural com o ar.

Ao se atingir a temperatura final de aquecimento, T_f cessa-se o aquecimento do reator e conseqüentemente o processo de dessorção. A válvula que interrompe a passagem de refrigerante entre o reator e o condensador é fechada. A massa de refrigerante dessorvida em cada ciclo é igual ao produto da massa de adsorvente contida no reator pela diferença entre a concentração inicial, X_i , e a concentração final de refrigerante, X_f .

Na próxima etapa do ciclo, o condensador assume o papel de evaporador. O reator, cuja temperatura é igual a T_f , e a pressão igual a P_{cond} , começa a ser resfriado. A temperatura e a pressão no interior do reator diminuem e a concentração mássica de refrigerante no leito adsorativo se mantém constante enquanto a válvula que bloqueia o escoamento de refrigerante entre evaporador e o reator se encontra fechada. Esta válvula é aberta quando a pressão no interior do reator se torna inferior à pressão no interior do evaporador. A partir deste momento, conforme o reator é resfriado, o leito adsorativo adsorve (na temperatura T_a) o refrigerante contido no evaporador, e este, ao vaporizar, ocasiona o efeito frigorífico.

Ao se atingir a temperatura inicial, T_i , cessa-se o resfriamento, fecha-se a válvula que permite a passagem de refrigerante entre o reator e o evaporador e pode-se iniciar um novo ciclo.

3.5 PROCESSOS CÍCLICOS DE ADSORÇÃO

Os processos cíclicos de adsorção, que utilizam leitos fixos preenchidos com adsorventes em forma de grão, são classificados com relação a regeneração, em quatro tipos: regeneração por temperatura ou Thermal Swing Adsorption (TSA), regeneração por pressão ou Pressure Swing Adsorption (PSA), regeneração por arraste com purga de gás ou Purge Gas Stripping (PGS) e regeneração por deslocamento químico ou Displacement Desorption (DD). Estes tipos de processo são descritos em detalhe por Ruthven (1984).

Os sistemas de refrigeração com leitos fixos preenchidos com adsorvente utilizam-se do processo de regeneração por temperatura. Por este motivo, neste trabalho, descreve-se apenas o processo de regeneração TSA.

3.5.1 Regeneração por temperatura

No processo de regeneração TSA o ciclo opera entre duas temperaturas diferentes. A etapa de adsorção que opera em baixas temperaturas e a etapa de dessorção que opera em altas temperaturas, ou seja, o ciclo opera entre duas isotermas diferentes. A quantidade de adsorvato acumulada no leito, em cada ciclo, é calculada pela diferença entre a quantidade adsorvida, na temperatura mais baixa, e a quantidade dessorvida, na temperatura mais alta.

O calor transferido ao leito, na etapa de dessorção, pode ser feito direta ou indiretamente. No caso da transferência direta de calor, fluidos quentes em contato direto com as partículas sólidas, passam através do leito adsorvente e o adsorvato é simultaneamente eliminado. No caso da transferência indireta de calor, o fluido de aquecimento (se este for utilizado) não está em contato direto com o sólido, sendo o aquecimento das partículas feito indiretamente através de serpentinas térmicas por onde o fluido quente circula, ou então através da utilização de resistências elétricas.

Este processo de regeneração é o indicado para espécies fortemente adsorvidas, sendo o adsorvato recuperado em alta concentração, podendo ser utilizado para gases e líquidos. Este método, segundo Ruthven (1984), não é adequado para ciclos rápidos, pois neste caso o adsorvente não estará sendo utilizado com sua máxima capacidade.

CAPÍTULO IV

CIRCUITOS ELETRÔNICOS DESENVOLVIDOS PARA O SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE

4.1 CONDICIONADOR DE SINAIS

As medidas da temperatura caracterizadas pelos melhores níveis da exatidão usam sensores da platina para traduzir o sinal térmico em um elétrico. O coeficiente térmico baixo ($\alpha = (R_{100} - R_0) / (R_0 \cdot 100^\circ\text{C}) \cong 0.385 \Omega / ^\circ\text{C}$ para uma sonda de padrão comercial) e o valor ôhmico relativamente baixo destes sensores, determinam a necessidade de medições de grande resolução para a medição da variação na resistência do sensor. Tais medidas requerem uma cuidadosa consideração das resistências adicionais originadas dos fios de ligação, dos contatos das soldas e das derivas térmicas associadas.

Para atuar com os sensores Pt-100 foi desenvolvido um circuito eletrônico condicionador de sinal (LES-TERM-05). Este circuito converte a grandeza física resistência elétrica, do Pt-100, em um sinal de tensão elétrica variante no tempo em função da temperatura. O sinal de tensão na saída do condicionador de sinal é do tipo analógico e situa-se na faixa de 0-10 volts. A Figura 4.1 mostra o circuito LES-TERM-05.

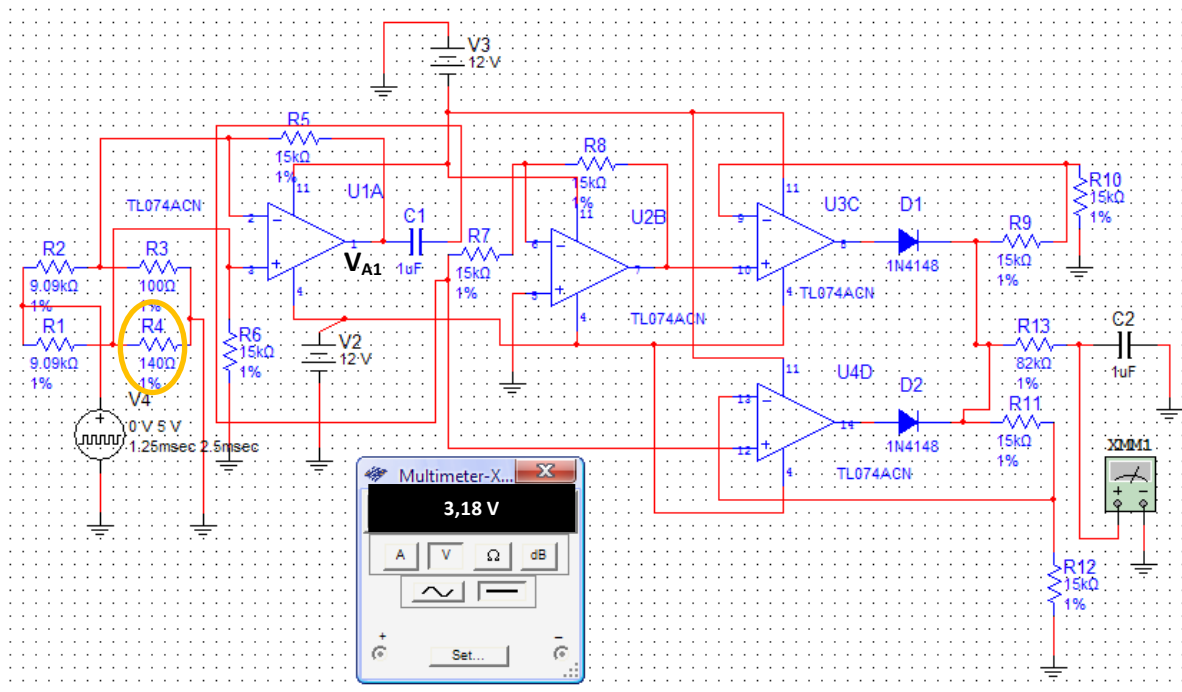


Figura 4.1 Circuito condicionador de sinais, LES-TERM-05.

O circuito eletrônico condicionador de sinais é compacto e utiliza componentes de uso comum, sem a necessidade de utilização de amplificadores operacionais de instrumentação, como em Svelto et al (2000), Muñoz et al (2005) e Anderson (1997). Os amplificadores operacionais de instrumentação são, de modo geral, circuitos integrados de difícil aquisição e de custo elevado.

O LES-TERM-05 também dispensa a aplicação de técnicas de linearização implementadas por hardware e possui auto-compensação de temperatura sem a adição de um elemento sensor.

A configuração adotada para o LES-TERM-05 define uma eletrônica de baixo ruído e com elevada imunidade às resistências de contato, o que permite medidas de temperatura com uma definição de até $0,1^{\circ}\text{C}$. Uma cuidadosa técnica de calibração do circuito permite medidas exatas da temperatura em um intervalo de -5°C até 150°C dentro da faixa de operação do sensor. A exatidão final foi limitada essencialmente pelo padrão de calibração utilizado para mensurar a temperatura.

O projeto do circuito condicionador de sinais – em circuitos utilizados em instrumentação transforma-se o sinal de corrente contínua (geralmente oriundo de baterias), em sinal alternado, com a intenção de se facilitar o processamento dos dados e se eliminar as tensões parasitas geradoras de erro acumuladas no decorrer do circuito. Para esta utilidade o LES-TERM-05 utiliza-se de um circuito integrado do tipo CMOS 555, associado a um MUX 4051, para gerar uma onda quadrada na frequência de 400 Hz com 5 V de amplitude, que alimenta o circuito ponte de Wheatstone.

Devido à baixa amplitude do sinal fornecido pelos elementos sensores da ponte, representados por R4, foi inserido no circuito o amplificador U1A da Figura 4.1. O amplificador U1A funciona como um amplificador diferencial, cujo ganho varia de acordo com o valor dos resistores R1, R2, R3, R5 e R6.

A saída do amplificador diferencial V_{A1} , ainda possui uma tensão DC oriunda do chaveamento do multiplexador, além da tensão off-set gerada pelo amplificador. Com o intuito de fornecer um desacoplamento DC, foi utilizado um capacitor em série com o circuito. Na tensão de saída do capacitor se apresenta um divisor de corrente, que por um lado passa por um circuito inversor e em seguida por um circuito retificador.

Os diodos dos circuitos retificadores impedem a passagem de corrente no sentido negativo. A combinação do sinal proveniente das saídas do circuito inversor-retificador e do circuito retificador, fornecem uma tensão constante sempre que $R_7 = R_8$.

Para tratar o sinal de saída utilizou-se um filtro passa-baixas do tipo RC em série. Assim, obtém-se na saída do circuito um sinal constante, para cada variação de resistência sofrida pelo termorresistor, e ao mesmo tempo, linear com relação ao sinal de entrada. Ou seja, o circuito modula um sinal em amplitude a partir de uma portadora e em seguida demodula o sinal, fornecendo em seus terminais uma tensão proporcional ao sinal de entrada.

A integral das saídas dos conversores de sinal alternado para contínuo (baseados em U_3 e U_4) tenderá a evitar o efeito da deriva térmica do amplificador de alto ganho denominado U_1 . Este resultado é a integral da variação do sinal alternado, compensando o valor contínuo.

Pode-se dizer então, que:

$$\Delta R = \alpha \Delta V_S$$

Onde α é a constante de proporcionalidade do circuito de transdução eletrônica e ΔV_S é a variação de tensão na saída do circuito.

Para realização de testes de desempenho com o circuito, foram feitas diversas simulações computacionais e testes experimentais, que permitem avaliar a performance do circuito para aplicações em sensores resistivos, mostrando alta imunidade a ruído e linearidade.

Considerações sobre as simulações computacionais do condicionador de sinais – a utilização de um sistema computacional para análise de circuitos eletrônicos representa uma vantagem sob o ponto de vista da avaliação de desempenho do mesmo.

Para o circuito eletrônico do condicionador de sinal do Pt-100, foi realizada uma simulação para pequenos sinais AC. Nesta simulação foi adotada a configuração $\frac{1}{4}$ de ponte (somente um dos quatro resistores da ponte de Wheatstone, na entrada do circuito, sofre variação). O resistor variado foi o resistor R_4 da Figura 4.1. A variação da resistência de R_4 , simula a variação da resistência do PT-100 o que ocasionará na saída uma tensão V_S proporcional. Os amplificadores operacionais para a simulação são TL074, um gerador de onda quadrada de 400Hz, demais componentes passivos são os descritos na Figura 4.1 exceto os listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valor dos resistores para simulação.

RESISTORES						
	R1 (K Ω)	R2 (K Ω)	R3 (K Ω)	R4 (K Ω)	R5 (K Ω)	R6 (K Ω)
Simulação1	100	100	0,12	0,12	50	50
Simulação2	150	150	5	5	530	530

Os gráficos das Figuras 4.2(a) e (b) mostram as curvas ΔR versus V_S obtidas da simulação 1 e 2. A Tabela 4.2 apresenta alguns indicadores de desempenho do circuito do condicionador de sinal.

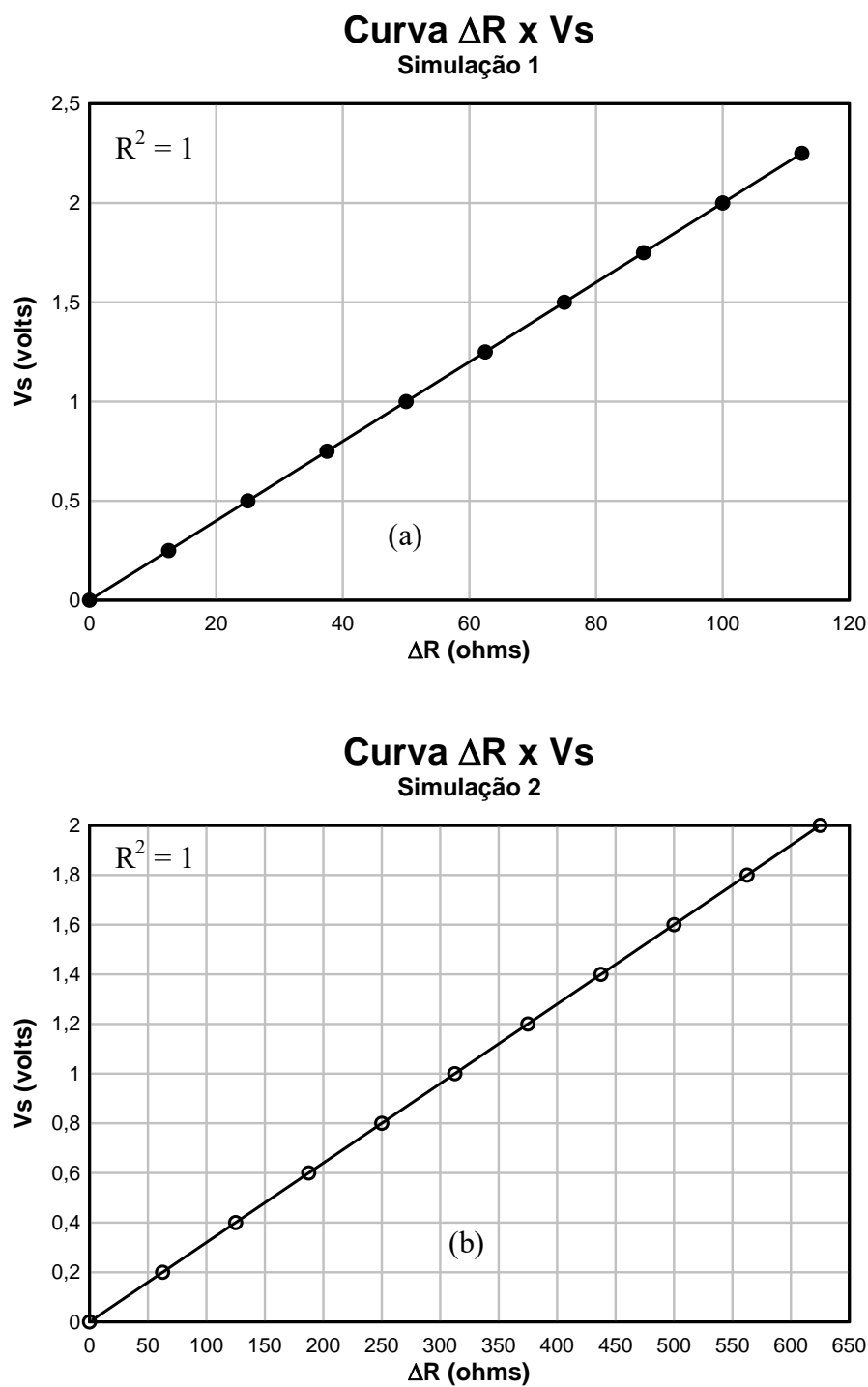


Figura 4.2(a) Curva ΔR x V_S da simulação 1 e (b) curva ΔR x V_S da simulação 2.

Tabela 4.2 Indicadores de desempenho obtidos nas simulações

	Deriva térmica na faixa de 0 a 70°C (%)	R ²	Desvio padrão dos erros (%)
Simulação1	0,003969	1	0,08543
Simulação2	0,004077	1	0,19499

Considerações sobre os resultados experimentais – analogamente ao procedimento anterior este procedimento experimental, denominado experimental 1, continuou a adotar a configuração $\frac{1}{4}$ de ponte. O resistor variado continuou sendo o resistor R_4 da Figura 4.1, o qual foi substituído por resistências confeccionadas com fio de manganina. A variação da resistência de R_4 , simula a variação da resistência do PT-100 o que ocasionará na saída uma tensão V_s proporcional. Os elementos ativos e passivos utilizados no experimento são os descritos na Figura 4.1, exceto os listados na Tabela 4.3. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.3.

Tabela 4.3 Valor dos resistores para o experimento prático.

	RESISTORES					
	R1 (K Ω)	R2 (K Ω)	R3 (K Ω)	R4 (K Ω)	R5 (K Ω)	R6 (K Ω)
Experimental 1	2,2	2,2	0,350	0,350	750	750

Para o ensaio de deriva térmica utilizou-se o aparato experimental apresentado na Figura 4.4. O circuito eletrônico do condicionador de sinal foi submetido a uma variação de temperatura que foi de 23,5 até 42°C. Constatou-se que o valor medido pelo circuito sofreu uma alteração de +0,58°C. Este valor situa-se dentro da faixa de limite de erro estabelecido para Pt-100/classe B, conforme verifica-se na Tabela 4.4 (ABNT, 1997).

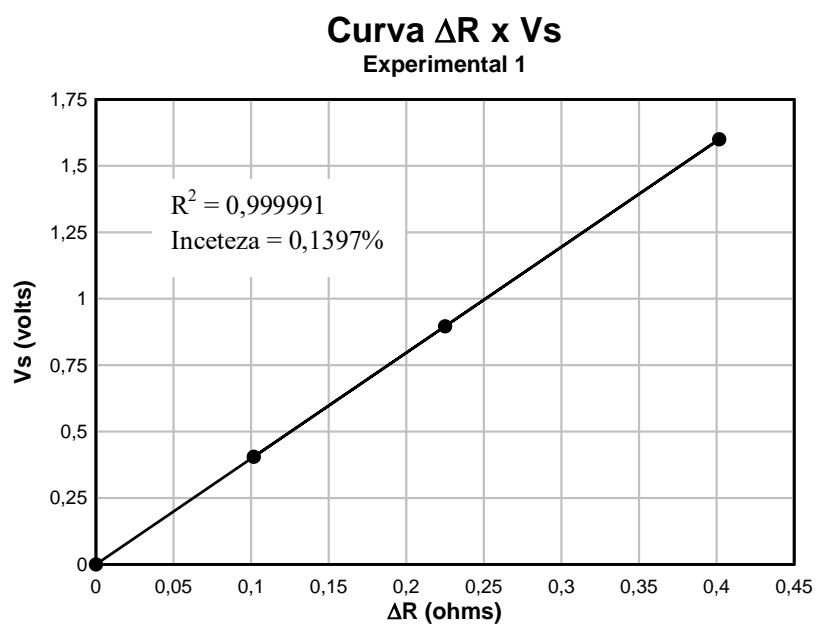
Figura 4.3 Curva $\Delta R \times V_s$ experimental 1.

Tabela 4.4 Limites de erro para Pt-100 classes A e B

TOLERÂNCIA		
Temperatura (°C)	Classe A (+/- °C)	Classe B (+/- °C)
-200	0,55	1,3
-100	0,35	0,8
0	0,15	0,3
100	0,35	0,8
200	0,55	1,3
300	0,75	1,8
400	0,95	2,3
500	1,15	2,8
600	1,35	3,3
650	1,45	3,6
700	—	3,8
800	—	4,3
850	—	4,6

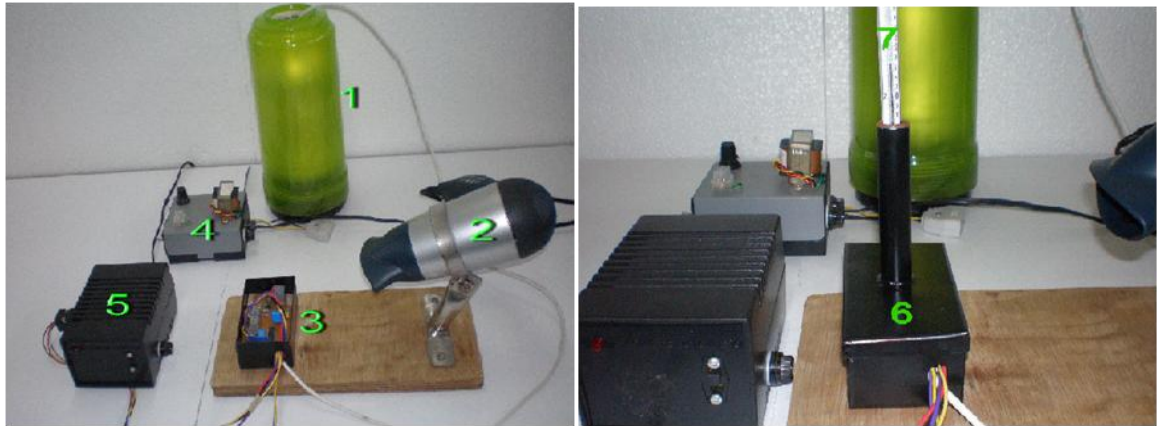


Figura 4.4 Aparato experimental para teste do circuito condicionador de sinal

A Figura 4.4 (1) mostra a câmara térmica onde se encontra o transdutor Pt-100 a 0°C.

A Figura 4.4 (2) mostra o aquecedor resistivo convectivo a ar. Ele é o responsável por aquecer o circuito do condicionador de sinal.

A Figura 4.4 (3) mostra o circuito eletrônico do condicionador de sinal, devidamente acomodado no interior da câmara térmica (a qual terá sua temperatura variada desde 23,5 até 42°C).

A Figura 4.4 (4) é o circuito de potência tiristorizado, para controle da tensão elétrica CA entregue ao aquecedor resistivo.

A Figura 4.4 (5) é o conversor de tensão elétrica CA-CC. Ele é responsável por fornecer as tensões contínuas necessárias ao funcionamento do circuito eletrônico do condicionador de sinal.

A Figura 4.4 (6) é a câmara térmica do condicionador de sinal, hermeticamente fechada, e que minimiza a transferência de calor por convecção em seu interior. Ela é responsável por manter estabilizada a temperatura em seu interior, onde se encontra o circuito eletrônico do condicionador de sinal.

A Figura 4.4 (7) é o termômetro, com resolução de $0,2^{\circ}\text{C}$, destinado a medir a temperatura interna da câmara térmica do condicionador de sinal.

4.2 CIRCUITO ELETRÔNICO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

Para atuar no controle do fluxo de ar que flui dentro da câmara de termoacumulação de gelo, com destino ao reator, foi desenvolvido o circuito eletrônico LES-REFRI-05. O LES-REFRI-05 é um circuito eletrônico do tipo amplificador de instrumentação com saída transistorizada. Ele controla a tensão elétrica contínua, na faixa de 0-10 volts, que é entregue ao conjunto de três ventiladores responsáveis por insuflar o ar para dentro da câmara do termoacumulador de gelo em direção ao reator. A velocidade dos ventiladores varia em função da tensão elétrica aplicada em seus terminais. A Figura 4.5 mostra o circuito LES-REFRI-05.

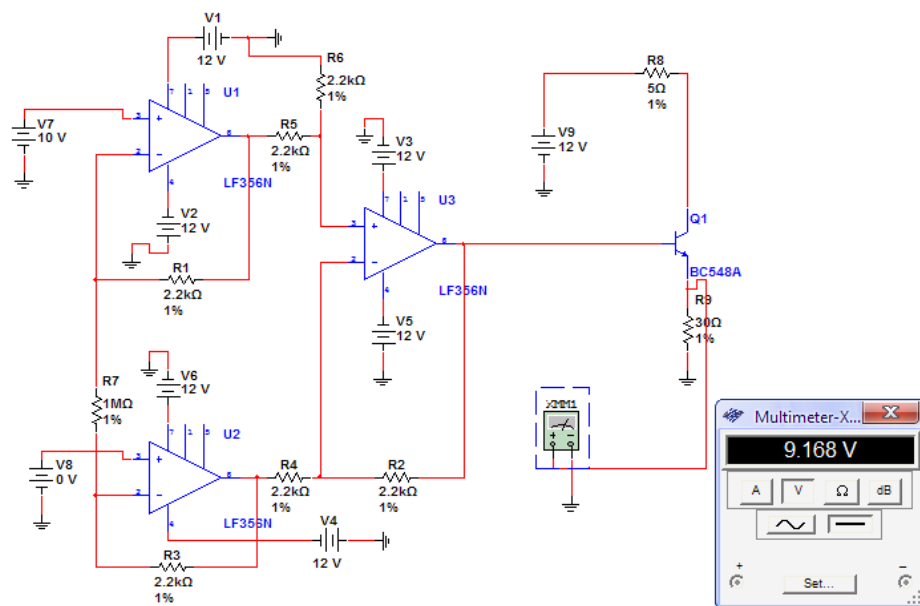


Figura 4.5 – Circuito eletrônico amplificador de instrumentação LES-REFRI-05.

O projeto do circuito amplificador de instrumentação – o termo “amplificador de instrumentação”, segundo Bowers (1990) parece ter surgido no fim da década de 60 denotando geralmente um amplificador que executava uma conversão de um sinal diferencial na entrada para um sinal de saída simples (*single-ended*) com um ganho precisamente definido. Desta maneira, um amplificador de instrumentação pode ser

esquemático como mostra o diagrama da Figura 4.6 representando um circuito em cujas entradas se aplicam dois sinais de tensão (v_1 e v_2) e que disponibiliza em sua saída a diferença entre estes dois sinais ampliada por um ganho $A = v_{saída} - v_{ref} = A(v_1 - v_2)$. Este sinal de saída $v_{saída}$ pode ser tanto flutuante como referenciado ao terra, bastando neste caso apenas conectar o terminal v_{ref} ao terra do circuito. O ganho “precisamente definido” de que trata Bowers é geralmente dado pela razão entre duas resistências (R_S e R_G).

Emprega-se neste experimento amplificador de instrumentação, construído a partir de amplificadores operacionais (*op-amps*) e que utilizam realimentação resistiva.

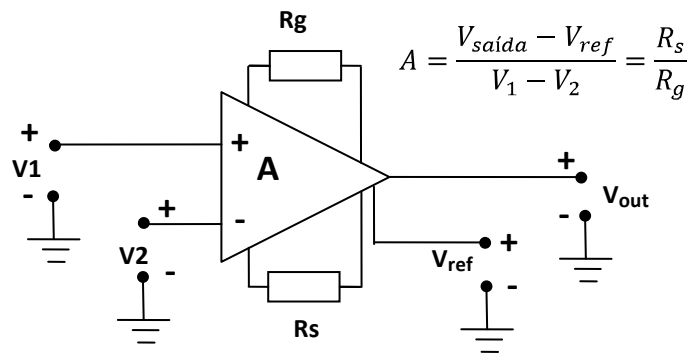


Figura 4.6 Representação do Amplificador de Instrumentação.

Um amplificador de instrumentação construído a partir de amplificadores operacionais é baseado numa estrutura conhecida como amplificador diferencial ou subtrator, mostrada na Figura 4.7.

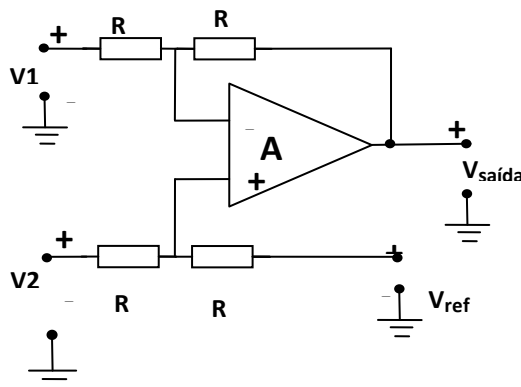


Figura 4.7 Representação do Amplificador diferencial (subtrator).

Aplicando-se o teorema da superposição no circuito da Fig. 4.7, chega-se à seguinte expressão:

$$V_{saída} - V_{ref} = \frac{R_2}{R_1} \cdot v_1 + \frac{1+R_2/R_1}{1+R_3/R_4} \cdot v_2 \quad (4.1)$$

Fazendo $R_1 = R_3 = R_G$ e $R_2 = R_4 = R_S$, então a expressão (1) reduz-se à:

$$\frac{V_{saída} - V_{ref}}{v_2 - v_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_S}{R_G} \quad (4.2)$$

Pela análise da Equação 4.2 verifica-se que o ganho do subtrator é dado por uma razão de resistências e que se os sinais v_1 e v_2 forem iguais, a saída será nula. Porém, isto requer um casamento muito bom entre resistores R_1 e R_3 e entre R_2 e R_4 . É necessário que as entradas de um amplificador de instrumentação apresentem impedâncias altas e casadas. Uma maneira de se implementar estas características, que se tornou uma configuração padrão para amplificadores de instrumentação é a clássica estrutura baseada em três amplificadores operacionais como mostrado na Figura 4.8.

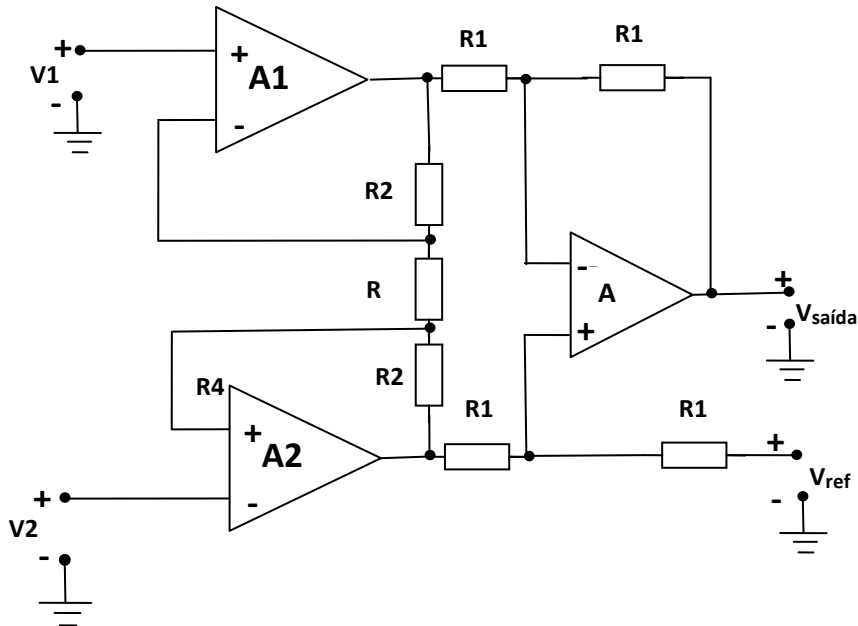


Figura 4.8 Configuração clássica de um amplificador de instrumentação formado por três op-amp.

O circuito da Figura 4.8 pode ser visto como apresentando dois estágios: o primeiro formado pelos amplificadores $A1$ e $A2$ e pelas resistências $R2$ e R_G ; e o segundo que nada mais é do que o subtrator da Figura 4.7 operando com ganho unitário para sinais de modo diferencial (todas as resistências são iguais). O estágio de entrada apresenta impedâncias altas e casadas em suas entradas, características estas conferidas pelos amplificadores $A1$ e $A2$. Quando um sinal diferencial vid é aplicado entre as entradas do circuito, a tensão vid é imposta sobre a resistência R_G e, portanto, passa para o segundo estágio com um ganho dado pelo fator $1+2*R_2/R_G$. Já para sinais de modo comum, as tensões nas extremidades de R_G serão iguais e não haverá corrente fluindo por R_G . Portanto, os *op-amps* disponibilizarão para o segundo estágio o sinal de entrada de modo comum com ganho unitário. Cabe ao segundo estágio rejeitar este sinal, passando para a saída somente sinais de modo diferencial.

4.3 CIRCUITO ELETRÔNICO DE CONTROLE DE POTÊNCIA

Para atuar no controle da resistência elétrica do aquecedor resistivo envolvente, é que foi desenvolvido o circuito eletrônico de controle de potência denominado LES-TYR-06. O LES-TYR-06 recebe um sinal elétrico, do tipo analógico na faixa de 0-10 volts, e como resultado controla a fase da tensão alternada de 220Vca que é aplicada ao aquecedor resistivo envolvente, controlando, assim, a quantidade de calor gerada pelo aquecedor.

O LES-TYR-06 é um circuito eletrônico do tipo controle de fase tiristorizado e que utiliza um circuito integrado monolítico analógico TCA785 com 16 pinos disponíveis. Entre várias aplicações gerais o TCA 785 é um circuito dedicado ao controle de ângulo de disparo de tiristores (triacs e scrs) continuamente de 0° a 180° (ALMEIDA, 2007; ANDRADE, 1996). A estrutura interna e a possibilidade externa de chaveamento permitem um grande número de opções de funcionamento. A versatilidade do circuito TCA 785, permitiu que o controle de fase propiciado pelo LES-THYR-06 fosse atuado através da aplicação de um sinal analógico, entre 0V e 10V.

Descrição de funcionamento do TCA 785 – na Figura 4.9 tem-se o diagrama em blocos com as principais funções internas do integrado. Ele é alimentado pela fonte de tensão interna regulada em 3,1V, assegurando independência dos parâmetros essenciais das

variações de tensão de sua alimentação externa (entre 8 e 18V). Essa tensão de 3,1V pode ser obtida no **pino 8**.

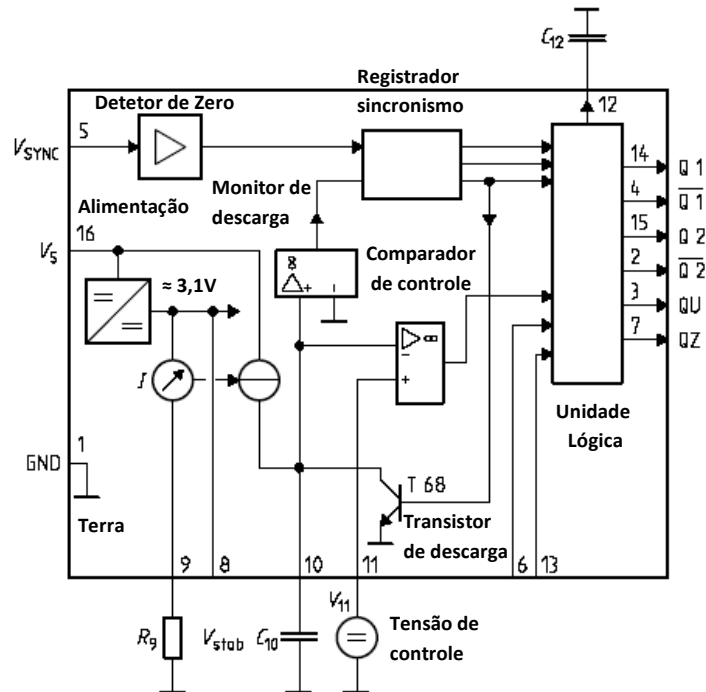


Figura 4.9 – Diagrama em blocos do TCA 785

O sincronismo é obtido através de um detetor de zero (**pino 5**), conectado a um registrador de sincronismo. O gerador de rampa, cujo controle está na unidade lógica, provém de uma fonte de corrente constante carregando o capacitor o **C10**, corrente essa controlada pelo resistor **R9**, cuja finalidade é ajustar a amplitude da rampa, que vai a zero sempre que a tensão de sincronismo passa pelo zero, devido a saturação de um transistor em paralelo com o capacitor. O comparador de controle compara a tensão de rampa com a tensão de controle; quando essas forem iguais e envia pulsos nas saídas via unidade lógica. Obtêm-se, então, no **pino 15**, pulsos positivos no semiciclo positivo de tensão de sincronismo, defasados entre si de 180°. Esses pulsos têm suas larguras determinadas pela conexão de um capacitor externo, **C12**, entre o **pino 12** e o terra, e amplitudes iguais à tensão de alimentação do **pino 16**. Nos **pinos 2 e 4** obtêm-se saídas complementares dos **pinos 14 e 15**, respectivamente, em coletor aberto, necessitando da ligação externa de um resistor entre os **pinos 2-16 e 4-16**, proporcionando uma corrente máxima de 5mA. A largura dos pulsos pode ser controlada através da conexão de um resistor entre os **pinos 13 e 16**. Para aplicação com triacs pode-se usar a saída do **pino 7**, que fornece um pulso

correspondente à soma lógica nor dos pulsos nos **pinos 14 e 15**. O **pino 6** quando aterrado por um relé ou um transistor PNP inibe todas as saídas do TCA 785, servindo de proteção para o sistema.

Na Figura 4.10 apresenta-se o diagrama elétrico do circuito LES-THYR-06, e na Figura 4.11 apresenta-se a fotografia do LES-THYR-06.

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos terminais utilizados no projeto.

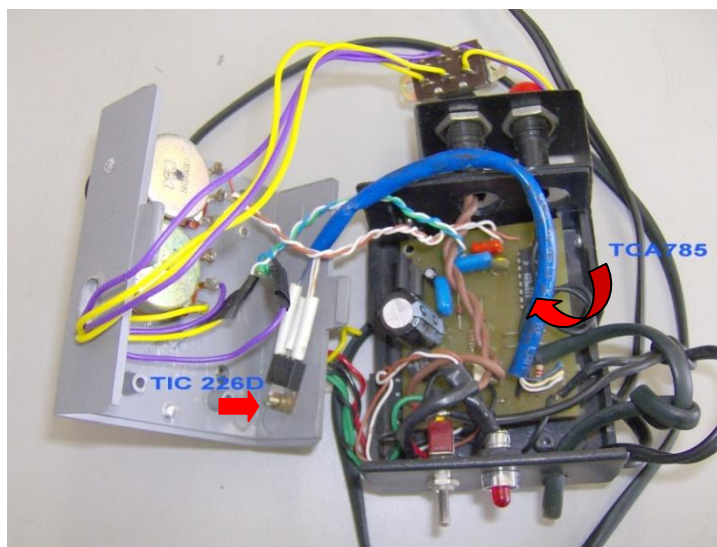


Figura 4.11 Fotografia do LES-THYR-06.

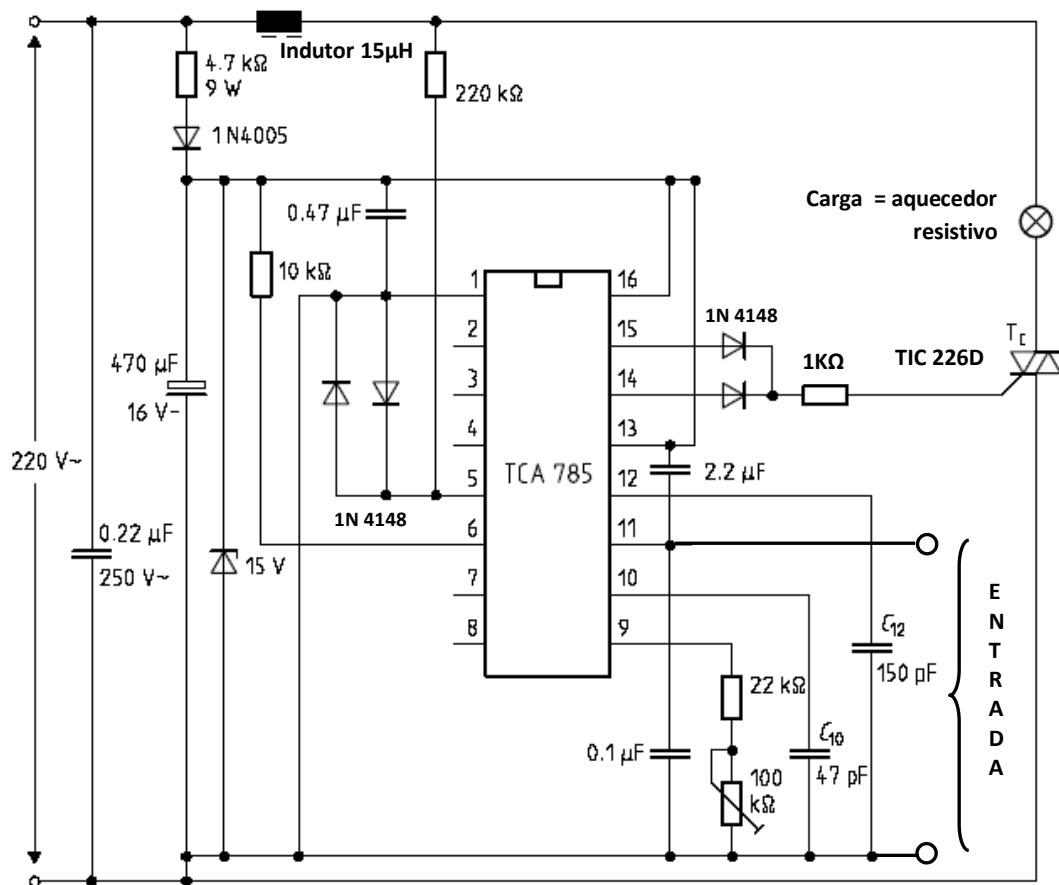


Figura 4.10 – Diagrama elétrico do circuito LES-THYR-06.

Tabela 4.5 Resumo da finalidade dos principais terminais utilizados no projeto.

Pino	Condição	Observação
16	Alimentado com 15Vcc, retificação em ½ onda e regulação à zener	Não há necessidade de se utilizar um transformador abaixador para a fonte. A isolamento galvânica proporcionada pelo trafo seria desperdiçada (e o custo do projeto aumentaria) posto que para o sincronismo é imprescindível o acoplamento direto da rede de tensão CA (devidamente atenuado pelo resistor de 220K Ω).

14 e 15	Saída dos pulsos de disparo para o gate do TRIAC	Alternativamente, por se tratar do controle de um TRIAC (TIC 226D), o pino 7 também poderia ter sido usado, uma vez que este contém o somatório dos sinais dos pinos 14 e 15.
11	Entrada da tensão do tipo contínua. Ela serve para o controle dos pulsos de disparo obtidos nas saídas 7, 14 e 15.	Esta tensão vem da saída analógica do FieldPoint, ela excursiona de 0 a 10vcc. O resultado desta variação é o controle do ângulo de disparo do TRIAC na faixa de 0 a 180° (nas saídas dos pinos 7, 14 e 15).

Considerações acerca do controle de potência – a relação que se estabelece entre a tensão cc de entrada do controle do TCA 785, pino 11, e o ângulo de disparo da senóide a ser aplicada à carga, é uma relação linear. A tensão de entrada pode variar desde zero, quando $\alpha=180^\circ$, até o valor máximo que corresponde a $\alpha=0^\circ$. A Figura 4.11 expressa esta relação.

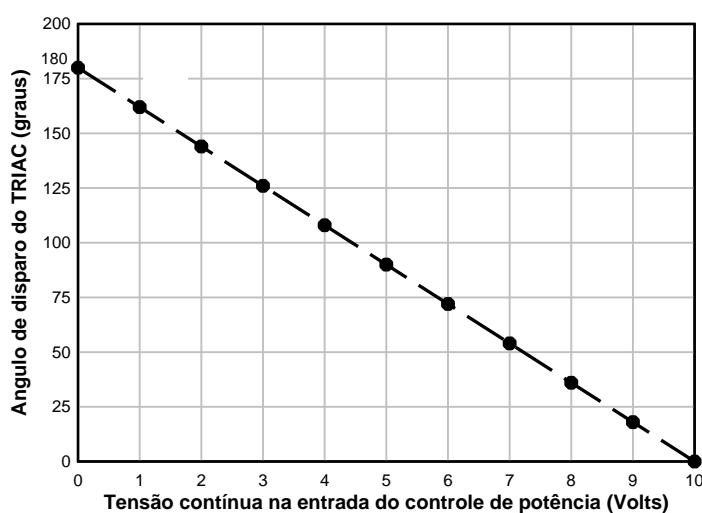


Figura 4.11 Relação entre a tensão cc da entrada de controle do TCA, no pino 11, e o ângulo de disparo do TRIAC.

A tensão aplicada ao pino 11 do TCA 785 vem do Fieldpoint (módulo saída analógica AI-210) e sendo o seu valor conhecido, conseqüentemente, também é conhecido o ângulo de disparo (α). A Figura 4.12 mostra a forma de onda do sinal senoidal de tensão da rede elétrica e também a da tensão que é aplicada ao aquecedor.

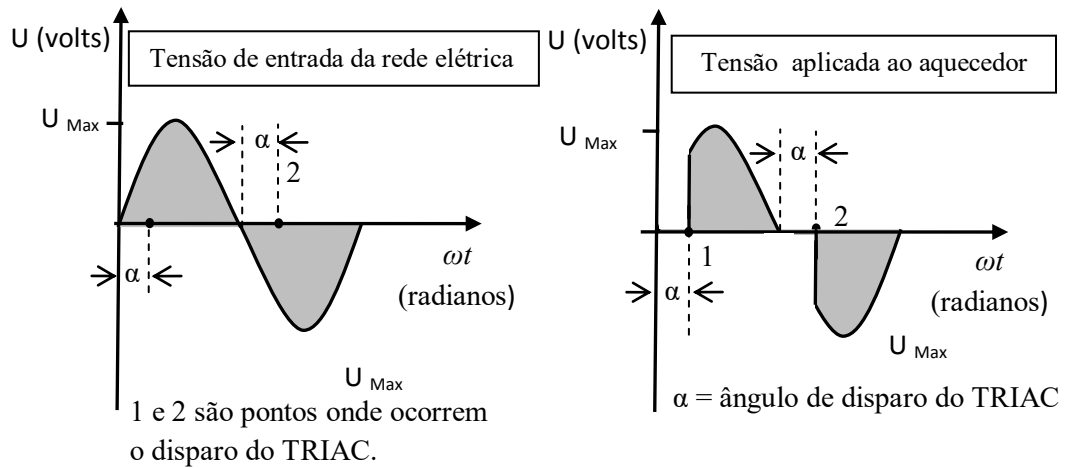


Figura 4.12 Forma de onda do sinal senoidal de tensão da rede elétrica e a da tensão que é aplicada ao aquecedor.

Conhecendo-se o ângulo α utiliza-se a seguinte equação para o cálculo da tensão eficaz aplicada ao aquecedor resistivo.

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (U_{max} \sin \omega t)^2 d\omega t} \quad (4.3)$$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{max}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} \quad (4.4)$$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{U_{max}^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} \quad (4.5)$$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{U_{max}^2}{\pi} \left(\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right) \Big|_{\alpha}^{\pi}} \quad (4.6)$$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{U_{max}^2}{\pi} \left[\frac{\pi - \alpha}{2} - \left(\frac{\sin 2\pi - \sin 2\alpha}{4} \right) \right]} \quad (4.7)$$

Assim:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{U_{max}}{\pi} \left(\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{\sin 2\alpha}{4} \right)} \quad (4.8)$$

Onde U_{rms} é o valor da tensão eficaz (em volts) de saída do controle de potência (a qual é aplicada ao aquecedor resistivo), π é o ângulo em radianos (equivalente a meio ciclo da senóide), α é o ângulo de disparo do tiristor (contado a partir do valor zero da senóide) e $U_{máx}$ é o valor de pico da tensão de 220 Vca (aplicada na entrada do referido controle de potência).

De posse da tensão eficaz aplicada à resistência do aquecedor, calcula-se a potência dissipada pelo aquecedor resistivo.

$$P = U_{rms}^2 * R_{aq} \quad (4.9)$$

Onde P é a potência elétrica (em watts) dissipada pelo aquecedor resistivo, U_{rms} é o valor da tensão eficaz aplicada ao aquecedor resistivo e R_{aq} é o valor da resistência elétrica do aquecedor.

Para cálculo da energia desenvolvida pelo aquecedor resistivo, pode-se aplicar a seguinte equação:

$$E = P * t \quad (4.10)$$

Onde E é a energia (em Joules) desenvolvida pelo aquecedor, P é a potência elétrica dissipada pelo aquecedor e t é o tempo (em segundos) durante o qual a tensão elétrica ficou aplicada ao aquecedor.

CAPÍTULO V

SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DO ADSORVEDOR

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura para o aquecedor elétrico resistivo aplicado ao adsorvedor de um sistema de refrigeração por adsorção física.

O adsorvedor ou reator é uma das partes do sistema de refrigeração por adsorção física. É no adsorvedor que se encontra o leito adsortivo de carvão ativado, o qual necessita ser aquecido para que haja a dessorção do metanol. O sistema de aquecimento desenvolvido é formado por uma resistência envolvente que recobre o adsorvedor cilíndrico e é fixada ao mesmo por meio de abraçadeiras metálicas ajustáveis, conforme mostrado na Figura 5.1.



Figura 5.1 Adsorvedor envolto pelo aquecedor resistivo.

O controlador escolhido é o controlador convencional PID, uma vez que estes controladores são amplamente utilizados no desenvolvimento de sistemas de controle, devido ao pequeno número de parâmetros que devem ser ajustados. Vale salientar que Ogata (2003) cita que mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente têm a estrutura de controlador PID ou PID modificado. Já Aström e Hägglund (2004), citando uma pesquisa realizada em refinarias, indústrias químicas e indústrias de papel, informam que de um total de mais de 11000 controladores instalados nestas empresas, 97% deles são do tipo PID.

A variável manipulada do sistema de controle foi a tensão aplicada ao aquecedor resistivo e a variável controlada a temperatura do leito adsortivo de carvão ativado.

Para a sintonia do controlador foram utilizadas as metodologias de Ziegler-Nichols e Basilio-Matos (ver Apêndice F).

5.2 SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA PARA O AQUECEDOR RESISTIVO

Na Figura 5.2 mostra-se um diagrama esquemático representativo do sistema de controle de temperatura do aquecedor resistivo aplicado ao adsorvedor.

A medição da temperatura no interior do leito adsortivo é feita utilizando-se um RTD (*Resistance Thermometer Detector*) do tipo Pt-100 com bainha de aço inoxidável. Já a medição da temperatura na parte exterior do cilindro do adsorvedor é feita utilizando-se Pt-100 do tipo planar.

O sensor Pt-100 converte variação de temperatura em variação de resistência elétrica. Para transformar a variação da resistência elétrica em variação de tensão elétrica, utilizou-se um circuito eletrônico denominado condicionador de sinal (LES-TERM-05). Os módulos AI-112 e FP-1000 recebem a tensão elétrica (0 a 10Vcc) oriunda do condicionador de sinal e convertem-na em valores digitais que são enviados ao computador pessoal. Utilizando-se da função PID desenvolvida no software LabVIEW é feita a comparação do sinal lido com o valor de referência e obtém-se um valor para uma variável

interna de controle, que representa a saída da função PID. Este valor digital é enviado para os módulos FP-1000 e AO-210 que o convertem e geram um sinal analógico entre 0 e 10Vcc, o qual aciona o circuito do atuador, LES-THYR-05. O atuador, por sua vez, controla o percentual do valor da tensão eficaz de 220Vca que será aplicada ao aquecedor resistivo (que envolve o adsorvedor) e, conseqüentemente, controla a temperatura aplicada ao leito adsorativo de carvão ativado.

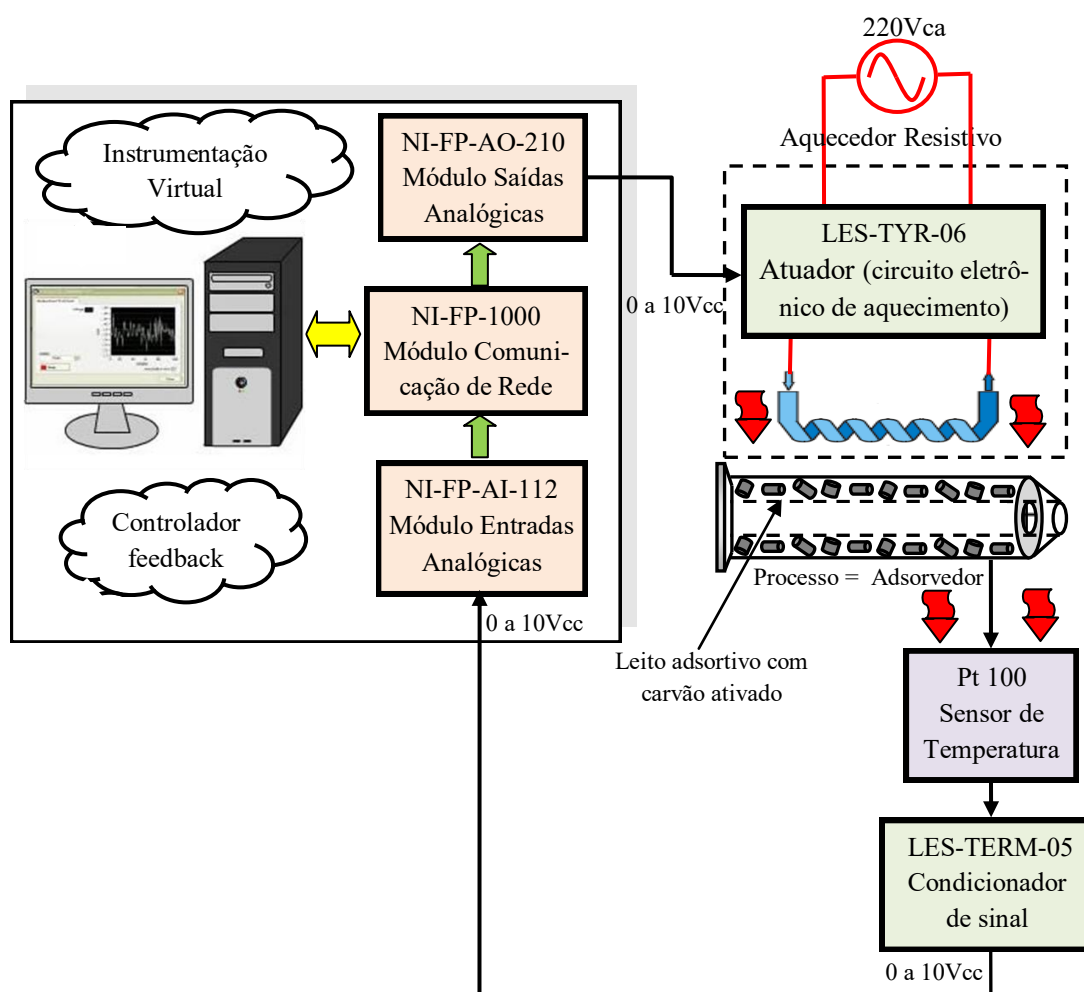


Figura 5.2 Diagrama esquemático representativo do sistema de controle de temperatura do aquecedor resistivo aplicado ao adsorvedor.

5.2.1 Aquecedor resistivo

As características técnicas do aquecedor resistivo são as seguintes: (i) temperatura máxima 250°C; (ii) tensão nominal de 220Vca; (iii) corrente nominal de 1,37A; frequência nominal de 60Hz.

A Figura 5.3 mostra o aquecedor resistivo envolvente e as abraçadeiras utilizadas para fixação do mesmo ao adsorvedor.



Figura 5.3 Aquecedor resistivo e abraçadeiras utilizadas para fixação ao dsorvedor.

5.2.2 Sensor termorresistivo

Os sensores de temperatura resistivos são sensores que operam baseados no princípio da variação da resistência elétrica de um metal em função da temperatura. Eles são fabricados com fios de alta pureza de platina, de níquel ou de cobre. É possível determinar a temperatura do ambiente onde se encontra o sensor termorresistivo recorrendo-se à relação entre a sua resistência elétrica e a sua temperatura. A Figura 5.4 mostra uma típica curva resistência-temperatura para um RTD de platina a 100 Ω .

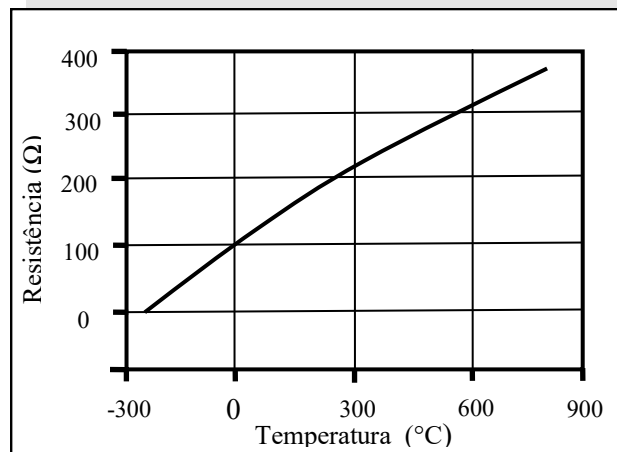


Figura 5.4 Curva Resistência-Temperatura para um Pt-100, $\alpha = 0.00385$

De forma simplificada o modelo matemático para o sensor termorresistivo pode ser dado por:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad 5.1$$

Onde R_t é o valor da resistência (em Ω) do sensor na temperatura atual, R_0 é o valor da resistência do sensor a 0°C , t é a temperatura atual (em $^\circ\text{C}$) e α é o coeficiente de temperatura do sensor ($\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$).

Na Tabela 5.1 apresenta-se os coeficientes de temperatura correspondentes aos RTDs de platina.

Tabela 5.1. Coeficientes de temperatura correspondentes aos RTDs de platina.

Padrão	Coeficiente de temperatura. (α)
DIN 43760/IEC751	0,003850
American	0,003911
ITS-90	0,003926

A termorresistência é identificada pelo material que a constitui e pela resistência que apresenta a 0°C . O sensor de resistência de platina é o modelo de laboratório utilizado para medidas de temperatura, onde: Pt-100 é normalmente utilizada na faixa de -200°C a 650°C , Pt-25 é normalmente utilizada na faixa de -200°C a 661°C e Pt-0,25 é normalmente utilizada na faixa de -50°C a 1000°C (ABNT NBR 13772, 1997).

As principais características dos sensores de platina são a alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, relação de Resistência x Temperatura praticamente linear, o desvio com o uso e envelhecimento desprezíveis, além do alto sinal elétrico de saída. É um sensor de inigualável precisão, estabilidade e sensibilidade.

A termorresistência utilizada neste trabalho é a de platina com resistência de 100Ω à temperatura de 0°C , denominada de Pt-100.

5.2.3 Circuito eletrônico condicionador de sinal

Este circuito eletrônico, LES TERM-05, converte a grandeza física resistência elétrica, do Pt-100, em um sinal de tensão elétrica variante no tempo em função da temperatura. O sinal na saída do condicionador de sinal é uma tensão elétrica do tipo contínua (cc) e situa-se na faixa de 0-10 volts (ver seção 4.1).

5.2.4 Circuito eletrônico do atuador

O LES-THYR-06 é um circuito eletrônico do tipo controle de fase tiristorizado. Ele recebe um sinal elétrico, do tipo analógico na faixa de 0-10 volts, e como resultado controla a fase da tensão alternada de 220Vca que é aplicada ao aquecedor resistivo envolvente, controlando, assim, a quantidade de calor gerada pelo aquecedor e aplicada ao adsorvedor (ver seção 4.3).

5.2.5 Módulo de comunicação de rede

O módulo NI-FP-1000 é um módulo de comunicação de rede. Ele faz parte de um sistema desenvolvido pela National Instruments denominado FieldPoint, e é utilizado em

aplicações com um computador pessoal (PC) baseado em Entradas/Saídas (I/O) distribuídas. Este módulo é uma interface para redes de comunicação, entre computadores, que se utilizam do padrão serial RS-232 e RS-485. Para esta aplicação utilizou-se o padrão RS-232.

Este módulo gerencia as comunicações entre o PC, que atua como *host* do sistema, e os módulos de I/O (módulo de entrada NI-FP-AI-112 e o módulo de saída NI-FP-AO-210) distribuídas; tudo sobre um barramento local de transmissão de dados de grande velocidade. Ele é capaz de conectar até nove módulos FieldPoint I/O para o PC.

A interface serial NI-FP-1000 comunica-se com o PC operando em uma plataforma com o sistema operacional Windows® e rodando o software LabView®. A Figura 5.5(a) mostra o módulo NI-FP-1000.

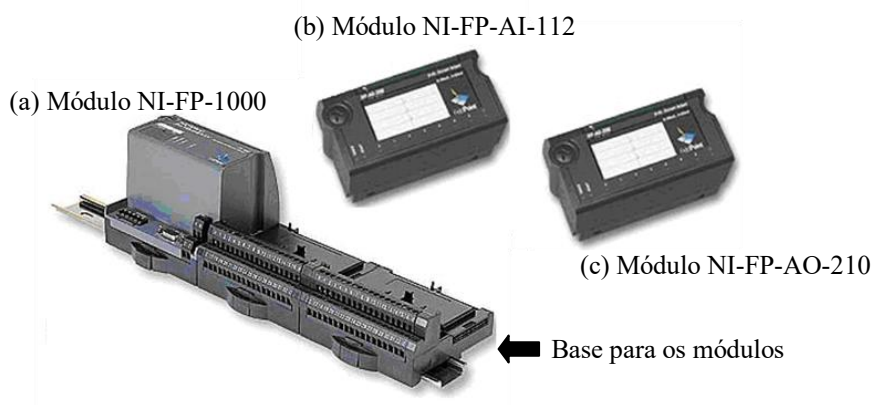


Figura 5.5 Módulos: (a) NI-FP-1000, (b) NI-FP-AI-112 e (c) NI-FP-AO-210.

5.2.6 Módulo de entradas analógicas

O módulo NI-FP-AI-112 é um módulo de entrada analógico de 16 canais, produzido pela National Instruments. Ele é utilizado para a medida direta de sinais de tensão da ordem de uns poucos milivolts até uma dezena de volts. Os sinais de tensão de entrada são provenientes dos sensores termorresistivos de temperatura, Pt-100 (via circuito eletrônico condicionador de sinal, LES-TERM-05). O módulo NI-FP-AI-112 vem com um

certificado NIST-traceable de calibração para assegurar medidas analógicas confiáveis. A Figura 5.5 (b) mostra o módulo NI-FP-AI-112.

5.2.7 Módulo de saídas analógicas

O módulo NI-FP-AO-210 é um módulo de tensão analógica de 8 canais de saída, produzido pela National Instruments. Ele disponibiliza em suas saídas tensões que excursionam desde 0Vcc até 10Vcc em cada um de seus canais. O módulo inclui a detecção de sobrecarga para a proteção da fiação e para a pesquisa de defeitos e também é provido de sensor de curto-circuito. O módulo NI-FP-AO-210 vem com um certificado NIST-traceable de calibração para assegurar um controle analógico confiável. A Figura 5.5 (c) mostra o módulo NI-FP-AO-210.

5.3 PROJETO DO CONTROLADOR

Os métodos de projeto de controladores diferem com relação ao conhecimento da dinâmica do processo. Duas podem ser as metas de controle a serem atingidas: seguir a referência e/ou rejeitar distúrbios. A utilização de controladores PID cuja configuração contemple dois graus de liberdade satisfaz estes dois requisitos independentes e por vezes conflitantes (OGATA, 2003). No sistema desenvolvido para este trabalho precisa-se atender ao requisito relativo à resposta de entrada de referência. Sendo assim, a principal meta do controle é seguir o valor de referência (setpoint), e conseqüentemente o controlador PID projetado possui um grau de liberdade, uma vez que não é necessário satisfazer requisitos conflitantes.

As especificações quanto ao seguimento da referência, utilizadas neste trabalho, incluem:

1. Tempo de subida, t_r ;
2. Tempo de acomodação, t_s ;
3. Sobressinal (ou ainda Máximo sobressinal), M_p ;

Essas especificações são definidas a seguir e mostradas graficamente na Figura 5.1.

1. Tempo de subida, t_r : é o tempo requerido para que a resposta passe de 10% a 90%, ou de 5% a 95%, ou ainda de 0% a 100% do valor final.
2. Tempo de acomodação, t_s : é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores em uma determinada faixa (em geral 2% ou 5%) em torno do valor final e aí permanecendo indefinidamente. Este tempo relaciona-se com uma maior constante de tempo do sistema.
3. Sobressinal (em porcentagem), M_p : é o valor máximo de pico da curva de resposta. Em geral especifica-se um sobressinal entre 8 e 10% do valor desejado, ou então um sinal superamortecido.

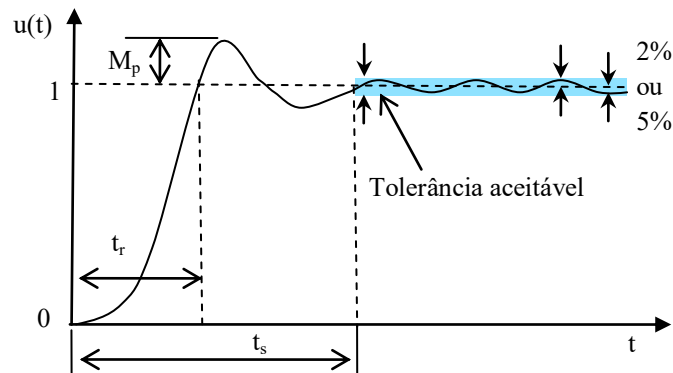


Figura 5.1 Resposta dinâmica a uma entrada em degrau unitário que mostra t_r , t_s e M_p .

O controle feedback- é uma técnica importante, muito usada nas indústrias de processo. Entre suas principais vantagens pode-se citar que a ação corretiva é tomada assim que a variável controlada se desvia do setpoint, não importando o tipo de perturbação, uma vez que o sistema de controle não requer nenhum conhecimento da fonte ou natureza da perturbação. A Figura 5.2 apresenta o diagrama do controle feedback.

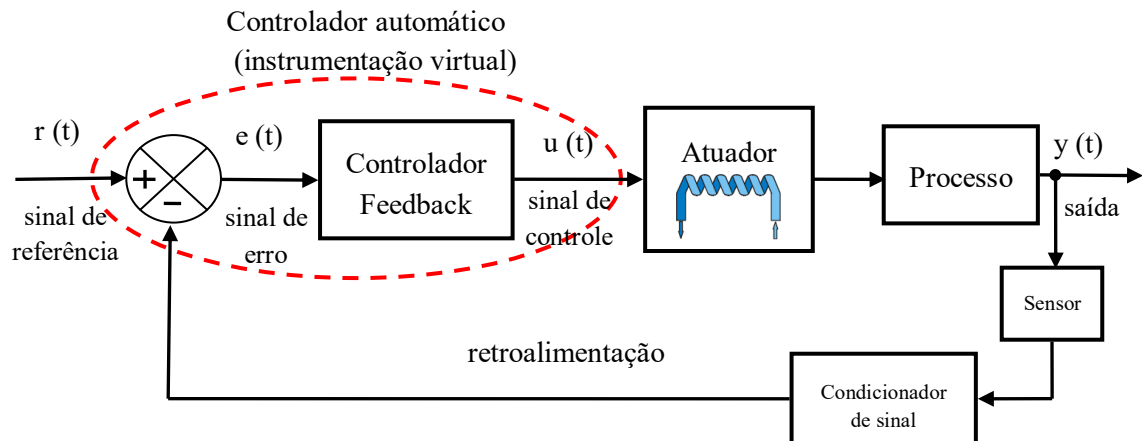


Figura 5.2 Configuração do controle feedback.

No controle feedback nenhuma ação corretiva é tomada até que um desvio na variável controlada ocorra, ou seja, a perturbação atinge o processo e depois que a saída controlada se afasta do setpoint o sistema de controle atua. Este tipo de controle permite alguma flutuação da variável controlada dentro de certa faixa. Como não há ocorrência de perturbações de grande magnitude que sejam fortes o suficiente para afetar seriamente ou mesmo danificar o processo, nem constantes de tempo grandes e/ou grandes atrasos (que fariam com que o processo operasse continuamente num estado transiente e nunca atingisse o estado estacionário desejado); este tipo de controle é satisfatório para o processo em questão.

5.3.1 O controlador PID implementado no LabVIEW

De modo geral o controlador PID fornece um sinal de controle dado por:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (5.4)$$

O algoritmo do controlador PID implementado no software LabVIEW é um algoritmo PID modificado. As características do PID modificado são descritas a seguir.

Integração trapezoidal- a integração trapezoidal é utilizada para evitar mudanças muito pronunciadas na ação integral quando há uma repentina mudança na variável de

processo ou no setpoint. Utiliza um ajuste não linear da ação integral para neutralizar o sobressinal. Quanto maior o erro, menor a ação integral, como mostrado na Equação (5.5).

$$u_I(k) = \frac{K_p}{T_I} \sum_{i=1}^k \left[\frac{e(i) + e(i-1)}{2} \right] \Delta t \quad (5.5)$$

Ação derivativa parcial- por causa de mudanças abruptas que podem ocorrer no setpoint, a ação derivativa somente será aplicada à variável de processo, não ao erro e , com o intuito de evitar picos derivativos. A Equação (5.6) representa a ação derivativa parcial.

$$u_D(k) = -K_p \frac{T_D}{\Delta t} (VP(k) - VP(k-1)) \quad (5.6)$$

Saída do controlador- a saída do controlador é a soma das ações proporcional, integral e derivativa, como apresentado na Equação (5.7).

$$u(k) = u_p(k) + u_I(k) + u_D(k) \quad (5.7)$$

A Equação (5.8) apresenta o modelo prático do controlador PID implementado no software LabVIEW.

$$u(t) = K_p \left[(SP - VP) + \frac{1}{T_I} \int_0^t (SP - VP) dt - T_D \frac{dVP}{dt} \right] \quad (5.8)$$

Limitação da saída do controlador- a saída do controlador é limitada segundo a faixa especificada para o controle de saída.

- (1) Se $u(k) \geq u_{max}$ então $u(k) = u_{max}$, e
- (2) Se $u(k) \leq u_{min}$ então $u(k) = u_{min}$

Em resumo: o algoritmo utilizado para a correção da soma integral no PID do LabVIEW facilita o controle anti-windup e também evita ressaltos quando da transferência do controle manual para o controle automático no controlador PID. O efeito windup ocorre no limite superior da saída do controlador, por exemplo, 100%. Quando o erro e diminui, a saída do controlador também diminui, indo para fora da área de windup. O algoritmo de correção da soma integral evita mudanças abruptas da saída do controlador

quando se posiciona a chave do modo manual para o módulo automático ou muda qualquer outro parâmetro.

5.3.2 Sintonia do controlador PID

Considerando-se que o sistema deste trabalho é um sistema com resposta ao degrau monotonicamente crescente, para efetivação da sintonia do controlador PID escolheu-se os métodos heurísticos de Ziegler-Nichols (ZIEGLER e NICHOLS, 1942) e de Basilio-Matos (BASILIO e MATOS, 2000; BASILIO e MATOS, 2002).

Especificações de desempenho- para o ajuste do controlador PID, as especificações de desempenho quanto ao seguimento da referência são:

1. Tempo de subida, $t_r \leq 20\text{min}$;
2. Tempo de acomodação, $t_s \leq 30\text{min}$;
3. Sobressinal, $M_p \leq 5\%$;

Para satisfazer as especificações de desempenho adotadas para o controlador PID deste trabalho, o mesmo foi implementado em um computador pessoal, PC, utilizando-se um aplicativo com linguagem gráfica de programação denominado LabVIEW®.

Determinação dos parâmetros de sintonia- os parâmetros do controlador que se deseja conhecer são: o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_I , e o tempo derivativo T_D . A identificação destes parâmetros foi feita excitando-se o aquecedor resistivo com uma tensão senoidal com frequência de 60Hz. Ressalta-se que pelo fato do aquecedor ser puramente resistivo, excitá-lo com tensão senoidal equivale a aplicar degrau de tensão contínua com amplitude igual ao valor eficaz da tensão senoidal aplicada.

O desenvolvimento experimental é realizado aplicando-se a seguinte seqüência de passos:

Passo 1. Aplica-se um degrau com amplitude $V_{\text{Degrau}} = 80$ Volts ao aquecedor resistivo.

Passo 2. Faz-se a aquisição da resposta $y(t)$.

Passo 3. Aguarda-se a planta atingir o estado permanente da resposta, y_{∞} .

Passo 4.1 Para atender ao método Ziegler-Nichols, calcula-se o ponto de inflexão da curva de resposta $y(t)$ e determinam-se os valores de T e L , como descrito na Figura 5.3.

Passo 4.2 Para atender ao método Basilio-Matos, calcula-se o valor de A bem como a área A_0 apresentada na curva de reação ao degrau de 80 volts da Figura 5.3.

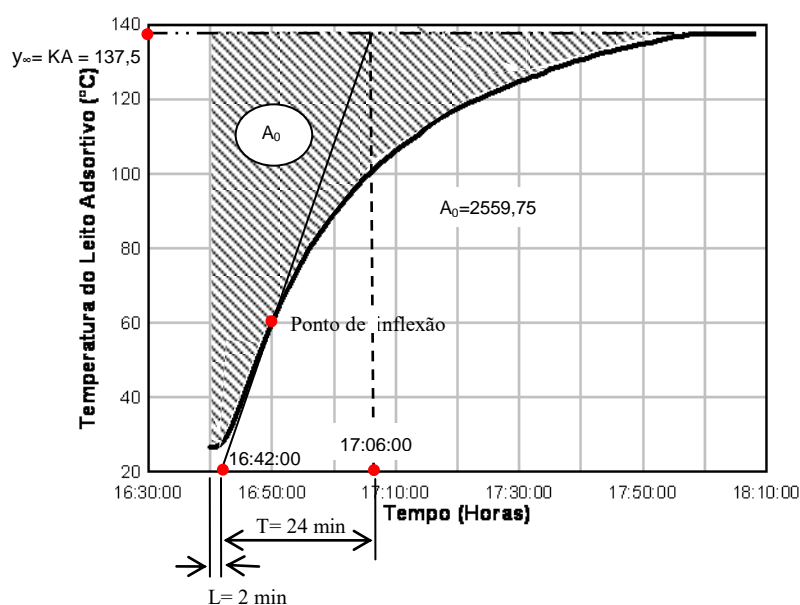


Figura 5.3 Curva de reação ao degrau de 80 volts aplicado ao aquecedor

A Tabela 5.2 relaciona alguns dados relevantes obtidos a partir da curva de reação ao degrau de 80 volts aplicados ao aquecedor resistivo.

Tabela 5.2 Dados obtidos a partir da curva de reação ao degrau unitário de 80 volts.

Elementos	Dados obtidos do gráfico da curva de reação ao degrau
Temp. Ambiente (T_{amb})	26,6°C
$y_{\infty} = KA$	137°C

$\Delta T = y_{\infty} - T_{amb}$	110,9°C
V_{Degrau}	80 Volts
$K = \Delta T / V_{Degrau}$	1,39
A	98,92°C
T	24min
L	2min
$A_0 = \int_0^{\infty} [KA - y(t)] dt$	2559,75°C.min

Baseando-se na resposta ao degrau unitário aplicado à planta, a Tabela 5.3 apresenta as fórmulas para cálculo dos parâmetros, ganho proporcional K_p , tempo integral T_I e o tempo derivativo T_D , para o controlador PID, segundo os métodos de sintonia Ziegler-Nichols e Basilio-Matos. A Tabela 5.4 reúne os valores calculados dos parâmetros do controlador PID segundo o método de sintonia, Ziegler-Nichols e Basilio-Matos.

Tabela 5.3 Fórmulas para cálculo dos parâmetros K_p , T_I e T_D , do controlador PID.

Método Sintonia PID	Parâmetros do controlador		
	K_p	T_I	T_D
Ziegler-Nichols	1,2T/L	2L	0,5L
Basilio-Matos	$0,6699A/y_{\infty}$	$5A_0/(6y_{\infty})$	$A_0/(5y_{\infty})$

Tabela 5.4 Valores calculados dos parâmetros do controlador PID e o ajuste real aplicado ao controlador.

Método Sintonia PID	Parâmetros do controlador		
	K_p	T_I (min)	T_D (min)
Ziegler-Nichols	14,4	4	1
Basilio-Matos	0,48	15,51	3,72
Ajuste real (final)	2,88	13,89	1,37

Como exemplo de sintonia apresenta-se, na Figura 5.4, o comportamento da temperatura no carvão ativado para um valor de referência ajustado de 80°C.

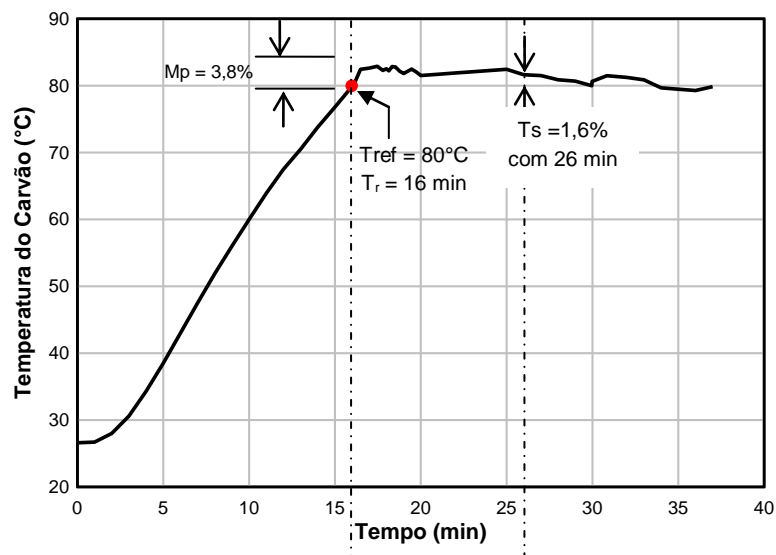


Figura 5.4 Curva da temperatura no carvão ativado para o setpoint de 80°C

A Tabela 5.5 reúne os valores para os requisitos de desempenho especificados e os valores reais (considerando-se o setpoint de 80°C).

Tabela 5.5 Valores dos requisitos de desempenho especificados e os valores reais para o setpoint ajustado para 80°C.

Desempenhos	Requisitos do desempenho		
	M_p (%)	T_r (min)	T_s (min)
Especificado	≤ 5	≤ 20	≤ 30
Real (setpoint 80°C)	3,8	16	26

Comparando-se os valores dos requisitos de desempenho especificados com os valores reais obtidos na planta, conclui-se que os parâmetros de sintonia para o controlador PID estão condizentes com as premissas especificadas para o projeto do controlador.

CAPÍTULO VI

MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se os materiais, os equipamentos e métodos utilizados no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

6.2 DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS DO APARATO EXPERIMENTAL

O sistema de controle e simulação dinâmica dos processos de sorção e dessorção em ciclos de refrigeração por adsorção física, SISD, é um sistema automatizado para o controle da temperatura para o aquecimento e resfriamento e monitoração da pressão do leito adsortivo, do tempo do ciclo e da massa transportada durante os fenômenos da adsorção/dessorção do ciclo adsortivo.

O SISD é constituído, basicamente, por um alimentador de fase líquida do adsorvato, um leito adsortivo com carvão ativado, uma resistência elétrica para aquecimento do leito adsortivo, um reservatório de termoacumulação de gelo para resfriamento do leito adsortivo, um condensador/evaporador; bem como: tubos metálicos e de borracha para interligação do sistema, válvulas, conectores, sensores e atuadores. Vale salientar que o SISD funciona sob vácuo.

Na Figura 6.1 apresenta-se o diagrama esquemático do SISD.

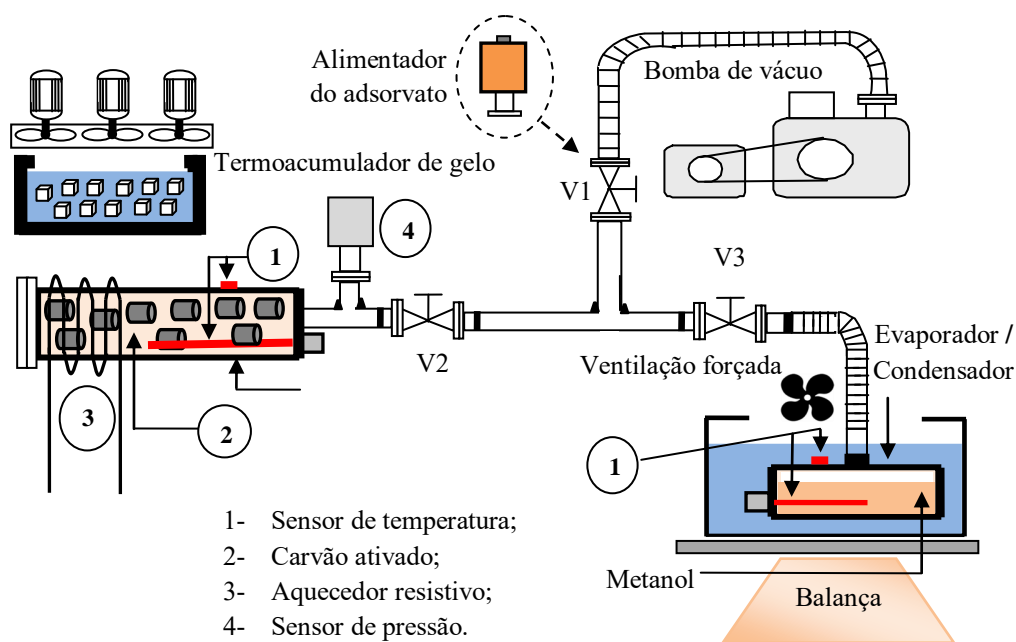


Figura 6.1 – Diagrama esquemático do SISD

6.2.10 sistema de alimentação do adsorvato

O sistema de alimentação da fase líquida do fluido adsorvativo consiste de um recipiente cilindriforme em aço inox (RCA), e que é flangeado em uma de suas extremidades; diâmetro interno de 50mm e comprimento de 70mm; uma válvula manual de 3/4" , V1; uma abraçadeira de alumínio e um anel de borracha para vedação.

O RCA possui na sua parte superior, diametralmente oposta à parte flangeada, um furo roscado. Por este furo será introduzido o líquido refrigerante. A Figura 6.2 mostra o recipiente cilíndrico de alimentação.

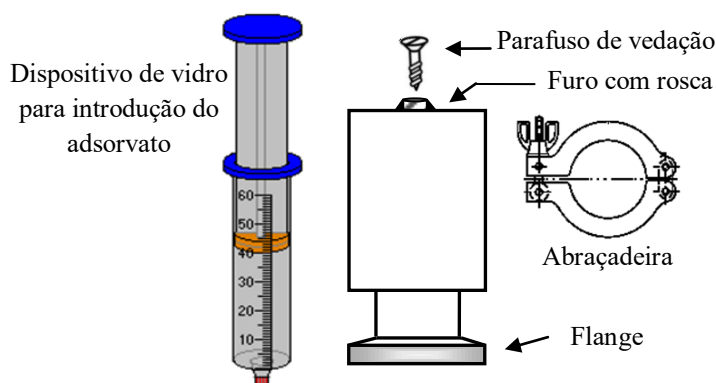


Figura 6.2- Recipiente cilindriforme de alimentação da fase líquida do adsorvato.

O recipiente cilíndrico de alimentação possui capacidade para 50g de adsorvato líquido. O RCA tem como finalidade receber, armazenar e transferir o líquido refrigerante que será introduzido no SISD.

6.2.2 O adsorvedor ou reator

O adsorvedor faz o papel de um compressor mecânico de um sistema de refrigeração convencional. A diferença principal entre o ciclo a compressão a vapor e o ciclo à adsorção sólida, reside na origem da energia utilizada para transferir calor de um reservatório frio para outro a uma temperatura superior (LEITE, 1996). No primeiro utiliza-se energia mecânica, no segundo faz-se uso da energia interna de um fluido interagindo com um meio sólido. No compressor mecânico o processo de aspiração e compressão do líquido refrigerante é realizado de maneira contínua, enquanto neste sistema de adsorção física o processo ocorre de modo intermitente, onde durante um certo período o reator comprime o refrigerante (etapa de dessorção) e em outro, ele o aspira do evaporador (etapa de adsorção).

O sistema de refrigeração abordado neste trabalho baseia-se no ciclo de adsorção sem recuperação de calor, ciclo intermitente, como mencionado acima. Este conceito leva ao projeto de uma máquina na qual a energia necessária à dessorção é proveniente de uma fonte de calor externa; neste caso a energia fornecida por uma resistência elétrica.

O reator funciona de forma alternada, seja como adsorvedor, durante a etapa de produção frigorífica, seja como regenerador, mediante a conversão térmica da energia oriunda da resistência elétrica. Na etapa de produção frigorífica o reator é resfriado por meio de um sistema de termoacumulação de gelo.

O adsorvedor é constituído de um cilindro de aço inox com dois compartimentos concêntricos separados por uma tela metálica (também de aço inox). Esta configuração do reator foi proposta inicialmente por Vodianitskaia e Klüpel (1984).

As dimensões do reator, são: comprimento $C_L = 300mm$, diâmetro interno $\varnothing_L = 49,4mm$ e diâmetro externo de $\varnothing_E = 51,0mm$. O espaço anular concêntrico é o espaço destinado ao leito, o qual leito é ocupado pelo adsorvente (carvão ativado);

enquanto o espaço cilíndrico (no centro do reator) tem diâmetro de $\varnothing_c = 24mm$, é destinado a circulação do adsorvente.

O adsorvedor utiliza aproximadamente 51% de seu volume total para acomodar o leito adsorativo (preenchido com carvão ativado).

Internamente ao adsorvedor e em contato com o carvão do leito adsorativo, é colocado um sensor de temperatura do tipo RTD – Pt100. Nas paredes externas do reator também são dispostos vários sensores de temperatura do mesmo tipo descrito anteriormente.

Na Figura 6.3 apresenta-se o desenho do reator destacando o leito adsorativo, com o carvão ativado, e o caminho preferencial para o adsorvato, na etapa de dessorção ou adsorção.

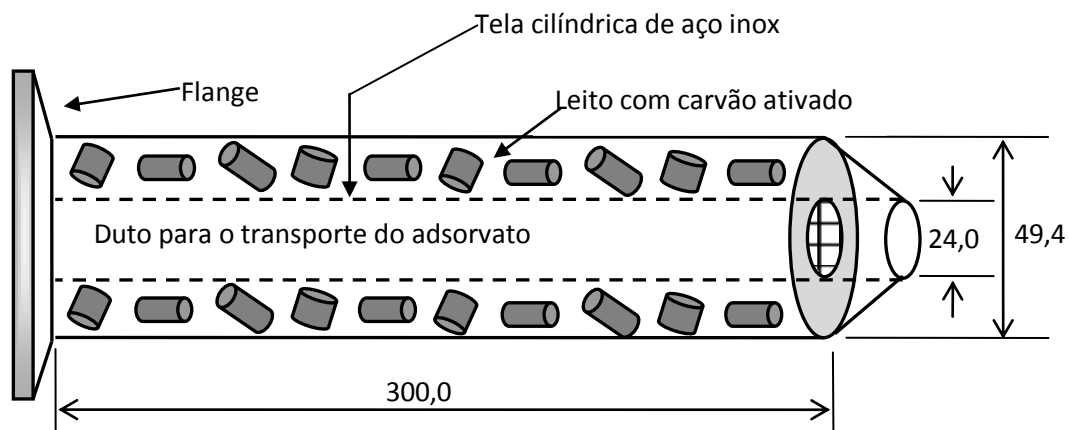


Figura 6.3- Diagrama representativo do adsorvedor

Protótipos de refrigeradores solares usando o ciclo de adsorção e o carvão ativado AC-35, utilizavam as seguintes quantidades de adsorvente por m^2 de área do reator: Medini et al (1991) utilizaram 19 kg; Boubakri et al (2000) fizeram uso de 20 kg; Pons e Grenier (1987) utilizaram 22Kg; e Grilo (2004) onde foram utilizados 21Kg de carvão ativado. Constata-se que a média aproximada destes protótipos é de 20Kg de carvão ativado por m^2 de área do reator.

Outros protótipos de refrigeradores solares, porém não mais com o carvão ativado AC-35, utilizaram as seguintes quantidades de carvão ativado por m^2 de área do reator: Silveira Junior (1990) com 10Kg; e Li et al (2003) com o total de 19Kg.

Neste trabalho adotou-se a relação de 11Kg de carvão ativado por m^2 de área do reator, o que representa uma redução de aproximadamente 44% considerando-se os trabalhos realizados com carvão AC-35, e um valor equivalente ao utilizado por Silveira Junior (1990) em seu experimento.

6.2.3 Evaporador/condensador

O dispositivo denominado evaporador/condensador é a parte do sistema de refrigeração que ora exerce a função de condensador, quando da dessorção do adsorvato, ora exerce a função de evaporador, no momento da adsorção. É no condensador onde ocorre a mudança de fase gás-líquido do metanol proveniente do adsorvedor. É no evaporador onde ocorre a produção do efeito frigorífico, quando da mudança de fase líquido-gás, com o vapor de metanol deslocando-se do evaporador para o adsorvedor (reator).

O cálculo da área e do volume do evaporador /condensador consta do Apêndice A. O dimensionamento térmico do condensador e do evaporador, foram realizados a partir de resultados de simulações numéricas realizadas com dados oriundos de Leite (1996) e Leite et al (2004) e constam do Apêndice B.

O evaporador/condensador é constituído de um tubo cilíndrico de aço, com 35mm de diâmetro e 110mm de comprimento. Este cilindro é fechado em suas extremidades e possui em sua parte central, considerando-se o seu comprimento, um duto para a entrada/saída do metanol. Na Figura 6.4 apresenta-se o evaporador/condensador.

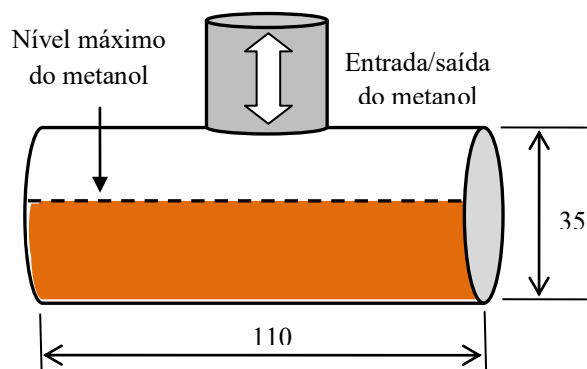


Figura 6.4 Evaporador/condensador

O volume do evaporador/condensador é de $V_{ev} = 106\text{cm}^3$ ou 106ml

A área total do evaporador/condensador é de $A_{total} = 140,19\text{cm}^2$

O metanol ocupará 50% do volume total do evapocondensador.

Esta configuração do evapocondensador permite uma maior área superficial do metanol no interior do mesmo, o que melhora a evaporação do metanol.

A câmara do evaporador/condensador – é uma câmara constituída de EPS, poliestireno expandido, com uma espessura de 5mm. Seu formato é cilíndrico e o evapocondensador está instalado em seu interior. As dimensões da câmara são: 70mm de diâmetro e 170mm de comprimento; com uma capacidade volumétrica total de 654ml. A câmara do evapocondensador é mostrada na Figura 6.5.

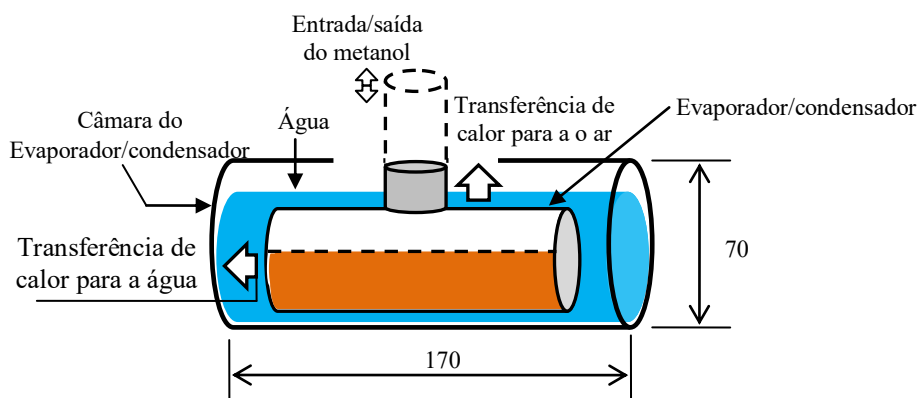


Figura 6.5 Câmara do evaporador/condensador

A Figura 6.5 é uma representação esquemática do volume de controle do evaporador/condensador, com a finalidade de destacar os principais processos de transferência de calor e de massa que atravessam as superfícies. Esse volume de controle indica a transferência de calor latente do metanol através do tubo para a água e da água para vizinhança do reservatório que é o ar ambiente. Esta Figura também indica o sentido do fluxo da massa ciclada de metanol. Para o dimensionamento do evaporador/condensador foram considerados os processos de transferência de calor e de massa que atravessam a superfície na representação esquemática do volume de controle da câmara do evaporador/condensador da Figura 6.5.

O condensador – é o dispositivo onde ocorre a mudança de fase gás-líquido do adsorvato, quando este se desloca vindo do adsorvedor. O dimensionamento térmico do condensador, descrito no Apêndice B, tem como base a potência térmica dissipada na água durante a mudança de fase gás-líquido do metanol.

A potência térmica do condensador é $q_{con} = 10,05W$ e, sendo assim, a área de troca de calor é de $212cm^2$.

O evaporador - é o dispositivo onde ocorre a produção do efeito frigorífico. Este efeito tem origem na mudança de fase líquido-gás do adsorvato; no momento em que este se desloca com destino ao adsorvedor. A mudança de fase do adsorvato retira calor das paredes metálicas do evaporador e conseqüentemente da água que o envolve externamente, causando o efeito frigorífico em todo o interior da câmara.

Um balanço de energia nesse componente mostra que além de resfriar a água, sua principal função, parte da energia da mudança de fase do metanol é usada para atuar sobre o resfriamento do evaporador, do ar no interior da câmara e de outros materiais aí existentes.

No dimensionamento térmico do evaporador, descrito no Apêndice C, considerou-se as transferências de calor e de massa ocorridas no interior da câmara frigorífica. A potência térmica correspondente à quantidade de metanol que evapora é $q_{evap} = 9,0W$.

6.2.4 O sistema de trocador de calor convectivo de gelo

O sistema de trocador de calor convectivo de gelo, STC, serve para reduzir de maneira controlada, e quando necessário, a temperatura do reator. Este sistema é basicamente constituído de um reservatório para termoacumulação de gelo e de um conjunto de três ventiladores para insuflar o ar. Também faz parte deste sistema uma tela de aço inox (assentada na parte interna da câmara do reservatório), a qual foi projetada para reter os blocos de gelo evitando que atinjam os ventiladores, e também impedindo-os de saírem pela abertura frontal.

Na parte do ciclo de refrigeração adsortiva em que se deseja esfriar o reator, os ventiladores do STC são acionados. Neste momento o ar ambiente é impulsionado pelos ventiladores para dentro da câmara do reservatório de termoacumulação, onde se encontram blocos cilíndricos vazados de gelo. Esta convecção forçada do ar, circulando por entre os espaços vazados do gelo, resfria-o. O ar, agora resfriado, sai do reservatório por uma abertura frontal e vai de encontro ao reator diminuindo a sua temperatura. Um sistema eletrônico controla a velocidade dos ventiladores com o intento de se obter a estabilização (ou permitir apenas uma pequena variação) da temperatura de refriamento do reator.

As paredes internas da câmara do reservatório de termoacumulação de gelo, são de EPS com 15mm de espessura. O reservatório tem suas paredes externas construídas de madeira com 10mm de espessura. Ele possui as seguintes dimensões externas: 260mm de comprimento, 150mm de altura e 200mm de profundidade.

A água, resultante da mudança da fase sólida para a líquida, é drenada pela parte inferior do termoacumulador. Uma válvula, de acionamento manual, controla a saída desta água.

A parte superior do reservatório é coberta por uma peça móvel e permite o acesso à câmara de acumulação de gelo. É por esta abertura que se insere os pequenos blocos de gelo.

A Figura 6.6 ilustra o sistema de trocador de calor convectivo de gelo.

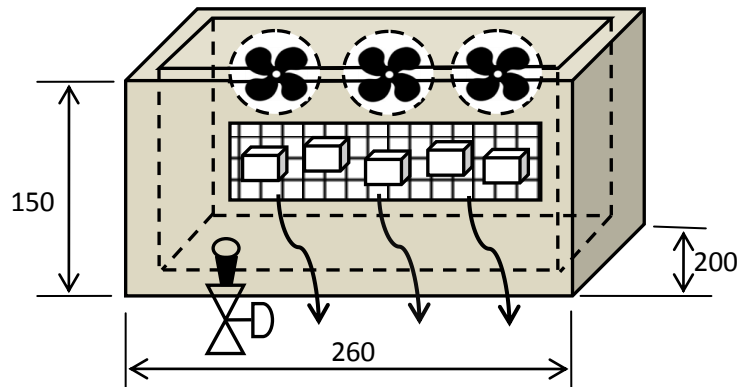


Figura 6.6 Sistema de trocador de calor convectivo de gelo.

6.2.5 O sistema de aquecimento resistivo aplicado ao reator

O sistema de aquecimento resistivo consiste de uma resistência de fio de níquel-cromo e cuja isolamento elétrica é feita por folha de mica. A resistência de fio, depois de isolada, é recoberta por uma chapa maleável de aço inox 304. A chapa de aço é moldada adquirindo a forma de um cilindro, cujo diâmetro é suficiente para envolver o reator. A potência máxima dissipada pelo aquecedor resistivo é de 250W sob uma tensão elétrica de 220V.

O aquecedor resistivo é flexível e foi construído para que possa ser facilmente retirado ou inserido no sistema. Para uma melhor fixação do aquecedor ao reator, duas abraçadeiras metálicas tipo fita, são utilizadas com esta finalidade.

A temperatura do aquecedor resistivo, e conseqüentemente a temperatura do reator adsorptivo ligado a ele, é controlada por meio de um circuito eletrônico denominado LESTHYR-05. O circuito eletrônico atua sobre a tensão elétrica que alimenta o aquecedor resistivo, controlando a potência elétrica que é entregue ao mesmo. O algoritmo de controle utilizado no atuador é o Proporcional-Integral-Derivativo.

A Figura 6.7 mostra o aquecedor resistivo do tipo envolvente, que faz parte do sistema de aquecimento resistivo.

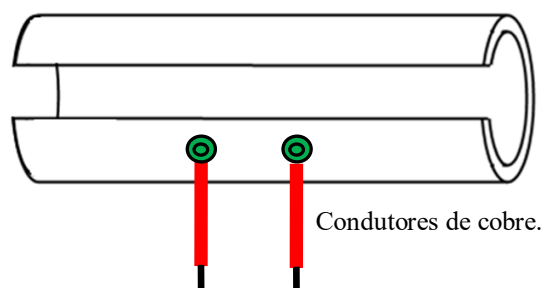


Figura 6.7 Aquecedor resistivo do tipo envolvente.

6.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS ELEMENTOS DO SISTEMA

A caracterização física dos elementos de um sistema é um dado relevante posto que estes valores são utilizados em modelagens de processos, equações de balanço e também são pré-requisitos para determinação de parâmetros de projeto.

6.3.1 Caracterização física do adsorvente e do adsorvato

O adsorvente utilizado é o carvão ativado AC-35, fabricado pela indústria francesa CECA. Este carvão tem o formato de bastonete cilíndrico com as dimensões médias de 3mm de comprimento e 2mm de diâmetro.

Neste carvão ativado os espaços vazios representam 78% do volume total. Metade do volume livre corresponde a espaços intercristalinos, e a outra metade aos poros no interior dos grãos. O volume de microporos no carvão ativado AC-35 é de cerca de 0,4 litros/Kg. O carvão ativado AC-35 é obtido de madeira de pinho e seu princípio ativo é decorrente de um processo de aquecimento a temperatura de 950°C, em presença de vapor de água. As isósteras do par carvão ativado AC-35/metanol foram levantadas experimentalmente por outros pesquisadores, e conseqüentemente, foram determinados os parâmetros da equação de Dubinin-Astakhov (PONS e GRENIER, 1986; GUILLEMINOT et al, 1987).

O adsorvato utilizado, álcool metílico, é fabricado pela indústria brasileira Labsynth Produtos para Laboratório Ltda. As propriedades do metanol são disponibilizadas pelo seu fabricante.

Os valores dos parâmetros da equação de estado, bem como das propriedades, do carvão ativado AC-35/metanol encontram-se no Anexo A.

6.3.2 Caracterização física do leito adsortivo

O leito adsortivo teve sua caracterização física determinada através da sua porosidade e da sua densidade de empacotamento. Os cálculos para a determinação da porosidade e da densidade de empacotamento encontram-se no Apêndice D. A Figura 6.8 mostra o adsorvedor e suas partes constituintes.

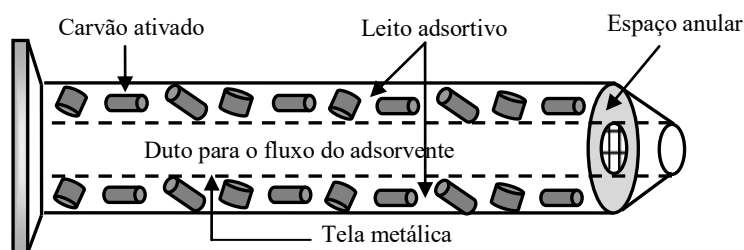


Figura 6.8 Adsorvedor e suas partes constituintes

Determinação da porosidade do leito- a porosidade do leito consiste no cálculo da fração de vazios existente no leito, ou seja, o espaço que não foi ocupado pelo carvão ativado.

Dentro do interior do cilindro de inox do adsorvedor, existem dois compartimentos concêntricos, os quais são separados por uma tela metálica de aço inox. O leito adsortivo situa-se no espaço anular existente no cilindro de aço inox do adsorvedor. O espaço anular é o espaço que é ocupado pelo adsorvente, carvão ativado, enquanto o espaço cilíndrico de menor diâmetro, forma um duto por onde circulará o adsorvato na fase gasosa.

O espaço anular gera o volume útil do leito adsortivo, o qual é preenchido pelo adsorvente. O volume útil do leito adsortivo é $V_{LU} = 439279,4683\text{mm}^3$ ou $44 \times 10^4\text{mm}^3$

De posse do volume útil, V_{LU} , determinou-se a massa de adsorvente, M_{Ads} , no leito. O valor médio da massa de adsorvente é, $M_{Ads} = 172,83g$.

Com os dados do volume útil, V_{LU} , e da massa de adsorvente, M_{Ads} , calculou-se a porosidade média do leito, $\varepsilon_L = 0,068$.

Para o preenchimento do leito nos experimentos realizados, seguiu-se o mesmo procedimento ora apresentado, com o objetivo de servir de parâmetro representativo entre todos os experimentos realizados e futuros.

Determinação da densidade de empacotamento do leito- a partir da determinação da massa média do adsorvente comportada pelo leito e de seu volume útil, V_{LU} , calculou-se a densidade de empacotamento do leito, ρ_{LU} , que é $\rho_{LU} = 392,77Kg m^{-3}$.

Resumo dos valores médios- através dos valores médios dos dados obtidos pelos procedimentos apresentados, a caracterização física do leito adsorativo pode ser resumida pela Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Caracterização física do leito

Diâmetro Interno, ϕ_L (mm)	49,4
Comprimento, C_L (mm)	300
Volume Interno Útil, V_{LU} (mm ³)	44.10 ⁴
Porosidade , ε_L	0,068
Densidade de Empacotamento, ρ_{LU} (Kg.m ⁻³)	392,77

6.4 GRANDEZAS MEDIDAS

Os testes experimentais envolvem a medida, em tempo real, das seguintes grandezas: pressão interna do sistema de refrigeração, temperaturas em distintos pontos do adsorvedor, temperaturas do condensador / evaporador e também a massa de adsorvato no condensador / evaporador.

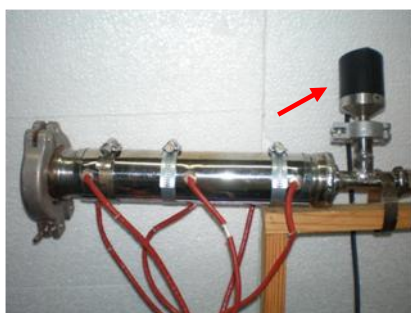
A seguir são descritos os instrumentos de medida utilizados e o sistema desenvolvido para a aquisição automática dos dados.

6.4.1 Medidas de pressão interna do sistema

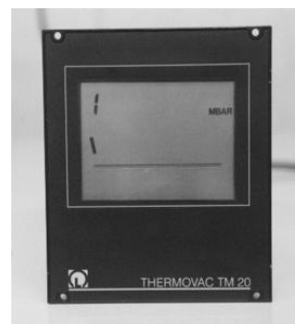
Para medir a pressão no sistema foi utilizada uma sonda piezométrica de alta precisão, Piezovac PV 20, da Leybold, conectada ao módulo indicador e transmissor Thermovac TM 20 que possui um display em LCD e indica o valor da pressão medida e sua respectiva unidade. A sonda e o módulo podem ser vistos nas Figuras 6.9a e 6.9b.

O módulo indicador e transmissor de pressão possui um regulador de medidas de pressão que permite sua medida numa faixa de $5 \cdot 10^{-4}$ a 1.000 mbar, ou de $5 \cdot 10^{-4}$ a 2.000 mbar. O módulo possui, também, um seletor que permite ainda a medida da pressão em Pa e Micron.

O sinal de pressão é transmitido em forma de tensão elétrica e opera entre 0 e 5Vcc para a primeira faixa de pressão, ou 0 e 10Vcc para a segunda faixa de pressão. Neste experimento utilizou-se a faixa de medida de $5 \cdot 10^{-4}$ a 1.000 mbar com 0 a 5Vcc de saída.



(a)



(b)

Figura 6.9 Instrumentação utilizada para medir a pressão: (a) sonda piezométrica instalada na tubulação do refrigerador e (b) módulo indicador e transmissor Thermovac TM 20.

6.4.2 Medidas de temperatura

As medidas de temperatura no adsorvedor foram realizadas em pontos distintos: na superfície externa e no interior do tubo cilíndrico do adsorvedor, na superfície externa e no interior do tubo cilíndrico do condensador/evaporador.

Para a medição da temperatura utilizou-se sensores denominados de termorresistências ou RTDs (Resistance Thermometer Detector). Estes sensores operam baseados no princípio da variação da resistência elétrica de um metal (platina, níquel ou cobre), em função da temperatura a eles aplicada. O RTD transforma a grandeza temperatura em resistência elétrica onde normalmente a equação Callendar-Van Dusen é para aproximar a curva do termorresistor.

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)] \quad (6.1)$$

onde R_t é a resistência do RTD a uma temperatura qualquer $= t$ (°C); R_0 é a resistência do RTD a 0°C, t é a temperatura em °C, sendo que A, B e C são os coeficientes de Callendar-Van Dusen mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. Coeficientes Callendar-Van Dusen Correspondentes aos RTDs de platina.

Padrão	Coeficiente temp.(a)	A	B	C*
DIN 43760/IEC751	0,003850	$3,9080 \times 10^{-3}$	$-5,8019 \times 10^{-7}$	$-4,2735 \times 10^{-12}$
American	0,003911	$3,9692 \times 10^{-3}$	$-5,8495 \times 10^{-7}$	$-4,2325 \times 10^{-12}$
ITS-90	0,003926	$3,9848 \times 10^{-3}$	$-5,870 \times 10^{-7}$	$-4,0000 \times 10^{-12}$

* Somente para temperaturas abaixo de 0°C.

Para temperatura acima de 0°C, quando o coeficiente $C=0$, a equação 6.1 pode ser simplificada para uma equação quadrática:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2] \quad (6.2)$$

Segundo Orlando (2003) a equação 6.1 tem sido utilizada por Institutos Nacionais de Metrologia para interpolar entre os pontos fixos que definem a escala internacional de

temperatura. Ele também apresenta uma forma alternativa para a equação 6.1, aplicada a sensores de platina do tipo Pt-100, que é :

$$R = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta X - \beta \left(\frac{t}{100} \right)^2 \right] X \right\} \quad 6.3$$

Onde

$$X = \left(\frac{t}{100} \right) \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \quad 6.4$$

Sendo que $\beta = 0$ para $t > 0^\circ\text{C}$.

Os valores nominais dos coeficientes encontram-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Coeficientes da Equação Callendar-Van Dussen – Valores Nominais

PARÂMETRO	DIN 43760/IEC 751
R_0	100 Ω
A	0,00390802
B	$-5,80195 * 10^{-7}$
C	$-4,27350 * 10^{-12}$
α	0,00385000
β	1,50700
δ	0,111

O tipo do RTD utilizado neste experimento é o sensor à resistência de platina, denominado Pt-100/classe de precisão B (existem outros tipos de Pt, tais como: Pt-25,5; Pt-120; Pt-130; Pt-500 e Pt-1000). Este sensor, construído de fios de platina de alta pureza (99,999%), apresenta uma resistência elétrica de 100 Ω na temperatura de 0 $^\circ\text{C}$. O termômetro de platina foi escolhido por ter um baixo custo e atender às medições na faixa de temperatura de operação. Suas principais características são: alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, repetibilidade e linearidade na relação das grandezas

resistência elétrica \times temperatura. RTDs comumente utilizados na indústria têm deriva menor do que $0,1^\circ\text{C}/\text{ano}$, e alguns modelos têm desvio menor do que $0.0025^\circ\text{C}/\text{ano}$.

A seguir a Tabela 6.4 apresenta as classes de tolerância para Pt-100 (ABNT, 1997b).

Tabela 6.4 Classes de tolerância para PT-100

Classe	Tolerância
A	$0,15 + 0,002t$
B	$0,30 + 0,005t$

A Tabela 6.5 apresenta os limites de erro para Pt-100 classes A e B (ABNT, 1997b).

Tabela 6.5 Limites de erro para Pt-100 classes A e B

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	TOLERÂNCIA	
	Classe A (\pm $^\circ\text{C}$)	Classe B (\pm $^\circ\text{C}$)
-200	0,55	1,3
-100	0,35	0,8
0	0,15	0,3
100	0,35	0,8
200	0,55	1,3
300	0,75	1,8
400	0,95	2,3
500	1,15	2,8
600	1,35	3,3
650	1,45	3,6
700	—	3,8
800	—	4,3
850	—	4,6

Na Figura 6.10(a) e 6.10(b) pode-se observar respectivamente: o sensor Pt-100 planar (utilizado nas medidas de temperatura das superfícies) e o Pt-100 de bainha metálica (utilizado nas medidas no interior do tubo cilíndrico). Na Figura 6.11 apresenta-se a constituição interna do sensor Pt-100 com bainha.

Na Figura 6.12 observa-se o local de aplicação do Pt-100 planar. Para a pré-instalação do Pt-100 no adsorvedor tubular utilizou-se um adesivo gel de rápida polimerização a base de éster de cianoacrilato, Figura 6.12(a). Para finalizar o processo de fixação do Pt-100, e também protegê-lo contra choques mecânicos e umidade, o mesmo foi recoberto por uma camada de elastômero de silicone (Figura 6.12(b)). Na Figura 6.13 apresenta-se o local de aplicação do Pt-100 com bainha metálica.

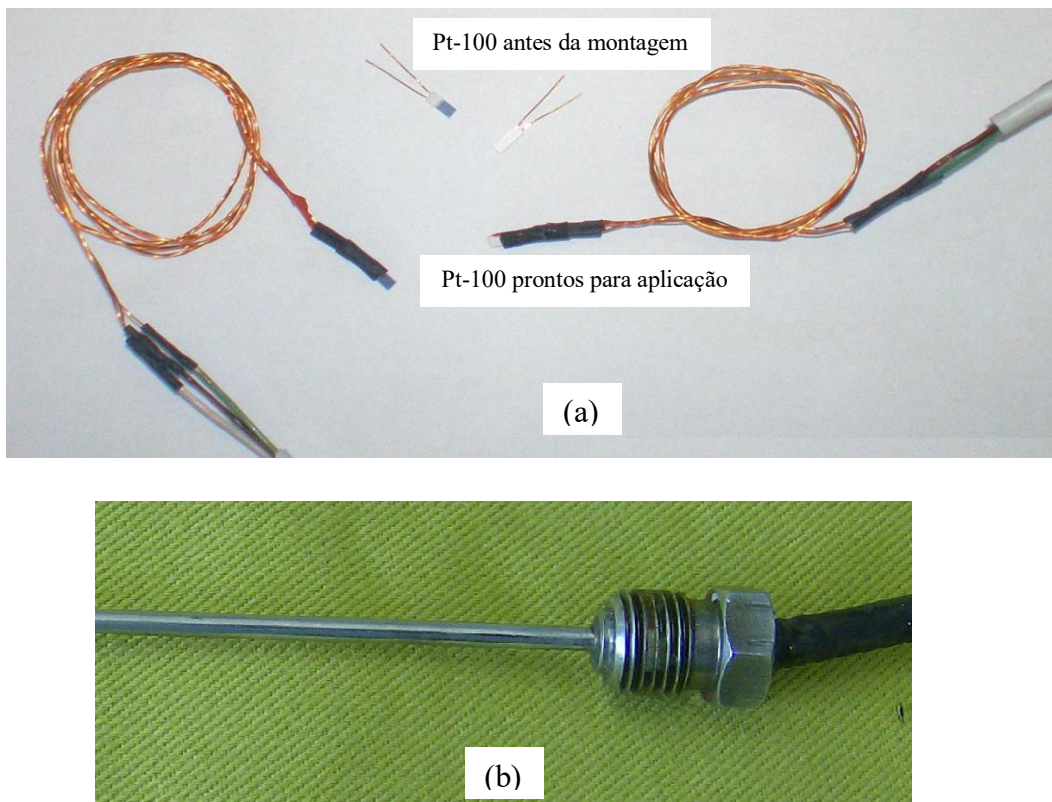


Figura 6.10 (a) Sensor Pt-100 tipo planar e (b) com bainha metálica.

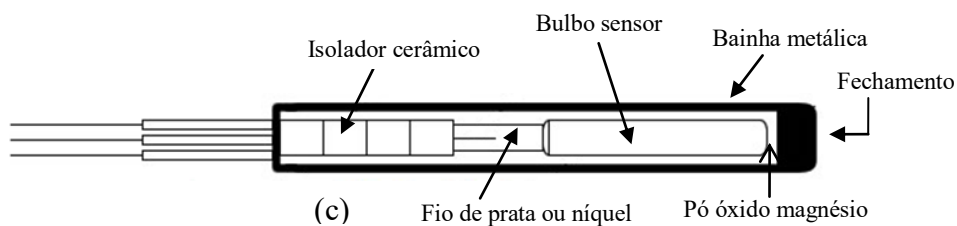


Figura 6.11 Componentes internos do Pt-100 com bainha metálica

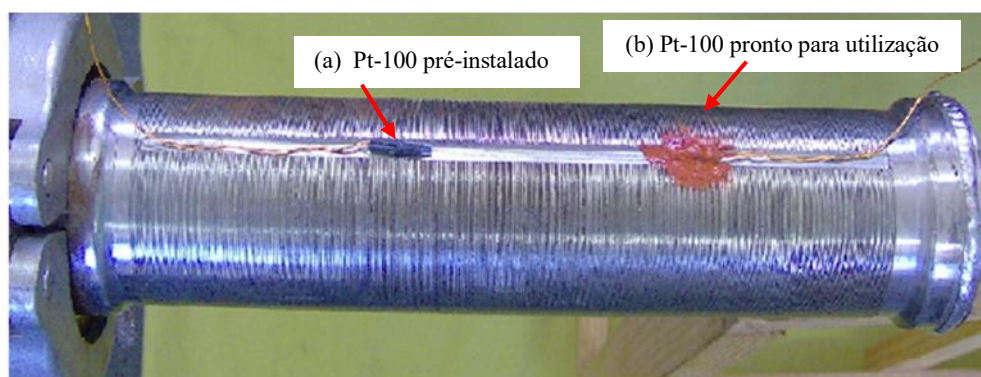


Figura 6.12 Vista de topo do adsorvedor tubular, com a localização do sensor Pt-100.

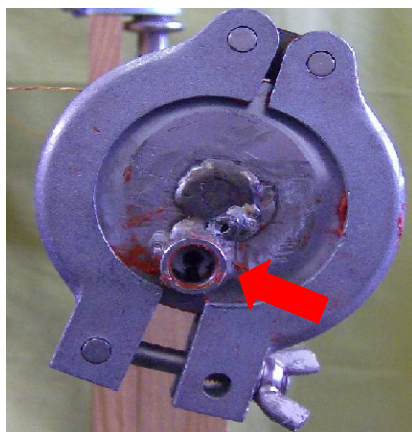


Figura 6.13 Vista lateral do adsorvedor com indicação do local de inserção do Pt-100 com bainha metálica.

Para medir as temperaturas foram instalados oito sensores de temperatura, sendo 1 para medir a temperatura ambiente, 5 no adsorvedor e 2 no condensador/evaporador. No adsorvedor utiliza-se 4 sensores na parede externa do tubo e 1 na parte interna em contato

com o carvão (sensor do tipo com bainha - mede temperatura do leito adsortivo). No condensador/evaporador tem-se um sensor, do tipo com bainha, na parte interna do tubo e mais um sensor na parede externa do tubo.

Calibração dos RTDs – A utilização de termorresistores está sempre associada a um circuito condicionador de sinais. Este circuito condicionador de sinais é um circuito eletrônico e é imprescindível ao nosso experimento, pois converte a variação de resistência elétrica do RTD em uma tensão elétrica proporcional a esta alteração.

Tanto o RTD quanto o circuito condicionador de sinais apresentam não linearidades durante seu funcionamento. Sendo assim torna-se necessário uma correção para uma acertada interpretação da medição dos valores da temperatura.

A calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. Logo, este procedimento visa minimizar os efeitos das não linearidades dos sensores e circuitos. A calibração foi realizada para o conjunto Pt-100/condicionador de sinais, seguindo um procedimento modificado da norma NBR 13772 (ABNT, 1997a). Apesar da utilização de apenas 8 sensores Pt-100, foram calibrados o dobro de sensores como estratégia de segurança

Desenvolveu-se um programa computacional, na plataforma LabView, para coletar os dados de tensão de cada conjunto Pt-100/condicionador de sinais. Estes dados deram origem a equações de ajustes que foram introduzidas no software de supervisão e controle. A Figura 6.14 ilustra a interface gráfica desenvolvida para calibração dos sensores Pt-100/condicionador de sinais. Os dados coletados são apresentados em tempo real e armazenados em uma planilha eletrônica.

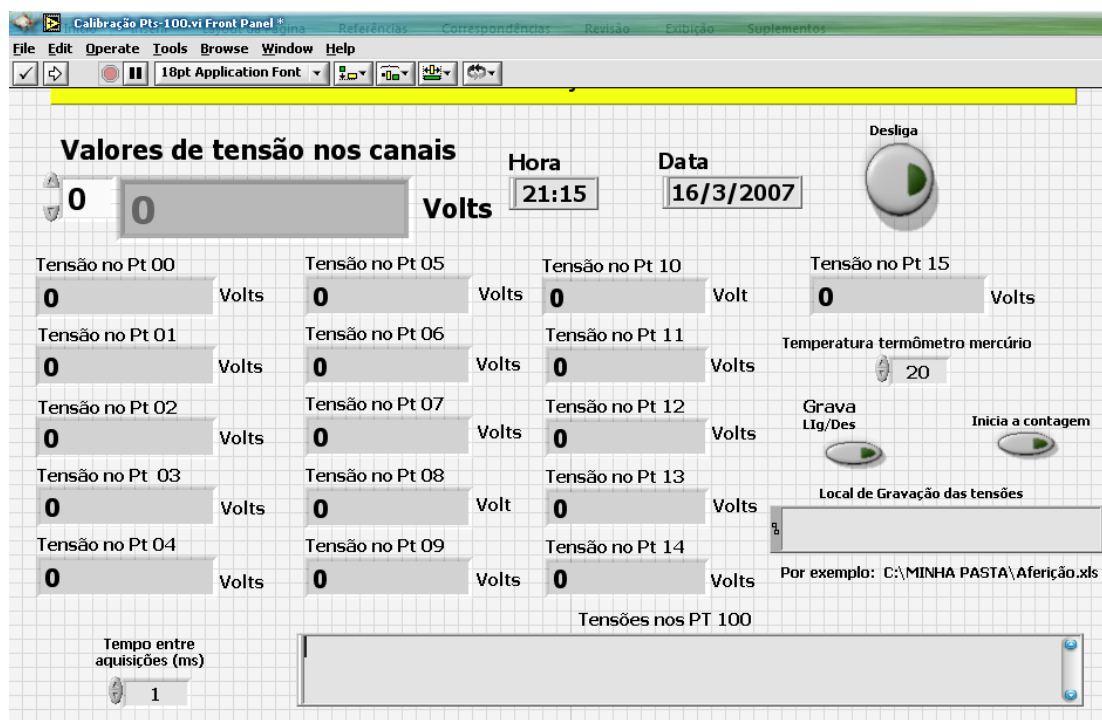


Figura 6.14 Interface gráfica para calibração dos sensores Pt-100/condicionador de sinais.

As curvas de calibração de cada um dos sensores foram levantadas considerando-se o comprimento total dos respectivos cabos de transmissão do sinal e, como já mencionado, o circuito eletrônico de condicionamento de sinal. O Apêndice E traz a descrição da calibração dos Pt-100 e as equações de correlação levantadas para cada conjunto sensor/condicionador de sinais.

6.4.3 Medidas de pressão

A medida de pressão no leito adsorativo foi realizada por intermédio do sensor DI 2000 que leva seu sinal até o transmissor de pressão PV 20, o qual depois de tratá-lo apresenta-o em um indicador de uma tela de cristal líquido incorporada ao equipamento. A faixa de indicação do PV 20 vai de 0 a 1000 milibar cuja resolução é de 1 milibar.

O transmissor de pressão conforma o sinal do sensor DI 2000 para um sinal de tensão elétrica situado na faixa de 0 a 5Vcc. Este sinal é disponibilizado em um borne com dois terminais situados na parte trazeira do transmissor e é conduzido por meio de um cabo elétrico até o módulo NI-FP-AI120/NI-FP1000 e daí até o computador.

A calibração do transmissor de pressão – desenvolveu-se um programa computacional, na plataforma LabVIEW, para coletar os dados do transmissor de pressão e gerar o par pressão (P) indicada na tela do PV 20 versus tensão (U) coletada pelo LabVIEW. A partir do conjunto dos pontos P-U, ajustou-se uma reta correlacionando estes valores. Estes dados originaram uma equação de ajuste que foi introduzida no software de supervisão e controle. A Figura 6.15 mostra a tela para aquisição de dados das tensões do transmissor de pressão PV 20 e para a inserção do valor da pressão de referência. A Figura 6.16 mostra a curva de calibração do sensor de pressão DI2000.



Figura 6.15 – Tela para aquisição de dados do sensor de pressão DI2000.

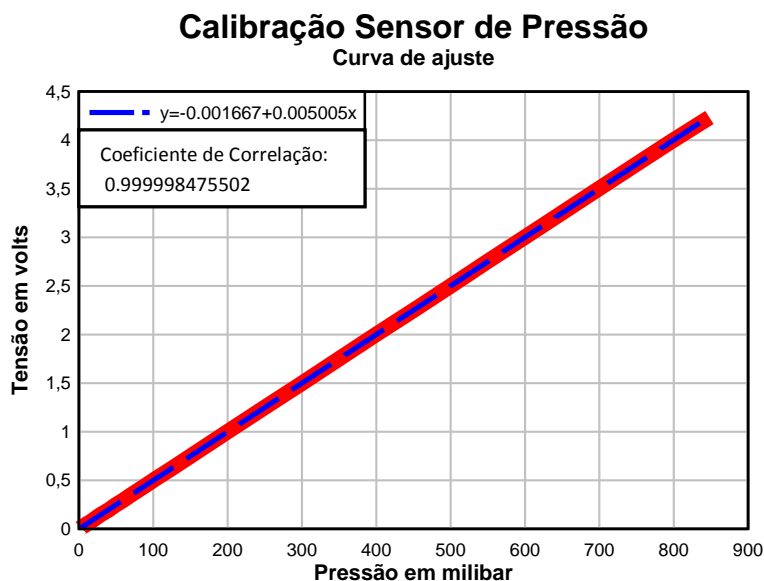


Figura 6.16 Curva de calibração do sensor de pressão DI2000.

6.4.4 Medidas da massa do adsorvato dessorvido e adsorvido durante o ciclo de refrigeração

Pesquisadores têm utilizado recipientes transparentes e graduados para mensurar a massa de adsorvato que se desloca durante o ciclo. Em muitas destas situações este recipiente é posicionado entre o condensador e o evaporador e se destina a medir o líquido condensado. Este procedimento requer a existência de uma válvula, entre o evaporador e o recipiente de coleta. A válvula deve permanecer fechada, durante o tempo da fase de dessorção, enquanto se realiza a medição. Por outro lado quando se deseja mensurar a massa do líquido evaporado, o evaporador, tradicionalmente metálico, é substituído por um vaso de vidro graduado.

Neste experimento o evaporador/condensador repousa sobre uma balança digital, e esta serve para medir a massa de adsorvato que circula no sistema. O valor da massa medida é apresentado no frontal da balança. A informação da massa medida pela balança também é transformada em dados digitais e enviada a um computador. A Figura 6.17 apresenta o conjunto evaporador/condensador-balança digital-computador.

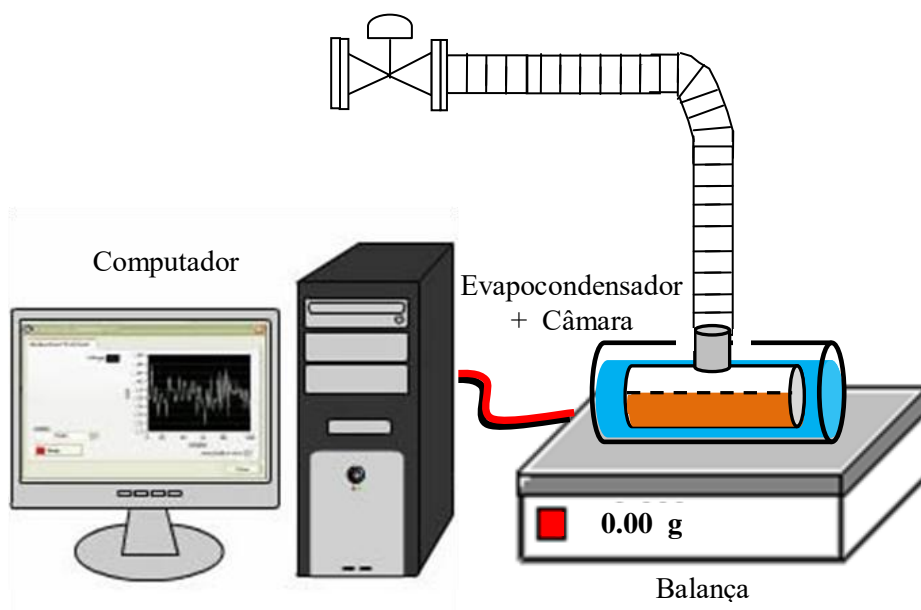


Figura 6.17 Conjunto evaporador/condensador-balança digital-computador

A massa de metanol, que está sempre circulando entre o adsorvedor e o evaporador durante o ciclo adsorptivo, é mensurada através de uma balança semi-analítica modelo Kern EW 4200, da empresa Kern & Sohn. A resolução da balança é de 0,01g e ela opera segundo o método da indicação através de um display de cristal líquido (BELOV, 1997). Vale salientar que a balança está sempre conectada ao aparato experimental (evaporador/condensador).

O protocolo de comunicação da balança foi fornecido pelo fabricante o que possibilitou a construção de um programa computacional de comunicação com o software de instrumentação virtual desenvolvido para este projeto. Por conta disto, as medições realizadas pela balança são enviadas em tempo real (por meio de uma porta serial de comunicação) para o computador de supervisão e controle do sistema. A balança, além de apresentar o valor da massa na tela do monitor de vídeo, armazena os dados e os disponibiliza para outros aplicativos. A Figura 6.18 mostra esta balança.



Figura 6.18 Balança semi analítica com resolução de 0,01g.

6.4.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de automação é responsável pela aquisição e gerenciamento dos dados do experimento. As informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e em seguida enviadas a um computador, onde são devidamente tratadas e armazenadas. O sistema de aquisição de dados usa equipamentos da National Instruments.

O computador utiliza um software aplicativo especialmente desenvolvido no programa LabVIEW 6.1 para converter em unidade de engenharia adequada o sinal elétrico recebido. Os dados, então, são armazenados em arquivos padronizados e a partir daí são acessados por um programa de usuário e os cálculos necessários são realizados.

Na Figura 6.19 encontram-se os componentes físicos do sistema de aquisição de dados, baseado no sistema FieldPoint da National Instruments. Em 6.19(a) apresenta-se o módulo de comunicação, NI-FP1000. Este módulo está ligado ao computador de supervisão e controle através da porta serial de comunicação. Ele é responsável por receber as informações oriundas do módulo de entradas analógicas, NI-AI-112, codificar estes valores, colocá-los em um protocolo de comunicação e por último enviá-los (via barramento de comunicação) para o computador. Ele também é responsável por receber do computador, via barramento de comunicação, os dados inseridos em um protocolo de

comunicação. Estes dados são decodificados e entregues ao módulo de saídas analógica NI-FP-210.

Na Figura 6.19(b) mostra-se o módulo de entradas analógicas de 16 canais, NI-AI-112. Ele recebe o sinal de tensão elétrica, oriundo do condicionador de sinais (que está acoplado ao Pt-100), dirigindo-o ao módulo de comunicação NI-FP1000.

Na Figura 6.19(c) mostra-se o módulo de saídas analógicas de 16 canais, NI-AO-210. Ele recebe os dados oriundos do computador, via NI-FP1000, e aciona suas saídas em tensão que vão para o atuador do aquecedor resistivo do adsorvedor ou para o atuador do controle de velocidade dos ventiladores do circuito de resfriamento do adsorvedor.

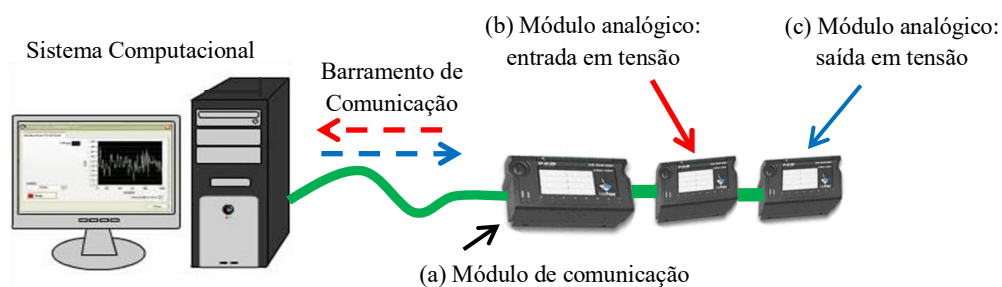


Figura 6.19 Componentes físicos para aquisição de dados do sistema de automação.

6.4.6 A Instrumentação do protótipo

O protótipo foi instrumentado segundo a conceituação de instrumentação virtual para computador. A instrumentação virtual foi desenvolvida na plataforma do software denominado LabVIEW. A programação realizada com o LabVIEW utiliza o conceito de programação gráfica (MIHURA, 2001; BISHOP, 2006).

Na instrumentação utilizou-se os seguintes componentes/dispositivos: computador do tipo PC, balança digital, módulo de entradas analógicas, módulo de saídas analógicas, módulo de comunicação de rede, transdutor/transmissor de pressão, transdutores de temperatura, circuitos eletrônicos condicionadores de sinal para sensores de temperatura, circuito eletrônico para controle de aquecimento, circuito eletrônico para controle de

resfriamento. Na Figura 6.20 apresenta-se o diagrama em blocos e o fluxo de sinal, dos elementos utilizados na instrumentação.

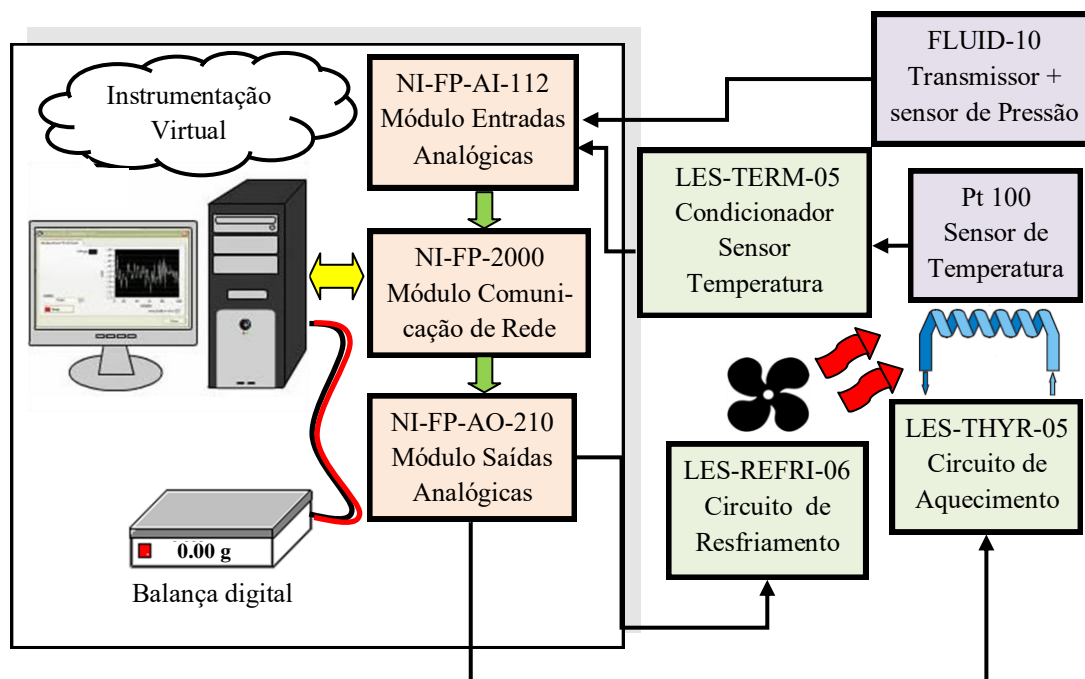


Figura 6.20 Diagrama em blocos dos elementos da instrumentação.

O transdutor de pressão é do tipo piezorresistivo, sensor Di 2000 da marca LEIBOLD; o indicador e transmissor de pressão é o PV 20 da marca PIEZOVAC, com saída em tensão de 0-5 volts. O transdutor de pressão está instalado próximo ao adsorvedor e destina-se a medir a pressão no leito adsortivo.

Os sensores de temperatura são do tipo termorresistivos de platina, Pt-100. Os Pt-100 estão posicionados dentro do leito adsortivo, em contato com o carvão ativado; também estão posicionados dentro do evaporador/condensador, em contato com o adsorvato; na superfície externa do adsorvedor e na superfície externa do evaporador/condensador.

6.5 CONDIÇÕES OPERACIONAIS

No ciclo de refrigeração por adsorção, o componente adsorvedor tem uma função semelhante à de um compressor em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, realizando o transporte de fluido refrigerante (adsorvato) para o adsorvedor, durante o processo de adsorção ou para fora do adsorvedor, na dessorção. Essa transferência de massa ocorre devido a pequenos gradientes de pressão que se estabelecem, em função das diferentes temperaturas nos três componentes do sistema (adsorvedor-condensador-evaporador).

Para se obter as baixas temperaturas requeridas nos sistemas de refrigeração, é necessário que a pressão no interior do sistema seja inferior à atmosférica durante todas as etapas do ciclo. No presente protótipo de refrigerador, onde o fluido de trabalho é o metanol, as condições aplicáveis determinam que o adsorvedor trabalhe sob pressões que variam entre 25 e 250 hPa (os dispositivos descritos nos procedimentos adiante, podem ser verificados na Figura 6.21). Para se conseguir pressões dessa ordem, abrem-se as válvulas v_2 e v_3 , conecta-se (utilizando-se uma mangueira flexível) a bomba de vácuo da marca Edwards, modelo RV3 no sistema. Abre-se a válvula v_1 . Efetua-se o vácuo.

Em seguida fecha-se se a válvula v_1 e a válvula v_2 e mantém-se v_3 aberta. Desconecta-se a mangueira flexível e a bomba de vácuo. Conecta-se o alimentador de metanol, Figura 6.20, no mesmo conector onde estava a bomba de vácuo. Abre-se v_1 .



Figura 6.20 Alimentador de metanol

Por conta do aparato experimental encontrar-se à pressão negativa, o metanol é aspirado para o interior do refrigerador em direção ao evaporador, pois v_2 está

bloqueando o caminho para o adsorvedor. Fecha-se v_1 . A válvula v_1 só é aberta para estas duas operações (vácuo e carga de metanol), durante o funcionamento do refrigerador ela permanece fechada. Abre-se v_2 . A partir deste momento o sistema funcionará com v_1 sempre fechada e v_2 e v_3 sempre abertas.

O fluxo de metanol para carregar o sistema (seta vermelha), bem como os componentes do arranjo experimental podem ser observados na Figura 6.21.

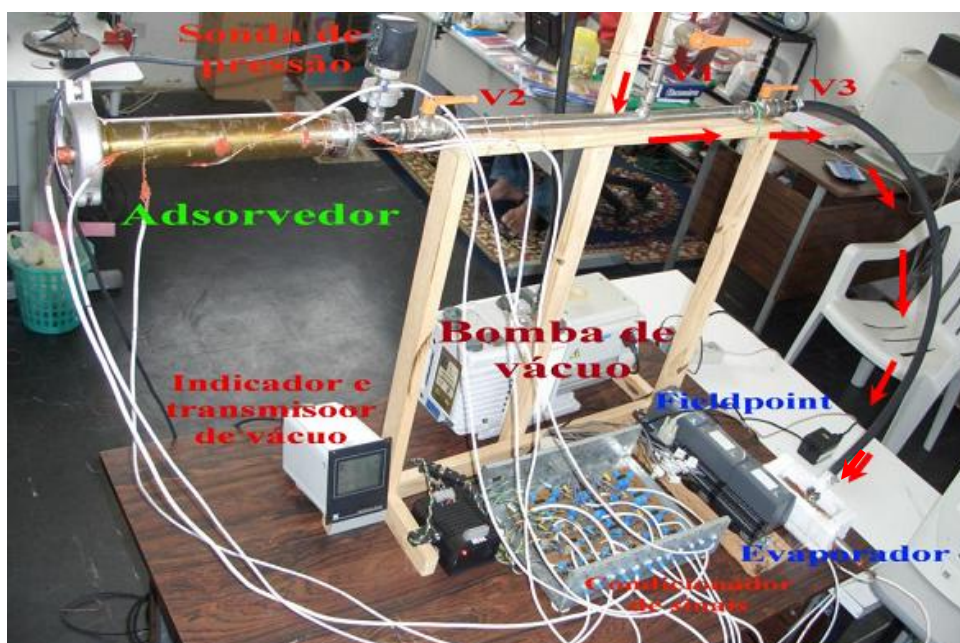


Figura 6.21 Componentes do experimento e fluxo de metanol na carga do sistema.

6.5.1 Inicialização do ciclo adsorativo

Com o metanol no evaporador e as válvulas em suas posições definitivas ($v_1 = \text{off}$, $v_2 = \text{on}$ e $v_3 = \text{on}$); dá-se início ao ciclo de refrigeração por adsorção, sendo este considerado um ciclo fechado e intermitente, ou seja, sem recuperação de calor.

A Figura 6.22 mostra um ciclo ideal de refrigeração por adsorção que servirá de base para a descrição do ciclo real que ora se inicia. Para melhor compreensão as quatro etapas do ciclo serão agrupadas em dois estágios.

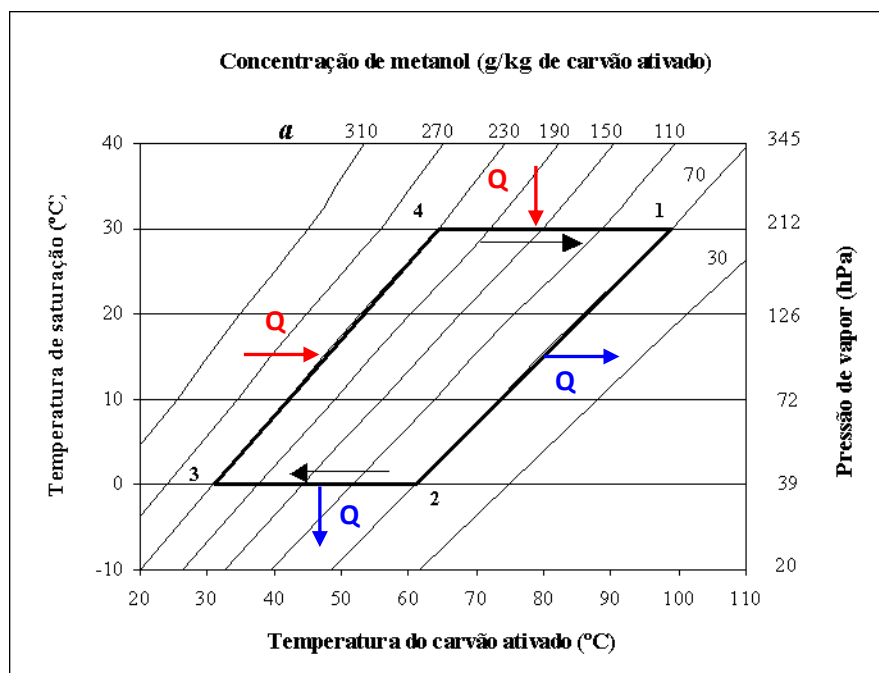


Figura 6.22 Ciclo termodinâmico ideal de um sistema de refrigeração por adsorção (as setas vermelhas indicam aquecimento do adsorvedor e as azuis indicam seu resfriamento).

Estágio 1: é neste estágio que o adsorvedor é previamente resfriado (processo 1 → 2) para receber o adsorbato gasoso (2 → 3). Esse processo segue teoricamente um processo isostérico (com concentração de fase adsorvida constante), até que o adsorbato no evaporador alcance um valor mínimo de pressão (ponto 2) e passe a fluir para o adsorvedor. O processo de adsorção (2 → 3) terá início, quando a pressão do adsorvedor decrescer abaixo da pressão do evaporador, até o primeiro atingir uma temperatura mínima (ponto 3).

Para execução do estágio 1, aciona-se os ventiladores do sistema trocador de calor convectivo de gelo. O ar passa pelo gelo e é direcionado para o adsorvedor tubular. O ar frio rouba calor do adsorvedor e reduz a temperatura no leito adsorativo para uma temperatura abaixo da temperatura ambiente (que é, também, a temperatura do evaporador neste momento).

A Figura 6.23(a) mostra o trocador de calor convectivo de gelo (TCG); na Figura 6.23(b) o adsorvedor e na Figura 6.23(c) o aquecedor resistivo envolvente. A Figura

6.24(a) mostra o conjunto dos três ventiladores insufladores de ar do TCG e a Figura 6.24(b) mostra a vista frontal do TCG onde se observa os blocos de gelo.

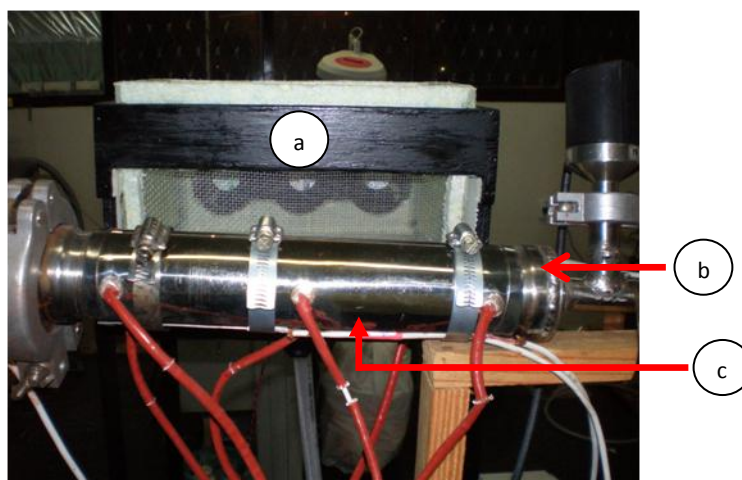


Figura 6.23 TCG (a), adsorvedor (b) e aquecedor resistivo (c).

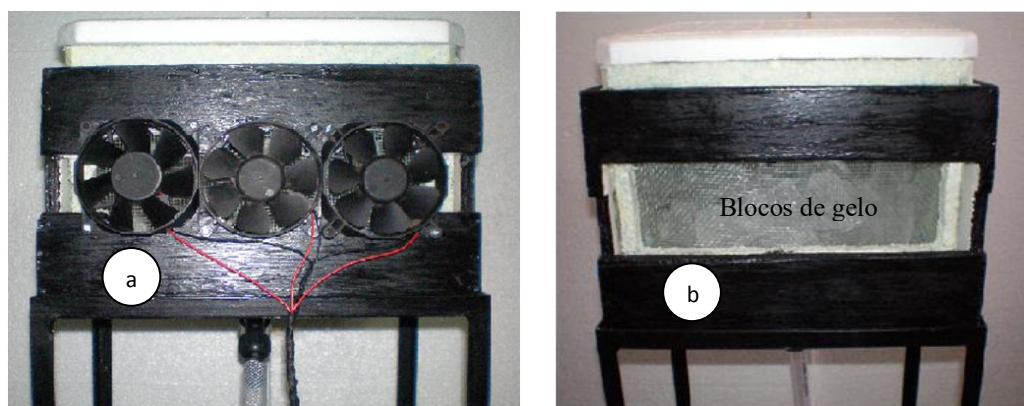


Figura 6.24 (a) Vista traseira do TCG, destacando os três ventiladores; (b) vista frontal destacando os blocos de gelo.

A diminuição da temperatura/pressão no leito adsortivo ensejará a evaporação do metanol, que se encontra no evaporador, causando o efeito frigorífico. O metanol é adsorvido pelo carvão ativado até o limite da concentração máxima para o par adsortivo carvão ativado-metanol. A Figura 6.25 mostra, em azul, o fluxo do metanol do evaporador ao adsorvedor.

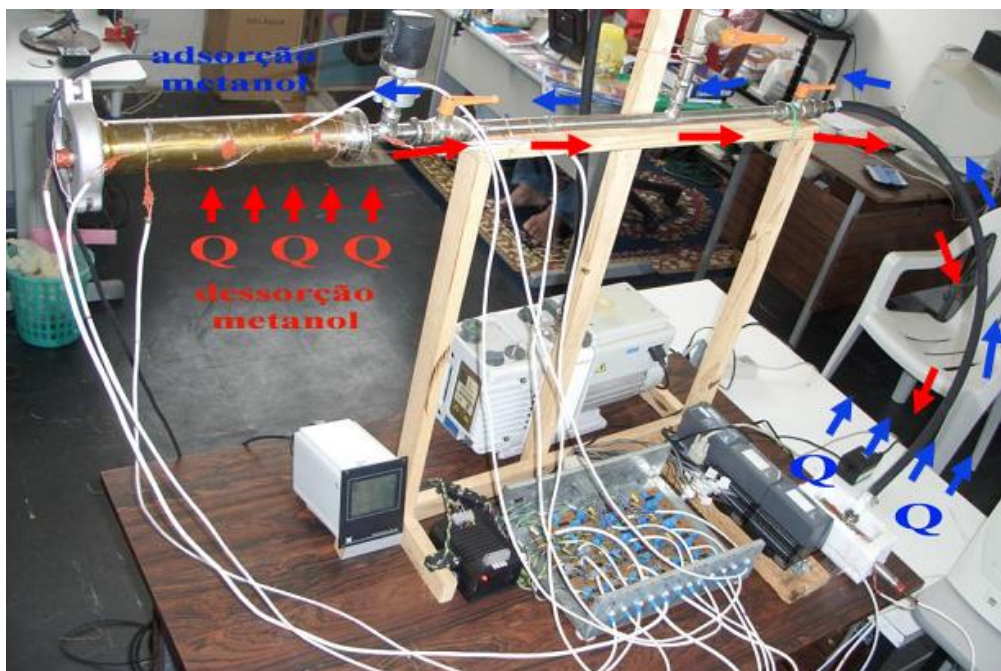


Figura 6.25 Fluxo do metanol evaporador \rightarrow adsorvedor, em azul e adsorvedor \rightarrow evaporador em vermelho.

Estágio 2: este estágio é o de regeneração, no qual o adsorvedor é aquecido ($3 \rightarrow 4$) para permitir a transferência do adsorvato para o condensador ($4 \rightarrow 1$), completando, assim, o ciclo.

No ponto 3 inicia-se o aquecimento do adsorvedor ($3 \rightarrow 4$), pela ação do aquecedor resistivo envolvente (Figura 6.26), até que a pressão em seu interior supere a pressão de condensação (ponto 4), quando, então, inicia-se a transferência do adsorvato em fase gasosa para o condensador ($4 \rightarrow 1$), onde ele passa à fase líquida, completando, desta forma, o ciclo (ponto 1). O evaporador/condensador pode ser melhor observado na Figura 6.27.

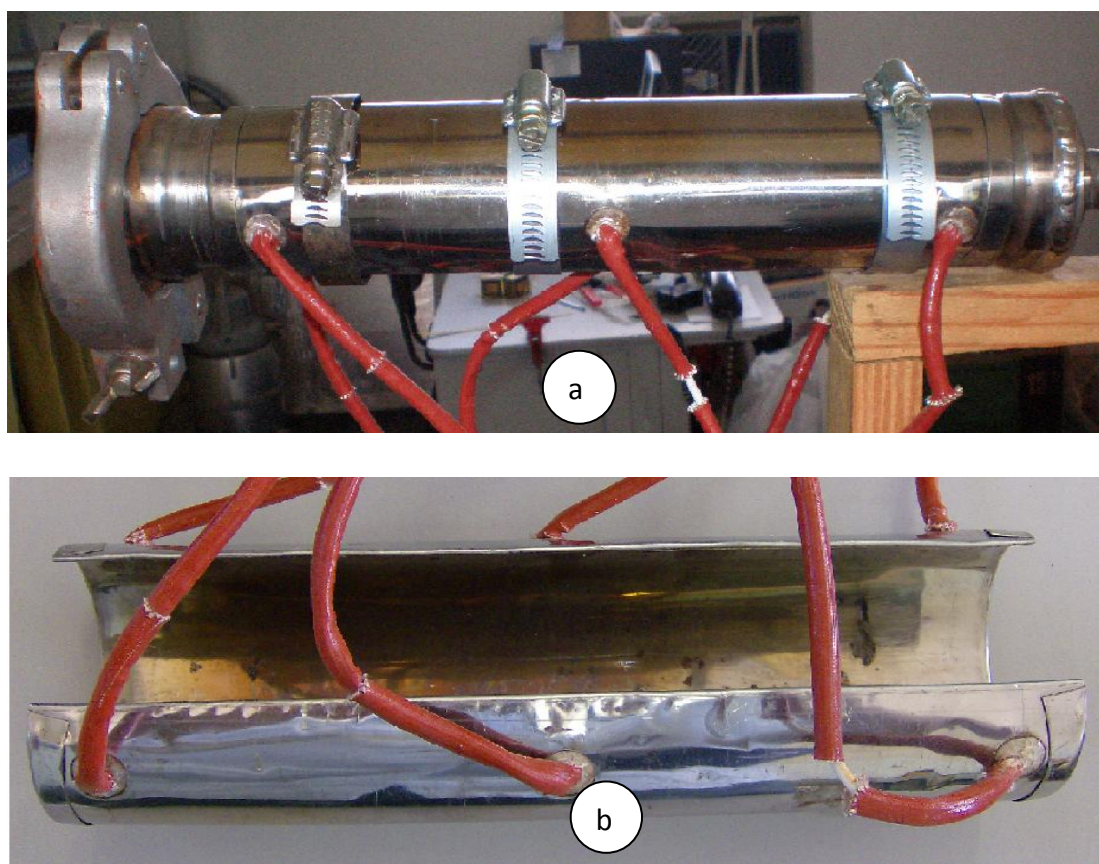


Figura 6.26 (a) Aquecedor resistivo envolvendo adsorvedor e (b) detalhe do aquecedor resistivo fora do aparato experimental.



Figura 6.27 Vista parcial do aparato experimental com ênfase no sistema Fieldpoint, condicionador de sinais e condensador/evaporador.

6.6 INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO

Para possibilitar e facilitar a interação do usuário com o software do sistema de supervisão e controle desenvolveu-se uma interface gráfica. Esta interface, denominada de interface VMT, traz representações visuais do software do sistema de supervisão e controle.

A interface VMT é uma conjugação de três tipos de interface:

- *Interface gráfica de **V**isão geral*- apresenta uma visão global do processo, sob visualização imediata na operação do sistema. Apresenta os dados mais significantes à operação resumindo os principais parâmetros a serem controlados e/ou monitorados do processo .
- *Interface gráfica de **m**alhas*- apresenta o estado das malhas de controle exibindo, em forma de gráfico e em valores numéricos, os dados das variáveis controladas, tais como: setpoint e valor atual do controlador.
- *Interface gráfica de **t**endência histórica e real*- apresenta diversas variáveis simultaneamente, na forma gráfica de tendência real e com valores coletados on-line.

A interface VMT pode ser observada na Figura 6.28. Esta interface mostra, em tempo real, simultaneamente e de forma numérica, as seguintes variáveis do sistema: temperatura do leito adsorativo, temperatura da parede externa do adsorvedor, temperatura do metanol no interior do evaporador, temperatura da parede externa do evaporador. Apresenta em tempo real, simultaneamente e de forma gráfica e numérica, as variáveis: pressão no leito adsorativo e massa de metanol existente no evaporador. Apresenta em tempo real, simultaneamente, de forma gráfica, de forma gráfica de tendência real e de forma numérica dos valores de: setpoint, entrada e saída dos controladores PID. Além disso, também possibilita alterar os parâmetros dos controladores PID, tais como: setpoint, ganho proporcional K_p , tempo integral T_I e o tempo derivativo T_D .

A Tabela 6.6 apresenta um resumo das funcionalidades proporcionadas pela interface gráfica VMT.

Tabela 6.6 Resumo das funcionalidades da interface gráfica VMT

Componentes da Interface Gráfica VMT	Funcionalidades
Interface gráfica V isão geral	Mostra as principais variáveis de um sistema de refrigeração adsorptivo: temperatura e pressão do leito adsorptivo, quantidade de massa de adsorvato no adsorvente em cada ciclo.
Interface gráfica m alhas	Apresenta os valores de setpoint e o valor atual das malhas de controle (com controlador PID) do aquecimento e do resfriamento do adsorvedor.
Interface gráfica t endência histórica e real	Permite que se altere o setpoint, ganho proporcional K_p , tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d , dos controladores PID que fazem parte do sistema de aquecimento e de resfriamento do adsorvedor.

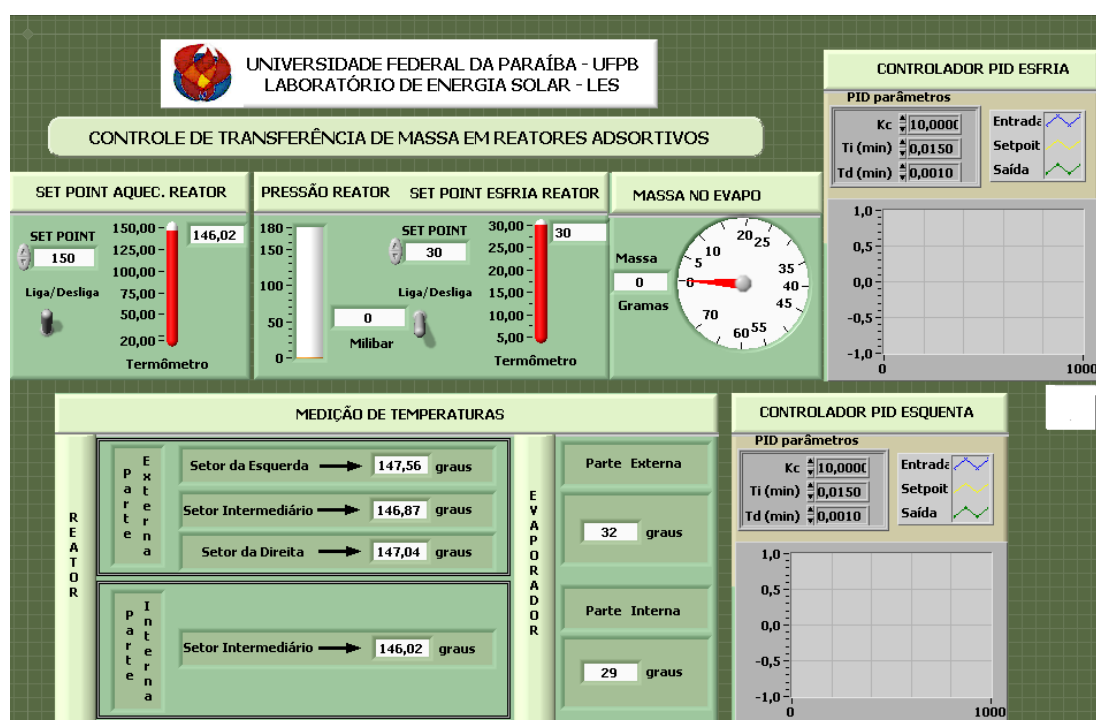


Figura 6.28 Interface gráfica VMT.

CAPÍTULO VII

RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 RESULTADOS

Realizou-se experimentos com o protótipo para se determinar a capacidade de refrigeração. Os experimentos foram realizados com ciclos distintos e com vários níveis de temperatura de geração.

Implementou-se a instrumentação virtual do aparato experimental abolindo-se quase totalmente os tradicionais equipamentos de medição e tornando o sistema mais flexível e adaptável a outras plataformas experimentais relacionadas à refrigeração por adsorção física.

A supervisão das variáveis mais relevantes do sistema, tais como: temperatura e pressão do leito adsorativo e massa de metanol adsorvida/dessorvida foi completamente automatizada. Este procedimento de automação eliminou a inspeção visual do volume/massa do líquido refrigerante (relatado na totalidade da literatura referente às pesquisas experimentais) e introduziu um objeto de visualização com características dinâmicas tal que, possibilitou o monitoramento da massa do metanol em tempo real. Foram avaliadas as massas adsorvidas e dessorvidas para cada um dos ciclos termodinâmicos experimentais.

Os dados trabalhados referem-se aos ciclos termodinâmicos correspondentes a testes experimentais de três ciclos. Cada um destes ciclos, denominados de ciclos 1, 2 e 3, têm duração distintas para etapas de adsorção/dessorção.

7.1.1 Variações temporais das temperaturas dos tubos do adsorvedor

As variações das dispersões das medidas da temperatura na parede do adsorvedor com o tempo foi calculada pela média e são mostradas nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3, juntamente com as temperaturas do adsorvente e do ar ambiente, respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3.

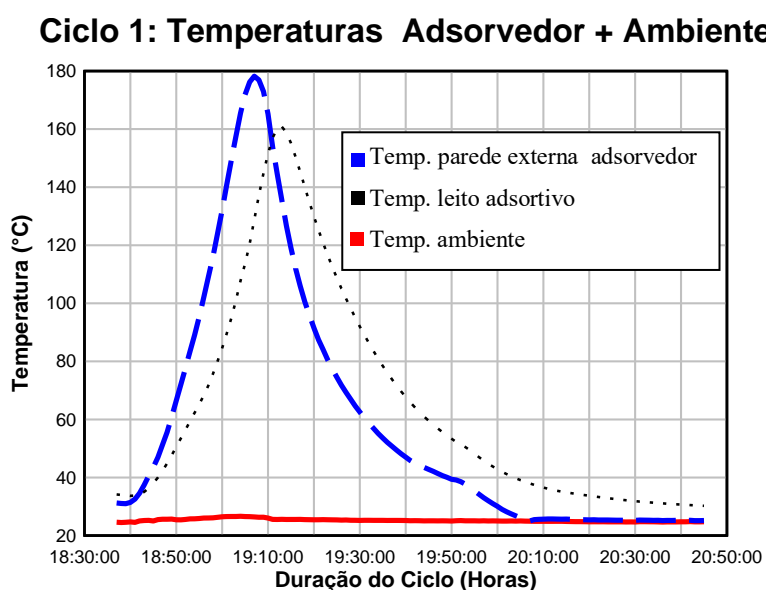


Figura 7.1 Variação de temperatura do tubo do adsorvedor, do carvão ativado e do ar ambiente, em função do tempo, para o ciclo 1.

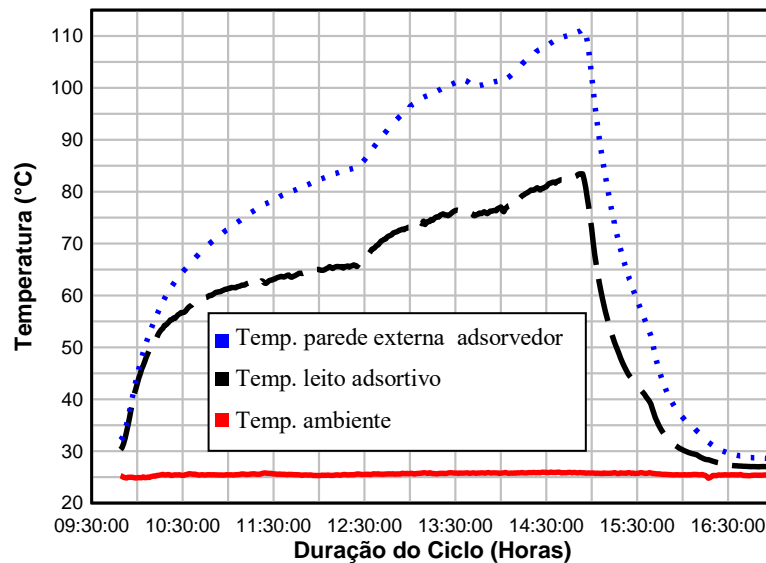
Ciclo 2 : Temperaturas Adsorvedor + Ambiente

Figura 7.2 Variação de temperatura do tubo do adsorvedor, do carvão ativado e do ar ambiente, em função do tempo, para o ciclo 2.

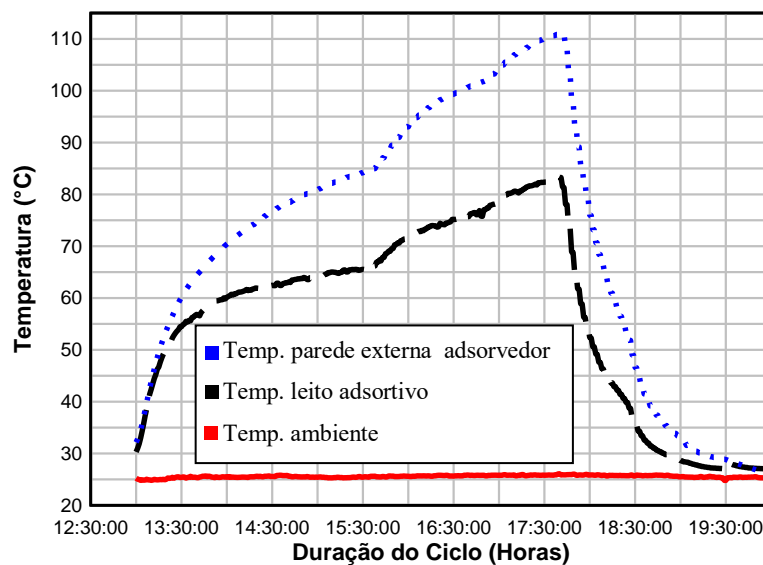
Ciclo 3: Temperatura Adsorvedor + Ambiente

Figura 7.3 Variação de temperatura do tubo do adsorvedor, do carvão ativado e do ar ambiente, em função do tempo, para o ciclo 3.

As temperaturas máximas da parede do adsorvedor foram de 178,23°C; 110,5°C e 111,09°C; enquanto que para o adsorvente obtiveram-se 160,81°C; 83,07°C; 90,44°C; respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3; para temperaturas do ar variando poucos décimos em torno de 24,50°C.

As temperaturas médias do adsorvente ao longo do tempo, são mostradas nas Figuras 7.4, 7.5 e 7.6, respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3.

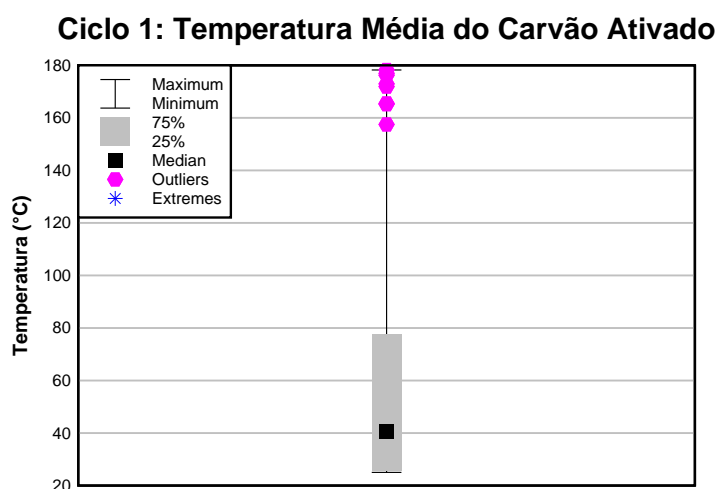


Figura 7.4 Média das temperaturas da parede do adsorvedor.

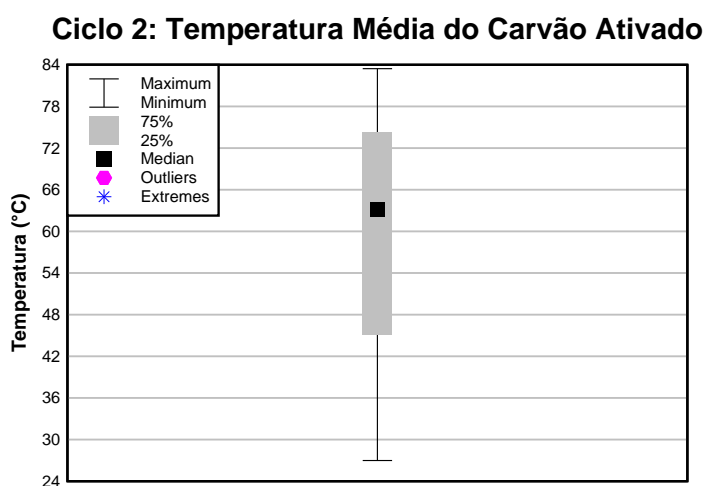


Figura 7.5 Ciclo 2: Temperatura média do carvão ativado

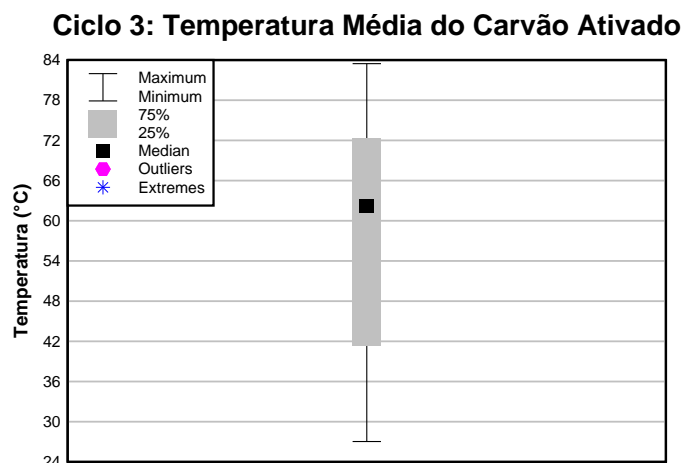


Figura 7.6 Ciclo 3: Temperatura média do carvão ativado.

7.1.2 Variação da massa ciclada de metanol

A massa do refrigerante que flui durante o ciclo termodinâmico de adsorção, nas etapas de adsorção e dessorção, é mostrada nos gráficos das Figuras 7.7, 7.8 e 7.9; respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3. Nestas figuras apresenta-se o gráfico teórico e experimental da massa de metanol “ciclada”. É possível observar-se com nitidez o momento da adsorção (indicado com uma seta nas figuras).

A duração de cada um dos ciclos é determinada pela diferença entre dois horários consecutivos pontos-limite, correspondendo aos estados termodinâmicos limites, quais sejam: o início da dessorção e o final da adsorção, definem respectivamente o momento inicial e o momento final de cada ciclo.

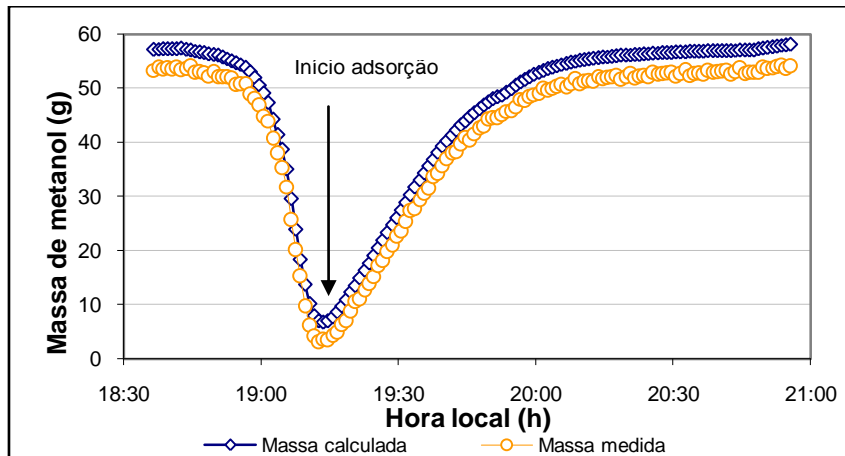


Figura 7.7 Massa ciclada de metanol durante o ciclo 1

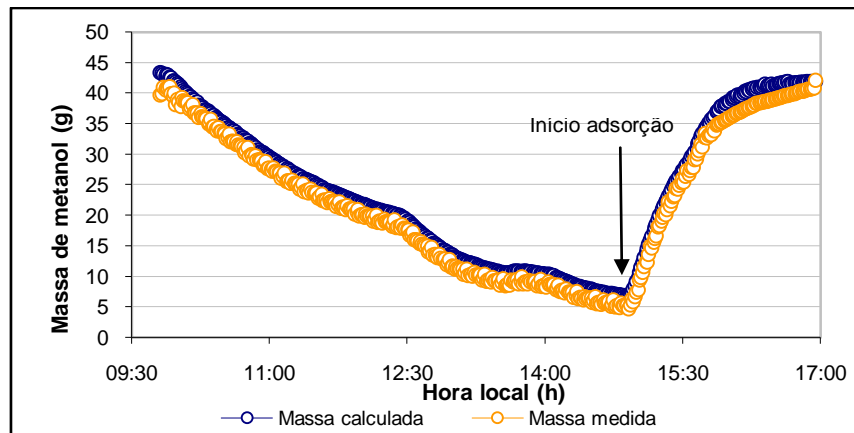


Figura 7.8 Massa ciclada de metanol durante o ciclo 2

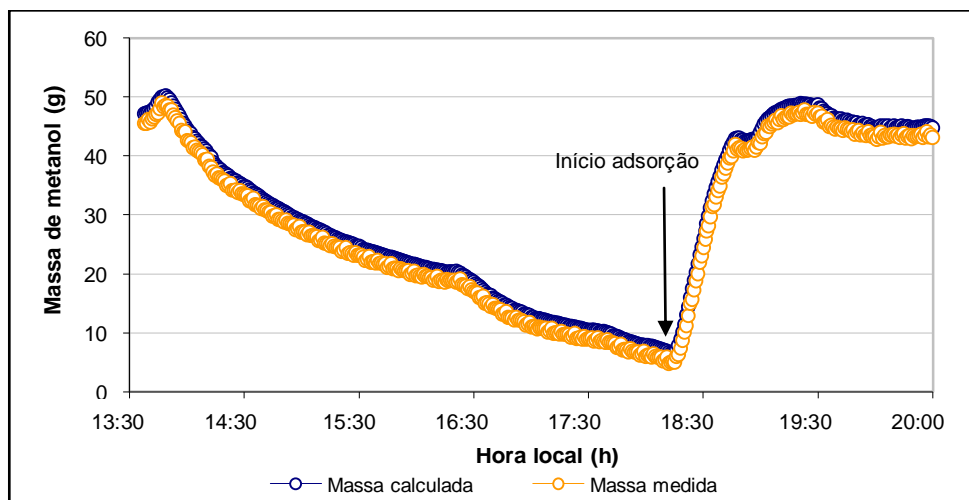


Figura 7.9 Massa ciclada de metanol durante o ciclo 3

7.1.3 Os ciclos experimentais de refrigeração

Os ciclos de refrigeração por adsorção, obtidos experimentalmente, são mostrados nas Figuras 7.10, 7.11 e 7.12; respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3.. A duração de cada um dos processos que compõem o ciclo é determinada pela diferença entre dois horários consecutivos pontos-limite, correspondendo aos seguintes estados termodinâmicos no interior do adsorvente:

- a- Início do processo de aquecimento (concentração de fase adsorvida máxima);
- b- Início do processo de dessorção (transferência de massa para o condensador);
- c- Final do processo de dessorção (concentração de fase adsorvida mínima);
coincidindo com o início do processo de resfriamento;
- d- Início do processo de adsorção (transferência de massa para o adsorvedor);
- e- Final do processo de adsorção (concentração de fase adsorvida próxima àquela do estado (a)).

O final da adsorção é considerado como o instante em que a temperatura do adsorvente atinge um valor mínimo; este ponto define o momento final de cada ciclo.

Nos ciclos termodinâmicos pode-se identificar as temperaturas máxima do adsorvedor, quais sejam: 150,5°C; 111,0°C; 111,09°C; respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3. Pode-se observar nos gráficos as temperaturas extremas dos processos de adsorção, quais sejam: 30,0°C para o ciclo 1, 27,0°C para o ciclo 2 e 28,0°C para o ciclo 3.

Finalmente deve-se ressaltar o seguinte aspecto prático que a análise dos ciclos de adsorção proporciona: indicação das temperaturas mínimas do metanol saturado no interior do evaporador, quais sejam aproximadamente: 9,0°C para o ciclo 1, 0°C para o ciclo 2 e -3°C para o ciclo 3. Estes valores correspondem ao final do processo de adsorção.

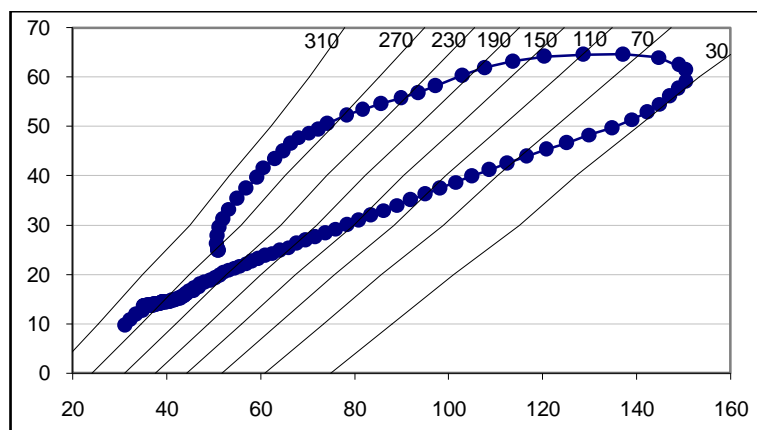


Figura 7.10 Ciclo experimental 1

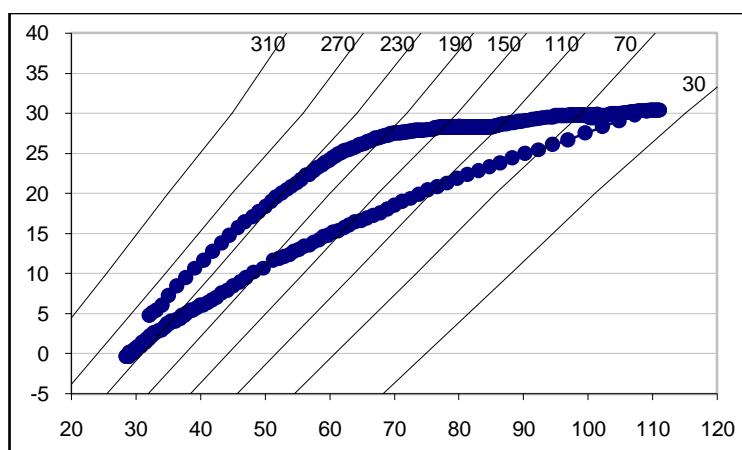


Figura 7.11 Ciclo experimental 2

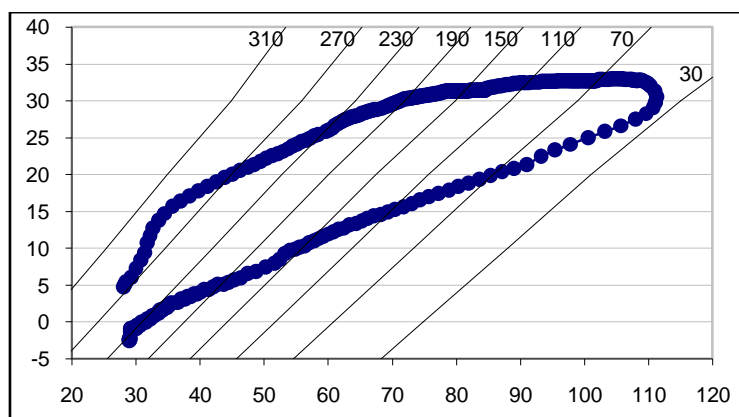


Figura 7.12 Ciclo experimental 3

7.1.4 Coeficientes de performance (COP)

O desempenho do sistema é avaliado através do Coeficiente de Performance , COP, que pode ser definido de diferentes maneiras, de acordo com a literatura especializada. Segundo Leite (2004), pode-se definir o COP como sendo o desempenho térmico do ciclo de refrigeração, COP_t , expresso matematicamente como:

$$COP_t = \frac{m_1 \Delta a L(T_{eva}) - Q_1}{m_1 \Delta a \Delta H(T_{reg}) + Q_2 + Q_3} \quad (7.1)$$

Onde:

- m_1 - massa de adsorvente;
- Δa - variação de concentração do adsorbato;
- ΔH – variação da entalpia de adsorção;
- T_{ev} - temperatura média de evaporação do adsorbato;
- T_{reg} - temperatura média de regeneração;
- T_{con} - temperatura de condensação;
- L - calor latente de evaporação;
- Q_1 - calor sensível transferido no resfriamento do adsorbato de T_{con} (final) a T_{ev} ;
- Q_2 - calor sensível para aumentar a temperatura do adsovedor (massa de adsorvente + massa do coletor solar) de T_{ads} a T_{con} (inicial);
- Q_3 - variação de energia interna da massa adsorvida durante o aquecimento do adsorvedor de T_{ads} a T_{con} (inicial);

Leite ressalta que o numerador da equação 7.1 representa a energia útil, ou seja, é a energia efetivamente usada para produzir o efeito frigorífico.

Oliveira (2004) define o COP como sendo a razão entre a capacidade de refrigeração e a energia total que foi utilizada na etapa de aquecimento com o processo de dessorção no leito do adsorvedor. Logo:

$$COP = \frac{\text{Capacidade de refrigeração}}{\text{Energia total}_{\text{dessorção}}} \quad (7.2)$$

Neste trabalho utilizou-se o conceito de COP definido por Oliveira.

Sendo assim temos:

$$\text{Energia total}_{\text{dessorção}} = \frac{(\text{Tensão elétrica aquecedor})^2}{\text{Resistência do aquecedor}} \times \text{tempo de duração da dessorção} \quad (7.3)$$

$$\text{Capacidade de refrigeração} = Q_{\text{ref}} = m * c * \Delta T \quad (7.4)$$

Onde m é a massa da água contida no evaporador;

c= calor específico da água.

$$\Delta T = \text{temp. água}_{\text{início dessorção}} - \text{temp. água}_{\text{final dessorção}} \quad (7.5)$$

Observação: a massa da água é igual para todos os três ciclos.

A Tabela 7.1 apresenta os valores do COP para cada um dos três ciclos

Tabela 7.1 Valores do COP para os ciclos 1, 2 e 3

PARÂMETROS						
	E _{total} (KJ)	m (Kg)	Q _{ref} (KJ)	ΔT (s)	c (J/Kg*K)	COP
Ciclo1	304,5325	0,18	4,25106	1980	4180	0,014
Ciclo2	592,5888	0,18	9,06642	18360	4180	0,015
Ciclo3	540,5880	0,18	9,6683	16260	4180	0,018

7.2 DISCUSSÕES

7.2.1 Variação de temperatura do adsorvente

A temperatura do carvão ativado foi medida através de um Pt-100 com bainha, no ponto mediano interno ao adsorvedor.

Como pode ser observado na Figura 7.1, gráfico do ciclo 1, a temperatura do carvão permaneceu abaixo da temperatura do tubo durante quase toda a etapa de regeneração; durante o resfriamento do adsorvedor esta tendência foi invertida. Isto ocorreu devido à inércia térmica dos materiais, uma vez que o tubo tem uma capacidade térmica bem menor do que a do adsorvente; o calor específico do carvão ativado é o dobro daquele do aço inoxidável. Vale salientar que foi retirado o aquecedor resistivo que envolvia o adsorvedor durante a etapa da dessorção. Isto propiciou uma melhor troca de calor entre as paredes externas do tubo adsorvedor e o ar ambiente.

Comparando o comportamento das temperaturas do adsorvedor nos ciclos 2 e 3, Figuras 7.2 e 7.3 respectivamente, constata-se que nestes ciclos a temperatura das paredes, permaneceram sempre maiores do que as temperaturas do carvão ativado em todas as etapas do ciclo, diferentemente do que constatou Grilo (2004) para a etapa de resfriamento do adsorvedor. Isto deveu-se ao fato de que nestes dois ciclos o aquecedor resistivo que envolve o adsorvedor não foi retirado.

A análise das temperaturas médias do carvão ativado observadas nas Figuras 7.4, 7.5 e 7.6 (que se fortalecerá com a análise do ciclo de adsorção que far-se-á mais adiante) mostra que o efeito frigorífico é melhor quando as temperaturas médias do carvão ativado, no valor aproximado de 65°C, mantêm-se por mais tempo neste patamar.

7.2.2 Considerações sobre a diferença da variação da massa ciclada de metanol

A massa do refrigerante que flui durante o ciclo termodinâmico de adsorção, nas etapas de adsorção e dessorção, é mostrada nos gráficos das Figuras 7.7, 7.8 e 7.9; respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3.

O valor estimado da massa de metanol ciclada foi calculado utilizando-se a equação de Dubinin-Astakhov e é sempre maior do que o valor da massa medida pela balança digital da marca Kern. Comparando-se o valor experimental com o valor teórico da massa ciclada, constata-se que o segundo valor é sempre maior. A diferença entre a massa adsorvida estimada pela equação de Dubinin-Astakhov e aquela obtida pela balança posicionada sob o evaporador, pode ser provavelmente explicada pelo acúmulo de refrigerante na tubulação do protótipo, pela resistência à difusão do refrigerante no leito adsortivo e pela depuração insuficiente deste leito.

Sugeriu-se a hipótese do acúmulo de refrigerante na tubulação na etapa da dessorção, pois o sistema não possui um condensador separado do evaporador o que resultou em um único recipiente com esta dupla função. Tal fato fez com que o condensador tivesse uma área útil de troca de calor aquém do valor ótimo desejável. Esta decisão de projeto também tornou menor a quantidade de água que envolve o condensador diminuindo o arrefecimento de sua massa metálica aquecida pelo refrigerante dessorvido. Certamente a adoção de um condensador separado do evaporador traria uma melhoria no desempenho do sistema.

A hipótese sobre a resistência à difusão do refrigerante no interior das partículas de adsorvente foi sugerida pois, se a difusividade de refrigerante interferiu na cinética de sorção, tem que se considerar uma situação onde não ocorreu o equilíbrio pressão-temperatura-concentração mássica (P-T-X), conforme previsto na equação de Dubinin-Astakhov.

Se a difusividade do refrigerante no leito for relevante no processo de sorção, a concentração mássica de refrigerante no leito no final do processo de dessorção não pode ser calculada apenas utilizando-se a equação de Dubinin-Astakhov, e sim, deve-se considerar uma situação de não equilíbrio P-T-X, onde a taxa de sorção é descrita de acordo com o proposto por Sakoda e Suzuki (1984).

$$\frac{dX^*}{dt} = k_s a_p (X - X^*) \quad (7.1)$$

Onde:

X^* é a concentração mássica de refrigerante fora do equilíbrio P-T-X, ($\text{Kg}_{\text{refrig.}}/\text{Kg}_{\text{Adsorvente}}$);

$K_s a_p$ é o coeficiente global de transferência de massa, (s^{-1}).

A terceira hipótese para explicar a diferença entre os valores de massa adsorvida obtida pelos dois métodos refere-se a depuração insuficiente do leite. Se a bomba de vácuo succionou uma quantidade de vapor menor do que a sua capacidade nominal, é possível que o tempo de depuração utilizado tenha sido insuficiente para eliminar toda a água e outras impurezas presentes no carvão, e sendo assim estas impurezas podem ter influenciado no equilíbrio termodinâmico entre o refrigerante e o leite.

Uma vez que não se pôde concluir que uma das três hipóteses abordadas é a causadora da diferença entre os valores de massa adsorvida obtida pelos dois métodos, é prudente admitir que as três hipóteses podem estar contribuindo simultaneamente para explicar as diferenças encontradas.

Na avaliação do protótipo foi considerado como massa adsorvida, aquela medida pela balança digital, uma vez que foi essa massa de metanol evaporada que ocasionou o efeito frigorífico. O COP foi calculado a partir desta massa adsorvida.

7.2.3 Os ciclos experimentais de refrigeração

Os ciclos de refrigeração por adsorção, obtidos experimentalmente, são mostrados nas Figuras 7.10, 7.11 e 7.12; respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3.

Analizando-se o ciclo 3 onde se obteve uma temperatura no evaporador de -3°C , e não houve a produção de gelo; com o do experimento de Khattab (2004) (que também é de dimensões reduzidas e utiliza 200g de metanol e 600g de carvão ativado), reproduzido

na Figura 7.13, e que com -1°C consegue que seja produzido gelo; Grilo (2004) reporta que esse fato é explicado na literatura especializada como decorrente de uma conjunção de fenômenos físicos que interferem no processo de solidificação da água, baixando seu ponto de fusão, dos quais destacam-se os seguintes:

- **Convecção.** À medida que a camada superficial da água esfria, sua densidade aumenta, imergindo-se e dando lugar a uma água menos fria e menos densa, gerando correntes de convecção que intensificam a uniformidade do resfriamento. Ao atingir 4°C (ponto de densidade máxima), a água sofrerá menos correntes convectivas e, a partir de então, com a diminuição de sua temperatura, uma fina camada de gelo se formará na superfície, constituindo uma resistência térmica ao restante da água.
- **Dissolução de gases.** A água sempre contém gases dissolvidos (principalmente O_2 e CO_2) que dificultam a ocorrência do ponto de solidificação. Portanto, quanto menor a temperatura inicial da água a congelar, maior será a concentração desses gases.
- **Superesfriamento.** Conforme as Leis de Raoult (sobre pontos de ebulição e fusão), somente a água pura solidifica-se a 0°C ; líquidos que contenham substâncias dissolvidas (sais minerais) têm seu ponto de fusão mais baixo do que o líquido puro.
- **Ponto de Schaefer.** Em consequência do fenômeno de super-resfriamento, o congelamento da água ocorre somente quando ela atinge a chamada temperatura de nucleação. Essa temperatura é variável e depende de vários parâmetros (formação de bolhas, núcleos de cristalização, campo magnético, etc.). No entanto, a partir do ponto de Schaefer mesmo que a solidificação propriamente dita não ocorra, verifica-se uma formação espontânea de cristais de gelo.

7.2.4 Coeficientes de performance (COP)

Os COPs do protótipo foram de 0,014; 0,015 e 0,018; respectivamente para os ciclos termodinâmicos 1, 2 e 3. Segundo a literatura especializada estes valores de COP são considerados baixos.

Os valores dos COPs encontrados somente têm paralelo com o trabalho de Lima *et al* (2007), trabalho este em que também utilizam o par carvão-metanol. O experimento dos autores desenvolveu um COP de 0,015. Os autores atribuem a causa do reduzido COP à ineficiência do condensador utilizado.

Com relação ao COP do protótipo deste trabalho acredita-se que apesar de consumir uma certa quantidade de energia para promover a dessorção de refrigerante, nem todo esse refrigerante chegou ao evaporador para contribuir com a capacidade de refrigeração do protótipo, conforme a primeira hipótese sugerida para explicar a diferença entre a massa adsorvida medida pela balança digital sob o evaporador e aquela estimada pela equação de Dubinin-Astakhov.

Outro fator que potencializa a energia aplicada para promover a dessorção do metanol é o fato do adsorvedor estar isolado termicamente quando desta etapa do ciclo termodinâmico. Uma vez que neste protótipo não se fez uso de qualquer isolamento térmica aplicada ao adsorvedor esta foi uma das causas responsáveis pelo desempenho abaixo da média apresentado pelo sistema.

Acredita-se também que uma contribuição expressiva para o baixo desempenho do sistema tenha sido causado pelo condensador, a saber:

(1) Como dito anteriormente, o fato de neste experimento utilizar-se um só recipiente com a função dupla de condensador (na dessorção) e evaporador (na adsorção) e considerando-se que (a) para o primeiro, *em uma rápida aproximação*, quanto maior a área, quanto maior a quantidade de água no reservatório e quanto menor o isolamento térmico, tanto melhor para o rendimento; e considerando-se que para o (b) evaporador, *de modo geral*, quanto menor a massa metálica (em contato com a água), quanto menor a massa de água e quanto maior o isolamento térmico do ambiente, tanto melhor para o rendimento. Constatase que são premissas de projeto conflitantes, pois ao melhorar-se o desempenho de um, prejudica-se o do outro.

(2) A isolamento térmica, constituída de poliestireno expandido, aplicada ao redor do condensador/evaporador era fixa e por conseguinte não era retirada quando da etapa de condensação do metanol. A troca de calor entre o metanol e as paredes metálicas do condensador era auxiliada por um ventilador que insuflava o ar, por uma pequena abertura, para dentro da câmara que abrigava o condensador e a água que o recobria com o intuito de o arrefecer.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi construído e instrumentado um protótipo de refrigerador por adsorção física e efetivou-se a simulação dinâmica dos processos de sorção e dessorção em ciclos de refrigeração.

A supervisão das variáveis mais relevantes do sistema, tais como: temperatura e pressão do leito adsorativo e massa de metanol adsorvida/dessorvida, foi completamente automatizada. Este procedimento de automação eliminou a inspeção visual do volume/massa do líquido refrigerante (relatado na totalidade da literatura referente às pesquisas experimentais) e introduziu um objeto de visualização com características dinâmicas tal que, possibilitou o monitoramento da massa do metanol em tempo real. Foram avaliadas as massas adsorvidas e dessorvidas para cada um dos ciclos termodinâmicos experimentais.

Os experimentos com o protótipo indicaram que um sistema de refrigeração adsorativo sem válvulas é factível. Os experimentos também revelaram que a utilização de um único recipiente atuando como condensador e evaporador diminui consideravelmente o COP do sistema.

Constatou-se que o ciclo termodinâmico com duração curta ~ 1 hora (não obstante a quantidade de metanol adsorvido e dessorvido ser equivalente a de ciclos termodinâmicos mais longos, > 5 horas), conseguiu reduzir a temperatura da água do evaporador em apenas $5,65^{\circ}\text{C}$ enquanto que os outros ciclos reduziram-na em aproximadamente 12°C . A diferença percentual entre as temperaturas de $5,65^{\circ}\text{C}$ e 12°C foi de 53%. Já no COP, comparativamente, houve uma redução percentual aproximada de

20%. Conclui-se que o COP não é o melhor parâmetro para se avaliar o resultado do efeito frigorífico sobre a água contida na câmara do evaporador.

A maioria dos equipamentos comumente utilizados para medição e controle de sistemas foi substituído pela instrumentação virtual. Dentre outras vantagens a adoção da instrumentação virtual: (1) possibilitou a redução de custos com aquisição de equipamentos de precisão, (2) mudanças operacionais que antes demandariam tempo em rearranjos estruturais puderam ser realizadas apenas com pequenas alterações de software e (3) tornou o sistema de controle e supervisão mais flexível e adaptável à outras plataformas experimentais relacionadas à refrigeração por adsorção física e (4) oportunizou o desenvolvimento de tecnologia nacional nesta área da instrumentação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, para dar continuidade nesta linha de pesquisa utilizando o protótipo montado, sugere-se a utilização de um condensador e evaporador atuando como componentes distintos do sistema.

Com relação ao protótipo sugere-se a realização de experimentos com outros tipos de adsorvente (tal como carvão ativado de fabricação nacional) e de adsorvato (tal como o etanol). Sugere-se a utilização do protótipo com pares adsorvente/adsorvato que possam atuar com pressões positivas (tal como carvão ativado-amônia).

Para calcular a variação da concentração de refrigerante no leito, sugere-se que o modelo considere a difusidade de refrigerante no leito adsorvente, para avaliar se esta difusidade afeta a cinética de sorção.

Sugere-se que sejam utilizados outros dispositivos para aquecimento e resfriamento do adsorvedor (tal como módulos Peltier) e que diferentes algoritmos de controle sejam testados.

Sugere-se a substituição da balança semi-analítica por uma célula de carga e que seja projetado o circuito eletrônico necessário ao funcionamento desta.

REFERÊNCIAS

- 1- ANDRADE, EDNA ALVES de, **ELETRÔNICA INDUSTRIAL: Análise de Dispositivos e suas Aplicações**. (Professora do CEFET-BA), Edição própria, Salvador, 1996.
- 2- ANDRADE, R. R. D., **Avaliação Teórico-Experimental do Ciclo Termodinâmico em um Adsorvedor Multitubular de um Refrigerador Solar**, Dissertação Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2004.
- 3- ALMEIDA, JOSÉ LUIZ ANTUNES de, **Dispositivos Semicondutores: TIRISTORES Controle de potência em C.C e C.A.** Érica, 11ª edição, São Paulo, 2007.
- 4- BOUGARD, J. e VERONIKIS, G. **Adsorbeur Modulaire pour Machine Frigorifique Solaire Charbon Actif-Ammoniac**. Proc. Meet. On Solid Sorption Refrigeration, Vol. 1, pp. 302-307. Paris: Institut International Du Froid, 18-20 Nov, 1992.
- 5- BISHOP, ROBERT H. **LabVIEW1 7Express: Student Edition**, Prentice Hall, New Jersey, 2006.
- 6- BOUBAKRI, A., GUILLEMINOT, J. J., MEUNIER, F. **Adsorptive solar powered ice maker: experiments and model**. Solar Energy, Vol. 69, N. 3, pp. 249-263, 2000.
- 7- BOYLESTAD, R., NASHELKY, L., **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**, Prentice-Hall, 5ª edição, Rio de Janeiro, 1994.
- 8- CRITOPH, R. E. **An Ammonia Carbon Solar Refrigerator for Vaccine Cooling**. Renewable Energy, v. 5, pp. 502-508, 1994.
- 9- CRITOPH, R. E. Performance Limitations of Adsorption Cycles for Solar Cooling. Solar Energy, v. 41, n. 1, pp. 21-31, 1988.
- 10- CHUA, H. T., Ng, K. C., MALEK, A., KASHIWAGI, T., AKISAWA, A., SAHA, B. B. Entropy Generation analysis of Two-Bed, Silica Gel-Water, Non-Regenerative Adsorption Chillers. J. Phys. D: Appl. Phys., v. 31, pp. 1471-1477, 1998.

- 11- DAVIES, R. A, LEGROS, E. F. Odour Removal by Adsorption on Activated Carbon. *Filtration & Separation*, pp. 169-170, Maio-Junho, 1986.
- 12- DUBININ, M. M. Adsorption in Micropores. *Journal Of Colloid and Interface Science*, v. 23, pp. 487-499, 1967.
- 13- EVERETT, D.H., Definitions, Terminology and Symbols in Colloids and Surface Science - Part I. In: *Pure Appl. Chem.*, N 31, p. 577-638, 1972.
- 14- GRILO, M. B., 2004, **Desenvolvimento Experimental de um Refrigerador Solar para Fabricação de Gelo usando o Par Adsorptivo Carvão Ativado-Metanol**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- 15- GUILLEMINOT, J.J., POYELLE, F., MEUNIER, F., **Ab et Adsorption Alternative aux CFC? La Climatisation par Adsorption**. *Revue General du Froid*, pp.34-39, 1995.
- 16- GUILLEMINOT, J. J.; MENIER, F.; PAKLEZA, J. **Heat and mass transfer in a non-isothermal fixed bed solid adsorbent reactor: a uniform pressure – non-uniform temperature case**. *International Journal Heat Mass Transfer*, v. 30, n. 8, p. 1595-1606, 1987.
- 17- GREGG, S.J.; SING, K.S.W. **Adsorption, Surface Area and Porosity**. 2^a. Ed., Londres: Academic Press, 1982.
- 18- HEADLEY, O. STC., KOTHDIWALA, A. F., MCDOOM, I. A. **Charcoal-Methanol Adsorption Refrigerator Powered by a Compound Parabolic Concentrating Solar Collector**. *Solar Energy*, v. 53, n. 2, pp. 191-197, 1994.
- 19- HU, E. J. **Simulated Results of a Non-Valve, Daily-Cycled, Solar-Powered Carbon/Methanol Refrigerator with a Tubular Solar Collector**. *Applied Thermal Engineering*, v. 16, n. 5, pp. 439-445, 1996.
- 20- Hu, E. J. **A Study of Thermal Decomposition of Methanol in Solar Powered Adsorption Refrigeration Systems**. *Solar Energy*, v. 62, pp. 325-329, 1998.
- 21- Huber, U., Stoeckli, F., Houriet, J. P. **A Generalization of the Dubinin-Radushkevich Equation for the Filing of Heterogeneous Micropore Systems in Strongly Activated Carbons**. *Journal Of Colloid and Interface Science*, v. 67, n. 2, pp. 195-203, 1978.
- 22- IUPAC. Reporting Physisorption Data For Gas Solid Systems With Special Reference To The Determination Of Surface-Area And Porosity (Recommendations 1984). In: *Pure and Appl. Chem.*, Vol. 57, N 4, pp.603-619, 1985.

- 23-KLÜPPEL, R. P., GURGEL, J. M., **Solar Adsorption Cooling Using Silicagel/water.** Advances in Solar Energy Technology, Vol 3 pp. 2627-2631, 1988.
- 24-LI, M., SUN, C.J., WANG , R.Z., CAI, W.D. **Development of no Valve Solar Ice Maker,** Applied Thermal Engineering v.24, pp. 865–872, 2003.
- 25-LUO, L., FEIDT, M. Comportement Transitoire d'une Machine Frigorifique à Adsorption. Étude Expérimentale Du Système Alcool/Charbon Actif. Rev. Gén. Therm., v. 36, pp. 159-169, 1997.
- 26-LIDGEY, F. J., HAIGH, D. G., **Analogue IC Design: the current mode approach,** Peter Peregrinus Ltd., London: 1990, Chapter 16, pp. 569-595.
- 27-LEITE, A. P. F. **Sistema Frigorífico à adsorção utilizando carvão ativado-metanol com regeneração por energia solar.** Tese apresentada para concurso público na vaga de professor titular do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.
- 28-LI, M.; WANG, R. Z.; XU, Y. X.; WU, J. Y.; DIENG, A. O. **Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker.** Renewable Energy. 27; 211-221, 2002.
- 29-LI, M.; SUN, C.J.; WANG R.Z.; CAI, W.D. **Development of no valve solar ice maker.** Applied Thermal Engineering vol. 24, pp. 865–872, 2004.
- 30-LEITE, A. P. F., **Thermodynamic analysis and modeling of an adsorption-cycle system for refrigeration from low-grade energy sources,** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, v. 20, n. 3, pp. 301–324. 1998.
- 31-MEDINI, N., MARMOTTANT, B., EL GOLLI, S., GRENIER, Ph. **Etude d'une Machine Solaire Autonome à Fabriquer de la Glacê.** Rev. Int. Froid, v. 14, pp. 363-367, 1991.
- 32-MILES, D. J., SHELTON, S. V. **Design and Testing of a Solid-Sorption Heat-Pump System.** Applied Thermal Engineering, v. 16, n. 5, pp. 389-394, 1996.
- 33-MIHURA, BRUCE, **LabVIEW for Data Acquisition,** Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- 34-NAGEL, LAURENCE W. **SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits.** Berkeley, University of California, 1975. 233p. (Thesis ERL-M520).

- 35-NIEMANN, M., KREUZBURG, J., SCHREITMÜLLER, K.R. AND LEPPERS, L. **Solar Process Heat Generation Using an Etc Collector Field With External Parabolic Circle Concentrator (Pcc) to Operate an Adsorption Refrigeration System.** Solar Energy, v. 59, n. 1-3, pp. 67-73, 1997
- 36-OLIVEIRA, R. G. **Avaliação de um Sistema de Refrigeração por Adsorção para Produção de Gelo, Operando Diferentes Tipos de Ciclo com Baixas Temperaturas de Geração.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Campinas, 2004.
- 37-PASSOS, F. P. **Etude des Couples Charbon Actif/Methanol et de leur Application a la Refrigeration Solaire.**, Tese (Doutorado)101 p.. Dep Mecanique, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne1986.
- 38-PONS, M., GUILLEMINOT, J. J. **Design of an Experimental Solar Powered, Solid-Adsorption Ice Maker.** Journal of Solar Energy Engineering, v. 108, pp. 332-337, 1986.
- 39-PONS, M.; GRENIER, Ph. **A phenomenological adsorption equilibrium law extracted from experimental and theoretical considerations applied to the activated carbon and methanol pairs.** Carbon, v. 24, n. 5, p. 615-625, 1986.
- 40-PIS, J.J., PARRA, J.B., PUENTE, G., RUBIERA, F., PAJARES, J.A., **Development of Macroporosity in Activated Carbons by Effect of Coal Preoxidation and burn-off.** In: Fuel, Vol. 77, N° 6, pp. 625-630, 1998.
- 41-POYELLE, F., GUILLEMINOT, J.J. and MEUNIER, F., **Experimental Tests and Predictive Model of an Adsorptive Air Conditioning Unit,** Ind. Eng. Chem. Res., v. 38, pp. 298-309, 1999.
- 42-PEDERSON, DONALD O. **A historical review of circuit simulation.** IN: IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 31, nº 1 p. 103-111, January 1984.
- 43-ROUQUEROL, J., **Recommendations for the Characterization of Porous Solids.** In: Pure and Appl. Chem., Vol.66, N 8, pp. 1739-1758, 1994.
- 44-RUTHVEN, D. M., **Principles of Adsorption and Adsorption Processes.** John Wiley & Sons, 1984.
- 45-SAKODA, A., SUZUKI, M. **Fundamental Study on Solar Powered Adsorption Cooling System.** J. Chem. Eng. Japan, v.17, pp. 52-57, 1984.
- 46-SILVEIRA JUNIOR V., **Montagem e Teste de Desempenho de um Refrigerador Solar por Adsorção Física com Produção de Gelo,** Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

-
- 47- SRIVASTAVA, N. C., EAMES, I. W. **A Review of Adsorbents and Adsorbates in Solid-Vapour Adsorption Heat Pump Systems.** Applied Thermal Engineering, v. 18, pp. 707-714, 1998.
 - 48- SVELTO, C.; GALZERANO, SUARDI, G. e BAVA, E., **Compact and accurate digital thermometer based on an Andersonaposs;sloop and a Pt-100 sensor.**
 - 49- TAMAINOT-TELTO, Z., CRITOPH, R. E. **Adsorption Refrigerator Using Monolithic Carbon Ammonia Pair.** Int. J. Refrig., v. 20, n. 2, pp. 146-155, 1997.
 - 50- VASILIEV, L. L., MISHKINIS, D. A., ANTUKH, A. A., VASILIEV Jr., L. L. **A Solar and Electrical Solid Sorption Refrigerator.** Int. J. Therm. Sci., v. 38, pp. 220-227, 1999.
 - 51- VODIANITSKAIA, P. M. B., **Desenvolvimento Experimental de um Refrigerador Solar para Fabricação de Gelo usando o Par Adsorativo Carvão Ativado-Metanol.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1984.
 - 52- WANG, R. Z., WU, J. Y., XU, Y. X., TENG, Y., SHI, W. **Experiment on a Continuous Heat Regenerative Adsorption Refrigerator Using Spiral Plate Heat Exchanger as Adsorbers.** Applied Thermal Engineering, v. 18, pp. 13-23, 1998.
 - 53- WANG, R. Z., WU, J. Y., XU, Y. X. **A Continuous Heat Regenerative Adsorption Refrigerator Using Spiral Plate Heat Exchanger as Adsorbers: Improvements.** Transactions of the Asme, v. 121, pp. 14-19, 1999.
 - 54- WANG, R.Z., **Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao Tong University,** Renewable and Sustainable Energy Reviews v.5, pp. 1-37, 2000.
 - 55- WANG, R. Z E OLIVEIRA, R. G., **Adsorption Refrigeration - An Efficient Way to Make Good Use of Waste Heat and Solar Energy.** International Sorption Heat Pump Conference, Denver, CO, USA, June 22-24, 2005.

ANEXO A

PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE ESTADO DO PAR CARVÃO ATIVADO AC-35/METANOL E PROPRIEDADES DOS COMPONENTES

A.1 PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE DUBININ-ASTAKHOV (PONS e GRENIER, 1986)

- Capacidade máxima de adsorção, $W_o = 0,425 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ adsorvente
- Coeficiente de afinidade, $D = 5,02 \cdot 10^{-7}$
- Parâmetro característico, $n = 2,15$

A.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.

A.2.1 Carvão ativado AC-35

- Condutividade térmica (leito poroso) (GUILLEMINOT *et al.*, 1987), $k = 0,19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Condutância térmica adsorvente/metal (GUILLEMINOT *et al.*, 1987), $h = 16,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

- Calor específico a pressão constante, $C_1 = 920 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

- Massa específica (densidade aparente), $\rho_1 = 420 \text{ kg m}^{-3}$

A.2.2 Metanol

- Calor específico a pressão constante do líquido, $C_2 = 2.507 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

- Coeficiente de expansão térmica do líquido, $\alpha = 1,26.10^{-3}$

- Constante de gás ($M = 32,04$), $R = 259,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

- Pressão de vapor de saturação, P_s [Pa], com T em K:

$$\ln P_s = 22,185 - 2.312,83 \left(\frac{1}{T} \right) - 566.896 \left(\frac{1}{T} \right)^2 + 4,419.10^7 \left(\frac{1}{T} \right)^3$$

- Massa específica do líquido, ρ_2 [kg m^{-3}], com T em K:

$$\rho_2 = 1.283,315 - 3,3388 T + 8,65165.10^{-3} T^2 - 1,01655.10^{-5} T^3$$

- Calor latente de evaporação/condensação, L [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$], com T em K:

$$L = 643,984 + 4,74188 T - 10,1045.10^{-3} T^2 + 11,2826.10^{-8} T^3$$

A.2.3 Aço inoxidável

- Calor específico, $C_p = 480 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

- Massa específica, $\rho_p = 7.800 \text{ kg m}^{-3}$

- Condutividade térmica, $k_p = 17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

APÊNDICE A

DIMENSIONAMENTO DA ÁREA E DO VOLUME DO EVAPORADOR/CONDENSADOR

A.1 DIMENÇÕES DO EVAPORADOR/CONDENSADOR

A Figura A.1 apresenta as dimensões do evaporador/condensador que serão utilizadas para os cálculos da sua área e do seu volume.

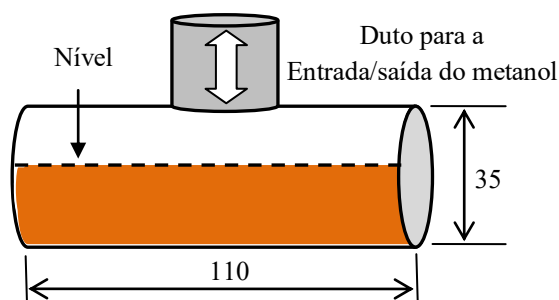


Figura A.1- Dimensões do evaporador/condensador

A.2 CÁLCULO DO VOLUME DO EVAPORADOR/CONDENSADOR

O volume do evaporador/condensador é dado pela Equação A.1.

$$V_{ev} = \frac{\pi \phi_{ev}^2 L_{ev}}{4}, \quad (A.1)$$

Onde

V_{ev} é o volume do evapocondensador; ;

ϕ_{ev} é o diâmetro do evapocondensador;

L_{ev} é o comprimento do evapocondensador.

Assim,

$$V_{ev} = \frac{\pi (3,5cm)^2 \cdot 11cm}{4} \quad (A.2)$$

$$V_{ev} = 106cm^3 \text{ ou } 106ml$$

A.3 CÁLCULO DA ÁREA DO EVAPORADOR/CONDENSADOR

A área total do evapocondensador é dada pela Equação A.3, conforme indicado na Figura A.2.

$$A_{total} = A_{lateral} + 2A_{base} \quad (A.3)$$

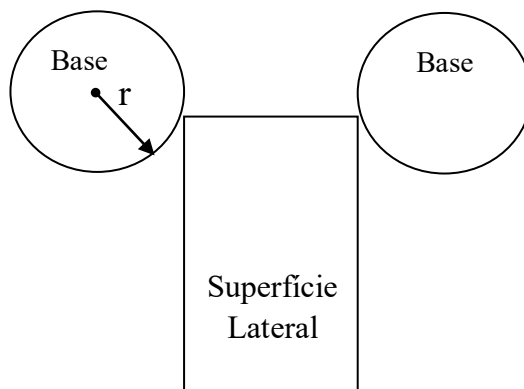


Figura A.2 Superfícies do evaporador/condensador

Onde

A_{total} é a área total do evapocondensador;

$A_{lateral}$ é a área lateral do evapocondensador;

A_{base} é a área da base do evapocondensador.

Assim,

$$A_{total} = 2\pi rh + 2\pi r^2, \text{ então } A_{total} = 2\pi r(h + r) \quad (\text{A.4})$$

$$A_{total} = 2\pi \cdot 1,75\text{cm}(11\text{cm} + 1,75\text{cm}) \quad (\text{A.5})$$

$$A_{total} = 140,19\text{cm}^2$$

O metanol ocupará 50% do volume total do evaporador/condensador.

Esta configuração do evaporador/condensador permite uma maior área superficial do metanol no interior do mesmo, o que melhora a evaporação do metanol.

APÊNDICE B

DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DO CONDENSADOR

B.1 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DO CONDENSADOR (LEITE, 1996; LEITE et al 2004)

O dimensionamento térmico do condensador foi realizado a partir de resultados de simulações numéricas realizadas com dados oriundos de Leite (1996) e Leite et al (2004). Este dimensionamento tem como base a potência térmica dissipada na água durante a mudança de fase gás-líquido do metanol, expressa pela Equação B.1:

$$q_{con} = \frac{M_{con}L_{con}}{\Delta t_{con}} \quad (B.1)$$

Onde:

M_{con} é a massa de metanol condensada (Kg);

L_{con} é o calor latente de condensação do metanol (KJ Kg⁻¹);

Δt_{con} é a duração teórica do processo de condensação (s).

Substituindo na Equação B.1 os valores de $M_{con} = 53.10^{-3}\text{Kg}$, $L_{con} = 1160 \text{ KJ Kg}^{-1}$ e $\Delta t_{con} = 1,7\text{h}$ (indicada por testes exploratórios), obtem-se um potência térmica $q_{con} = 10,05\text{W}$.

Tomando valores médios das propriedades da água à temperatura de 30°C e uma diferença de temperatura de 1°C entre a superfície metálica do condensador e a água, da equação clássica da transferência de calor por convecção, temos:

$$q_{con} = h_{con}A_{con}\Delta T_{con} \quad (\text{B.2})$$

Onde:

h_{con} é o coeficiente de transferência de calor por convecção;

A_{con} é a área efetiva de troca de calor;

ΔT_{con} é a diferença de temperatura entre a superfície do condensador e a água.

Considerando-se o coeficiente de transferência de calor por convecção $h_{con} = 470\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$; determina-se na Equação (B.2), uma área de troca de calor de 212cm^2 .

APÊNDICE C

DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DO EVAPORADOR

C.1 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO DO EVAPORADOR (LEITE, 1996; LEITE et al 2004)

O dimensionamento térmico do evaporador foi realizado a partir de resultados de simulações numéricas realizadas com dados oriundos de Leite (1996) e Leite et al (2004). No dimensionamento do evaporador considerou-se as transferências de calor e de massa ocorridas no interior da câmara frigorífica.

As potências térmicas correspondentes à quantidade de metanol que evapora podem ser calculadas através da Equação C.1:

$$Q_{ev} = \frac{M_{ev}L_{ev}}{\Delta t_{ev}} \quad (C.1)$$

Onde:

M_{ev} é a massa de metanol evaporada (Kg);

L_{ev} é o calor latente de evaporação do metanol(KJ Kg⁻¹);

Δt_{ev} é a duração do processo de evaporação.

Fazendo $M_{ev1} = 6.10^{-3} \text{Kg}$ e $\Delta t_{ev} = 0,17 \text{h}$, obtém-se, da Equação (8), $Q_{ev1} = 11,8 \text{W}$. Tomando $M_{ev2} = 46,8.10^{-3} \text{kg}$ e $\Delta t_{ev} = 1,7 \text{h}$, resulta $Q_{ev2} = 9,1 \text{W}$. Considerando os coeficientes de transferência de calor envolvidos em cada um desses processos, adota-se para a superfície de evaporação necessária o maior valor obtido

APÊNDICE D

DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO LEITO ADSORTIVO

D.1 CÁLCULO DO VOLUME ÚTIL DO LEITO ADSORTIVO

As dimensões do adsorvedor apresentadas na Figura D.1 serão utilizadas para o cálculo do seu volume útil. O espaço anular gera o volume útil, V_{LU} , do leito adsortivo, o qual é preenchido pelo adsorvato.

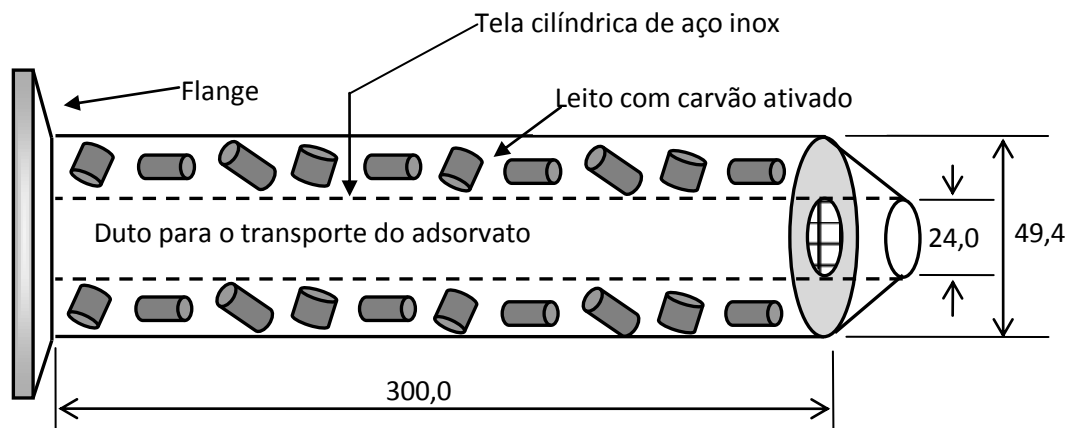


Figura D.1- Diagrama representativo do adsorvedor

O volume útil do leito é dado pela Equação D.1.

$$V_{LU} = V_L - V_D \quad (D.1)$$

Onde V_{LU} é o volume útil do leito que pode ser ocupado pelo carvão ativado; V_L é o volume total do leito adsorativo e, V_D é o volume do duto formado pela tela de aço inox. De posse destes dados o cálculo do volume útil do leito é dado pela Equação D.2.

$$V_{LU} = \frac{\pi \phi_L^2 C_L}{4} - \frac{\pi \phi_D^2 C_L}{4}, \text{ ou ainda: } V_{LU} = \frac{\pi C_L}{4} (\phi_L^2 - \phi_D^2) \quad (\text{D.2})$$

$$\text{Logo: } V_{LU} = 439279,4683 \text{ mm}^3 \text{ ou } 44 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

D.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA DO ADSORVENTE NO LEITO ADSORTIVO

Para a obtenção da massa de adsorvente comportada pelo leito adotou-se a seguinte rotina: primeiramente pesou-se uma determinada massa de adsorvente, suficiente para preencher todo o volume V_L , e em seguida, com o cilindro metálico do leito sob a ação de um vibrador, adicionou-se lentamente o adsorvente até o preenchimento completo de todo o seu volume útil, V_{LU} . Ao se verificar a estabilização do nível do adsorvente no leito, na sua capacidade máxima V_{LU} , determinou-se a massa remanescente e por diferença, obteve-se a massa de adsorvente no leito, M_{Ads} . A Tabela D.1, lista estes valores da massa do adsorvente. Este procedimento foi repetido mais duas vezes.

Tabela D.1- Valores da massa do adsorvente no leito adsorativo

Amostra	Massa de Adsorvente (g)
A	170,73
B	173,35
C	172,41
Valor Médio	172,83

D.3 CÁLCULO DA POROSIDADE DO LEITO ADSORTIVO

De posse dos dados do volume útil do leito e da massa do adsorvente nele contida, calcula-se a porosidade do leito, ε_L , a partir da Equação D.3.

$$\varepsilon_L = 1 - \frac{M_{Ads}}{\rho_{Ap} V_{LU}} \quad (D.3)$$

Onde ρ_{Ap} é a densidade aparente do adsorvente (a caracterização física do adsorvente está disponível no Anexo A).

Os valores encontrados para o cálculo da porosidade do leito estão dispostos na Tabela D.2.

Tabela D.2- Valores da porosidade do leito

Amostra	Volume útil do leito mm ³	Massa de Adsorvente (g)	Porosidade do Leito
A	44 x 10 ⁴	170,73	0,076
B	44 x 10 ⁴	173,35	0,062
C	44 x 10 ⁴	172,41	0,067
Valor Médio	44 x 10⁴	172,83	0,068

Logo, a porosidade média do leito adsorativo é, $\varepsilon_L = 0,068$.

Para o preenchimento do leito nos experimentos realizados, seguiu-se o mesmo procedimento ora apresentado, com o objetivo de servir de parâmetro representativo entre todos os experimentos realizados e futuros.

D.4 CÁLCULO DA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DO LEITO ADSORTIVO

A partir da determinação da massa média do adsorvente comportada pelo leito e de seu volume útil, V_{LU} , o cálculo da densidade de empacotamento do leito, ρ_{LU} , é dado pela Equação D.4.

$$\rho_{LU} = \frac{\bar{M}_{Ads}}{V_{LU}} = \frac{172,83 \cdot 10^{-3} Kg}{44 \cdot 10^{-5} m^3} = 392,77 Kg m^{-3} \quad (D.4)$$

APÊNDICE E

CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA, Pt-100

E.1 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS Pt-100

Os sensores Pt-100 foram calibrados, todos ao mesmo tempo, colocando-se os mesmos em um banho térmico de temperatura controlada. A Figura E.1 apresenta o banho térmico.



Figura E.1 Banho térmico utilizado para calibração dos sensores Pt-100.

Foram utilizados vinte e cinco temperaturas distintas para a aferição dos Pt-100. A Tabela E.1 lista os valores das temperaturas.

Tabela E.1 Valores das temperaturas utilizadas para calibração dos Pt-100

Temperaturas	Valores das temperaturas (°C)
Negativas (04 pontos)	1,9 – 2,8 – 6,8 e 9,4
Positivas (21 pontos)	0 – 5,2 – 10,3 – 15,0 – 20,1 – 24,5 – 30,0 35,0 – 40,0 – 45,3 – 50,6 – 55,5 – 60,9 – 65,5 70,7 – 75,8 – 80,6 – 85,7 – 90,7 – 95,0 – 100,7.

Para calibração das termorresistências Pt-100 utilizou-se o adaptação do método constante na norma NBR 13772 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A norma NBR 13772 especifica o método de calibração de termorresistência de platina, por comparação com termômetro de referência. Esta norma abrange a termorresistência de platina adequada para a faixa de -200°C a 850°C. A norma NBR 13772 preconiza que a termorresistência a ser aferida, juntamente com o termômetro de referência, devem ser inseridos em um banho térmico controlado. Os valores obtidos nos terminais terminais do sensor de temperatura devem ser lidos diretamente por um instrumento de medição. O método adaptado consiste de interpor entre o sensor de temperatura de platina e o medidor, um circuito eletrônico que converterá o valor da resistência do Pt-100 para um valor de tensão elétrica proporcional a esta. No método adaptado o medidor que antes era um instrumento destinado a medir resistência elétrica, é substituído por um capaz de mensurar tensão elétrica. Este procedimento permite que sejam ajustados o conjunto Pt-100/condicionador eletrônico de sinal.

Após a inserção dos Pt-100 no banho térmico, e depois de ser selecionada temperatura do banho e ligado o equipamento, aguarda-se o tempo necessário a estabilização da temperatura. Em seqüência, verificava-se a temperatura indicada em um termômetro padrão de mercúrio e colocava-se este valor no programa de coleta de dados. O termômetro padrão de mercúrio pode ser observado na Figura E.2, e a interface do programa para coleta de dados pode ser observada na Figura E.3.



Figura E.2 O termômetro padrão de mercúrio incorporado ao banho térmico.

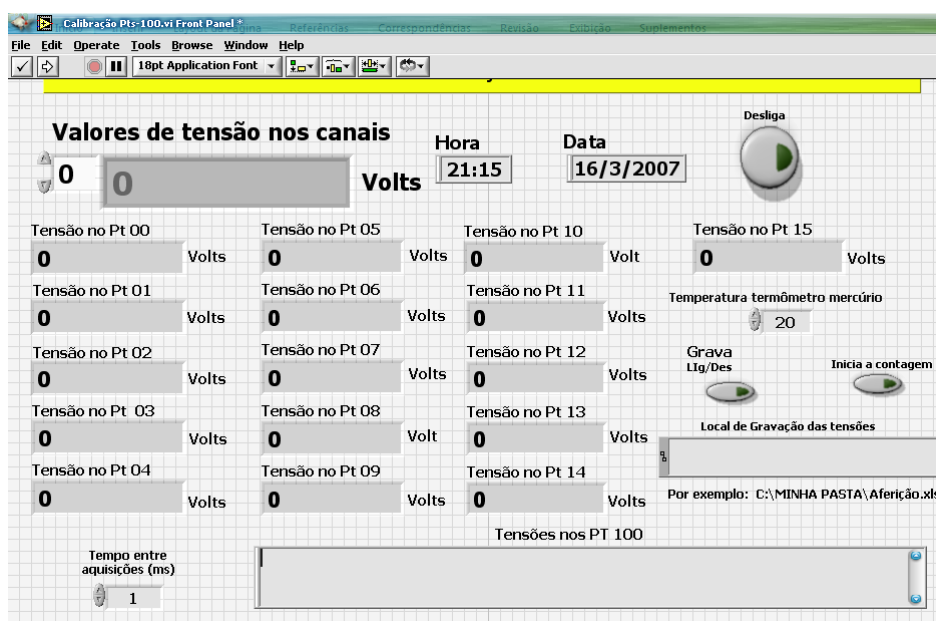


Figura E.3 Interface gráfica do programa para coleta das tensões elétricas dos Pt-100

Após a inserção do valor da temperatura lida no termômetro de mercúrio, o programa de coleta de dados era inicializado e realizadas 500 leituras das tensões elétricas de cada um dos sensores. O programa realizava a média destes valores de forma a gerar o par temperatura do banho térmico (T_{bt})-tensão do Pt (E_{pt}). A calibração foi realizada para a faixa situada entre $-9,4^{\circ}\text{C}$ até $+100,7^{\circ}\text{C}$.

A partir dos vários conjuntos de pares $T_{bt} - E_{pt}$, ajustou-se uma reta correlacionando estes valores. Os coeficientes de correlação obtidos para as retas ajustadas aos dados experimentais foram de aproximadamente 0,99 (indicando a grande linearidade destes sensores). Estes dados deram origem a equações de ajustes que foram introduzidas no software de supervisão e controle.

A Figura E.4 mostra uma das curva de calibração do Pt-100.

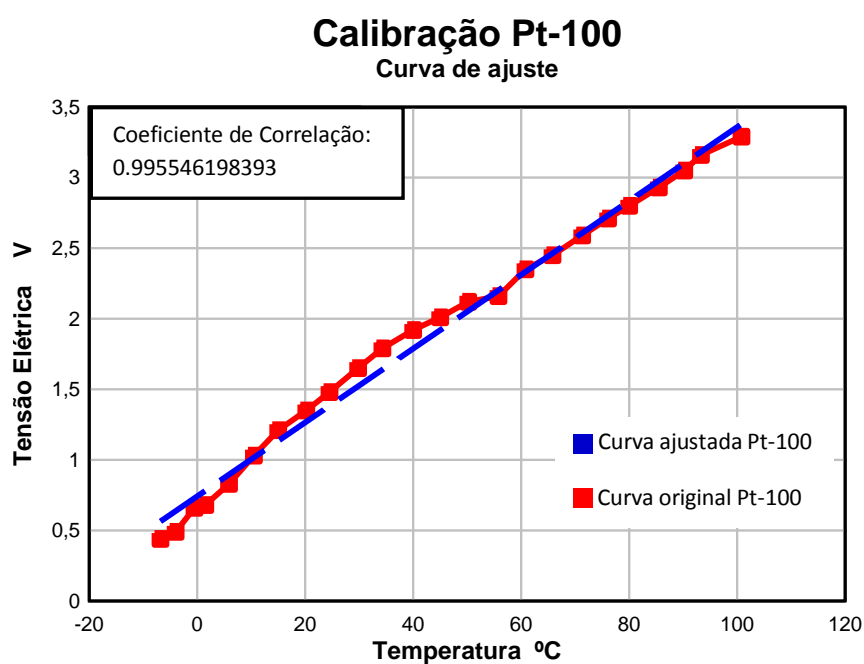


Figura E.4 Curva de calibração do Pt-100.

A seguir, a Tabela E.5 mostra as equações de ajuste, aplicadas ao programa de aquisição de dados, referentes a cada uma das tensões elétricas oriundas dos condicionadores de sinal dos sensores Pt-100.

Tabela E.5 Equação de ajuste dos Pt-100.

Pt-100	Equação de ajuste	Pt-100	Equação de ajuste
01	$31,5642 \cdot V - 47,5079$	10	$35,569 \cdot V - 24,38$
02	$35,9981 \cdot V - 24,4127$	11	$32,749 \cdot V - 49,924$
03	$30,7667 \cdot V - 48,6971$	12	$40,8134 \cdot V - 1,8785$
04	$37,967 \cdot V - 15,313$	13	$41,106 \cdot V - 1,94646$
05	$37,972 \cdot V - 13,1$	14	$40,707 \cdot V - 2,22646$
06	$37,671 \cdot V - 15,1$	15	$40,6823 \cdot V - 1,44677$
07	$31,5011 \cdot V - 47,135$		
08	$35,9981 \cdot V - 25,4127$		
09	$30,7667 \cdot V - 48,6971$		

APÊNDICE F

PRINCÍPIOS DA SUPERVISÃO E CONTROLE

F.1 PRINCÍPIOS DA SUPERVISÃO E CONTROLE DE SISTEMAS

Pode-se definir a supervisão e controle de um sistema como o software que contém um conjunto de programas gerado e configurado para implementar as estratégias de controle e supervisão, as interfaces gráficas para interação homem-máquina, a aquisição o gerenciamento e o tratamento de dados do processo. Alguns sistemas de supervisão e controle possuem uma linguagem procedimental ou gráfica (blocos funcionais), como é o caso da linguagem LabVIEW, para descrever procedimentos de controle a serem realizados em nível de supervisão.

A supervisão de um sistema possibilita que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. As informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário. Dentre as funções de monitoramento de um processo podem-se citar sinóticos animados, gráficos de tendência de variáveis analógicas e digitais, relatórios em vídeo ou impressos dentre outros. Nas funções de controle as operações de entrada e saída são executadas diretamente através de cartões de Entrada/Saída ligados diretamente ao barramento do micro, ou então por unidades descentralizadas remotas. Os dados são amostrados, um algoritmo de controle como um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), por exemplo, é executado e a saída é aplicada ao processo atuando sobre uma variável manipulada.

A regra geral para o funcionamento de um sistema de supervisão e controle parte dos processos de comunicação com os equipamentos de campo, cujas informações são enviadas para o núcleo principal do software. O núcleo é responsável por distribuir e coordenar o fluxo dessas informações para os demais módulos, até chegarem à forma esperada para o operador do sistema, na interface gráfica (geralmente acompanhadas de gráficos, animações e relatórios), de modo a exibir a evolução do estado dos dispositivos e do processo controlado, permitindo informar anomalias, sugerir medidas a serem tomadas ou reagir automaticamente.

Os dados adquiridos, oriundos de sensores instalados no sistema para captação de grandezas físicas inerentes ao processo, devem ser condicionados e convertidos em unidades de engenharia adequadas e armazenados em arquivos padronizados. Esses dados podem ser manipulados de modo a gerar valores para parâmetros de controle. Os arquivos padronizados poderão ser acessados por programas de usuários para realização de cálculos, alteração de parâmetros e dos seus próprios valores.

O software de supervisão e controle permite que estratégias de controle possam ser desenvolvidas utilizando-se de funções avançadas para o controle das funções do processo.

Após a estratégia de supervisão e controle ser configurada, o software básico deve executar, gerenciar e armazenar o resultado de cálculos e operações realizadas, o estado dos pontos e todas as informações necessárias. Cada ponto supervisionado ou controlado pode ser configurado de forma individual.

O mecanismo que possibilita a interação do usuário com o software do sistema de supervisão e controle é denominado interface gráfica do usuário. A interface gráfica é desenvolvida para facilitar e tornar prática a utilização do computador através de representações visuais do software do sistema de supervisão e controle. O usuário por intermédio do mouse, do teclado ou de telas sensíveis ao toque é capaz de selecionar símbolos e manipulá-los de forma a obter um resultado prático. Do exposto conclui-se que a interface gráfica do usuário, GUI (do inglês – Graphical User Interface), possibilita que um determinado sistema seja controlado e supervisionado. A seguir, descrevem-se as principais interfaces gráficas que um aplicativo de supervisão e controle pode conter:

- *Interface gráfica de visão geral*- são interfaces que apresentarão uma visão global de um processo, sob visualização imediata na operação do sistema. Nestas interfaces são apresentados os dados mais significantes à operação e objetos que representam o processo. Os objetos devem, preferencialmente, serem dotados de características dinâmicas, representando o estado de grupos de equipamentos e áreas dos processos apresentados. Os dados devem procurar resumir de forma significativa os principais parâmetros a serem controlados (ou monitorados) do processo específico;
- *Interfaces gráficas de grupo*- são interfaces representativas de cada processo ou unidade, apresentando objetos e dados de uma determinada área de modo a relacionar funções estanques dos processos. Os objetos devem ser dotados de características dinâmicas representando o estado e/ou condição dos equipamentos da área apresentada. Os dados apresentados devem representar valores quantitativos dos parâmetros supervisionados (ou controlados). As interfaces gráficas de grupo também possibilitam que sejam acionados os equipamentos da área através de comandos do tipo abrir/fechar ou ligar/desligar. Além disso, também é possível alterar os parâmetros de controle ou supervisão, tais como: setpoint e limites e modos de controle, dentre outros;
- *Interfaces gráficas de detalhe*- são interfaces que atendem a pontos e equipamentos controlados (ou monitorados) individualmente. Serão compostas, quando possível, por objetos com características dinâmicas, representando o estado do equipamento. Os dados apresentam todos os parâmetros do ponto supervisionado (ou monitorado). As interfaces gráficas de detalhe devem possibilitar ao usuário alterar os parâmetros do equipamento, seus limites, os seus dados de configuração, dentre outros;
- *Interfaces gráficas de malhas*- são interfaces que apresentam o estado das malhas de controle. Todas as interfaces devem apresentar os dados das variáveis controladas exibidas, tais como: setpoint, limites e condição dos alarmes (se houver), valor atual e valor calculado. Tudo, por exemplo, em forma de gráfico e em valores numéricos;
- *Interfaces gráficas de tendência histórica e real*- são interfaces que apresentam várias variáveis simultaneamente, na forma gráfica, com valores

coletados em tempo real (on-line), na forma de tendência real e na forma histórica (off-line) com os valores de arquivos pré-armazenados em disco. Estas tendências podem ser apresentadas em forma de gráficos ou em forma tabular, com os últimos valores coletados para cada variável;

- *Interfaces gráficas de manutenção*- são compostas por informações de problemas, alarmes e defeitos das diversas áreas referentes ao processo e equipamentos destes, incluindo o próprio sistema de controle. As informações são do tipo histórico de falhas. O histórico de falhas por equipamento ou área fica armazenado em arquivos no banco de dados, possibilitando o tratamento destas informações através de programas de usuário para estatísticas de utilização e defeitos.

A implementação das interfaces gráficas de um sistema de supervisão e controle depende da complexidade, das variáveis que se deseja supervisionar e controlar e do desempenho esperado para o sistema. Sendo assim, pode-se construir uma interface gráfica que agrupe elementos de vários outros tipos de interfaces, que devido aos fatores citados anteriormente não serão implementadas.

F.1.1 Componentes físicos de um sistema de supervisão e controle

Os componentes físicos de um sistema de supervisão e controle podem ser resumidos em: (1) sensores e atuadores, (2) rede de comunicação, (3) unidades descentralizadas remotas (aquisição/controle) e de (4) monitoração central (sistema computacional). As unidades descentralizadas remotas são unidades computacionais específicas, utilizadas em qualquer tipo de sistema que se deseje monitorar, para a funcionalidade de ler entradas, realizar cálculos ou controles, e atualizar saídas. Na Figura F.1 apresentam-se os componentes físicos de um sistema de supervisão e controle.

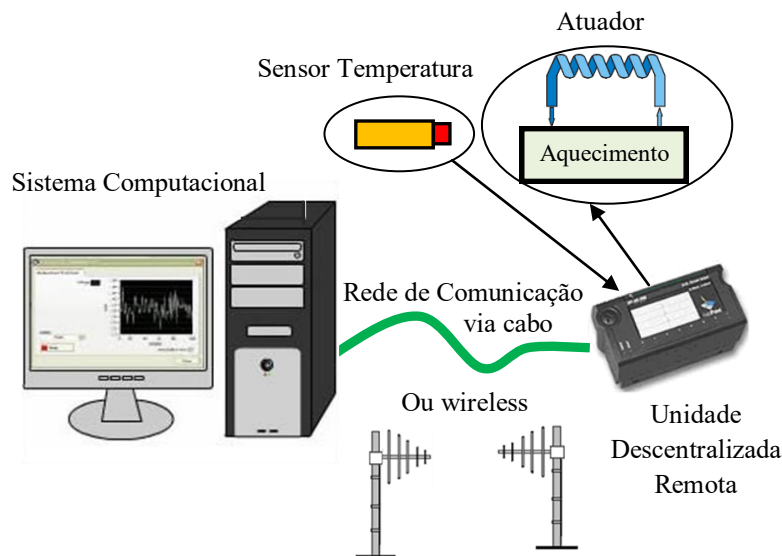


Figura F.1. Componentes físicos de um sistema de supervisão e controle.

Os sensores são dispositivos conectados aos equipamentos controlados e monitorados pelo sistema de supervisão e controle, que convertem parâmetros físicos tais como velocidade, nível de água, pressão e de temperatura, para sinais analógicos e digitais que são utilizados pela unidade descentralizada remota. Os atuadores são utilizados para atuar sobre o sistema, por exemplo, ligando e desligando determinados equipamentos.

O processo de controle e aquisição de dados se inicia na unidade descentralizada remota, com a leitura dos valores atuais dos dispositivos que a ela estão associados e seu respectivo controle.

A rede de comunicação é a plataforma por onde as informações fluem oriundas das unidades descentralizadas remotas para o sistema computacional. Considerando-se os requisitos do sistema e a distância a cobrir, a rede de comunicação pode ser implementada através de cabos multivias, cabos Ethernet, fibras ópticas, linhas discadas, linhas dedicadas, rádio modems, dentre outros.

F.1.2 Os objetos de um sistema de supervisão e controle

Um sistema de supervisão e controle gerencia determinado número de objetos (também denominados entidades). Os objetos descrevem as variáveis de processo controladas bem como também descrevem os elementos habituais encontrados no console de um terminal de controle. A atividade de configuração de um sistema de supervisão e controle inicia-se geralmente na definição de cada variável de processo. Em todo o sistema existem basicamente duas variáveis: (1) as simples ou primitivas e (2) as variáveis compostas, formadas a partir destas.

As variáveis primitivas podem ser classificadas como analógica ou discreta. Como principais atributos das variáveis analógicas destacam-se uma descrição sucinta da mesma, sua unidade de engenharia, o último valor lido da variável e se couber: o limite inferior (valor em unidade de engenharia a ser atribuído ao valor 0% da variável) e o limite superior (valor em unidade de engenharia a ser atribuído ao valor 100% da variável). Como atributos das variáveis discretas (também denominadas de variáveis digitais) destacam-se uma descrição sucinta da mesma e a descrição do seu estado, ou seja, o texto a ser atribuído aos estados 0 e 1 da variável, como por exemplo, aberto/fechado para válvulas e ligado/desligado para motores.

F.2 O CONTROLE DE PROCESSOS

O termo controle de processos pode ser definido como o controle que têm por objetivo manter certas variáveis de um sistema entre os seus limites operacionais desejados. Estes sistemas de controle podem necessitar constantemente da intervenção humana, ou serem automáticos (CAMPOS e TEIXEIRA, 2006).

A partir do momento em que a monitoração e o controle de um processo são realizados, o processamento das variáveis de campo é executado. Então, o controle do sistema permite que qualquer evento imprevisto no processo seja detectado e que mudanças nos valores tomados como referências sejam imediatamente providenciadas no sentido de normalizar a situação. Ao operador fica a incumbência de acompanhar o processo de controle, com o mínimo de interferência, excetuando-se casos em que sejam necessárias tomadas de decisão de sua restrita atribuição (FARIAS e TURNELL, 1996).

Neste momento faz-se necessária a definição da terminologia básica aplicada a sistemas de controle (OGATA, 2003).

Variável de processo (VP) - a variável de processo, também denominada variável de controle, é a variável que é controlada no processo. É a grandeza ou a condição que é mensurada e controlada, tal como temperatura, pressão e umidade, dentre outras.

Variável manipulada (VM) - a variável manipulada é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador, de tal forma que altere o valor da **VP**. A variável controlada é a saída do sistema, tal como: a tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, a posição de uma válvula, dentre outras.

Setpoint (SP) - o valor de setpoint ou valor de referência, é o valor desejado para a **VP**.

Erro ou desvio (e)- é a diferença entre o valor desejado e a variável de processo, ou seja $SP - VP$.

Controlar- significa medir o valor da variável controlada do sistema (**VP**) e utilizar a variável manipulada (**VM**) no sistema para corrigir ou limitar os desvios do valor medido (**e**) a partir de um valor desejado (**SP**). Define genericamente a atuação aplicada a variável manipulada (**VM**) na ocorrência de variações da variável de processo (**VP**). A ação de controle pode ser reversa ou direta.

Ação de controle reversa- na ação de controle reversa, se a variável de processo (**VP**) aumenta, a variável manipulada (**VM**) diminui. Tipicamente utilizada em controles de aquecimento.

Ação de controle direta- na ação de controle direta, se a variável de processo (**VP**) aumenta, a variável manipulada (**VM**) também aumenta. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração.

Sistemas a controlar ou plantas- qualquer objeto físico a ser controlado.

Processo- toda operação a ser controlada.

Sistema- combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. O conceito de sistema que se aplica a este trabalho é o que se relaciona a fenômenos físicos dinâmicos.

Distúrbio- é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Quando gerado fora do sistema ele é denominado distúrbio externo e se comporta como um sinal de entrada no sistema.

Diagrama de blocos- é uma representação gráfica das funções desempenhadas por cada componente de um sistema. Os blocos são conectados por meio de setas que indicam o sentido do fluxo de sinais. A seta que aponta para o bloco indica a entrada e a seta que aponta para fora do bloco representa a saída. Essas setas são também designadas como sinais. Em um diagrama em blocos, todas as variáveis do sistema são ligadas umas as outras por meio de blocos funcionais. Sendo assim, o diagrama de blocos descreve o inter-relacionamento que existe entre os vários componentes. Um diagrama de blocos contém informações relativas ao comportamento dinâmico, mas não contempla nenhuma informação sobre a construção física do sistema. Na Figura F.2 apresentam-se os elementos básicos constituintes de um diagrama de blocos.

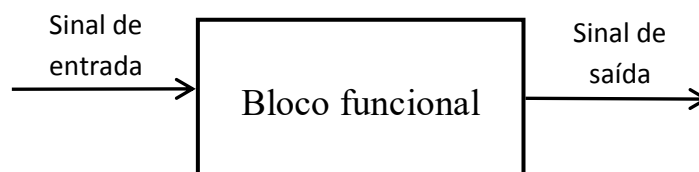


Figura F.2. Elementos básicos constituintes de um diagrama de blocos.

Somador- o somador é um círculo com um “*xis*”. Esse símbolo indica a operação de soma. O sinal de mais e o sinal de menos na extremidade de cada seta indica se o sinal deve ser somado ou subtraído. Vale salientar que as quantidades a serem somadas ou subtraídas devem ter as mesmas dimensões e as mesmas unidades.

Ponto de ramificação- é um ponto em que o sinal que vem de um bloco avança simultaneamente em direção a outros blocos ou somadores. Na Figura F.3 representa-se o somador e o ponto de ramificação.

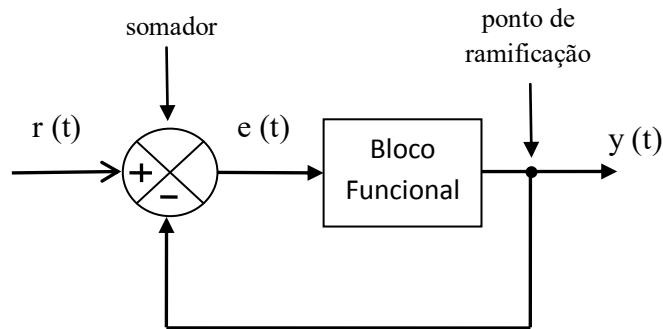


Figura E.3. O somador e o ponto de ramificação.

Os sistemas de controle podem atuar em malha aberta ou em malha fechada.

F.2.1 O controle em malha aberta

O controle em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle pré-determinado, esperando-se que ao final de um determinado tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. Neste tipo de sistema de controle não são utilizadas informações sobre evolução do processo (sinal de saída) para determinar o sinal de controle a ser aplicado em um determinado instante. Mais especificamente, o sinal de controle não é calculado a partir de uma medição do sinal de saída.

No controle em malha aberta, a cada entrada de referência corresponderá uma condição fixa de operação. As características básicas deste tipo de controle são a imprecisão e nenhuma adaptação a distúrbios externos. Por outro lado são em geral simples e baratos, pois não envolvem equipamentos sofisticados para medição e/ou determinação do sinal de controle.

Qualquer sistema de controle cujas operações são efetuadas em uma sequência em função do tempo é um sistema de malha aberta. Na Figura F.4 apresenta-se o diagrama em blocos de um sistema de controle em malha aberta.



Figura F.4 Diagrama em blocos de um sistema de controle em malha aberta.

F.2.2 O controle em malha fechada

No controle em malha fechada, informações sobre como a saída de controle está evoluindo são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. Isto é feito a partir de uma *realimentação* da saída para a entrada. Em geral, a fim de tornar o sistema mais preciso e de fazer com que ele reaja a distúrbios externos, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência (chamado comumente de *set-point*) e o desvio (erro) entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que será aplicado ao processo. Assim, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre a saída e o sinal de referência. O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de *controlador* ou *compensador*.

A utilização da realimentação e, portanto, do controle em malha fechada, permite entre outros: (1) aumentar a precisão do sistema, (2) rejeitar o efeito de distúrbios externos, (3) melhorar a dinâmica do sistema (estabilizar um sistema naturalmente instável em malha aberta) e (4) diminuir a sensibilidade do sistema a variações dos parâmetros do processo (torna o sistema *robusto*).

O diagrama básico de um sistema de controle em malha fechada é mostrado na Figura F.5.

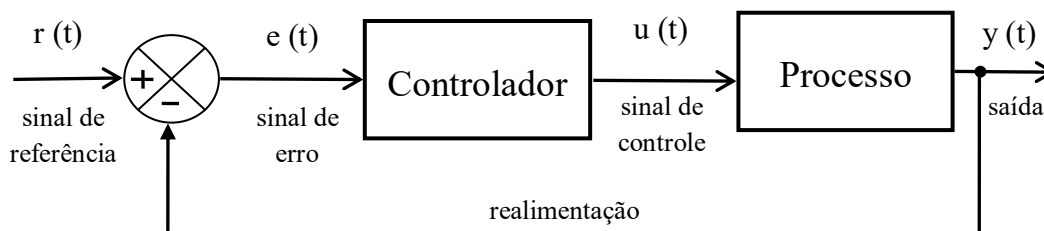


Figura F.5. Diagrama básico de um sistema de controle em malha fechada

F.2.3 Controladores automáticos

Um controlador automático compara o valor real de saída do sistema físico a ser controlado com a entrada de referência (setpoint), determina o desvio e produz um sinal de controle que vai reduzir o desvio a zero ou a um valor bem pequeno. O modo como o controlador automático produz o sinal de controle é chamada de ação de controle. Na Figura F.6, segundo Johnson e Moradi (2005), apresenta-se o diagrama de blocos representativo de um sistema de controle industrial. Esse diagrama consiste de um controlador automático, um atuador, uma planta, um elemento de medida (sensor) e um condicionador de sinal.

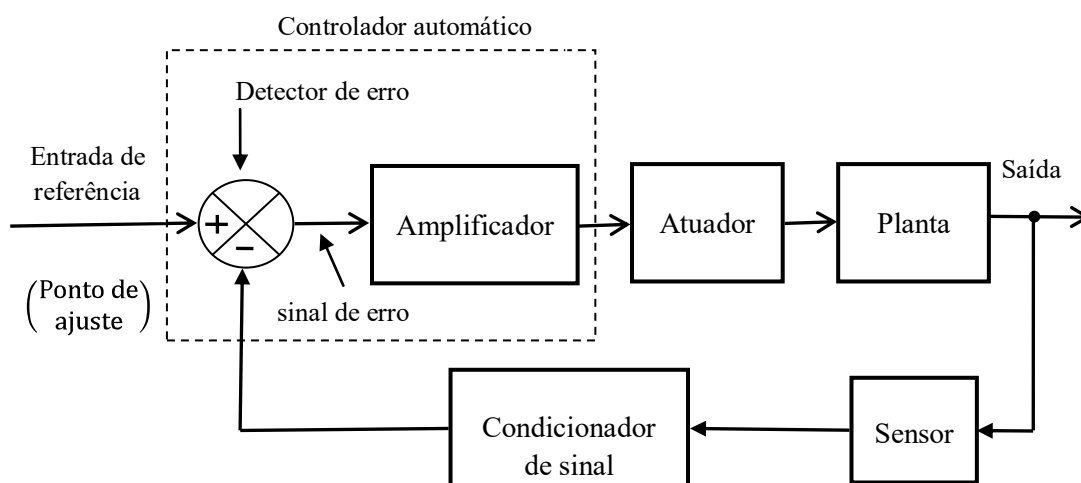


Figura F.6 Diagrama de blocos de um sistema de controle industrial.

O controlador detecta o sinal de erro, sendo este, geralmente, de pequeno valor, e o amplifica a um valor adequado ao sistema. A saída do controlador automático alimenta um atuador.

O atuador é um dispositivo capaz de manejar potências consideráveis e que atua na planta (segundo o sinal de controle) com a finalidade de fazer com que a saída se aproxime do sinal de entrada de referência.

O elemento de medição, sensor/transdutor, que fica situado no ramo de realimentação do sistema de malha fechada, é um dispositivo que faz a conversão da variável de saída em outra variável. Este dispositivo normalmente converte uma grandeza física qualquer em um sinal de origem elétrica.

O condicionador de sinal, também situado na linha de realimentação do sistema de malha fechada, é geralmente um circuito eletrônico que é capaz de realizar a conversão do sinal oriundo do sensor em um sinal capaz de ser comparado com o sinal de entrada de referência.

F.2.4 Algoritmos de controle tradicionais

Os algoritmos de controle classificam os controladores de acordo com suas ações de controle.

O controlador liga-desliga ou *on-off* - é o tipo mais simples. Este tipo de controle implica em que sempre se use a ação corretiva máxima. Deste modo a variável manipulada tem seu valor máximo quando o erro é positivo e seu valor mínimo quando o erro é negativo. Neste tipo de controle não há parâmetros a serem configurados a não serem as ações de mínimo e máximo que se executam no sinal de controle. O controle *on-off* muitas vezes é apropriado para manter a variável controlada do processo próxima ao valor de referência que foi especificado, mas tipicamente resulta em um sistema onde as variáveis oscilam. Portanto, sua principal desvantagem é a variação permanente da saída controlada em torno do sinal de referência desejado.

Matematicamente sua ação pode ser descrita como:

$$u(t) = \begin{cases} u_{max} & \text{para } e > 0 \\ u_{min} & \text{para } e < 0 \end{cases}$$

(F.1)

Onde $e = r(t) - y(t)$ representa a diferença entre a referência especificada pelo operador e a saída medida do processo e é denominado erro de controle. Os valores u_{max} e u_{min} são constantes. O valor mínimo u_{min} é normalmente zero ou então $-u_{max}$. Na Figura F.7 apresentam-se as características de um controlador liga-desliga, onde uma resposta típica é também apresentada.

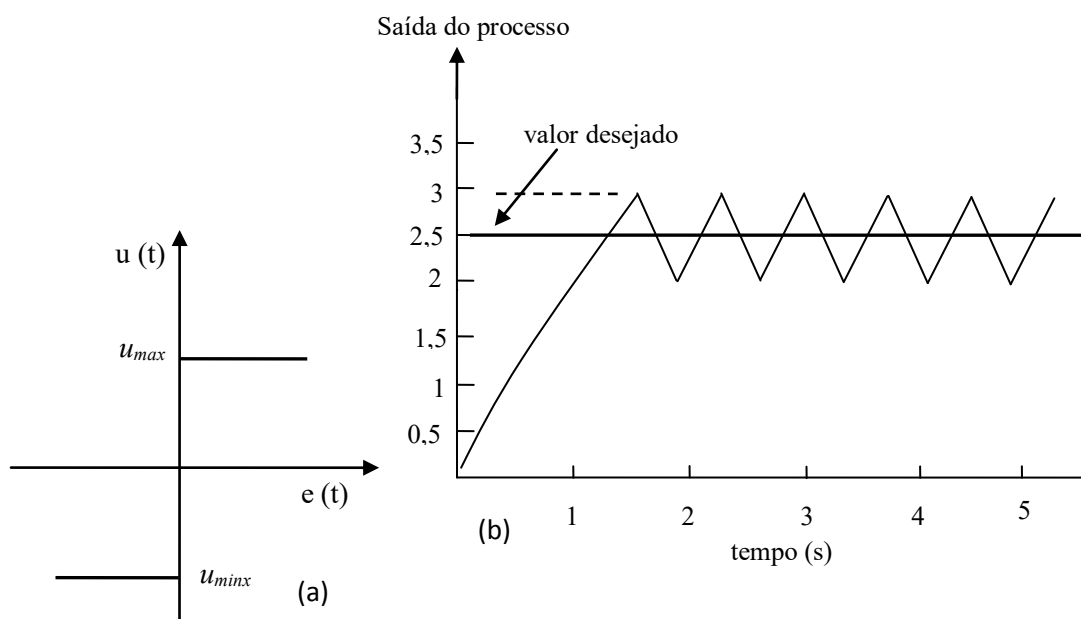


Figura F.7 (a) Característica de um controlador liga-desliga; (b) forma de onda típica de saída.

Através da observação do gráfico da Figura F.7 constata-se que no controle *on-off*, o sinal $u(t)$ permanece em um valor máximo ou em um valor mínimo, conforme o sinal de erro seja negativo ou positivo. Para diminuir a frequência desta oscilação pode-se acrescentar ao sistema de controle um parâmetro denominado histerese. Este parâmetro corresponde a uma região simétrica ao valor da referência desejada e cria assim uma região na qual a saída do controlador $u(t)$ mantenha seu valor presente até que o sinal de erro atuante tenha sido movido além do valor desta faixa. O novo comportamento da saída é mostrado na Figura F.8. Com isto consegue-se uma diminuição na frequência de oscilação da saída, porém se a histerese for definida com um valor muito elevado a variação na amplitude da saída será muito grande e um novo problema surge.

Assim o valor da histerese será um compromisso entre precisão desejada e a durabilidade do elemento atuador.

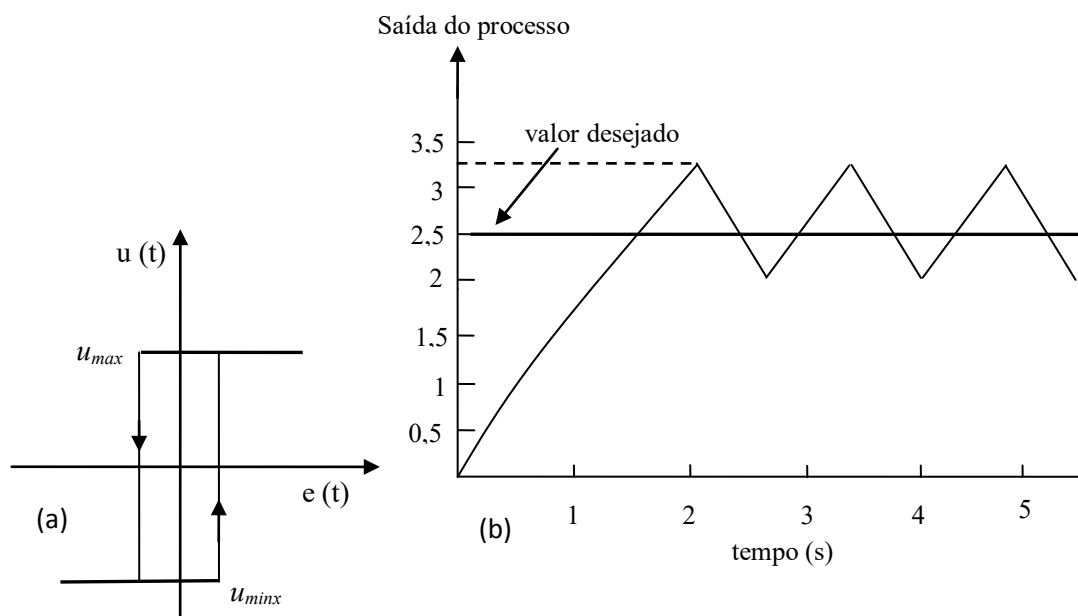


Figura F.8 (a) Característica de um controlador liga-desliga com histerese; (b) forma de onda típica de saída.

O controlador proporcional – tem sua ação de controle proporcional ao erro, ou seja, o controlador proporcional (P) gera a sua saída proporcional ao tamanho do sinal de erro atuante, $e(t)$. Na equação, no domínio do tempo, do algoritmo de posição do controlador P, a saída $u(t)$ é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + u_0 \quad (F.2)$$

O fator multiplicativo, K_p , é denominado ganho do controlador. A variável u_0 é o valor inicial (sinal de polarização), ou seja, é a posição da saída do controlador no momento em que ele foi colocado em automático. A ação de controle é simplesmente proporcional ao erro. Quando o erro de controle é igual a zero, a variável de controle $u(t) = u_0$, ou seja, nenhuma energia é entregue ao processo, o que faz com que volte a surgir o desvio. Por causa disto, um controle proporcional puro nunca consegue estabilizar com a variável de processo=setpoint. Para contornar este problema adiciona-se um valor constante à saída da variável de controle para garantir que na condição Variável de

Processo = Setpoint alguma energia seja entregue ao sistema, tipicamente 50%. Este valor constante é denominado de polarização (bias), e quando ajustável permite que se obtenha uma estabilização da variável de processo mais próxima do setpoint. A polarização u_0 a princípio é fixada em $(u_{max} - u_{min})/2$, contudo pode ser ajustada manualmente de forma que o erro de controle em estado estacionário seja zero em uma dada referência. Observe-se que quanto maior o ganho, maior será a ação do controlador, para um mesmo desvio ou erro na variável de processo. A Figura F.9 mostra o diagrama de bloco para o controle proporcional.

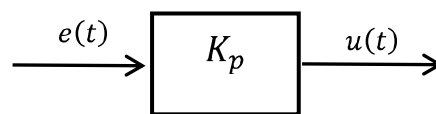


Figura F.9 Diagrama em blocos do termo de controle proporcional.

A Figura F.10 mostra o diagrama de blocos de um controlador do tipo proporcional inserido em um sistema com controle automático.

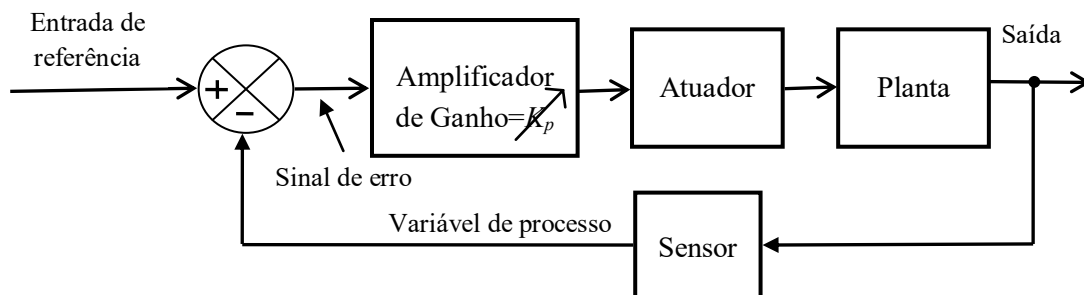


Figura F.10 Diagrama de blocos de um sistema com um controlador proporcional.

Conclui-se que o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com um ganho ajustável, qualquer que seja o mecanismo real e o tipo de energia utilizada na operação.

Para descrever a característica do controlador proporcional deve-se especificar os limites u_{max} e u_{min} da variável de controle. A faixa linear pode ser dada pela inclinação da curva característica (ganho K_p do controlador), ou seja, a faixa onde a curva característica é

linear (conhecida como banda proporcional BP). Esta faixa está normalmente centrada em torno do valor da referência. A banda proporcional e o ganho do controlador estão relacionados através da equação abaixo.

$$u_{max}-u_{min} = K_p \times BP \quad (F.3)$$

Normalmente se assume que $u_{max}-u_{min} = 100\%$, o que implica que o ganho proporcional pode ser definido, como:

$$K_p = 100\%/BP \quad (F.4)$$

A banda proporcional também pode ser definida como o erro que provoca uma variação de 100% na saída do controlador:

$$\Delta u(t) = \frac{100}{BP} \times \Delta e(t) \quad (F.5)$$

A Figura F.11 mostra a curva característica de um controlador proporcional. Este tipo de controlador é caracterizado por uma função não linear $u = f_c(e)$, a qual é dependente do erro de controle.

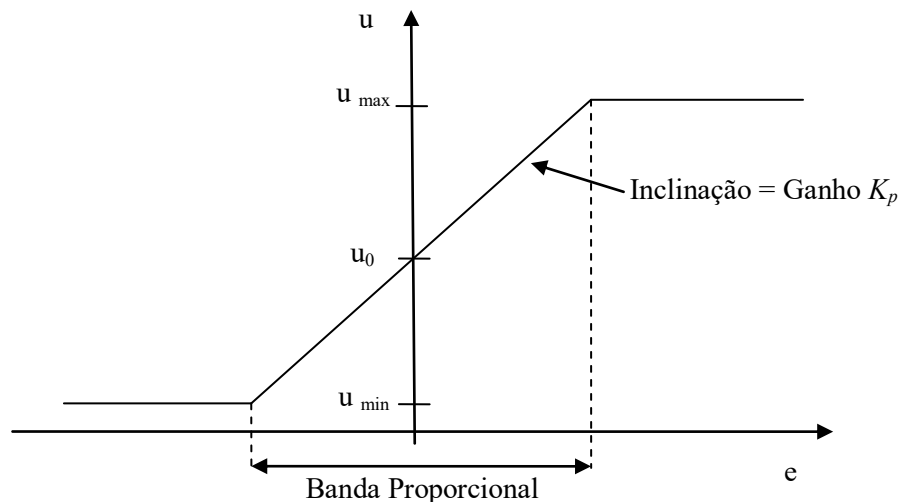


Figura F.11 Curva característica de um controlador proporcional. A entrada é o sinal de erro $e(t)$, e a saída é o sinal de controle $u(t)$.

A Figura F.12 ilustra o efeito da variação da banda proporcional, BP, no controle de um processo.

Na Figura F.12 (A) com a banda proporcional grande, o processo atinge uma condição de equilíbrio. Ele se estabiliza, porém muito abaixo do setpoint. Neste caso a quantidade de energia entregue ao sistema através da variável manipulada, é a necessária para manter a variável de processo no valor em que ela está. O processo irá permanecer estável nesta condição se nenhuma perturbação ocorrer. Apesar de estável o processo não atingiu o setpoint, existindo o chamado erro em regime permanente. Com a diminuição da BP em (B) , observa-se que a estabilização ocorre mais próxima do setpoint, mas ainda há erro de regime permanente. Em (C) verifica-se uma redução excessiva da BP o que leva o processo à instabilidade (oscilação), ocorrendo o sobressinal, onde a variável de processo ultrapassa o valor de setpoint. Isto ocorre pelo longo tempo em que a variável manipulada esteve no seu valor máximo e por ter sua redução se iniciado já muito próxima do valor desejado, quando não mais se pode evitar o sobressinal.

O ajuste da banda proporcional faz parte do processo denominado de sintonia de controle.

Quando a condição desejada ($VP = SP$) é atingida, o termo proporcional resulta em que $VM = 0$, ou seja, nenhuma energia é entregue ao processo, o que faz com que volte a surgir desvio. Por causa disto, um controle proporcional puro nunca consegue estabilizar com $VP = SP$.

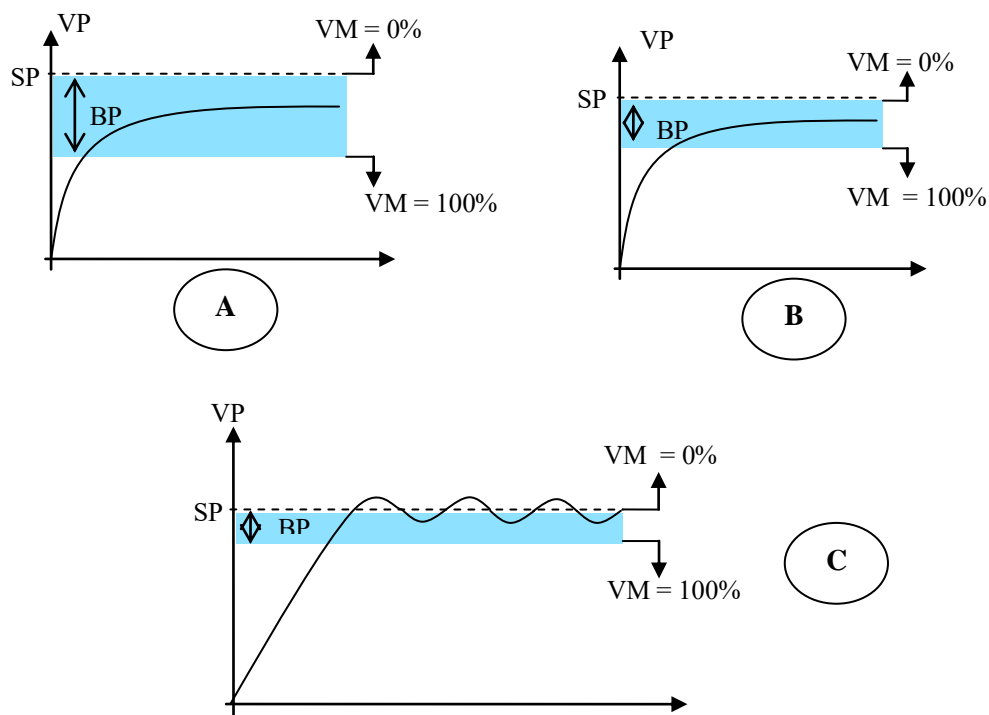


Figura F.12 Efeito da redução da BP no comportamento da variável de processo.

Muitos controladores que operam apenas no modo Proporcional, adicionam um valor constante à saída da variável de controle para garantir que na condição variável de processo=setpoint alguma energia seja entregue ao sistema, tipicamente 50%. Este valor constante é denominado *Bias* (polarização), e quando ajustável permite que se obtenha uma estabilização da variável de processo mais próxima ao setpoint.

Na Figura F.13 mostra-se a ação do controlador proporcional quando ocorre um *erro* em degrau. Constata-se que a ação proporcional tem a mesma forma do *erro*, apenas multiplicada por um ganho proporcional (no caso $K_p = 2$).

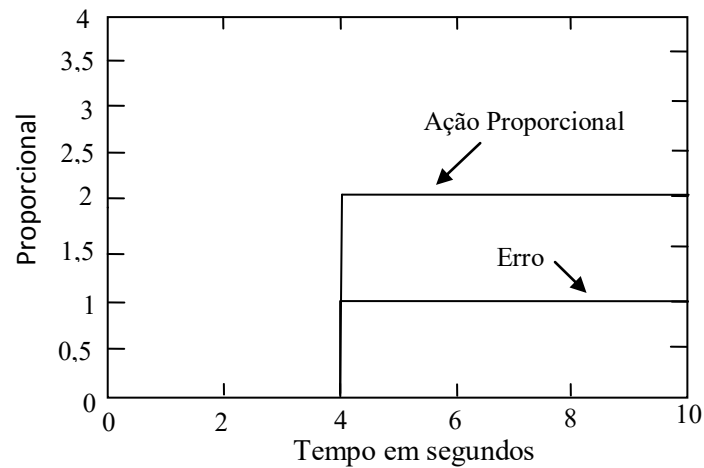


Figura F.13 Ação do controlador proporcional submetido a um erro degrau.

Vale salientar que o controlador proporcional atua como um controlador *on-off* quando os erros de controle são grandes.

O controlador integral – em um controlador com ação de controle integral, o valor de saída $u(t)$ do controlador sofre alteração a uma taxa de variação proporcional ao sinal de erro $e(t)$. A representação do controlador integral no domínio do tempo é:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (\text{F.6})$$

$$\text{Logo: } u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (\text{F.7})$$

Onde K_i é o ganho do controlador integral. O diagrama de blocos no domínio do tempo é mostrado na Figura F.14.

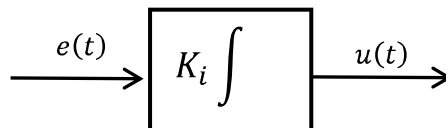


Figura F.14 Diagrama em blocos do termo de controle integral.

Na Figura F.15 mostra-se a ação do controlador integral quando ocorre um *erro* em degrau. Constata-se que a ação integral será a integral do degrau, que é uma rampa. A ação integral irá aumentar ou diminuir a saída do controlador indefinidamente enquanto houver erro. O tempo integral observado na Figura F.14 é igual a 2.

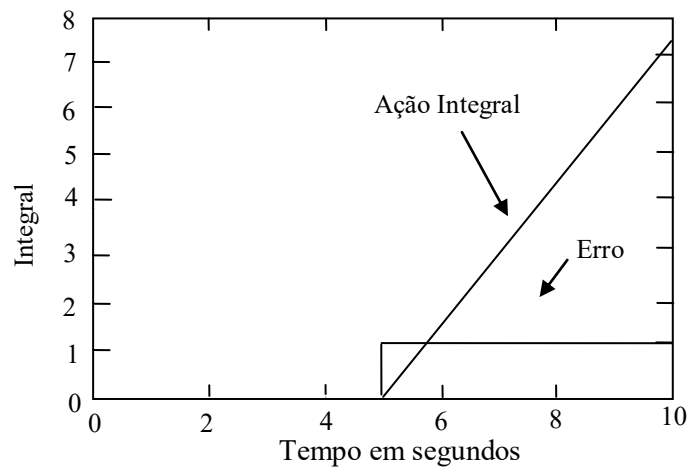


Figura F.15 Ação do controlador integral submetido a um erro degrau.

O controlador derivativo – no controlador com ação derivativa, o valor de saída $u(t)$ do controlador é proporcional à derivada do erro $e(t)$. Ou seja:

$$u(t) = K_D \frac{de}{dt} \quad (\text{F.8})$$

Onde o ganho do controle derivativo é denominado K_D . Como descrito em Johnson e Moradi (2005) esta forma particular é denominada de controle derivativo puro, para a qual a representação em diagrama de bloco é mostrada na Figura F. 16.

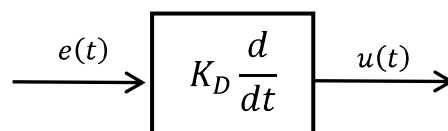


Figura F.16 Diagrama em blocos do termo de controle derivativo.

Na Figura F.17 mostra-se a ação derivativa do controlador integral quando ocorre um erro em rampa. Observa-se que a ação integral será um valor constante (degrau), pois a derivada de uma rampa é um valor fixo (neste caso $de/dt = 1$) que será multiplicado por um tempo derivativo (neste caso $K_p = 2$ e $T_D = 7$).

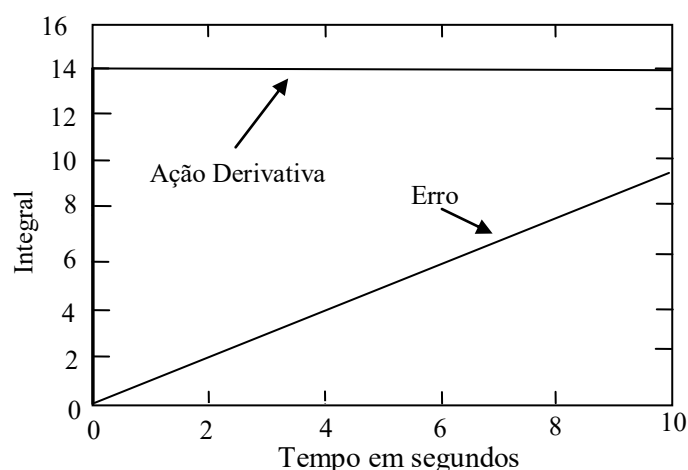


Figura F.17 Ação do controlador derivativo quando ocorre um erro em rampa.

No controlador derivativo, uma grande taxa de variação de erro pode causar uma grande ação corretiva, mesmo que o erro seja pequeno. Por outro lado, caso o sinal de erro não varie, não existirá ação corretiva, ainda que o erro seja grande. A utilização do controle derivativo requer mais cuidado do que quando se utiliza o controle proporcional ou o integral. Segundo Johnson e Moradi (2005), em muitas aplicações reais um controle derivativo puro não é utilizado devido à possibilidade de amplificação do ruído de medição. Sendo assim uma modificação no termo derivativo tem de ser implementada.

Na Tabela F.1 apresenta-se algumas considerações acerca das ações proporcional, integral e derivativa.

Tabela E.1 Considerações acerca das ações proporcional, integral e derivativa

Controlador	Ação no processo	Considerações
P	CORREÇÃO PROPORCIONAL AO ERRO	A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.
I	CORREÇÃO PROPORCIONAL AO PRODUTO ERRO x TEMPO	Erros pequenos mas que existem a muito tempo requerem correção mais intensa.
D	CORREÇÃO PROPORCIONAL À TAXA DE VARIAÇÃO DO ERRO	Se o erro está variando muito rápido esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

O controlador proporcional-integral (PI) – o controlador integral não é isoladamente uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação do controlador proporcional e integral (PI) gera a sua saída proporcionalmente ao erro (P), e proporcionalmente à integral do erro (I). Sendo assim, a ação consiste em uma resposta na saída do controlador, VM, que é proporcional à amplitude e duração do desvio. A ação integral tem o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional (erro em regime permanente).

A equação, no domínio do tempo, para um controlador PI clássico é descrita abaixo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (E.9)$$

Onde o ganho proporcional é K_p , e o ganho integral é K_i . No diagrama de bloco da Figura F.18 apresenta-se o controlador PI clássico.

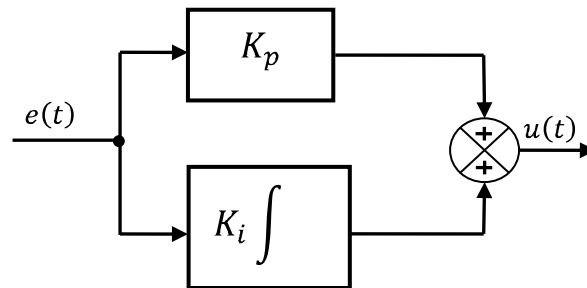


Figura F.18 Diagrama de blocos de um controlador proporcional-integral clássico.

Em aplicações industriais é comum se utilizar de uma representação do controlador PD denominada de forma *constante de tempo*. A forma constante de tempo, que modifica os parâmetros do PD, pode ser deduzida a partir da forma desacoplada descrita pela Equação F.10.

Da Equação F.10, coloca-se K_p em evidência, então temos:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (F.10)$$

Em seqüência define-se a constante de tempo de integração, como:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{F.11})$$

Então, substituindo 11 em 10, vem:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (\text{F.12})$$

Onde T_i é a constante de tempo integral.

Assim temos que o ganho proporcional também multiplica o termo integral.

Na Figura F.19 apresenta-se a ação do controlador PI quando ocorre um *erro* em degrau. Observa-se que a ação proporcional, considerando-se $K_p = 2$, muda instantaneamente a saída na presença de um erro, contudo é a ação integral que continua mudando a saída enquanto existir esse erro. Portanto o controlador PI não irá aceitar um erro em regime permanente entre o valor de referência (setpoint) e a variável a ser controlada. A saída do controlador tenderá a saturar na tentativa de eliminar o erro.

Pode-se também observar na Figura F.19 que, após o tempo integral, que neste caso é 2, a ação integral fez com que a saída repetisse a ação proporcional. Isto é, quando ocorreu o erro de 1%, a saída do controlador foi para 2% devido à ação proporcional e, após o tempo integral de 2 segundos a saída foi para 5% devido à ação integral de 3% adicionada a ação proporcional, que continua em 2%. Pode-se dizer que a ação integral *repetiu* a ação proporcional. Este é o motivo pelo qual o tempo integral (T_i) também é conhecido como o tempo de repetição, e o seu inverso ($1/T_i$) como repetições por minuto ou segundos.

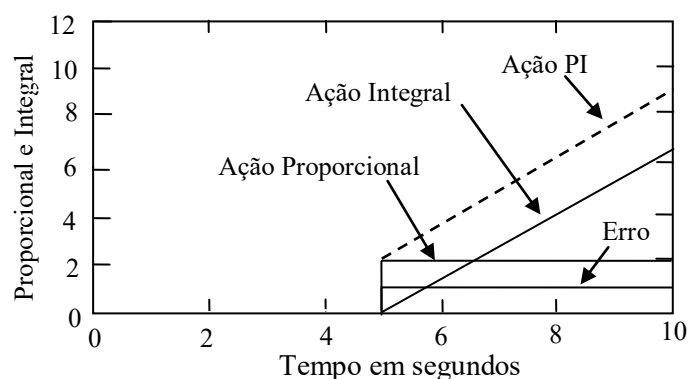


Figura F.19 Ação do controlador proporcional e integral submetido a um erro degrau.

Na Figura F.20 mostra-se a ação do controlador proporcional no instante em que foi incluída a ação integral. Observa-se a gradual elevação do valor da variável manipulada e a conseqüente eliminação do erro em regime permanente. Com a inclusão da ação integral, o valor da variável manipulada é alterado progressivamente no sentido de eliminar o erro da variável de processo, até que a variável de processo e a variável manipulada alcancem um novo equilíbrio, mas agora com $VP = SP$.

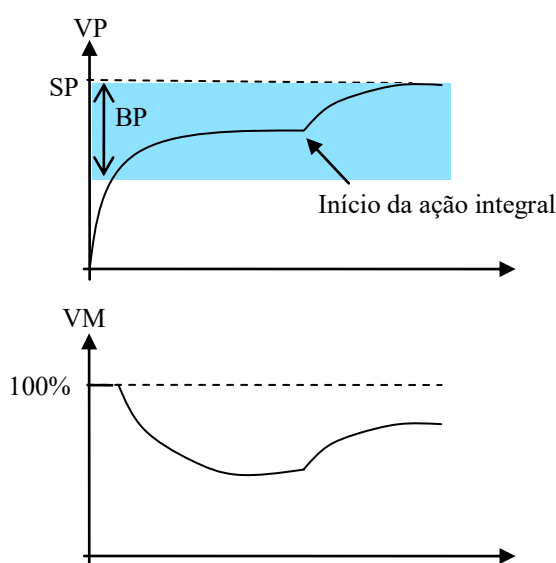


Figura F.20 Efeito da ação integral no controlador proporcional.

A ação integral funciona do seguinte modo: a intervalos regulares a ação integral corrige o valor da variável manipulada, somando a esta o valor do desvio $SP - VP$. Este intervalo de atuação é denominado de tempo integral, que pode também ser expresso pelo seu inverso que é a taxa integral (ou repetições por minuto, como dito anteriormente). O aumento da taxa integral aumenta a atuação integral no controle do processo.

A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro em regime permanente, e a adoção de um termo integral excessivamente atuante pode levar o processo a instabilidade. Já a adoção de um termo integral pouco atuante retarda em demasia a estabilização $VP = SP$.

O controlador proporcional-derivativo – o controlador derivativo não é isoladamente uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. O controlador proporcional e derivativo (PD) gera a sua saída proporcionalmente ao erro (P), e proporcionalmente à deriva do erro. Sendo assim, a ação

consiste de uma resposta na saída do controlador, VM, que é proporcional à velocidade de variação do desvio. A ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações da variável de processo evitando que se eleve ou reduza muito rapidamente.

O termo derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está estável, seu efeito é nulo. Durante perturbações ou na partida do processo, quando o erro está variando, o derivativo sempre atua no sentido de atenuar variações. Ao antecipar a variação da variável de processo, a ação derivativa reduz ou elimina o sobressinal e as oscilações no período transitório, sendo portanto sua principal função melhorar o desempenho do processo durante os transitórios.

A equação, no domínio do tempo, para um controlador PD é descrita abaixo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de}{dt} \quad (\text{F.13})$$

Onde o ganho proporcional é denominado K_p , e o ganho derivativo é K_D . O diagrama de bloco para um controlador PD clássico é mostrado na Figura F.21.

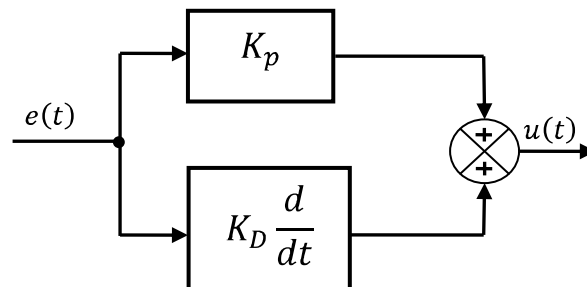


Figura F.21 Diagrama de blocos de um controlador proporcional-derivativo clássico.

Contudo, representações industriais do controlador PD freqüentemente utilizam a forma *constante de tempo* para os parâmetros do PD no lugar da forma desacoplada apresentada na equação F.10.

Da equação F.13 colocando-se K_p em evidência, temos:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{K_D}{K_p} \frac{de}{dt} \right) \quad (\text{F.14})$$

Define-se a constante de tempo como:

$$T_D = \frac{K_D}{K_p}$$

(F.15)

Substituindo E.15 em E.14, vem:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

(F.16)

Onde T_D é a constante de tempo derivativa.

Na Figura F.22 mostra-se a ação do controlador PD quando ocorre um erro em rampa. Observa-se que a ação proporcional é uma rampa (ganho $K_p = 3$) e a ação derivativa adiciona um valor constante a esta rampa. Observa-se, ainda, que o tempo derivativo ($T_D = 5$) antecipa a ação proporcional que só iria ocorrer no tempo de 5 segundos depois. Caso não existisse a ação derivativa a saída do controlador só seria igual a 15% depois de transcorridos os 5 segundos. Mas, conforme se observa na Figura F.20, com o tempo derivativo igual a cinco, a saída do controlador já é igual a 15% no tempo zero, imediatamente após o controlador ter calculado a derivada do erro. Conclui-se, então, que o termo derivativo procura estimar uma tendência de aumento ou diminuição do erro, e atuar na saída do controlador de modo a eliminar este erro que está sendo previsto no futuro. Logo a ação derivativa tem uma função de antecipação e também evita oscilações em processos lentos.

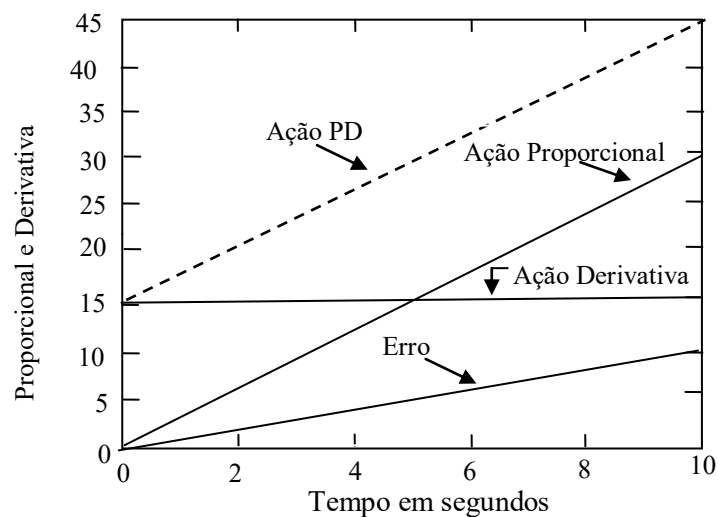


Figura F.22 Ação do controlador proporcional-derivativo quando ocorre um erro em rampa.

Na Figura F.23 mostra-se a contribuição da ação derivativa no controlador PD. Observa-se que a ação derivativa reduz o valor da variável manipulada se a variável de processo está crescendo muito rápido.

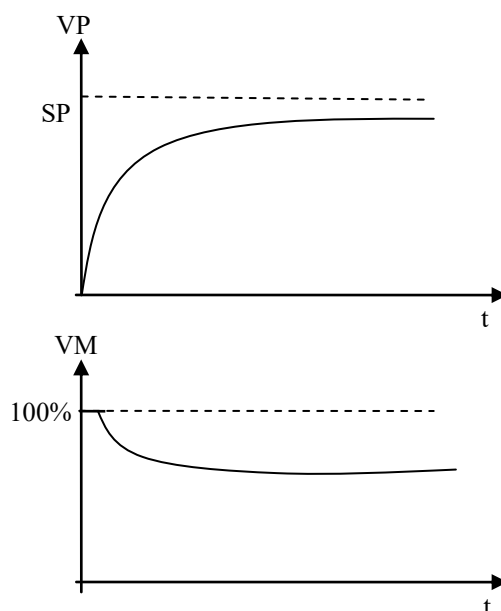


Figura F.23 Contribuição da ação derivativa no controlador PD.

A ação derivativa no controle funciona do seguinte modo: a intervalos regulares o controlador calcula a variação do desvio do processo, somando à variável manipulada o valor desta variação. Se a variável de processo está aumentando, o desvio está reduzindo, resultado de uma variação negativa, que reduz o valor da variável manipulada e conseqüentemente retarda a elevação da variável de processo. A intensidade da ação derivativa é ajustada variando-se o intervalo de cálculo da diferença, sendo este parâmetro

o tempo derivativo T_D . O aumento do valor de T_D aumenta a ação derivativa, reduzindo a velocidade de variação da variável de processo.

O controlador proporcional, integral e derivativo – o controlador PID, reúne todas as características apresentadas anteriormente. Sendo assim, o controlador proporcional, integral e derivativo (PID) tem a sua saída proporcional ao erro (P), proporcional à integral do erro e proporcional a derivada do erro.

A família dos controladores PID é construída de várias combinações dos termos proporcional, integral e derivativo de acordo com os requerimentos de desempenho; contudo a essência do controlador PID continua a mesma (ISERMANN, 1989; LUYBEN, 1990; SHINSKEY, 1989). Uma das combinações para o controlador PID é a combinação em que os termos P, I e D são dispostos de forma paralela. Este arranjo é também conhecido como um arranjo acadêmico do controlador PID ou ainda como equação paralela. A equação paralela não incorpora qualquer das modificações que usualmente podem ser implementadas para a obtenção de um controlador mais funcional.

Esta separação dos três termos é melhor evidenciada na Figura F.24.

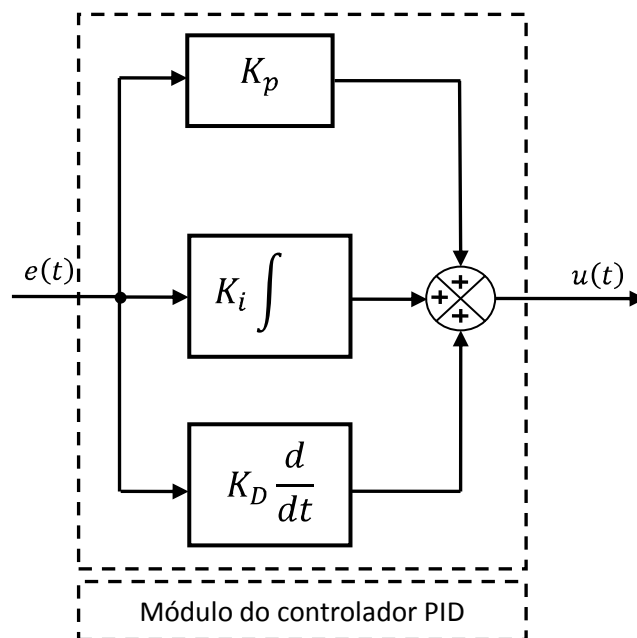


Figura F.24 Arquitetura paralela para o controlador PID clássico.

Uma análise que é possível fazer observando-se a Figura F.24, é que uma mudança numérica em qualquer coeficiente individual, K_p , K_i ou K_D , muda somente o valor da contribuição em cada ramo do termo. Por exemplo, se o valor de K_D é modificado, então somente o valor da ação de derivação é alterado e esta mudança é *desacoplada* e independente do valor do termo proporcional e do termo integral. Este desacoplamento dos três termos é uma consequência da arquitetura paralela do controlador PID.

A arquitetura paralela do controlador PID resulta em uma representação matemática no domínio do tempo que é descrita pela Equação F.17.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (\text{F.17})$$

Contudo, é usual em representações industriais do controlador PID a forma *constante de tempo* no lugar da forma desacoplada descrita na Equação F.17. A forma que utiliza a constante de tempo pode ser deduzida da Equação F.17. Assim colocando-se em evidência a constante K_p , tem-se:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int_0^t e(t) dt + \frac{K_D}{K_p} \frac{de}{dt} \right) \quad (\text{F.18})$$

Definindo as novas constantes de tempo, como:

$$T_D = \frac{K_D}{K_p} \text{ e } T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{F.19})$$

Substituindo E.19 em E.18, tem-se que:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (\text{F.20})$$

Os parâmetros do controlador são: o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_i , e o tempo derivativo T_D .

Na Figura F.25 apresenta-se o diagrama de blocos de uma planta que utiliza um controlador PID clássico, na configuração paralela. Observa-se que a variável de controle é a soma das três parcelas: P, I e D.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_D \frac{de}{dt}(t)$$

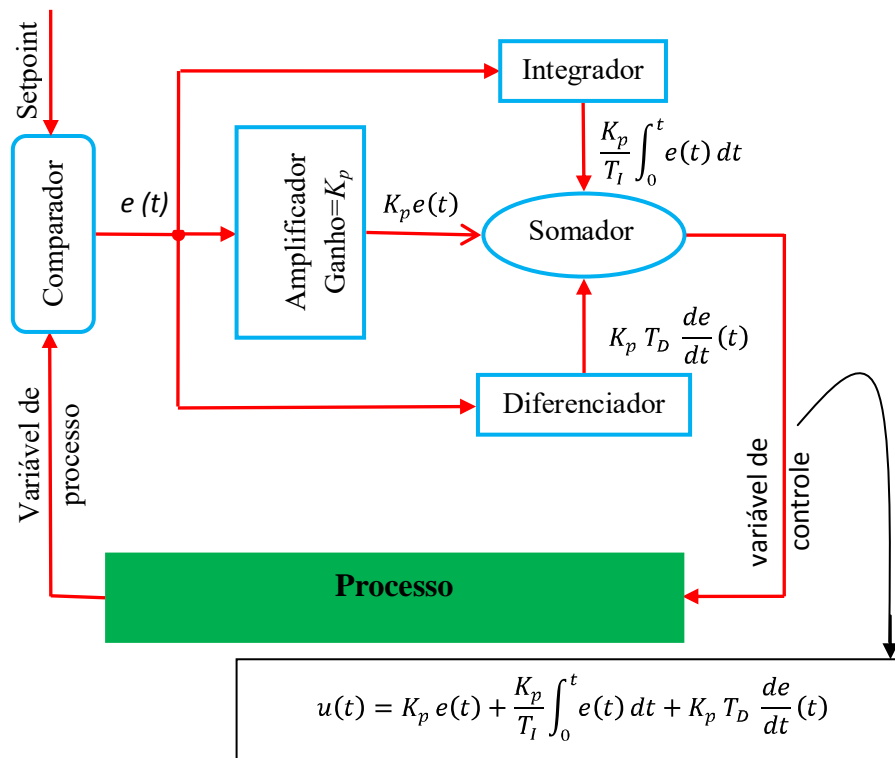


Figura F.25 Diagrama de blocos de uma planta com um controlador PID na configuração paralela.

Na Tabela F.2 apresenta-se o resumo do efeito de cada um dos parâmetros sobre o desempenho do processo.

Tabela F.2 Resumo do efeito de cada um dos parâmetros sobre o desempenho do processo.

Parâmetro	Ação no processo
BP	Torna-se mais lento.
Aumenta	Geralmente se torna mais estável ou menos oscilante. Tem menos sobressinal.
BP	Torna-se mais rápido.
Diminui	Fica mais instável ou mais oscilante. Tem mais sobressinal.
1/T_I	Torna-se mais rápido, atingindo rapidamente o setpoint.
Aumenta	Fica mais instável ou mais oscilante. Tem mais sobressinal.

Parâmetro	Ação no processo
$1/T_I$	Torna-se mais lento, demorando para atingir o setpoint.
Diminui	Fica mais estável ou menos oscilante. Tem menos sobressinal.
T_D	Torna-se mais lento.
Aumenta	Tem menos sobressinal.
T_D	Tem mais sobressinal.
diminui	

F.2.5 Sintonia do controlador

O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam uma determinada especificação de desempenho é denominado sintonia do controlador.

Se um modelo matemático da planta pode ser obtido, então é possível aplicar um conjunto de técnicas de projeto na determinação dos parâmetros do controlador. Por outro lado também são disponibilizadas na literatura várias regras empíricas que permitem sistematizar a busca de melhores desempenhos, sem comprometer as especificações do processo. Neste trabalho descrevem-se os dois métodos heurísticos que serão utilizados para a determinação dos parâmetros do controlador PID aplicados ao sistema de controle proposto.

Regras Ziegler-Nichols de sintonia (Ziegler e Nichols, 1942) – Ziegler e Nichols desenvolveram estas regras de sintonia através da simulação de um grande número de diferentes processos. Estas regras propõem um conjunto de valores para o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_I e o tempo derivativo T_D que proporcionarão uma operação estável ao sistema. Tudo baseado nas características da resposta temporal de uma dada planta.

As regras Ziegler-Nichols são compostas por dois métodos heurísticos: o primeiro deles baseia-se na resposta experimental ao degrau; o segundo, o método da resposta à frequência, no valor de K_p que ocasiona uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada.

As regras de sintonia Ziegler-Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto inicial na sintonia fina. Sendo assim, estes valores não são os valores definitivos para K_p , T_I e T_D .

Método Ziegler-Nichols de resposta ao sinal degrau– neste método obtém-se experimentalmente a resposta do sistema em malha aberta a uma entrada em degrau unitário. Se a planta não possui integradores (pólo em zero nem pólos complexos conjugados dominantes, então essa curva de resposta ao degrau unitário pode ter o aspecto de um S, como descrito na Figura F.26. Correlaciona-se, então, os parâmetros do controlador com características desta resposta ao degrau unitário. Esta curva de resposta ao degrau também pode ser gerada a partir de uma simulação dinâmica da planta.

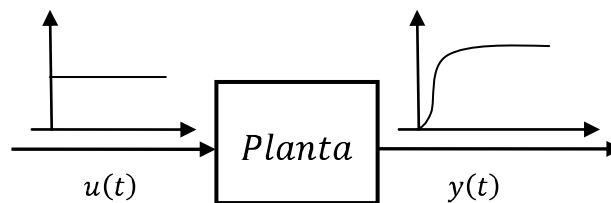


Figura F.26 Resposta ao degrau unitário de uma planta.

Vale salientar que este método somente se aplica caso a curva resposta ao degrau unitário de entrada tenha o aspecto de um S.

A curva em formato de S é caracterizada por duas constantes, a saber: o atraso L e a constante de tempo T , como mostrado na Figura F.27. O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva e determinando-se a interseção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $y(t) = K$.

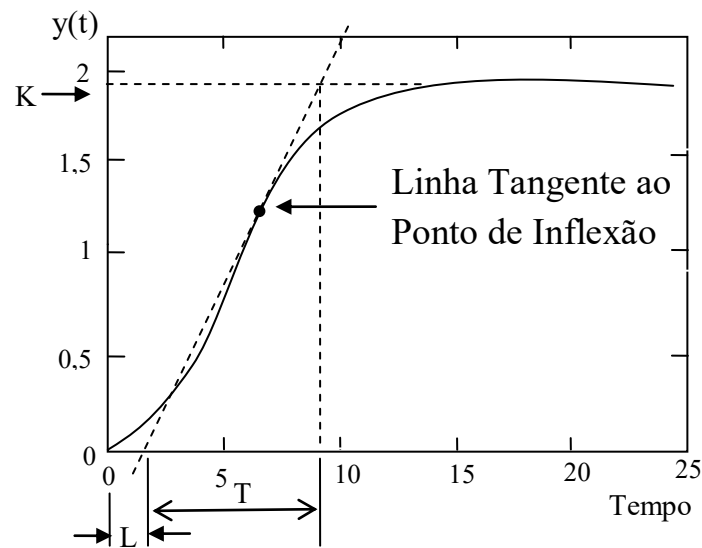


Figura F.27 Curva de resposta, ao degrau unitário, em forma de S.

Baseados nestas informações medidas no gráfico de resposta, Ziegler e Nichols propuseram os valores de K_p , T_I e T_D de acordo com a fórmula expressa na Tabela F.2.

Tabela F.2 Método de sintonia Ziegler-Nichols baseado na resposta ao degrau unitário aplicado à planta.

Controlador	Parâmetros do controlador		
	K_p	T_I	T_D
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

Método Ziegler-Nichols de resposta à frequência— neste método define-se primeiro $T_I = \infty$ e $T_D = 0$. Utiliza-se, então, somente a ação de controle proporcional (conforme descrito na Figura F.28) aumentando-se K_p de 0 ao valor crítico K_{cr} , no qual a saída mostra uma oscilação sustentada pela primeira vez, determinando o período P_{cr} (conforme observa-se na Figura F.29). Tanto o ganho crítico e o correspondente período P_{cr} são determinados experimentalmente. Este método não se aplica se a saída não exibir uma oscilação sustentada para um valor qualquer que K_p pode assumir.

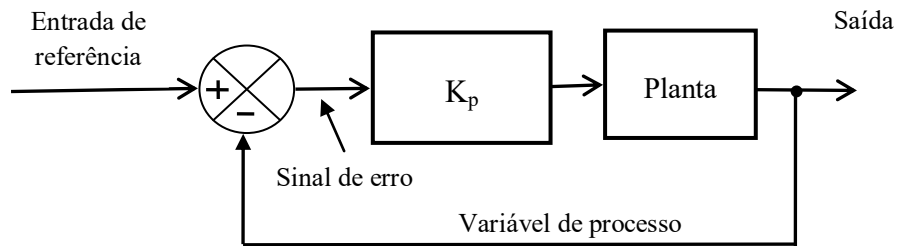


Figura F.28 Diagrama de um sistema em malha fechada com um controlador proporcional.

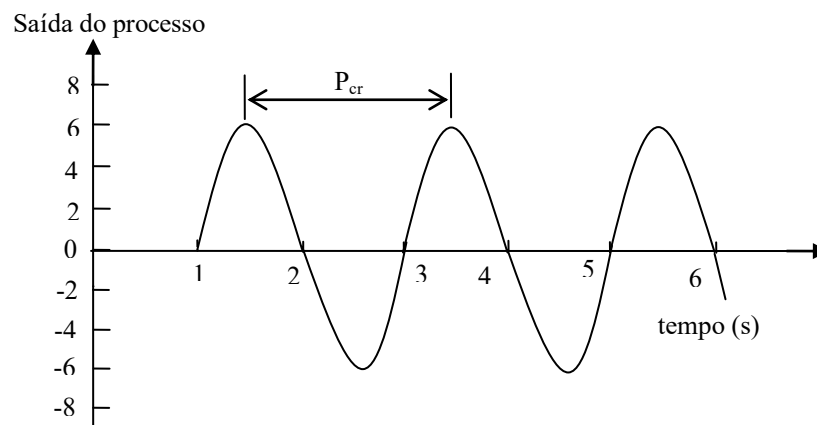


Figura E.29 Oscilação sustentada com período P_{cr} .

Ziegler e Nichols arbitram os valores de K_p , T_I e T_D de acordo com a fórmula expressa na Tabela F.3.

Tabela F.3 Método de sintonia Ziegler-Nichols baseado no ganho crítico K_{cr} e no período P_{cr} .

Controlador	Parâmetros do controlador		
	K_p	T_I	T_D
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$(1/1,2) P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Método Basílio-Matos de resposta ao sinal degrau (Basílio e Matos, 2000; Basílio e Matos, 2002)– esta técnica de ajuste recente propõe o ajuste de parâmetros de controladores Pi e PID com objetivo de limitar o percentual de ultrapassagem da resposta.

Este método é assim como o método de Ziegler-Nichols, baseado na curva de resposta de um degrau cuja amplitude é definida em função do valor de referência a ser adotado. O ajuste dos parâmetros dos controlador PID é feito de acordo com o seguinte algoritmo.

Algoritmo:

Passo 1. Aplicar um degrau com amplitude A e fazer a aquisição da resposta $y(t)$.

Passo 2. Aguardar a planta atingir o estado permanente da resposta, y_{∞} .

Passo 3. Calcular o ganho estático K da planta (razão entre o valor de estado permanente da resposta, y_{∞} , e da entrada).

Passo E. Calcular a área A_0 , mostrada na Figura F.30.

Passo 5. Para o ajuste dos parâmetros de um controlador utilizar os valores da Tabela F.4.

Passo 6. Com o controlador PID já inserido no sistema real, deve-se aumentar ou diminuir K_p com o objetivo de aumentar ou diminuir o percentual de ultrapassagem da resposta ou ainda para aumentar a velocidade de resposta do sistema.

Tabela F.4 Método de sintonia Basilio-Matos baseado na resposta ao degrau unitário aplicado à planta.

Controlador	Parâmetros do controlador		
	K_p	T_I	T_D
PI	$A/(4y_{\infty})$	$A_0/(2y_{\infty})$	—
PID	$0,6699A/y_{\infty}$	$5A_0/(6y_{\infty})$	$A_0/(5y_{\infty})$

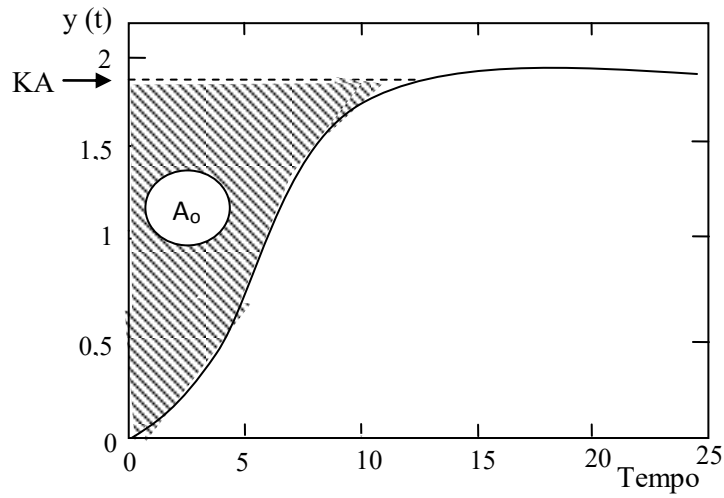


Figura F.30 Curva de resposta, ao degrau unitário, para cálculo dos parâmetros Basilio-Matos.

Da Figura F.30, temos que $A_0 = \int_0^{\infty} [KA - y(t)] dt$ (F.21)

Onde A_0 é a área como descrito na Figura F.27, A é a amplitude do sinal degrau e K é o ganho DC.

O valor de regime permanente da resposta, y_{∞} , pode ser dado por:

$$y_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = KA \quad (F.22)$$

E portanto o ganho DC pode ser escrito como:

$$K = \frac{y_{\infty}}{A} \quad (F.23)$$