

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM PROCESSO DESUMIDIFICADOR DESSECANTE MULTIMALHA

ANTÔNIO M. J. DA CRUZ, JOSÉ M. GALVEZ

Laboratório de Automação Controle e Mecatrônica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus Universitário, 31270-901- Belo Horizonte, MG, Brasil.

E-mail: jmgalvez@ufmg.br

Abstract— This work presents the development of a dynamic model for a cooling dehumidifier system based on desiccant rotors. The modeling procedure was performed looking towards its use as a designing tool for PID controllers. The proposed model was validated by computational simulation for a wide range of values of humidity, temperature and flow of the process air. A brief review of the thermodynamic processes in the dehumidifier system components, for the purposes of automation and control, is also presented. The proposed air humidity control strategy uses the temperature of the reactivating air as the manipulated variable. The achieved results lead to a fine-tuning of the PID controller and shown the soundness of the proposed procedure.

Keywords— Dehumidification Systems; Desiccant Rotors; Air Environment Control; Air Quality Control.

Resumo— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo dinâmico para um sistema de resfriamento e desumidificação (SIRED) baseado em rotores dessecantes. O procedimento de modelagem foi realizado considerando sua futura utilização como ferramenta de projeto de controladores PID. O modelo proposto foi validado através de simulação computacional para diversos valores de umidade, temperatura e vazão do ar de processo. Uma breve revisão dos processos termodinâmicos que ocorrem nos diversos componentes do sistema de desumidificação, com objetivos de automação e controle, é também apresentado. A estratégia de controle da umidade do ar de processo utiliza a temperatura do ar de reativação como variável manipulada. Os resultados obtidos mostraram a validade do procedimento proposto.

Palavras-chave— Sistemas de Desumidificação; Rotor Dessecante; Controle de Ar Ambiente; Controle da Qualidade do Ar.

processo. O sistema também inclui: válvulas controladoras do fluxo de ar, rede de dutos e o sistema de controle.

1 Introdução

Os avanços tecnológicos das ultimas décadas criaram a necessidade de novas técnicas para o controle das condições do ar em ambientes industriais. O controle independente da temperatura e da umidade do ar tornou-se vital para os processos produtivos. Os sistemas convencionais de compressão mecânica de vapor não conseguem atender aos atuais níveis de umidade requeridos na produção e no armazenamento de produtos sensíveis a umidade. As elevadas exigências de ventilação e de qualidade do ar interior (QAI) dificultam o uso de condicionadores de ar convencionais, principalmente em operações nas quais o ar de entrada está em condições extremas de umidade (Carmago, 2003). O objetivo dos sistemas de resfriamento e desumidificação (SIRED) é controlar a umidade, a temperatura e a vazão do ar à saída do equipamento para diversas condições psicrométricas do ar na sua entrada. Controladores PID são utilizados como elementos de controle, entretanto a sintonia destes apresenta severas dificuldades por se tratar de sistemas do tipo multimalha. Este trabalho apresenta a elaboração de um modelo dinâmico para o SIRED baseado em características físicas de cada componente com o objetivo de ser utilizado como ferramenta de análise e simulação na sintonia dos parâmetros proporcional, integral e derivativo do controlador (Cruz, 2006).

2 Sistema de Resfriamento e Desumidificação

A Figura 1 apresenta o SIRED constituído por: o sistema de filtragem, o primeiro estágio de resfriamento (primeira serpentina), o rotor dessecante, o segundo estágio de resfriamento (segunda serpentina) e o ventilador do ar de

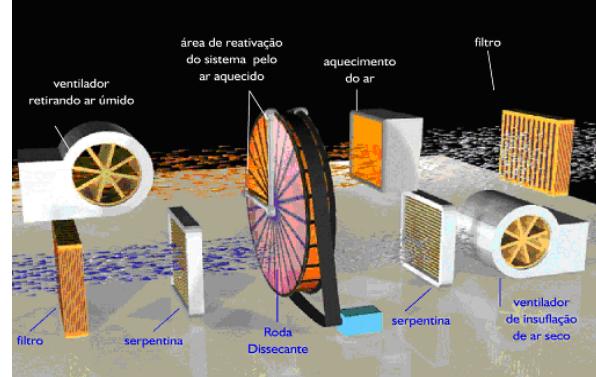


Figura 1.Unidades Básicas do SIRED.

O SIRED considerado neste trabalho permite o controle automático de umidade relativa na faixa de 10% a 40%, de vazão entre 1200 e 4200 m³/h e de temperatura entre 10 e 25°C. O sub-sistema de filtragem possui três estágios: um filtro metálico tipo G0 lavável, um filtro tipo plano G3 e um filtro tipo bolsa F1 plissado. Após os filtros, o ar é resfriado para padronização do processo por meio de uma serpentina na qual circula água gelada. A Tabela 1 apresenta as condições termodinâmicas do sistema neste primeiro estágio (em vazão máxima).

Tabela 1. Condições Termodinâmicas no Primeiro Estágio.

| | Entrada | Saída |
|---------------------|----------------------------------|----------|
| Temp. da Água | 8 °C | 14 °C |
| Temp. do Ar | 40 °C | 10 °C |
| Umidade do Ar | 50 % | 100 % |
| Calor Total | 73.321 kcal/h | |
| | 30.482 sensível + 42.748 latente | |
| Vazão de Condensado | | 79,5 l/h |

A água gelada é fornecida por um resfriador com condensação a ar. As bombas de água gelada (da Schenneider) possuem motores de indução trifásicos de 380 V da WEG. O SIRED conta ainda com uma caixa de água para expansão de líquido e uma válvula de 3 vias com comando elétrico.

O ar ambiente é previamente resfriado no primeiro estágio de resfriamento por processo convencional indireto (com resfriador, serpentina e ventilador) e então direcionado para o rotor dessecante.

O rotor dessecante em sílica-gel gira num meio com dois fluxos de ar (em oposição). O ar do processo (previamente resfriado a 10°C) passa através da parte principal do rotor ($\frac{3}{4}$ da sua seção transversal) e torna-se mais seco. A umidade da água é transferida do ar de processo para o rotor dessecante e é removida deste pelo ar de reativação (previamente aquecido) numa área correspondente a $\frac{1}{4}$ da seção transversal do rotor num processo contínuo e uniforme resultante do efeito da rotação, o que regenera (seca) o rotor. O rotor possui as seguintes características: diâmetro de 965 mm; profundidade de 200 mm; feito em sílica-gel; velocidade de rotação de 24 rph; relação de área R/P de 0,333.

Desta forma, o controle da umidade do ar de processo pode ser realizado na medida em que se controla a temperatura do ar de reativação. Tem-se uma relação inversa, ou seja, quanto maior a temperatura do ar de reativação, menor a umidade do ar de saída. Em média, a reativação começa aos 60°C e a temperatura máxima segura para reativação situa-se em torno de 160°C. Para sistemas não controlados, o fabricante recomenda o valor de 140°C para a temperatura padrão de reativação.

Ao passar pelo rotor dessecante, o ar é aquecido entre 20°C e 30°C (dependendo do grau de umidade requerido), da saída do rotor o ar é direcionado para a segunda serpentina de resfriamento que tem a função de baixar a sua temperatura para um valor ajustado pelo operador do processo. A Tabela 2 apresenta as condições termodinâmicas neste estágio.

Tabela 2. Condições Termodinâmicas no Segundo Estágio.

| | Entrada | Saída |
|---------------------|---------------------------|-----------|
| Temperatura da Água | 8 °C | 14 °C |
| Temperatura do Ar | 30,7 °C | 9,9 °C |
| Umidade do Ar | 2,11 g/kg | 2,11 g/kg |
| Calor Total | 22.209,2 kcal/h (latente) | |

A temperatura de ajuste é garantida por uma válvula de 3 vias com comando elétrico usada para controlar a vazão de água gelada que passa pela serpentina e, assim, a temperatura do ar.

O ventilador é do tipo centrifugo, de simples aspiração, com pás curvadas para trás e acionado por um conjunto inversor de frequência - motor de indução de 3 CV. O ventilador possui as seguintes características: velocidade de 2880 rpm, pressão estática de 115 mmH₂O e vazão de 4200 m³/h.

O ar tratado é levado até a chão de fábrica através de um duto retangular, de dimensões 50x400x600 mm, feito em chapa galvanizada com bitola 20, térmicamente isolado com polietileno e lã de vidro.

O sistema de controle é constituído por um CLP Siemens 314 C 2DP com placa de rede, interface Profibus^(R), IHM e placas I/O (analogicas e digitais).

O ciclo dessecante do SIRED é apresentado na carta psicrométrica da Figura 2.

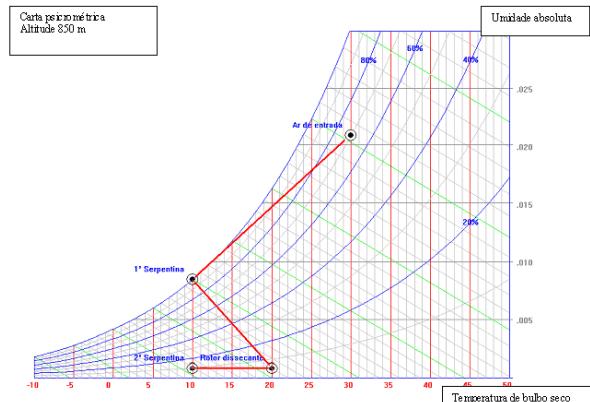


Figura 2. Carta Psicrométrica do Ciclo Dessecante do SIRED.

Finalmente, o aquecimento do ar de reativação é realizado por um banco de resistências com uma potência total máxima de 52 kW. A temperatura é controlada por um módulo tiristorizado (conversor estático CA/CA) ligado a este banco de resistências.

A temperatura do ar de reativação não é a única variável a influenciar na taxa de desumidificação do rotor. Esta taxa também é afetada (Camargo, 2003) por: a relação R/P (relação vazão de ar de reativação/ar de processo), a temperatura do ar de reativação, a temperatura do ar de processo na entrada, a velocidade do ar de processo através do dessecante, a umidade do ar de processo na entrada, a umidade do ar de reativação, a velocidade do ar de reativação através do dessecante, a quantidade de dessecante em contato com a corrente de ar e pelas propriedades/características do dessecante.

A escolha das variáveis de controle mais apropriadas passa por uma análise técnica/econômica que deve ser realizada caso a caso. Neste trabalho a temperatura do ar de reativação e a relação R/P foram escolhidas como as opções mais interessantes para serem utilizadas como variáveis manipuladas no controle do processo de desumidificação.

A Figura 3 apresenta a influência da relação vazão de ar de reativação/ar de processo (R/P) na temperatura e na umidade absoluta do ar de insuflação na saída do desumidificador. Uma menor relação R/P proporciona um menor consumo de energia na reativação, (Camargo 2003).

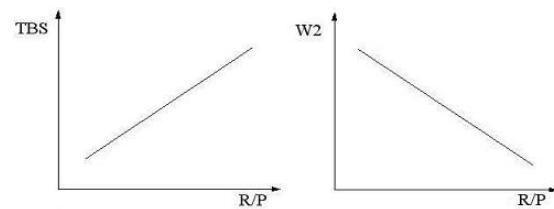


Figura 3. Influência dos Fluxos do Ar de Reativação e de Processo.

A temperatura do ar de reativação tem um forte efeito no desempenho. Quanto maior a temperatura do dessecante mais facilmente ele desprenderá a umidade. E quanto mais seco ele estiver mais umidade do ar de processo ele poderá absorver. A Figura 4 mostra a influência da temperatura de reativação na temperatura e na umidade absoluta do ar de insuflação na saída do desumidificador (Camargo 2003).

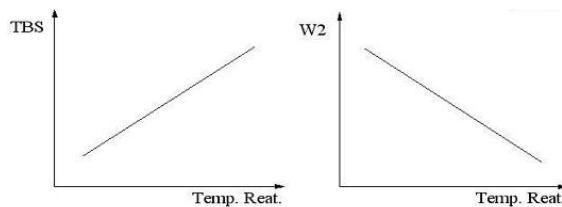


Figura 4. Influencia da Temperatura de Reativação.

3 Modelagem do Sistema SIRED

Sistemas térmicos são em geral representados por modelos a parâmetros distribuídos (Stoecker, 1989), entretanto, tais modelos não são adequados para a análise e o projeto de sistemas de controle. Neste trabalho, um procedimento heurístico de modelagem foi desenvolvido. O procedimento foi implementado em duas etapas: na primeira etapa, os parâmetros do modelo estático que define o regime permanente foram obtidos; na segunda etapa, constantes de tempo e atrasos foram adicionados ao modelo estático de forma a incluir a dinâmica do sistema. A modelagem dos diversos subsistemas do SIRED é apresentada a seguir:

O Rotor Dessecante

Rotores dessecantes possuem uma grande superfície de adsorção cujas dimensões dependem na largura do rotor e da porosidade da sua superfície interna. No seu interior ocorre a interação termodinâmica entre o ar de reativação e o ar de processo. Assim, relações matemáticas podem ser estabelecidas entre a vazão e temperatura do ar de regeneração (na entrada do rotor) e a umidade e vazão do ar de processo (na saída do equipamento). A Figura 5 apresenta o esquema de um desumidificador tipo cilindro rotativo. A Figura 6 mostra detalhes dos fluxos de ar no rotor.

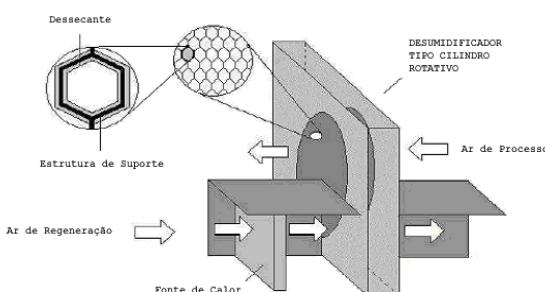


Figura 5. Desumidificador tipo Cilindro Rotativo (Camargo, 2003).

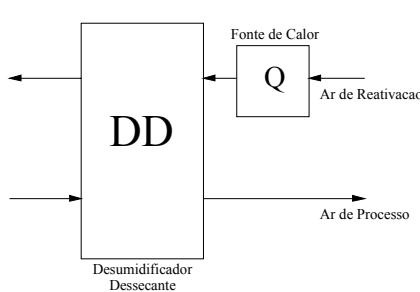


Figura 6. Detalhe Fluxos de Ar de Processo e de Reativação.

Devido à interação entre os fluxos, a operação de desumidificação pode ser considerada análoga à de uma "bomba de calor úmida", ou seja, ela transfere calor latente (umidade) da corrente de ar de processo para a corrente de ar de reativação.

Tratando o rotor como um trocador de umidade (Camargo, 2003), tem-se:

$$Q_r(W_{rs} - W_{re}) = Q_p(W_{pe} - W_{ps}) \quad (1)$$

O ponto ótimo de operação ocorre quando a relação entre a vazão do ar de reativação (Q_r) e a do ar de processo (Q_p) é igual a 1/3. A partir de informações do rotor dessecante fornecidas pelo fabricante, a relação entre a taxa de desumidificação ($W_{pe} - W_{ps}$) com a temperatura (θ_r) e a vazão do ar de reativação (Q_r) pode ser aproximada por

$$W_{ps} = W_{pe} - 0,051 \theta_r(t) - 1,8 \ln(0,333 Q_p) \quad (2)$$

com θ_r e θ_p em °C, Q_r e Q_p em m³/h, W_r é a umidade absoluta do ar de reativação no rotor em gágua/kgar, W_p é a umidade absoluta do ar de processo no rotor em gágua/kgar. Os subscritos "e" e "s" referem-se a entrada e saída respectivamente.

O rotor possui inércia química e física no processo de adsorção, o que determina o tempo de resposta necessário para a desumidificação entrar em regime permanente. A constante de tempo associada à inércia do rotor foi determinada experimentalmente e pode ser aproximada por

$$T_{rotor} = (60/5) RPM_{rotor} \quad (3)$$

O Sensor de Umidade Relativa

A umidade relativa é uma função da umidade absoluta e da temperatura do ar de processo. Para uma faixa de temperatura de 10°C a 40°C, considerando-se uma pressão atmosférica padrão e de posse de dados tabelados de pressão de saturação, o modelo do sensor de umidade é dado por

$$UR_{po} = \frac{W_{po}}{\left(0,0004 \theta_p^2 - 0,004 \theta_p + 0,0905\right)} \quad (4)$$

O sensor de umidade presente no duto de saída de ar é a interface entre a saída do ar de processo e o controlador e tem a propriedade de converter umidade absoluta em umidade relativa. Com base nos dados do fabricante, a constante de tempo do sensor é dada por

$$T_{sensor} = 5 \quad (5)$$

O Duto

O sensor de umidade encontra-se a uma distância de 50 m do rotor dessecante. Esta distância provoca um retardo de tempo (entre os processos físicos no rotor e seu reflexo no sensor de umidade) o retardo de tempo é uma função do comprimento do duto L e da velocidade do ar no duto, tal que

$$\tau_{duto} = \left(\frac{AL_{duto}}{Q_p} \right) \quad (6)$$

O Sistema de Ventilação

O sistema de ventilação (conjunto inversor, motor e ventilador) entra no modelo geral do SIRED apenas como um fluxo de ar com vazão e temperatura constantes e passíveis de serem manualmente ajustadas pelo operador dentro da faixa de projeto.

O Banco de Resistências

Considerando um comportamento linear, a potência fornecida pelo banco de resistências é proporcional ao seu sinal de entrada, tal que

$$H_r = K_h [u(t)] \quad (7)$$

O modelo para o banco de resistências engloba a resistência e a capacidade térmica do volume de controle contido no banco. A constante de tempo térmica do conjunto foi estimada através da capacidade térmica do sistema (C_{th}) e da resistência térmica (R_{th}), tal que

$$T_{th} = R_{th} C_{th} \quad (8)$$

4 O Modelo do SIRED

Partindo-se da formulação para as trocas térmicas e de umidade até a entrada do rotor, passando pelo duto e finalmente chegando ao sensor de umidade, obtém-se as equações do sistema que relacionam a variação da umidade relativa do ar de processo com a vazão e a temperatura do ar de reativação. O modelo geral do SIRED acopla todos os modelos dos subsistemas anteriormente descritos.

A Figura 7 nos dá uma visão do modelo final, para a relação R/P mantida em 1/3, o ar de processo na entrada do rotor padronizado em 10°C, com vistas a um controle baseado na variação da temperatura do ar de reativação.

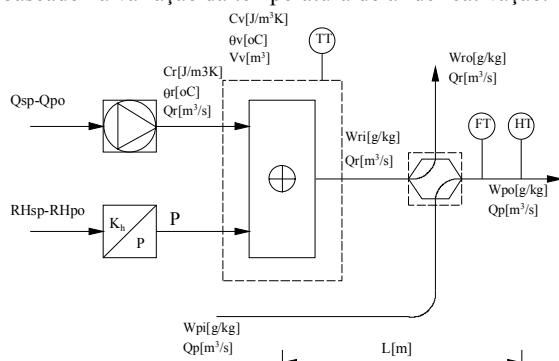


Figura 7. Esquema do Processo de Desumidificação.

De forma a obter um modelo a parâmetros concentrados e linear no ponto de operação, algumas considerações termodinâmicas adicionais fizeram-se necessárias: a energia transferida para o ar pelos elementos de aquecimento foi considerada proporcional ao sinal manipulado; os acumulos de calor e umidade no duto, na estrutura metálica das paredes do banco, nas resistências e no rotor foram desprezados; a perda de calor e a absorção de umidade através das paredes e dos dutos foram ignoradas; a capacidade térmica dos elementos caracterizados por resistência térmica ao fluxo de calor foi considerada desprezível; a transferência de calor por radiação foi desprezada; todos

os fluxos de calor foram analisados em regime permanente.

As grandezas relevantes para efeito de controle são as temperaturas do fluido à entrada (θ_e) e à saída (θ_s), a capacidade térmica do fluido (C_{th}), a resistência térmica do processo de aquecimento (R_{th}), o fluxo de calor fornecido pela resistência elétrica (H_r), a perda de calor para o ambiente (H_{amb}) e as entalpias do fluido à entrada (H_e) e à saída (H_s) - com a temperatura de referência de 0°C. Do princípio de conservação da energia

$$H_s = H_r + H_e + H_{amb} \quad (9)$$

Como a taxa de variação da temperatura é proporcional ao fluxo de calor absorvido e H_{amb} é pequeno em relação à H_s , H_e e H_r , temos:

$$C_{th} \frac{d\theta_s}{dt} = H_e + H_r \quad (10)$$

Neste caso, H_e é constante para as condições de temperatura e vazão do ar de processo.

$$H_e = \frac{C_{th} Q_r}{V} \theta_{amb} \quad (11)$$

Considerando a potência de aquecimento, $u(t)$ proporcional ao erro de umidade, da Equação (7) têm-se

$$H_r = K_h u(t) = K_h K_p e(t) \\ = K_h K_p [UR_{sp}(t) - UR_{ps}(t)] \quad (12)$$

então

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{1}{C_{th}} \left[\frac{C_{th} Q_r}{V} \theta_{amb} + K_h K_p e(t) \right] \quad (13)$$

Por outro lado, com a inclusão de um controlador PID, a potência pode ser escrita como

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{1}{C_{th}} \left[\frac{C_{th} Q_r}{V} \theta_{amb} \right] + \\ + \frac{K_h K_p}{C_{th}} \left[e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (14)$$

Considerando constantes a vazão do ar de processo (Q_p) e a umidade do ar de entrada (W_{pe}) na Equação (2), a umidade absoluta à saída do rotor (W_{ps}) pode ser escrita como uma função linear da temperatura do ar de reativação (θ_r),

$$W_{ps} = K_{rotor} \theta_r; \quad K_{rotor} < 0 \quad (15)$$

das Equações (3) e (15), a função de transferência do rotor dessecante pode ser escrita como

$$G_{rotor}(s) = \frac{W_{ps}(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K_{rotor}}{T_{rotor} s + 1} \quad (16)$$

da Equação(4), na vizinhança do ponto de operação

$$UR_{ps} = K_{sensor} W_{ps}; \quad (\theta_p = 10^\circ C) \quad (17)$$

das Equações (5), (6) e (17), a função de transferência do sensor de umidade pode ser escrita como

$$G_{sensor}(s) = \frac{UR_{ps}(s)}{W_{ps}(s)} = \frac{K_{sensor} e^{-\tau_{duto} s}}{T_{sensor} s + 1} \quad (18)$$

Das Equações (16) e (18)

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{UR_{ps}(s)}{\theta_r(s)} = \left(\frac{UR_{ps}(s)}{W_{ps}(s)} \right) \left(\frac{W_{ps}(s)}{\theta_r(s)} \right) \\ &= G_{sensor}(s) G_{rotor}(s) \end{aligned}$$

então

$$G(s) = \left(\frac{K_{sensor} e^{-\tau_{duto} s}}{T_{sensor} s + 1} \right) \left(\frac{K_{rotor}}{T_{rotor} s + 1} \right) \quad (19)$$

finalmente, a função de transferência do sistema de desumidificação é dada por:

$$G(s) = \frac{UR_{ps}(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K_{sensor} K_{rotor} e^{-\tau_{duto} s}}{(T_{sensor} s + 1)(T_{rotor} s + 1)} \quad (20)$$

5 O Sistema de Controle

Em geral, o processo de sintonia dos controladores do sistema segue uma hierarquia natural baseada nas constantes de tempo dos vários processos envolvidos, com prioridade para os processos com menores constantes de tempo e aqueles que correspondem às malhas mais internas do sistema. O diagrama em blocos da Figura 8 ilustra o processo com os elementos de controle de vazão e aquecimento e os sensores disponíveis para controle do processo de desumidificação. A seqüência utilizada neste caso foi a seguinte: a) controle da vazão do ar de processo, b) controle da temperatura do ar na entrada do rotor, c) controle da temperatura do ar processado e d) controle da umidade relativa.

O controle da vazão é realizado através de uma malha PID interna ao CLP que atua através de um inversores de freqüência nos motores dos ventiladores do ar de processo e do ar de reativação; havendo uma malha PID e um inversor para cada ventilador.

O sinal de realimentação no controle da vazão é gerado por um sensor de vazão que produz um sinal de 4 a 20mA. Neste caso, a vazão pode variar de 1200 a 4200 m³/h com incrementos de 50 m³/h, sendo que, a vazão do ar de reativação deve ser no mínimo 1/3 da vazão do ar de processo.

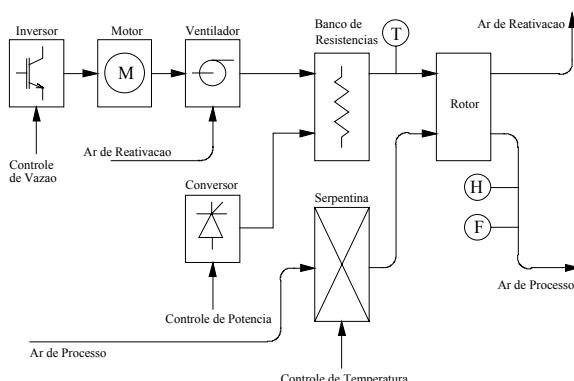


Figura 8. Dispositivos do SIRED - Processo Controlado.

O controle da temperatura na entrada do rotor é realizada através de uma malha PID que atua numa válvula de 3 vias do circuito de água gelada de modo a controlar a vazão de água gelada na serpentina e manter a temperatura do ar de processo em 10,0°C na entrada do rotor. O sinal de realimentação é produzido por um sensor de temperatura tipo PT-100 instalado na entrada do rotor e que gera um sinal de 4 a 20mA proporcional à temperatura do ar.

De forma semelhante, o controle da temperatura na entrada do ar de processo é realizado por outra malha PID que também atua numa válvula de 3 vias do circuito de água gelada da serpentina 2. Um sensor de temperatura tipo PT-100 gera o sinal de realimentação de 4 a 20mA proporcional à temperatura do ar.

Finalmente, o controle da umidade relativa é realizado através de malha PID que atua no controle da potência (através de conversor estático CA/CA) fornecida ao banco de resistências associado. De forma que, quanto maior a potência dissipada no banco, maior a temperatura do ar de regeneração e menor a umidade remanescente no ar de processo.

A Figura 9 mostra a estrutura de controle em malha fechada, com a introdução do bloco de conversão de temperatura em umidade absoluta (fisicamente efetuado pelo rotor dessecante), do bloco de conversão de umidade absoluta em umidade relativa (fisicamente efetuada pelo sensor de umidade) e de um bloco de retardo (que reúne todos os retardos do processo).

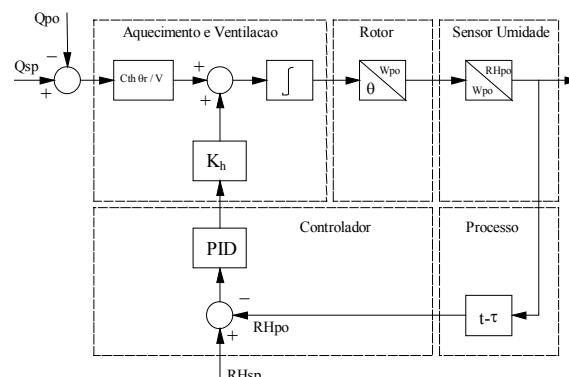


Figura 9. Diagrama em Blocos do Sistema de Controle de Umidade.

6 Resultados Experimentais

O modelo foi implementado no ambiente Simulink - Matlab^(R). A validação do modelo (não apresentada neste trabalho por motivos de espaço) foi efetuada utilizando-se os valores constantes na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros Utilizados na Simulação.

| | |
|--|---|
| Potência Máxima do Banco de Resistências | $P = 52\text{kW}$ |
| Temperatura de Entrada do Ar de Processo | $\theta_{pe} = 10^\circ\text{C}$ |
| Valores de Temperatura de Saída do Ar de Processo | $\theta_{ps} = 10^\circ\text{C}$ a 25°C |
| Faixa de Valores de Umidade de Saída do Ar de Processo | $UR_{ps} = 10\%$ a 40% |
| Umidade Absoluta do Ar de Reativação na Entrada | $W_{re} = 15\text{g}_\text{água}/\text{kg}_\text{ar}$ |
| Faixa de Valores de Vazão do Ar de Processo | $Q_p = 1200$ a $4200\text{ m}^3/\text{h}$ |
| Constante de Tempo do Rotor | $T_{rotor} = 30\text{s}$ |

| | |
|---|---|
| Retardo de Tempo devido ao Comprimento do Duto | $\tau_{duo} = 20\text{s}$ |
| Constante de Tempo do Sensor de Umidade | $T_{sensor} = 5\text{s}$ |
| Constante de Tempo de Aquecimento | $T_{th} = 10\text{s}$ |
| Relação entre Ar de Reativação e Ar de Processo | $R/P = 0,333$ |
| Faixa de Valores de Temperatura Ambiente | $\theta_{amb} = 10^\circ\text{C} \text{ a } 40^\circ\text{C}$ |

A partir do modelo obtido o controlador PID foi sintonizado considerando-se os valores de vazão e umidade conforme Tabela 4.

Tabela 4. Valores Utilizados na Sintonia do Controlador PID.

| | |
|---|-----------------------------------|
| Umidade relativa do ar de processo na saída | $UR_{ps} = 20\%$ |
| Temperatura do ar de processo na saída | $\theta_{ps} = 20^\circ\text{C}$ |
| Vazão de ar de processo | $Q_p = 3000 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| Temperatura ambiente | $\theta_{amb} = 20^\circ\text{C}$ |

Os valores utilizados para os termos P_b , I_r e T_d foram 200, 0,04 e 5, respectivamente. A Figura 10 mostra os resultados obtidos com a sintonia do controlador PID, o primeiro gráfico mostra a umidade do ar de processo na saída, nele pode ser observado que a estabilização da umidade ocorreu com 300 segundos e de forma suave, com erro zero em regime permanente. O segundo gráfico mostra a temperatura do ar de regeneração, nele é possível observar que o sobresinal da temperatura do ar de regeneração está dentro da faixa de tolerância, ou seja, abaixo de 160°C . Uma vez conseguida a sintonia do controlador PID, verificou-se a abrangência desta sintonia para diferentes valores de vazão e umidade dentro da faixa de valores de projeto. Os resultados obtidos validam o procedimento proposto.

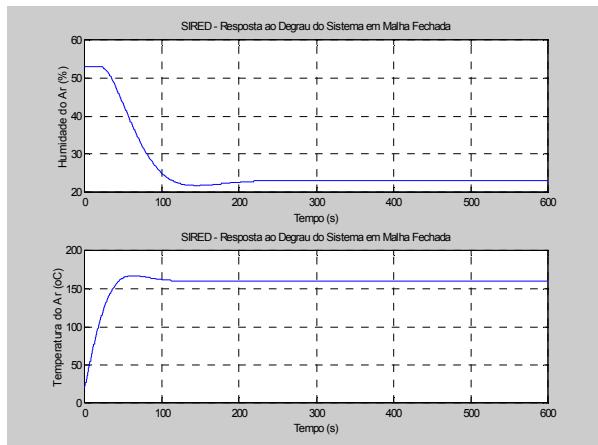


Figura 10. Resposta do Sistema em Malha Fechada a um Degrau.

5 Comentários Finais e Conclusão

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo dinâmico com o objetivo de auxiliar no projeto e sintonia do controlador em sistemas de desumidificação baseados em rotor dessecante.

Duas alternativas de controle foram analisadas, o controle pela temperatura do ar de reativação e o controle pela vazão do ar de reativação.

A decisão pelo controle da umidade pela variação da temperatura do ar de reativação levou em consideração

a relação linear observada entre a taxa de desumidificação e a temperatura de reativação.

O modelo matemático desenvolvido foi validado através de simulação comparativa (com resultados da planta física). Alcançada uma sintonia satisfatória do controlador PID, verificou-se a abrangência dos parâmetros obtidos do controlador, testando-se o controlador para diversos valores de umidade, temperatura e vazão nas condições limites de projeto.

Os resultados experimentais mostraram a viabilidade e eficiência do controle da umidade pela temperatura do ar de reativação.

Agradecimentos

Nossos agradecimentos à FAPEMIG pelo constante apoio ao nosso trabalho.

Referências Bibliográficas

- Camargo, J.R., 2003, Systems de Resfriamento Evaporativo e Evaporativo-Adsorptivo Aplicados ao Condicionamento de Ar, Tese Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista- Guaratinguetá.
- Stoecker, W.F., 1989, Design of Thermal Systems, McGraw-Hill Book Company.
- Cruz, A.M., 2006, Análise de um Sistema de Desumidificação Dessecante: Modelagem , Simulação e Sintonia do Controlador, Trabalho de Graduação Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.

Nomenclatura

- P : Potência Nominal do Banco de Resistências
 θ_{pe} : Temperatura do Ar de Processo na Entrada
 θ_{ps} : Temperatura do Ar de Processo na Saída
 θ_{amb} : Temperatura do Ar Ambiente
 T_{rotor} : Constante de Tempo do Rotor Dessecante
 T_{sensor} : Constante de Tempo do Sensor de Umidade
 T_{th} : Constante de Tempo de Aquecimento
 τ_{duo} : Atraso de Tempo nos Dutos
 R/P : Ar de Reativação /Ar de Processo
 Q_p : Vazão do Ar de Processo
 Q_r : Vazão do Ar de Reativação
 A : Área
 V : Volume Interno da Câmara de Resistências
 R_{th} : Resistência Térmica
 C_{th} : Capacitância Térmica
 H_r : Calor Produzido pelo Banco de Resistências
 H_e : Entalpia na Entrada do Processo
 H_s : Entalpia na Saída do Processo
 H_{amb} : Perda de Calor para o Ambiente
 L : Comprimento dos Dutos
 W_r : Umidade do Ar de Reativação
 W_p : Umidade do Ar de Processo
 RH_p : Umidade Relativa do Ar de Processo