

MODELAGEM E SISTEMA DE CONTROLE CLÁSSICO APLICADO EM RESFRIADORES EVAPORATIVOS PARA CLIMATIZAÇÃO DE AMBIENTES

Andrei Hudson Guedes Braga, andrei_projetos@yahoo.com.br¹
Jesus Marlinaldo de Medeiros, jesus_medeiros@yahoo.com.br¹
Cleonildo Soares Braga, cleonildosoares@ipojuca.ifpe.edu.br¹
Juliana de Almeida Yanaguizawa de Carvalho, julianaalmeida@ipojuca.ifpe.edu.br¹

¹Instituto Federal de Pernambuco, Rodovia Pe 060, Bairro Jardim Califórnia, Ipojuca - PE

Resumo: *Um dos grandes desafios do mundo moderno é sem dúvida a questão da energia, seu aproveitamento racional e não agressão ambiental. Para solucionar o problema, buscam-se investimentos em matrizes energéticas limpas. Uma alternativa possível é a substituição dos sistemas de condicionamento de ar (compressão de vapor) por resfriadores evaporativos para proporcionar redução do consumo elétrico, bons níveis de qualidade do ar interior, conforto térmico e não agressão ambiental. O resfriamento evaporativo é um processo natural que consiste na redução da temperatura do ar e elevação de sua umidade relativa através de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o ar e a água. Apesar da sua simplicidade e do baixo custo de aquisição e operação, a redução de temperatura obtida no resfriador evaporativo depende muito mais da umidade relativa do que da temperatura de entrada. Por essa razão, para clima quente e seco é útil, mas para clima úmido é ineficiente. Uma abordagem teórica do resfriador evaporativo é analisada. Aqui foi realizada a modelagem matemática do resfriador evaporativo através da técnica caixa branca usando a descrição física dos fenômenos envolvidos. Para tanto, foi projetado um sistema de controle utilizando diversos controladores clássicos. Também foram analisados e comparados os consumos de energia com cada controlador. Para tanto, são utilizados processos auxiliares de umidificação, renovação e mistura entre massas de ar, para garantir as condições de conforto e projetado um sistema de controle. O sistema de controle projetado deverá também garantir que os índices de desempenho sejam alcançados, tais como tempo de resposta, sobre elevação máxima, erro máximo e estabilidade.*

Palavras-chave: *consumo de energia, controle de processo, climatização*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o mundo vem enfrentando grandes problemas e dos mais variados tipos, no entanto, nos últimos anos tem sido crescente a preocupação com o consumo de energia elétrica e os efeitos da liberação de gases nocivos a camada de Ozônio, desta forma, cresce o interesse por sistemas alternativos cujas características sejam o baixo consumo elétrico e a não agressão da natureza. Pesquisadores têm dedicados esforços e recursos em pesquisas direcionadas a minimizar esses efeitos, tendo desenvolvido sistemas, processos e equipamentos com melhores rendimentos, bem como investido em novas tecnologias, que de forma geral apresentam baixo rendimento, mas, menores consumos de energia elétrica.

Dentro do contexto histórico, é possível observar diversos tipos de sistemas que apresentam alto consumo e influenciam na degradação do meio ambiente, no entanto, nenhum outro tem tanta influência quantos os equipamentos destinados a climatização e a refrigeração, especialmente nos dias atuais, onde são cada vez mais requeridos. Na sociedade moderna, muitos itens que antes eram de luxo passaram a ser considerados como artigos de utilidade básica, dentre eles estão climatizadores de ambientes, refrigeradores, umidificadores e desumidificadores, todos de uso domésticos, contudo, é na área industrial que os sistemas de climatização e refrigeração passaram a ser utilizados massivamente. Em algumas atividades, para melhorar a qualidade dos produtos fabricados, é necessário que setores inteiros no chão de fábrica sejam climatizados, tal como as indústrias de fios, onde o controle das condições climáticas é obrigatório para garantir um padrão de qualidade. Para garantir a qualidade de alguns produtos é necessária a aplicação de resfriamento rápido, bem como, a armazenagem em ambientes climatizados, além disso, o crescente aumento da produção implica diretamente no aumento do consumo de energia por parte desses sistemas. Segundo Shelton (1999),



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

cerca da metade da energia elétrica residencial consumida nos Estados Unidos é para fins de climatização, refrigeração, ventilação e aquecimento.

Outra grande preocupação mundial, que tem sido intensamente debatida nos últimos anos, é a questão ambiental. Intimamente relacionada a graves problemas como a própria crise energética, o desequilíbrio ambiental, tem provocado vários fenômenos, tais como el ninõ, la ninã, dentre outros. Um dos graves problemas que contribuem para o desequilíbrio ambiental é a liberação de gases tóxicos na atmosfera, o que ocasiona a destruição da camada de Ozônio e também o efeito estufa. Os gases que mais agridem a camada de Ozônio são os chamados CFCs (cloro flúor carbono) usados em sistemas de condicionamento e refrigeração convencionais (sistemas de compressão de vapor) de pequeno, médio e grande portes em todo o mundo. O cloro do cfc é o responsável pela destruição da camada de Ozônio, e consta que um átomo de cloro pode destruir cerca de cem mil moléculas de Ozônio. A molécula de cfc pode durar aproximadamente 100 anos na atmosfera. É esse tempo que os raios uv levam para romper o átomo de cloro da molécula de cfc e leva-lo de volta para a camada mais baixa da atmosfera eliminando-o na água da chuva. O Ozônio é a nossa única proteção contra os raios ultravioletas do Sol. Se todo o Ozônio na camada superior estivesse à pressão e temperatura do nível do mar, a camada teria aproximadamente três milímetros de espessura. Não é muito, porém é essencial para a vida, e assim é necessário que seja preservada.

O grande desafio dos pesquisadores é o de criar e melhorar sistemas condizentes com a nossa atual realidade. O preceito de que é preciso utilizar energia de forma racional e ainda preservar o meio ambiente, dentro dessa nova consciência mundial, pode nos levar direto aos sistemas de climatização por compressão de vapor. Tais sistemas têm sido utilizados diariamente e em larga escala. Estes equipamentos de refrigeração e ar condicionado são responsáveis por grande parte da energia consumida, principalmente nas cidades de médio e grande porte, das regiões de clima tropical. Além do alto consumo, outra grande desvantagem é a liberação de gases CFCs para a atmosfera quando da troca de fluido, seja por dano no compressor, corrosão em tubulações ou até mesmo pela obstrução de um filtro de líquido. Na prática há um aumento significativo, ano a ano, no uso de sistemas de compressão de vapor, o que pode levar a um colapso, tanto energético quanto ambiental.

A necessidade de se repensar sobre o modelo atual tem incentivado a realização de pesquisas em todo o mundo, com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica e promover um impacto ambiental positivo. Pesquisas com sistemas de climatização por absorção, resfriamento evaporativo e resfriamento dessecante estão sendo realizadas em todo o planeta e com maior intensidade. Estes ciclos proporcionam redução no consumo de energia elétrica e não usam gases nocivos ao ambiente como fluido de trabalho. Os sistemas alternativos passaram a ficar em evidência principalmente depois do protocolo de Kioto, que tratou dos efeitos dos clorofluorcarbonetos e dos hidroclorofluorcarbonetos sobre a camada de Ozônio, e decidiu em uma primeira etapa pelo fim do uso dos cfc a partir de 1995 e do hfc, em uma segunda etapa, até 2015 (Pons *et. al*, 1999). Com a ratificação do protocolo de Kioto os sistemas alternativos de refrigeração e ar condicionado passaram a ser mais explorados, dos quais os sistemas de resfriamento dessecante têm sido muito desenvolvidos, particularmente, nos Estados Unidos e Austrália. Na tentativa de estabelecer um paralelo os rendimentos dos ciclos alternativos têm sido constantemente comparados e avaliados. Meunier *et. al* (1996), tentaram fazer comparações a outros ciclos, fazendo uma equivalência do ciclo Carnot para refrigeração por adsorção.

Alguns dos sistemas alternativos que têm sido mais explorados são os de resfriamento evaporativo e os compostos por rotores dessecantes, que utilizam apenas água e ar como fluidos de trabalho, não trazendo riscos para o meio ambiente, bem como apresentando reduzidos consumos de energia elétrica, além disso, não trabalham com compressores ou com tubulações, que são fontes de corrosão e de constantes manutenções preventiva e corretiva. A proposta básica dos resfriadores dessecantes é o tratamento do ar a partir da modificação das umidades relativas e absolutas na entrada e saída do processo, enquanto nos sistemas convencionais de compressão de vapor, a temperatura do ar é tratada e as umidades são decorrência deste tratamento. No resfriamento dessecante ocorre o contrário, as umidades são tratadas e a temperatura de saída decorre deste tratamento. A secagem do ar, através de uma roda de sílica gel, é a primeira etapa do processo, seguido de uma etapa intermediária que consiste na troca de calor sensível, e por fim a reumidificação deste ar. A intenção é que a sequência destas etapas proporcionem um ar tratado e capaz de levar e manter um ambiente dentro da zona de conforto térmico estabelecida na carta psicrométrica. A capacidade de manter temperatura e umidade dentro da zona de conforto térmico é uma característica importante, uma vez que os ciclos de compressão de vapor nem sempre conseguem manter uma umidade desejada (Braga, 2004). Os sistemas de condicionamento de ar por adsorção podem ser usados em diversos ambientes. Rane *et. al* (1999) propuseram um sistema de resfriamento adsorção para climatização dos espaços internos de um ônibus da Índia. Eles modelaram e analisaram um ciclo de ar condicionado adsorção, usando os rejeitos térmicos dos gases de escapamento como fonte de calor para reativar o sistema. Eles estimaram que um ônibus com carga térmica de 7 trs/h (84.000 btus/h) consome

aproximadamente 1,2 litros de diesel por hora de operação. Este veículo tem rendimento de cerca de 35 %, ou seja, 65 % de energia é rejeitada na forma de calor, tanto pelo escape quanto pelas trocas no radiador. A proposta é que cerca de 1/3 do calor rejeitado seja recuperado para criar um novo ciclo alternativo de climatização.

Um sistema alternativo para climatização, que tem sido usado em um grande número de aplicações em regiões quentes e secas, é o que realiza o processo de resfriamento evaporativo. Esta técnica pode ser usada combinada à ventilação natural e a ventilação forçada, tanto para redução da temperatura (processo de diminuição do calor sensível) quanto para umidificar o ar (processo de aumento do calor latente). Omtvedt *et. al* (1971) trataram da influência da climatização, por resfriamento evaporativo, na vida das pessoas, dando enfoque a redução da fadiga em decorrência da redução da temperatura do ar. Filippin *et. al* (1998), apresentaram um trabalho desenvolvido na província de La Pampa na Argentina, uma região de clima semi-árido. A técnica de resfriamento evaporativo foi aplicada a um prédio de 350 m² de área. Resultados obtidos em dois anos de experiências foram mostrados. O resfriamento evaporativo, além de poder ser utilizado para climatização de ambientes em regiões quentes e secas, é usado também nos sistemas de climatização com rotor dessecante, correspondendo à última etapa, ou seja, é responsável pela umidificação do ar na saída do equipamento e, conseqüentemente, pela redução da temperatura de bulbo seco.

Os sistemas alternativos garantem a redução do consumo de energia elétrica quando comparados aos sistemas convencionais, no entanto, suas faixas de rendimento são, de maneira geral, baixas. Para garantir um alto desempenho dos sistemas térmicos, em particular dos ciclos de refrigeração alternativos, é necessária a utilização de controladores automáticos. Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor sempre fizeram uso desses controladores. Os primeiros controladores automáticos usados nos sistemas de refrigeração por compressão de vapor foram os liga desliga. Este tipo de controlador, aplicado ao controle de temperatura, opera em função da temperatura do ar succionado pelo condicionador (ar de retorno), que altera a resistência do fluido contido em um bulbo e este fluido atua sobre o relé, que liga ou desliga o equipamento. A simplicidade construtiva e operacional desse controlador, além do baixo custo, faz com que a maioria dos condicionadores de ar de pequeno e médio porte utilize-o a fim de manter uma temperatura média constante, porém, a necessidade de melhores controladores, principalmente em sistemas de grande porte e a necessidade de eliminar as grandes oscilações na resposta, fez com que outros controladores fossem desenvolvidos em equipamentos de escala comercial. Um exemplo disso são os resfriadores de líquido de grande porte (chiller), ou os sistemas especiais desenvolvidos para indústrias, que utilizam sistemas de controle clássicos.

A necessidade de controlar melhor os sistemas térmicos tornou-se tão evidente que alguns pesquisadores em diversas partes do mundo estão, atualmente, trabalhando nesta área. Por se tratar de duas áreas distintas da engenharia, o controle de sistemas térmicos ou controle de processos é dotado de algum grau de dificuldade extra, uma vez que, cada sistema térmico possui sua própria dinâmica, onde seu modelo matemático, experimental ou teórico, pode ser de difícil determinação. Assim, o sucesso deste tipo de trabalho pode estar na criação de um modelo que possa ser integrado aos sistemas de controle, o que requer o conhecimento das duas áreas.

Apesar de que alguns trabalhos já estejam sendo desenvolvidos, muitos sistemas térmicos comerciais têm tido seus rendimentos reduzidos pela falta de um controle mais adequado. Talvez, as dificuldades que existam em unir pesquisadores, disciplinas e conhecimentos, além da diferença de abordagem no tratamento do problema, análise e exposição dos resultados, sejam fatores determinantes para a falta de um maior desenvolvimento dessas duas áreas (Braga, 2000).

Algumas relevantes pesquisas têm sido desenvolvidas e atestam a eficiência da integração das áreas de controle e térmica. Sfetsos e Coonick (2000) usaram técnicas de inteligência artificial, redes neurais e neuro fuzzy, para previsão da radiação solar horária sobre uma superfície horizontal. Já Alkhamis et al (2000) usaram um controlador clássico, tipo PID, para controlar a temperatura de um bioreator alimentado por um coletor solar. Este trabalho ressaltou a importância do controlador PID e comparou o seu resultado ao de um liga desliga. Kalogirou et. al (1999) estudaram a utilização de redes neurais artificiais para modelar um sistema de aquecimento de água solar doméstico.

Na área de resfriamento, alguns trabalhos também foram apresentados. Braga (2000) estudou um sistema de controle clássico aplicado a um trocador de calor atuado por resfriamento evaporativo. A água que saía do trocador de calor deveria ter temperatura controlada para servir a algum processo.

A grande influência dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor no consumo de energia elétrica e na degradação do meio ambiente, sugere que outros sistemas de climatização e refrigeração sejam criados e melhorados. O desenvolvimento de sistemas que utilizem outras fontes de energia, que não poluam a atmosfera do planeta e com alto coeficiente de desempenho se constitui no grande desafio dos tempos atuais. Porém, o rendimento de qualquer sistema deve ser avaliado não apenas como uma relação matemática de saída e entrada de energia, mas também pelo reflexo de suas conseqüências.

O objetivo central deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de, quando utilizado sozinho ou associado aos ciclos de refrigeração alternativos, produzir um novo ciclo de climatização para ambientes, que além de apresentar baixo consumo de energia elétrica também garanta a operação dentro das melhores faixas de rendimento, bem como apresentar tempo de resposta satisfatório, estabilidade e rejeição de distúrbios, tais como inserção de grandes cargas térmicas.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

A elaboração do modelo matemático foi realizada com o intuito de permitir a utilização da aplicação dos modelos de controle clássicos. Uma das formas de modelagem que permite a associação com as teorias de controle clássico é a análise global. A Fig. (1) apresenta o esquema de um sistema de resfriamento evaporativo para climatização de um ambiente.

Para que o balanço de energia ocorra de forma adequada, o modelo matemático apenas poderá ser realizado após a definição de um volume de controle (Bejan, 1996). Desta forma, foram definidas as áreas de caixas do pulverizador e do ambiente como volumes de controle. Para a realização dos modelos matemáticos considerou-se que não desprezível a variação do calor específico a pressão constante em todo o processo, bem como a variação do vapor de água no ambiente. Considerou-se também que as temperaturas no resfriador e no ambiente são uniformes. A transferência de calor, por condução, através das paredes do resfriador foi desprezada.

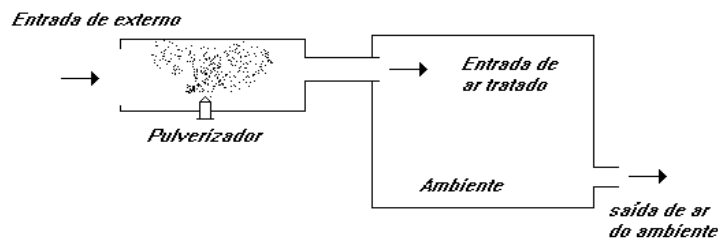


Figura 1. Esquema de um resfriador evaporativo aplicado a um ambiente.

A equação (1) representa o balanço de energia entre a entrada e a saída do resfriador evaporativo. A equação (2) representa o sistema de resfriamento no estado transitório.

$$m_{ar} \cdot cp_{ar} \cdot T_1 + m_{ag} \cdot h = m_{ar} \cdot cp_{ar} \cdot T_2 \quad (1)$$

onde: m_{ar} é o fluxo de massa de ar circulando

cp_{ar} é o calor específico a pressão constante

T_1 é a temperatura na entrada do resfriador (temperatura externa)

T_2 é a temperatura na saída do resfriador

T_3 é a temperatura na saída do ambiente

m_{ag} é o fluxo de água pulverizado

Ma é a massa de ar do ambiente

M é a massa de ar do resfriador evaporativo

h é a energia de vaporização da água

Q é um fluxo de calor entrando no ambiente, é função da temperatura externa.

O resfriador evaporativo, no estado transitório, resulta na equação (2).

$$M \cdot cp_{ar} \cdot \frac{dT_2}{dt} = -(m_{ar1} + m_v) \cdot cp_{ar} \cdot T_2 + m_{ar1} \cdot cp_{ar} \cdot T_1 + m_{ag} \cdot h \quad (2)$$

Onde: $m_{ar2} = m_v + m_{ar1}$, a massa de ar na saída é a da entrada mais o vapor de água inserido. O valor de m_{ar2} é função da quantidade de água pulverizada, o que implica no aparecimento de um termo recorrente na equação. Para

evitar esse termo considerou-se que a parcela m_{ar2} é constante e assume de m_{ar1} somado ao valor médio de m_v . O valor da parcela de vapor de água é muito pequeno quando comparada ao valor da massa de ar e ao valor total do denominador da função de transferência, desta forma a variação do vapor de água devido à pulverização, na parcela apresentada, pode ser desprezada. A simulação realizada com a parcela nos valores máximo e mínimo não apresenta diferenças nos gráficos de resposta.

Aplicando a transformada de Laplace, tem-se:

$$(M \cdot cp_{ar} \cdot s + m_{ar2} \cdot cp_{ar}) \cdot T_2(s) = m_{ar1} \cdot cp_{ar} \cdot T_1(s) + h \cdot m_{ag}(s) \quad (3)$$

O modelo matemático do ambiente foi realizado a partir do balanço de energia entre a entrada e a saída, onde a equação (4) representa o sistema em estado transitório. Para realizar o modelo foram consideradas as cargas térmicas devido à condução através de superfícies e devido ao calor latente do ar infiltrado. Desta forma, o ambiente terá estas duas cargas de entrada, bem como a energia do ar que vem do resfriador evaporativo.

Para a realização do modelo considerou-se que o vapor de água é o mesmo na entrada e na saída do resfriador. Outra consideração realizada foi que existe uma carga térmica entrando no ambiente.

$$(M_a \cdot cp_{ar} \cdot s + Q + m_{ar2} \cdot cp_{ar}) \cdot T_3(s) = -m_{ar2} \cdot cp_{ar} \cdot T_2(s) + Q \cdot T_1(s) \quad (4)$$

As funções de transferências do resfriador evaporativo e ambiente serão realizadas dos modelos elaborados. A equação (5) apresenta o modelo do resfriador.

$$T_3(s) = \frac{m_{ar1} \cdot cp_{ar} \cdot T_1(s) + h \cdot m_{ag}(s)}{(M \cdot cp_{ar} \cdot s + m_{ar2} \cdot cp_{ar})} \quad (5)$$

A equação (5) dará origem a duas funções de transferências. A equação (6) é a função de transferência entre a temperatura de saída do resfriador e a temperatura de entrada do ar, que representa o distúrbio da planta. A equação (7) é a função de transferência entre a saída do resfriador e o fluxo de água pulverizado a cada instante, que será utilizado como variável de controle.

$$\frac{T_2(s)}{T_1(s)} = \frac{m_{ar1} \cdot cp_{ar}}{(M \cdot cp_{ar} \cdot s + m_{ar2} \cdot cp_{ar})} \quad (6)$$

$$\frac{T_2(s)}{m_{ag}(s)} = \frac{h}{(M \cdot cp_{ar} \cdot s + m_{ar2} \cdot cp_{ar})} \quad (7)$$

A equação (8) representa o modelo matemático do ambiente e dará origem a duas funções de transferências. A equação (9) é a função de transferência entre a temperatura de saída do ambiente e a temperatura do ar na entrada do ar

no ambiente, que representa a variável de controle da planta. A equação (10) é a função de transferência entre a temperatura de saída do ar do ambiente e a temperatura externa, que será utilizada como distúrbio no ambiente.

A equação (8) apresenta o modelo do ambiente.

$$T_3(s) = \frac{m_{ar2} \cdot cp_{ar} \cdot T_2(s) + Q \cdot T_1(s)}{(M_a \cdot cp_{ar} \cdot s + Q + m_{ar2} \cdot cp_{ar})} \quad (8)$$

$$\frac{T_3(s)}{T_2(s)} = \frac{m_{ar2} \cdot cp_{ar}}{(M_a \cdot cp_{ar} \cdot s + Q + m_{ar2} \cdot cp_{ar})} \quad (9)$$

$$\frac{T_3(s)}{T_1(s)} = \frac{Q}{(M_a \cdot cp_{ar} \cdot s + Q + m_{ar2} \cdot cp_{ar})} \quad (10)$$

2.1. Projeto de controladores

A realização do projeto de um controlador adequado deve considerar o tipo de sistema que está sendo trabalhado, bem como as características dinâmicas do sistema. A seguir serão descritas as ações de controle clássico, tendo características proporcional, integral e derivativa, conforme descrito por Ogata (2003). Existem diversas técnicas de projeto de controladores clássicos, tais como o critério de estabilidade de Routh, os métodos de Ziegler e Nichols ou o método de alocação de pólos. Para o projeto se faz necessário que sejam atribuídos os valores para os termos das equações. Os valores dos termos das equações definirão o tempo morto, a constante de tempo e o ganho do sistema acoplado, o que resulta na definição do comportamento dinâmico.

Os valores dos termos das equações são definidos da seguinte forma:

$$h = 539 \text{ kcal/kg}; \quad cp_{ar} = 0,24 \text{ kcal/kg.C}; \quad m_{ar1} = 0,28 \text{ kg/s}; \quad M = 0,25 \text{ kg}; \quad M_a = 10 \text{ kg}; \quad m_v = 0,005 \text{ kg/s}; \quad Q$$

$$= 0,059 \frac{\text{kcal}}{^\circ\text{C.s}}$$

2.2. Critério de Ziegler e Nichols

O primeiro passo para realizar o dimensionamento dos controladores é estabelecer as especificações de desempenho que se deseja alcançar. As especificações para esse projeto são: Tempo de resposta menor que 100 segundos; máximo sobre sinal menor que 10% do distúrbio; resposta sem muitas oscilações, o que evita o desgaste prematuro do elemento final de controle.

Para a realização do projeto dos controladores foram utilizados os métodos de Ziegler e Nichols. A partir da aplicação dessa metodologia foi possível dimensionar os controladores e, conseqüentemente calcular os ganhos proporcional, integral e derivativo. Após o cálculo dos ganhos foi necessária a realização de um ajuste para encontrar os ganhos que levassem o sistema a respostas que satisfaçam as especificações de desempenho.

Os projetos dos controladores, realizados pelo método de Ziegler e Nichols, sofreu ajustes finais para adequação as especificações de desempenho. Os ganhos dos controladores, obtidos para cada controlador e contendo os ajustes finais, serão apresentados na seção de resultados.

3. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos, com os diversos controladores clássicos, com ganhos proporcional, integral e derivativo ajustados a partir dos valores apresentados pelo critério de estabilidade de Routh. Para maior aproximação dos ganhos ótimos, os ganhos passaram por uma sintonia fina.

A consideração é de que o sistema esteja em equilíbrio e um distúrbio tenderá a tirar o sistema da estabilidade, para tanto será aplicada uma entrada em degrau unitário, ou seja, o problema é de um regulador com entrada em degrau unitário.

Os controladores devem ser projetados para atender a algumas especificações de desempenho, que foram estabelecidas para manter um bom funcionamento do sistema, com eliminação dos sinais de distúrbios e preservando o equipamento em relação a desgastes prematuros. Para o sistema em questão, as especificações de desempenho desejadas são: estabilidade do sistema; sobre sinal máximo da ordem de 10 % do sinal do distúrbio na entrada; tempo de resposta de 2 minutos; erro máximo em regime permanente de 2% do distúrbio; e resposta sem grandes oscilações, apresentando no máximo um único pico acima de 10 % do distúrbio.

3.1. Controlador Proporcional

A aplicação de um controlador Proporcional no sistema não surtiu o efeito desejado, uma vez que, apesar do sistema ter voltado ao equilíbrio, originou-se um erro em regime que é proporcional a 12 % do distúrbio. A figura 2 mostra o sistema sob a ação de um controlador proporcional.

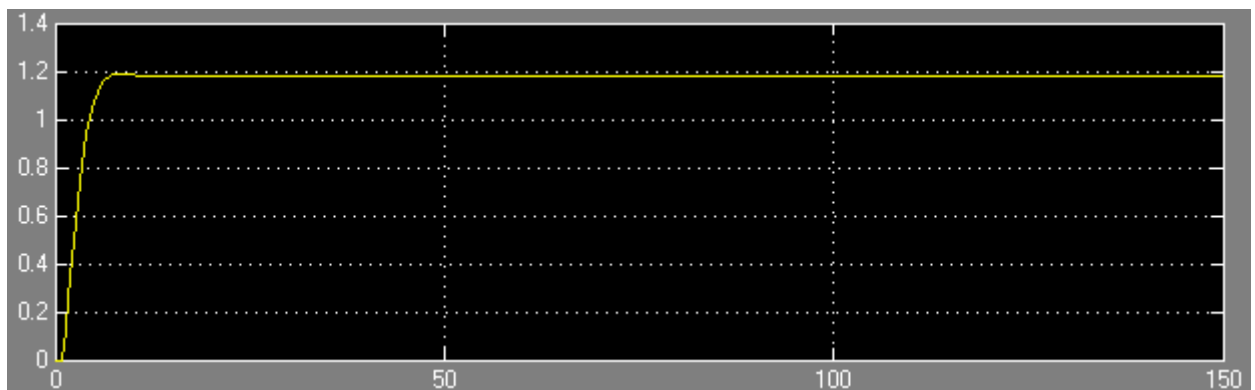


Figura 2. Sistema sob a ação de um controlador proporcional ($k_p = 0,002$).

3.2. Controlador Proporcional Integral (PI)

A aplicação de um controlador PI no sistema não surtiu o efeito desejado. O degrau foi anulado em menos de 50 segundos, enquanto o erro em regime permanente foi à zero, o que já era esperado, uma vez que, o efeito do integrador, especialmente em sistemas com grandes constantes de tempo, é o de eliminar o erro em regime, no entanto, pode-se observar que ocorreram oscilações, e que o sobre sinal alcançou aproximadamente 3,5 % do valor do distúrbio. O controlador PI atende as especificações de desempenho quanto ao erro em regime, no entanto, apresenta um pico em pouco tempo, o que a rigor não é desejável, além disso, já apresenta pequena oscilação, desta forma, no caso de pequenas modificações nas condições de funcionamento do sistema, tais como modificações nos distúrbios, pode apresentar mais de um pico bem próximos. Essas oscilações resultariam em desgaste do elemento final de controle, nesse caso, a bomba funcionará oscilando muito quando da aplicação do distúrbio. Valores de ganho integral pouco maiores que o apresentado provocam oscilações no sistema.

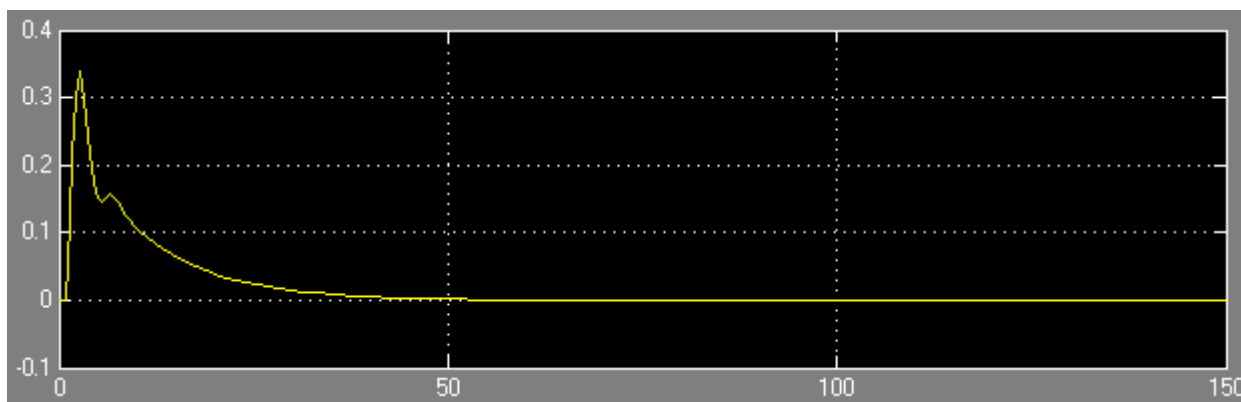


Figura 3. Sistema sob a ação de um controlador PI ($k_p = 0,01$; $k_i = 0,1$).

3.3. Controlador Proporcional Derivativo (PD)

A aplicação de um controlador PD no sistema levou o sistema à estabilidade em aproximadamente 20 segundos, reduziu também o sobre sinal resultante do distúrbio na entrada, entretanto, não foi suficiente para que o erro em regime fosse eliminado. O erro em regime permanente apresentado é de 2,6 % do distúrbio.

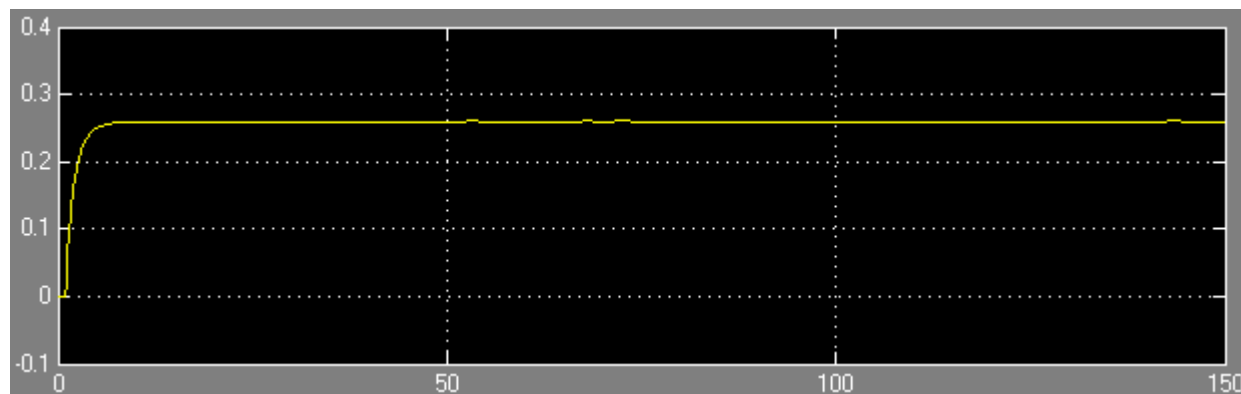


Figura 4. Sistema sob a ação de um controlador PD ($k_p = 0,01$; $k_d = 1$).

3.4. Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

A aplicação de um controlador PID no sistema surtiu o efeito desejado. O degrau foi anulado em aproximadamente 50 segundos, enquanto o erro em regime permanente foi à zero. Pode-se observar ainda que o sobre sinal foi da ordem de 1,6 % do distúrbio na entrada, o que mostra muita eficiência para evitar picos, além disso, o pico durou apenas alguns poucos segundos. Outra característica importante é que a resposta não apresenta grandes oscilações, mesmo com modificações nos distúrbios ou pequenas variações nos valores dos ganhos. O controlador em questão apresenta uma associação entre as características de cada ação, sendo essa a preferida nos sistemas de controle de processos especialmente em sistemas como os apresentados.

O resultado do conjunto com controlador PID mostra que o sistema foi capaz de, diante de um forte distúrbio na entrada, ser conduzido à estabilidade, levando-o a um erro nulo em regime permanente, sem que ocorressem grandes oscilações. O tempo de resposta foi de aproximadamente 50 segundos e o sobre sinal da ordem de 1,6 % do distúrbio. O erro em regime foi eliminado.

Para obtenção do resultado apresentado na figura 5 foram utilizados ganho proporcional de 0,01; ganho integral de 0,1 e ganho derivativo igual a 5. A variação da temperatura externa foi usado como distúrbios para todo o sistema e assumiram o valor de 10 C.

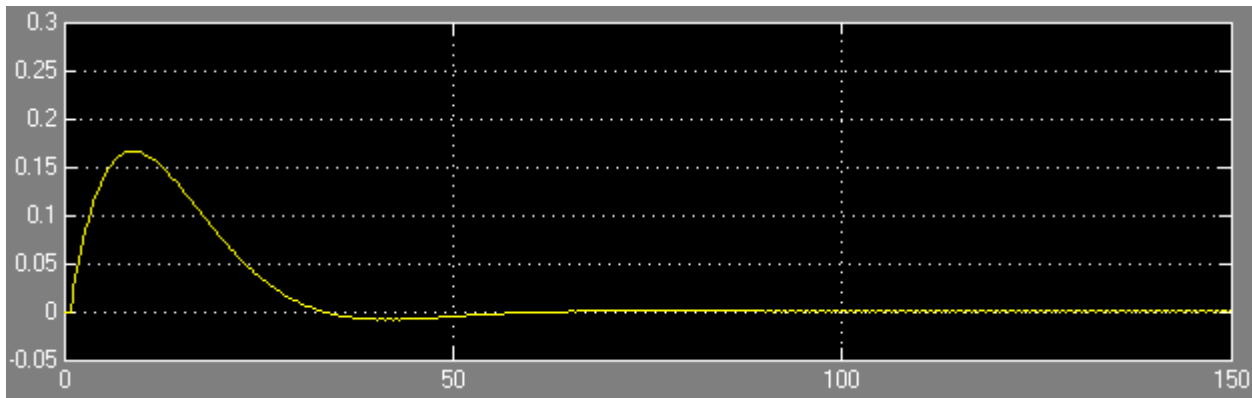


Figura 5. Sistema sob a ação de um controlador PID ($k_p = 0,01$; $k_d = 5$; $k_i = 0,1$).

4. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos com a utilização dos controladores clássicos no sistema de resfriamento evaporativo acoplado a um ambiente, pode-se verificar que os controladores proporcional, proporcional integral (PI) e proporcional derivativo (PD) não conseguem manter as condições iniciais do sistema, proporcionando estabilidade em todo o período, sobre sinal reduzido e eliminar o erro em regime permanente. O controlador proporcional apresentou boas características com relação à estabilidade em regime e tempo de resposta, no entanto, observa-se que existe sobre sinal, bem como erro em regime equivalente a aproximadamente 12% do sinal de distúrbio. Essas características não habilitam o controlador proporcional a ser utilizado no sistema. O controlador proporcional integral apresenta boas características com relação ao tempo de resposta e ao erro em regime permanente, que de acordo com as simulações é completamente eliminado, todavia, a forma do sobre sinal alcança valores próximos a 3,5 % do sinal de distúrbio e apresenta pequena oscilação. Outra característica desfavorável são as oscilações do sistema no período inicial, que são ampliadas para valores de ganho integral pouco diferente ou para condições de distúrbios pouco diferentes das previstas, o que na prática poderá levar o dispositivo final de controle a um colapso, ou seja, a defeitos provocados pelo excesso de atuações em curto período, especialmente considerando-se que as variações dos distúrbios são muito freqüentes. O controlador proporcional derivativo apresenta grande estabilidade, elimina o sobre sinal e apresenta um bom tempo de resposta, entretanto, observa-se que não consegue eliminar o erro em regime permanente, mantendo cerca de 2,6% do sinal de distúrbio. Considera-se que o controlador PD não deve ser utilizado para controlar o sistema, especialmente devido ao erro em regime permanente. O controlador proporcional integral derivativo, que reúne as características das três ações clássicas, apresenta bom tempo de resposta, boa estabilidade e eliminou o erro em regime permanente. O sobre sinal, que foi da ordem de 1,6% do sinal de distúrbio, ocorreu de forma suave, evitando as oscilações no sistema e, conseqüentemente, o desgaste prematuro do elemento final de controle. O controlador PID atende a todas as especificações de desempenho requeridas e pode ser utilizado de forma segura no sistema proposto.

5. REFERÊNCIAS

- Alkhamis, T. M., El-Khazali, R., Kablan, M. M., Alhusein, M. A., 2000, "Heating of a Biogas Reactor Using Energy System with Temperature Control Unit" *Solar Energy*, Vol. 69, No. 3, pp. 239 – 247.
- Braga, A. H. G., 2000, "Controle Aplicado a Sistemas Térmicos", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.
- Braga, A. H. G., 2004, "Sistema de Controle de Temperatura para Climatização de Ambientes", Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.
- Bejan Adrian, 1996, "Transferência de Calor"; 4ª edição, Editora Edgard Blucher, S.Paulo, Brasil, 428 p.
- Filippin, C., Beascochea, A., Esteves, A., De Rosa, C., Cortegoso, L., Estelrich, D., 1998, "A Passive Solar Building for Ecological Research in Argentina: The First Two Years Experience", *Solar Energy*, Vol. 63, No. 2, pp. 105 – 115.
- Kalogirou, S. A., Panteliou, S., Dentsoras, A., 1999, "Modeling of Solar Domestic Water Heating Systems Using Artificial Neural Networks", *Solar Energy*, Vol. 65, No. 6, pp. 335 – 342.

- Meunier, F., Kaushik, S. C., Neveu, P., and Poyelle, F., 1996, “A Comparativo Thermodynamic Study of Sorption Systems: Second Law Analysis”. International Journal Refrigeration, Vol 19, N° 6, pp. 414 – 421.
- Ogata, K., 2003, “Engenharia de Controle Moderno”, 4° edição, editora Prentice Hall, S.Paulo, Brasil, 800 p.
- Omtvedt, I. T., Nelson, R. E., Edwards, R. L., Stephens, D. F., Turman, E. J., 1971, “Influence of the Heat Stress During Early, Mid and Late Pregnancy of Gilts ”, J. Animal Sci, 32:312.
- Pons, M., Poyelle, F., 1999, “Adsorptive Machines with Advanced Cycles for Heat Pumping or Cooling Applications”, International Journal of Refrigeration, 22, pp. 27 – 37.
- Rane, M. V., Pabla, S. S. And anand, G., 1999, “Activated Carbon/Ammonia Adsorption System for Bus Air Conditioning”. Proceedings of the of the sorption heat pump conference, pp. 71 – 80, Munich – Germany.
- Sfetsos, A., Coonick, A. H., 2000, “Univariate and Multivariate Forecasting of Hourly Solar Radiation with Artificial Intelligence Techniques ”, Solar Energy, Vol. 68, No. 2, pp. 169 – 178.
- Shelton, Sam V., 1999, “Le Conditionnement D’Air Avec La Sorption Solide”, Applied Thermal Engineering, pp 67 – 76.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

MODELING AND CLASSIC CONTROL SYSTEM IN EVAPORATIVE COOLERS FOR ENVIRONMENT CLIMATIZATION

Andrei Hudson Guedes Braga, andrei_projetos@yahoo.com.br¹

Jesus Marlinaldo de Medeiros, jesus_medeiros@yahoo.com.br¹

Cleonildo Soares Braga, cleonildosoares@ipojuca.ifpe.edu.br¹

Juliana de Almeida Yanaguizawa de Carvalho, julianaalmeida@ipojuca.ifpe.edu.br¹

¹Federal institute of Pernambuco, Highway PE 060, Quarter California Garden, Ipojuca - PE

Abstract. *One of the great challenges of the modern world is without a doubt the question of the energy, its rational exploitation and not ambient aggression. To solve the problem, investments in clean energy matrices search. A possible alternative is the substitution of the air conditioning systems (vapor compression) for evaporative coolers to provide reduction of the electric consumption, good levels of quality of interior air, thermal comfort and not ambient aggression. The evaporative cooling is a natural process that consists of the reduction of the temperature of the air and rise of its relative humidity through simultaneous mechanisms of heat and mass transference between air and the water. Although its simplicity and of the low cost of acquisition and operation, the reduction of temperature gotten in the evaporative cooler depends much more on the relative humidity of what of the temperature of entrance. Therefore, for hot and dry climate it is useful, but for humid climate it is inefficient. A theoretical boarding of the evaporative cooler is analyzed. Here the mathematical modeling of the evaporative cooler through the white box technique was carried using the physical description of the involved phenomena. For in such a way, a control system was projected using diverse classic controllers. Also they had been analyzed and compared the consumptions of energy with each controller. For in such a way, ancillary proceedings of dehumidification, renewal and mixture between air masses are used, to guarantee the conditions of projected comfort and a control system. The system of projected control will have to also guarantee that the performance indices are reached, such as reply time, on maximum rise, maximum error and stability.*

Keywords: *consumption of energy, control of process, climatization.*