

MODELAGEM MATEMÁTICA E EXPERIMENTAL PARA SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO COM  
PROJETO DOS CONTROLADORES CLÁSSICOS

Andrei Hudson Guedes Braga - [andreihudson@ipojuca.ifpe.edu.br](mailto:andreihudson@ipojuca.ifpe.edu.br)

Robson Pacífico Guimarães Lima - [robsonpacifico@ipojuca.ifpe.edu.br](mailto:robsonpacifico@ipojuca.ifpe.edu.br)

Lucas Alan Nascimento de Lima - [alanlucas7301@gmail.com](mailto:alanlucas7301@gmail.com)

Instituto Federal de Pernambuco, Rodovia PE 060, Bairro Jardim Califórnia, Ipojuca – PE

S2 - Equipamentos e Componentes de Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento

**Resumo.** As novas diretrizes ambientais têm orientado uma formatação de equipamentos e processos diferenciada, exigindo melhores rendimentos ou novos modelos construtivos. A premissa de que preservar é preciso ganha força e a necessidade de desenvolver equipamentos ecologicamente corretos ou melhorar substancialmente os existentes, de forma a apresentar níveis de consumo de energia menores que os existentes, causando um impacto positivo ao Meio Ambiente, é uma necessidade dos tempos modernos. Essa visão de melhores equipamentos, dos pontos de vistas ecológico e energético, pode conduzir direto aos equipamentos do ciclo de refrigeração por compressão de vapor. As máquinas desse ciclo, seja para refrigeração ou para condicionamento de ar, apresentam acentuados consumos de energia. Além disso, utilizam fluidos refrigerantes nocivos ao Meio Ambiente, inclusive ecológicos. Na tentativa de reduzir esses efeitos, algumas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de reduzir o consumo de energia desses ciclos. Esse trabalho apresenta uma modelagem matemática experimental do conjunto formado por climatizador de ar e ambiente. Serão desenvolvidos três modelos matemáticos através do método caixa preta. O estudo foi desenvolvido para que os modelos sejam conhecidos de forma que, futuramente, sistemas de controle de processos possam ser projetados permitindo aumentar a eficiência do conjunto, reduzindo o consumo de energia e aumentando a vida útil do equipamento. Também para controlar os parâmetros, temperatura de bulbo seco do ar e umidade relativa, dentro dos valores ajustados, o que não ocorre com equipamentos convencionais. O modelo físico foi montado em laboratório para a realização dos experimentos. Ao final, os modelos matemáticos são analisados e validados e os controladores são projetados.

**Palavras-chave:** modelagem matemática, ambientes climatizados, sistema de controle de processos

## 1. INTRODUÇÃO

O planeta tem passado por grandes transformações, especialmente nos anos mais recentes quando o Meio Ambiente tem sofrido com as modificações impostas pelo homem, quando da necessidade do aumento no consumo dos mais diversos tipos de produtos, resultando em uma busca incessante por maior produtividade. Na tentativa de solucionar parte dos problemas, muitas pesquisas científicas têm sido conduzidas para a área ambiental. As novas diretrizes ambientais têm orientado uma formatação de equipamentos e processos diferenciada, exigindo melhores rendimentos ou novos modelos construtivos. A premissa de que preservar é preciso ganha força e a necessidade de desenvolver equipamentos ecologicamente corretos ou melhorar substancialmente os existentes, de forma a apresentar níveis de consumo de energia menores que os existentes, causando um impacto positivo ao Meio Ambiente, é uma necessidade dos tempos modernos. O crescimento da população global impõe altas taxas de degradação ao meio ambiente, bem como alto consumo das nossas reservas naturais, especialmente nas sociedades cujo crescimento acontece de forma desorganizada. Os nocivos efeitos dessa dinâmica de crescimento se acumulam e faz com que o planeta enfrente problemas cada vez maiores. Dois dos problemas que mais preocupam e cujo debate tem sido muito intenso, estão relacionados ao consumo de energia elétrica e os efeitos da liberação de gases nocivos na camada de Ozônio, o que resulta no crescimento do interesse no desenvolvimento ou melhoramento de sistemas alternativos cujas características sejam o baixo consumo de energia elétrica e a não agressão da natureza. Seguindo essa linha de raciocínio é possível encontrar um relevante número de pesquisas direcionadas a minimizar esses efeitos, cujos resultados desejados são o desenvolvimento de sistemas, processos e equipamentos com melhores rendimentos.

A sociedade moderna se utiliza cada vez mais de equipamentos que possuem características de alto consumo, que agredem a natureza, e que outrora foram considerados artigos de luxo, mas que atualmente são itens de necessidade básica. Sob essa ótica, é possível observar diversos tipos de sistemas que apresentam alto consumo, todavia, nenhum outro tem ganho tanto destaque quanto os equipamentos destinados a climatização e a refrigeração. Os climatizadores de ambientes, refrigeradores, umidificadores e desumidificadores, utilizados para fins domésticos, são cada vez mais solicitados, no entanto, também na área industrial os sistemas de climatização e refrigeração apresentam altas taxas de crescimento. 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 (Braga, 2010). Para garantir a qualidade de alguns produtos é necessário 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.

As consequências da massificação da utilização de equipamentos, sobre o Meio Ambiente, constituem outro problema a ser resolvido. Intimamente relacionada a graves problemas como a própria crise energética e o desequilíbrio ambiental, tem supostamente provocado vários fenômenos, tais como El Niño e La Niña. 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 agredem a camada de Ozônio são os chamados HCFC (Hidroclorofluórcarbono) e o CFC (Clorofluórcarbono) usados em sistemas de condicionamento e refrigeração convencionais (sistemas de compressão de vapor) de pequeno, médio e grande portes em todo o mundo. Segundo Sagan (1998), 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 levá-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 Ozonosfera estivesse a pressão e temperatura do nível do mar, a camada teria aproximadamente 3 milímetros de espessura.

O desenvolvimento de novos sistemas, bem como o aperfeiçoamento do desempenho de sistemas existentes, constitui o principal desafio dos pesquisadores no sentido de criar 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, para fins residenciais, comerciais e industriais. Estes equipamentos de refrigeração e ar condicionado são responsáveis por grande parte da energia consumida, principalmente nas cidades de médio e grande portes, das regiões de clima tropical. Além do alto consumo, outra grande desvantagem é a liberação de gases HCFC e CFC para a atmosfera quando da troca de fluido, seja por dano no compressor, corrosão em tubulações ou até mesmo pelo entupimento 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. Os equipamentos de climatização mais novos já utilizam gases considerados ecológicos, tais como os hidro flúor carbono (HFC) tipo o R – 407 C e o 410 A. Dentre esses equipamentos destacam-se os de fluxo de refrigerante variável (VRF), que além de utilizarem o fluido 410 A, também trabalham com a variação de rotação do compressor em função da carga térmica solicitada em cada instante, o que na prática representa uma redução no consumo total de energia. Todavia, equipamentos com tecnologia VRF apresentam custos de aquisição e instalação muito altos em relação aos condicionadores cujos compressores apresentam rotação fixa.

O alto desempenho dos sistemas térmicos, em particular dos ciclos de refrigeração alternativos, é alcançado com 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, variando a pressão que atua sobre o diafragma que aciona o relé, ligando ou desligando 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 portes utilizem-no 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.

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, 2004).

Algumas relevantes pesquisas têm sido desenvolvidas e atestam a eficiência da integração das áreas de controle e térmica, cujo início tem sido a criação de modelos matemáticos consistentes. Garcia et al. (1999) estudaram uma estratégia de controle que possibilitou a otimização da distribuição de temperatura dentro de recipiente volumétrico. Spetios 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 et al. (2016) estudaram um sistema de controle clássico aplicado a um sistema de resfriamento evaporativo. Braga e Lima (2020), realizaram a modelagem matemática e o projeto de controladores para a água do reservatório de um resfriador evaporativo, objetivando o resfriamento controlado da água para reuso desse rejeito térmico em outros processos. Mashuri et al. (1999) apresenta um

trabalho onde mostra a necessidade de controle na temperatura de regeneração do adsorvente e no processo de resfriamento evaporativo, como forma de garantir uma razão de calor sensível na ordem de 75 %, como também atingir os índices de desempenho aceitáveis.

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 diferenciados 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 consequências.

O objetivo central deste trabalho é realizar um modelo matemático consistente e que represente bem um sistema composto de condicionadores de ar climatizando um ambiente, bem como projetar controladores automáticos clássicos, do tipo PID, para atender as especificações de desempenho. Para coleta de dados, utilizou-se uma sala de aula padrão do IFPE, campus Ipojuca, onde os experimentos foram realizados. Os modelos matemáticos foram gerados no domínio da frequência e deverão ser consistentes e adequados a utilização de sistemas de controle clássico e moderno, uma vez que, foram projetados controladores automáticos para garantir operação dentro das melhores faixas de rendimento, menor consumo de energia, maximização do tempo de vida útil dos componentes, velocidade da resposta e menor faixa de erro. Os projetos dos controladores clássicos também são realizados nesse trabalho.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Nessa seção serão desenvolvidos os modelos matemáticos experimentais, do tipo caixa preta, realizado a partir de experimentos com o sistema proposto. Após a coleta dos dados, os modelos matemáticos serão desenvolvidos, simulados e comparados ao modelo experimental, resultando no processo de validação.

### **2.1 Experimento**

O sistema de climatização da sala é realizado por dois climatizadores ambientes, do tipo split ambiente, fixados na parede e produz uma redução da temperatura de bulbo seco do ar, ao mesmo tempo em que reduz a umidade relativa do ambiente. Para a realização do processo de coleta dos dados, os equipamentos estiveram desligados, garantindo que as condições climáticas do ambiente fossem similares as condições externas. Na sequência, um sensor de temperatura de bulbo seco e um sensor de umidade relativa foram fixados no centro da sala, a 1,2 metros de altura. Os sensores foram ligados a um computador para que os dados fossem transmitidos, possibilitando a coleta. Em seguida o sistema de climatização da sala foi acionado e, passados alguns segundos, as condições climáticas começaram a variar. O processo foi mantido até que a temperatura e umidade do ambiente estabilizassem. Após a estabilização, o sistema foi desativado e os dados coletados foram utilizados para a modelagem matemática.

O sistema foi montado com dois splits ambientes, conhecidos comercialmente como hi wall, ambos com capacidades nominais de 6.000 kcal/h, sensores de temperatura de bulbo seco e de umidade relativa com saída para computador, computador e software para coleta de dados.

O valor inicial da Temperatura de bulbo seco do ar, no ambiente, era de 28,31 °C, sendo essa a temperatura externa durante o experimento. O sistema foi mantido em funcionamento e a temperatura foi reduzida até a estabilização. Após a estabilização da temperatura, observou-se um valor final de 24,78 °C. Observando-se ainda que no movimento decrescente da curva, verificou-se um atraso de tempo de 303 segundos. Esse tempo morto é causado pelos fatores de velocidade do fluxo, da capacitância e da resistência. O tempo de estabilização da temperatura foi de 7200 segundos.

Da análise dos resultados é possível observar que, no início do processo, a umidade relativa do ar é de 81,15%, no entanto, após a estabilização da curva, o valor final foi de 50,74%.

### **2.2 Identificação Matemática do Sistema**

A modelagem matemática foi realizada de forma a permitir a utilização das estratégias de controle, considerando-se a incompatibilidade das estratégias dos controladores com sistemas múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), próprios dos modelos mais convencionais. Desta forma, foi necessário o desenvolvimento de um modelo matemático contendo apenas uma saída, mesmo que com várias entradas variantes no tempo.

A modelagem matemática foi realizada a partir do estudo do comportamento da curva descrita pelo processo durante o experimento. A dinâmica apresentada pelo processo foi modelada a partir de três parâmetros principais, o tempo morto, a constante de tempo e o ganho do sistema. Esses três parâmetros formam a base do método de modelagem apresentado. O tempo morto corresponde ao tempo decorrido, desde o acionamento do sistema, até o momento em que os sensores começam a captar as variações das variáveis (temperatura e umidade). A constante de tempo corresponde ao tempo decorrido, desde o momento em que o sensor começa a captar a variação do sinal, devido o acionamento do sistema, até alcançar 63% do valor máximo. O ganho corresponde a razão entre a energia de saída do sistema, contabilizada pela variação das variáveis e a energia de entrada no sistema, que corresponde a energia de acionamento.

O trabalho apresenta a metodologia das equações pré-determinadas, que podem representar a dinâmica de diversos processos, conforme descrito em Campos (2010). A equação 1 apresentada, mostra um modelo generalizado, que necessita de modificação no termo exponencial para ser utilizada na modelagem. Uma particularidade desse método é que a função de transferência  $G_p(S)$  já está descrita no domínio da frequência, não sendo necessário realizar a transformada de Laplace.

$$G_p(S) = \frac{k e^{-\theta.S}}{\tau.S + 1} \quad (1)$$

A utilização da equação 1 está condicionada a modificação do termo exponencial. Para que isso ocorra serão apresentadas três simplificações para o termo. As equações 2, 3 e 4 mostram as simplificações sugeridas.

$$e^{-\theta.S} = 1 - \theta.S \quad (2)$$

$$e^{-\theta.S} = \frac{1}{e^{\theta.S}} = \frac{1}{1 + \theta.S} \quad (3)$$

$$e^{-\theta.S} = \frac{1 - \frac{\theta}{2}.S}{1 + \frac{\theta}{2}.S} = \frac{2 - \theta.S}{2 + \theta.S} \quad (4)$$

Cada uma das aproximações descritas nas equações 2, 3 e 4, quando substituídas na equação 1, resultam nas equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$G_p(S) = \frac{-k\theta.S + k}{\tau.S + 1} \quad (5)$$

$$G_p(S) = \frac{k}{\tau.\theta.S^2 + (\tau + \theta).S + 1} \quad (6)$$

$$G_p(S) = \frac{-k.\theta.S + 2.k}{\tau.\theta.S^2 + (2\tau + \theta).S + 2} \quad (7)$$

Nas equações 1, 5, 6 e 7,  $k$  é o ganho do sistema, definido como a razão entre o valor do sinal de saída e o valor do sinal de entrada. Nesse caso, o sinal de saída corresponde a variação de temperatura do ar do ambiente, enquanto que a entrada corresponde ao sinal do degrau do sistema ou seja, a quantidade de energia introduzida no equipamento para o seu funcionamento.

$$k = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}}, \text{ representa o ganho do sistema}$$

O termo  $\theta$  representa o tempo morto do processo, que é definido como sendo o tempo que decorre desde a excitação do sistema com o degrau ( $t_1$ ), até o momento em que o sistema passa efetivamente a atuar como resultado da entrada ( $t_2$ ). Em outras palavras, o tempo morto corresponde ao tempo decorrido, desde o acionamento do sistema, até o momento em que os sensores começam a captar as variações da variável analisada (temperatura).

$$\theta = (t_2 - t_1) = \text{Tempo Morto}$$

As equações 1, 5, 6 e 7 apresentam o termo  $\tau$ , que representa a constante de tempo, que pode ser definida como o tempo decorrido do instante em que o degrau foi realizado, até o momento em que o sinal de saída do processo alcançou 63% da máxima variação de temperatura ( $t_3$ ), descontado o tempo morto. Pode-se entender esse ponto como o ponto de inflexão da curva. Assim, a constante de tempo corresponde ao tempo decorrido, desde o momento em que o sensor começa a captar a variação do sinal, devido ao acionamento do sistema, até alcançar 63% do valor máximo ou mínimo, nesse caso específico será 63% do menor valor da temperatura.

$$\tau = (t_3 - t_2) = f[(t_2 - t_1) \cdot 0,63] = \text{Constante de Tempo}$$

As equações foram trabalhadas no domínio da frequência. Nas equações de 1 a 7, o termo “S” representa que as equações estão no domínio da frequência.

Para a validação da modelagem matemática, as equações desenvolvidas foram inseridas em um programa, desenvolvido no MatLab. O programa possibilitou a plotagem e comparação das curvas simuladas e a curva experimental.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos dos experimentos realizados no ambiente, para determinação das mudanças ocorridas. É possível verificar a capacidade de redução da temperatura de bulbo seco do ar. Na seção seguinte serão apresentados os modelos matemáticos obtidos para o sistema. Também está descrita a validação dos modelos utilizando as curvas experimentais e as realizadas a partir das equações identificadas.

#### 3.1. Experimentos com o Protótipo

O sistema foi atuado a partir do degrau de entrada, resultando em uma gradual redução da temperatura de bulbo seco do ar. O experimento somente foi interrompido após estabilização do processo, ou seja, quando a temperatura estabilizou, o que ocorreu em torno de 24,78 °C.

A análise dos resultados experimentais mostrou que o tempo morto foi de 303 segundos, enquanto a constante de tempo foi de 2844 segundos. O ganho ajustado foi de -0,0145 °C/V.

A partir dos valores dos parâmetros descritos foi possível montar as equações e testar qual melhor representa o processo. As equações 8, 9 e 10 representam os modelos matemáticos obtidos a partir das equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$G_{P1}(S) = \frac{4,3935.S - 0,0145}{2844.S + 1} \quad (8)$$

$$G_{P2}(S) = \frac{-0,0145}{864576S^2 + 3148S + 1} \quad (9)$$

$$G_{P3}(S) = \frac{4,3935S - 0,029}{864576S^2 + 5992S + 2} \quad (10)$$

As figuras 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam os resultados experimentais e simulados. Os eixos das ordenadas e abscissas apresentam os valores de temperatura de bulbo seco do ar e o tempo decorrido.

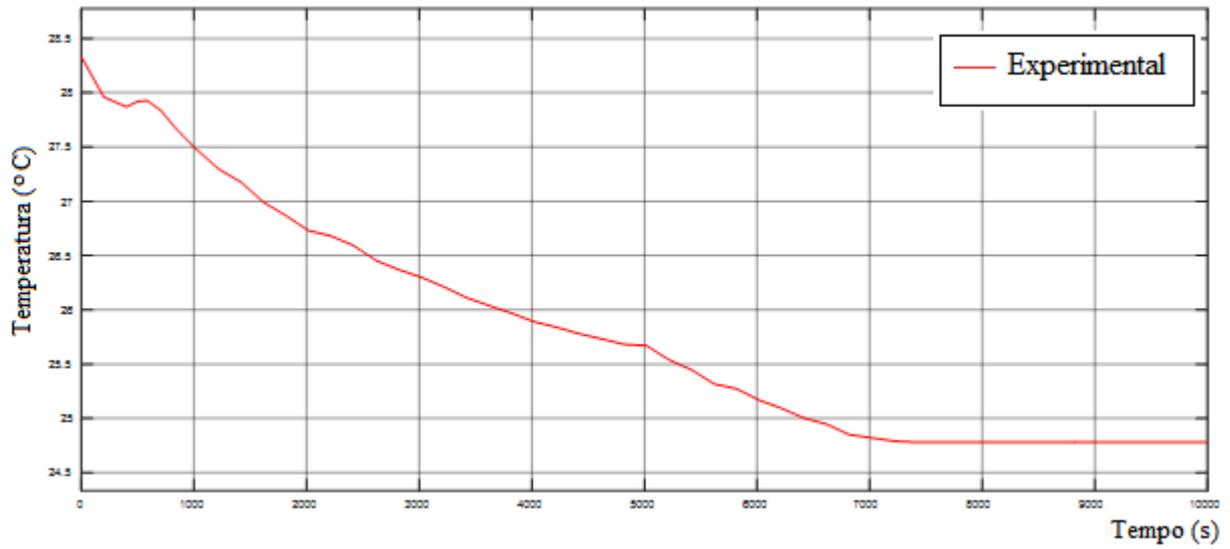


Figura 1. Gráficos de Resposta Experimental.

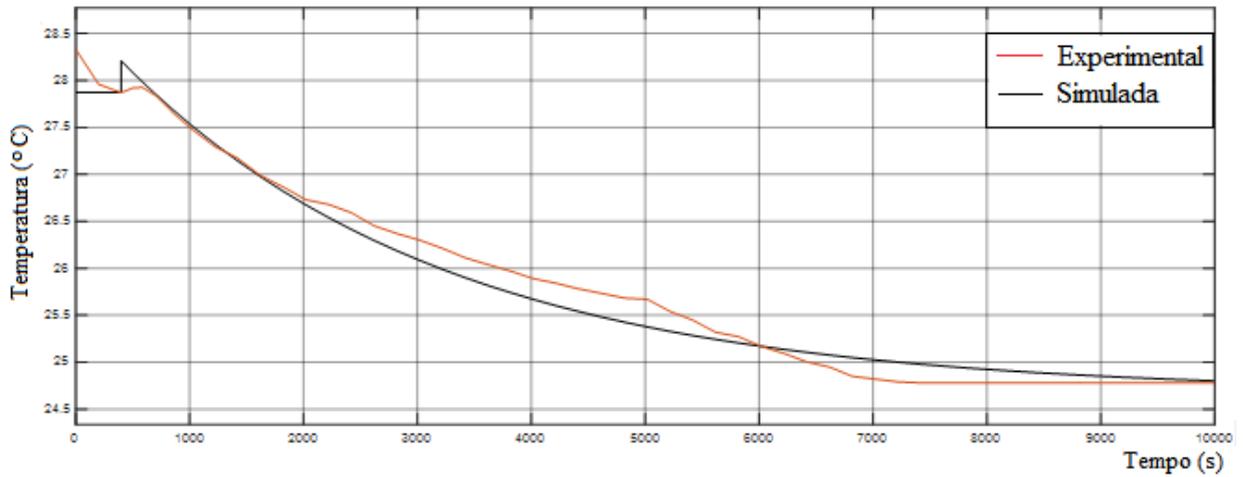


Figura 2. Gráficos de Resposta Experimental X Resposta teórica para a Equação 8 (GP1).

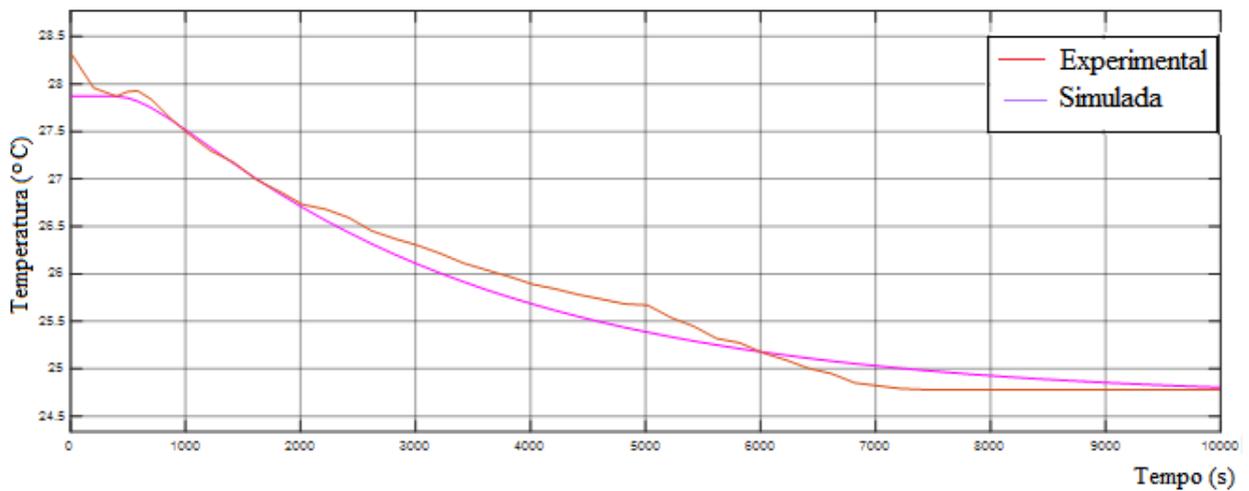


Figura 3. Gráficos de Resposta Experimental X Resposta teórica para a Equação 9 (GP2).

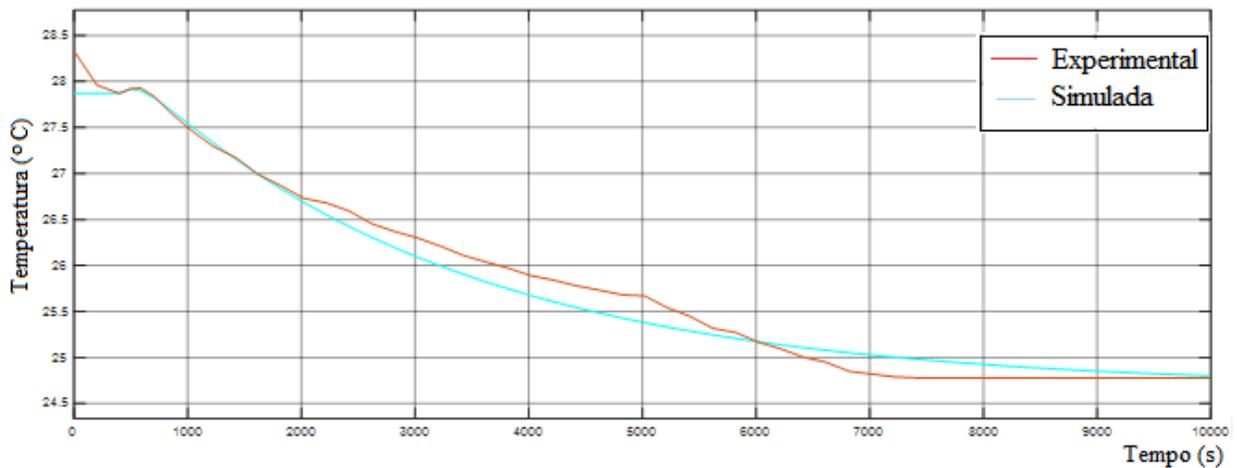


Figura 4. Gráficos de Resposta Experimental X Resposta teórica para a Equação 10 (GP3).

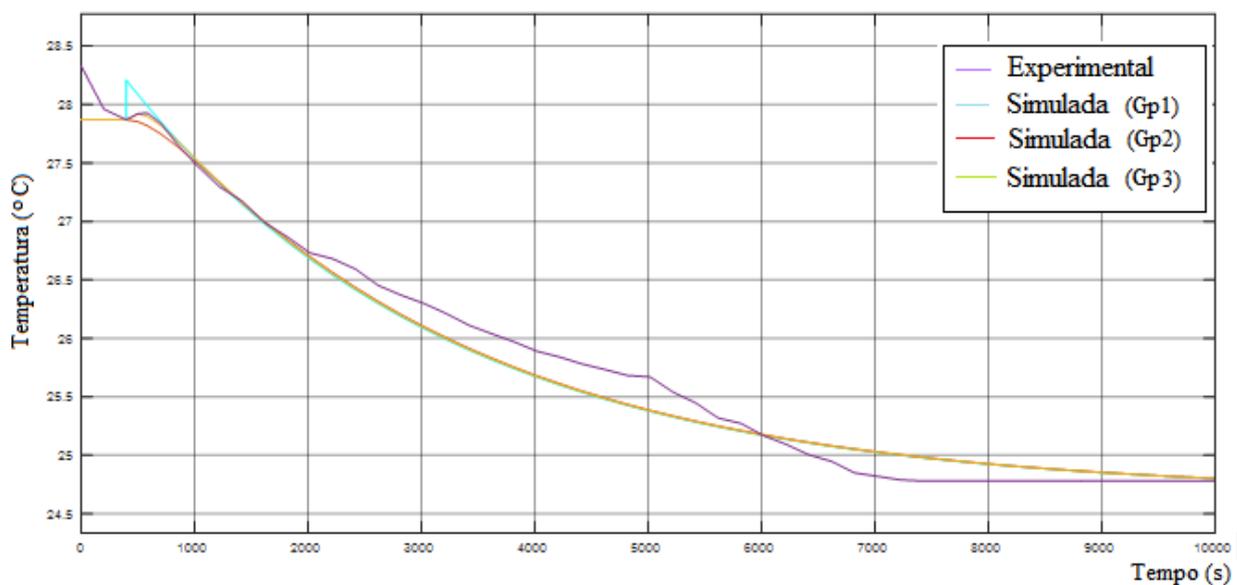


Figura 5. Gráficos de Resposta Experimental X Respostas teóricas para as 03 Equações.

### 3.2. Análise dos resultados

As simulações foram realizadas a partir das três equações identificadas. A figura 1 mostra a resposta experimental do sistema, quando excitado. As figuras 2, 3 e 4 apresentam as respostas do experimento versus as respostas das simulações das equações 8, 9 e 10, respectivamente. A partir desses gráficos foi possível realizar as comparações entre os modelos simulados e o modelo experimental. A figura 5 mostra a composição dos quatro gráficos, sendo possível observar que apresentam resultados similares. Observa-se que as diferenças existentes entre os modelos teóricos ocorrem apenas no início do processo, entre 0 e 700 segundos. As principais diferenças entre os três gráficos simulados são verificadas no início do processo. Os gráficos das equações 8 e 10 apresentam um retardo maior que o gráfico da equação 9, contudo estão mais próximos do comportamento apresentado pelo experimento. As diferenças permanecem no período compreendido entre 400 e 1000 segundos. Após esse tempo, as três curvas se equivalem. Particularmente, observam-se pequenas diferenças, especialmente no início dos processos, onde o tempo morto está presente. Em relação ao gráfico do experimento, o maior desvio é observado em regime transitório, entre 2000 e 6000 segundos, quando o maior erro absoluto é aproximadamente 0,3 °C ou 8,5% em relação a variação da temperatura de bulbo seco. O regime permanente inicia em 7200 segundos e é possível observar que o erro máximo em regime é menor que 1%. Nessa região as três curvas identificadas apresentam resultados muito próximos, que convergem para o resultado experimental.

Outra característica importante apresentada nas curvas de resposta é a não linearidade da curva experimental, responsável pelas maiores diferenças entre os modelos identificados e a curva real do sistema.

A função de transferência que melhor representa o sistema ensaiado foi a Gp2, uma vez que representa melhor a dinâmica desse sistema. Chega-se a essa conclusão ao analisar os primeiros 700 segundos, quando é possível observar que nesse período a primeira função de transferência (Gp1) está afastada da resposta experimental, o que seria esperado,

por se tratar de modelo de primeira ordem. É possível verificar ainda que a curva resultante da GP3 apresenta um leve afastamento da curva experimental, contudo possuindo uma dinâmica similar.

### 3.3. Projeto dos Controladores Clássicos

Essa seção mostra o projeto dos controladores para o sistema de climatização de ambientes. Os controladores projetados serão o proporcional (P), o proporcional integral (PI) e o proporcional integral derivativo (PID), ambos pelo método de Ziegler e Nichols, conforme descrito em Ogata (2003).

A tabela 2 apresenta os ganhos proporcional, integral e derivativo para os controladores proporcional, integral e para o derivativo, calculados pelo método de Ziegler e Nichols.

**Tabela 1. Ganhos dos Controladores Clássicos**

	CONTROLADOR P	CONTROLADOR PI	CONTROLADOR PID
<b>Ganho Proporcional (KP)</b>	647,32	582,58	776,78
<b>Ganho Integral (KI)</b>	-	0,001	0,00165
<b>Ganho Derivativo (KD)</b>	-	-	151,5

As equações 11, 12 e 13 representam o modelo matemático dos controladores clássicos proporcional, proporcional integral e proporcional integral derivativo, respectivamente. Os modelos serão utilizados para controlar a planta do sistema de climatização, de forma a atender os critérios de desempenho estabelecidos, como tempo de resposta, tempo de subida, erro máximo em regime permanente, sobre sinal e otimização do consumo de energia.

(11)

$$G_{C(P)}(S)_{\text{protótipo}} = \frac{-647,32}{1}$$

(12)

$$G_{C(PI)}(S)_{\text{protótipo}} = \frac{-587825,36S - 582,58}{1008,99.S}$$

(13)

$$G_{C(PID)}(S)_{\text{protótipo}} = \frac{-8023022069S^2 - 485441,35S - 776,78}{11476,125S^2 + 606.S}$$

## 4. CONCLUSÃO

As equações propostas como modelos do sistema identificado, após simulação através do software MatLab, apresentaram respostas muito próximas ao modelo experimental obtido no processo de climatização do ambiente. Os erros entre as curvas identificadas e a curva do processo são muito pequenos, especialmente em regime permanente. A região entre 2000 e 6000 segundos, onde ocorre o maior erro está localizada próxima da região de decaimento, com erro absoluto de 0,3 °C ou 8,49%. Apesar de representar um erro significativo, o projeto dos controladores será realizado de modo a compensar eventuais diferenças. Os projetos dos controladores clássicos dos tipos proporcional (P), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID) foram realizados e serão incrementados ao sistema. Também deverão ser realizados projetos com controladores modernos. Alguns controladores modernos como o LQG e o controle Robusto conseguem compensar pequenas falhas decorrentes da modelagem. Todos esses controladores serão testados e seus resultados comparados.

Considerando que o modelo matemático realizado tem como objetivo subsidiar o projeto dos controladores automáticos, tanto dos tipos clássicos quanto modernos, conclui-se que o modelo apresentado poderá ser utilizado com segurança, como mostraram as validações.

A partir do modelo matemático e dos controladores projetados será possível desenvolver novos climatizadores com controle de temperatura e umidade, que resultarão em maior eficiência do sistema de climatização de ambientes. A atuação dos controladores no sistema possibilitará um menor consumo de energia, uma vez que os controladores foram otimizados para os critérios de desempenho que envolvem a minimização do consumo, que possibilitam ainda um maior tempo de vida útil dos equipamentos, uma vez que a variável de controle será manipulada de forma a permitir que o sistema responda sempre de forma suave, evitando grandes sobressinais ou oscilações.

## 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., 2004, “Sistema de Controle de Temperatura para Climatização de Ambientes”, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.

Braga, A. H. G., 2016, Gomes, D. F., Medeiros, J. M., Junior, A. B. S., Analysis of Classical Controllers used in Evaporative Coolers in Hot and Dry Climates. 16 th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering November 07-10th, 2016, Vitória, ES, Brazil.

Braga, A. H. G., Lima, R. P. G., 2020. Identificação e Modelagem Matemática da Variação de Temperatura da Água do Reservatório do Resfriador Evaporativo e Projeto dos Controladores Clássicos, tipo PID. XLI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 16-19 novembro, 2020, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

Campos, Mario Cesar M. M. de. Teixeira, H. C. G. “Controles Típicos”, 2º edição, editora Blucher, S.Paulo, Brasil.

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.

Ogata, K., 2003, “Engenharia de Controle Moderno”, 4º edição, editora Prentice Hall, S.Paulo, Brasil, 800 p.

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.

**Abstract.** *The new environmental directives have been oriented to a differentiated format of equipment and processes, demanding better performance or new construction models. The premise that preserving must be strengthened and the need to develop ecologically correct equipment or substantially improve existing ones, in order to present smaller energy consumption than existing ones, causing a positive impact on the Environment, is a necessity of modern times. This vision of better equipment from the ecological and energy point of view can lead directly to the equipment of the refrigeration cycle by steam compression. The machines in this cycle, whether for cooling or for air conditioning, have a high energy consumption. In addition, they use environmentally harmful refrigerant fluids, including ecological fluids such as HFCs, which influence the increase of the greenhouse effect. In an attempt to reduce these effects some researches have been developed with the objective of reducing the energy consumption of these cycles. This work presents an experimental mathematical modeling of the set consisting of an air conditioner and an environment. Three mathematical models will be obtained through the black box method. The study was designed so that the models are known so that, in the future, process control systems can be designed to increase the efficiency of the assembly, reducing energy consumption and increasing the life of the equipment. Also to control the parameters, air dry bulb temperature and reported humidity, within the adjusted values, which do not occur with conventional equipment. The physical model was assembled in the laboratory to perform the experiments. At the end, the mathematical models will be analyzed and validated.*

**Keywords:** *mathematical modeling, air-conditioned rooms, process control system.*