

Identificação e Modelagem Matemática da Variação de Temperatura da Água do Reservatório do Resfriador Evaporativo e Projeto dos Controladores Clássicos, tipo PID.

Andrei Hudson Guedes Braga¹ ; Robson Pacífico Guimaraes Lima²
Instituto Federal de Pernambuco
Rodovia PE 060, Bairro Jardim Califórnia, Ipojuca – PE
andreihudson@ipojuca.ifpe.edu.br¹
robsonpacifico@ipojuca.ifpe.edu.br²

Abstract. The population growth imposes high rates of production and consumption of electric energy, as well as the increase of the degradation of the Environment. These conditions drive research into the development of more efficient machines and equipment. Further research is carried out with the aim of creating systems that are alternative to existing ones, presenting lower energy consumption and that can produce a positive impact on the Environment. The air conditioning equipment represents systems characterized by high consumption, as well as by influencing the degradation of the ozone layer and greenhouse effect. Coolant fluids of the CFC type directly influence the ozone layer, while the alternative HFC fluids, especially the R 407 C and the R 410 A, influence the greenhouse effect and, consequently, global warming. An alternative system to the vapor compression cycle conditioners, when used in hot and dry regions, may be the evaporative cooler. This system performs sensible and latent heat exchange, which can present good results in the regions mentioned, as in the interior of the Brazilian Northeast. In addition to providing a milder climate, the evaporative cooler features low power consumption and may have a low acquisition cost. This work presents the mathematical model of reservoir water in a new evaporative cooler model, differing from the commercial model because it does not have fins. The new model also has an atomizer, consisting of a toothed disk coupled to a motor, whose function is to break the molecule of water and spray it, allowing a greater and faster absorption of water by the air stream. The idea is to use thermal waste, that is, to use water, whose temperature decreases as the system goes into operation, to cool products and / or processes. For this, a prototype was created, in laboratory scale, having been instrumented and prepared to monitor the temperatures and humidity of the air in the entrance and the exit of the prototype, as well as a temperature sensor for the water to monitor and to collect the necessary data for modeling mathematics.

Keywords: evaporative cooler with atomizer; reduction of energy consumption; control.

1 Introduction

O planeta está em permanente transformação, que se acentua a cada ano e cujos efeitos são visíveis. 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. 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 à natureza.

A sociedade moderna se utiliza cada vez mais de equipamentos que possuem características de alto consumo e que agredem a natureza. Sob essa ótica, é possível observar diversos tipos de sistemas que apresentam alto consumo, dentre estes estão os equipamentos destinados a climatização e a refrigeração. Equipamentos para

fins domésticos, comercial e industrial 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, conforme Braga [1].

Um problema que contribui 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 (Hidroclorofluorcarbono) e o CFC (Clorofluorcarbono) usados em sistemas de condicionamento e refrigeração convencionais de pequeno, médio e grande portes em todo o mundo. Segundo Sagan [2], 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 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 sistemas 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 hcfc ,em uma segunda etapa, até 2015, conforme Pons [3]. 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. Outros pesquisadores, como Meunier [4], tentaram fazer comparações a outros ciclos, fazendo uma equivalência do ciclo Carnot para refrigeração por adsorção.

Alguns dos sistemas alternativos que têm sido 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. O processo de resfriamento evaporativo têm sido usado em um grande número de aplicações em regiões quentes e secas. Segundo Yamane (1998), este foi o primeiro sistema de climatização, tendo sido desenvolvido em meados do século XIX. 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). Filippin [5], 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.

Esse trabalho apresenta a modelagem matemática da água do reservatório de um resfriador evaporativo, onde a água é pulverizada em uma fina camada, através da atomização da molécula. Para tanto, foi montado um protótipo contendo o conjunto motor, eixo e um disco dentado, que tem a função de atomizar a molécula. O protótipo possui ainda bomba de circulação da água e ventilador. Também serão desenvolvidos modelos matemáticos identificados, a partir dos experimentos. Os modelos serão validados e poderão ser utilizados para o desenvolvimento de sistemas de controles clássicos e modernos para a utilização da água resfriada para ser usada em resfriamento de equipamentos e/ou processos. Na sequência serão projetados os controladores clássicos dos tipos proporcional (P), proporcional integral (PI) e proporcional integral derivativo (PID). Os ganhos dos controladores serão calculados através do método de sintonia de Ziegler e Nichols, e formarão as equações dos controladores.

2 Resfriador Evaporativo

Nessa seção será apresentado todo o experimento, incluindo o sistema de resfriador evaporativo, sensores e microcontrolador utilizados no trabalho. Os sensores e o microcontrolador arduino foram utilizados para comandar o experimento e coletar os dados da aquisição.

2.1 Experimento

Os experimentos foram realizados em ambiente laboratorial, com temperatura do ar controlada. O modelo proposto foi experimentado por três vezes sob as mesmas condições de entrada. A figura 1 mostra um sistema de resfriamento evaporativo proposto

Para a realização dos experimentos, com o sistema proposto, foi montado um protótipo em escala reduzida, sendo operado em laboratório. As figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mostram o protótipo sendo montado. A figura 1 mostra o exterior do protótipo montado, também a parte superior, onde está instalado o conjunto de ventilação. A figura 2 mostra o interior do mesmo, sendo possível verificar a instalação de um sensor de temperatura para a monitoração da água do reservatório. Também observa-se o reservatório, que fornece água a ser pulverizada na corrente de ar. Também é possível visualizar o conjunto de mangueiras conectadas, interligadas da bomba até a área central superior do resfriador evaporativo. A figura 3 apresenta a bomba e o medidor de fluxo, bem como as ligações. Existe ainda um sistema auxiliar constituído por um aquecedor tipo Peltier e dois resistores de fio de Cromo AWG 26 com resistência equivalente total de 15 ohms, ligado a uma fonte de 22 V e 1,46 A, resultando em 32,12 W de potência. A função desse conjunto é variar a temperatura da água na entrada do resfriador, simulando condições constantes de temperatura da água, quando essa solicitação for necessária. Na figura 4 observa-se o atomizador, constituído por motor elétrico isolado DC com eixo montado para baixo, ao qual foi conectado um disco com extremidade serrilhada. Esse conjunto é responsável por quebrar a gotícula de água, criando a névoa. A figura 5 mostra o arduino, que é responsável pela coleta dos dados dos sensores, bem como pela alimentação elétrica da bomba, ventilador e rotação do atomizador. O arduino é capaz de fazer variar as vazões de ar e água, bem como a rotação do atomizador, permitindo a otimização dos parâmetros. O sensor de temperatura e umidade AM2302 DHT22 pode ser visto na figura 6. Esse sensor possui resolução de 0,1 °C e 1% de umidade relativa.

O experimento foi realizado no ambiente laboratorial, com temperatura de bulbo seco e umidade do ar controlados, de forma a minimizar os efeitos das variações climáticas externas. Para tanto foram instalados sensores de temperatura e umidade no interior do laboratório, de forma a monitorar os parâmetros. Para iniciar o experimento o motor do ventilador foi acionado, provocando um fluxo de ar através do protótipo. O acionamento do motor fará com que o disco gire, no entanto sem que, inicialmente, a água circule.

O sistema foi montado com a bomba, o ventilador, o pulverizador e a estrutura de sustentação no formato de um resfriador evaporativo dispostos verticalmente. A fonte de alimentação dos PWMs foi ajustada para 13,5 volts, com corrente máxima de 1,06 A. Dessa forma, a potência foi de 14,31 W para a bomba, o atomizador e o ventilador. Para acionar o sistema, foi realizado um degrau máximo, dessa forma, o motor do ventilador foi acionado no instante determinado. Também nesse momento foi acionado o atomizador, que provoca a pulverização da água.

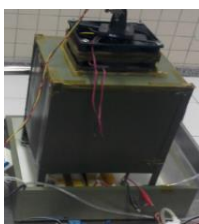


Figura 1. Protótipo

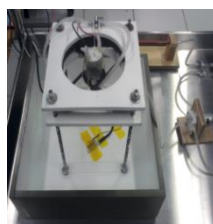


Figura 2. Sensor e Bomba

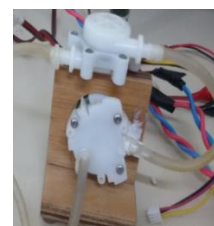


Figura 3. Medidor de Fluxo

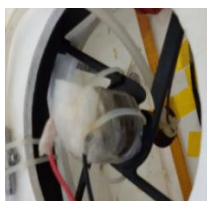


Figura 4. Atomizador e Disco

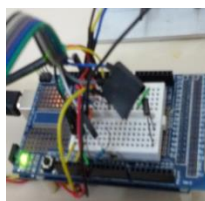


Figura 5. Arduino

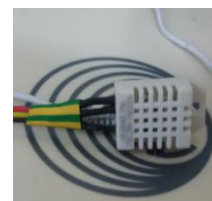


Figura 6. Sensor AM2302 DHT22

3 Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos dos experimentos dos resfriadores evaporativos construído em laboratório (protótipo), para a água do reservatório. Será possível verificar a capacidade de redução da temperatura da água. Na seção seguinte serão apresentados os modelos matemáticos obtidos para o protótipo. Também será realizada a validação dos modelos utilizando as curvas experimentais e as realizadas a partir das equações identificadas.

3.1 Experimentos com o Protótipo

Essa seção mostra as respostas dos experimentos com o protótipo. Para iniciar os experimentos, o condicionador de ar do laboratório foi acionado e ajustado para temperatura de 24o C, deixando o ambiente em equilíbrio em 25,7 o C com 71% de umidade relativa. A partir de estabilização da temperatura dentro do ambiente é que foi dado início ao experimento dos resfriadores evaporativos.

O gráfico da figura 7 apresenta o resultado dos experimentos realizados para obtenção da variação de temperatura da água com o sistema proposto.

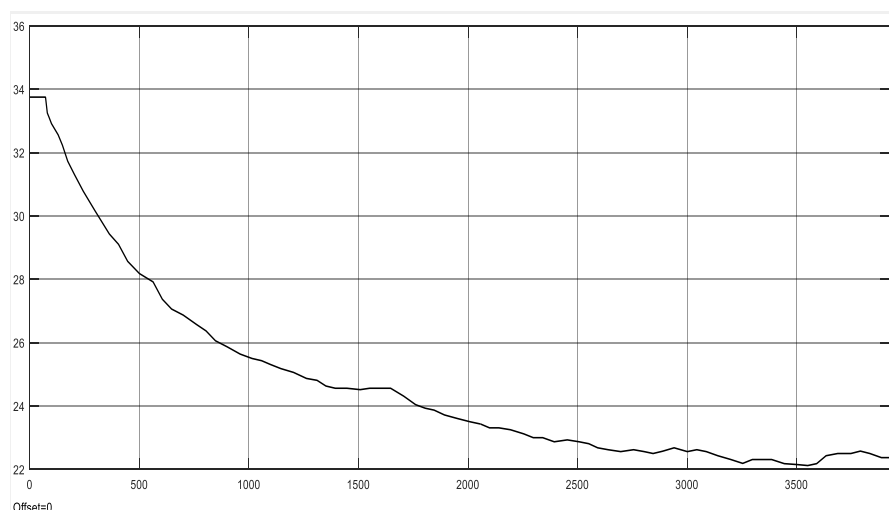


Figura 7. Gráfico de Variação da Temperatura da Água do Reservatório do Protótipo.

A resposta da figura 7 mostra que a variação de temperatura do protótipo foi de aproximadamente 11,45 o C, partindo de 33,75 o C e chegando a 22,3 o C, em média. A temperatura da água inicia acima da ambiente devido ao aquecimento provocado pelo sistema auxiliar constituído por um aquecedor tipo Peltier e dois resistores de fio de Cromo AWG 26, conforme descrito na seção 2.1. O sistema de aquecimento objetiva simular uma carga que será transferida no resfriador.

A curva da figura 7 mostra um tempo de simulação de, aproximadamente, 4000 segundos até a estabilização. No entanto, observa-se que 90% da variação total ocorre em aproximadamente 2000 segundos, o que indica um tempo de descida relativamente pequeno, sendo uma característica adequada ao controle em temperaturas intermediárias.

3.2 Modelos Matemáticos Identificados

As equação 1 representa a equação geral, no domínio da frequência, para processos, enquanto as 2, 3 e 4, representam a equação geral com as três simplificações utilizadas para determinar a dinâmica do sistema. As equações 2, 3 e 4, representam os modelos matemáticos identificados para a água do reservatório.

Para a montagem das equações foi necessário o cálculo dos parâmetros tempo morto (θ), constante de tempo (τ) e do ganho (k), para a água do reservatório do protótipo. A tabela 1, abaixo, apresenta os valores dos parâmetros para ambos os equipamentos.

Tabela 1. Dados de Identificação

	Resfriador Evaporativo (Protótipo)	Dados Gerais
Constante de tempo	716 segundos	PVi = 33,75 °C
Tempo Morto	30 segundos	PVf = 22,31 °C (T = 3925)
Ganho	- 0,84741 °C / Volt	PVm = 26,54 °C (T = 886)
Entrada	13,5 Volts	
Saída	- 11,45 °C	

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

$$G_{p1}(S) = \frac{25,42 \cdot S - 0,847741}{716 \cdot S + 1} \quad (2)$$

$$G_{p2}(S) = \frac{-0,84741}{21.480 \cdot S^2 + 746 \cdot S + 1} \quad (3)$$

$$G_{p3}(S) = \frac{25,42 \cdot S - 1,695}{21.480 \cdot S^2 + 1462 \cdot S + 2} \quad (4)$$

O gráfico 08, abaixo, apresenta as curvas resultantes da simulação das equações 2, 3 e 4, descritas acima. A simulação foi realizada no software MATLAB e para a realização foi efetuada uma entrada de 13,5 Volts. É possível observar que as curvas apresentam dinâmicas similares, sendo as diferenças observáveis no início dos gráficos, até os 150 segundos de funcionamento.

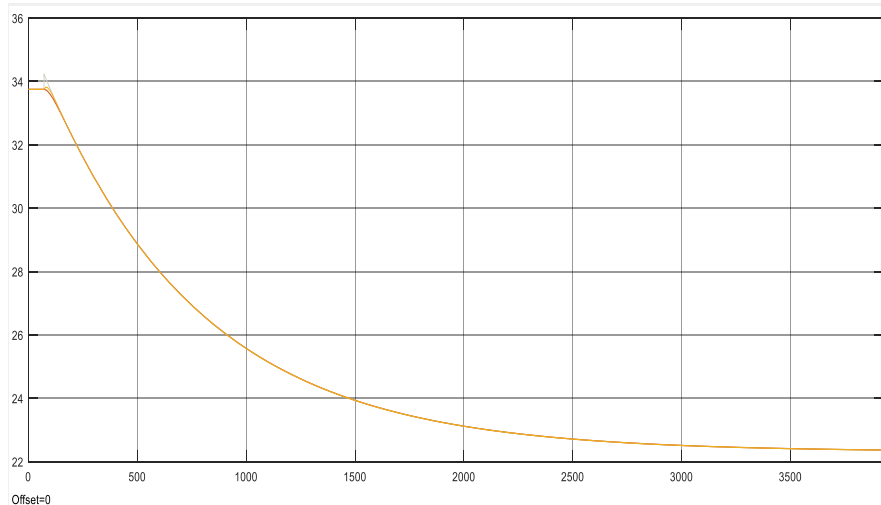


Figura 8. Gráficos de Simulação das Três Equações Identificadas.

O gráfico da figura 9 apresenta a validação das equações identificadas. Nessa figura estão dispostas as três curvas das equações e a curva real, obtida no experimento. É possível observar que as curvas simuladas e real estão bem ajustadas. No entanto, sempre existe uma pequena diferença devido a linearidade da curva real, mas que, no entanto, não comprometem a identificação. Observe que a diferença máxima é de um grau, entre o tempo de 1500 e 1700 segundos. No início do experimento ocorre uma diferença de aproximadamente 0,5 indo de 70 segundos até 750 segundos. A partir do tempo 2000 segundos, essa diferença tende a diminuir a partir daí, chegando a zero.

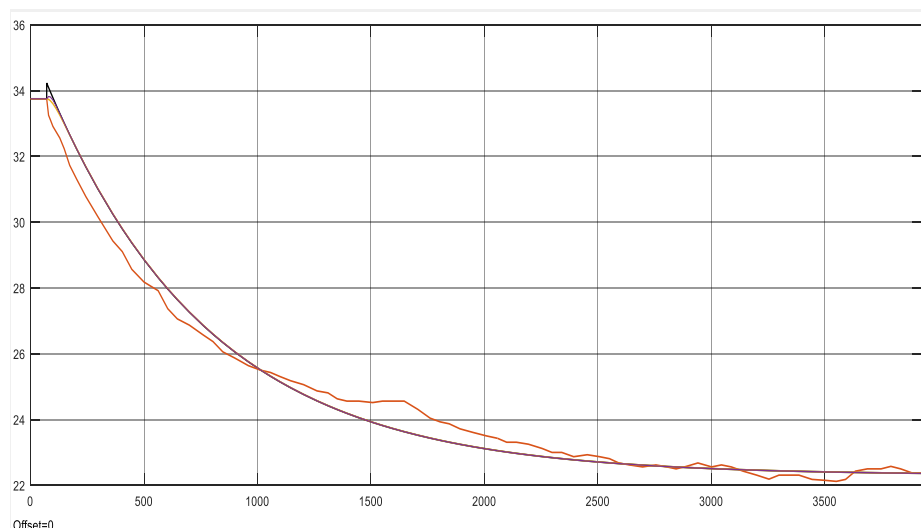


Figura 9. Gráfico de Validação dos Modelos Experimental e Identificado para o Protótipo

O gráfico 10, abaixo, apresenta as curvas resultantes do experimento e da simulação enfatizando o início do funcionamento. Apesar das curvas estarem sobrepostas, é possível verificar que diferem no início do processo, resultando em diferenças em relação ao sistema real. A equação 2 apresenta uma curva que se mostra bem ajustada, a curva do experimento, ao longo do percurso, no entanto é inconsistente no início do processo, uma vez que possui dinâmica do início diferente da real. As equações 3 e 4 apresentam dinâmica mais condizentes com a do sistema real, representando na curva da figura 7.

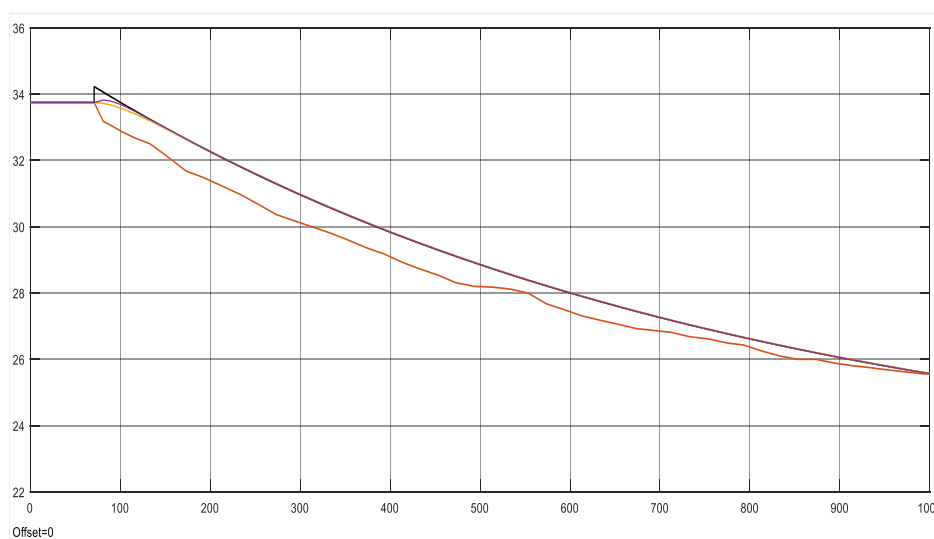


Figura 10. Gráfico das Curvas de Identificação Ampliado

3.3 Projetos dos Controladores

Nessa seção será realizado o projeto do controlador para o sistema de resfriamento da água do reservatório. Os controladores projetados serão o proporcional (P), o proporcional integral (PI) e o proporcional integral derivativo (PID), ambos pelo método de Ziegler e Nichols.

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 2. Ganhos dos Controladores Clássicos

	CONTROLADOR P	CONTROLADOR PI	CONTROLADOR PID
Ganho Proporcional (KP)	28,16425	25,35	33,799
Ganho Integral (KI)	-	0,01	0,0014
Ganho Derivativo (KD)	-	-	0,167

As equações 5, 6 e 7 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 resfriamento de água do resfriador, 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.

$$G_{C(P)}(S)_{\text{protótipo}} = \frac{-28,16425}{1} \quad (5)$$

$$G_{C(PI)}(S)_{\text{protótipo}} = \frac{-2532,255.S - 25,348}{99,9.S} \quad (6)$$

$$G_{C(PID)}(S)_{\text{protótipo}} = \frac{-34219,67.S^2 - 2091,20.S - 33,8}{112,5.S^2 + 60.S + 0} \quad (7)$$

4 Conclusão

A análise dos resultados mostra que a variação da temperatura da água é bastante significativa, mesmo com uma carga atuante, porém com ambiente controlado. A utilização da água pode ser realizada para fins de resfriamento de produtos e/ou processos, mesmo quando em ambiente não controlado, assim a determinação da dinâmica e a geração de modelo matemático são importantes para o estudo desse processo. Os modelos matemáticos que podem ser utilizados, conforme apresentado nos gráficos, são os representados nas equações 3 e 4. A partir desses modelos serão projetados os controladores para comandar o sistema, mantendo-o em funcionamento.

A modelagem seguida pela validação indica que os modelos matemáticos identificados são seguros e podem ser utilizados para representar o sistema físico, montado em forma de protótipo.

Os controladores foram projetados e apresentados, conforme equações 5, 6 e 7, e serão utilizados no protótipo para controlar o sistema de resfriamento da água do reservatório.

4.1 Permission

You are the sole responsible for making sure that you have the right to publish everything in your paper. If you use material from a copyrighted source, or from other authors, you may need to obtain permission from the copyright holder or the respective authors. An authorship statement must be placed at the bottom of your paper, immediately before the list of references, as shown further below.

Declaração de Autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários para ser incluído aqui.

References

- [1] Braga, A. H. G., 2004, "Sistema de Controle de Temperatura para Climatização de Ambientes", Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.
- [2] Sagan, C. "Bilhões e Bilhões: Reflexões sobre Vida e Morte na Virada do Milênio", Companhia das Letras, 1° edição, Rio de Janeiro, 1999.
- [3] Pons, M., Poyelle, F. "Adsorptive Machines with Advanced Cycles for Heat Pumping or Cooling Applications", International Journal of Refrigeration, 22, pp. 27 – 37, 1999.

- [4] Meunier, F., Kaushik, S. C., Neveu, P., and Poyelle, F. “A Comparative Thermodynamic Study of Sorption Systems: Second Law Analysis”. *International Journal Refrigeration*, Vol 19, N° 6, pp. 414 – 421, 1996.
- [5] Filippin, C., Beascochea, A., Esteves, A., De Rosa, C., Cortegoso, L., Estelrich, D. “ A Passive Solar Building for Ecological Research in Argentina: The First Two Years Experience ”, *Solar Energy*, Vol. 63, No. 2, pp. 105 – 115, 1998.