

# AUTOMAÇÃO DO CONTROLE DE TEMPERATURA DO AR DE REGENERAÇÃO DE UM ROTOR DESSECANTE UTILIZANDO MICROCONTROLADOR

**Abmael Vilar BARROS (1); Cícero Herbert Teixeira ANDRADE (2); Márcio Gomes da SILVA (3)**

- (1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil, [abmaelvilar@gmail.com](mailto:abmaelvilar@gmail.com)  
(2) Universidade Federal da Paraíba, Laboratório de Energia Solar, João Pessoa-PB, Brasil, [eng\\_herbert@yahoo.com.br](mailto:eng_herbert@yahoo.com.br)  
(3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil, [mgcefet@gmail.com](mailto:mgcefet@gmail.com)

## RESUMO

No sistema de refrigeração com resfriador evaporativo, a temperatura do fluxo de ar no processo é frequentemente observada. Neste sistema há dois fluxos de ar: de climatização (do ar em processo) e de regeneração. Este trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura automatizado para o sistema de refrigeração evaporativo de forma a facilitar sua utilização e aperfeiçoar seu desempenho. O sistema utilizado é constituído basicamente de: painel eletrônico com teclado, microcontrolador PIC 16F877A, queimador a gás natural, ventilador de circulação de ar, válvula reguladora de fluxo e sensores. O sistema proposto controla o fluxo de gás natural veicular (GNV), utilizado na produção de calor por combustão a gás, por meio de uma válvula reguladora de fluxo e sensores de temperatura e luminosidade. O calor gerado pela queima do GNV aquece o ar de regeneração utilizado no processo de secagem do rotor dessecante do sistema não convencional de refrigeração. Desta forma a temperatura do ar de regeneração pode ser controlada e monitorada. O sistema proposto permite que o queimador a gás funcione em regime automático, sem a presença de um operador, permitindo otimizar o processo.

**Palavras-chave:** automação, controlador de fluxo, microcontrolador

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas convencionais de refrigeração baseados na compressão de vapor não são capazes de lidar com os padrões exigidos pela umidade atual de produção e armazenamento de produtos sensíveis à umidade. Atualmente, a melhor solução técnica para o controle de umidade, temperatura e vazão do ar de processo é dada pelos sistemas de condicionamento de ar dessecante, que são largamente difundidas entre os processos industriais.

Sistemas de resfriamento dessecante são baseados nos princípios de desumidificação dessecante e resfriamento evaporativo. Um sistema de desumidificação dessecante é um dispositivo que contém um adsorvente para adsorção e dessorção de umidade do ar em processo e do ar de regeneração, respectivamente (MEDEIROS *et al*, 2009). Neste sistema, deve conter, obrigatoriamente, um trocador de calor após um rotor dessecante, já que o calor liberado na seção de regeneração inviabiliza a utilização do ar sem que seja promovida uma diminuição de sua temperatura antes de entrar no resfriador evaporativo. Geralmente utiliza queimadores a gás natural para aquecer o ar de regeneração que desumidifica o rotor dessecante.

Um sistema de resfriamento dessecante vem sendo investigado por pesquisadores da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, no Laboratório de Energia Solar - LES. Esse sistema foi montado com queimadores a gás natural veicular que são operados manualmente, gerando perda de tempo nos ajuste da temperatura do ar de regeneração, e oscilações relevantes na temperatura. Também, não há um sistema ou dispositivo de segurança, caso a chama do queimador apague, o gás continuará sendo liberado, se espalhando rapidamente ao ambiente podendo causar acidentes. Tendo em vista o problema e as variáveis em questão, é proposta uma solução de controle automático da temperatura do ar de regeneração a partir de um microcontrolador, no intuito de garantir um controle eficaz e seguro. Foi feito o diagrama de bloco do sistema de aquecimento para análise e desenvolvimento do sistema de controle.

Este trabalho tem como objetivo solucionar o problema de controle manual da temperatura do ar de regeneração do rotor dessecante, a fim de garantir a integridade e funcionalidade do sistema não convencional de refrigeração. Através de um sistema de controle automatizado que utiliza o microcontrolador PIC 16F877A, sensores e uma válvula. Foi feita uma análise das variáveis a serem controladas de forma a obter o resultado mais rentável, ou seja, mais econômico e que ao mesmo tempo atenda as necessidades de segurança e funcionamento. Para isso são estudados tipos de sensores a serem usados assim como os atuadores.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistema de Refrigeração Evaporativo com Rotor Dessecante

O sistema de resfriamento dessecante utilizado neste trabalho é composto por, resfriadores evaporativos, aquecedor, rotor dessecante e trocador de calor, conforme esquema da Figura 1.

O ar segue os seguintes processos: (1-2) na entrada do sistema o ar é succionado diretamente da atmosfera para o rotor dessecante. O ar do processo é desumidificado e aquecido. O aquecimento é devido ao processo de adsorção ser exotérmico. (2-3) O ar é conduzido ao rotor sensível (trocador de calor) liberando grande parte do calor absorvido no processo de adsorção. (3-4) Ao entrar no resfriador evaporativo o ar receberá água pulverizada a alta pressão através de vários bicos. O ar, ao absorver a água, irá ceder calor sensível para que a água mude de fase e evapore, ou seja, absorva calor latente, assim a temperatura do ar diminui e este é conduzido ao ambiente a ser condicionado. (5-6) O ar de retorno succionado do ambiente climatizado com temperatura e umidade absoluta menor que a do ambiente externo, passa por um resfriador evaporativo secundário, onde sua temperatura é reduzida. (6-7) Logo em seguida, passa pelo trocador de calor onde sairá quente e úmido, depois é lançado na atmosfera por meio de um ventilador. (8-9) O ar atmosférico é aquecido por meio da queima direta de GNV, obtendo uma mistura de gases com baixa umidade relativa e alta temperatura. (9-10) Na saída do rotor dessecante o ar sai com alta umidade absoluta e temperatura acima da temperatura do ambiente externo e assim, é lançado na atmosfera por meio de um ventilador.

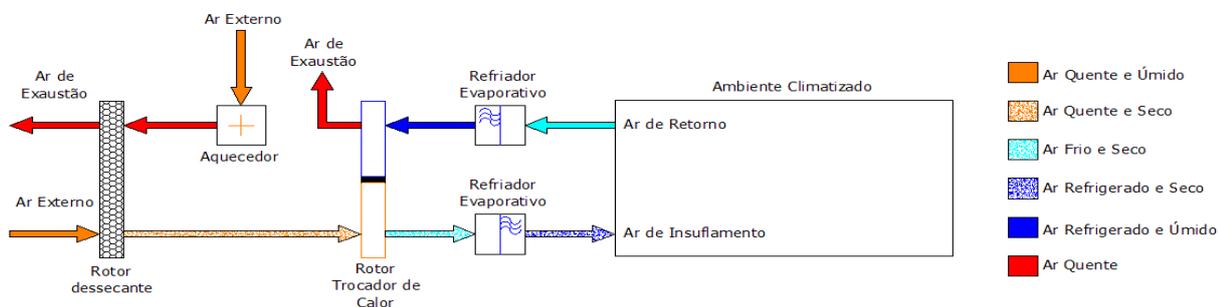


Figura 1 – Esquema do sistema de resfriamento dessecante montado pelo LES/UFPB.

### 2.2 Sistemas de Controle

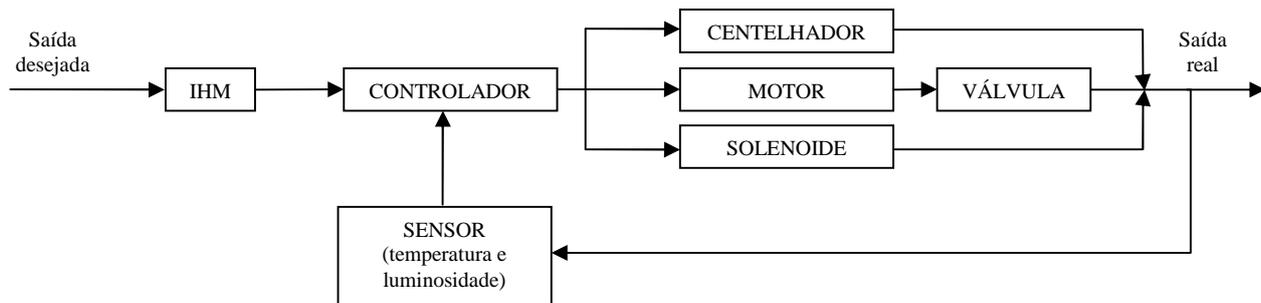
O controle automático representa um papel vital no avanço da engenharia e da ciência propiciando meios para atingir desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, bem como melhoria na qualidade e diminuição do custo de produção, aumentando a taxa de produção, operações manuais repetitivas etc. (OGATA, 1982).

O primeiro controlador automático usado em um processo industrial é geralmente aceito como sendo o regulador de esferas de James Watt, desenvolvido em 1769, que construiu um controlador centrífugo para controlar a velocidade de máquinas a vapor. Este controle é chamado frequentemente de automação. Dorf e Bishop (2001, 9 p.) definem como uma tecnologia que utiliza comandos programados para operar um dado processo, combinados com retroação de informação para determinar que os comandos sejam executados corretamente.

Muitos controladores incluem servomecanismos como parte integral. Servomecanismo é um sistema de controle realimentado no qual a saída é alguma posição mecânica, velocidade ou aceleração. Sistemas realimentados são tendem a manter uma relação prescrita entre a saída e a entrada de referência, comparando-a e utilizando a diferença como um meio de controle (OGATA, 1982).

Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou fechada. Malha aberta: o sistema controla diretamente a variável do processo sem uma referência da saída; Malha fechada: o controle é feito por meio da comparação do sinal de saída com o sinal desejado. O sistema de controle em malha fechada, frequentemente, usa uma função de uma relação preestabelecida entre a saída e a entrada para controlar o processo. Quase sempre a diferença entre a saída do processo e a referência de entrada é amplificada e usada para controlar o processo de modo que a diferença seja continuamente reduzida (DORF e BISHOP, 2001).

Geralmente, os sistemas são representados em diagramas de blocos em sequência lógica de instruções de comandos, o que facilita na análise e automatização do mesmo. O diagrama de bloco do sistema em questão é esquematizado na Figura 2.



**Figura 2 – Diagrama de bloco do sistema de controle do queimador.**

O bloco IHM (Interface Homem-Máquina) corresponde ao teclado matricial 4x4 e ao display de LCD; o CONTROLADOR ao microcontrolador PIC 16F877A; o CENTELHADOR ao atuador que acende a chama do queimador; o SOLENOIDE à trava eletromagnética; MOTOR ao motor de passo que atua na válvula reguladora de fluxo do gás natural veicular utilizado no queimador. O último bloco SENSOR corresponde aos sensores de temperatura e luminosidade. A saída desejada é a temperatura que se deseja obter com o queimador e a saída real é a temperatura real interna do queimador.

Cada bloco dos atuadores (centelhador, motor e solenoide) há um circuito eletrônico de potência (drive de potência) para o seu acionamento. Os blocos IHM e CONTROLADOR fazem parte da mesma estrutura física, ou seja, a placa de desenvolvimento ACEPIC 40 V1.1 e os demais correspondem ao seu próprio dispositivo físico.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Sensores

Foram utilizados vários circuitos dentre os quais estão as fontes e circuitos de acionamento de potência. Quanto às fontes, foi utilizada uma fonte de tensão regulável de 3 a 32V com corrente máxima de 3A ajustada em 24V para a alimentação do motor de passo e de seu próprio drive de potência; uma fonte de tensão de 12V regulada com corrente máxima de 1,5A para alimentação dos circuitos de acionamento do centelhador, do solenóide e do cooler de ventilação e; uma fonte de tensão de 12V regulada com capacidade de até 1A para alimentação da placa de desenvolvimento ACEPIC 40 V1.1 e todos os dispositivos a ele acoplados.

Os sensores de temperatura e luminosidade utilizados foram, respectivamente: o Negative Temperature Coefficient (NTC) um tipo termistor onde sua resistência varia em função da variação de temperatura. Usado extensivamente em vasta gama de aplicações, tais como na medida e no controle da temperatura, na compensação da temperatura, na supressão de surtos e na medida do fluxo de líquido (LAMAS, 2010). E o Light Dependent Resistor (LDR) resistor dependente de luz, que é uma resistência que tem seu valor modificado de acordo com a alteração de incidência luminosa em sua face de atuação.

Haag *et al* (2003) sugerem a equação de Steinhart-Hart para descrever a curva característica do NTC, operando na faixa de -50°C a +150°C com precisão de  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ . Porém, para fins deste trabalho, esta precisão não demonstrou um ganho efetivo na exatidão dos resultados finais quando comparados com o da equação modificada de Steinhart-Hart utilizada por Lopes (2006), Viana (2010) e Guadagnini e Barlette (2005).

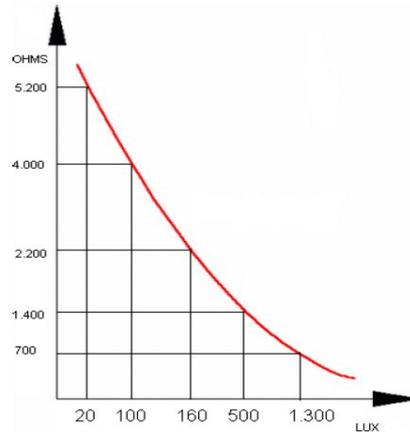
Com isso, Os valores de resistência do NTC foram calculados com base na equação modificada de Steinhart-Hart [Eq.01]:

$$R = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad [\text{Eq.01}]$$

em que R é a resistência elétrica do termistor à temperatura absoluta T, R<sub>0</sub> a resistência à temperatura T<sub>0</sub> e β é uma constante característica do termistor.

A faixa de temperatura utilizada para leitura foi de 30°C a 90°C.

Para o sensor de LDR a sua resistência varia de acordo com a curva característica da Figura 3.



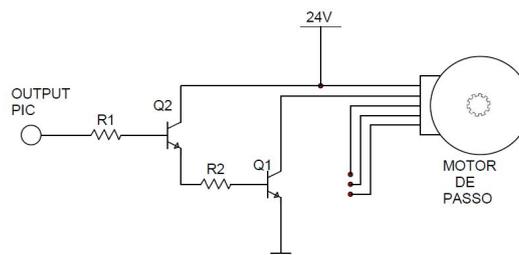
**Figura 3 – Curva característica do LDR. (Fonte: NEGRELLI, p18, 2006)**

Os circuitos de leitura utilizados nestes dois sensores foram dois divisores de tensão, com o propósito de gerar uma variação de tensão na faixa de 0V a 5V para leitura do sinal do mesmo pelo conversor analógico-digital (A/D) do microcontrolador PIC 16F877A.

### 3.2 Motor de Passo

O motor de passo é constituído de diversas bobinas que são energizadas na forma de pulsos elétricos em uma determinada sequência para desempenhar sua função de rotação. A medida que as bobinas vão recebendo esses pulsos elétricos, o eixo do motor gira se deslocando em pequenos ângulos pré-determinados chamados de passo e logo após mantendo-se nesta posição até a energização da próxima bobina. Para cada pulso recebido por cada bobina, o motor realiza um movimento de passo. Caso a sequência de pulsos das bobinas seja interrompida o motor se mantém na última posição de giro até que a sequência reinicie. Este ângulo de giro que o eixo realiza é um deslocamento angular muito pequeno de forma que para se conseguir uma volta completa do eixo é necessária uma grande sequência de passos.

Neste trabalho, foi utilizado o motor de passo a fim de controlar a válvula reguladora de fluxo, responsável pela liberação ou interrupção do fluxo de GNV. Para controlar o motor de passo através do microcontrolador PIC utilizou um drive de potência, ou seja, um circuito eletrônico que amplifica o sinal enviado pelo PIC e chaveia a alimentação das bobinas. Esse drive é apresentado na Figura 4, onde Q1 e Q2 são dois transistores NPN.

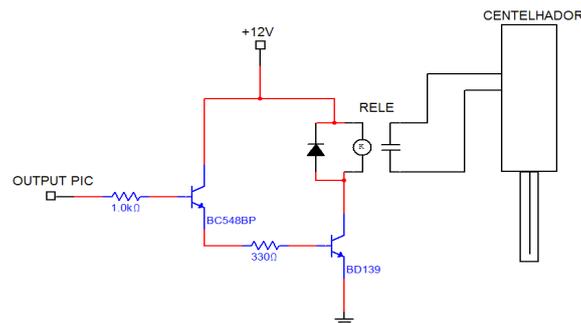


**Figura 4 - Circuito de acionamento do motor de passo.**

Existe um circuito deste para cada bobina a ser alimentada. No caso do motor utilizado são quatro fios onde cada um é uma bobina. O microcontrolador foi programado para enviar um sinal de 5V para cada saída por vez, em ciclo.

### 3.3 Centelhador e Solenoide

O centelhador é um dispositivo que provoca uma pequena descarga elétrica de um ponto a outro de sua estrutura. Essa descarga elétrica semelhante a um pequeno raio, quando entra em contato com o gás inerte no ambiente em questão, provoca sua combustão instantânea. O dispositivo utilizado nesse trabalho é um acendedor usualmente empregado na cozinha para acender as bocas do fogão. Feitas as devidas adaptações para o controle foi possível controlá-lo com o microcontrolador, utilizando-se do circuito da Figura 5.



**Figura 5 - Circuito de acionamento do centelhador.**

O circuito da Figura 6 amplifica o sinal enviado pelo microcontrolador fazendo assim o acionamento do rele. Ao contato do mesmo foram colocados dois fios que fecham o circuito do centelhador e que é acionado após o fechamento do contato, provocando assim a centelha. Esse centelhador é montado em um atuador de deslocamento linear eletromagnético (solenoide) responsável pelo deslocamento de avanço e recuo do centelhador na ignição do queimador. O circuito de acionamento do solenoide utilizado é semelhante ao do centelhador.

### 3.4 Microcontrolador PIC 16F877A

O microcontrolador utilizado neste projeto foi o PIC 16F877A de 40 pinos, tendo cinco portas A, B, C, D e E, tendo cada, uma quantidade de pinos que podem ser configuráveis como entradas ou saídas. Os pinos utilizados neste projeto estão relacionados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Entradas e saídas de sensores e atuadores**

Pino	Porta	Nome do pino	Função
2	A	AN0	Entrada analogica
3	A	AN1	Entrada analogica
4	A	RA2	Saida digital
5	A	RA3	Saida digital
15	C	RC0	Saida digital
16	C	RC1	Saida digital
17	C	RC2	Saida digital
24	C	RC5	Saida digital

As entradas analógicas AN0 e AN1 são conversores A/D de 8 bits, empregadas na leitura dos sinais do sensor de temperatura e sensor de chamas. As saídas RA2 e RA3 acionam o centelhador e o solenoide. Por fim as saídas RC0, RC1, RC2 E RC5 estão empregadas para os pulsos das bobinas do motor de passo. As outras portas são empregadas para o funcionamento de outros periféricos, tais como: display de LCD e teclado.

### 3.5 A IHM

A interface homem-máquina ou de acesso é formada pelo teclado matricial 4x4 e o display de LCD. O teclado matricial consta de uma matriz de contatos formada por botões. Esses botões são ligados a porta B que possui 8 pinos configuráveis.

O Display utilizado neste projeto é do tipo LCD (Display de Cristal Líquido) de 16x2, ou seja, 2 linhas de 16 caracteres cada. Esse dispositivo utiliza-se das portas D e E tendo respectivamente 8 e 3 pinos para seu funcionamento. A porta D é utilizada para a transição dos dados e a porta E as permissões de escrita do LCD.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADO

A montagem do sistema de controle automatizado do queimador é apresentada na Figura 6.

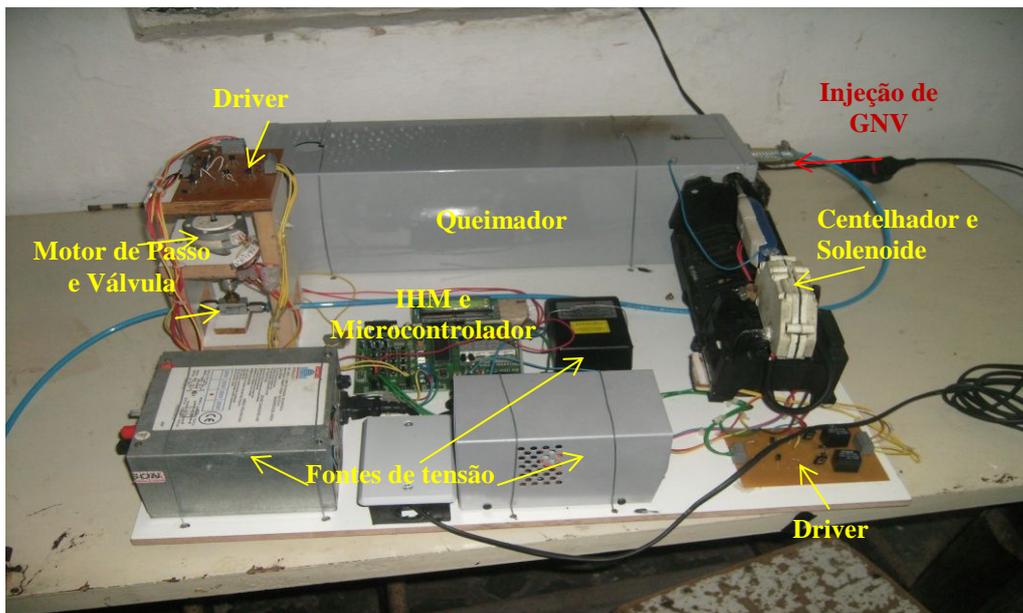


Figura 6 – Montagem do queimador microcontrolado.

O sistema microcontrolado tem seu início na IHM onde é introduzido o valor de temperatura desejada ( $T_{ref}$ ), também chamada de temperatura de referência. Para a descrição do funcionamento, será adotado um valor de  $T_{ref} = 70^{\circ}\text{C}$  e a temperatura ambiente considerada é de  $33^{\circ}\text{C}$ . O processo se divide em duas etapas: (1<sup>a</sup>) acender a chama do queimador e; (2<sup>a</sup>) controlar a temperatura do queimado.

Antes de iniciar o processo o sistema deve ser configurado. Tendo duas opções possíveis:

- Auto reinicialização – se houver ausência de chamas durante a 2<sup>a</sup> etapa do processo o próprio sistema se encarrega de reiniciar as etapas. Por questões de segurança essa opção só permite que o sistema reinicie automaticamente por três vezes, a partir da quarta tentativa o sistema precisa ser reiniciado manualmente. Tal configuração foi feita por questões de segurança;
- Modo manual – o sistema precisa ser reiniciado manualmente e voltará a seu funcionamento normal apenas se o botão de *reset* for acionado.

### 4.1 Primeira etapa

O motor é acionado para abrir a válvula reguladora de fluxo, apenas o suficiente para acender uma tocha inicial. Logo em seguida, o solenoide é acionado avançando o centelhado. Ao fim de curso do avanço, o centelhador é acionado gerando uma centelha, que servirá de ignição à combustão do gás natural veicular. Caso o gás entre em combustão, a radiação provocada pela chama sensibilizará o sensor de chamas e informará ao microcontrolador que a chama foi acesa e o solenoide é acionado recuando o centelhador para que a chama não o danifique. Se o sensor de chamas não for sensibilizado na primeira tentativa, o centelhador será novamente acionado e assim por diante totalizando três tentativas, caso a chama não seja

detectada o microcontrolador aciona o motor para fechar a válvula e será pedido um sinal de reset do sistema. Isso ocorre por questões de segurança, pois não há um sensor que indique se o cilindro contém gás ou não.

Considerando que houve acendimento da chama, o sistema passa para a segunda etapa.

## 4.2 Segunda etapa

Nesta etapa o microcontrolador faz a leitura do sensor de temperatura para compará-la com a temperatura de referência. Se a temperatura medida for menor que  $T_{ref}$  o motor é acionado abrindo a válvula, porém se a temperatura de medida for maior do que  $T_{ref}$  o motor é fecha a válvula, de modo que apenas na igualdade de ambas o motor se manterá estático.

O sistema é programado para uma tolerância de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Assim, entre os valores máximo e mínimo o motor não é acionado. Uma vez estabelecido a igualdade entre a temperatura de referencia e a temperatura medida, o motor de passo só atua fora da faixa de tolerância de modo a restaurar a igualdade. Caso seja detectada a ausência de chama, através do sensor de luminosidade, o controlador fecha a válvula automaticamente.

O valor da temperatura de referência pode ser modificado a qualquer instante, de modo que quando inserido o sistema corrige automaticamente sem necessidade de reinicialização.

A temperatura máxima suportada pelo controle é de  $90^\circ\text{C}$  por questões de limitação do próprio projeto, que é experimental, mas o mesmo sistema pode ser utilizado para qualquer variação de temperatura, salvo o ajuste de sensores e conversores.

O resultado obtido através do sistema de controle automatizado do queimador a GNV pode ser visualizado na Figura 7.

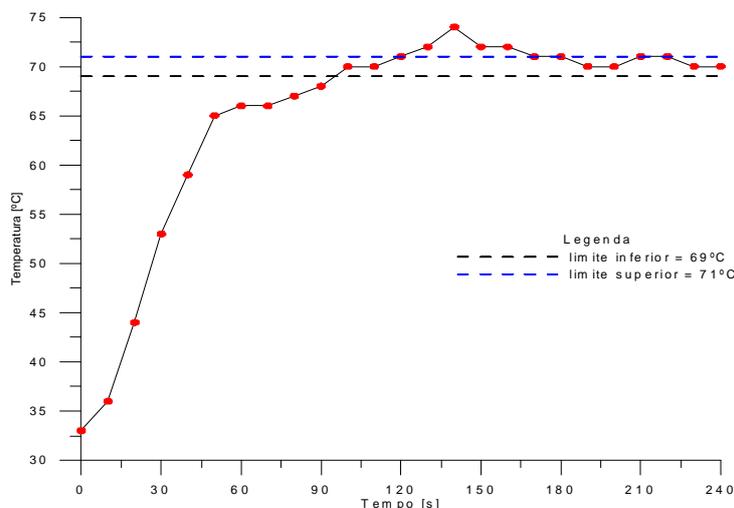


Figura 7 – Temperatura de saída do sistema de controle do queimador.

Conforme pode ser observado, nos instantes iniciais, logo após a ignição, a temperatura aumenta rapidamente para a temperatura desejada. Devido à inércia do processo, a temperatura ultrapassa a faixa de tolerância, Mas, logo é controlada e passa a ficar dentro da faixa estabelecida.

## 5 DISCURSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de controle proposto da temperatura do ar de regeneração permite que o queimador opere em regime automático sem a presença de um operador e sem variações significativas no valor pré-determinado da temperatura do ar durante o ciclo de refrigeração, como redução do tempo de ajuste da temperatura do ar de regeneração além de garantir a segurança do operador.

O fato do ciclo de processamento das informações relativas à temperatura ser muito mais rápida que a inércia do sistema, garante um controle eficaz e que o afastamento da temperatura do sistema em relação à de referência não seja significativo que possa comprometer o sistema de refrigeração.

## REFERÊNCIAS

DORF, R.C.; BISHOP, R.H. **Sistemas de controle modernos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2001.

GUADAGNINI, P.H. e BARLETTE, V.E. **Um termômetro eletrônico de leitura direta com termistor**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 3, p. 369-375, 2005.

HAAG, R.; OLIVEIRA, L.M.; VEIT, E.A. **Coleta automática e interpretação de dados em um laboratório didático de termologia**. Textos de apoio ao Professor de Física, v.16 n.2, 2005.

LAMAS, W.Q. **Sensores térmicos NTC e PTC - Parte 1**. Disponível em:  
<<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/309>> Acesso em: 13 jul 2010.

LOPES, B.M.M.I. **Termometria através do computador**. 2006. 87p. Projeto de instrumentação para o ensino (Licenciatura Noturna em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MEDEIROS, J.M.; SILVA, M.G.; SANTOS, J.C.; GURGEL, J.M. Experimental investigation and simulation study on a desiccant air-conditioning system in Brazil. *In*: 20TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – COBEM, 2009, Gramado. **Anais ...** Gramado: 1 CD-ROM.

NEGRELLI, T. **Dispositivo de controle automático de iluminação**. 2006. 56p. Projeto de Graduação - Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES, 2006.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro: Editora Prentice/Hall do Brasil, 1982.

VIANA, R.L. **Aula 18 - Aplicações de circuitos elétricos**. Disponível em:  
<[http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/a\\_18.htm](http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/a_18.htm)> Acesso em: 13 jul 2010.