

## LABORATÓRIO REMOTO DE AUTOMAÇÃO PREDIAL

**Ronaldo de Jesus Santos** - ronaldojs@unb.br  
**Adolfo Bauchspiess** - adolfobs@ene.unb.br  
**Geovany Araújo Borges** - gaborges@ene.unb.br

Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes - <http://www.lavsi.ene.unb.br>  
Grupo de Instrumentação, Controle e Automação (GICA)  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade de Brasília  
Caixa Postal 04591  
70910-970 - Brasília – DF

**Resumo:** *Este artigo apresenta um laboratório remoto de automação predial o qual representa um conjunto de escritórios composto por cinco salas, sendo que cada uma delas possui uma porta e uma janela. Este ambiente predial tem dois aparelhos de ar-condicionado os quais estão estrategicamente posicionados de forma a atender todo o ambiente. Construiu-se uma maquete inspirada no ambiente mencionado, de forma a reproduzir problemas inerentes ao controle de sistemas prediais reais. Levando em conta que é mais simples a geração de calor que o resfriamento, optou-se pelo uso de secadores de cabelo como fontes de calor e a conseqüente inversão do sinal de controle. Em todas as salas foram instalados sensores de temperatura, assim como nos dois corredores externos ao conjunto de salas. Estes corredores foram concebidos no sentido de se recriar situações típicas em automação predial, como a incidência diferenciada do sol nas salas ao longo do dia. Desta forma podemos simular temperaturas externas diferentes para cada parede dependendo da posição do sol. O laboratório foi projetado de forma a reproduzir de forma fiel diversas situações em um ambiente real. Na maquete foram instaladas micro-chaves de monitoração de abertura de portas e janelas, que são monitoradas por microcontroladores. Com este laboratório remoto, alunos, professores e pesquisadores podem não apenas desenvolver e testar estratégias de automação e controle, e.g., visando racionalização de energia, como também acompanhar sua execução em tempo real. A contribuição principal consiste na possibilidade de se verificar estratégias de automação predial, sem as restrições usuais de ambientes prediais.*

**Palavras-chave:** *Sistemas térmicos, Automação, Controle por microprocessador, Laboratório remoto.*

**Número Cobenge 2004:** 441

## 1. INTRODUÇÃO

Durante a vida profissional, a atualização constante de conhecimento tem se tornando um paradigma para todas as profissões. Métodos convencionais de ensino e aprendizado são baseados em palestras, conferências e leitura de publicações. A aplicação exclusiva desta metodologia tradicional, especialmente em programas de formação de nível superior, é lenta e cara gerando conseqüentemente certa ineficiência diante do universo de informações necessárias ao atual contexto pedagógico (Belousov, 2001). Novas metodologias e mídias não convencionais ocupam cada vez mais espaço no atual processo de ensino, especialmente nas universidades. São exemplos de ferramentas teleconferências, simuladores, laboratórios remotos e programas educacionais.

No caso da engenharia, experimentação remota tornou-se recentemente uma realidade para estudantes, professores e pesquisadores. Além de permitir a estes uma maior interação com o laboratório, tendo em vista que com o advento da Internet tornou-se possível à disponibilidade deste por um período de até 24 horas por dia, devemos considerar também a economia de recursos alocados para este tipo de prática, já que um único experimento pode ser compartilhado por dezenas de usuários, dependendo do propósito ao qual foi construído.

Diferentemente do laboratório virtual, onde todo processo se resume a uma simulação em software, o laboratório remoto permite a interação com processos reais permitindo ao usuário a análise de problemas práticos “do mundo real” como ruídos, a não-linearidade de processos, entre outros, os quais usualmente não são tratados em teoria, mas que na prática devem ser considerados devido a sua influência nos resultados esperados.

Alguns grupos de pesquisa já utilizam experimentos remotos como suporte ao aprendizado de técnicas de controle de processos (Röring e Jochheim, 1999) (Guimarães *et al.*, 2002). No entanto, não é de conhecimento dos autores a existência de laboratórios remotos de automação predial. Esta área de aplicação da engenharia de controle tem recebido grandes investimentos por parte de empresas como a Siemens, mas pouco tem sido aplicado de técnicas de controle de processos. No objetivo de incrementar o currículo de engenheiros de Mecatrônica e de Engenharia Elétrica, este trabalho tem como objetivo principal a implementação de um laboratório de automação predial remoto, através do qual poderão ser projetados e implementados controladores baseados nas mais diversas estratégias de controle.

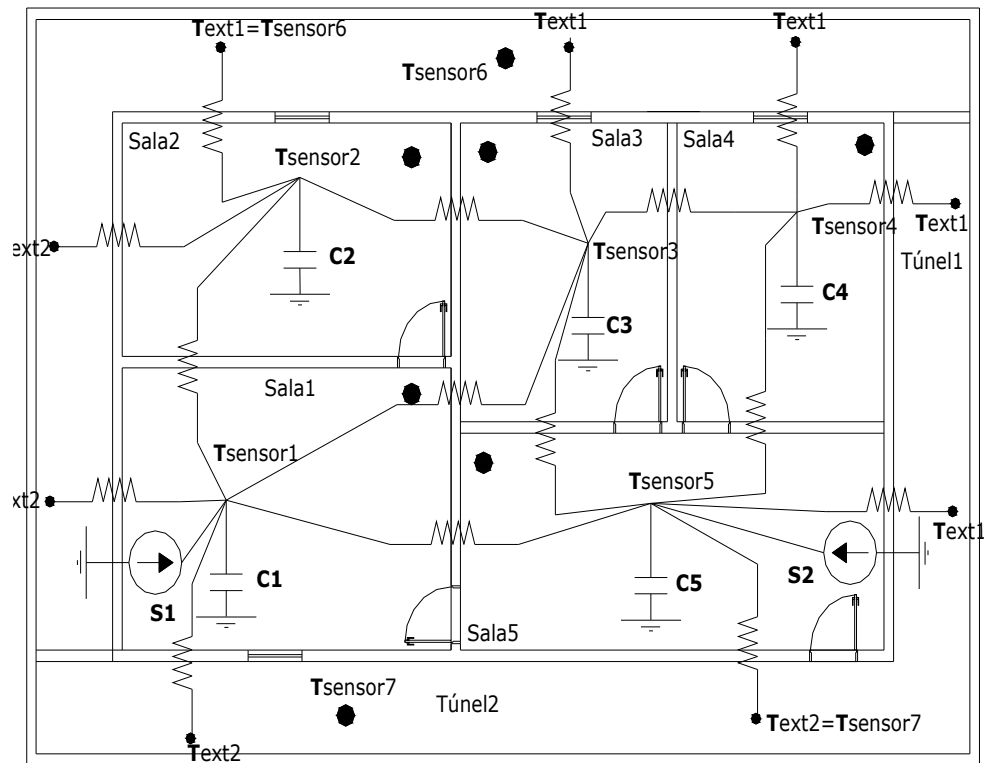
## 2. MODELAGEM SIMPLIFICADA DE SISTEMAS TÉRMICOS

Sistemas térmicos são aqueles nos quais as variáveis estão relacionadas a armazenamento e transporte (fluxo) de calor. Nestes sistemas, a transferência de calor pode ocorrer de três formas distintas: condução, convecção e radiação. Na prática, apenas uma dessas três formas predomina, mas em geral são consideradas duas formas de transferência de calor, desprezando-se o efeito da radiação.

Processos térmicos são inerentemente sistemas de parâmetros distribuídos, ou seja, suas variáveis mudam de valor conforme a localização e distância das mesmas no processo. Para simplificar o problema, admitimos que o sistema térmico pode ser controlado com precisão usando apenas alguns pontos de medição. Indo mais longe, com propósitos de simulação, o sistema poderia ser aproximado por parâmetros concentrados representados, como ilustrado na Figura 1.

A Figura 2 mostra uma foto do protótipo de sistema térmico usado neste trabalho, que representa um típico conjunto de escritórios. Este ambiente possui cinco salas com portas e janelas que podem ser abertas ou fechadas, simulando a operação normal de um ambiente de escritório. Duas fontes de aquecimento, formadas por secadores de cabelo, com potência nominal de 1kW cada, são usadas para atuar no do processo. A ação do fluxo de aquecimento é quase a mesma que no caso do resfriamento; muda-se somente o sinal de controle. Assim, é

muito mais fácil sua implementação no caso de protótipos em escala reduzida do o uso de unidades de resfriamento.



**Figura**

Sistema com parâmetros concentrados.

1 -



**Figura 2** - Protótipo do sistema térmico.

O protótipo consiste em três grandes áreas. A primeira é representada por duas salas adjacentes (salas 1 e 2). A maior (sala 1) recebe calor da fonte D1. A segunda área é composta

por duas salas em meia parede (salas 3 e 4) e um corredor (sala 5), onde está a fonte de calor D2. As duas primeiras áreas representam a parte principal do protótipo. A terceira área é constituída de dois túneis (T1 e T2) nos quais bolsas de gelo podem ser colocadas, a fim de estabelecer diferentes temperaturas na entrada dos aquecedores D1 e D2. Isto simula o efeito do sol em um lado e da sombra em outro lado do prédio, o qual pode afetar significativamente a eficiência energética do sistema. Em cada sala, corredor e túnel instalamos um sensor de temperatura afim de medi-las durante a evolução do controle do sistema.

Um modelo análogo ao processo térmico, linear e invariante no tempo, é dado por um circuito elétrico composto de capacitores e resistores. Nesta analogia o fluxo de calor equivale à corrente elétrica e a temperatura equivale à tensão elétrica.

A constante de tempo de cada sala está relacionada ao valor da resistência térmica  $R$  de cada parede e a capacitância térmica  $C$  de cada sala. Em um sistema que envolve capacitância e resistência em série, a constante de tempo é tida como  $RC$ , e pode ser encontrada experimentalmente isolando-se as salas envolvidas e medindo o intervalo de tempo necessário para que seja atingida 63,21% da resposta ao degrau (modelo de primeira ordem).

Denominado  $q$  a variável de entrada fluxo de calor e  $T$  a variável de saída de temperatura, o modelo de uma determinada sala pode ser representado pela seguinte função de transferência:

$$\frac{T(s)}{q(s)} = \frac{K}{RCs+1} \quad (1)$$

Nesta equação,  $s$  é a variável de Laplace, e  $q(s)$  e  $T(s)$  são as transformadas de Laplace do fluxo de calor e da temperatura ambiente, respectivamente (Ogata, 1997).

### **3. CIRCUITOS DE MEDIÇÃO, PROCESSAMENTO E COMUNICAÇÃO**

#### **3.1 Unidade de processamento**

O sistema apresentado é composto de unidades de processamento baseadas no microcontrolador PIC18F252 da Microchip™. Este dispositivo possui as seguintes características: CPU RISC com arquitetura Harvard; 32 kbytes de memória Flash; memória EEPROM de 256 bytes; 15 kbytes de memória RAM; Duas saídas PWM; mais de 10 MIPS; Multiplicador 8x8 bits implementado em hardware; 14 interrupções disponíveis com níveis de prioridade diferenciados; 4 temporizadores (dois de 8 bits e um de 16 bits); 5 canais de conversão A/D (com 10 bits de resolução); 3 pinos de interrupção externos; comunicação serial: RS485 e RS232 de forma síncrona e assíncrona (Souza,2001).

#### **3.2. Sensor de medição de temperatura**

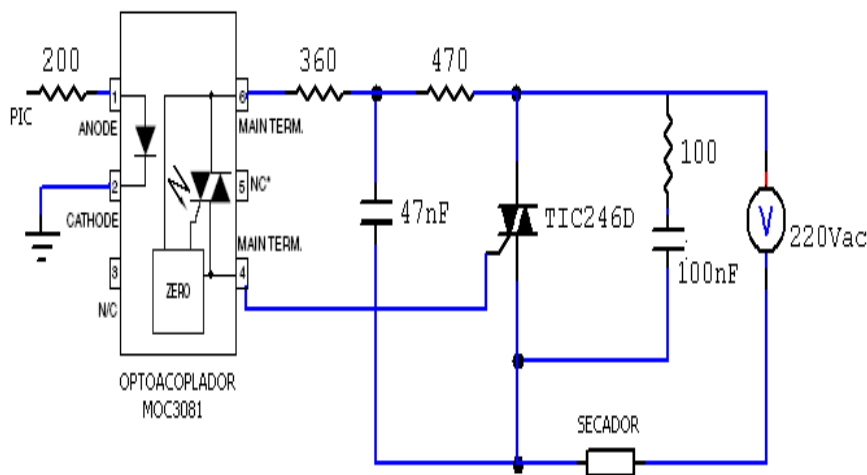
O sensor de temperatura LM35 usado neste projeto gera uma tensão de saída linear proporcional à temperatura medida, em graus Celsius, sem necessidade de calibração (10mV/°C). Ele possui precisão de 0,5°C a 25°C e baixa corrente de dreno, próxima de 60mA, gerando baixo auto-aquecimento. A configuração empregada permite uma faixa de medição de 2°C a 150°C. Esta representa a melhor configuração de medição para nosso sistema já que este não está sujeito a variações negativas de temperatura. Para a medição de temperatura foram usados os conversores A/D de dez bits do PIC18F252.

#### **3.3 Acionamento das fontes de calor**

O acionamento das fontes de calor é feita por modulação em largura de pulso (PWM, do inglês). Apesar da disponibilidade no microcontrolador de periféricos para geração de PWM, estes recursos não foram empregados. O objetivo em médio prazo do projeto é seu uso com

aparelhos de ar-condicionado, cujos dispositivos de controle interno não devem permitir acionamento por ângulo de disparo sobre a alimentação de 220V/60Hz. Assim, decidiu-se usar modulação PWM, com período de portadora elevado (e.g., 5 minutos), e acionar o ar-condicionado por um certo tempo (e.g., 1 minuto, resultando em 20% de ciclo de trabalho). No caso das fontes de calor da maquete, períodos de portadora menores foram gerados. No entanto, pouco deve ser modificado no circuito de acionamento para a ativação de aparelhos de ar-condicionado.

O circuito de potência utiliza um TRIAC para o acionamento de cada fonte de calor. Estas são acionadas através de sinal PWM do microcontrolador, cadenciado por software, uma vez que os periféricos internos não permitem frequências de portadora muito baixas (muito abaixo de 60Hz). Este circuito garante o isolamento elétrico entre a carga de potência e placa de controle por meio de optoacoplador. Além disso, o optoacoplador possui dispositivo detector de passagem por zero. Um snubber foi adicionado de modo a evitar o regatilhamento TRIAC por meio da derivada no tempo da tensão entre seus terminais (ver Figura 4):

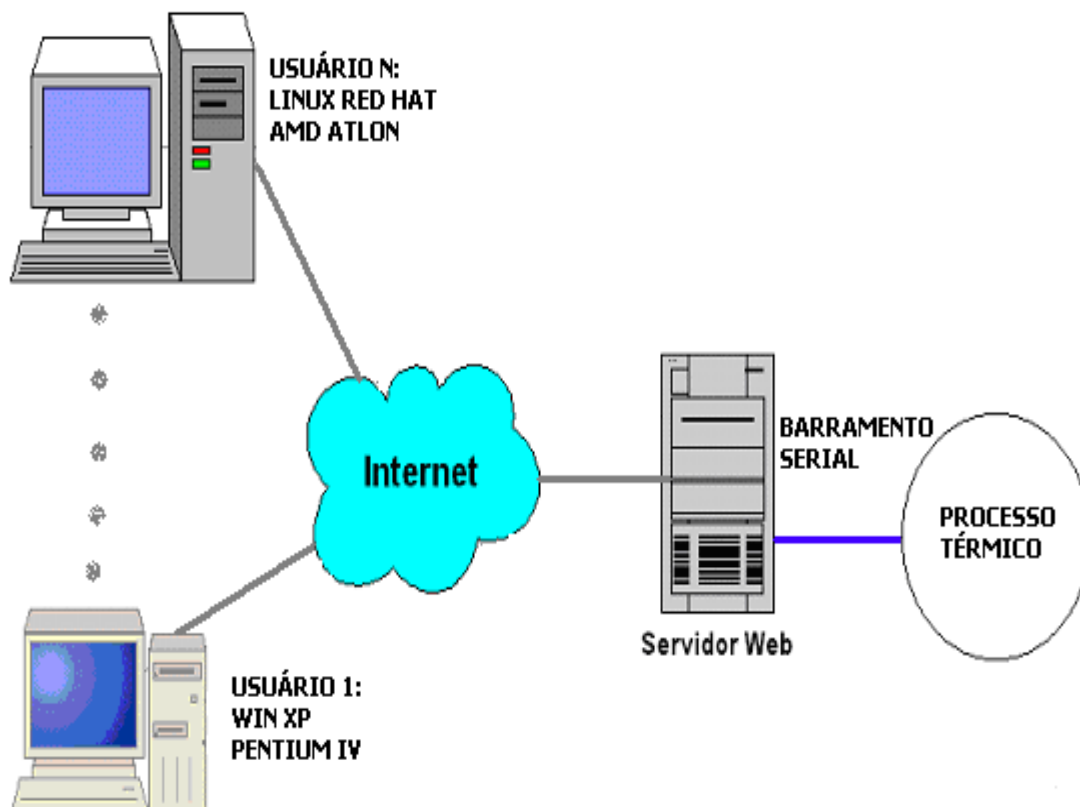


**Figura 3** – Circuito eletrônico do sistema de potência.

### 3.4. Comunicação

Sistemas remotos podem ter um ou mais usuários on-line, monitorando ou configurando o mesmo módulo a qualquer instante. Os diferentes tipos de processos a serem interconectados mostram a necessidade de considerar uma arquitetura remota portátil, ou seja, compatível com diferentes plataformas de hardware. Este modelo usa um servidor *Web*. Obviamente, o número de processos é limitado devido à capacidade do servidor e à largura de banda da rede.

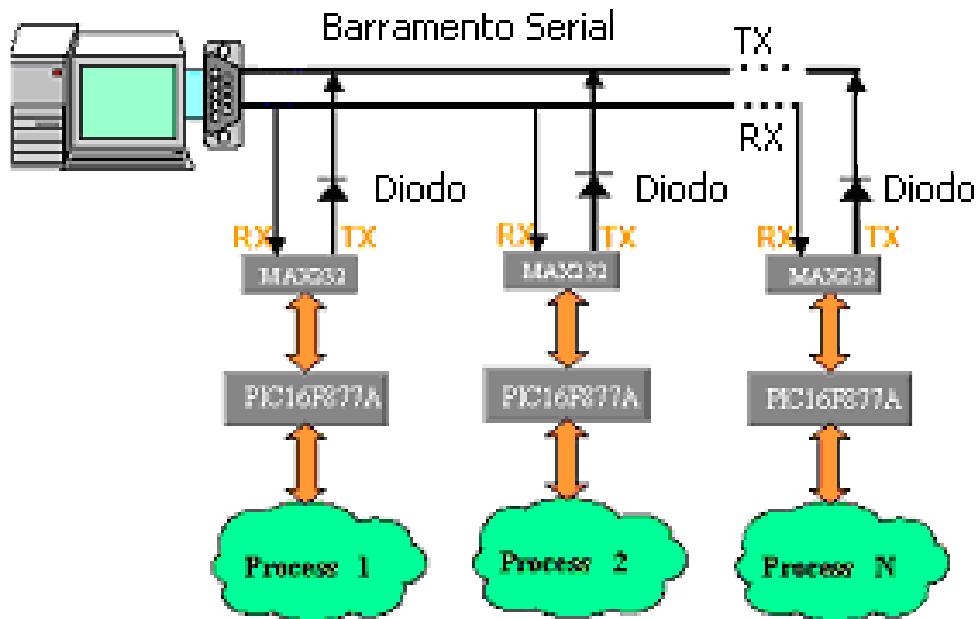
Para a implementação do sistema remoto, dois subsistemas tiveram de ser implementados: um deles é o de comunicação entre o computador que publica a página na internet e os processos; o outro cuida da interação com os usuários remotos. Estes subsistemas estão representados na Figura 4.



**Figura 4** - Arquitetura de comunicação para o supervisório remoto.

Para estabelecer a comunicação entre o servidor e os microcontroladores, foi utilizada uma arquitetura bastante incomum para este fim, haja vista que a comunicação serial RS-232 define uma comunicação ponto a ponto e não multiponto (Zelenovsky, 2001). Este sistema foi adotado em função da disponibilidade de porta serial no hardware do microcontrolador usado no projeto. De qualquer forma é possível construir um barramento RS-232 no qual alguns dispositivos podem ser conectados, e então dividir um mesmo conjunto de fios para transmitir ou receber dados. Esta implementação é factível desde que se tenha somente um dispositivo mestre (supervisório PC), o qual pode transmitir e também fazer solicitações de dados a outros dispositivos (microcontroladores PIC). É necessário que cada dispositivo escravo tenha um diodo na linha de transmissão. Este dispositivo eletrônico é necessário para uma operação correta da interface padrão RS-232, a qual define a tensão de  $-15$  volts para a linha de transmissão quando inativa. Assim, obteve-se um barramento multiponto de baixo custo (Figura 5). A velocidade máxima de comunicação ficará limitada pela capacitância da junção de cada diodo em polarização reversa, bem como pelos tempos de resposta de cada um.

No caso da comunicação entre usuário remoto e o servidor a arquitetura de comunicação baseia-se no modelo cliente/servidor e foi desenvolvida em Java. Desta maneira o operador pode acessar o sistema supervisório usando qualquer sistema operacional que suporta um browser web com a máquina virtual Java. Todos os web browsers relativamente recentes vem com esta máquina virtual.



**Figura 5** - Comunicação serial multiponto usando RS232C.

A linguagem Java tem características favoráveis para desenvolvimento de software cliente/servidor bem como as ferramentas necessárias para estabelecer comunicação em tempo real numa arquitetura cliente/servidor. É altamente portátil e vastamente registrada. Tem bibliotecas matemáticas e é freeware. Do ponto de vista de segurança, os applets (programas executáveis em browsers) oferecem grandes vantagens devido a estes não terem acesso a dados locais (do cliente), não sendo capazes de ver ou modificar qualquer informação no computador do cliente sem a iniciativa do mesmo. Através do applet Java o cliente pode configurar o controlador do processo térmico, definindo suas prioridades, monitorando as diversas variáveis do processo bem como a atuação do controlador no atuador.

Em geral applets Java são usados nas máquinas cliente para estabelecer a comunicação em tempo real com o servidor de software *web* em execução no servidor *web* (supervisório). Localmente o supervisório é a interface do sistema. O servidor *web* fornece páginas HTML e applets Java. Atualmente é comum encontrarmos páginas desenvolvidas em linguagens como PHP (Pré-Hypertext-Protocol), ASP(Active Server Pages) e JavaScript. A vantagem destas ferramentas é a possibilidade de análise e processamento de dados. PHP e ASP executam seus scripts no próprio servidor *web*, e enviam apenas os resultados das operações solicitadas pelo cliente. Desta forma a necessidade do cliente em termos de capacidade de processamento de seu computador fica consideravelmente reduzida.

Applets Java são facilmente atualizáveis, já que um novo download do servidor é inicializado automaticamente sempre que a página web é recarregada e a versão do applet é detectada obsoleta. Baseado nestas idéias foi construído o applet Java cuja interface é observada na Figura 6. Por esta interface, o usuário pode escolher a estratégia de controle a ser empregada, bem como ajustar seus parâmetros. As curvas de acionamento e de medição são também apresentadas em tempo de execução. Além disso, o sistema supervisório registra todos os dados em um arquivos texto, tornando-o disponível ao usuário no final para análise *a posteriori*.

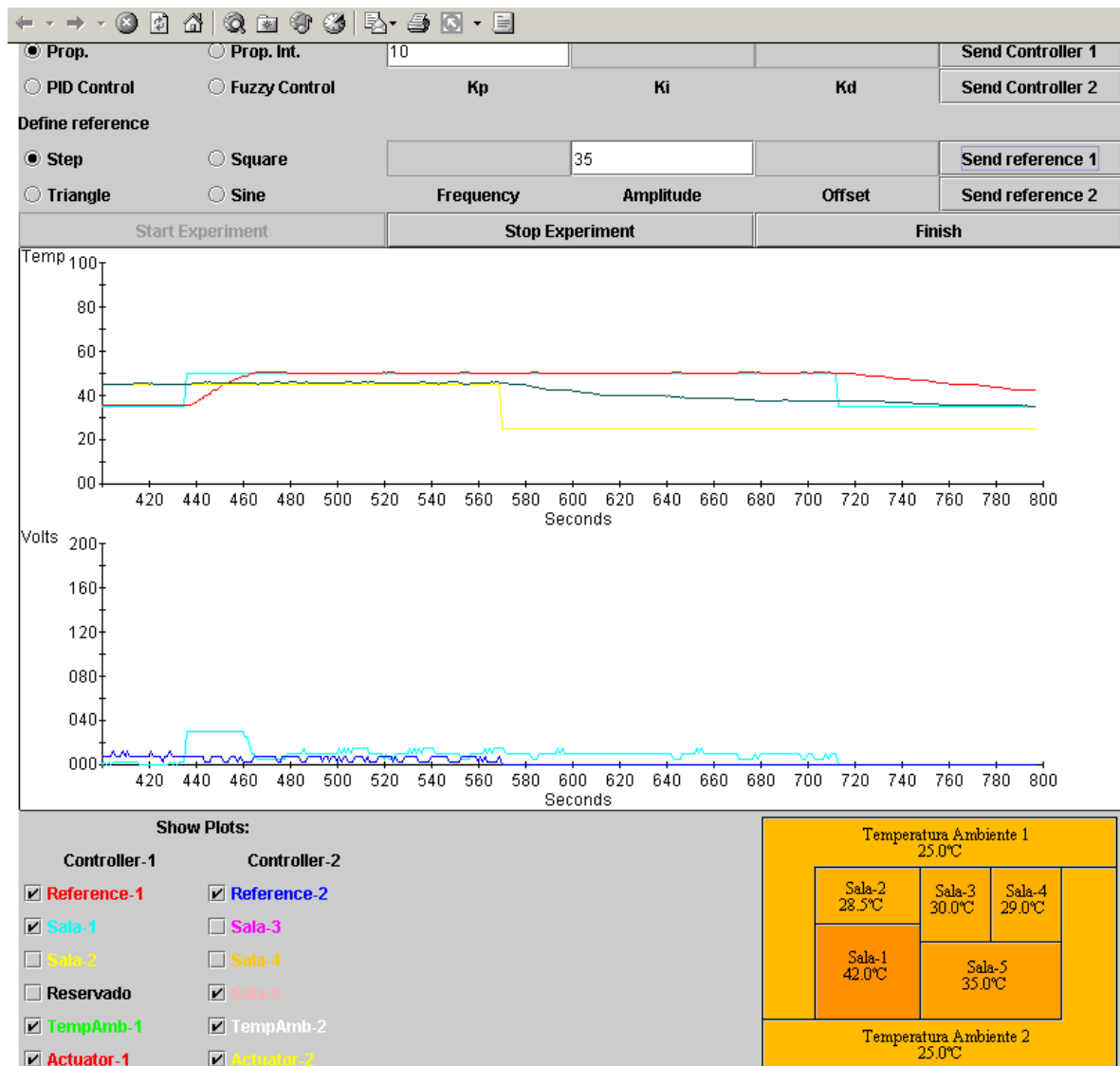


Figura 6 – Applet Java cliente/supervisorio.

#### 4. CURVAS EXPERIMENTAIS

A fim de ilustrar os possíveis experimentos a serem realizados neste laboratório remoto, alguns resultados são apresentados. Estes resultados consistem em curvas de resposta de controladores proporcional (P), figura 7, e proporcional-integral (PI) implementados, figura 8.

Como é esperado o controlador proporcional apresenta erro em regime permanente. O erro só pode ser reduzido com o aumento do ganho, o que, no entanto leva o sistema à saturação.

O controlador PI, conforme visto na figura 8, consegue acompanhar a referência com erro nulo. Como é acrescentado um pólo e um zero o sistema térmico passa a ter uma resposta subamortecida.

O número de bits utilizado na conversão A/D (8 bits) leva a sinais de temperatura em “escada”. Os dois bits menos significativos do conversor A/D foram desprezados para reduzir o ruído de medida.



### Controle Proporcional KP-2

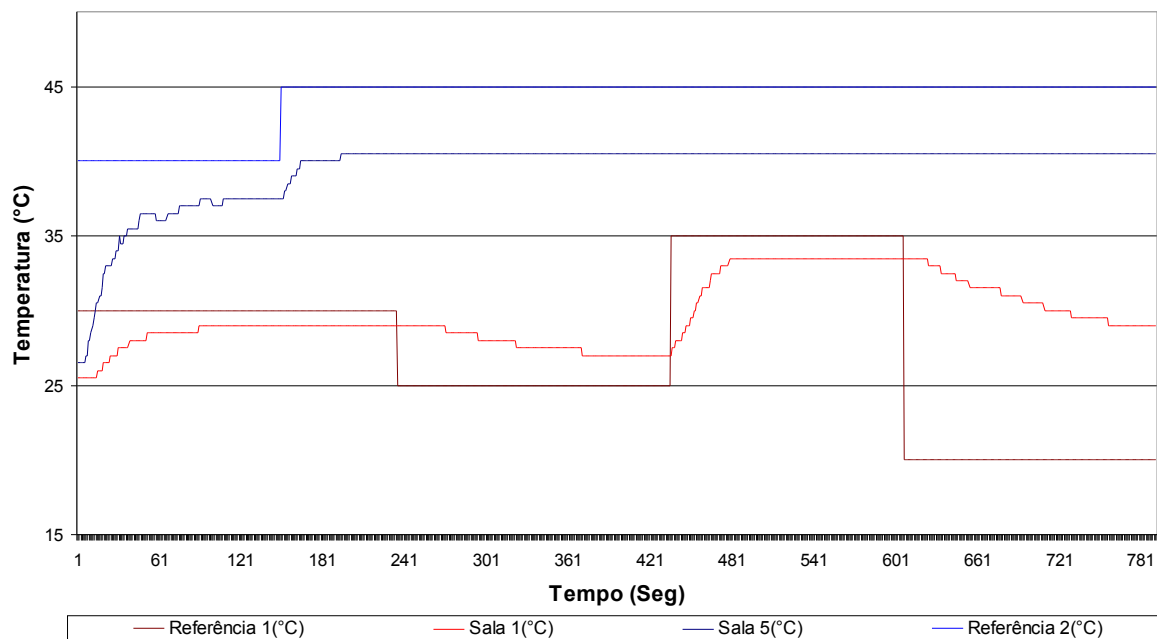


Figura 7 - Gráfico de resposta do controle proporcional nas salas 1 e 5.

### Controle PI (Kp-10 Ki-2)

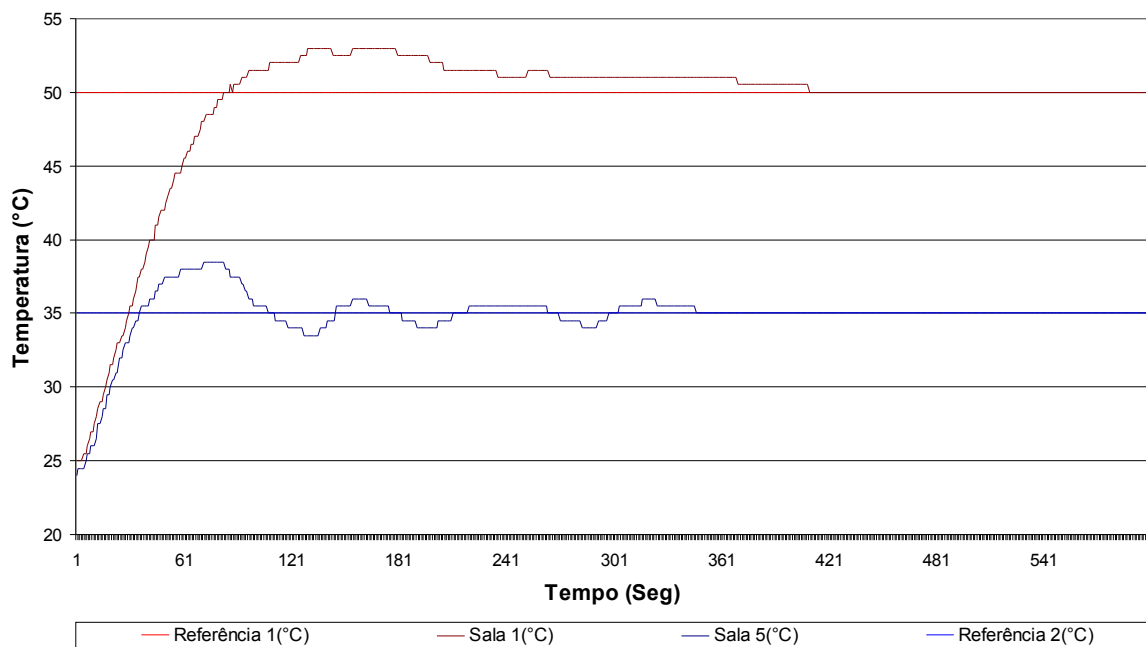


Figura 8 - Gráfico de resposta do controle proporcional-integral nas salas 1 e 5.

## 5. CONCLUSÕES

O processo térmico apresentado neste trabalho permite que alunos dos cursos de engenharia tenham contato com alguns dos aspectos relevantes da automação predial. Em particular o sistema de condicionamento térmico, que é a maior carga em sistemas prediais, pode ser automatizado em função de conforto e racionalização de energia.

Em etapas futuras pretende-se implementar um sistema especialista baseado em lógica nebulosa para a automação da maquete térmica. Esta abordagem permitiria considerar de forma não “matemática” o controle do processo não-linear, multivariável e variante no tempo. A lógica nebulosa trata o sistema de forma “lingüística”, obtendo o controlador não-linear de forma mais direta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro oferecido pela Capes, e o suporte técnico provido pelo DTL da UnB.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Belousov, I., R. Chellali and J. Clapworthy. **Virtual Reality Tools for Internet Robotics**. Seoul, Korea. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2001.

Guimarães, B., Souza, A.S., Gosmann, H.L., Bauchspiess, A. (2002) **Internet based remote laboratory: the level control of three coupled water reservoirs**. ACCA 2002 (Congresso da *Asociación Chilena de Control Automático*), Santiago, Chile, 2002.

Luna Filho, F.M., A. Bauchspiess and H.L. Gosmann. In: **Controle Fuzzy para Sistema de Nível de Líquidos**. Natal, Brasil. Congresso Brasileiro de Automática, 2002.

Nascimento Jr., C.L and Yoneyama, T. In: **Inteligência Artificial em Controle e Automação**. São Paulo, SP. Edgard Blücher, 2000.

Ogata, K. **Modern Control Engineering**. London, UK. Prentice Hall, 1997.

Pereira F. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. São Paulo, SP. Érica, 2003.

Röring, C. e Jochheim, A. (1999) **The Virtual Lab for Controlling Real Experiments via Internet**. IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design. Kohala Coast-Island of Hawaii, USA, 1999.

Souza, David José and Lavinia, Nicolas C. **Conectando o PIC – Explorando Recursos Avançados** (1ª Edição). Editora J. J. Carol, São Paulo, SP. 2002.

Souza, David José . **Desbravando o PIC** (2º Edição). São Paulo, SP. Editora Érica, 2001.

Zelenovsky, Ricardo. In: **Processamento de Sinais, Arquitetura e Interfaceamento com Computadores, Microcontroladores**. Rio de Janeiro, RJ. DC, PUC-RJ, CETUC, 2001.

## ANEXO A – DIAGRAMA ELÉTRICO DO CIRCUITO DE CONTROLE

A Figura A.1 apresenta o diagrama elétrico do circuito de controle. Os circuitos de acionamento e de medição de temperatura foram omitidos.

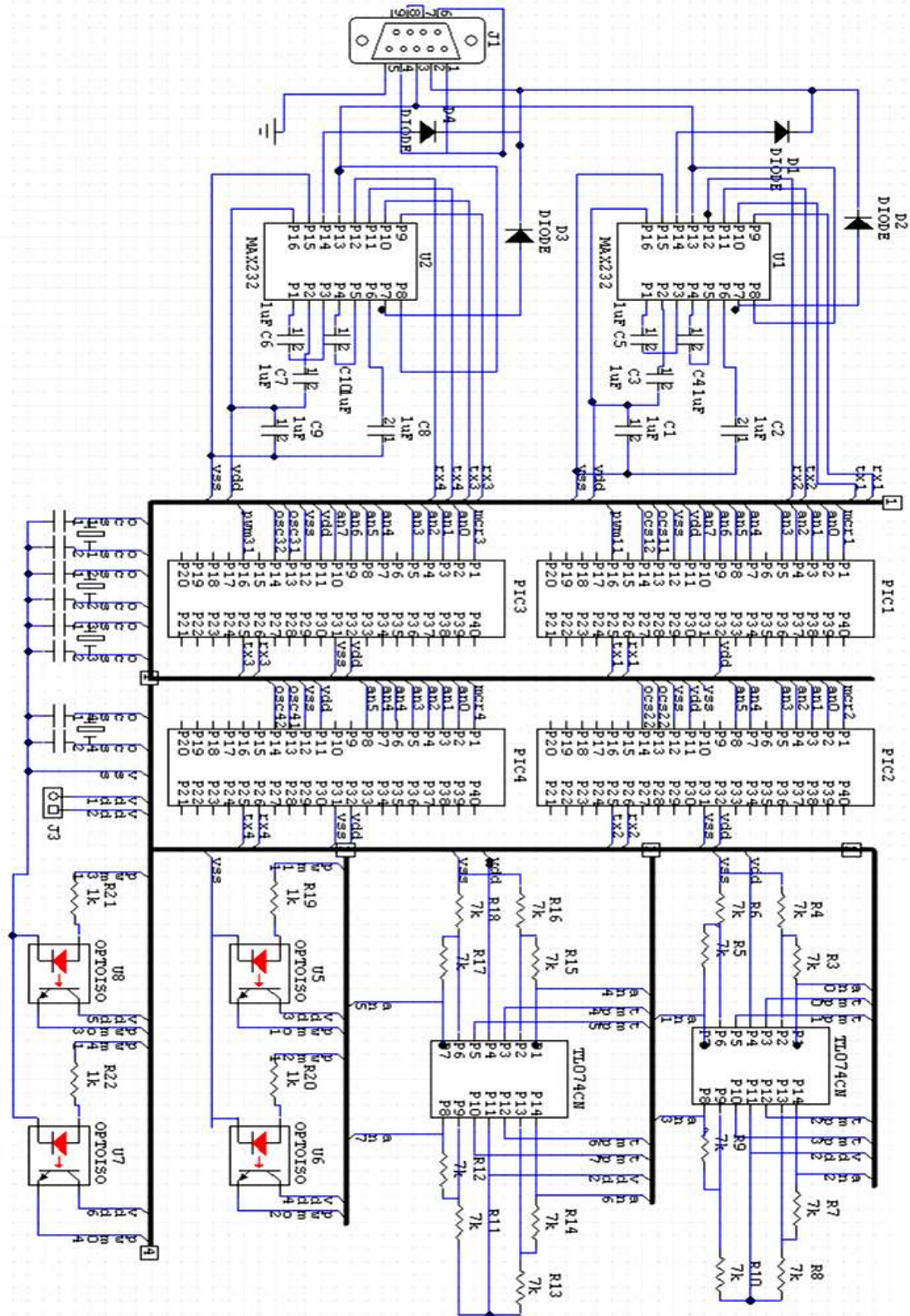


Figura A.1 – Esquemático do circuito de controle.

## REMOTE BUILDING AUTOMATION LABORATORY

**Abstract:** *This paper presents a remote laboratory for building automation. The experiment represents is an office, consisting of five rooms with doors and windows. Such a real environment has two air-conditioning systems, positioned in different strategic points in the environment. Based on this office, a reduced scale model has been conceived, in such a way that real problems inherent to normal scale buildings can be observed. The only difference with respect to a real building is that, instead of using air-conditioning, heat sources (hair drying) have been chosen. This leads to inverting of the control signal. Each room is equipped with temperature sensors, as well as in the corridors. The laboratory has been designed o reproduce many situations of a real environment, for instance, by using corridors to connect rooms with different temperatures. Micro-switches are used to detect whether the doors and windows are open. With this aparatus connected to internet, students and researchers can evaluate classical control strategies, but considering other variables such as power saving. The main contribution of this paper is the possibility to evaluate buildings automation strategies without constraints related to real environments.*

**Keywords:** *Thermal systems, Building automation, Microprocessors-based control, Remote laboratory.*