

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Tecnologia – FT
Departamento de Engenharia Elétrica – ENE

Sistema de Controle Térmico para Ambiente Predial

2/2001

Projeto Final de Graduação

Jary do Araguaia Câmara de Sousa
Aluno

Prof. Adolfo Bauchspiess
Orientador

Brasília
2002

Aos meus pais pela vida, dedicação e apoio que tornaram possível a realização de mais este projeto de vida.

Ao Professor Adolfo Bauchspiess, pela paciência e orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília pela colaboração e apoio.

Às empresas Johnson Controls e Sistemas Técnicos Digitais (STD) pelos conhecimentos adquiridos na área de automação predial e de sistemas em geral, respectivamente, como também, pela documentação e dispositivos fornecidos para a realização física deste projeto.

Índice

<i>Lista de Abreviações</i>	5
<i>Lista de Figuras</i>	9
<i>Lista de Tabelas</i>	10
<i>Resumo</i>	11
<i>Capítulo 1 – Introdução</i>	12
<i>Capítulo 2 – Automação Predial</i>	14
2.1) <i>Introdução</i>	14
2.2) <i>Padrões de Conforto Térmico</i>	15
2.3) <i>A Automação Predial Hoje</i>	17
<i>Capítulo 3 – Modelamento do Processo Térmico</i>	19
3.1) <i>Introdução</i>	19
3.2) <i>Sistema Construído</i>	26
<i>Capítulo 4 – Técnica de Controle Liga-Desliga</i>	30
<i>Capítulo 5 – Estratégia de Controle com Variação da Planta</i>	33
<i>Capítulo 6 – Simulação no MatLab-Simulink®</i>	36
<i>Capítulo 7 – Resultados Experimentais</i>	39
<i>Capítulo 8 – Conclusões</i>	42
<i>Referências Bibliográficas</i>	43

<i>Apêndice</i>	45
<i>Descrição da Placa PCI-6024E</i>	45
<i>Bloco Conector Isolado de 68 pinos SCB-68</i>	47
<i>Circuito Eletrônico de Acionamento do Secador de Cabelo</i>	49
<i>Circuito Eletrônico de Acionamento do Cooler</i>	50
<i>Circuito dos Sensores de Temperatura</i>	51

Lista de Abreviações

A

A	Ampères
AC	Corrente alternada
ACH	Sinal do canal de entrada analógica
A/D	Conversor analógico/digital
AI	Entrada analógica
AIGND	Sinal terra da entrada analógica

B

Bus	Grupo de condutores (barramento) que interconecta um circuito individual externo ao computador. Exemplos de barramentos de PC são o ISA e o PCI.
-----	--

C

C	Celsius
CH	Canal
CLP	Controlador lógico programável

D

D/A	Conversor digital/analógico
DAQ	Aquisição de dados
dB	Decibel – unidade para expressar uma medida logaritmica da razão de dois níveis de sinal: $dB = 20 \cdot \log_{10} (V_1/V_2)$ para sinais em volts

DC	Corrente contínua
DGND	Sinal terra digital
DIO	Entrada/Saída digital
DO	Saída digital
F	
Fuzzy	Controlador de lógica difusa
G	
G	Ganho – fator pelo qual um sinal é amplificado, algumas vezes expressado em decibéis
H	
Hz	Frequência de um sinal em hertz – ciclos por segundo de um sinal periódico
I	
I	Controladores do tipo integral
I/O	Entrada/Saída – a transferência de dados para/de um computador envolvendo canais de sistemas de comunicações, operador de instrumentos de interface, e/ou aquisição de dados e interfaces de controle
K	
kS	1000 amostras
L	
LabVIEW	Laboratório de instrumento virtual de engenharia de bancada

LED	Diodo emissor de luz
N	
NI-DAQ	Software driver da National Instruments para hardware de aquisição de dados
O	
ON/OFF	Controladores de duas posições ou liga–desliga
P	
P	Controladores proporcionais
PCI	Componente periférico interconectado
PCI-6024E	Placa de multifunção I/O para barramentos PCI de computadores, de 68 pinos série E com 16 canais entrada analógicos
PD	Controladores do tipo proporcional-derivativo
PI	Controladores do tipo proporcional-integral
PID	Controladores do tipo proporcional-integral-derivativo
PLC	Controlador lógico programável
PWM	Modulação por largura de pulso
S	
S	Amostras
SCB-68	Bloco conector isolado de 68 pinos
Sensor	Dispositivo que converte um fenômeno físico em um sinal elétrico
S/s	Amostras por segundo – usado para expressar a taxa com que uma placa de aquisição de dados amostra um sinal analógico

T

TBS Temperatura de bulbo seco – medida a partir de um simples termômetro, como o de mercúrio em vidro, onde sua extremidade inferior é um reservatório (bulbo), que no caso é seco por estar em contato direto com o ar livre.

TBU Temperatura de bulbo úmido – medida a partir de um termômetro onde o reservatório da extremidade inferior (bulbo) está em contato direto com material umedecido.

TR Unidade Tonelada de refrigeração

U

UR Umidade relativa

V

V Volts

VAC Tensão em corrente alternada

VDC Tensão em corrente contínua

Prefixo	Significado	Valor
p-	pico-	10^{-12}
n-	nano-	10^{-9}
μ -	micro-	10^{-6}
m-	mili-	10^{-3}
k-	kilo-	10^3
M-	mega-	10^6
G-	giga-	10^9
T-	tera-	10^{12}

Lista de Figuras

FIGURA 1: Influência sobre o conforto térmico	15
FIGURA 2: Planta Baixa da maquete construída	26
FIGURA 3: Estrutura completa do sistema implementado	27
FIGURA 4: Tela de supervisão implementada no <i>LABVIEW</i>	28
FIGURA 5: Tela do diagrama de blocos do arquivo principal implemen. no <i>LABVIEW</i>	29
FIGURA 6: Sistema de controle de temperatura construído	30
FIGURA 7: Controladores Liga-Desliga com histerese	31
FIGURA 8: Comportamento de malha aberta do caso 1	33
FIGURA 9: Comportamento de malha aberta do caso 2	34
FIGURA 10: Diagrama de blocos do caso 1	36
FIGURA 11: Resposta a entrada degrau do caso 1 para $T_{ref} = 40^{\circ}\text{C}$	36
FIGURA 12: Resposta a entrada degrau do caso 1 para $T_{ref} = 50^{\circ}\text{C}$	37
FIGURA 13: Diagrama de blocos do caso 2	37
FIGURA 14: Resposta a entrada degrau do caso 2 para $T_{ref} = 40^{\circ}\text{C}$	37
FIGURA 15: Resposta a entrada degrau do caso 2 para $T_{ref} = 50^{\circ}\text{C}$	38
FIGURA 16: Comportamento de malha fechada do caso 1 para $T_{ref} = 40^{\circ}\text{C}$	39
FIGURA 17: Comportamento de malha fechada do caso 1 para $T_{ref} = 50^{\circ}\text{C}$	39
FIGURA 18: Comportamento de malha fechada do caso 2 para $T_{ref} = 40^{\circ}\text{C}$	40
FIGURA 19: Comportamento de malha fechada do caso 2 para $T_{ref} = 50^{\circ}\text{C}$	40
FIGURA 20: Diagrama de blocos da placa <i>PCI-6024E</i>	46
FIGURA 21: Diagrama físico da placa <i>SCB-68</i>	47
FIGURA 22: Pinagem da placa <i>SCB-68</i>	48
FIGURA 23: Circuito eletrônico de acionamento do secador de cabelo	49
FIGURA 24: Circuito eletrônico de acionamento do cooler	51
FIGURA 25: Sensor de temperatura <i>LM35</i> visto por baixo	52
FIGURA 26: Diagrama de blocos do sensor de temperatura <i>LM35</i>	53
FIGURA 27: Aplicação básica do sensor de temperatura <i>LM35</i>	53
FIGURA 28: Esquema de montagem dos sensores de temperatura <i>LM35</i>	54

Lista de Tabelas

TABELA 1: Condições internas para verão	<i>16</i>
TABELA 2: Calor liberado por pessoas (kcal/h)	<i>24</i>
TABELA 3: Pontos definidores das escalas de temperatura	<i>25</i>

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo a implementação de um algoritmo de controle do tipo *Liga-Desliga* com histerese para o controle do processo térmico de aquecimento de primeira ordem, onde uma maquete foi construída num primeiro momento deste projeto no estágio supervisionado 1, simulando um ambiente predial real. Este sistema foi implementado em um PC Pentium III, 700 MHz, com plataforma Windows 98, utilizando-se o software de supervisão e controle *LabVIEW 6.0 Edição Estudante* juntamente com a placa A/D e D/A *PCI-6024E* e seus acessórios, desenvolvidos pela empresa norte-americana *National Instruments* especializada na produção de *hardware* e *software* para medição e automação de sistemas em geral. São apresentados resultados experimentais realizados no modelo predial construído e os resultados de simulação obtidos com o software *MatLab-SIMULINK®*. Em seguida, são apresentadas as conclusões acerca dos dados experimentais e teóricos e, por fim, são mostradas em um apêndice as características físicas de funcionamento e os detalhes físicos de montagem de cada parte integrante do presente projeto.

Palavras Chave: Processo térmico de aquecimento, controlador Liga/Desliga, controle de temperatura

1. Introdução

Temperatura, sem dúvida alguma, é uma das grandezas físicas mais medidas e controladas em todo o mundo, seja na climatização de ambientes (residenciais, *shopping-centers*, hospitais, etc) ou em ambiente industrial (fornos, estufas, reatores químicos, etc). Seu valor muitas vezes determina a qualidade de um produto, a eficiência de um processo ou o bem estar de um ambiente.

Em um mercado cada vez mais exigente, tendo à disposição um leque de ofertas muito diversificado, que busca por produtos de maior qualidade e confiabilidade, está claro que qualidade é fator de sucesso e de sobrevivência de uma empresa. Isto dá à engenharia de controle a obrigação de fornecer soluções teóricas e práticas para atender as exigências das normas industriais nacionais e internacionais.

Desta forma a área de automação teve um aumento vertiginoso na década de 80 visando obter ambientes mais confortáveis, menor consumo de energia, maior precisão de ajuste e medidas, produtos e serviços com menor tempo de produção, graças à maior eficiência nos processos de produção industrial.

É neste contexto que os controladores microprocessados (*CLP's*) tornaram-se peças fundamentais aos sistemas de automação predial e industrial. Maior eficiência, maior confiabilidade e menor número de pessoas necessárias na atuação e supervisão de processos são as principais características trazidas com o uso destes controladores.

No panorama internacional, estes dispositivos de controle surgiram para atender a demanda industrial a partir de meados dos anos 1980 com esquemas de controle variados: controlador *PID* e auto-ajuste de parâmetros (*self-tuning*), controlador adaptativo de uso geral, controlador *PID* adaptativo, controlador *PID* e auto-sintonia (*auto-tuning*) e vários outros; hoje um só aparelho reúne todas estas características (controle *PID*, auto-sintonia e auto-ajuste) e outras indicações de interesse como potência, alarmes, sinais de entrada (por ex., sensores) configuráveis por *software*, etc. No panorama nacional estes aparelhos são baseados ainda no controle *on-off* e somente poucas empresas têm atuado no sentido de buscarem para seus produtos características semelhantes aos produtos estrangeiros. A concorrência mais forte com os aparelhos microprocessados é o controle por microcomputadores devido à elevada velocidade e poder de processamento dos microcomputadores

que tornam possíveis a implementação de esquemas de controle mais sofisticados, em tempo real e com opção para monitoração gráfica dos processos. No entanto com o aparecimento de microcontroladores cada vez mais velozes e poderosos (16 e 32 bits), com conversores A/D, D/A e PWM integrados na mesma pastilha a disputa fica equilibrada e com espaço para ambas as opções.

Da experiência acumulada e aplicações já realizadas e bem sucedidas fica claro que nenhum método utilizado irá resolver sozinho todos os problemas encontrados nos diferentes campos de atuação. Há limitações em todos eles e seu uso só será definido após extensiva análise do problema e parâmetros considerados relevantes; há muitos casos em que é mais conveniente o uso de mais de um esquema de controle que são combinados de maneira a produzirem o resultado desejado. Um exemplo desta interação [16] são os algoritmos destinados à supressão de sobre-sinal que utilizam a lógica *fuzzy* e que atuam em conjunto com os controladores *PID*.

O presente trabalho está organizado como segue. No Capítulo 2 é feita uma apresentação acerca dos sistemas inteligentes aplicados à automação predial, em especial, os sistemas de ar condicionado no que diz respeito à sua importância, características e tendências futuras. No Capítulo 3 são apresentados os principais conceitos da Termodinâmica, o modelamento do processo térmico, como também, o sistema construído para simulação real de um ambiente predial. A técnica de controle *Liga-Desliga* é descrita no Capítulo 4. No Capítulo 5 é apresentada a estratégia de controle com variação da planta. No Capítulo 6 são apresentados os resultados de simulações feitas no **MatLab-Simulink**. Os resultados experimentais são apresentados e analisados no Capítulo 7. No Capítulo 8 são apresentadas conclusões acerca da técnica de controle *Liga-Desliga* e do sistema construído.

2. Automação Predial

2.1 Introdução

Em cada gesto e atividade do nosso cotidiano, a energia está presente e sem ela o mundo pararia completamente. Se os povos primitivos evoluíram a partir da descoberta do fogo, as sociedades modernas evoluirão tanto mais quanto mais eficientes forem na forma como geram e exploram as fontes energéticas.

Assim, com as recentes discussões em torno das fontes energéticas, preocupa-se cada vez mais em planejar ambientes inteligentes que além de melhorar a qualidade dos ambientes internos dos edifícios, maximizar o conforto, a produtividade e a segurança possam, também, proporcionar uma maior eficiência do consumo de energia. Os sistemas inteligentes de controle para edifícios automatizam os sistemas mecânicos do edifício para oferecer o máximo de conforto e, ao mesmo tempo, utilizar o mínimo de energia.

Em algumas empresas, os sistemas inteligentes de controles automatizados para edifícios são essenciais para alcançar suas metas. No setor farmacêutico, por exemplo, se as condições de laboratório adequadas não forem mantidas pelo equipamento do edifício ou por uma equipe de funcionários, pode haver a perda de anos de pesquisa e desenvolvimento de novas substâncias. Em um centro de dados bancários, se o equipamento de refrigeração falhar, pode haver o desligamento dos sistemas de computadores, o que causaria a demora de transações de milhões de dólares a cada minuto.

Quando pensamos em utilizar equipamentos que permitam oferecer conforto aos ocupantes de uma edificação, pensamos logo em um sistema de ar condicionado. O sistema de ar condicionado tem como objetivo principal controlar a temperatura, umidade, pureza e distribuição do ar no ambiente, de modo a propiciar conforto aos seus ocupantes.

Vários fatores afetam o conforto térmico no ser humano. O metabolismo do corpo gera calor, e a quantidade de calor gerado depende de fatores, tais como idade, saúde, nível de atividade e fatores emocionais. Além disso, os diferentes hábitos de se vestir podem provocar sensações de calor diferentes [7]. A figura 1 ilustra os principais fatores que afetam o conforto térmico [7].

A taxa de liberação de calor por ocupante em um ambiente condicionado pode variar de 120W para uma pessoa em atividade sedentária a 440W para atividade intensa. Para aumentar a taxa de transferência de calor, nosso organismo produz o suor, para que este evapore e transmita calor latente [7].

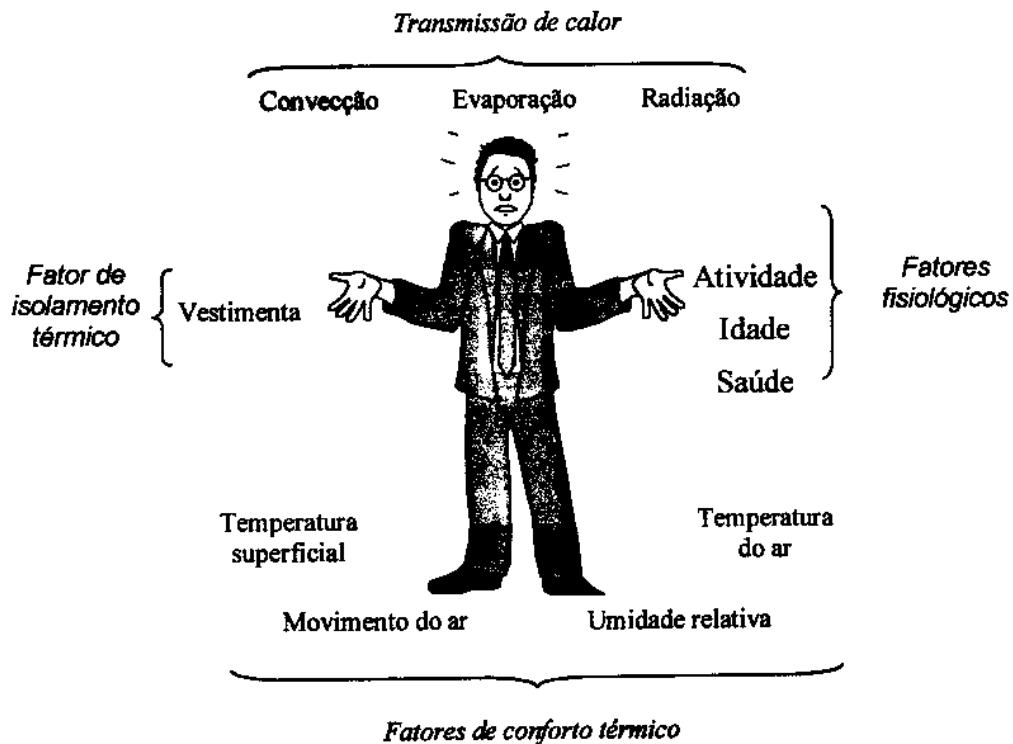


Figura 1 – Influência sobre o conforto térmico.

2.2 Padrões de Conforto Térmico

A norma brasileira que estabelece os parâmetros básicos de projeto para instalações centrais de ar condicionado para conforto é a NBR6401. Nesta norma, além de parâmetros relativos ao dimensionamento do sistema de ar condicionado, são apresentadas as condições de conforto para diversos tipos de ambientes. A norma estabelece o tipo de ocupação dos ambientes, os níveis de

ruído permissíveis, a vazão de ar de renovação, as velocidades para dutos de ar, e outros parâmetros relativos à cargas térmicas.

A tabela 1 mostra alguns padrões apresentados na NBR6401 relativos às condições internas recomendadas para alguns recintos, durante o verão. A própria norma recomenda utilizar os valores da tabela 1 na falta de informações específicas. Assim, nada impede que sejam adotados outros valores, desde que devidamente fundamentados.

Outros métodos de determinação das condições de conforto térmico são apresentadas em [Creder, Cap.2], onde adota-se a “Carta de Conforto do Ar Parado”. O ábaco foi construído a partir de ensaios feitos com pessoas vestidas com roupa comum e submetidas a várias condições de temperatura, umidade relativa e movimento do ar, e verificou-se quais as condições que ofereciam conforto à maioria das pessoas.

Finalidade	Local	TBS (°C)	UR (%)
Conforto	Residências, hotéis, escritórios, escolas	23 a 25	40 a 60
Lojas de curto tempo de ocupação	Bancos, barbearias, cabeleireiros, lojas, magazines, supermercados	24 a 26	40 a 60
Ambientes com grandes cargas de calor latente e/ou sensível	Teatros, auditórios, templos, cinemas, bares, lanchonetes, restaurantes, bibliotecas, estúdios de TV	24 a 26	40 a 65
Locais de reuniões com movimento	Boates, salões de baile	24 a 26	40 a 65
Ambientes de Arte	Depósitos de livros, manuscritos, obras raras	21 a 23	40 a 50
	Museus e galerias de arte	21 a 23	50 a 55

Tabela 1 – Condições internas para verão.

2.3 A Automação Predial Hoje

Grandes empresas como, por exemplo, a Johnson Controls utilizam em seus sistemas de resfriamento controles analógicos baseados em algoritmos como *ON/OFF*, *P*, *I*, *PI*, *PD* e *PID*. De acordo com as necessidades dos projetos, com as características dos equipamentos a serem automatizados e com os problemas enfrentados, os algoritmos são adaptados a fim de se obter maior confiabilidade dos sistemas.

Assim, a otimização potencial, hoje, para a operação de sistemas de resfriamento, em construções com sistemas de controle de supervisão, se limita às capacidades das funções do *CLP* com sua lógica binária. Pouca informação sobre a conduta térmica da construção e do sistema de resfriamento é considerada hoje durante a operação de sistemas de resfriamento nos algoritmos do *CLP*.

Atualmente outras formas de controle de processos estão surgindo com a utilização de lógica difusa (controle *fuzzy*) e redes neurais, contudo estes trabalhos situam-se ainda no plano acadêmico e sua implementação efetiva em larga escala ainda são tímidas ou praticamente inexistentes e vão levar tempo para surgirem como uma opção concreta de utilização (Pesquisa TALEBI-DARYANI & CLAUDIA LUTHER, Johnson Controls da Alemanha, [10]).

O foco da estratégia de otimização realizada pelo controle *fuzzy* é o de assegurar uma operação ótima de um sistema de resfriamento. Operação ótima significa:

- redução do tempo de operação e dos custos de operação do sistema e
- redução da geração de energia refrigerante e dos custos de consumo.

O avanço requerido na estratégia de otimização proporciona ao usuário de sistemas de resfriamento uma temperatura com erro de “setpoint” (temperatura desejada) tão pequeno quanto possível. Esta característica do sistema é importante, em regra para assegurar pesquisa e condições de trabalho na construção. Análises da conduta térmica da construção (comportamento durante os

dias de determinado mês do ano, por exemplo, da temperatura na construção) e do sistema de resfriamento são necessários, em regra para encontrar o potencial de resfriamento eficiente e métodos durante a operação. Estas análises, também, focam a medição de importantes valores físicos do sistema como variáveis de entrada para controladores *fuzzy* diferentes, já que não existe conhecimento específico para otimização da operação de sistemas de resfriamento. (Pesquisa TALEBI-DARYANI & CLAUDIA LUTHER, Johnson Controls da Alemanha, [10])

A compreensão e o estudo do sistema de controle *fuzzy* abrirá novos campos de aplicação para tecnologia *fuzzy* na engenharia de automação predial.

3. Modelamento de Processo Térmico

3.1 Introdução

Para uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos nos sistemas térmicos em geral, os conceitos básicos de Termodinâmica [10] são introduzidos, a seguir.

As leis da Termodinâmica

A base de todas as leis da natureza é a evidência experimental e isto é igualmente verdadeiro para as leis da termodinâmica. Toda experiência efetuada conduz à verificação destas leis, quer direta ou indiretamente. A base destas leis é, por isso, a evidência experimental; elas nunca foram refutadas e têm sido verificadas por grande número de experiências.

São dois os princípios fundamentais da termodinâmica, os quais definem e regulam todos os processos. Uma terceira lei costuma ser utilizada para definir-se igualdade de temperaturas entre dois corpos distintos, conhecida como *Lei Zero da Termodinâmica*. A seguir apresenta-se uma definição sucinta destes princípios.

Lei Zero da Termodinâmica

A Lei zero da termodinâmica afirma que, quando dois corpos têm igualdade de temperatura com um terceiro corpo, eles terão igualdade de temperatura entre si. Isso parece bastante óbvio, uma vez que estamos familiarizados com esta experiência. Entretanto, sendo esse fato independente de outras leis e uma vez que na apresentação da termodinâmica ele precede a primeira e a segunda leis, recebe a mesma denominação de *Lei Zero da Termodinâmica*. Essa lei constitui realmente a base da medida da temperatura, porque podemos colocar números no termômetro de mercúrio e sempre que um corpo tiver igualdade de temperatura com o termômetro poderemos dizer que o corpo tem a temperatura lida no termômetro.

A Primeira Lei da Termodinâmica

Também conhecida como Lei da Conservação da Energia, esse princípio afirma, em termos bastante simplificados e intuitivos, que, para um sistema que efetua um ciclo, o saldo energético relativo ao que entra e sai do sistema é sempre nulo. Assim, a quantidade de calor que entra ou sai do sistema é igual à quantidade de trabalho imprimida ao sistema ou produzida por ele. Em outras palavras, pode-se afirmar que é impossível criar trabalho do nada.

A Segunda Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica estabelece que, para um sistema que efetua um ciclo, o saldo energético relativo ao que entra e sai do sistema é sempre nulo. No entanto, não impõe nenhuma restrição quanto à direção do fluxo de calor e trabalho. Um ciclo no qual uma determinada quantidade de calor é cedida pelo sistema e uma quantidade equivalente de trabalho é recebida pelo sistema satisfaz a primeira lei, da mesma maneira que um ciclo onde as trocas de calor e trabalho se dão em sentido oposto. Todavia, sabemos da experiência não ser suficiente que um ciclo não viole a primeira lei para que ele ocorra. Esse tipo de evidência experimental é que levou à formulação da segunda lei. Dessa forma, um ciclo somente ocorrerá se a primeira e segunda leis da termodinâmica forem satisfeitas.

O principal significado da segunda lei envolve o fato de que processos ocorrem em determinada direção e não na oposta. Uma xícara de café quente esfria em virtude da troca de calor com o meio, mas o meio não cederá calor para a xícara de café quente. Um carro, para subir uma ladeira, consome gasolina, mas, descendo-a, o nível de gasolina no tanque não voltará ao inicial. Observações desse tipo e diversas outras são evidências da validade da segunda lei da termodinâmica.

Calor

Pode-se definir calor como a energia em transição através do contorno de um sistema devido a uma diferença de temperatura.

Para exemplificar, considere o que ocorre quando colocamos em contato dois corpos que possuem temperaturas diferentes. O que tiver temperatura maior sofrerá uma queda na temperatura e vice-versa, até atingirem uma temperatura de equilíbrio. Esta variação de temperaturas ocorre exatamente porque há transferência de energia entre os objetos, e a esta energia que está sendo transmitida devido à diferença de temperatura dá-se o nome de calor.

Os experimentos de *Joule* (1818-1889) permitiram relacionar calor e energia mecânica, e pôde-se definir a quilocaloria (kcal) da seguinte forma [Creder, p.11]:

“Quilocaloria é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 quilograma d’água de 14,5°C para 15,5°C”

Este resultado permite identificar as seguintes relações:

Energia

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kcal} = 3,968 \text{ BTU (British Thermal Unit)}$$

Potência

$$1 \text{ kcal/h} = 3,968 \text{ BTU/h}$$

$$1 \text{ kW} = 860 \text{ kcal/h}$$

$$1 \text{ TR} = 3024 \text{ kcal/h}$$

$$1 \text{ TR} = 12000 \text{ BTU/h}$$

$$1 \text{ Tonelada Padrão*} = 288000 \text{ BTU}$$

* Energia necessária para solidificar a água a 0°C na taxa de 1 tonelada a cada 24 horas. (12.000BTU/h x 24h)

Transferência de Calor

O fenômeno de transferência de calor ocorre através de três diferentes processos, que possuem particularidades na forma como o calor flui do corpo (ou ponto) mais quente para o mais frio. Sempre que houver diferença de temperatura, haverá transferência de calor.

Condução

Quando existe uma diferença de temperatura no interior de um meio (sólido ou fluido), denominamos *condução* a transferência de calor que ocorrerá no meio, da região de alta temperatura para a de baixa temperatura.

Podemos perceber o processo de condução térmica quando aquecemos uma haste de aço em uma extremidade enquanto seguramos na outra extremidade. A haste aquece gradualmente e o calor transmitido pela barra flui no sentido do lado de maior temperatura (onde é aquecida) para o de menor temperatura (onde seguramos).

A taxa de transferência de calor por condução em um corpo depende de:

- ▶ Diferença de temperatura
- ▶ Área transversal ao sentido do fluxo de calor
- ▶ Condutividade térmica do material

Convecção

Este processo se refere à transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, quando estiverem em temperaturas diferentes. É o movimento de um fluido, resultante da existência de uma diferença de pressão ou temperatura.

O processo de convecção ocorre, por exemplo, quando fazemos circular o ar (soprando ou através de ventiladores) sobre um objeto quente para esfriá-lo. Outro exemplo ocorre quando a água passa pelo chuveiro elétrico e troca calor com as resistências elétricas.

Outros exemplos muito comuns são encontrados nos equipamentos de ar condicionado onde as trocas de calor ocorrem por convecção (ambiente refrigerado, serpentinas de fancoils, condensadores, evaporadores, tanques de gelo).

A taxa de transferência de calor por convecção em um corpo depende de:

- ▶ Diferença de temperatura
- ▶ Área da superfície de troca
- ▶ Velocidade do escoamento do fluido
- ▶ Turbulência no escoamento
- ▶ Propriedades térmicas do fluido e da superfície

*Difusão – Propriedade dos gases e vapores de se misturarem, devido ao movimento intrínseco de suas moléculas.

Radiação

Processo de transferência de calor que ocorre através da emissão de radiação térmica. Todas as superfícies, a uma temperatura não-nula, emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Diferentemente da condução e da convecção, este processo de transferência de calor não depende da existência de um meio para transportar o calor.

O exemplo mais claro de radiação térmica é o do calor transmitido pelo Sol. Outros exemplos são os fornos de metalurgia e até mesmo as fogueiras. Repare que para receber calor de uma fogueira, basta se colocar ao seu redor (aquecimento por radiação térmica), não sendo necessário receber os gases e vapores que ela emite (aquecimento por convecção).

A taxa de transferência de calor por radiação em um corpo depende de:

- ▶ Diferença de temperatura
- ▶ Área e grau de incidência/emissão das superfícies
- ▶ Geometria das superfícies
- ▶ Propriedades térmicas (absorvidade, reflexividade, transmissividade)

Calor Sensível e Calor Latente

Calor sensível é a quantidade de calor que deve ser fornecida ou retirada de um corpo para provocar uma variação de temperatura. O calor latente é o calor associado à mudança de estado físico do corpo, que ocorre naturalmente sem variação de temperatura.

O corpo humano emite ou recebe calor sensível e calor latente, que é o calor necessário para vaporizar a transpiração e a respiração, permanecendo constante sua temperatura total. Observe na tabela 2 (NBR-6401), a seguir, alguns valores de calor sensível e calor latente do corpo humano.

Local	Metabolismo homem adulto	Metabolismo médio	TBS (°C)									
			28		27		26		24		21	
			S	L	S	L	S	L	S	L	S	L
Teatro, escola primária	98	88	44	44	49	39	53	35	58	30	65	23
Escola secundária	113	100	45	55	48	52	54	46	60	40	68	32
Escritórios, hotéis, apartamentos, universidades	120	113	45	68	50	63	54	59	61	52	71	42
Supermercados de varejo, lojas	139											
Farmácias, drogarias, bancos	139	126	45	81	50	76	55	71	64	62	73	53
Restaurantes*	126	139	48	91	55	84	61	78	71	68	81	58
Fábricas (trabalho leve)	202	189	48	141	55	134	62	127	74	115	92	97
Salão de baile	227	214	55	159	62	152	69	145	82	132	101	113
Fábrica (trabalho moderadamente pesado)	252	252	68	184	76	176	83	169	96	156	116	136
Boliches, fábricas, ginásios	378	365	113	252	117	248	122	243	132	233	152	213

S = Calor Sensível (kcal/h) ; L = Calor Latente (kcal/h).

Tabela 2 – Calor liberado por pessoas (kcal/h).

*Estes valores compreendem 14 kcal/h (50% calor sensível e 50% latente) por ocupante, para levar em conta o calor despreendido pelos pratos com alimentos.

Temperatura e Escalas de Temperatura

A temperatura é a medida do movimento das moléculas de um sistema. Esta medida pode ser feita através de um termômetro ou sensor de temperatura, quando este é colocado em contato com o sistema (ou corpo) até que se atinja o equilíbrio térmico entre ambos.

As escalas de temperaturas foram criadas para se adotar um ponto de referência para a medida de temperatura de corpos. As escalas mais comuns de temperatura (Fahrenheit e Celsius) foram definidas a partir do ponto de fusão do gelo e de ebulição da água à pressão atmosférica. Na escala Celsius este intervalo foi dividido em 100 partes iguais. As escalas Kelvin e Rankine têm como referência o *zero absoluto*. Observe na tabela 3 a relação entre as várias escalas de temperatura.

	°F	°C	K	°R
Ponto de ebulição normal da água	212	100	373	672
Ponto de fusão do gelo	32	0	273	492
Zero absoluto	-460	-273	0	0

Tabela 3 – Pontos definidores das escalas de temperatura.

A conversão entre estas unidades pode ser feita através das seguintes relações:

$$\begin{array}{|l} \text{°C} = (\text{°F} - 32) \cdot (5/9) \\ \text{°R} = \text{°F} + 460 \end{array} \quad \begin{array}{|l} \text{°F} = \text{°C} \cdot (9/5) + 32 \\ \text{K} = \text{°C} + 273 \end{array}$$

3.2 Sistema Construído

Para a realização deste projeto, construiu-se uma maquete num primeiro momento, no estágio supervisionado 1, para a simulação térmica de um ambiente predial. Procurou-se utilizar materiais acessíveis e de baixo custo, mas que pudessem reproduzir ao máximo as características físicas de um ambiente real. A figura abaixo mostra a planta da maquete construída.

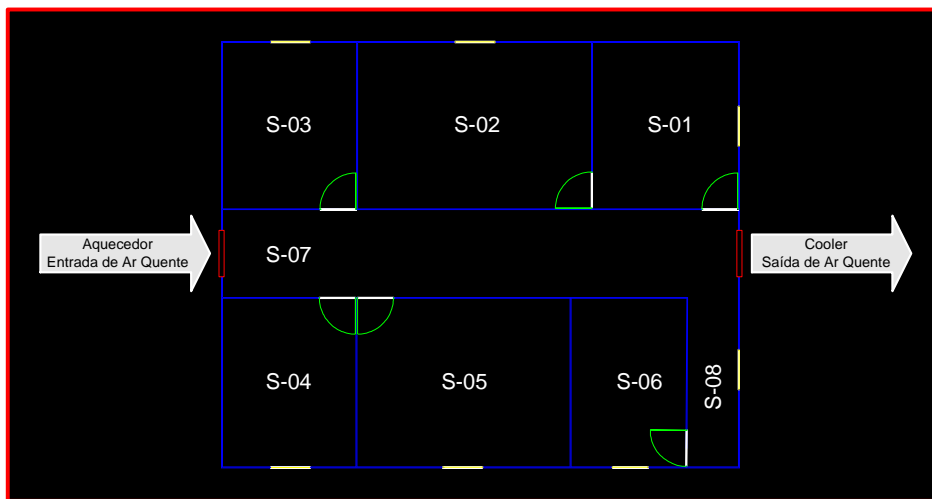


Figura 2 – Planta baixa da maquete construída.

A estrutura da maquete foi toda feita utilizando-se uma caixa de papelão “de dimensões razoáveis”. Para simular ao máximo um ambiente predial real, seu piso foi revestido com uma camada (folha) de borracha fina e as janelas feitas de material acrílico.

Para o controle térmico da maquete utilizou-se um *secador de cabelo* de 1000 W (aquecedor da figura 2) para o aquecimento do ambiente e um *cooler* (figura 2) para exaustão do mesmo. Escolheu-se esse método de aquecimento devido à dificuldade de se implementar sistemas de refrigeração a nível de realização experimental desse porte. Assim, este trabalho tem como foco principal, e oposto ao real (resfriamento), o estudo de um sistema de controle térmico sobretudo de aquecimento. Para o comando do secador e do cooler implementou-se 2 (dois) circuitos distintos de

acionamento, cada qual conectado às saídas digitais DIO0 e DIO1, respectivamente, do cartão *PCI-6024E*. Para maiores detalhes sobre a construção dos circuitos de acionamento, a especificação dos dispositivos utilizados, a instalação e o funcionamento do *secador* e do *cooler* consulte o apêndice deste trabalho nos itens *Circuito Eletrônico de Acionamento do Secador de Cabelo* e *Circuito Eletrônico de Acionamento do Cooler*.

Para a aquisição de dados analógicos de temperatura foram instalados 8 (oito) sensores de temperatura *LM35* em cada cômodo da maquete (sensores S-01 a S-06) e no corredor (sensores S-07 e S-08), ligados às entradas analógicas ACH0 a ACH7 do cartão *PCI-6024E*. Para maiores detalhes de especificação, instalação e funcionamento dos sensores *LM35* consulte o apêndice na página 50 deste trabalho no item *Circuito dos Sensores de Temperatura*.

A estrutura global do projeto é mostrada na figura a seguir. O *supervisor*, implementado no software *LABVIEW 6.0 Edição Estudante*, possibilita a interface e o controle do processo de temperatura pelo usuário através do acesso à placa *PCI-6024E* e do módulo *SCB-68* que atuam sobre os circuitos eletrônicos de acionamento do aquecedor e do cooler (ver apêndice).

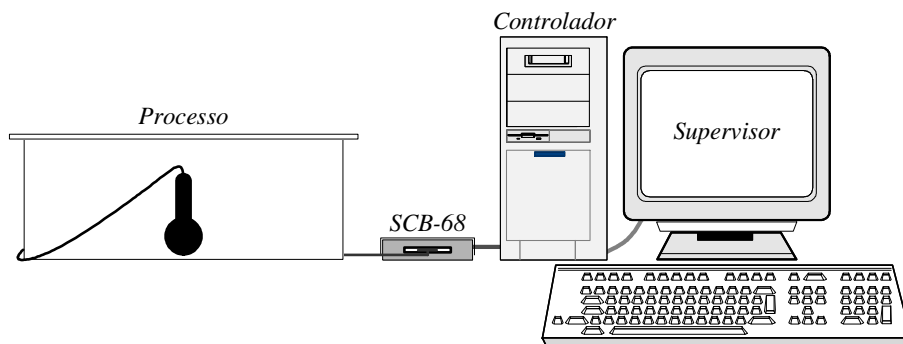


Figura 3 – Estrutura completa do sistema implementado.

A tela implementada no *LABVIEW* para supervisão e controle do processo térmico, mostrada na figura a seguir, consiste basicamente da apresentação dos parâmetros de controle (*temperatura de setpoint*, *temperatura controlada* e *sinais de controle do aquecedor e do cooler*) em

forma gráfica e, no caso da temperatura desejada (*setpoint*), há ainda um botão para o ajuste da mesma.

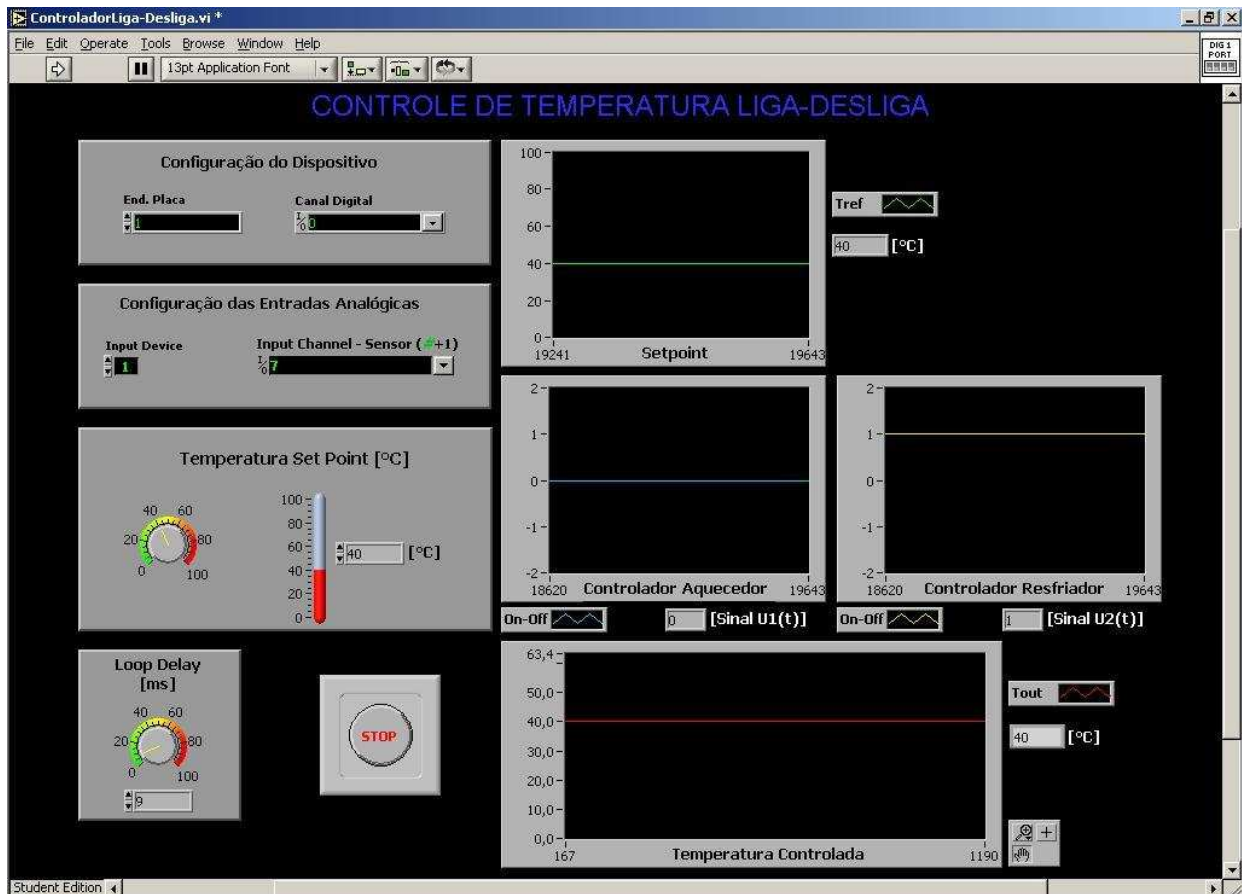


Figura 4 – Tela de supervisão implementada no LABVIEW.

A lógica do controlador (descrita no item *Técnica de Controle Liga/Desliga*), bem como todos os objetos criados na tela principal da figura 4, foram implementados conforme a tela do diagrama de blocos do arquivo principal mostrada abaixo.

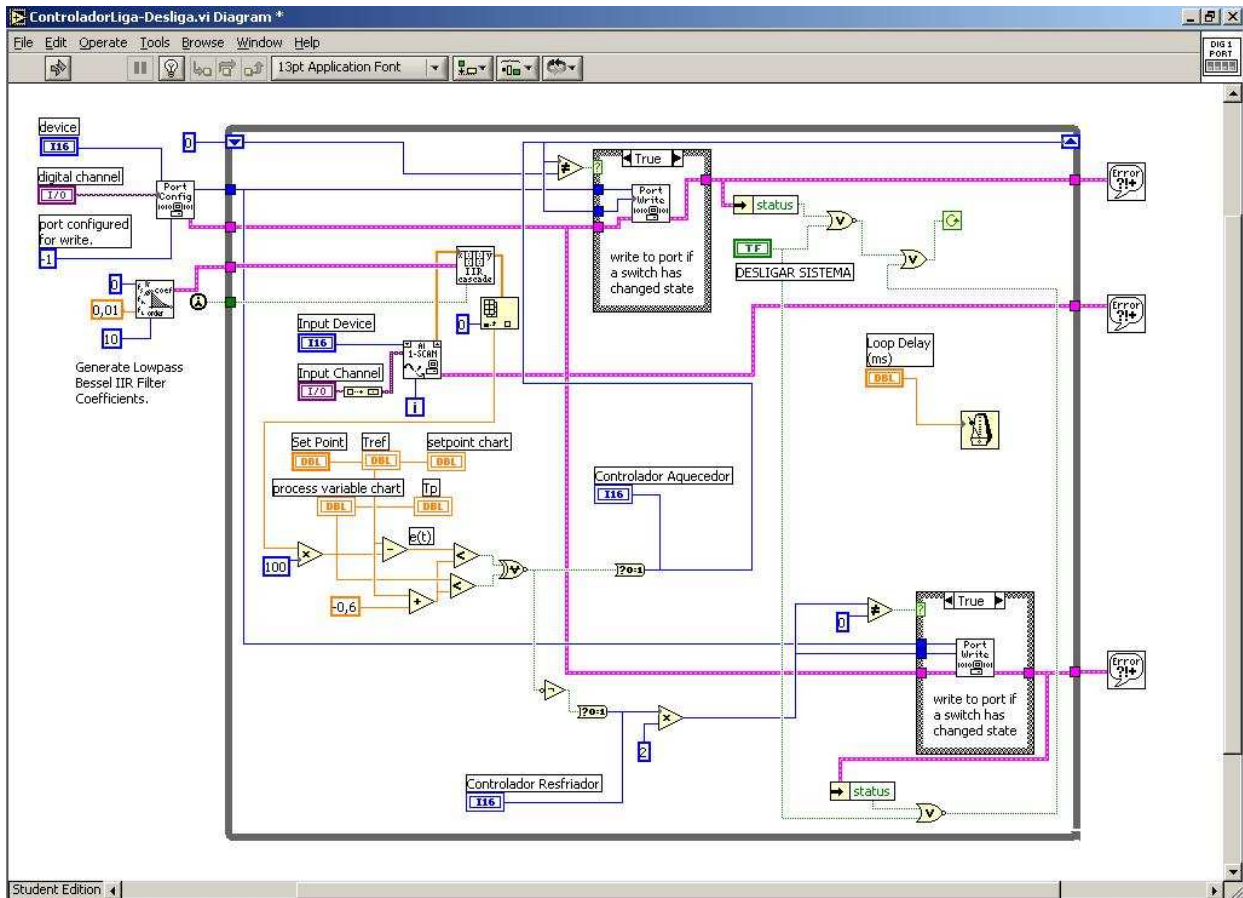


Figura 5 – Tela do diagrama de blocos do arquivo principal implementada no LABVIEW.

Na figura 5, além disso, devido à presença de ruído foi implementado um filtro passa-baixas a partir de um objeto do LABVIEW que gera um filtro digital de Bessel e, para tal, utilizou-se um de ordem 10 com frequência de corte de 0,01 Hz.

4. Técnica de Controle Liga-Desliga

Na técnica de controle de duas posições, o elemento atuante possui apenas duas posições fixas que, neste caso, são aquecedor ligado e cooler desligado, e vice-versa. O sistema de controle de temperatura construído pode ser representado conforme o diagrama de blocos abaixo.

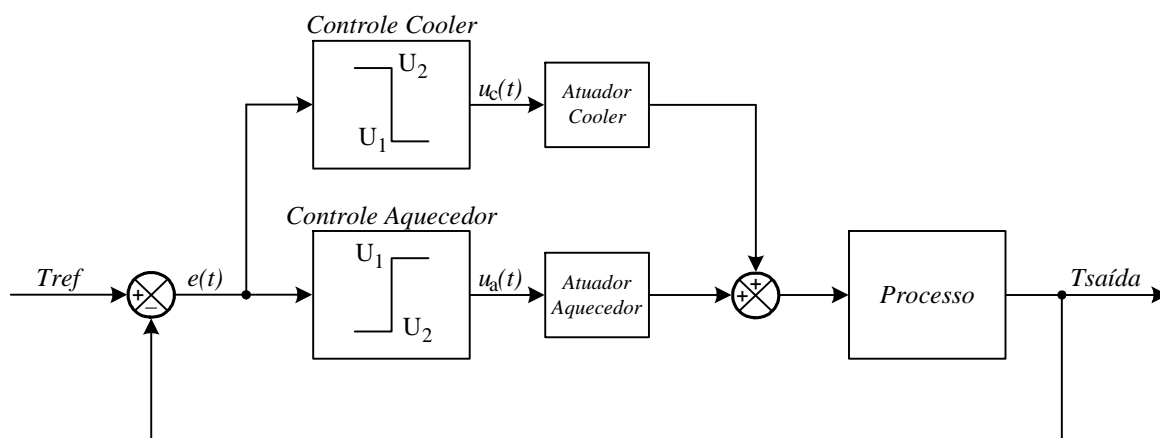


Figura 6 – Sistema de controle de temperatura construído.

Considere o sinal de saída $u_a(t)$ do controlador do aquecedor e $u_c(t)$ do controlador do cooler, e o sinal de erro atuante $e(t)$. Neste sistema térmico de controle *Liga-Desliga* os sinais $u_a(t)$ e $u_c(t)$ podem assumir apenas dois valores permanecendo ou em 5VDC ou em 0VDC (níveis de tensão das saídas digitais do cartão *PCI-6024E*), dependendo de o sinal de erro atuante ser positivo ou negativo. Assim, para o controle do processo térmico em questão temos as seguintes lógicas:

$$u_a(t) = \begin{cases} U_1 = 5 & \text{se } e(t) > 0 \\ U_2 = 0 & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad \text{e} \quad u_c(t) = \begin{cases} U_1 = 0 & \text{se } e(t) > 0 \\ U_2 = 5 & \text{se } e(t) < 0 \end{cases}$$

Como este tipo de função foi implementada com um relé físico observou-se uma inconsistência em zero devido à presença de ruídos provocando chaveamentos espúrios quando o sinal $e(t)$ está próximo de zero. Para evitar este tipo de problema e aumentar a vida útil dos equipamentos (aquecedor e cooler) com o ajuste da faixa de $e(t)$ [E_1 - $(-E_2)$, com $E_1=E_2$], utilizou-se um controlador liga-desliga com histerese e, também, inicialmente um filtro RC passa-baixas ($f_c = 338\text{Hz}$, máximo conseguido) que não foi suficiente implementando-se, assim, um segundo filtro no LabVIEW (filtro digital de Bessel, pág. 29).

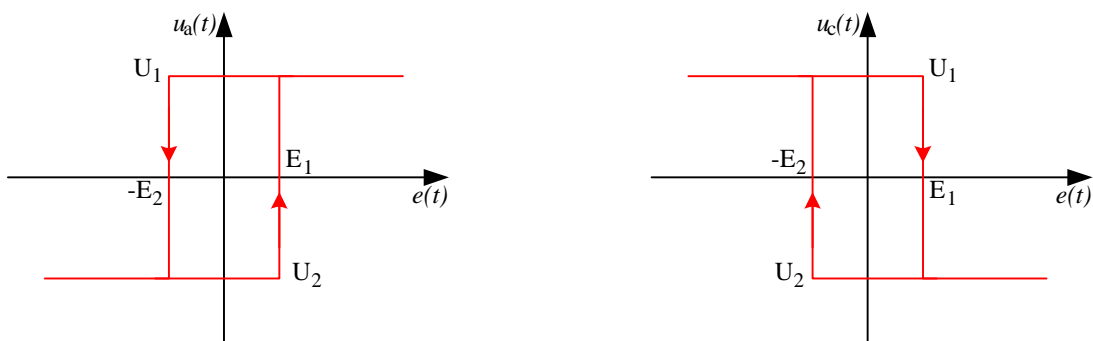


Figura 7 – Controladores Liga-Desliga com histerese.

A figura 7 nos mostra o seguinte:

1) Controlador do Aquecedor

- Se $u_a(t) = U_1$, é necessário que o valor de $e(t)$ desça abaixo de $-E_2$ para que haja um chaveamento para U_2 .
- Se $u_a(t) = U_2$, é necessário que o valor de $e(t)$ ultrapasse o valor de E_1 para que haja um chaveamento para U_1 .

2) Controlador do Cooler

- Se $u_c(t) = U_1$, é necessário que o valor de $e(t)$ ultrapasse o valor de E_1 para que haja um chaveamento para U_2 .
- Se $u_c(t) = U_2$, é necessário que o valor de $e(t)$ desça abaixo de $-E_2$ para que haja um chaveamento para U_1 .

Assim, para o presente trabalho, utilizou-se as seguintes lógicas de controle *liga-desliga* no *LABVIEW* :

1) Controlador do Aquecedor

- Se $u_a(t) = U_1 = 5$ VDC (bit 1), é necessário que o valor de $e(t)$ desça abaixo de $E_2 = -1$ para que haja um chaveamento para $U_2 = 0$ VDC (bit 0).
- Se $u_a(t) = U_2 = 0$ VDC (bit 0), é necessário que o valor de $e(t)$ ultrapasse o valor de $E_1 = 1$ para que haja um chaveamento para U_1 .

2) Controlador do Cooler

- Se $u_c(t) = U_1 = 5$ VDC (bit 1), é necessário que o valor de $e(t)$ ultrapasse o valor de $E_1 = 1$ para que haja um chaveamento para $U_2 = 0$ VDC (bit 0).
- Se $u_c(t) = U_2 = 0$ VDC (bit 0), é necessário que o valor de $e(t)$ desça abaixo de $E_2 = -1$ para que haja um chaveamento para $U_1 = 5$ VDC (bit 1).

Desse modo, utilizou-se neste projeto uma faixa $e(t)$ de $E_1 - (-E_2) = 2^\circ\text{C}$ distribuída uniformemente em torno da temperatura de referência (T_{ref}).

5. Estratégia de Controle com Variação da Planta

No estudo do sistema térmico em questão, considerando-se somente o caso de aquecimento, o processo foi modelado por uma função de transferência de primeira ordem dada por

$$G(s) = \frac{K}{sT + 1}.$$

Primeiramente, fez-se o levantamento das constantes de tempo (T) e dos ganhos (K) em malha aberta para os dois casos extremos, ou seja, com todas as janelas e portas fechadas (caso 1), e com todas as janelas e portas abertas (caso 2) e considerando-se, neste estudo, somente o sinal do sensor número 8 (S-08). Assim, os dados gerados e armazenados em arquivo pelo *LABVIEW* foram plotados conforme as figuras a seguir.

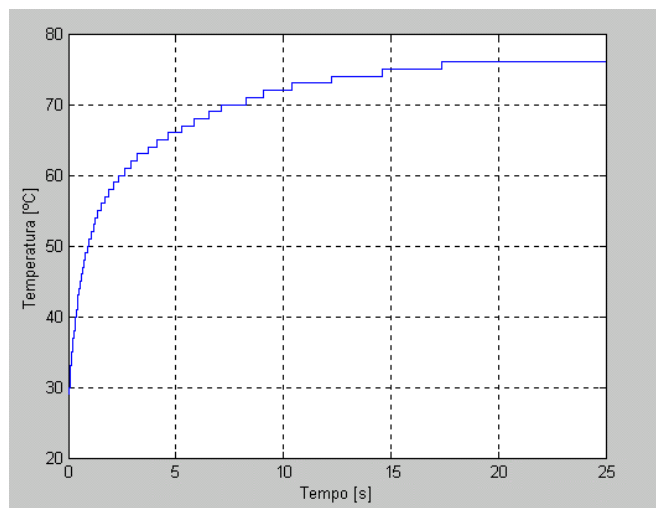


Figura 8 – Comportamento de malha aberta do caso 1.

No caso 1 partiu-se da temperatura inicial de 29°C com a curva saturando em 77°C, de onde tira-se que

$$K_f = 0,48$$

e para 63,7% de 77°C (49°C) calculou-se pelo MatLab

$$T_f = 4,5 \text{ s}$$

obtendo-se, assim, a seguinte função de transferência:

$$G_f(s) = \frac{0,48}{4,5s + 1}$$

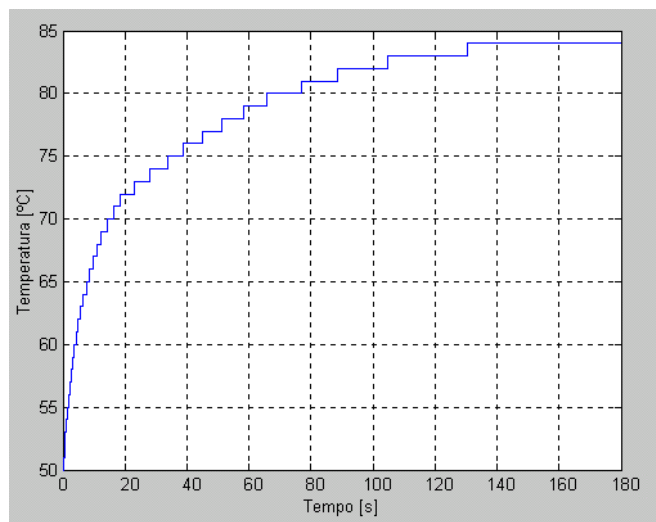


Figura 9 – Comportamento de malha aberta do caso 2.

No caso 2 partiu-se da temperatura inicial de 50°C com a curva saturando em 84,5°C, de onde tira-se que

$$K_a = 0,34$$

e para 63,7% de 84,5°C (53,8°C) calculou-se pelo MatLab

$$T_a = 12 \text{ s}$$

obtendo-se, assim, a seguinte função de transferência:

$$G_a(s) = \frac{0,34}{12s + 1}$$

Tanto os gráficos de malha aberta como os de malha fechada a seguir foram plotados a partir de arquivos gerados pelo LabVIEW (no mesmo arquivo compilador do controlador) e carregados (>load/>plot) no MatLab, onde essas foram as melhores definições ajustadas (com uma aquisição de dados (realimentação do sistema) a 1000 Hz (1ms) com um número de 20 pontos por segundo) para o correto funcionamento do sistema. Para um número maior de pontos o sistema se torna lento não respondendo às características de funcionamento desejadas.

Levantadas as curvas de malha aberta e obtidas as funções de transferência partiu-se, num segundo momento, para o levantamento das curvas de malha fechada. Realizou-se, para os casos 1 e 2, duas medidas em torno das temperaturas de referência de 40°C e 50°C para confronto posterior com as medidas simuladas no *MatLab*.

6. Simulação no MatLab – SIMULINK

De acordo com os parâmetros levantados anteriormente, da função de transferência, criou-se no software MatLab-SIMULINK® um modelo do sistema onde foram plotados os dados correspondentes às temperaturas levantadas em campo (40°C e 50°C, considerando neste estudo somente o sinal do sensor #8).

Para a simulação teórica utilizou-se o diagrama de blocos com realimentação unitária negativa, de acordo com a figura a seguir, para o caso 1.

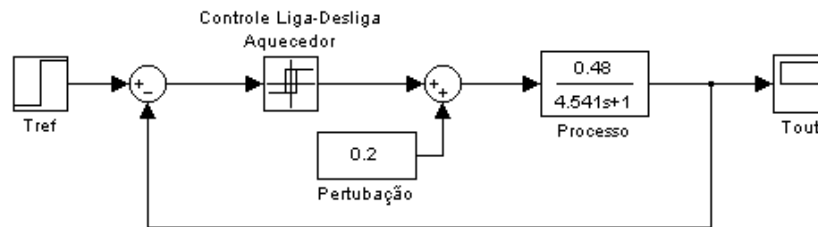


Figura 10 – Diagrama de blocos do caso 1.

Assim, neste caso, têm-se as seguintes curvas de *temperatura x tempo*:

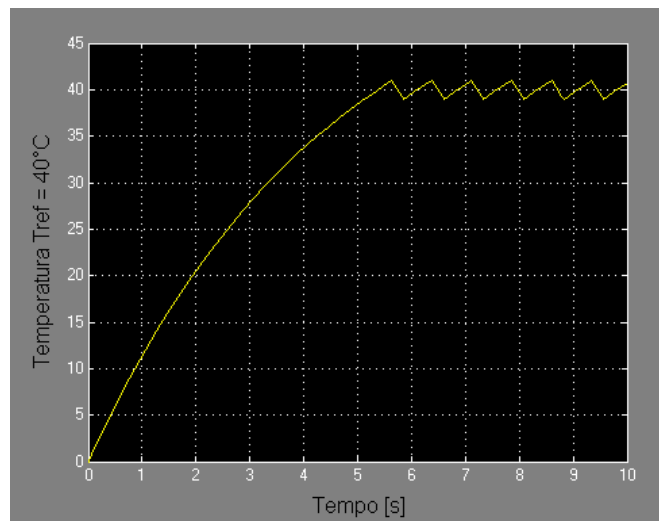


Figura 11 – Resposta a entrada degrau do caso 1 para Tref = 40°C.

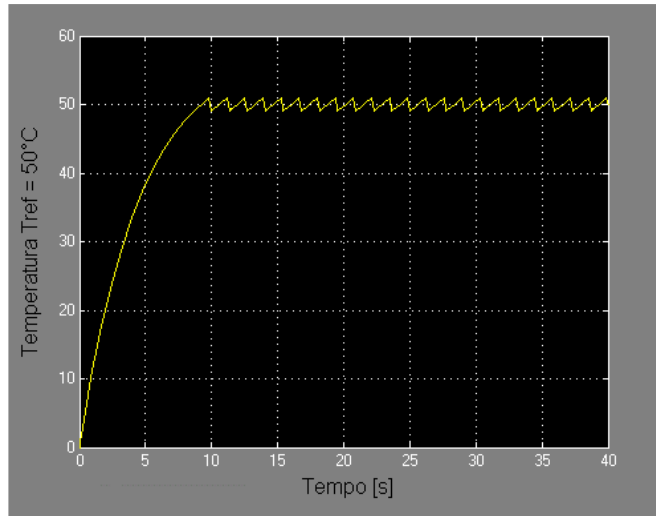


Figura 12 – Resposta a entrada degrau do caso 1 para Tref = 50°C.

Para a simulação teórica do caso 2 utilizou-se o diagrama de blocos com realimentação unitária negativa, de acordo com a figura a seguir.

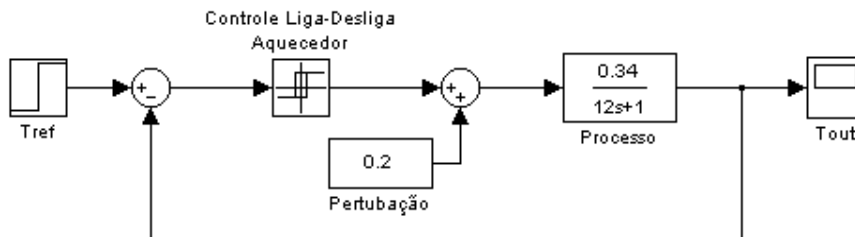


Figura 13 – Diagrama de blocos do caso 2.

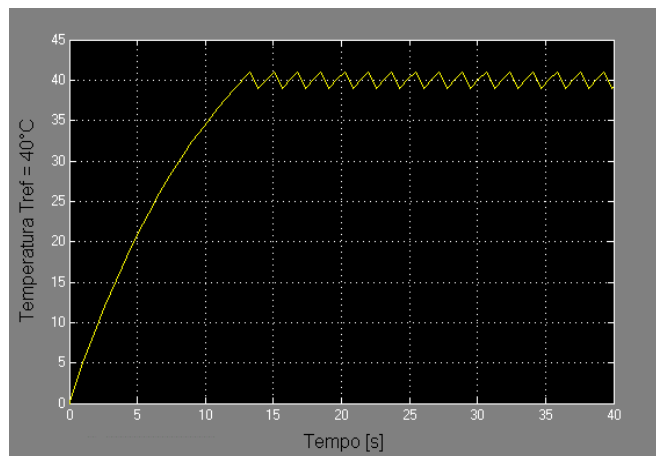


Figura 14 – Resposta a entrada degrau do caso 2 para Tref = 40°C.

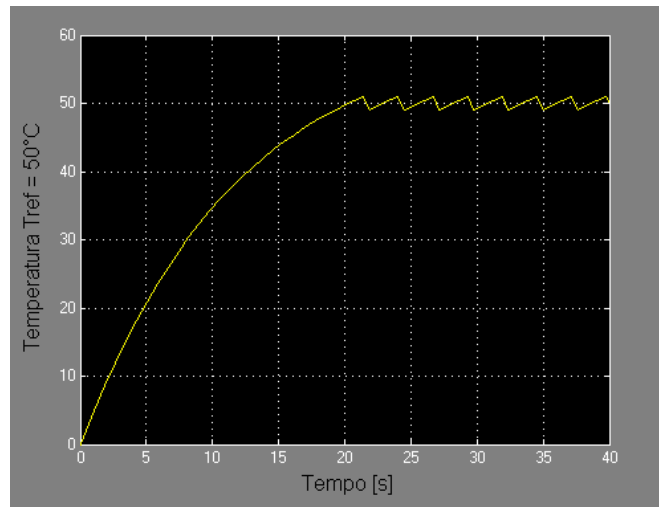


Figura 15 – Resposta a entrada degrau do caso 2 para Tref = 50°C.

Para os dois casos considerou-se, como uma boa aproximação para as perturbações a que eram submetidos (temperatura externa, umidade, etc), uma constante de valor médio de 0,2 de acordo com as características observadas em laboratório.

7. Resultados Experimentais

Para a estratégia de controle traçada, anteriormente, no caso de variação da planta obteve-se, conforme as figuras a seguir, as curvas capturadas pelo *LABVIEW* para os casos 1 e 2 nas temperaturas de setpoint de 40 e 50°C.

Partindo-se, inicialmente, do caso 1 as curvas a seguir foram plotadas.

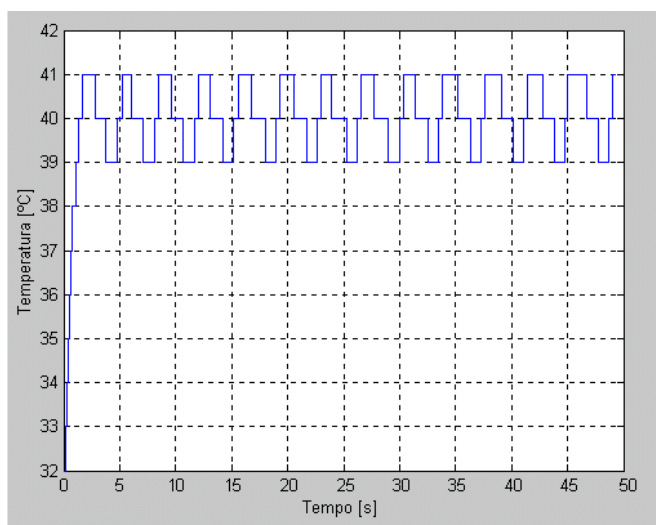


Figura 16 – Comportamento de malha fechada do caso 1 para Tref = 40°C.

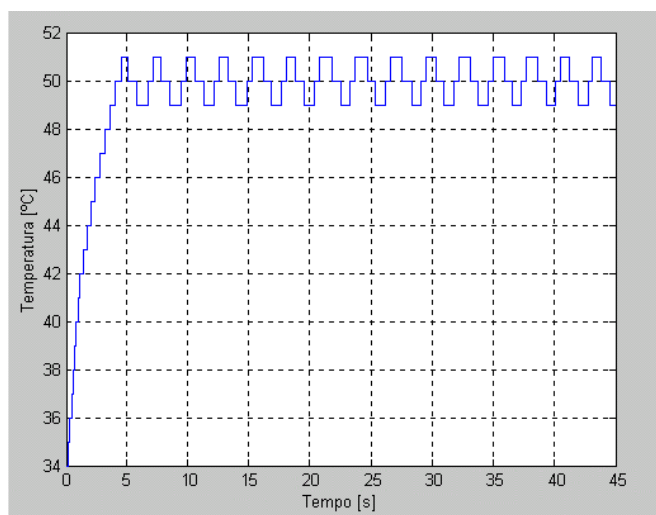


Figura 17 – Comportamento de malha fechada do caso 1 para Tref = 50°C.

Nos dois gráficos anteriores, para a aquisição dos dados em questão, partiu-se de temperaturas iniciais de 32°C ($T_{ref} = 40^\circ\text{C}$) e 34°C ($T_{ref} = 50^\circ\text{C}$). Para o caso 2 as seguintes curvas foram plotadas.

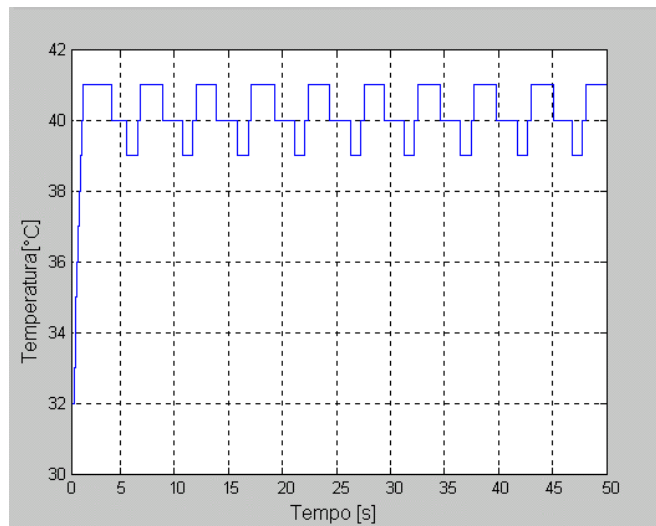


Figura 18 – Comportamento de malha fechada do caso 2 para $T_{ref} = 40^\circ\text{C}$.

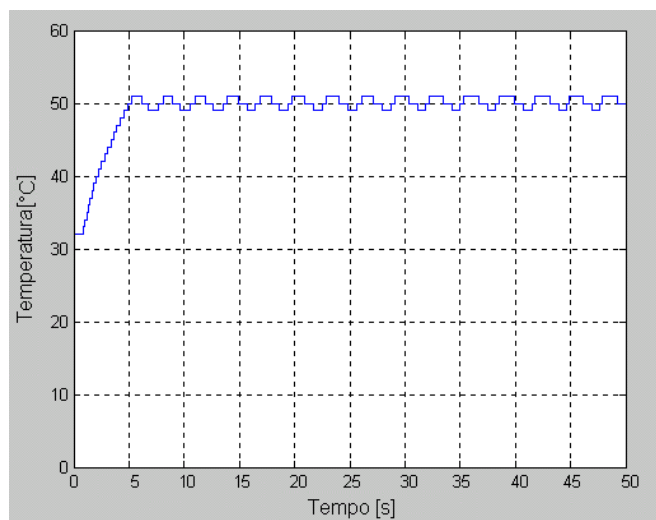


Figura 19 – Comportamento de malha fechada do caso 2 para $T_{ref} = 50^\circ\text{C}$.

Nos dois gráficos anteriores, para a aquisição dos dados em questão, partiu-se de temperaturas iniciais de 32°C ($T_{ref} = 40^\circ\text{C}$) e 34°C ($T_{ref} = 50^\circ\text{C}$).

Como as entradas analógicas do cartão *PCI-6024E* têm uma faixa de aquisição de $\pm 0,05$ a ± 10 V e, ainda, os sensores de temperatura *LM35* de acordo com o esquema de ligação implementado (Apêndice, pág. 54) nos dão sinais de escala $0 \text{ mV} + 10,0 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ bem pequena, os ruídos observados durante a aquisição dos dados são devido à esta pequena faixa com que estes sinais são coletados em relação à ampla faixa do cartão *PCI-6024E*, onde qualquer pequeno ruído nos dá uma considerável interferência no sistema. Uma forma de se amenizar ou até mesmo eliminar tal interferência seria a amplificação destes sinais logo após a saída dos sensores a níveis consideráveis propiciando um sistema mais preciso.

Em todos os casos utilizou-se na lógica dos controladores uma faixa de histerese de 2°C que pôde ser observada nos gráficos coletados de acordo com os casos listados anteriormente. Esta amplitude e frequência de oscilação são funções do intervalo E_1 e E_2 , cuja determinação foi feita levando-se em consideração a precisão desejada, os níveis de ruído e a vida útil dos componentes.

8. Conclusões

O sistema foi implementado apesar das limitações físicas (equipamentos, ruído) e computacionais (LabVIEW) que geraram resultados gráficos de baixa definição e difícil visualização, mas que não impossibilitou o levantamento das variáveis das funções de transferência pelo MatLab.

Pôde-se observar, também, através de resultados experimentais e simulações que este tipo de ação de controle possui uma série de limitações, sendo que a principal é o que diz respeito ao comportamento dinâmico, no caso, ao regime permanente do sistema em malha fechada, que tendem a se agravar se houver presença de ruído nos sinais tratados. Uma das formas discutidas anteriormente para se amenizar ou até mesmo eliminar tal interferência causada por ruídos seria a amplificação destes sinais logo após a saída dos sensores a níveis consideráveis propiciando um sistema mais preciso.

As aplicações deste tipo de controle restringem-se a sistemas onde não é necessário precisão nem um bom desempenho. A ação de controle liga-desliga pode assim ser considerada a ação de controle mais simples e mais econômica. Como exemplos corriqueiros de aplicação deste tipo de controle temos: controle de temperatura de certos tipos de ambiente, termostato da geladeira, controle de nível d'água a partir de "bóias", etc.

Como proposta de continuação sugere-se a implementação deste processo térmico predial utilizando-se as técnicas de controle *PID* e *fuzzy* para um estudo comparativo entre estas duas ações bastante utilizadas atualmente em outros sistemas, em termos de qualidade e eficiência de controle de acordo com as pretensões idealizadas inicialmente para este trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] NATIONAL INSTRUMENTS, *Measurement and Automation Catalogue*. National Instruments, www.ni.com, USA, 1999.
- [2] NATIONAL INSTRUMENTS, *SCB-68 68-Pin Shielded Connector Block Installation Guide*. National Instruments, www.ni.com, USA, February 1994.
- [3] R. A. LANDO & S. R. ALVES, *Amplificador Operacional – Teoria, Aplicações e Servo Mecanismo*. Livros Érica Editora LTDA, São Paulo, SP, 1983.
- [4] A. M. V. CIPELLI & W. J. SANDRINI, *Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos*. Livros Érica Editora LTDA, São Paulo, SP, 4^a Edição, 1980.
- [5] H. TAUB & D. SCHILLING, *Eletrônica Digital*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, SP, 1982.
- [6] J. MILLMAN & C. C. HALKIAS, *Eletrônica – Dispositivos e Circuitos*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, SP, Volume 2, 1981.
- [7] H. CREDER, *Instalações de Ar Condicionado*. LTC, 4^a Edição, 1990.
- [8] NBR 6401, *Norma ABNT*. 1980.
- [9] JOHNSON CONTROLS, *Curso de Ar Condicionado*. Johnson Controls, NEP, Abril de 2000.
- [10] TALEBI-DARYANI (Polytechnics of Cologne, Faculty of mechanical engineering, Department for measurement and control engineering) & CLAUDIA LUTHER (JCI – Johnson

Controls – Cologne Germany), *Application of Fuzzy Control for Optimal Operation of Complex Chilling Systems*. ICAFS'96.

[11] June 25-27, 1996, Second International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing, P- 165- 175, Conference Proceedings, Siegen Germany.

[12] K. OGATA, *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 2^a Edição, 1993.

[13] J. R. C. JÚNIOR, *Controladores PID Industriais com Sintonia Automática por Realimentação a Relé*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1999.

[14] R. H. BISHOP, *LabVIEW Student Edition 6i*. Prentice-Hall of U.S.A., New Jersey, NJ, 2001.

[15] MATLAB®, *High-Performance Numeric Computation and Visualization Software, User's Guide*. The Math Works, Inc., U.S.A., 1993.

[16] Yasuda, Y. & Crotty, S., *A PID Controller with Overshoot Suppression Algorithm*. ISA 1990, págs. 1849 a 1857.

Apêndice

Descrição da Placa PCI-6024E

A placa *PCI-6024E*, utilizada neste projeto, pertence à família *NI 6024E* que representa uma das famílias de placas desenvolvidas pela empresa norte-americana *National Instruments* especializada na produção de *hardware* e *software* para medição e automação. As placas da família *NI 6024E* são instrumentos de aquisição de dados com resolução de 12 bits de alta performance e confiabilidade que operam em uma ampla variedade de aplicações.

A família *NI 6024E* possui as seguintes especificações de canal, velocidade e resolução:

Barramento	-----	PCI, PCMCIA
Entradas Analógicas	-----	16 canais simples ou 8 canais diferenciais
Resolução	-----	12 bits
Taxa de Amostragem	-----	200 kHz
Faixa de Entrada	-----	± 0.05 a ± 10 V
Saídas Analógicas	-----	2
Resolução	-----	12 bits
Taxa de Saída	-----	10 kS/s
Faixa de Saída	-----	± 10 V
Entradas/Saídas Digitais	-----	8
Counter/Timers	-----	2, 24-bit
Triggers	-----	Digital

Para a realização deste projeto utilizou-se apenas alguns recursos da placa PCI-6024E, como: alimentação dos sensores de temperatura LM35 (5VDC) e leitura do sinal proveniente dos mesmos com as entradas analógicas (ACH), alimentação do circuito de acionamento do secador de cabelo (5VDC) e comando do mesmo com saída digital (DIO - 5VDC), e interface do driver de aquisição de dados da National Instruments NI-DAQ com o software C++ Builder 5 responsável por todo o processo de controle de temperatura da planta.

A figura 20 mostra o diagrama de blocos detalhado da placa PCI-6024E.

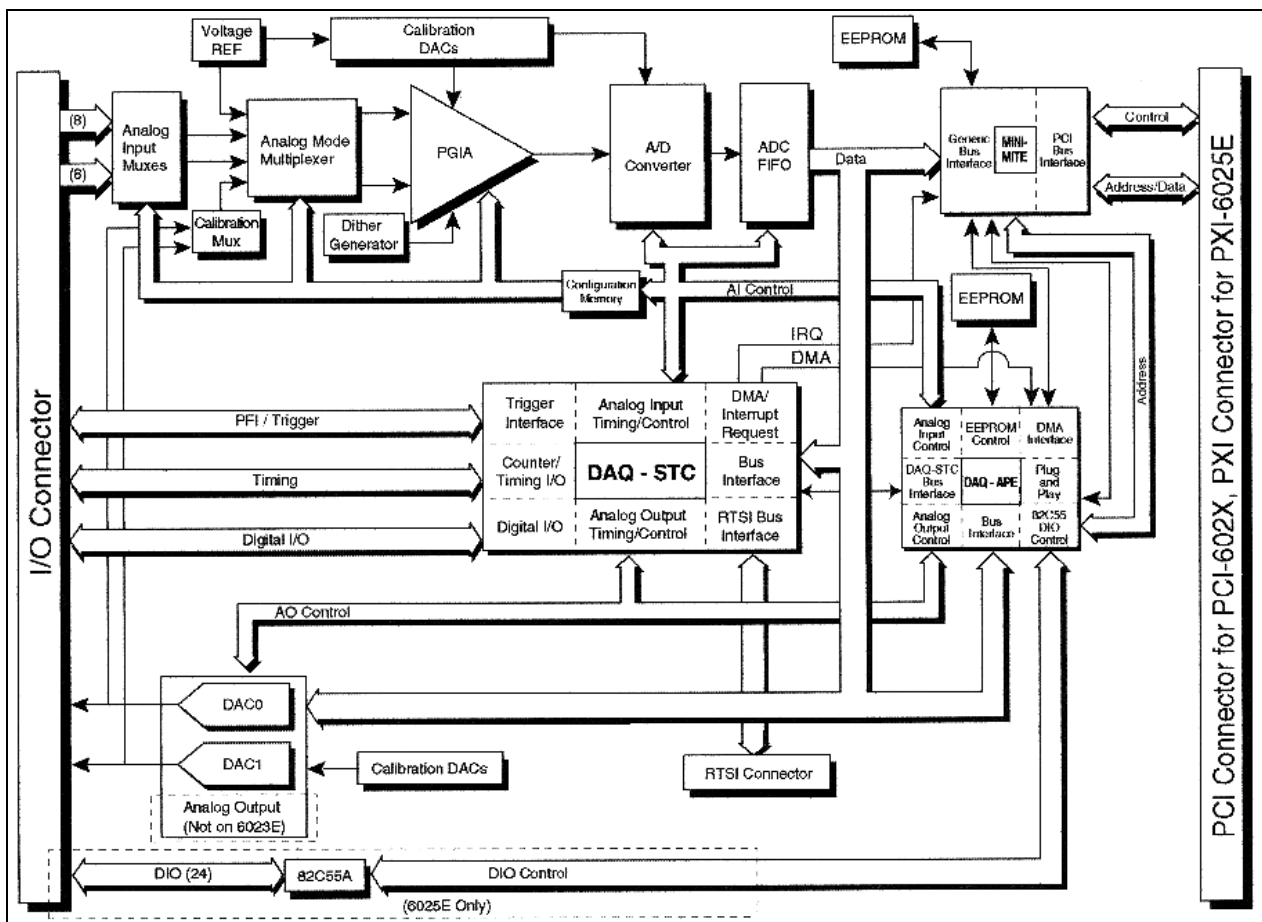


Figura 20 – Diagrama de Blocos da placa PCI-6024E.

Bloco Conector Isolado de 68 pinos SCB-68

O SCB-68 é uma placa com 68 terminais conectores de fácil manejo da *National Instruments* utilizada para o acondicionamento de sinais de entrada e saída que se interligam aos canais do cartão *PCI-6024E* através de um cabo conector *SCSI* fêmea de 68 pinos.

A figura 21 mostra o esquemático físico da placa *SCB-68*.

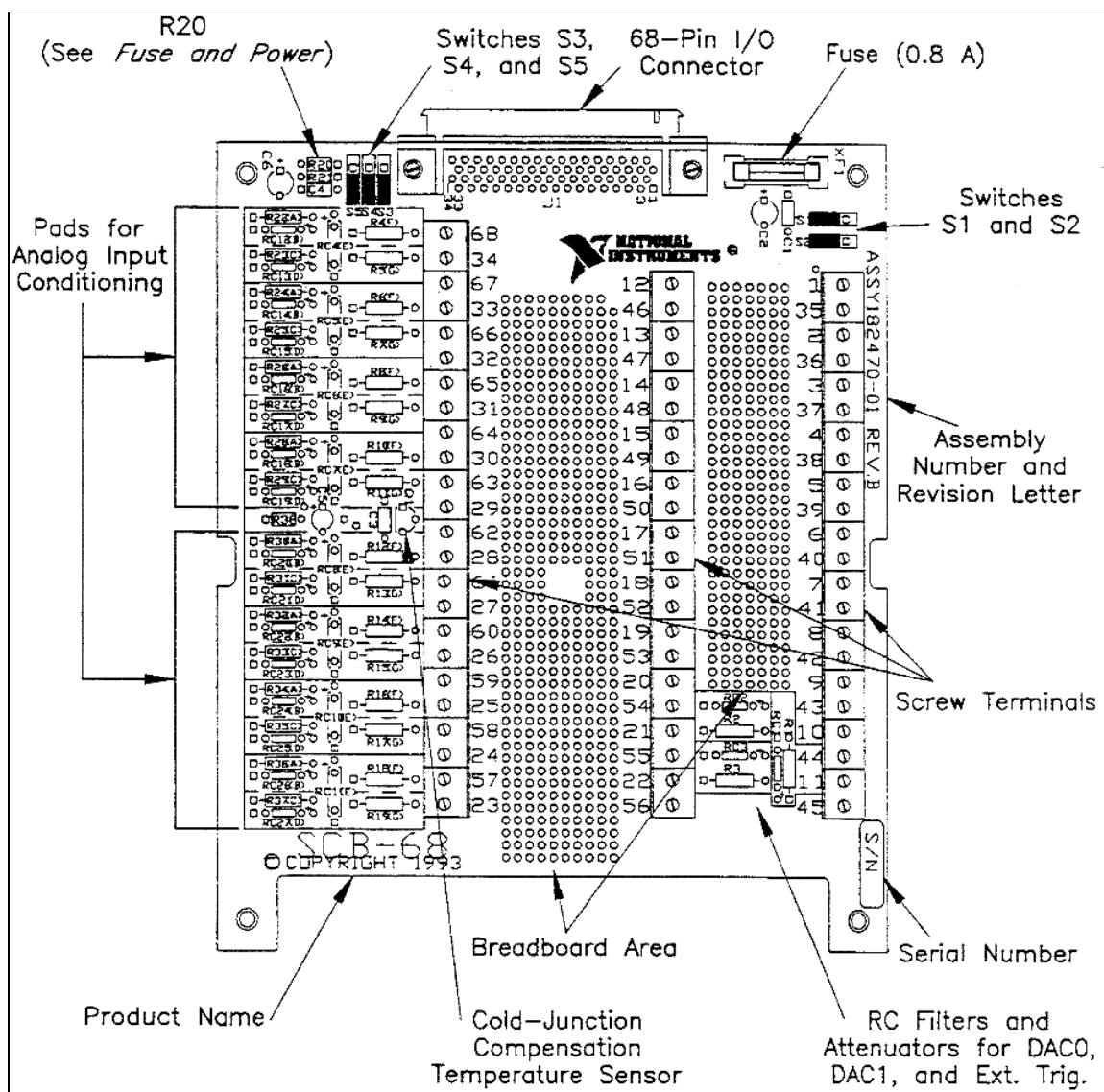


Figura 21 – Diagrama físico da placa *SCB-68*.

A figura 22 mostra a descrição dos 68 terminais da placa SCB-68.

ACH8	34	68	ACH0
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	32	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH3	30	64	AIGND
AIGND	29	63	ACH11
ACH4	28	62	AISENSE
AIGND	27	61	ACH12
ACH13	26	60	ACH5
ACH6	25	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH15	23	57	ACH7
DAC0OUT ¹	22	56	AIGND
DAC1OUT ¹	21	55	AOGND
RESERVED	20	54	AOGND
DIO4	19	53	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	51	DIO5
DIO6	16	50	DGND
DGND	15	49	DIO2
+5 V	14	48	DIO7
DGND	13	47	DIO3
DGND	12	46	SCANCLK
PFI0/TRIG1	11	45	EXTSTROBE
PFI1/TRIG2	10	44	DGND
DGND	9	43	PFI2/CONVERT
+5 V	8	42	PFI3/GPCTR1_SOURCE
DGND	7	41	PFI4/GPCTR1_GATE
PFI5/UPDATE	6	40	GPCTR1_OUT
PFI6/WFTRIG	5	39	DGND
DGND	4	38	PFI7/STARTSCAN
PFI9/GPCTR0_GATE	3	37	PFI8/GPCTR0_SOURCE
GPCTR0_OUT	2	36	DGND
FREQ_OUT	1	35	DGND

Figura 22 – Pinagem da placa SCB-68.

Circuito Eletrônico de Acionamento do Secador de Cabelo

Para o acionamento do secador de cabelo de acordo com as características dos equipamentos utilizados, mais especificamente das placas *SCB-68* e *PCI-6024E*, implementou-se o circuito da figura 23 que nos proporcionou uma melhor performance, rapidez de comando, como também, uma melhor isolamento elétrica (DC/AC) dos equipamentos. Outros tipos de circuito eletroeletrônicos também foram experimentados, mas nenhum deles conseguiu atingir o desempenho desejado.

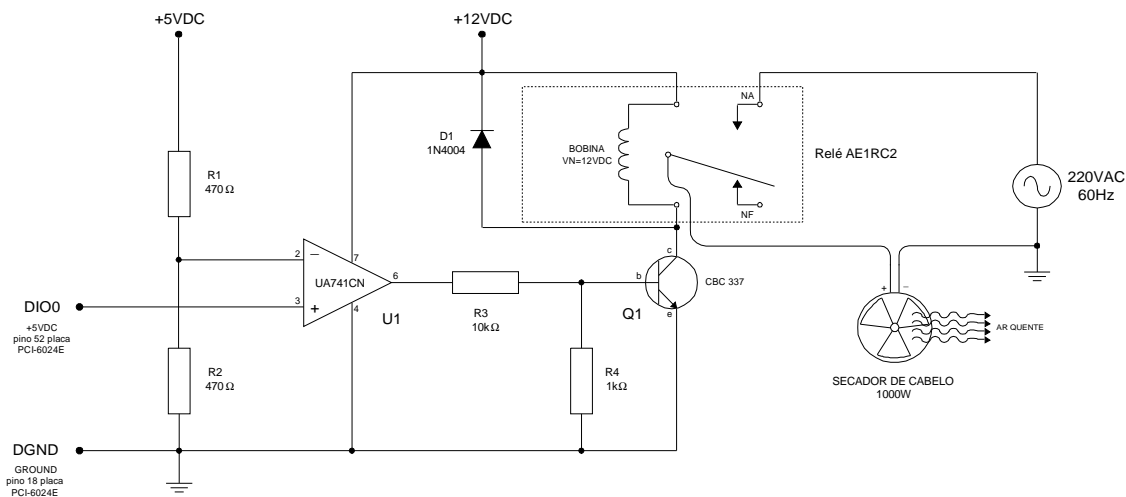


Figura 23 – Circuito eletrônico de acionamento do secador de cabelo.

O circuito da figura 23 utiliza o amplificador operacional U1 como um comparador que com o divisor de tensão, de acordo com as resistências R1 e R2 indicadas, tem-se um sinal de referência no pino 2 (U1) em torno de 2,5VDC, onde a tensão de 5VDC foi obtida a partir dos terminais 8 (5V) e 56 (AIGND) da placa *PCI-6024E*. A tensão de 12VDC foi obtida a partir da fonte interna do PC

para o acionamento da bobina do relé AE1RC2. Assim, quando o comando de acionamento do secador for solicitado, ou seja, a saída digital DIO0 for setada em nível lógico 1, será gerado um sinal de 5VDC no pino 3 (U1) que sendo maior que a tensão de referência 2,5VDC, permitirá um nível de tensão na saída do comparador U1 (pino 6) que polarizará o transistor Q1 (operando como chave \Rightarrow chave fechada) e induzirá, assim, uma corrente suficiente pela bobina do relé AE1RC2 que fechará seu contato normalmente aberto NA, permitindo a continuidade da rede AC até os terminais de alimentação do secador de cabelo proporcionando, assim, seu acionamento.

Para o comando de desligamento do secador opera-se setando a saída digital DIO0 em nível lógico 0, ou seja, a tensão passará de 5VDC para 0VDC no pino 3 de U1. Neste caso, a tensão de referência 2,5VDC será maior que a de entrada e, com isso, a saída de U1 terá um outro nível de tensão que não permitirá a polarização do transistor Q1 (operando como chave \Rightarrow chave aberta) e, conseqüentemente, não induzirá corrente pela bobina do relé AE1RC2, fazendo com que a lâmina do mesmo volte para sua posição original NF (normalmente fechado) impossibilitando, com isso, a continuidade da rede AC até os terminais de alimentação do secador de cabelo ocasionando, assim, seu desligamento.

Circuito Eletrônico de Acionamento do Cooler

Utilizou-se, neste projeto, como parte do controle do processo térmico um cooler, dispositivo bastante usado no interior de equipamentos eletrônicos que operam em alta temperatura refrigerando, ou seja, retirando o calor do ambiente (exaustor) e contendo o aumento de temperatura no interior dos mesmos. Assim, para o acionamento do *cooler* de acordo com as características dos equipamentos utilizados, mais especificamente das placas *SCB-68* e *PCI-6024E*, implementou-se como no circuito de acionamento do secador de cabelo o circuito da figura 24 que nos proporcionou uma melhor performance e rapidez de comando.

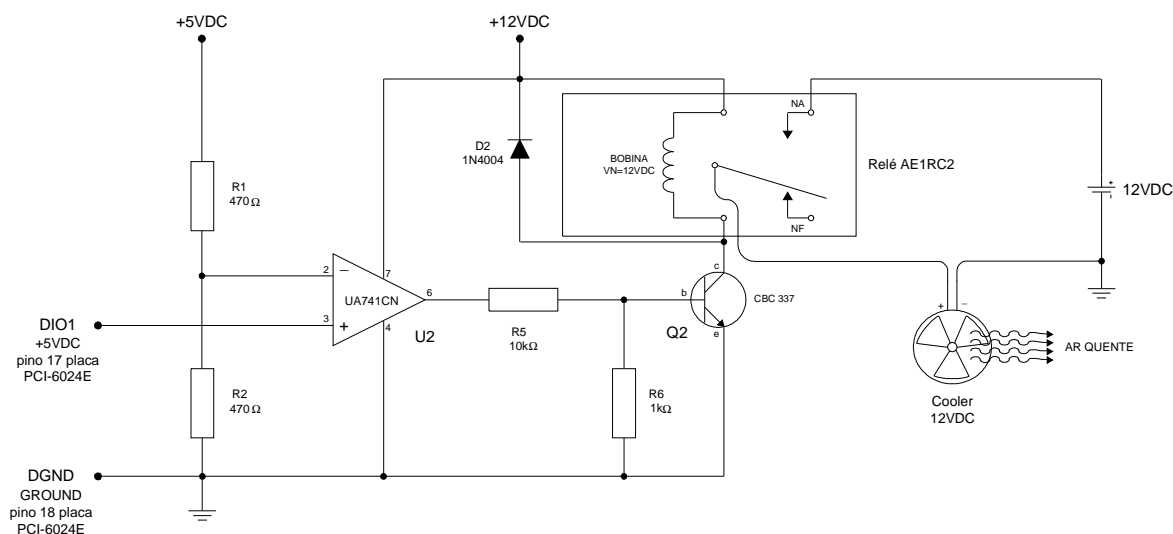


Figura 24 – Circuito eletroeletrônico de acionamento do cooler.

O funcionamento do circuito da figura anterior é o mesmo da figura 23, salvo as características elétricas dos dispositivos controlados.

Circuito dos Sensores de Temperatura

Para a implementação deste projeto optou-se, após algumas semanas de pesquisa e discussão, pela utilização do sensor de temperatura *LM35* da *National Semicondutores*, devido às suas características e especificações estarem de acordo com as características do projeto e, também, com os equipamentos utilizados, sendo assim, vistas como necessárias para um melhor aproveitamento e precisão na medição de temperatura da planta.

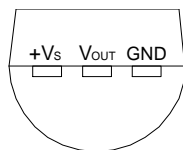


Figura 25 – Sensor de temperatura *LM35* visto por baixo.

O sensor de temperatura *LM35* é um circuito integrado presente em uma cápsula transistor *TO-92* hermética, cuja saída fornece uma tensão linearmente proporcional à escala de temperatura Celsius, onde seu range de temperatura vai de -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$ sem requerer nenhum tipo de calibração externa.

Todas as características do *LM35* são descritas a seguir.

Calibração	-----	$^{\circ}$ Celsius (Centígrado)
Fator de Escala Linear	-----	$0\text{ mV} + 10.0\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
Precisão Garantida	-----	0.5°C a $+25^{\circ}\text{C}$
Range	-----	-55°C a $+150^{\circ}\text{C}$
Operação	-----	4 a 30 V
Corrente de Dreno	-----	$< 60\mu\text{A}$
Aquecimento	-----	$0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ar Parado)
Não-Linearidade Típica	-----	$\pm 1/4^{\circ}\text{C}$
Impedância de Saída Baixa	-----	$0.1\ \Omega$ (Carga de 1mA)

A figura 26, a seguir, mostra o diagrama completo do circuito integrado do sensor *LM35* para um melhor entendimento de seu funcionamento.

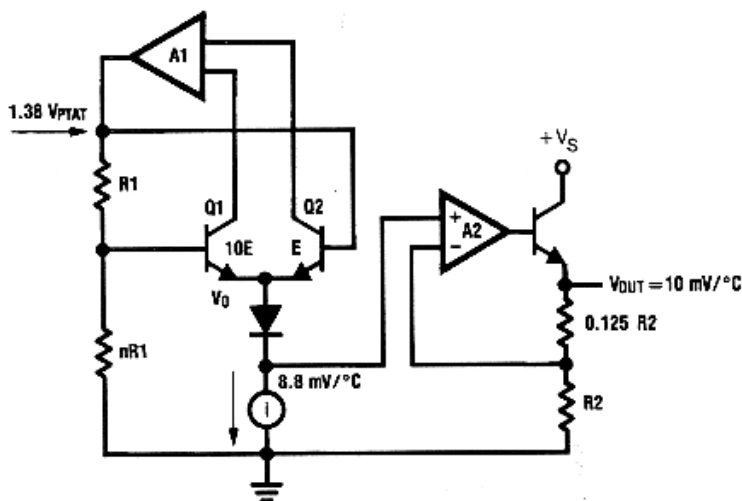


Figura 26 – Diagrama de blocos do sensor de temperatura LM35.

Para que pudéssemos fazer a integração do LM35 ao projeto adotamos a aplicação típica do sensor de acordo com a figura 27 que nos proporcionou uma ampla faixa de operação de +2°C a +150°C. A alimentação fornecida aos 8 (oito) sensores do projeto foi de 5VDC do pino 14 (PCI-6024E) e a referência GND do pino 56 (PCI-6024E), e os sinais de saída conectados aos pinos 68 (ACH0), 33 (ACH1), 65 (ACH2), 30 (ACH3), 28 (ACH4), 60 (ACH5), 25 (ACH6) e 57 (ACH7).

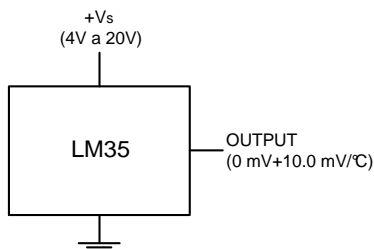


Figura 27 – Aplicação básica do sensor de temperatura LM35.

Assim, para a conexão dos 8 (oito) sensores à placa *PCI-6024E*, fez-se o esquema de montagem da figura 28.

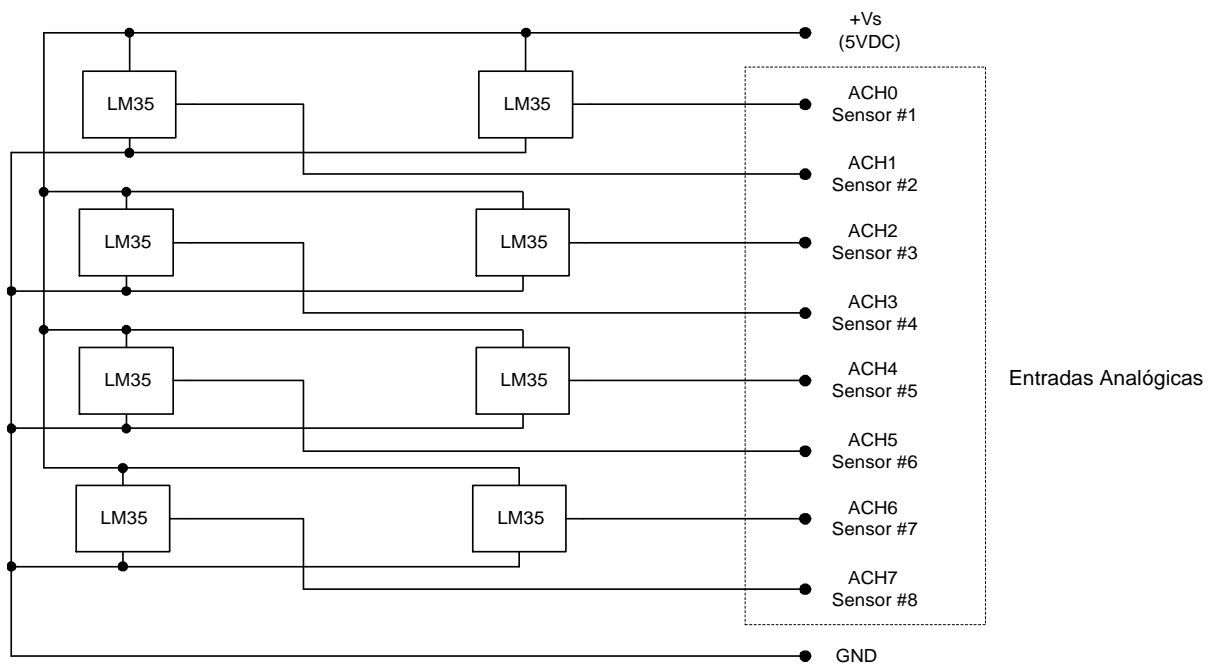


Figura 28 – Esquema de montagem dos sensores de temperatura *LM35*.

Desta forma, como a tensão de saída dos sensores é dada na proporção de 10mV para cada °C, conseguiu-se obter as temperaturas em °C, de cada ambiente da planta, multiplicando-se os valores de tensão correspondentes por 100.