



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS MOSSORÓ
CURSO BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JEFFERSON COSTA CONCEIÇÃO SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM UMA PLANTA
TÉRMICA**

MOSSORÓ – RN

2014

JEFFERSON COSTA CONCEIÇÃO SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM UMA PLANTA
TÉRMICA**

**Monografia apresentada a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA, para a obtenção do
título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.**

**Orientador: Prof. Msc. Marcelo Roberto Bastos
Guerra Vale – UFERSA**

**Co-orientadora: Profa. Dsc. Danielle Simone S.
Casillo – UFERSA**

MOSSORÓ – RN

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

S586i Silva, Jefferson Costa Conceição.

Implementação de um sistema de controle em uma planta
térmica./ Jefferson Costa Conceição Silva -- Mossoró, 2014.
60f.: il.

Orientador: Prof.. Me. Marcelo Roberto B. G. Vale
Co-orientadora: Prof^a Dra. Danielle Simone da Silva Casillo

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de
Graduação.

1.Planta térmica - Controle PID . 2. Plataforma Arduino. 3.
Temperatura. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /044-14

CDD: 622.43

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba
CRB-15/452

JEFFERSON COSTA CONCEIÇÃO SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM UMA PLANTA
TÉRMICA**

**Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
para a obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia**

APROVADA EM: 25/ 02/ 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.sc. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale (UFERSA)
Presidente e Orientador

Profa. D.sc. Danielle Simone da Silva Casillo (UFERSA)
Co-orientadora

Prof. M.sc. Mara Franklin Bonates (UFERSA)
Primeiro Membro

Prof. D.sc. Dannel Cavalcante Lopes (UFERSA)
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus grandes heróis, que me deram apoio, incentivo e carinho em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Msc. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale pela paciência, atenção, compromisso e horas de dedicação para me ajudar a concluir o presente trabalho.

A minha co-orientadora, Prof. Dsc. Danielle Simone da Silva Casillo pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Meus agradecimentos aos amigos, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de um controle térmico em um protótipo utilizando os conceitos básicos de controle PID. Para isso foram estudados métodos de sintonia de controle PID e logo em seguida feito um ajuste empírico dos parâmetros de controle PID. Foi desenvolvido um protótipo e um circuito de controle utilizando a plataforma Arduino. Os testes avaliaram o tempo de acomodação em diferentes setpoints e foi verificado o consumo de energia consumida pelo atuador. O resultado obtido foi um controle térmico que se mostra eficaz e desejado.

Palavra-chave: Controle PID. Plataforma Arduino. Temperatura.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: ARDUINO MEGA 2560.....	8
FIGURA 2: SINAL DE SAÍDA ANALÓGICO.....	9
FIGURA 3: SINAL DE SAÍDA DIGITAL.....	9
FIGURA 4: SHIELD WIRELESS E SD ARDUINO	11
FIGURA 5: ARDUINO IDE	12
FIGURA 6: BLOCOS DE UM SISTEMA DE CONTROLE.....	14
FIGURA 7: EXEMPLO DE MALHA ABERTA	15
FIGURA 8: EXEMPLO DE MALHA FECHADA	16
FIGURA 9: AÇÃO LIGA E DESLIGA.....	17
FIGURA 10: ERRO DE SETPOINT	17
FIGURA 11: MOVIMENTO DA AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL.....	18
FIGURA 12: MOVIMENTO DE AÇÃO DE CONTROLE INTEGRAL.....	19
FIGURA 13: MOVIMENTO DE AÇÃO DE CONTROLE PI	20
FIGURA 14: MOVIMENTO DE AÇÃO DE CONTROLE PD.....	21
FIGURA 15: AÇÃO DO CONTROLADOR PID	22
FIGURA 16: SISTEMA DE CONTROLE TÉRMICO PID.....	24
FIGURA 17: COMPONENTES INTERNOS DA PLANTA	25
FIGURA 18: FLUXO DE AR NO INTERIOR DA PLANTA TÉRMICA.....	25
FIGURA 19: PLANTA TÉRMICA	26
FIGURA 20: CIRCUITO ESQUEMÁTICO.....	27
FIGURA 21: SETPOINT 55°C	30
FIGURA 22: VARIÁVEL MANIPULADA PARA 55°C	30
FIGURA 23: SETPOINT 65°C	31
FIGURA 24: VARIÁVEL MANIPULADA PARA 65°C	31
FIGURA 25: SETPOINT 45°C COM ARREDONDAMENTO.....	32
FIGURA 26: VARIÁVEL MANIPULADA PARA 45°C ARREDONDADOS.....	32
FIGURA 27: SETPOINT 45°C	33
FIGURA 28: VARIÁVEL MANIPULADA PARA 45°C	33
FIGURA 29: TESTE COM VARIAÇÃO DO SETPOINT	34
FIGURA 30: GRÁFICO DO MV PARA VARIAÇÃO DO SETPOINT	34
FIGURA 31: SISTEMA DE CONTROLE	41
FIGURA 32: EXAUSTOR.....	41
FIGURA 33: ARDUINO E CIRCUITO	42
FIGURA 34: PLANTA TÉRMICA	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ESPECIFICAÇÕES DE MODELOS ARDUINO	7
TABELA 2: VALORES DOS PARÂMETROS PID COM AJUSTE.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

K_d	Ganho Derivativo
K_i	Ganho Integral
K_p	Ganho Proporcional
CV	Variavel Controlada
DC	Direct Current
I/O	Input/Output
IDE	Integrated Development Environment
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
MISO	Multiple Input and Sigle Output
MV	Variavel Manipulada
PID	Proporcional - Integrativo - Derivativo
PWM	Pulse-Width Modulation
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
SIMO	Single Input and Multiple Output
SISO	Single Input and Sigle Output
USB	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

RESUMO.....	I
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	II
LISTA DE TABELAS.....	III
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	IV
SUMÁRIO.....	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 A PLATAFORMA ARDUINO.....	5
2.1.1 Hardware	7
2.1.1.1 Sensores	8
2.1.1.2 Atuadores.....	10
2.1.1.3 <i>Shields</i>	11
2.1.2 Software	11
2.1.3 Aplicações.....	12
2.2 CONTROLE CLÁSSICO	14
2.2.1 Malha Aberta.....	15
2.2.2 Malha Fechada	15
2.2.3 Classificação dos Controladores Industriais	16
2.2.3.1 Controle ON-OFF.....	16
2.2.3.2 Controle Proporcional.....	18
2.2.3.3 Controle Integral.....	19
2.2.3.4 Controle Proporcional-Integral.....	20
2.2.3.5 Controle Proporcional-Derivativo	21
2.2.3.6 Controle Proporcional-Integral-Derivativo	21
3 PLANTA TÉRMICA.....	23
3.1 COMPONENTES DO PROTÓTIPO.....	23
3.2 DESENVOLVENDO O PROTÓTIPO	24
3.3 DESENVOLVENDO O CÓDIGO.....	27
4 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 AJUSTE EMPÍRICO.....	29

4.1.1	Setpoint 55°C	29
4.1.2	Setpoint 65°C	30
4.1.3	Setpoint 45°C	31
4.1.4	Setpoint Variável.....	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
	REFERÊNCIAS	37
	APÊNDICE 1 – CÓDIGO FONTE.....	38
	APÊNDICE 2 – FOTOS.....	41
	ANEXO 1 – DATASHEET BD139	43
	ANEXO 2 – DATASHEET SENSOR LM35.....	46

1 INTRODUÇÃO

A matéria é composta de átomos e moléculas que estão sempre em agitação, e segundo Sears, Zemansky e Young (1997), este grau de agitação das partículas informa indiretamente o quão frio ou quente está a matéria em relação a algum padrão definido, e isto é chamado de temperatura. É comum confundir conceitos de temperatura e de calor. No entanto são definições diferentes que se relacionam. Ainda segundo Sears, Zemansky e Young (1997), o calor pode ser definido como a energia em trânsito de um corpo a outro devido à diferença de temperatura, e sua unidade de representação no Sistema Internacional é o Joule.

A temperatura é uma das grandezas mais utilizadas na indústria de processos e seu uso se deve pelo fato de a temperatura ser um fator determinante que modifica características físicas e até químicas da matéria. Tendo o controle da temperatura, é possível realizar desde cozimento de alimentos até fabricação de ligas metálicas.

A medição da temperatura foi fato de observação das ciências a anos, pesquisadores como Galileio¹, Fahrenheit², entre outros, desenvolveram modelos, equipamentos ou escalas de medição de temperatura até chegar ao que é conhecido hoje. Os termômetros tornaram-se os instrumentos mais utilizados para medir a temperatura de um corpo e são utilizados vastamente em sensores chamados de termostatos pela indústria.

Com a revolução industrial no século XVIII, houve crescente desenvolvimento de tecnologias, presentes também na termodinâmica, que fundamentou conceitos de entropia e conservação de energia, contidos na sua 2ª Lei da Termodinâmica. Isto permitiu, segundo Ogata (2003), que as indústrias pudessem tabalhar com processos térmicos de altas temperaturas. Tornou-se necessários dominar técnicas de controle de temperatura, o que também impulsionou o estudo crescente da teoria de controle.

As indústrias foram implementando tipos de controles automáticos com as mais diversas aplicações. Com isto o controle automático tornou-se essencial em qualquer campo

¹ Galileo Galilei (1564-1642) foi físico, matemático, astrônomo e filósofo italiano, grande idealizador na revolução científica.

² Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) foi físico e engenheiro, inventou o primeiro termômetro de mercúrio.

da engenharia e da ciência. Desta forma, os desenvolvedores foram em busca de conceitos e novas técnicas que pudessem estabelecer em seus processos. O primeiro trabalho significativo de controle automático foi criado por James Watt³, que se caracterizava por ser um regulador de velocidade centrífuga de uma máquina a vapor. Outros nomes importantes surgiram nos séculos XIX e XX como: Minorsky, Hazen, Nyquist, entre outros.

O primeiro controle térmico automático de uma planta térmica foi o controle ON-OFF. Este controle é eficaz e cumpre o que promete, é muito popular em refrigeradores doméstico, fornos, ferros de passar roupas, entre outros. Entretanto, este tem alguns pontos fracos, quando o grau de exigência e confiabilidade nos sistemas de controle exigem uma maior precisão e durabilidade dos equipamentos como em estufas de produtos alimentícios industriais, aquário de peixes raros e sensíveis, câmaras de tratamentos térmicos industriais etc. Nesses casos é recomendado o uso de um controle que possa resultar em uma melhor precisão.

O controle Proporcional Integral Derivativo (PID) é muito usado pela indústria em seus projetos por ser robusto e facilmente adaptável em diversos problemas da engenharia de controle. O PID se torna mais interessante que o controle ON-OFF, já que o ON-OFF trabalhando em frações de segundos durante muito tempo, levaria o equipamento a exaustão e conseqüentemente entraria em colapso. Isto acontece devido a fadiga dos equipamentos eletromecânicos no movimento repetitivo da chave liga e desliga, ocorrendo então a ruptura desta, o que não é interessante para o sistema de controle.

O controle PID, pelo contrário, deixa o equipamento sempre ligado, porém com um consumo de energia sempre baixo. Isto durante um longo período apresenta vantagens em comparação com o ON-OFF.

³ James Watt (1736-1819) foi matemático e engenheiro escocês, construtor de instrumentos científicos, que se destacou pelos melhoramentos que introduziu no motor a vapor, mundialmente reconhecido pela unidade de potência de energia - o watt.

1.1 MOTIVAÇÃO

O projeto surgiu da ideia de aplicar conhecimentos adquiridos da teoria de controle e da possibilidade em realizar experimento prático desenvolvendo um sistema forno-secador de plantas com baixo custo, estável, portátil e rápido. Esta experiência servirá de motivação para trabalhos futuros de pequenos protótipos que possam ser desenvolvidos por estudantes.

A ideia era desenvolver um protótipo de uma planta térmica, que pudesse ser controlada por um circuito conectado ou não a um computador. Este trabalho serviria de experimento prático na tentativa de obtenção dos melhores parâmetros de controle que satisfaçam o problema. Esta realização, além de simular uma ação real de controle de uma indústria, favorece também o entendimento das principais dificuldades enfrentadas pelos desenvolvedores de sistemas de controle.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Desenvolver um modelo de sistema térmico real controlado por um microcontrolador, que seja tempo real, de baixo custo e simples, para que em trabalhos futuros possa ser testadas as mais variadas técnicas de sintonia de controle clássico e moderno, começando pelo PID.

Objetivos Específicos:

- Atingir o melhor controle de temperatura com o ajuste do controlador PID.
- Verificar se o comportamento do sinal de entrada do controle desta planta responde conforme a curva característica de um controle PID.
- Desenvolver um software de monitoramento com interface simples para computador.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2, será apresentado o referencial teórico a respeito do microcontrolador utilizado neste trabalho. No caso, foi escolhida uma plataforma robusta e versátil de base Arduino, que será usada devido a sua simplicidade e facilidade em realizar diversas tarefas e

também por sua vasta documentação disponível na internet e conceitos mais gerais da teoria dos controles clássicos, mais especificamente abordando o controle PID.

No capítulo 3, são descritas as etapas de construção do protótipo de um sistema térmico, iniciando pela descrição dos componentes. Logo em seguida, é apresentado o desenvolvimento do protótipo e a escrita do código utilizado no controle.

No capítulo 4 são apresentados os testes e discussão dos resultados obtidos através de gráficos.

O quinto capítulo apresenta as considerações finais deste trabalho e expectativas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está dividido em duas seções principais: Na primeira é apresentada a plataforma Arduino, uma das mais populares plataformas de prototipagem de desenvolvimento, dedicada inicialmente para estudantes. Serão apresentados um pouco da história, da filosofia por trás deste projeto, a estrutura e alguns exemplos de aplicações. Em seguida, será apresentada a seção dos controladores clássicos. Neste tópico discutem-se os principais controles, as definições importantes para a teoria de controle e mais especificamente os controladores PID, seus parâmetros e efeitos.

2.1 A PLATAFORMA ARDUINO

Microcontroladores são, segundo Martins (2005), pequenos componentes eletrônicos, dotados de inteligência programável, compostos de processador, pinos de entradas/saídas e memória, que compõem um sistema computacional completo, são usados em diversas aplicações, principalmente como sistemas embarcados. As características que diferenciam os modelos de microcontroladores em geral são:

- A quantidade de memória interna para armazenar dados e as instruções de programas.
- A velocidade de processamento.
- A quantidade de pinos de entrada e saída (I/O).
- A forma de alimentação, os tipos e as quantidades de periféricos.
- A arquitetura e o conjunto de instruções disponibilizadas nos circuitos internos.

Os microcontroladores são usados como central de processamento, podem ser programados para funções específicas, como em automação e controle, e são configurados através de registros especiais que alteram o seu funcionamento, modificam o modo de operação e características dos periféricos interligados. Ainda segundo Martins (2005), os microcontroladores são chamados de controles lógicos, isto devido a operação do sistema que se baseia nas ações lógicas que devem ser executadas.

Em 1971, foi criado o primeiro microcontrolador pela Texas Instruments, este possuía 4 bits com memórias ROM e RAM incorporados, foi utilizado em calculadoras. Desde então, os microcontroladores tiveram grandes evoluções, devido o grande avanço da eletrônica, das ciências dos materiais e de muitos outros estudos.

Em 2005, surge a plataforma Arduino, inicialmente foi projetado para os estudantes do Design Institute of Ivrea⁴, com o intuito de ser instrumento de interação em projetos escolares, possibilitando reduções de custos em projetos acadêmicos. Desde então, teve considerável crescimento, o que contribuiu para a entrada da plataforma em mercados de microcontroladores simples, fomentando seu sucesso.

No filme (Arduino: The Documentary, 2010), é contada a trajetória de sucesso do projeto, e é explicado que o Arduino significa, na verdade, uma ferramenta ou plataforma de computação física, capaz de detectar e controlar alguns sistemas do mundo físico. É caracterizado por ser um ambiente de desenvolvimento *open source*⁵, baseado em um microcontrolador, que pode ser utilizado para desenvolver diversos objetos interativos dependentes e independentes.

Há muitos outros microcontroladores e plataformas disponíveis no mercado. Muitos deles oferecem funcionalidades similares, simplificando os detalhes complicados da programação de microcontroladores em um pacote simples e fácil de utilizar. Entretanto, o Arduino leva vantagem quando público alvo são estudantes, professores ou amadores, pois as placas Arduino, em sua maioria, são de baixo custo, pré-montadas, *cross-plataform*⁶, possuem ambiente de programação simples e *open source*.

Segundo Lima e Villaça (2012), o Arduino é uma plataforma que permite a gravação direta do microcontrolador, quando ligada a uma porta USB de um computador, não exigindo um gravador dedicado. Isto torna a plataforma seja atraente e de fácil utilização para aplicações ou tarefas envolvendo um microcontrolador.

A plataforma Arduino não surgiu sozinha, no entanto seu nome tornou-se referência e impulsionou o surgimento de novos projetos baseados nele, que entram no mercado de placas e plataformas de microcontroladores, assim como em Netduino, Produino, Garagino, entre outros.

⁴ Interaction Design Institute Ivrea (Interaction-Ivrea) é uma organização independente sem fins lucrativos com sede em Milão, que oferece programa de mestrado em Design de Interação.

⁵ Open source significa que o sistema tem desenvolvimento aberto a comunidade de desenvolvedores, está livre para servir de base para outros projetos, sem haver custos com *copyright*.

⁶ Cross-plataform significa multiplataforma, ou seja, o sistema foi desenvolvido para ter suporte a várias plataformas.

2.1.1 Hardware

Segundo Mcroberts (2011), a placa de um Arduino é composta por um microprocessador Atmel – AVR, um oscilador composto por um *clock*, que envia pulsos de tempo numa frequência especificada, para permitir sua operação na velocidade correta, e um regulador de tensão linear de 5V.

Existem vários modelos de Arduino, alguns deles podem ter uma saída USB, que permite conectá-lo a um computador para *upload* ou recuperação dos dados. Geralmente, as placas expõem os pinos de entrada e saída do microcontrolador, para que o acesso seja fácil possibilitando conectá-los a outros circuitos ou dispositivos.

Os principais modelos de Arduino são: o Uno, Due, Mega2560, Nano, os mais recentes Galileo e TER, além do Lilypad e o Ethernet. Algumas especificações de modelos comercializados do Arduino podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações de Modelos Arduino

Name	Processor	Operating Voltage/ input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PW M	SRAM [KB]	Flash [KB]
Due	AT91SAM3X8E	3.3V/7-12V	84 Mhz	12/2	54/12	96	512
Ethernet	ATmega328	5 V/7-12 V	16 Mhz	6/0	14/4	2	32
Leonardo	ATmega32u4	5V/7-12V	16 Mhz	12/0	20/7	2.5	32
LilyPad	ATmega168V	2.7-5.5V/2.7-5.5V	8Mhz	6/0	14/6	1	16
Mega 2560	ATmega2560	5V/7-12V	16 Mhz	16/0	54/15	8	256
Micro	ATmega32u4	5V/7-12V	16 Mhz	12/0	20/7	2.5	32
Mini	ATmega328	5 V/7-9 V	16 Mhz	8/0	14/6	2	32
Nano	ATmega328	5V/7-9V	16 Mhz	8/0	14/6	2	32
Uno	ATmega328	5V/7-12V	16 Mhz	6/0	14/6	2	32

Dos modelos listados na Tabela 1, o utilizado para este trabalho foi o Arduino Mega 2560, entretanto poderia ser empregado qualquer um deles. As possíveis diferenças se devem apenas a estrutura, *design* e foco de aplicações direcionadas, contudo a escolha foi apenas uma questão de conveniência, desta forma encontram-se neste texto mais detalhes acerca do Mega 2560.

O Arduino Mega 2560, ilustrado na Figura 1, é uma placa de prototipagem baseada no ATmega2560, que possui 54 entradas / saídas digitais, das quais 15 podem ser usadas como saídas PWM - Pulse-Width Modulation, possuem também 16 entradas analógicas. Ainda conforme o fabricante, a placa possui um cristal oscilador, uma conexão USB, um conector de alimentação, um cabeçalho ICSP, e um botão de reset.

Figura 1: Arduino Mega 2560



Fonte: Repositório Digital da Arduino.cc

Ainda segundo o fabricante, o Arduino Mega 2560 pode ser alimentado através da conexão USB ou por uma fonte de alimentação externa, podendo operar de 6 a 20V. No entanto, o pino 5V de saída pode fornecer menos que 5V se o Arduino for alimentado com menos que 7V, o que deixaria a placa instável. Por outro lado, quando alimentado com mais de 12V, o regulador de voltagem pode superaquecer e danificar a placa. Portanto o recomendado é a faixa de 7 a 12V.

O Arduino ATmega2560, como visto na Tabela 1, possui o microcontrolador ATmega2560, que é um microcontrolador CMOS 8-bit de alta performance e baixo consumo, baseado na arquitetura AVR-RISC, combina 256KB de memória flash, 8KB de SRAM, 4KB EEPROM. Segundo o fabricante, ao executar instruções complicadas em um único ciclo de *clock*, o núcleo atinge uma taxa de transferência que se aproxima de $1 \frac{MIPS}{MHz}$, equilibrando o consumo de energia e velocidade de processamento.

No entanto, além de conhecer o microcontrolador, é necessário conhecer os componentes fundamentais de cada aplicação. Destes, os que mais se destacam são o microcontrolador, os sensores e os atuadores.

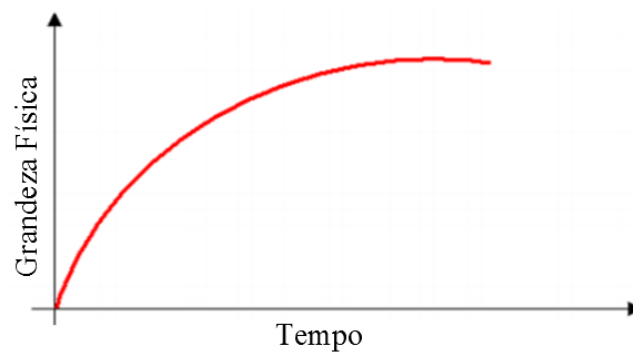
2.1.1.1 Sensores

Os sensores são componentes ou dispositivos capazes de detectar mudanças no mundo físico, relacionando informações sobre uma grandeza que precisa ser mensurada em um sinal. Este sinal pode ser usado para detectar e corrigir desvios em sistemas de controle e em instrumentos de medição. Normalmente, o sinal de saída dos sensores deve ser manipulado antes da leitura no sistema de controle, devido, em muitos casos o sensor não possuir características elétricas necessárias.

Segundo Wendling (2010), existem dois tipos essenciais de sensores, os analógicos e os digitais.

- Os sensores analógicos podem assumir qualquer valor em seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro de sua faixa de operação. Conforme visto na Figura 2, o sinal de saída do sensor tem um comportamento que melhor descreve a variação da grandeza mensurada, podendo assumir valores inteiros de 0 a 1024.

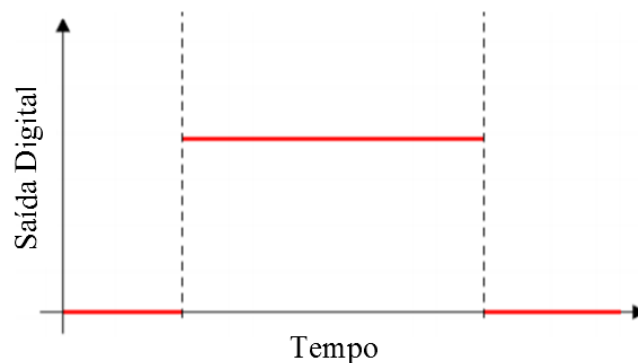
Figura 2: Sinal de Saída Analógico



Fonte: Adaptado de Martins (2005)

- Os sensores digitais podem assumir um dos seguintes valores no sinal de saída: 0 para falso ou 1 para verdadeiro, conforme a lógica booleana. A Figura 3 mostra uma saída de um sensor digital de acordo com a variação do tempo.

Figura 3: Sinal de Saída Digital



Fonte: Adaptado de Martins (2005)

Há uma série de características relacionadas aos sensores que é importante definirmos de acordo com cada aplicação. Algumas delas podem ser apontadas nesta lista:

- Tipos de saídas, podendo ser digital ou analógica.
- Linearidade, este conceito se aplica aos sensores analógicos, esta característica propõe que as respostas sejam proporcionais às entradas, facilitando assim a montagem do circuito interface de conversão dos valores de computação dos dados lidos, já os não lineares, não há uma correspondência proporcional.

- Alcance, que representa toda a faixa de valores de entrada de um sensor.
- Velocidade de resposta: trata de quão rápido o sensor é ao fornecer o valor da variável mensurada.

Existem muitos sensores, entretanto eles podem, ainda segundo Wendling (2010), ser classificados quanto ao tipo de grandeza física aos quais são aplicados.

- Sensores mecânicos, aqueles que sensoriam movimentos, posições ou presença. Tem como principal desvantagem o fato de terem peças moveis sujeitas à quebra e desgaste.

- Sensores fotoelétricos: trabalham com a luz, são muito rápidos e podem ser de diversos tipos, e sua escolha depende basicamente de suas características.

- Sensores térmicos: atuam sobre um circuito em função da temperatura do meio onde se encontram.

- Sensores capacitivos: são projetados para operar gerando um campo eletrostático, monitorando-o em busca de variação.

- Sensores indutivos: são emissores de sinais que detectam, sem contato direto, elementos metálicos que atravessem o campo magnético criado.

- Sensores ultrassônicos: detectam ondas ultrassônicas refletidas por objetos a certa distância.

2.1.1.2 Atuadores

São dispositivos que modificam uma variável controlada através de um sinal proveniente de um sistema ou agente controlador. Há inúmeros atuadores, e classificados como mecânicos, eletrônicos e elétricos. Relés, válvulas, motores, solenoides, entre diversos outros são exemplos de dispositivos atuadores.

Os atuadores são ligados às portas PWM (*Pulse Width Modulation*) do Arduino, onde são feitas a interface de comunicação enviando sinal aos atuadores. É utilizada nestas portas, a modulação por largura de pulso, que se trata da técnica de fornecer um sinal analógico através do meio digital. Este sinal de valores inteiros, está dentro do intervalo 0-255

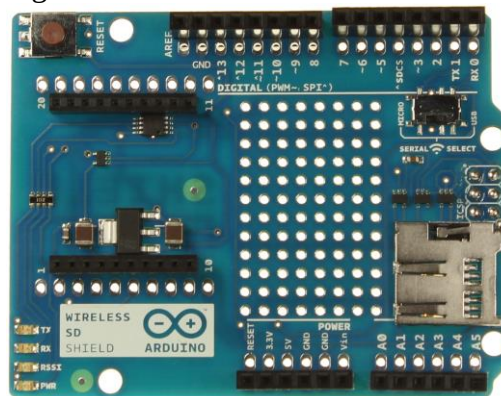
e é normalmente com o uso dos atuadores que é possível atuar no meio externo, modificando assim, alguma grandeza física.

Os motores são atuadores eletromecânicos que funcionam devido a variação do campo magnético induzido, que constantemente muda a direção dos pólos do eixo do motor, fazendo-o girar. Quanto maior a corrente elétrica fornecida ao motor, maior será a variação do campo magnético induzido por ela, e conseqüentemente maior rotação do motor. Por isso é feito um controle PWM de corrente com o intuito de estabelecer o giro desejado do motor.

2.1.1.3 Shields

As extensões da plataforma Arduino foram criadas para trabalhar em conjunto com as placas e com seus derivados, os *Shields* seriam, ainda segundo Mcroberts (2011), uma espécie de complementos ou placas de circuito contendo outros dispositivos, como por exemplo, receptores GPS, displays de LCD, módulos de Ethernet, Wi-fi, apresentado na Figura 4, entre muitos outros.

Figura 4: Shield Wireless e SD Arduino



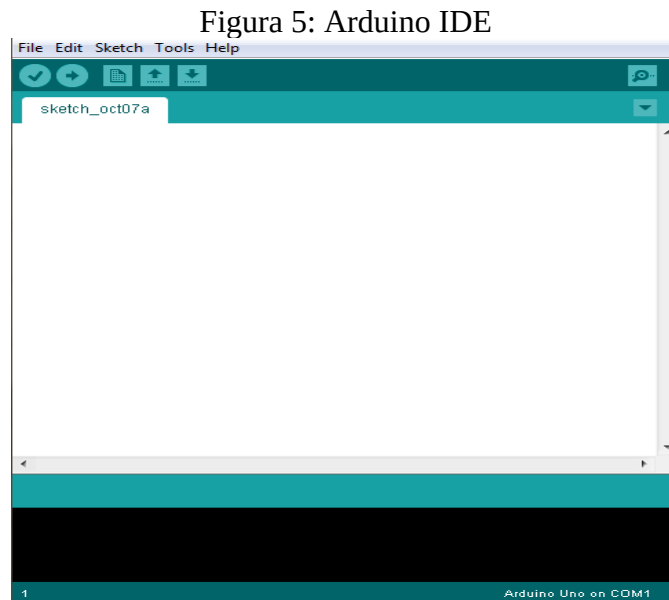
Fonte: Repositório Digital da Arduino.cc

Com a utilização de Shields conectados ao Arduino, aumentam-se as possíveis funcionalidades e aplicações do Arduino e similares.

2.1.2 Software

Como mencionado anteriormente, o Arduino é *cross-plataform*, ou seja, pode ser programado em diversos sistemas operacionais. O microcontrolador na placa é programado usando o *Arduino Programming Language*, baseado na linguagem de programação *Wiring* e

seu ambiente de desenvolvimento integrado oficial é desenvolvido baseado na IDE (Integrated Development Environment) do *Processing*. A sua interface gráfica é ilustrada na Figura 5.



Fonte: Print Screen da Aplicação

É a partir da Arduino IDE que é escrito todo o código fonte do programa que será enviado ao microcontrolador. Este software faz toda a interface de comunicação serial PC-Arduino, além da compilação do código.

2.1.3 Aplicações

Conforme Lima e Villaça (2012), para o desenvolvimento de uma tarefa utilizando Arduino, assim como em outras plataformas, é necessário seguir alguns passos:

- Análise do problema a ser solucionado e quais as exigências a serem cumpridas.
- Elaboração dos algoritmos e estruturação do programa com uso de fluxogramas.
- Escrita do programa na linguagem escolhida, no caso do Arduino, geralmente *Wiring*, entretanto pode se usar outras linguagens como *C*, *Java*, *Python*, etc.
- Compilação do programa.
- Teste, depuração e correções necessárias.

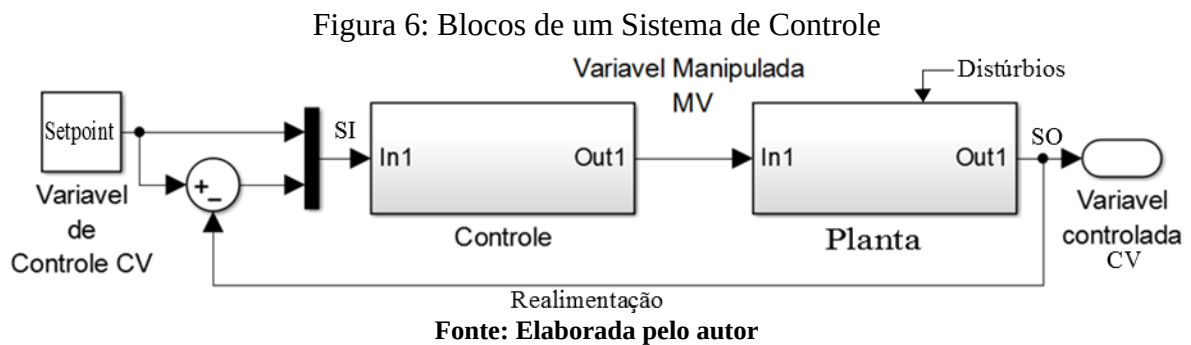
Há diversas aplicações ou tarefas utilizando o Arduino, essas são facilmente encontradas na internet. Outras aplicações mais complexas poderão surgir, devido o constante desenvolvimento da plataforma. A aproximação da arquitetura Atmel – AVR à dos

computadores possibilitará a execução de instruções x86 nesta plataforma, o que aumenta o horizonte de possibilidades. Uma delas é poder executar um sistema operacional completo como o Android.

2.2 CONTROLE CLÁSSICO

Antes de abordar a teoria do controle PID, é necessário expor alguns conceitos sobre controle. A teoria de controle está dividida em controle clássico, moderno e robusto. Entretanto, será apresentado neste texto apenas o controle clássico, que é onde se encontra o controle PID.

A Figura 6 ilustra um bloco de controle, onde se encontram algumas definições, que segundo Ogata (2003), são extremamente importantes para a teoria de controle e não se deve iniciar seu estudo sem elas.



- Variável Manipulada (MV) é a grandeza ou condição modificada pelo controlador de modo que afete o valor da variável a ser controlada.
- Variável Controlada (CV) é a grandeza ou condição que é medida e controlada.
- Planta pode ser uma parte de equipamento ou apenas um conjunto de componentes de um equipamento que funcione de maneira integrada com o objetivo de realizar determinada operação, ou simplesmente qualquer objeto físico a ser controlado.
- Processo é a operação natural de progresso contínuo ou desenvolvimento caracterizado por uma série de modificações graduais que se sucedem umas às outras.
- Sistema é a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo, não é limitado a algo físico.
- Distúrbios são sinais que tendem a afetar adversamente o valor da variável de saída de um sistema.
- Controle com realimentação refere-se a uma operação que na presença de distúrbios, tende a diminuir a diferença entre a saída de um sistema e alguma entrada de referencia e atua com base nessa diferença.

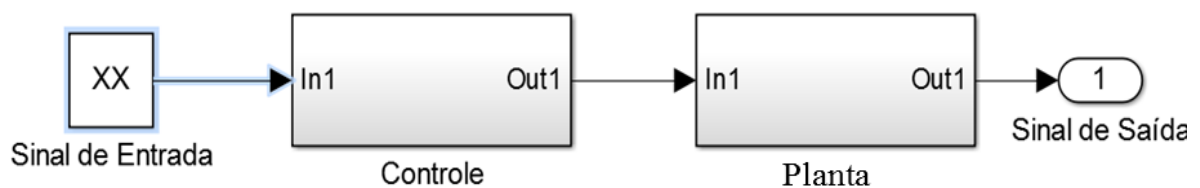
- Setpoint é o valor-alvo que um sistema de controle automático deverá alcançar para a variável de controle.
- SISO, SIMO, MISO e MIMO são características dos sistemas onde as referências de únicas ou múltiplas entradas e saídas.

Os sistemas de controle são classificados também pelo tipo de malha, podendo ser de malha aberta ou de malha fechada.

2.2.1 Malha Aberta

Os sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce ação de controle no sistema, ou seja, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada, e seu esquema está ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Exemplo de Malha Aberta



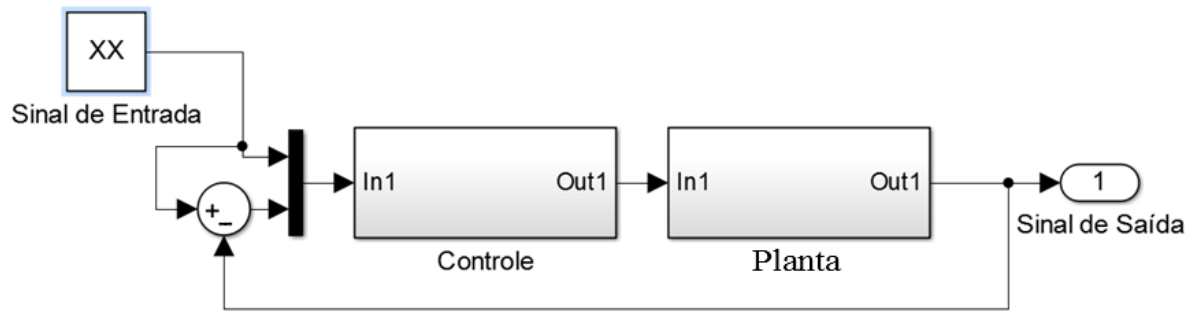
Fonte: Elaborada pelo autor

O sinal de entrada no controle não sofre interferência de qualquer variável, não há leitura no sinal da planta que retorne para o controle. Sendo assim, este tipo de arranjo é chamado de malha aberta. Um exemplo deste tipo de controle é a máquina de lavar roupas, que não há qualquer interação da saída na entrada, basicamente as lavadoras de roupa funcionam por um determinado tempo programado e estimado para um bom funcionamento.

2.2.2 Malha Fechada

Os sistemas de controle de malha fechada, segundo Ogata (2003), são os sistemas de controle com realimentação. O sinal de erro atuante realimenta o controlador de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado, por exemplo, em um sistema básico de controle de temperatura, a sua realimentação será o sinal lido constantemente pelo sensor e comparado com o valor desejado, esta malha está ilustrada na Figura 8.

Figura 8: Exemplo de Malha Fechada



Fonte: Elaborada pelo autor

Neste tipo de configuração, há influência no sinal de entrada do controle, o qual vem da constante leitura na saída da planta. Os controles de malha fechada são geralmente mais bem elaborados e detêm bons resultados.

2.2.3 Classificação dos Controladores Industriais

Durante século XX, a indústria desenvolveu sistemas de controle com estratégias de Feedback (Controle Realimentado) que foram aplicados com sucesso em sistemas lineares de malha fechada, dentre os quais se encontram os controles listados abaixo.

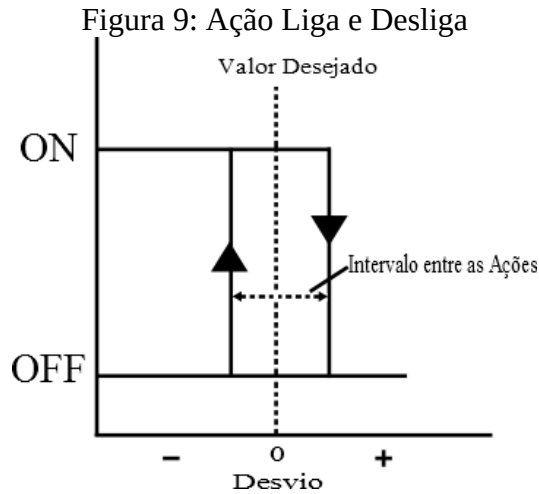
- Controle ON-OFF
- Controle Proporcional
- Controle Integral
- Controle Proporcional-Integrativo
- Controle Proporcional-Derivativo
- Controle Proporcional-Integrativo-Derivativo

2.2.3.1 Controle ON-OFF

Em um sistema ON-OFF, o elemento atuante tem somente duas posições fixas, ligar e desligar. Este controle é simples e barato, por isto é muito utilizado. Normalmente o sinal de saída do controlador denominado de $u(t)$ permanece em um valor máximo ou mínimo dependendo do sinal do erro atuante $e(t)$.

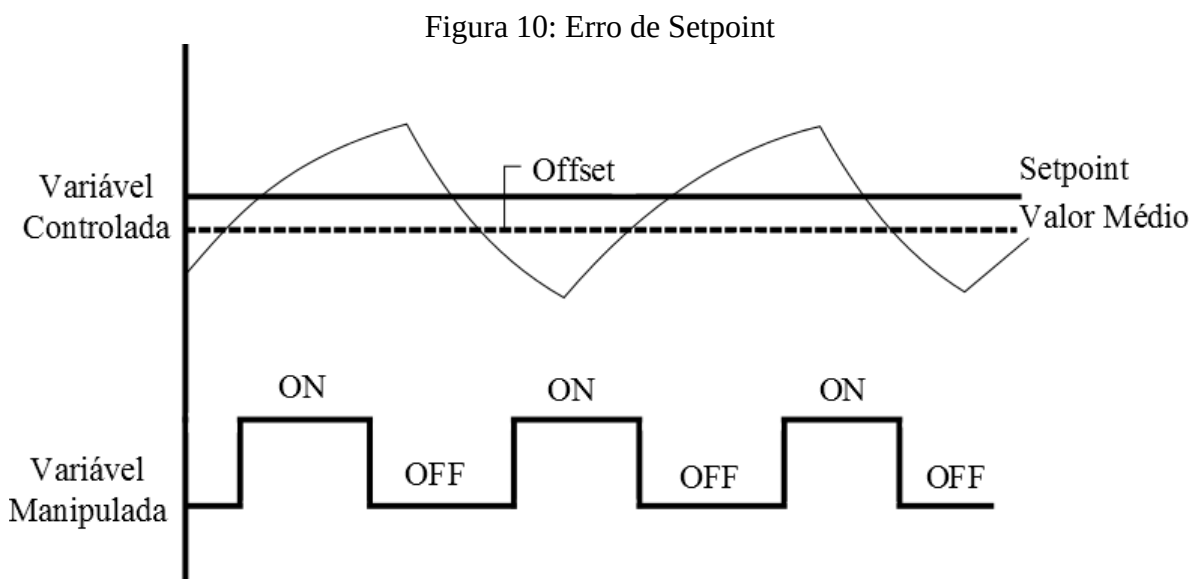
$$\begin{cases} u(t) = U_1 & \forall e(t) > 0 \\ u(t) = U_2 & \forall e(t) < 0 \end{cases} \quad (01)$$

Onde U_1 e U_2 são constantes e sua atuação no sistema ON-OFF tem comportamento ilustrado na Figura 9.



Fonte: SENAI (1999)

Com este tipo de controle, pode-se observar que a variável controlada tende a oscilar continuamente em torno do setpoint. Esta oscilação, segundo Araújo (2007) varia em frequência e amplitude em função do intervalo entre as ações e também em função da variável de carga. Com isto, pode ser notado na Figura 10 que o valor médio da grandeza controlada será sempre diferente do setpoint.



Fonte: SENAI (1999)

Ainda conforme Araújo (2007) este controlador apresenta as seguintes características:

- A correção independe da intensidade do desvio.
- O ganho é infinito devido o sinal de saída do controle ON-OFF ser mínima ou máximo, provocando assim um ganho extremamente alto, e com um alto tempo morto.
- O processo é oscilante.
- Há erro de offset.

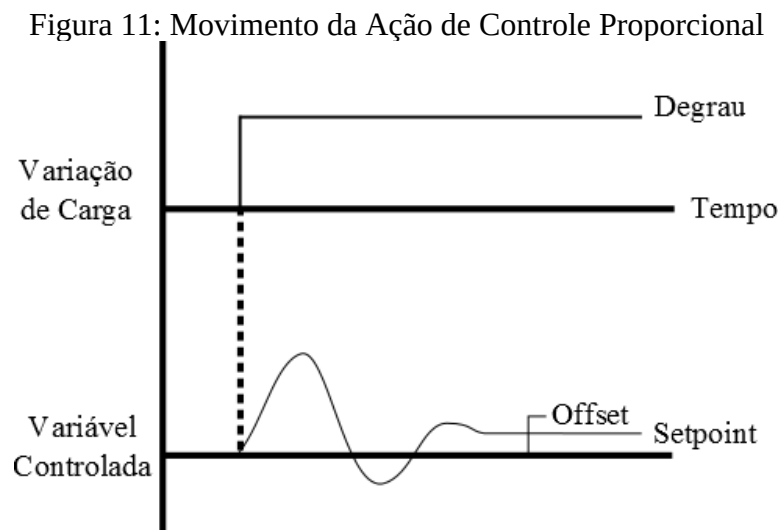
2.2.3.2 Controle Proporcional

Em um controlador com ação proporcional a relação entre a saída do controlador $u(t)$ e o sinal de erro $e(t)$ é dado por:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (02)$$

Onde K_p é uma constante denominada de ganho proporcional.

Um exemplo de movimento de uma ação de controle proporcional quando aplicado a um desvio em degrau, onde executa-se uma variação unitária no MV observando o resultado do CV, e isto pode ser visto na Figura 11.



Fonte: SENAI (1999)

Segundo SENAI (1999), o controlador do tipo proporcional apresenta correção proporcional ao desvio, existência de uma realimentação negativa e principalmente deixa um erro de offset após uma variação na carga provocada por um degrau. O aumento de K_p

diminui este erro de regime, entretanto em geral provoca oscilações no sistema deixando-o instável.

2.2.3.3 Controle Integral

O controle por ação integral atua no processo ao longo do tempo enquanto existir diferença entre o setpoint e o valor medido, pois o sinal de saída $u(t)$ é modificado a uma taxa de variação proporcional ao sinal $e(t)$. Então o sinal de controle é integrado no tempo, o que permite atuar de forma lenta até eliminar o erro completamente conforme a equação 03:

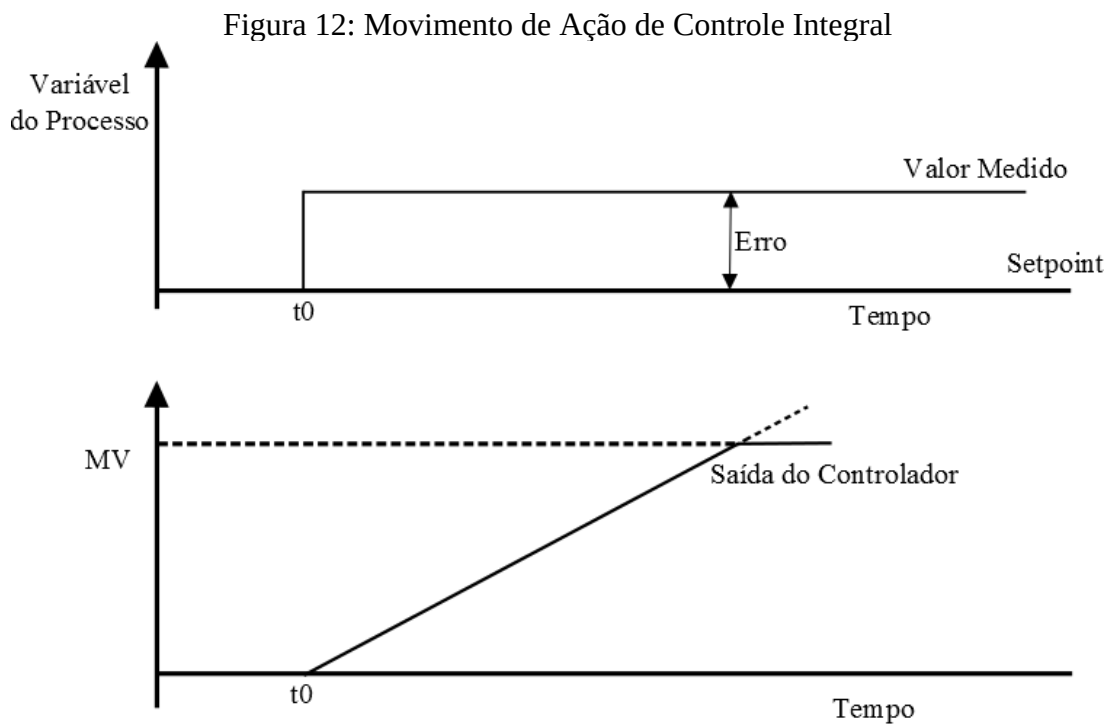
$$u(t) = K_i e(t) \quad (03)$$

Onde K_i é uma constante de ganho integral, que equivale a:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (04)$$

Em que T_i é o tempo integrativo.

A Figura 12 caracteriza o movimento de uma ação de controle integral, proveniente de um desvio degrau.



Fonte: Adaptado de SENAI (1999)

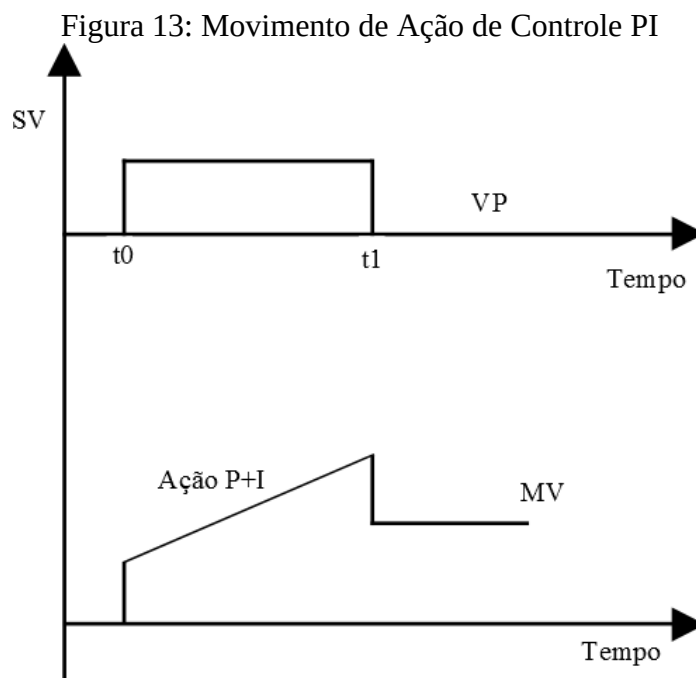
De acordo com SENAI (1999), o controle por ação integral é caracterizado por corrigir o erro de offset. O seu movimento de controle só mudará de sentido quando o sinal de desvio inverter-se, ou seja, passar pelo zero, e quanto maior for o erro mais rápida será a correção.

2.2.3.4 Controle Proporcional-Integral

A ação de um controle proporcional-integral é resultante da combinação entre a ação proporcional e a integral, e é definida matematicamente como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (05)$$

O controle PI tem como objetivo eliminar o erro instantâneo pela ação proporcional e o acumulativo pela ação integral. A Figura 13 apresenta o movimento de controle da ação PI ao longo do tempo.



Fonte: SENAI (1999)

O controlador PI tem como características principais a eliminação do offset e das oscilações, e por isso é muito utilizado na indústria.

2.2.3.5 Controle Proporcional-Derivativo

Esta ação de controle é definida matematicamente como:

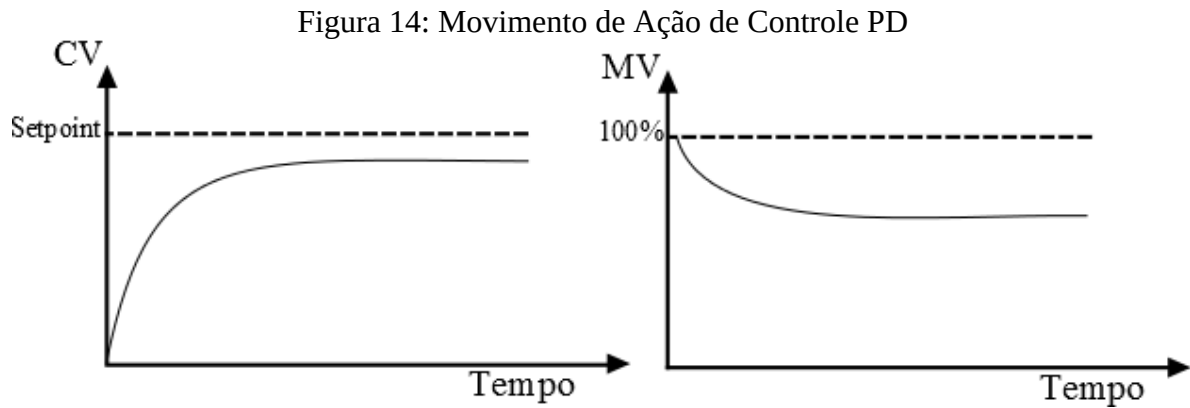
$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (06)$$

Onde K_d é a constante da ação derivativa que equivale a:

$$K_d = K_p T_d \quad (07)$$

Em que T_d é o tempo derivativo.

A Figura 14 mostra o movimento da ação característica do controle PD.



Fonte: Elaborada pelo autor

Este controle é caracterizado, segundo Araújo (2007) por levar em conta a taxa de variação do erro e por introduzir um importante efeito de antecipação no sistema, que reage com a magnitude do erro e com a possível tendência de fugir da zona de setpoint, começando assim uma ação corretiva prévia.

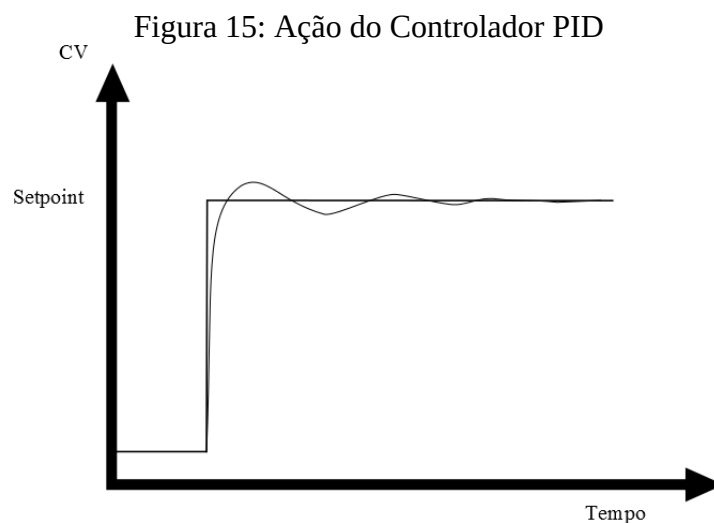
2.2.3.6 Controle Proporcional-Integral-Derivativo

Esta ação é a combinação das ações de controle proporcional, integral e derivativo e é dada matematicamente pela equação 08:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (08)$$

Suas características segundo Vale (2007) são: zerar o offset, melhorar a estabilidade relativa do sistema eliminando as oscilações, e previamente corrigir os possíveis desvios.

Os controladores PID são versáteis em número de aplicações e utilizações, o que de fato tem impulsionado os cientistas de controle a criar regras de sintonia e ajustes de controle. O PID é muito útil na maioria dos sistemas de controle, em particular nos sistemas em que o modelo matemático da planta não seja conhecido. Sua curva característica pode ser vista na Figura 15.



Fonte: Elaborada pelo autor

O controle PID se mostra simples e eficiente, e seu uso é muito comum pelas indústrias, por isso será utilizado neste trabalho. Conforme visto na equação 08, a saída do controle depende diretamente do erro em função do tempo, que de fato é o princípio fundamental de sua execução, $u(t) = 0$ se e somente se $e(t) = 0$.

3 PLANTA TÉRMICA

Neste capítulo é apresentado o protótipo da planta térmica em estudo e implementação de um controle PID, detalhando a construção deste, descrevendo os componentes utilizados, a dinâmica e comportamento do sistema de controle e a orientação para a escrita do código fonte do programa de controle.

Serão apresentados no APÊNDICE 1 – Código Fonte e APÊNDICE 2 – Fotos o código fonte do programa utilizado no controle e as fotos reais da implementação do sistema de controle PID em uma planta térmica respectivamente.

3.1 COMPONENTES DO PROTÓTIPO

O sistema térmico em análise é constituído por uma planta composta pelos componentes listados:

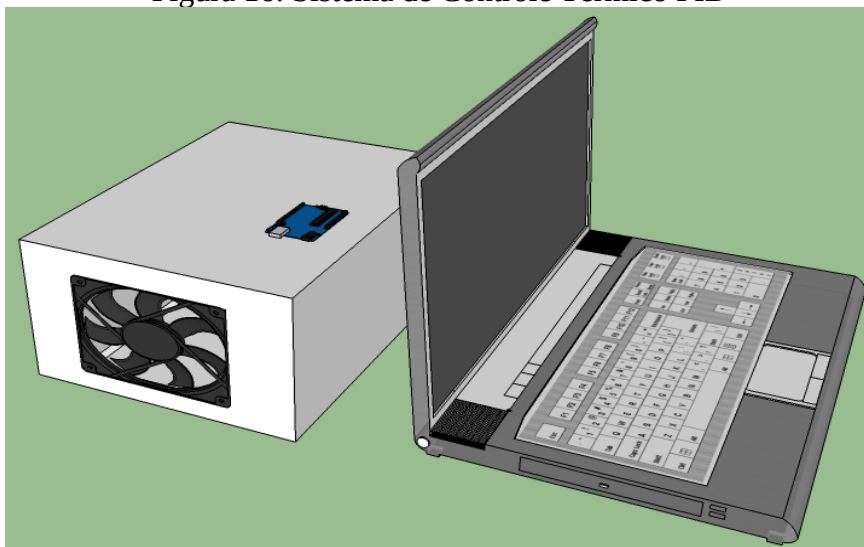
- Uma caixa de papelão revestida internamente por papel alumínio. Este revestimento de alumínio possibilita que a planta térmica tenha uma variação de temperatura maior, devido a propriedade de alta condutividade de calor do alumínio.
- Lâmpada incandescente de 60 Watts, localizada no interior da caixa, tendo a função de aquecê-la, essa potência é suficiente para elevar a temperatura interna da caixa para aproximadamente 70 °C.
- Atuador, cooler de 8,4 Watts localizado em uma das aberturas de ar, com a função de exaustor, sendo este devidamente controlado pelo sistema de controle PID - Arduino.
- Cooler localizado em outra abertura da caixa. Este não está ligado ao sistema, serve apenas como entrada de ar.

O sistema de controle PID deste trabalho é constituído basicamente por:

- Computador, apenas para plotar gráficos, não é componente essencial para o execução do controle.
- Microcontrolador Arduino, onde está implementado o controle PID.
- Circuito interligador dos dispositivos, composto por: resistor, transistor, fonte DC de 12V, sensor de temperatura, cooler e o Arduino.
- Protótipo.

O sistema de controle de temperatura desenvolvido neste trabalho é ilustrado na Figura 16, os componentes principais utilizados neste sistema térmico, são descritos melhor na próxima seção.

Figura 16: Sistema de Controle Térmico PID



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 DESENVOLVENDO O PROTÓTIPO

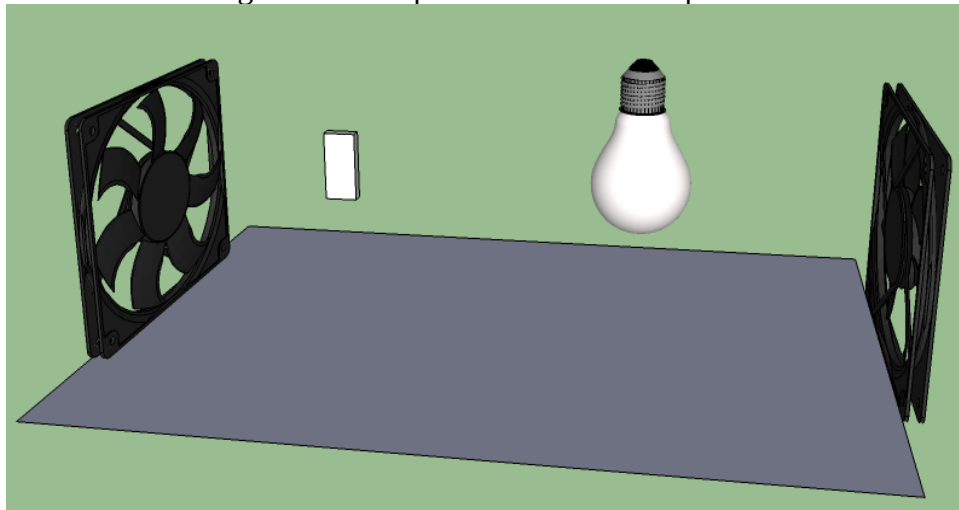
Para desenvolver o protótipo, foi necessário que a caixa de papelão fosse revestida internamente com papel alumínio. O uso do papel alumínio possibilitou elevar a temperatura máxima admissível no interior da caixa para alcançar 70 °C.

A lâmpada de 60 Watts dissipa calor para o sistema. Essa energia é constante e depende diretamente do material da própria lâmpada. Não há intervenção direta do controle do sistema para a fonte de calor.

Nas aberturas da caixa, foram instalados dois coolers de computador, onde o primeiro é o atuador e tem a função de exaustor de ar e o segundo é apenas entrada de ar, não sendo controlado pelo sistema. Esta configuração se deve pelo fato de ser observado nos primeiros testes, que havia pouca diferença em desempenho quando os dois coolers são ligados, então com o objetivo de economizar energia, foi escolhido controlar apenas um dos coolers.

Pode ser observado na Figura 17 como são instalados os componentes internos do protótipo da planta térmica. Pode ser visto também que o sensor está localizado equidistante à lâmpada e ao cooler exaustor, propondo assim um ponto estratégico onde a sua média representa a temperatura interna do protótipo.

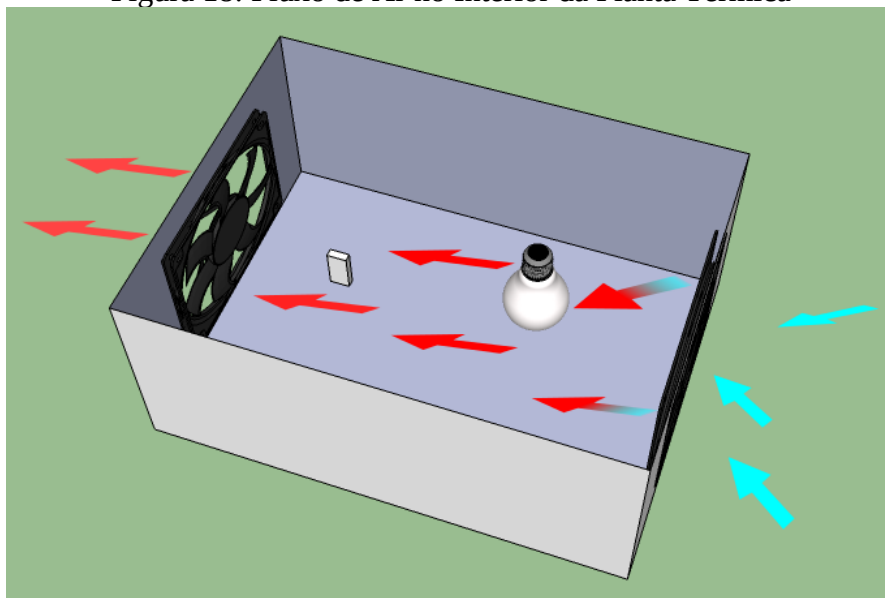
Figura 17: Componentes internos da planta



Fonte: Elaborada pelo autor

Desta maneira, haverá um fluxo de ar no interior da caixa, que tem seu caminho ilustrado na Figura 18 e este fluxo de ar é controlado pela velocidade das hélices dos coolers. Sabe-se que a temperatura no interior varia com o tempo e com a localização do sensor, então uma temperatura média é estimada, que representa a temperatura no interior da planta térmica.

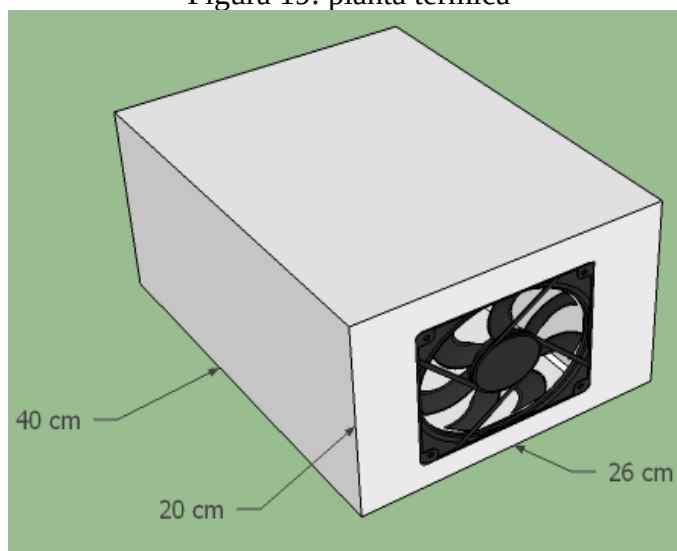
Figura 18: Fluxo de Ar no Interior da Planta Térmica



Fonte: Elaborada pelo autor

A caixa térmica tem dimensões conforme a Figura 19, e seu volume é de exato $2,08 \times 10^{-2} m^3$.

Figura 19: planta térmica



Fonte: Elaborada pelo autor

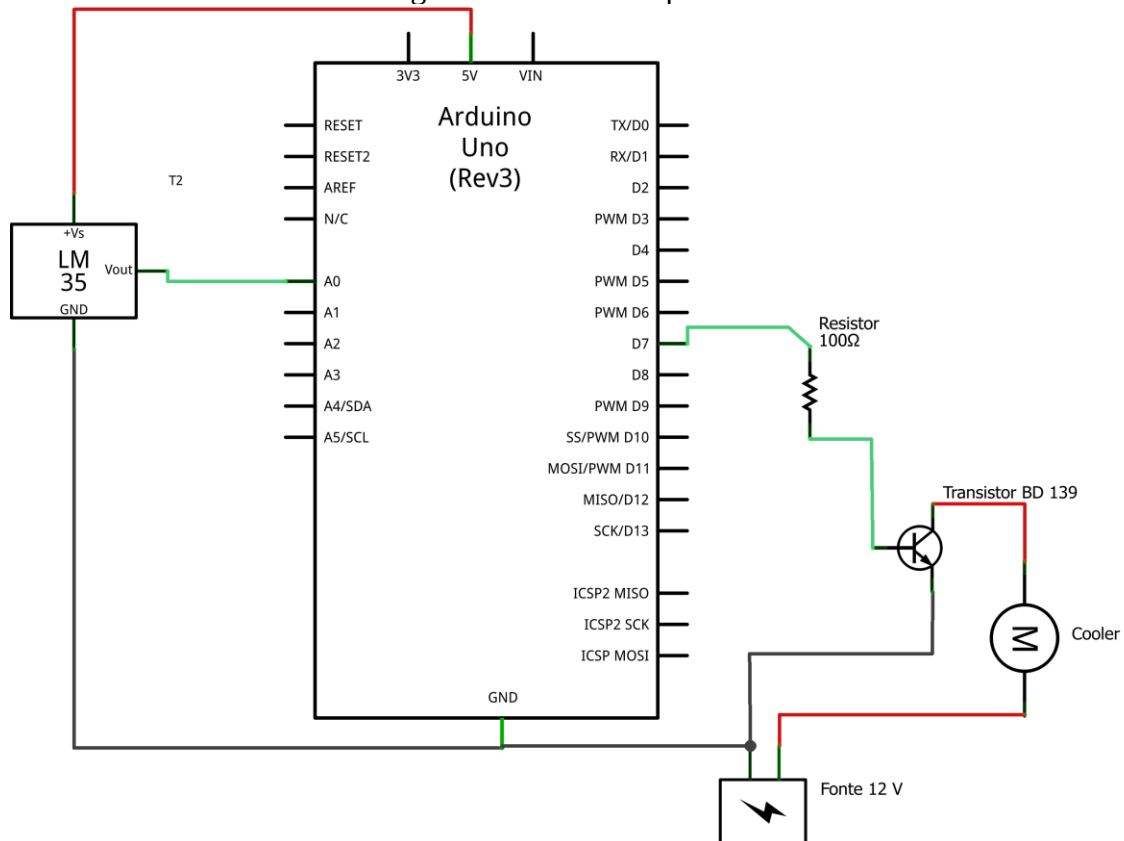
Para a montagem do circuito de controle da planta, foi necessário instalar um dispositivo que possibilitasse controlar o sinal de saída da fonte de DC de 12V e que não permita que a tensão da fonte interfira no funcionamento do Arduino. Esse componente é um transistor, que para este sistema foi utilizado o BD-139 e seu datasheet se encontra no ANEXO 1 – Datasheet BD139.

A escolha do BD-139 se dá pelo fato de atender às necessidades mínimas do projeto. A corrente e tensão máximas admissíveis pelo transistor estão além dos valores que seriam fornecidos. Entretanto, devido a grande variedade de transistores no mercado, há possibilidade de encontrar outro equivalente ao BD-139. É interessante que o projetista esteja em mãos o datasheet para ter a certeza que atenda a atividade desenvolvida.

Foi utilizado também o sensor de temperatura LM-35, o qual tem a função de enviar o sinal em Volts, que pode ser interpretado como temperatura através da relação linear do fator de escala $10mV/^{\circ}C$, ou seja, para cada $10mV$ varia-se $1^{\circ}C$, e isto é descrito em seu datasheet no ANEXO 2 – Datasheet Sensor LM35. O LM-35 é um dos sensores de temperatura mais utilizados em projetos com plataformas Arduino ou similares, por isso a escolha deste sensor para este projeto.

Como mencionado anteriormente, para interligar todos esses componentes eletrônicos, foi projetado e implementado um circuito de ligação que é ilustrado na Figura 20, na qual se encontram o Arduino, o sensor LM-35, o cooler, a fonte DC, o resistor e transistor utilizados neste sistema.

Figura 20: circuito esquemático



Fonte: Elaborada pelo autor

O circuito de ligação é simples e se faz necessário verificar a ligação do transistor, para evitar correntes com sentidos indevidos. É recomendado ler o datasheet do transistor, para entender quais terminais de conexão deverão ser usados. O sinal do Arduino se dirige ao terminal de base do transistor, enquanto o terminal emissor é ligado ao terra e o terminal coletor é ligado ao negativo do cooler. Esta configuração foi feita para o BD-139, se for utilizado outro transistor, é necessário saber a configuração que melhor satisfaça o projeto.

O transistor tem a função de ganho de tensão, já que com apenas a tensão de entrada que varia de 0 a 5V fornecida pelo controle Arduino-PID, terá com saída a tensão que varia de 0 a 12V.

3.3 DESENVOLVENDO O CÓDIGO

Para o desenvolvimento do código fonte, foi utilizada uma biblioteca desenvolvida pela própria comunidade do Arduino, que pode ser encontrada no sítio do Arduino: <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>. Foi necessário estudar os parâmetros de referência que deveriam ser chamados na biblioteca. É importante que as variáveis K_p , K_i , K_d

e *setpoint* sejam atribuídas pelo desenvolvedor do controle, adicionadas em seguida à biblioteca ao chamá-la dentro do loop do código fonte. Com isso é realizado o cálculo baseado na teoria do controle PID vista na seção 2.2.3.6.

A saída *MV* é estabelecida no cálculo de acordo com a equação 08 vista na seção 2.2.3.6, e deve ser escrita na porta correspondente ao cooler. O sensor LM-35 envia o valor atual da temperatura. Esta variável deverá estar sempre no *loop* antes de chamar a biblioteca através da função `pid.compute()`, detalhes desta função se encontra na *PIDLibrary*.

Foi utilizada a média de cinco valores lidos das temperaturas a cada 1 segundo, com a finalidade de diminuir a influência dos ruídos do sensor LM-35 na leitura dos dados. É necessário também apontar as variáveis *setpoint* e *PresentValue*, que representam a temperatura de controle e a temperatura lida respectivamente para a biblioteca, onde são calculados os parâmetros que faltam ser determinados, os quais são: *error*, *Derror* e *Serror*. O código fonte pode ser encontrado no APÊNDICE 1 – Código Fonte.

Para implementação de um algoritmo de um controle PID, é necessário seguir os passos deste pseudocódigo.

```

anterior_error = 0
integrativo = 0
iniciando:
    error = setpoint - valor_lido
    integrativo = integrativo + error*dt
    derivativo = (error - anterior_error)/dt
    MV = Kp*error + Ki*integrativo + Kd*derivativo
    anterior_error = error
    aguarde(dt)
retornar iniciando

```

4 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os testes e resultados obtidos na planta térmica. No decorrer deste trabalho foram feitos inúmeros testes e ajustes dos valores dos parâmetros de controle PID, K_p , K_i , K_d . Ao final dos testes, o controle foi estabelecido por um ajuste empírico que será apresentado nesta seção.

4.1 AJUSTE EMPÍRICO

Através da tentativa e erro, foi possível ajustar os parâmetros do controle PID, que davam melhor desempenho ao sistema, de acordo com os parâmetros do desenvolvedor. Esses parâmetros são: a faixa de erro, o tempo de acomodação, o overshoot e o tempo de resposta ao estímulo. Na Tabela 2 são encontrados os valores das variáveis de controle após um ajuste fino.

Tabela 2: Valores dos Parâmetros PID com Ajuste

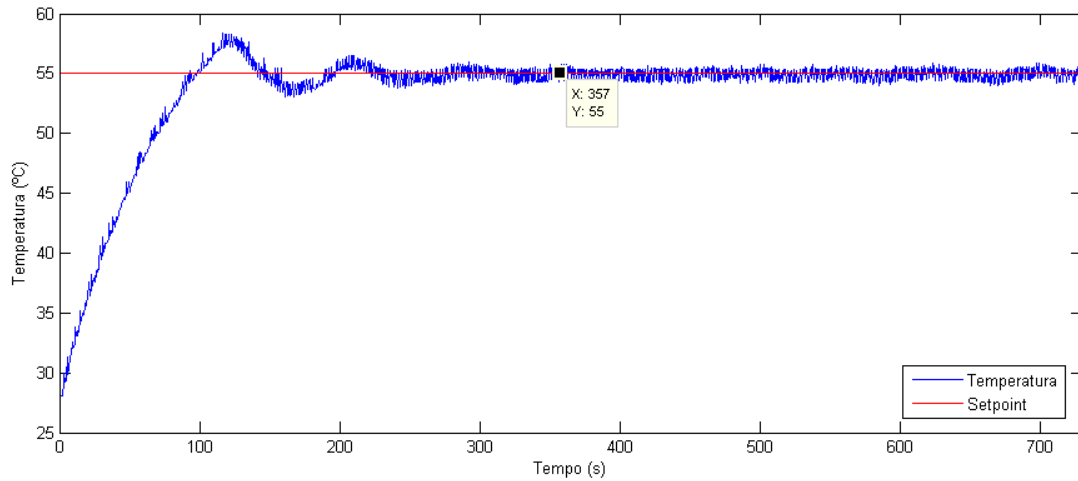
kp	Ki	kd
2,91	0,874	0,170

Com os novos valores, foram feitos novos testes que revelaram as curvas típicas de um controle PID. Para todos os setpoints, foram utilizados os valores da Tabela 2, mantendo assim a coerência nos testes. Entretanto poderia ter sido feitos ajustes para cada setpoint, o que resultaria melhor em desempenho, porém limitava o range de operação do controle PID. Então, a escolha de fixar os parâmetros PID se deve pelo fato de estabelecer um sistema de controle que pudesse ser facilmente adaptado para um sistema embarcado, onde não há dependência de um computador.

4.1.1 Setpoint 55°C

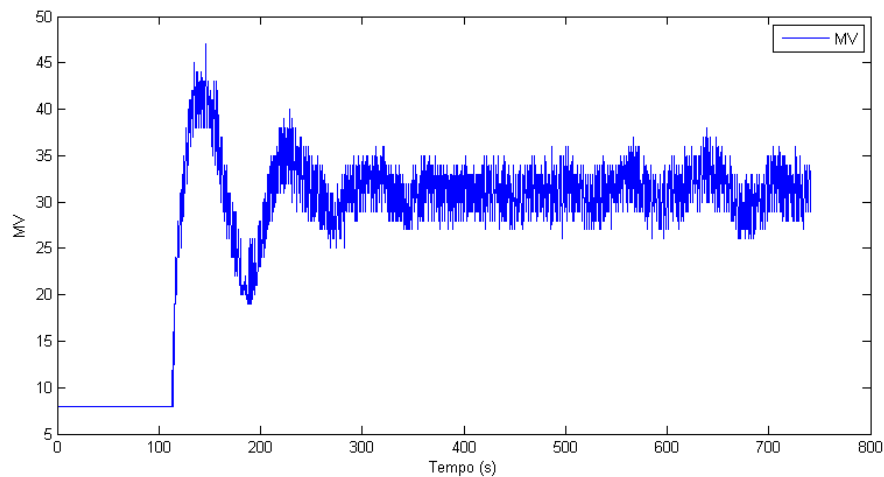
Pode ser observado na Figura 21 que o sistema foi iniciado em 28 °C com setpoint marcado em 55°C. Vê-se também que o tempo de acomodação do controle ficou em torno dos 357 segundos e que o resultado final do controle ficou entre 54,3 °C e 55,5°C, garantindo um erro de 1,27%, satisfazendo os parâmetros estabelecidos pela literatura para classificar o controle como eficiente.

Figura 21: Setpoint 55°C



A Figura 22 mostra o gráfico do comportamento da variável manipulada (*MV*) com relação ao tempo. Percebe-se que o cooler estava no mínimo até o momento que a temperatura cruza o setpoint e a partir deste momento o sinal de entrada no cooler assume valores maiores corrigindo a (*MV*).

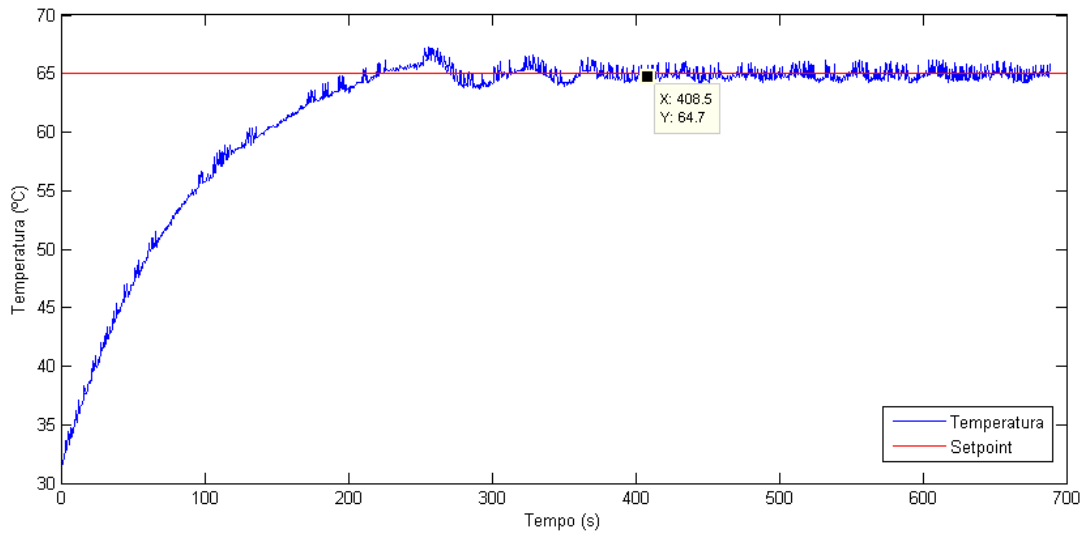
Figura 22: Variável manipulada para 55°C



4.1.2 Setpoint 65°C

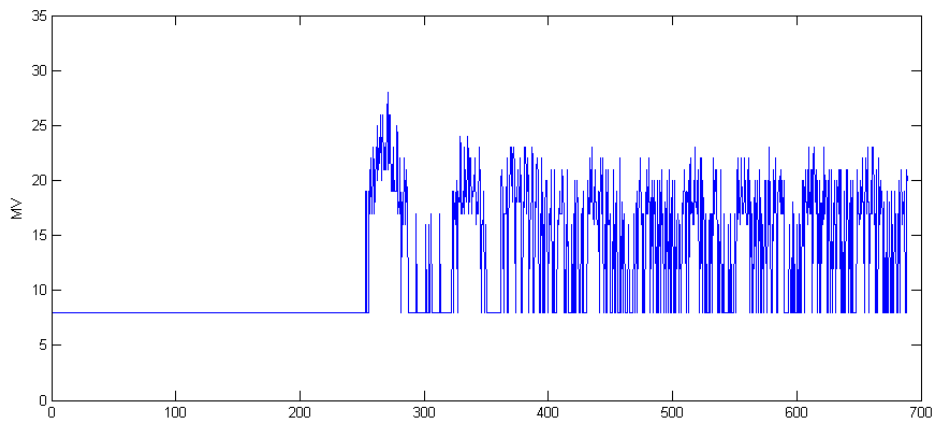
Assim como na seção 4.1.1, foi possível controlar a temperatura com um erro relativo de 1,53% e o tempo de acomodação foi em torno de 408 segundos, conforme visto na Figura 23.

Figura 23: Setpoint 65°C



O sinal de saída para este setpoint é baixo, como pode ser observado na Figura 24, isto é devido ao setpoint estar próximo do valor máximo que a planta suportaria, não ultrapassando o valor de escrita 30, que corresponde a 0,58V.

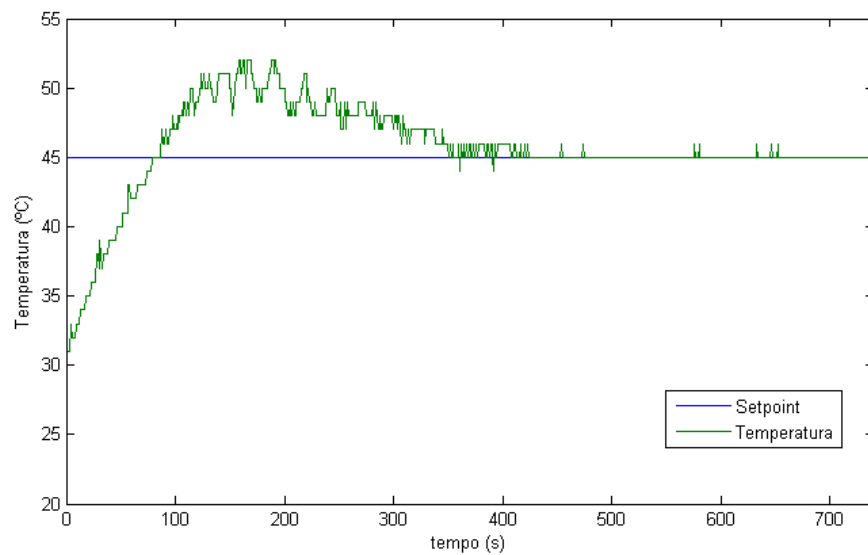
Figura 24: Variável Manipulada para 65°C



4.1.3 Setpoint 45°C

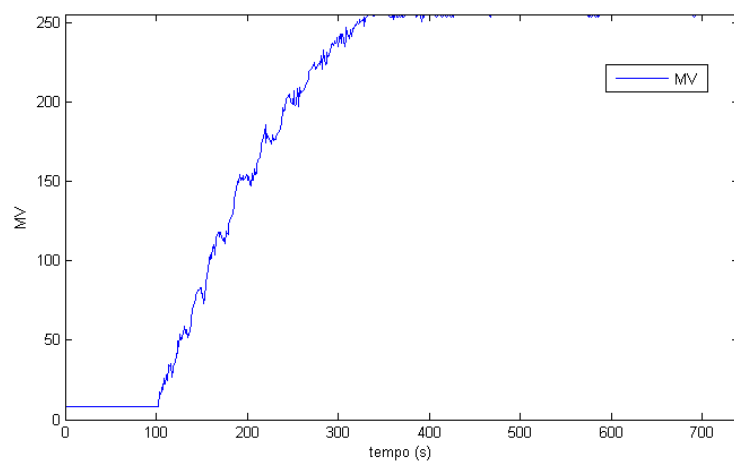
Para este setpoint foram feitos dois testes, o primeiro deles a partir de uma temperatura mais baixa, conforme a Figura 25. Entretanto, para este teste foi utilizado um arredondamento nas casas decimais com os mesmos valores dos parâmetros K_p , K_i , K_d , o que possibilitou realizar um controle exato, porém menos preciso. Isto deve ser levado em conta pelo desenvolvedor.

Figura 25: Setpoint 45°C com Arredondamento



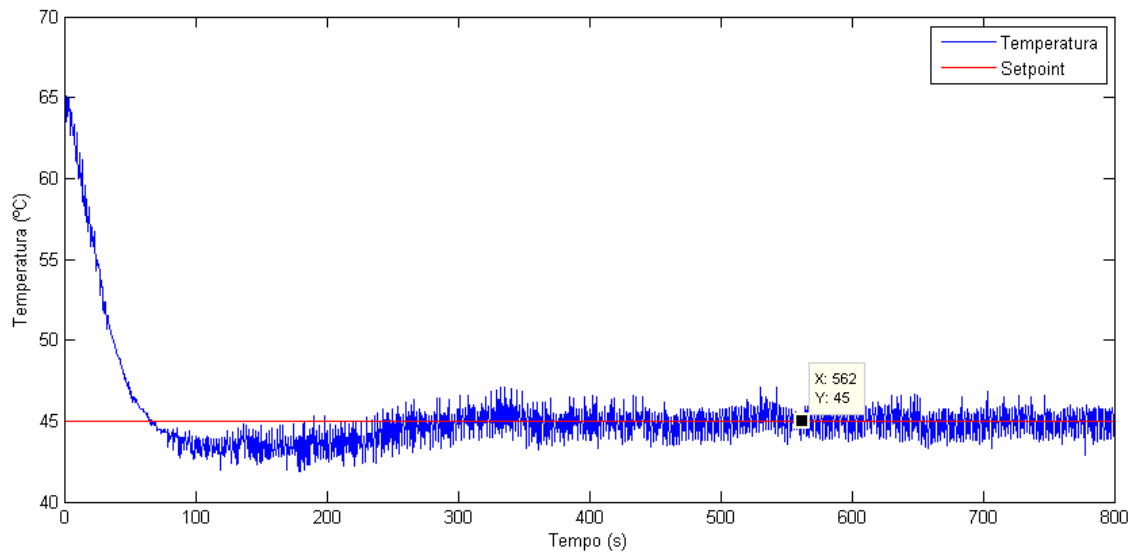
Em contradição ao que aconteceu no teste apresentado na seção 4.1.2, era esperado que o sinal de saída fosse alto conforme mostra a Figura 26, já que 45°C está em torno da temperatura mais baixa que pode ser controlada.

Figura 26: Variável Manipulada para 45°C Arredondados



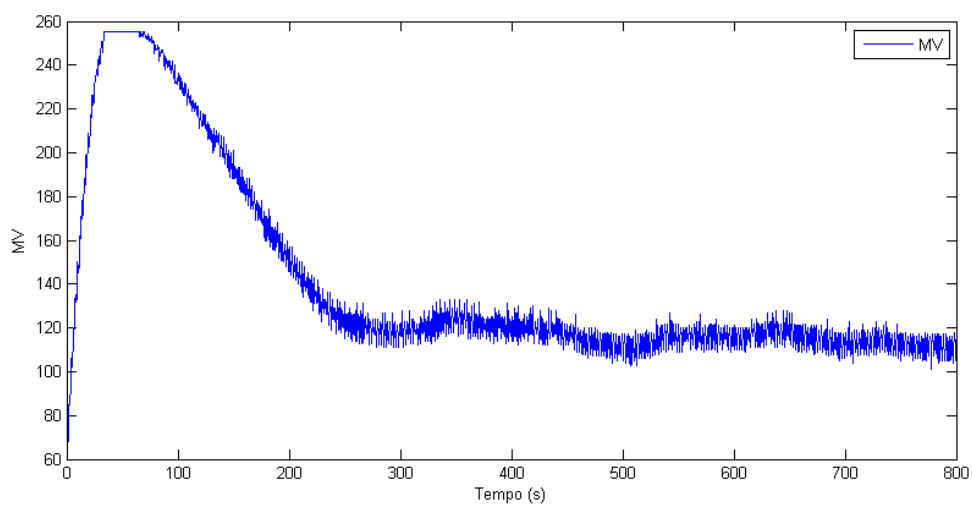
No teste realizado com o setpoint em 45°C, o controle iniciou com um valor maior que o setpoint. E conforme pode ser visto na Figura 27 o tempo de acomodação novamente ficou em torno dos 562 segundos, o que se pode justificar devido ao tempo da planta que poderá em outra experiência ser provada em uma modelagem matemática da planta térmica.

Figura 27: Setpoint 45°C



Para esta situação, pode ser observado na Figura 28 que a variável de saída se estabilizou em torno da metade do valor máximo de saída. Isto se deve pelo fato de o experimento ter sido iniciado com uma temperatura maior que o setpoint. O controle por sua vez se estabilizou com o valor diferente do primeiro teste de mesmo setpoint, onde o sentido de atuação do controle era oposto, no entanto este teste foi importante, já que se poupa energia nesta situação.

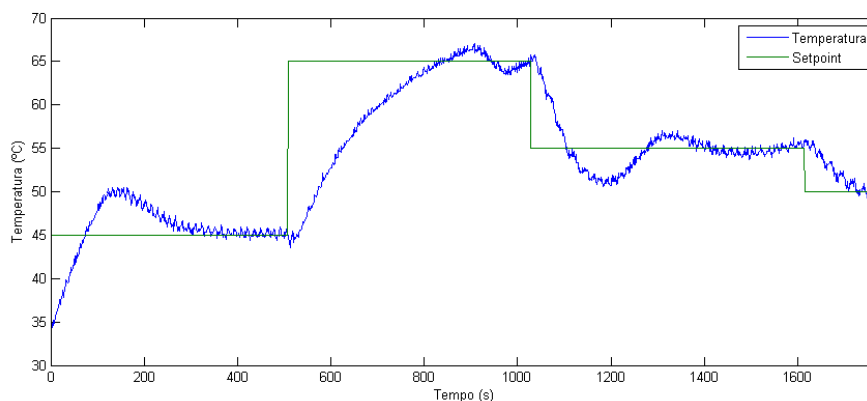
Figura 28: Variável Manipulada para 45°C



4.1.4 Setpoint Variável

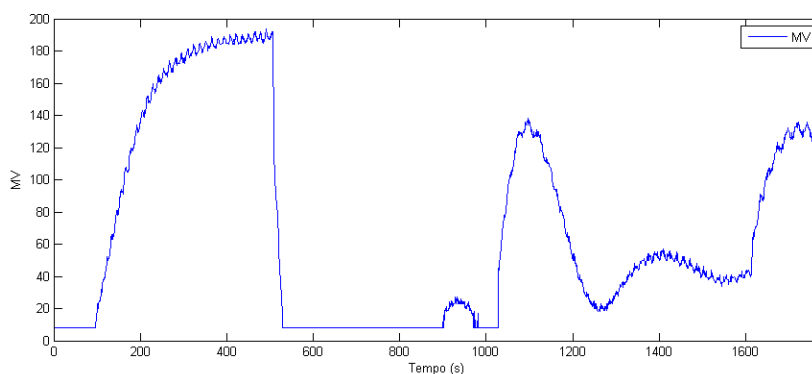
Assim como era esperado, com a execução dos degraus de setpoint, o controle de temperatura tenta ser estabelecido nas mudanças repentinas do valor desejado conforme mostra a Figura 29.

Figura 29: Teste com Variação do Setpoint



A partir da comparação das Figura 29 e Figura 30 é possível observar que o consumo de energia é maior quando é desejado um valor mais baixo de temperatura e menor energia quando for maior o valor desejado (setpoint) de temperatura. Então, este sistema possui direção reversa, que é caracterizado pelo movimento onde um aumento na CV, reduz-se a MV.

Figura 30: Gráfico do MV para Variação do Setpoint



Esta sequência de mudança no setpoint simula o controle real de uma planta térmica industrial, onde é necessário muitas vezes realizar mudanças no setpoint no decorrer da execução do controle.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, devido ao comportamento das curvas de controle serem semelhantes às curvas de controle PID vistas na literatura. Os valores esperados foram alcançados com margens de erros estipuladas pelo projetista. Seu desempenho foi superior ao esperado, entretanto com um melhor ajuste dos parâmetros K_p , K_i , K_d , mais eficaz será o controle.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento realizado teve como objetivo servir de experiência didática no ajuste de controle PID, simulando em uma planta real a dificuldade que um desenvolvedor pode passar ao realizar um sistema de controle em uma indústria ou produto.

Deve ser observado que não foi realizada modelagem matemática do protótipo, etapa ignorada neste projeto e que tem extrema importância na realização de um controle, principalmente quando não se pode perder tempo ou dinheiro realizando testes com protótipos. Entretanto, quando se tem uma planta em mãos para teste, pode ser possível obter um controle que satisfaça os critérios do desenvolvedor e cliente.

Assim, como mostrou a seção 2.2, este sistema de controle classificado como clássico, apresentou resposta satisfatória, pois foi possível estabelecer um controle de temperatura em uma planta térmica de acordo com os pré-requisitos e critérios do desenvolvedor. No entanto, existem novos estudos de controles modernos, que abordam uma teoria mais complexa do controle e que pode ser uma motivação para continuação do estudo, e em alguns casos podem apresentar melhor desempenho que o controle PID.

Contudo, o desenvolvimento deste trabalho apresentou uma boa experiência no ajuste de um controle de temperatura em uma planta. A escolha do controle PID se deu pelo fato de sua simplicidade e eficiência. Com este controle não foi necessário realizar nenhum ajuste maior, entretanto poderia ser feito um melhor ajuste automático dos parâmetros do controle PID em função da aproximação da CV ao setpoint, onde pudessem ser modificados durante a execução do controle, através de um ajuste fuzzy ou por alguma outra técnica, o que poderá ser motivação para um projeto futuro.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, F. M. U. **Apostila de Sistema de Controle**. Natal: UFRN, 2007.

ARDUINO: The Documentary. Direção: Rodrigo Calvo e Raul Alejos. Produção: Rodrigo Calvo. [S.l.]: Laboral. 2010.

EVANS, B. **Beginning Arduino Programming**. [S.l.]: Apress, 2011.

LIMA, C. B. D.; VILLAÇA, V. M. **AVR e Arduino Técnicas de Projeto**. 2ª. ed. Florianópolis: [s.n.], 2012. 632 p.

MARTINS, N. A. **Sistemas microcontrolados**. São Paulo: Novatec Editora, 2005.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec, 2011.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4ª. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2003.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. **Física 2. Mecânica dos Fluidos, Calor, Movimento Ondulatório**. Rio de Janeiro: [s.n.], v. II, 1997.

SENAI - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Fundamentos de Controle de Processo**. Serra: [s.n.], 1999.

TIMMIS, H. **Practical Arduino Engineering**. [S.l.]: Apress, 2011.

VALE, M. R. B. G. **Análise comparativa do desempenho de um controlador fuzzy acoplado a um PID neural sintonizado por um algoritmo genético com controladores inteligentes convencionais**. Natal: UFRN, 2007.

WENDLING, M. Sensores. Guaratinguetá: UNESP, 2010. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 16 novembro 2013.

APÊNDICE 1 – CÓDIGO FONTE

/* TCC Controle PID de Temperatura em uma pequena planta.

Discente: Jefferson Costa C Silva

Orientação: Marcelo Guerra

Coorientação: Danielle Casillo

*/

// inclusão da biblioteca PID

#include "PID_v1.h"

// Definição dos pinos

#define OutputPin 2

#define InputPin 1

// Constantes do PID

#define kp 2.91

#define ki 0.874

#define kd 0.170

// Variáveis do PID

doubleSetPoint, PresentValue, ManipulatedValue;

// Variaveis para pegar o setpoint

int numero;

char buffer[4];

intreceived;

// Parâmetros de controle e escolha do inversa ou diretamente proporcional.

PIDpid(&PresentValue, &ManipulatedValue, &SetPoint, kp, ki, kd, REVERSE);

// Variavel do tempo

long t;

// Função setup

```
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(OutputPin, OUTPUT);
  pinMode(InputPin, INPUT);

  // Ativa o PID, a cada Compute(), o sistema irá calcular o valor de MV.
  pid.SetMode(AUTOMATIC);

  analogWrite(OutputPin, 255);

  received = 0;
  buffer[received] = '\0';

  t=millis();
}

// Função que lêo LM35 cinco vezes e tira a média.
floatGetTemp(float sensor){
  floattemp = 0;
  for(int i=0; i< 5;i++)
  {
    temp += analogRead(InputPin);
    delay(20);
  }
  temp = (temp * 0.097751711);
  return (float)temp;
}

// Função loop
void loop(){
  if(Serial.available()){
    // lersetpoint
    buffer[received++] = Serial.read();
    if(received>= (sizeof(buffer)-1)){
```

```
numero = atoi(buffer);

received = 0;
}
Serial.flush();
SetPoint = numero;
}

floattemp = GetTemp(A0);
PresentValue=temp; // variável necessária na biblioteca
// Calcula o valor manipulado chamando biblioteca
pid.Compute();
if(ManipulatedValue<16){ // variável de saída da biblioteca
ManipulatedValue=8;
}
// Atua no processo
analogWrite(OutputPin,ManipulatedValue);
// Mostra os valores pela serial
if ((millis()-t) > 1000)
{
Serial.print("SetPoint: ");
Serial.println(SetPoint, 1);
Serial.print("Temperatura: ");
Serial.println(PresentValue, 1);
Serial.print("MV: ");
Serial.println(ManipulatedValue, 0);
t=millis();
}
delay(300);
}
```

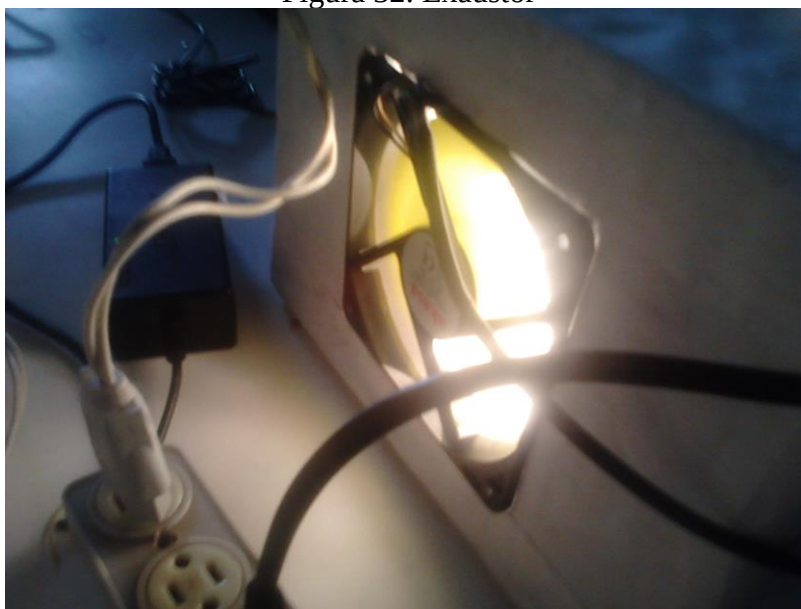
APÊNDICE 2 – FOTOS

Figura 31: Sistema de Controle



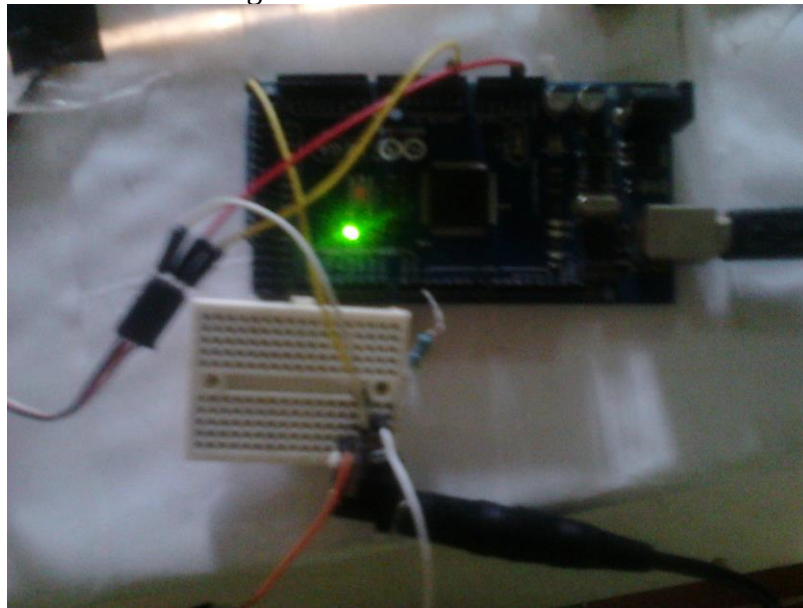
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32: Exaustor



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 33: Arduino e Circuito



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 34: Planta Térmica



Fonte: Elaborada pelo autor

ANEXO 1 – DATASHEET BD139



August 2013

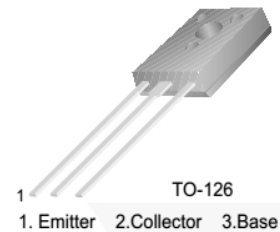
BD135 / 137 / 139 NPN Epitaxial Silicon Transistor

Features

- Complement to BD136, BD138 and BD140 respectively

Applications

- Medium Power Linear and Switching



Ordering Information

Part Number	Marking	Package	Packing Method
BD13516S	BD135-16	TO-126 3L	Bulk
BD1356STU	BD135-6		Rail
BD13510STU	BD135-10		
BD13516STU	BD135-16		
BD13716STU	BD137-16		
BD13710STU	BD137-10		Bulk
BD13716S	BD137-16		Rail
BD13916STU	BD139-16		Bulk
BD13910S	BD139-10		Rail
BD13916S	BD139-16		
BD1396STU	BD139-6		
BD13910STU	BD139-10		

Absolute Maximum Ratings

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only. Values are at $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter		Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	BD135	45	V
		BD137	60	
		BD139	80	
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	BD135	45	V
		BD137	60	
		BD139	80	
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage		5	V
I_C	Collector Current (DC)		1.5	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)		3.0	A
I_B	Base Current		0.5	A
P_C	Device Dissipation	$T_C = 25^\circ\text{C}$	12.5	W
		$T_A = 25^\circ\text{C}$	1.25	W
T_J	Junction Temperature		150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature		- 55 to +150	$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics

Values are at $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage	BD135	45			V
		BD137	60			
		BD139	80			
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = 30\text{ V}, I_E = 0$			0.1	μA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = 5\text{ V}, I_C = 0$			10	μA
h_{FE1}	DC Current Gain	$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 5\text{ mA}$	25			
h_{FE2}		$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 0.5\text{ A}$	25			
h_{FE3}		$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 150\text{ mA}$	40		250	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 500\text{ mA}, I_B = 50\text{ mA}$			0.5	V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 0.5\text{ A}$			1	V

h_{FE} Classification

Classification	6	10	16
h_{FE3}	40 ~ 100	63 ~ 160	100 ~ 250

Typical Performance Characteristics

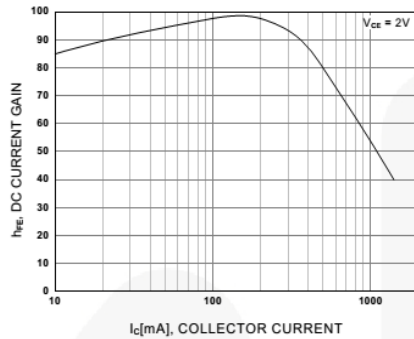


Figure 1. DC current Gain

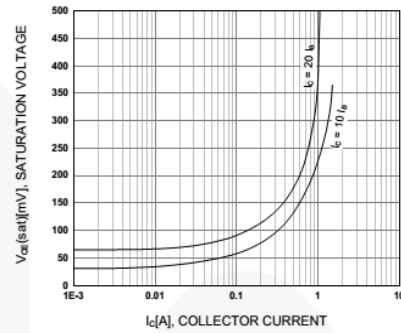


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage

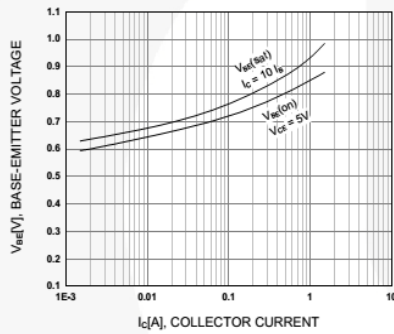


Figure 3. Base-Emitter Voltage

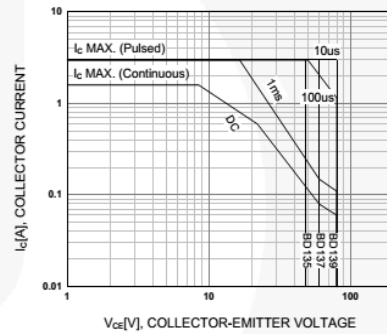


Figure 4. Safe Operating Area

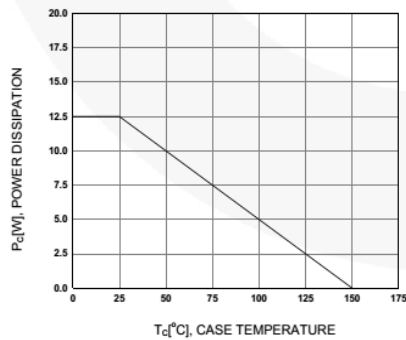


Figure 5. Power Derating

ANEXO 2 – DATASHEET SENSOR LM35



December 1994

LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D

Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$ over a full -55 to $+150^{\circ}\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\text{ }\mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55° to $+150^{\circ}\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40° to $+110^{\circ}\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is

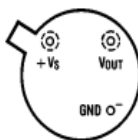
available packaged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-202 package.

Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear $+10.0\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at $+25^{\circ}\text{C}$)
- Rated for full -55° to $+150^{\circ}\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\text{ }\mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\text{ }\Omega$ for 1 mA load

Connection Diagrams

TO-46
Metal Can Package*



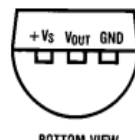
BOTTOM VIEW

TL/H/5516-1

*Case is connected to negative pin (GND)

Order Number LM35H, LM35AH,
LM35CH, LM35CAH or LM35DH
See NS Package Number H03H

TO-92
Plastic Package

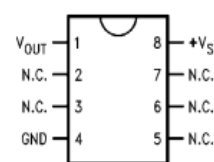


BOTTOM VIEW

TL/H/5516-2

Order Number LM35CZ,
LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

SO-8
Small Outline Molded Package

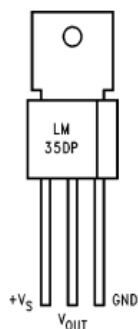


TOP VIEW

N.C. = No Connection

Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

TO-202
Plastic Package

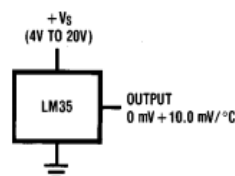


TL/H/5516-24

Order Number LM35DP
See NS Package Number P03A

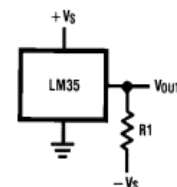
TRI-STATE® is a registered trademark of National Semiconductor Corporation.

Typical Applications



TL/H/5516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade
Temperature
Sensor ($+2^{\circ}\text{C}$ to $+150^{\circ}\text{C}$)



TL/H/5516-4

Choose $R_1 = -V_S/50\text{ }\mu\text{A}$

$V_{OUT} = +1,500\text{ mV}$ at $+150^{\circ}\text{C}$
 $= +250\text{ mV}$ at $+25^{\circ}\text{C}$
 $= -550\text{ mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade
Temperature Sensor

LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D
Precision Centigrade Temperature Sensors

Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+35V to -0.2V
Output Voltage	+6V to -1.0V
Output Current	10 mA
Storage Temp., TO-46 Package,	-60°C to +180°C
TO-92 Package,	-60°C to +150°C
SO-8 Package,	-65°C to +150°C
TO-202 Package,	-65°C to +150°C

Lead Temp.:

TO-46 Package, (Soldering, 10 seconds)	300°C
TO-92 Package, (Soldering, 10 seconds)	260°C
TO-202 Package, (Soldering, 10 seconds)	+230°C

SO Package (Note 12):

Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C

ESD Susceptibility (Note 11) 2500V

Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)

LM35, LM35A	-55°C to +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C to +110°C
LM35D	0°C to +100°C

Electrical Characteristics (Note 1) (Note 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	°C
	$T_A = T_{MAX}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		°C
	$T_A = T_{MIN}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	°C
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	°C
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/°C
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.5		± 3.0	± 0.5		± 3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		131	91		114	μA
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		133	91.5		116	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		2.0	0.5		2.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	μA/°C
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	°C
Long Term Stability	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			°C

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = +5\text{Vdc}$ and $I_{LOAD} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of Figure 1. Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is 400°C/W , junction to ambient, and 24°C/W junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is 180°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is 220°C/W junction to ambient. Thermal resistance of the TO-202 package is 85°C/W junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

Electrical Characteristics (Note 1) (Note 6) (Continued)								
Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8		± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	± 0.8		± 1.5	± 0.8		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				± 0.9		± 2.0	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$+ 10.0$	$+ 9.8, + 10.2$		$+ 10.0$		$+ 9.8, + 10.2$	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2.0		± 0.4	± 2.0		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5		± 5.0	± 0.5		± 5.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1		± 0.01	± 0.1		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	± 0.02		± 0.2	± 0.02		± 0.2	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		μA
	$V_S = +5\text{V}$	105		158	91		138	μA
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		μA
	$V_S = +30\text{V}$	105.5		161	91.5		141	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0		μA
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.5		3.0	0.5		3.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		$+ 0.39$		$+ 0.7$	$+ 0.39$		$+ 0.7$	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	$+ 1.5$		$+ 2.0$	$+ 1.5$		$+ 2.0$	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and 10mV/ $^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

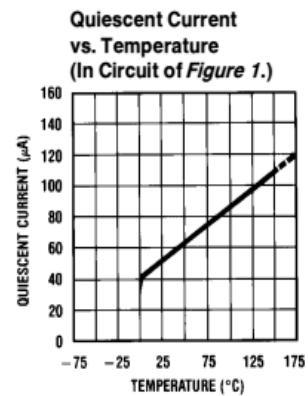
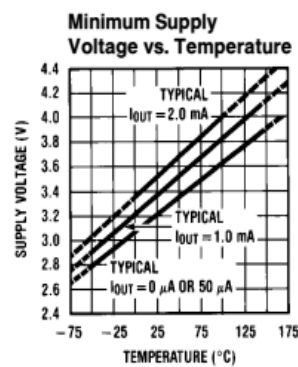
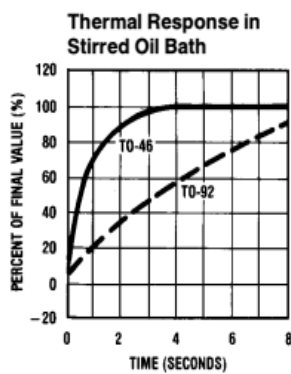
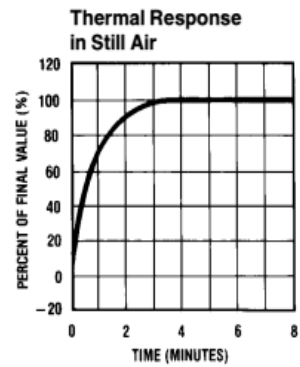
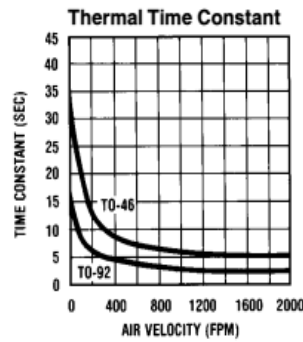
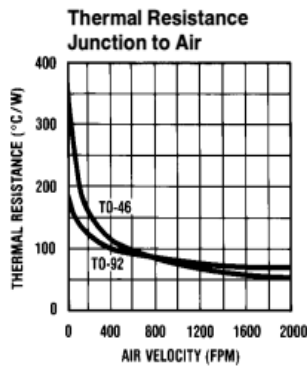
Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of Figure 1.

Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

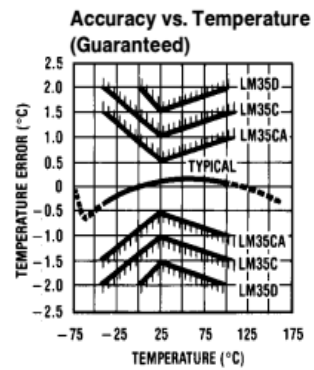
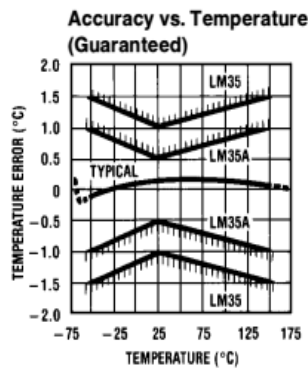
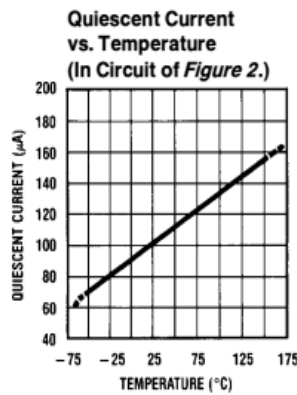
Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 k Ω resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

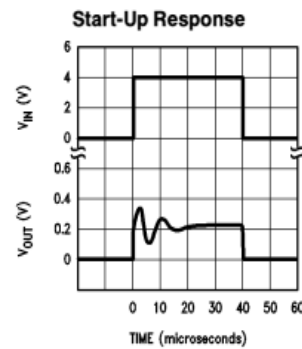
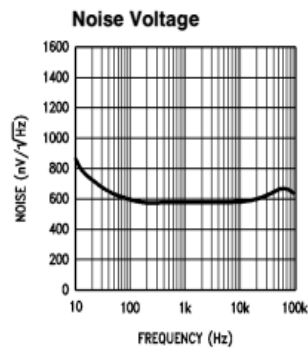
Typical Performance Characteristics



TL/H/5516-17



TL/H/5516-18



TL/H/5516-22