



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Projeto, Montagem e Teste de Módulo Instrucional Interativo para Estudo
de Curvas I-V em função da Temperatura**

DENIS PAULO NETO

SEROPÉDICA / 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

PROJETO, MONTAGEM E TESTE DE MÓDULO INSTRUCIONAL
INTERATIVO PARA ESTUDO DE CURVAS I-V EM FUNÇÃO DA
TEMPERATURA

DENIS PAULO NETO

Monografia apresentada
ao Curso de Graduação
em Física da UFRRJ,
como requisito parcial
para obtenção do título de
Licenciado em Física.

Sob Orientação do Professor

Dr. Marcelo Azevedo Neves

Seropédica

Janeiro de 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**PROJETO, MONTAGEM E TESTE DE MÓDULO INSTRUCIONAL
INTERATIVO PARA ESTUDO DE CURVAS I-V EM FUNÇÃO DA
TEMPERATURA**

Denis Paulo Neto

Monografia aprovada em 15 / 01 / 2020 para obtenção do título de Licenciado em Física.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Azevedo Neves
(Orientador)

Prof. Dr. Artur Jorge da Silva Lopes
(1º Titular)

Prof. Dr. Claudio Maia Porto
(2º Titular)

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado força e coragem de chegar até aqui, eu nada seria sem a Sua generosidade e Seu amor.

Agradeço a minha esposa Darmi e filha Emanuele, por todo empenho, dedicação e incentivo na minha formação.

Ao meu orientador Marcelo A. Neves, pelo apoio, encorajamento, investimento e compromisso na realização desse trabalho.

Ao Professor Arthur Jorge da Silva Lopes, meu orientador no P&D D712 Supercabo, por acreditar em mim e me dar a oportunidade de trabalhar ao seu lado, a ele meus profundos agradecimentos.

Ao P&D D712 Supercabo, no qual trabalhei durante dois anos.

Aos professores(as) desta instituição por fazerem parte da concretização e realização desse sonho.

RESUMO

Nesta Monografia de Conclusão de Curso de Licenciatura em Física da UFRRJ se apresenta o projeto, a construção e os testes (quanto a sua operacionalidade) de um módulo instrucional interativo experimental (“kit”) para obtenção da curva característica corrente vs. Tensão elétricas (“curva $I \times V$ ”) de dispositivos eletrônicos com dois terminais. O kit é construído usando o hardware Arduino Uno com software e circuitos adicionais especialmente desenvolvidos neste trabalho, controlando a temperatura aplicada usando uma célula de Efeito Peltier. Os testes foram realizados usando um diodo. Também de apresenta uma proposta de roteiro experimental a ser utilizada em aulas práticas de Disciplinas de cursos de Nível Superior.

Sumário

1) Introdução	1
1.1 Sobre a experimentação no ensino e aprendizagem da Física.	1
1.2 Objetivos desta Monografia	6
1.3 Sobre o aparato interativo pretendido e a estrutura desta Monografia	8
2) Revisão bibliográfica	10
2.1 O Diodo Semicondutor	10
2.1.1 Semicondutores	11
2.1.2 Elétrons e buracos	13
2.1.3 Recombinação e geração térmica	16
2.1.4 Semicondutores intrínsecos	17
2.1.5 Semicondutores impuros e extrínsecos	17
2.1.6 Concentração de elétrons e buracos	19
2.1.7 A corrente de deriva	21
2.1.8 A corrente de difusão	24
2.1.9 Modelando um diodo como uma junção p-n	29
2.1.10 Junção p-n polarizada	35
3) Materiais e métodos	42
3.1 Instrumentação	42
3.1.1. A Célula Peltier	42
3.1.2. Sensor de temperatura LM35	44
3.1.3. Microcontrolador ARDUINO	45
3.1.4. Software <i>PLX-DAQ</i> e <i>PLX-DAQ versão 2</i>	48
3.2. A Proposta de Módulo Experimental	58

3.3. Processamento dos dados	62
3.4 Os Procedimentos Experimentais	63
4) Resultados e discussões	66
4.1 Módulo experimental obtido	66
4.1.1 Módulo de variação e controle da temperatura construído	67
4.1.2 Módulo gerador da curva $V \times I$ construído	69
4.1.3 Programação no Arduino	71
4.1.4. Programação no Software PLX-DAQ Versão 2 para aquisição de dados em conjunto com o Arduino	84
4.1.5. Descrição do funcionamento geral do sketch	86
4.2. Teste do Módulo experimental	92
4.3. Aplicação com Diodo	92
4.4. Proposta de roteiro interativo (atividade)	98
5) Conclusão e propostas	109
Referências Bibliográficas	111
Apêndice A	117
Anexo	126

Índice de Tabelas

Tabela 1: Dados para determinação da curva $n \times T$	96
Tabela 2 : Determinação da constante Boltzmann, usando $q = e = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C..}$	98
Tabela 2: Determinação da carga fundamental, usando $K = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	98

Índice de Figuras

- Figura 1. Disposições de bandas de energia de um metal, semicondutor e um isolante. (a) Metal (b) Semicondutor (c) Isolante. Fonte: (CORREIA, 2017). 10
- Figura 2. a energia térmica rompe a força das ligações covalentes que mantém os átomos do semicondutor de Silício ligados. O elétron é liberado para a banda de condução se tornando um elétron livre e deixando um buraco na camada de valência. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013). 15
- Figura 3. Ilustrações das estruturas de bandas e níveis de energia de um cristal dopado com (a) uma impureza doadora e (b) uma impureza aceitadora. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013). 18
- Figura 4. Modelando a Difusão. Fonte: (MELLO, 1975, p. 90) 25
- Figura 5.(a) Foto de um diodo. Fonte: (WIKIMEDIA COMMONS, 2019); (b)Diagrama esquemático de uma junção PN; (c) O diodo como uma junção PN. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013). 31
- Figura 6. (a) Na situação de equilíbrio o fluxo total de carga é nulo, pois as correntes de recombinação e de fuga se compensam. (b) na polarização direta a corrente total I será um fluxo de elétrons de n para p pois as correntes não se compensam e. (c) Na polarização inversa o fluxo total de corrente será praticamente a corrente de fuga de P para N (movimento dos elétrons), pois a barreira de potencial aumenta drasticamente e a corrente de recombinação será desprezível. O deslocamento das bandas representa o nível de energia. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013). 32

Figura 7. Gráficos corrente-tensão característicos	
(a) de uma junção PN, Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013);	
(b) de diodos a diferentes temperaturas, Fonte: (EL-GHANAM, 2015).	39
Figura 8. Pastilha Peltier. Fonte: (DANVIC, 2019).	42
Figura 9. Esquema de uma Pastilha Peltier. Fonte: (YHAEFFNER, 2016).	43
Figura 10. Sensor LM35. Fonte: (VIDA DE SILÍCIO, 2019).	44
Figura 11. Exemplo de uma placa Arduino Uno. Fonte:(EVANS, 2013).	47
Figura 12: Exemplo de programação do Arduino utilizando a IDE. Fonte: Acervo do autor.	48
Figura 13: Interfaces do PLX-DAQ . (a) Configurações de acesso;	
(b) Configurações de operação. Fonte: Acervo do autor.	51
Figura 14: Microsoft Excel e interface do PLX-DAQ VERSÃO 2 . . Fonte: Acervo do autor.	56
Figura 15: Interface do PLX-DAQ VERSÃO 2 . . Fonte: Acervo do autor.	57
Figura 16: Planilha de configuração de parâmetros e botões do PLX-DAQ VERSÃO 2 . . Fonte: Acervo do autor.	57
Figura 17. Circuito divisor de tensão básico usado como transdutor para os cálculos da corrente e tensão no diodo, e posterior geração de gráfico no Microsoft Excel. Fonte: Acervo do autor.	59
Figura 18: Circuito representativo do módulo proposto. Fonte: Acervo do autor.	61
	61

Figura 19: Proposta da Montagem Experimental. Fonte: Acervo do autor.	
Figura 20: Fotos (a) do “Shield” de controle; (b) da Placa Peltier, da amostra e do sensor de temperatura LM35.	68
Figura 21: Foto do módulo experimental e tampa de fixação para a amostra.	69
Figura 22: Foto do módulo gerador da curva V x I.	70
Figura 23. Curvas obtidas (a) I – V para um mesmo diodo em 9 temperaturas diferentes; (b) Temperaturas das isotermas estabelecidas em função do tempo.	94
Figura 24. Ajuste das curvas V x I para as temperaturas 298,89K, 296,15K 292,58K , 288,34K, 286,67K , 285,14K,283,65K e 280,54K, identificadas em cada curva.	95
Figura 25. Gráfico da curva n x T.	96
Figura 26: Janela com o ajuste computacional da dependência I(V) da curva de teste a 290,15 K, usando a expressão $Y(X) = A * \exp(C*X/n) - A$, com $n=1,782299597776$ e $C = q/KT$.	97
Figura 27. (a) Foto de um diodo. Fonte: (WIKIMEDIA COMMONS, 2019); (b)Diagrama esquemático de uma junção PN; (c) O diodo como uma junção PN. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013).	100
Figura 28. Curva n x T do diodo usado neste Roteiro	101 102
Figura 29: Fotos (a) da montagem da amostra sobre a placa Peltier; (b) do	

travamento da amostra sobre a placa.

Figura 30: Configuração da comunicação serial na IDE.	103
Figura 31: Interface PLXDAQ para curva I-V do diodo.	103
Figura 32: Porta e velocidade de comunicação	104
Figura 33: Botão conectar	105
Figura 34. Configuração de parâmetros	105
Figura 35. Botões para (a) inicializar e (b) desconectar uma medida	107

Índice de Anexos

Folha de dados (datasheet) da Célula Peltier utilizada	126
Folha de dados (datasheet) do Sensor de temperatura utilizado.	129
Folha de dados (datasheet) do MOSFET JCS50N06FH utilizado	143

Índice de Apêndices

Apêndice A

117

1. Introdução

1.1. Sobre a experimentação no ensino e aprendizagem da Física.

Atividades experimentais são ferramentas necessárias para ajudar a vencer as estruturas mentais pré-existentes nos alunos, estruturas essas que Piaget chama de concepções causais, com as quais o aluno (com uma pré concepção já construída) usa o senso comum para explicar os fenômenos científicos (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). Desta forma atividades experimentais apontam o caminho para o entendimento correto do fenômeno científico.

Segundo Piaget, cada aluno tem um estágio de desenvolvimento cognitivo, o que torna necessário então o uso de práticas aceleradoras na construção de estruturas mentais que permitam o aprendizado dos conceitos científicos propostos (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). Sem essas práticas, os alunos podem apresentar dificuldades para aprender o conceito científico em virtude de não possuírem (naquele momento) as estruturas mentais necessárias para tal aprendizado (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). Por isso as atividades experimentais em ciência se tornam de extrema importância.

Mesmo entendendo a necessidade de atividades experimentais, a prática pedagógica e a teoria são diferentes, muitas vezes tais atividades não encontram espaço nas salas de aula, em parte porque os equipamentos para tais atividades são muito tradicionais (GASPAR, 2014) e, em parte, porque há um certo descrédito (GASPAR, 2014) de que tais atividades tenham real efeito

para a construção de uma estrutura mental na qual o aluno consiga entender as concepções científicas que se quer ensinar. Por isso existe a necessidade de uma instrumentação, para o ensino da física, mais acessível e eficiente de maneira ser necessário buscar a melhoria contínua dos métodos e aparatos pedagógicos-experimentais.

Para Lev Vygostky (1896-1934), em sua pedagogia sociocultural (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999), verifica-se que uma errônea compreensão da forma como se processam as descobertas científicas pode levar ao fracasso do redescobrimto através das atividades experimentais. Para Vigotski todos somos capazes de aprender novos conceitos, sem a necessidade de uma construção prévia de uma estrutura mental orgânica para suportar tal conceito, obviamente respeitada a capacidade mental do aluno, sua zona de desenvolvimento imediato (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). Tendo em vista que o cérebro leva um tempo para as estruturas mentais capazes de processar o novo conceito, não basta apenas apresentar a atividade experimental e simplesmente criar um desequilíbrio ou conflito cognitivo, pois somente isto seria insuficiente (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999): é necessário que haja uma interação social, onde, em um momento apropriado, e de maneira direcionada por alguém com capacidade de guiar a construção do conhecimento, os alunos possam interagir. Vemos então que quando interagimos socialmente conseguimos construir estruturas mentais com mais facilidade para o aprendizado de novos conceitos. Isto se deve à variada forma como se dá a expressão da linguagem por cada indivíduo, o que nos permite ver um mesmo conceito exposto de maneiras diferentes, nos habilitando assim

a encontrar aquilo que pode preencher as lacunas da construção de uma estrutura mental requerida ao aprendizado (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). Sendo assim podemos dizer que cada aluno possui lacunas construtivas diferentes e estruturas mentais diferentes, de maneira que tais estruturas construídas podem ser compartilhadas, fazendo então da interação social um processo necessário para uma construção mais ampla e completa de nossas estruturas mentais de um dado conceito físico.

Baseando-se na teoria de Vygostky, a atividade experimental tem de ser algo construtivista, Vygostky entendia que o conhecimento era uma aquisição construtiva que depende do aluno (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). No entanto essa construção deve ser guiada por um parceiro mais experiente, que pode ser o professor, de maneira a levar o aluno no caminho mais coerente para o entendimento dos conceitos físicos.

Tendo a visão pedagógica do uso de atividades experimentais com o objetivo da redescoberta orientada da física, da aceleração na construção das estruturas cognitivas e a mudança conceitual, precisamos então descartar o entendimento praticado no ensino tradicional, onde a atividade experimental é entendida como apenas um complemento de algum conteúdo teórico que se quer ensinar. Dificilmente uma atividade experimental didática poderá ser o único meio para “redescobrir” algum conceito físico, dada a necessidade de construir conceitos abstratos (“força”, “momentum angular”, “torque”, etc.) na construção de uma Teoria Física (GASPAR, 2014). Logo, seu objetivo no âmbito do ensino da Física deve ser o de fornecer o ambiente para aquisição, com mais eficiência, dos conceitos previamente elaborados. Por isso, as

atividades experimentais devem ser usadas para que as interações sociais tornem o aprendizado acessível e eficiente.

Quando se comparam atividades teóricas e experimentais, no contexto de um conceito físico que pode ser ensinado usando as duas atividades, pode se verificar que atividades experimentais permitem uma maior interação social em comparação com a atividade teórica, permitindo uma maior troca entre os companheiros de classe, bem como uma menor inibição quanto aos questionamentos e tentativas de respostas, desde que as respostas não tenham um formato pré-determinado como nas atividades teóricas.

Uma pedagogia para as atividades experimentais deve observar a zona de desenvolvimento imediato do aluno, usando explicações que o aluno consiga entender (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). Mesmo se o conceito físico for complexo é possível ensiná-lo, buscando, para isso, explicações que estejam no nível de entendimento do aluno. Deve-se também garantir que um parceiro mais capaz participe das atividades, sendo de extrema importância este aspecto: este parceiro, seja ele o professor ou outro aluno, irá conduzir o aluno para uma explicação correta do que está acontecendo. Outro alvo também deve ser o compartilhamento das perguntas propostas e das respostas pretendidas, através de atividades que induzam as perguntas e respostas corretas (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999). Isto irá conduzir a uma interação espontânea e uma necessidade de que todos os participantes conheçam tudo que está proposto. Observa-se também que para que a interação ocorra com

facilidade todos os participantes devem compreender a linguagem utilizada (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999).

Em primeira instância o conhecimento (ou saber) em física é gerado por um grupo de indivíduos (os cientistas) que, por sua vez possuem uma linguagem específica, e esse saber, com essa linguagem específica, é usado por outro grupo de indivíduos (os professores), que são os responsáveis em traduzi-lo, usando uma nova linguagem na tentativa de levá-lo aos alunos, que possuem uma linguagem muito diferente dos físicos experimentais e teóricos.

Os conhecimentos físicos gerados pelos cientistas geralmente são transpostos em livros-textos que detalham os aspectos teóricos e experimentais que foram utilizados para se gerar tal conhecimento. Porém, mesmo com descrições detalhadas, os procedimentos experimentais usados na geração do conhecimento físico não podem ser apresentados com toda riqueza de detalhes de um experimento real. Isto demonstra que, da mesma maneira com que as práticas experimentais são importantes para a geração do conhecimento físico, também são importantes para a sua transmissão. Deste modo, se faz necessário o seu uso e também uma transposição desses experimentos, já que o grupo de indivíduos que irá realiza-los possuem uma linguagem diferente da linguagem utilizada pelos físicos experimentais e teóricos (que geram tais conhecimentos).

Então para que tal transposição ocorra de forma a melhorar o conceito de atividades experimentais como ferramentas para o ensino da física é necessário enfatizar alguns aspectos importantes como: a modernização das

práticas experimentais, o aprimoramento do conhecimento da metodologia experimental, conectar os novos conhecimentos em física com os antigos, assim como transformar um conceito físico em problemas contextualizados para que desta forma fique mais acessível a linguagem de quem recebe tal conhecimento.

Em síntese, podemos considerar como nosso referencial pedagógico a Teoria de Vygotsky, salientando que (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999):

1 – O desenvolvimento cognitivo não pode ser entendido sem referência ao contexto social e cultural no qual ele ocorre;

2 – O processo de aprendizagem resulta essencialmente de cooperação, ensino e imitação;

3 – O aluno pode aprender se contar com a cooperação de professor ou de um parceiro mais capaz

4 – O ensino se consuma quando o aluno e o professor compartilham significados.

1.2. Objetivos desta Monografia

Trata-se de um Projeto de Instrumentação para o Ensino da Física, que pode ser usado para colaborar no estudo experimental de dispositivos eletrônicos em Nível Médio, e com a modelagem física adequada, também em Nível Superior, para formação de profissionais nas áreas de Física,

Engenharias Elétrica, Eletrônica e de Materiais, ou ainda na formação continuada de professores.

A fundamentação teórica deste Projeto é a aplicabilidade de sistemas eletrônicos de aquisição de dados em aulas experimentais de Física, tendo como ponto de partida a teoria de Vygotsky, estudada a partir de fontes secundárias (GASPAR, 2014; MOREIRA, 1999).

O problema proposto é projetar, construir e testar um módulo instrucional interativo ("kit"), com uso de recursos de automação e aquisição de dados eletrônicos, para obter curvas que apresentem a variação da corrente elétrica I em materiais e em dispositivos eletrônicos de estado sólido em função da tensão elétrica V estabelecida entre seus terminais, incluindo a variação com a temperatura T . Com esta curva, é possível, por processamento de dados, obter a variação da resistência elétrica $R = V / I$ em função de V , de I e de T . Neste trabalho, o dispositivo estudado de forma específica será um diodo retificador para uso em eletrônica de baixa potência (CAPUANO, 1997; TIPLER, 2006). Conforme se mostra adiante nesta monografia, com o modelo físico apropriado é possível obter o valor de constantes físicas fundamentais, ou outros parâmetros intrínsecos do material ou dispositivo eletrônico estudado, usando o kit pretendido (MELLO, 1975; RESENDE, 2004).

A relevância desta monografia consiste em fornecer a um(a) professor(a) um sistema de medição flexível para uso conforme seu planejamento didático, e que seja de uso interativo pelos alunos, permitindo atividades de interação social, conforme preconizado pela teoria de Vygotsky.

Com este trabalho espera-se avançar no conhecimento de metodologias para estudo experimental da física usando aquisição eletrônica de dados sobre o comportamento eletromagnético e térmico de sistemas físicos de interesse científico e tecnológico.

1.3. Sobre o aparato interativo pretendido e a estrutura desta Monografia

Propõe-se a construção e teste de um módulo experimental interativo usando a plataforma de hardware livre Arduino UNO (EVANS, 2013; MONK, 2013; OLIVEIRA, 2015; QUEIROZ, 2015; SILVA, 2018) para acionamento de aquisição de dados, em virtude de este equipamento ter um custo relativamente baixo e ser de fácil manipulação. Isto é vantajoso no cenário atual da estrutura das escolas e universidades públicas do nosso país, quando existem dificuldades estruturais como baixo investimento em instalações e equipamentos, manutenção reduzida dos equipamentos de ensino laboratorial ao longo do anos, carência de vivência prática de diversos fenômenos pelos alunos em nível de Ensino Médio e Ensino Superior (inclusive os dos Cursos de Licenciatura em Física), bem como do impacto social e econômico da Física.

Também foram utilizados *freewares*, tanto quanto foi possível, de forma a viabilizar a replicação do kit em diferentes instituições de ensino.

Para variação da temperatura, se propõe o uso do efeito termoelétrico Peltier (KONDEPUDI, 2008; PRIGOGINE, 2001), usando as chamadas

“pastilhas peltier” (FERNANDES, 2010; MOURA, 2014), que são passíveis de um controle eletrônico também usando a placa Arduino UNO.

Por fim, testamos este kit usando um dispositivo eletrônico de interesse e uso amplo: um diodo retificador (CAPUANO, 1997; MELLO, 1975; RESENDE, 2004; TIPLER, 2006).

Dentro desta proposta, apresenta-se a seguir uma Revisão Bibliográfica, que tratará sobre a modelagem de um diodo de estado sólido, e da relação entre corrente e tensão elétricas neste dispositivo considerando também sua temperatura.

Em seguida, esta Monografia descreve os Procedimentos Experimentais planejados, e após estes, os Resultados obtidos, discutindo-os. A partir da discussão dos resultados, se apresentam as Conclusões e Propostas de Continuidade desta Monografia, seguidas do referencial bibliográfico.

Por fim se apresentam o Apêndice A, onde será apresentada uma revisão sobre Efeito Peltier (usado para controle eletrônico da temperatura do diodo), usando a Termodinâmica Fora do Equilíbrio em Regime Linear, e os anexos com dados complementares.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 O Diodo Semicondutor

Como o dispositivo eletrônico a ser estudado é um diodo semicondutor, fazemos aqui uma revisão da modelagem física deste dispositivo de estado sólido, relevante para a compreensão e uso do kit. Consideramos que o conceito de Bandas de Energia em Sólidos é de conhecimento do leitor, resumida na figura 1, assim como a abordagem semi-clássica do elétron (CONCEIÇÃO, 2013; MELLO, 1975; RESENDE, 2004; TIPLER, 2006).

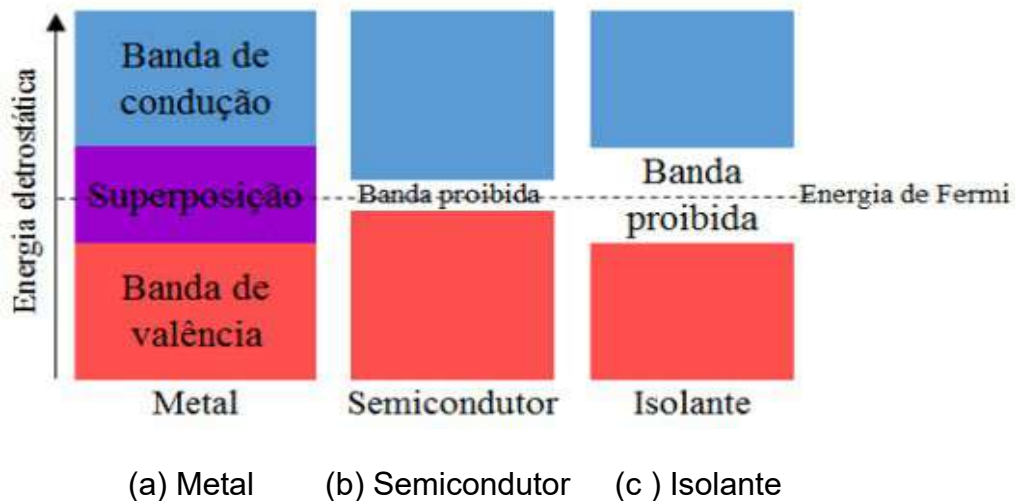


Figura 1. Disposições de bandas de energia de um metal, semicondutor e um isolante. (a) Metal (b) Semicondutor (c) Isolante. Fonte: (CORREIA, 2017).

Nesta primeira parte de Revisão Bibliográfica, vamos focar como a temperatura T afeta os parâmetros físicos que descrevem os processos físicos em um diodo.

2.1.1. Semicondutores

Em 1833, Michael Faraday fez a primeira observação documentada de um efeito semiconductor: a resistência do sulfeto de prata diminuía com a temperatura, de forma diferente da dependência observada em metais (ŁUKASIAK, 2010). A história do desenvolvimento das pesquisas e da indústria de dispositivos semicondutores é complexa e ultrapassa o escopo desta monografia, sendo indicada a leitura do artigo de Łukasiak e Jakubowski (ŁUKASIAK, 2010).

Podemos caracterizar os semicondutores por estes apresentarem, à temperatura ambiente, uma resistividade intermediária entre a dos metais e a dos isolantes (MELLO, 1975, p.49).

A razão para o nome Semiconductor pode ser verificada pelo fato de que, apesar de o número de elétrons “livres” em um semiconductor ser menor do que em condutores, ele é apreciável em comparação aos observados em materiais dielétricos (ou “isolantes”), de modo que a probabilidade que o elétron tem de passar da banda de valência para a banda de condução existe e, não deve ser desprezada (BARBOSA, 2010). De forma que, segundo Rezende: “isto resulta numa condutividade intermediária entre a dos isolantes e a dos metais” (REZENDE, 2004, p.118).

Segundo Rezende, os semicondutores são caracterizados por terem, no zero absoluto ($T = 0$ K), uma banda de valência cheia e uma banda de condução vazia, separadas por um gap de energia de valor E_g relativamente pequeno: menor que 2 eV (REZENDE, 2004, p.118). Nos isolantes ela fica na ordem de 6 eV e nos semicondutores na ordem de 1 eV. O fato de a banda

proibida (gap) ser maior nos isolantes implica que para um elétron saltar da banda de valência para a banda de condução ele precisará de muito mais energia do que em um condutor ou semicondutor (BARBOSA, 2014).

O gap, que significa a diferença de energia E_g entre a banda de valência e condução (MELLO, 1975; RESENDE, 2004; TIPLER, 2006), representa nos semicondutores a quantidade de energia que será necessária aportar no material semicondutor para que ele passe a se comportar como um condutor. Essa energia pode ser eletromagnética, “luminosa” ou mesmo térmica.

Segundo Rezende as propriedades condutoras dos semicondutores dependem principalmente da razão entre a energia do gap E_g e a energia térmica KT (i.e., E_g/KT , onde K é a constante de Boltzmann e T é a temperatura expressa em kelvins), que está ligada ao número de condutores na camada de condução (REZENDE, 2004).

Os semicondutores mais importantes são o silício e o germânio (MELLO, 1975; RESENDE, 2004; TIPLER, 2006). Eles possuem um gap na ordem de 1,12 eV e 0,66 eV, respectivamente, em temperatura ambiente (aproximadamente 300 K). Como os valores de gap se diferenciam dependendo do tipo de material usado para a construção do semicondutor, e eles podem variar com a temperatura, alguns semicondutores se tornam mais sensíveis ao valor da temperatura em comparação outros (REZENDE, 2004).

Quanto ao gap, ainda podemos falar que dependendo da transição que ocorra e das conservações de energia e momentum envolvidas poderá ou não ocorrer a emissão ou absorção de fótons. Por isso as formas das bandas tem grande influência nesta emissão, tendo grande impacto para os

semicondutores com propriedades ópticas e pouco impacto em semicondutores sem propriedades ópticas (REZENDE, 2004).

Os semicondutores chamados intrínsecos são os semicondutores puros, cuja concentração de elétrons na banda de condução varia exponencialmente com a temperatura, reduzindo assim a sua utilização em dispositivos (REZENDE, 2004). Por isso, para controlar este fenômeno, os materiais usados para a construção dos semicondutores são dopados com impurezas dando origem aos semicondutores chamados extrínsecos.

2.1.2. Elétrons e buracos

Parafrazeando Mello e Biase “a mecânica quântica permitiu explicar a estabilidade das substâncias cristalinas à luz da estrutura eletrônica dos átomos” (MELLO, 1975, p.49) portanto, essa explicação também é válida para os semicondutores , verificando-se que:

- os níveis de energia com os quais os elétrons permanecem presos às ligações covalentes, ou seja, eles estão dentro da banda de valência;
- os níveis de energia com os quais os elétrons passam a ser elétrons livres, ou seja, eles estão dentro da banda de condução;
- os níveis de energia que não podem ser atingidos pelos elétrons, a chamada banda proibida.

Para cristais formados de silício e germânio os átomos são unidos por ligações covalentes, isto porque a sua própria estrutura cristalina os impede de formar ligações iônicas, tal que em uma ligação do tipo covalente “cada elétron

da camada de valência passa a pertencer simultaneamente a dois átomos” (MELLO, 1975, p.50).

O fato de que os elétrons das camadas de valência dos semicondutores formem ligações covalentes influencia a maneira como as transições de bandas ocorrem nos semicondutores. Isto se deve ao fato de que a temperatura afeta diretamente a “liberação” de elétrons, de modo que, quanto mais baixa a temperatura, quanto mais próxima do zero absoluto, mais difícil fica a possibilidade destas ligações se quebrarem, ao passo que e quanto mais alta fica a temperatura, por causa da geração térmica, algumas ligações covalentes se quebram mais facilmente, liberando assim alguns elétrons livres (MELLO, 1975). Quando isso acontece, uma ligação covalente deixa de existir, liberando um elétron para transitar pela rede cristalina, sem que o potencial da mesma afete drasticamente o movimento do elétron. Para que isso aconteça pode se verificar uma mudança na massa do elétron, que passa a ter uma massa efetiva, ou seja, uma alteração na dependência da energia com o momentum, de forma que a equação da variação do momentum não é afetada (MELLO, 1975; REZENDE, 2004).

Este processo está ilustrado na figura 2.

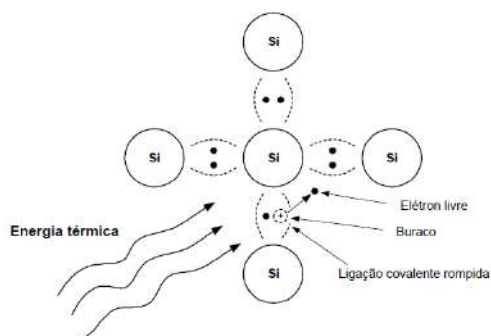


Figura 2. a energia térmica rompe a força das ligações covalentes que mantém os átomos do semicondutor de Silício ligados. O elétron é liberado para a banda de condução se tornando um elétron livre e deixando um buraco na camada de valência. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013).

A ausência de um elétron em uma das ligações atômicas da rede cristalina gera os chamados “**buracos**” (“*holes*”, em inglês). Quando um elétron sai da ligação covalente para transitar pela rede cristalina ele deixa um estado (mecânico-quântico) eletrônico vazio na ligação covalente, o dito “**buraco**”. Desta forma abre-se a possibilidade de um outro elétron, que saiu de outra ligação covalente, assumir o seu lugar¹. Este movimento de elétrons gera um fluxo de elétrons no sentido do campo elétrico aplicado e um fluxo de buracos contrário ao dos elétrons (MELLO, 1975). Esse deslocamento em sentidos opostos de elétrons e buracos faz com que os buracos se comportem como transportadores de cargas positivas, de modo que é possível verificar que esse transporte virtual tem os mesmos valores absolutos da carga, massa efetiva e momentum do elétron (REZENDE, 2004).

1

Trata-se de uma dinâmica dos estados mecânico-quânticos eletrônicos no sólido, mas como estamos lidando com o modelo semi-clássico, podemos usar esta linguagem: o elétron como “partícula” que “sai” de um orbital para “entrar” em outro orbital, ou pode mover-se livre pelo sólido, deixando para trás um “vazio”.

Mello e Biasi (MELLO, 1975) destacam que:

“O movimento dos elétrons e o movimento dos buracos se realiza de modo diferente – enquanto os elétrons caminham no cristal de forma mais livre, os buracos só podem passar de ligação covalente para ligação covalente. É por isso que a velocidade com que os elétrons se movem no interior do cristal é em geral maior do que a dos buracos” (MELLO, 1975, p.52).

Isto significa que, em geral, a mobilidade dos elétrons é maior que a dos buracos.

2.1.3. Recombinação e geração térmica

Elétrons e buracos, “ao colidirem”, podem recombinar-se, e assim, elétrons de condução são “capturados” em orbitais que estavam “vazios”.

A taxa de recombinação pode ser verificada pela equação fenomenológica $R = \alpha n p$, onde n e p são as concentrações de elétrons e buracos respectivamente, e α é um parâmetro dependente da temperatura (MELLO, 1975).

Pode-se argumentar (MELLO, 1975) que tanto a geração, como a recombinação, dependem da temperatura, de maneira que, quando a

temperatura T de um semicondutor é constante por um longo período de tempo a taxa de geração $G(T)$ é igual à taxa de recombinação: $G(T) = R = \alpha n p$.

2.1.4. Semicondutores intrínsecos

De acordo com Mello e Biase “quando um semicondutor não contém impurezas em quantidade suficiente para alterar-lhe as propriedades, dizemos que se trata de um semicondutor intrínseco” (MELLO, 2004, p.53).

Para um semicondutor intrínseco vale a relação $n = p = n_i$, onde n é a concentração de elétrons, p é a concentração de buracos e n_i é a concentração intrínseca dos portadores. Esta relação implica que em um semicondutor intrínseco a concentração de elétrons sempre será igual à concentração de buracos, com dependência da temperatura e da estrutura cristalina do material (MELLO, 1975; REZENDE, 2004).

2.1.5. Semicondutores impuros e extrínsecos

Segundo (MELLO, 1975), as impurezas em um semicondutor podem ser usadas de maneira intencional para modificar as propriedades do material de maneira controlada. Eles classificam essas impurezas como:

- Substitucionais – impurezas que substituem átomos da rede cristalina;
- Intersticiais – ocupam espaços vazios preexistentes na rede cristalina;
- Do tipo **N** – depois de realizar a ligação covalente liberam um elétron livre;
- Do tipo **P** – depois de realizar a ligação covalente geram um buraco na rede cristalina;

Mello e Biase afirmam ainda que:

“O fato de acrescentarmos uma impureza a um semiconductor intrínseco não só aumenta o número total de portadores, mas também altera a proporção entre elétrons e buracos. Nos materiais tipo **N**, os elétrons são chamados portadores em maioria e os buracos de portadores em minoria. Nos materiais do tipo **P**, os papéis se invertem” (MELLO, 1975, p.56).

Para os semicondutores extrínsecos, as impurezas adicionadas geram níveis de energia permitidos que estão dentro da banda proibida, diferindo por alguns ficarem muito próximos da banda de condução, com elétrons os ocupando, para impurezas do **tipo N**; e muito próximas da banda de valência, com elétrons faltando, para impurezas do **tipo P** (REZENDE, 2004). A Figura 3 ilustra estes conceitos.

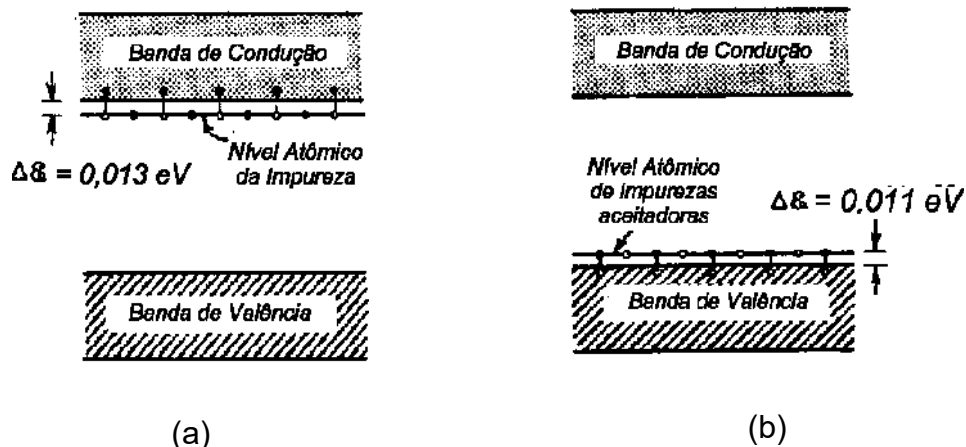


Figura 3. Ilustrações das estruturas de bandas e níveis de energia de um cristal dopado com (a) uma impureza doadora e (b) uma impureza aceitadora. Fonte:

(CONCEIÇÃO, 2013).

2.1.6. Concentração de elétrons e buracos

De acordo como (MELLO, 1975) para o cálculo da concentração de portadores n usamos a equação (1) apresentada a seguir.

$$n = \int_{E_G}^{\infty} D(E) f(E) d(E) \quad (1)$$

Em (1), $D(E)$ é a densidade de estados por unidade de volume na banda de condução ou valência, deduzida inicialmente para um Gás de Fermi, ou seja, caracterizado pela distribuição de Fermi-Dirac $f(E)$ dada em (2):

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/KT}} \quad (2)$$

Com a suposição de que o efeito do cristal sobre os portadores pode ser descrito por uma massa efetiva m^{*2} , sendo E a energia na banda de condução e E_G a energia do gap, tendo como referência a do topo da banda de valência, pode-se expressar $D(E)$ conforme dado em (3) (MELLO, 1975; REZENDE, 2004).

$$D(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} [E - E_G]^{1/2} \quad (3)$$

Como o número de estados, na banda de condução e valência, é muito grande, podemos dar um tratamento clássico ao elétron, podendo desta forma usar a distribuição de Boltzmann. Portanto para encontrarmos a concentração de elétrons na banda de condução, quando $E - E_F \gg KT$ e $E > E_F$, podemos usar a seguinte aproximação (4):

Grandeza física que expressa a inércia dos elétrons em sua dinâmica dentro dos cristais, considerando o potencial cristalino gerado pela disposição simétrica (em translação e rotação) dos íons, tal que se possa considerar como fonte de energia potencial apenas o potencial externo, aplicado ao cristal, sendo que este assunto está detalhado em (MELLO, 1975) e (REZENDE, 2004).

$$f(E) \simeq e^{-(E-E_F)/KT} \quad (4)$$

e a massa efetiva do elétron m_e^* , obtendo assim a concentração de elétrons n e a densidade efetiva de estados N_c na banda de condução, conforme (5) e por conseguinte, (6).

$$n = N_c e^{(E_F - E_G)/KT} \quad (5)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* KT}{\hbar^2} \right)^{3/2} \quad (6)$$

De maneira análoga para os buracos, considerando o grande número de estados disponíveis na banda de valência, e devido ao fato que a maior parte dos estados na banda de valência estarem ocupados, temos que os estados desocupados que sobraram na banda de valência são devidos aos elétrons que “subiram” para a banda de condução. Portanto para encontrarmos a concentração de buracos na banda de valência, quando $E - E_F \gg KT$ e $E < E_F$, podemos usar a seguinte aproximação dada em (7):

$$f(E) \simeq 1 - e^{-(E-E_F)/KT} \quad (7)$$

Considerando a massa efetiva m_b^* do buraco, a concentração de buracos p e a densidade efetiva de estados N_V na banda de valência conforme (8) e (9) ficam.

$$p = N_V e^{(-E_F)/KT} \quad (8)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_b^* KT}{\hbar^2} \right)^{3/2} \quad (9)$$

Se mudarmos a referência para alguma banda arbitrária abaixo do topo da banda de valência teremos (10) e (11)

$$p = N_V e^{-(E_F - E_v)/KT} \quad (10)$$

$$n = N_c e^{(E_F - E_c)/KT} \quad (11)$$

Agora o produto np entre as concentrações de portadores de carga fica expresso por (12):

$$np = N_c N_v e^{-E_g/KT} \quad (12)$$

Por (12) pode-se perceber que a concentração de elétrons e buracos dependem das concentrações dos estados, da temperatura e da energia do gap. Então se conclui que a concentração de buracos e elétrons em um semicondutor extrínseco não depende das impurezas existentes no material (MELLO, 1975).

Já a concentração n_i de portadores para um semicondutor intrínseco, que pelo fato de se tratar de um semicondutor puro, obedece a (13):

$$n = p = n_i \quad (13)$$

Se criamos uma relação $n = p = (n_i)^2$, obteremos (14):

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2KT} \quad (14)$$

A relação (14) demonstra que a concentração intrínseca dos semicondutores depende da temperatura e das características do material que está sendo utilizado (MELLO, 1975).

2.1.7. A corrente de deriva

Chamamos por “corrente de condução”, ou “deriva” (*drift current*), a corrente elétrica produzida por um campo elétrico externo, que promove um relativamente lento deslocamento médio de portadores de carga, deslocamento este que ocorre simultaneamente com o movimento, relativamente rápido e aleatório, característico das partículas em agitação térmica. Esta corrente

portanto é da mesma natureza que a observada nos metais, porém nos semicondutores ela é formada tanto por elétrons quanto por buracos. (REZENDE, 2004, p.145).

Classicamente, a densidade de corrente em qualquer material é dada por $J = qnv$, onde n e v são a densidade e a velocidade dos portadores respectivamente e q é a carga de cada portador, neste caso, a carga fundamental “ e ”. A densidade de corrente de deriva dos elétrons em um semicondutor (MELLO, 1975) é dada por (15):

$$J_n = -nq \langle v_n \rangle \quad (15)$$

A equação (15) explicita que a densidade de corrente dos elétrons no semicondutor está diretamente relacionada com a velocidade. Neste caso, uma velocidade de deriva, que é a resultante da velocidade dos elétrons após a sua colisão com os outros elementos da rede cristalina sob a ação da agitação térmica e a ação de um campo elétrico externo.

Na equação (15) a velocidade $\langle v_n \rangle$ é a média das velocidades dos elétrons. Uma vez que a componente vinda da agitação térmica é muito menor que a componente gerada pelo campo, as contribuições individuais de cada elétron não tem grande influência para a resultante final da velocidade, ficando as velocidades fortemente definidas pela direção do campo elétrico de módulo ε , pode-se então reescrever (MELLO, 1975) (15) na forma de (16):

$$J_n = -nq \langle v_n \rangle = nq \mu_n \varepsilon = \sigma_n \varepsilon \quad (16)$$

Em (16) se introduziram os parâmetro μ e σ . O primeiro está associado ao tempo médio entre colisões τ , de forma que (17) é válida:

$$\frac{q\tau}{m_e^*} = \mu \quad (17)$$

O parâmetro μ é uma constante que está relacionada com as características do material, como por exemplo a massa efetiva do elétron e o tempo médio entre as colisões, sendo assim convenientemente chamado de ***mobilidade*** dos elétrons (MELLO, 1975). O parâmetro σ é a *condutividade*, que demonstra a dependência da densidade de corrente de deriva com as características do material (REZENDE, 2004).

O sinal negativo em (16) mostra o sentido da velocidade de deriva dos elétrons, e conseqüentemente o vetor densidade de corrente de deriva tem sentido contrário ao vetor campo elétrico.

De modo análogo para os buracos se tem (18) e (19).

$$\langle v_p \rangle = \mu_p \varepsilon \quad (18)$$

$$J_p = np \langle v_p \rangle = np \mu_p \varepsilon \quad (19)$$

O sinal positivo na equação (19) indica que os buracos tem deslocamento com sentido contrário ao dos elétrons (MELLO, 1975).

Logo a corrente de deriva em um semiconductor é a soma da corrente de buracos mais a corrente de elétrons, conforme expresso em (20) e (21), onde σ_c é a condutividade combinada, considerando transporte de elétrons e buracos.

$$J_c = J_n + J_p = q(n\mu_n + p\mu_p) \varepsilon \quad (20)$$

$$J_c = q(n\mu_n + p\mu_p) \varepsilon = \sigma_c \varepsilon \quad (21)$$

Ou seja, a condutividade combinada é dada conforme (22).

$$q(n\mu_n + p\mu_p) = \sigma_c \quad (22)$$

Em casos de campo elétrico constante no tempo (“corrente contínua”, ou CC), o valor da resistência elétrica é exatamente o inverso da condutância (CAPUANO, 1997). Logo, também resistividade será o inverso da condutividade e assim (23) e (24) são válidas.

$$q(n\mu_n + p\mu_p) = \sigma_c = \frac{1}{\rho} \quad (23)$$

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (24)$$

Portanto quanto maior a resistividade, menor será a mobilidade e/ou a concentração de portadores. Considerando as expressões para as concentrações n e p , respectivamente (5) e (8), ou (10) e (11), temos a dependência de ρ com a temperatura T .

2.1.8. A corrente de difusão

Se consideramos a possibilidade de portadores de cargas serem “criados” não-uniformemente num material, o gradiente de concentração destes, resultante, produz movimento de portadores. Este movimento, chamado de difusão, ocorre no sentido da região de maior concentração para a de menor concentração. Como os portadores têm carga elétrica, seu movimento de difusão resulta numa corrente elétrica, chamada **corrente de difusão** (REZENDE, 2004, p.152).

A corrente de difusão pode ser analisada considerando a Figura 1, na qual tomamos uma fatia, de um determinado semiconductor, cortada de maneira que a sua área, tanto à direita quanto à esquerda, seja perpendicular à direção da densidade de corrente J . Essa fatia é tomada de forma que seu lado,

paralelo à direção da densidade de corrente, tenha comprimento igual ao livre caminho médio \bar{l} . Considerando que apenas partículas que estão a uma distância máxima igual ao livre caminho médio das áreas citadas acima podem atravessar tais áreas, podemos analisar, em uma dimensão, a quantidade de partículas que entram e saem desta fatia, tanto no sentido da densidade de corrente, quanto no sentido contrário à densidade de corrente.

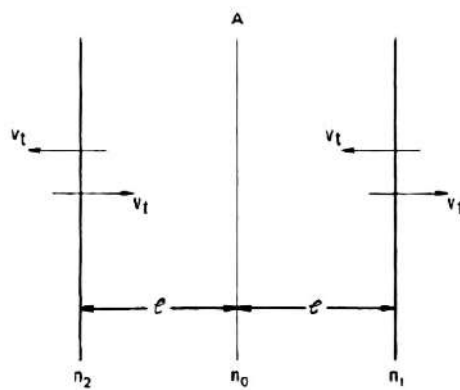


Figura 4. Modelando a Difusão. Fonte: (MELLO, 1975, p. 90).

Supondo que o movimento de portadores que esteja acontecendo na fatia seja um movimento de buracos $p(x)$, cuja concentração varia de acordo com a posição x , de forma que os buracos tem igual probabilidade de atravessar as áreas da fatia de semicondutor perpendiculares à densidade de corrente, tanto no sentido da densidade de corrente, quanto no sentido contrário, pode-se verificar que a densidade de corrente dentro da fatia de semicondutor, em uma dimensão é descrita por (25), onde $\Delta x = \bar{l}$

$$J_{p(x)}^{dif} = \frac{1}{2\tau} q \bar{l} \left[p\left(x - \frac{\Delta x}{2}\right) - p\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \right] \quad (25)$$

Neste modelo, a corrente de difusão total na fatia de semicondutor é igual à corrente que entra em uma das áreas perpendiculares menos a corrente que sai pela mesma área (REZENDE, 2004; MELLO, 1975).

Como Δx é muito pequeno, e supondo que o gradiente da concentração de buracos ocorra para uma distância muito maior que este Δx , temos que se seguem (26) e (27).

$$\left[p\left(x - \frac{\Delta x}{2}\right) - p\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \right] = -\Delta x \frac{dp(x)}{dx} \quad (26)$$

$$J_{p(x)}^{dif} = \frac{1}{2\tau} q \bar{l} \left(-\Delta x \frac{dp(x)}{dx} \right) = -\frac{q \bar{l}^2}{2\tau} \frac{dp(x)}{dx} \quad (27)$$

Em (27), $\frac{\bar{l}^2}{2\tau}$ é o coeficiente de difusão dos buracos (REZENDE, 2004), que pode ser relacionado conforme (28):

$$\frac{\bar{l}^2}{2\tau} = D_p \quad (28)$$

A corrente de difusão para os buracos, e para os elétrons de maneira análoga, ficam dadas por (29) e (30).

$$J_p^{dif} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (29)$$

$$J_n^{dif} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (30)$$

Estes resultados (29) e (30) evidenciam que o fluxo dos buracos é oposto ao dos elétrons (REZENDE, 2004; MELLO, 1975).

Para o caso de uma variação da concentração de portadores em três dimensões as extensões de (29) e (30) são, respectivamente, as expressões (31) e (32), com o uso do operador nabla para expressar o gradiente em 3D.

$$\vec{J}_n^{dif} = qD_n \nabla n \quad (31)$$

$$\vec{J}_p^{dif} = -qD_p \nabla p \quad (32)$$

Os resultados obtidos anteriormente vêm através da variação das concentrações de portadores no espaço. Para encontrarmos uma variação temporal precisamos relacionar a densidade de corrente com a variação temporal. Supondo desprezível a geração e recombinação de pares elétron-buraco temos (33).

$$\frac{I}{A \Delta x} = \frac{J(x) - J(x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (33)$$

Como a intensidade de corrente elétrica é $I = dq/dt$ e a densidade volumétrica de carga é $\rho = q/A \Delta x$, temos que (33) torna-se (34).

$$\frac{I}{A \Delta x} = \frac{\frac{dq}{dt}}{A \Delta x} = \frac{dq}{dt} \frac{1}{A \Delta x} = \frac{d\left(\frac{q}{A \Delta x}\right)}{dt} = \frac{d\rho}{dt} \quad (34)$$

Se Δx se iguala ao livre caminho médio, podemos então supor que Δx é muito pequeno, de forma que, fazendo $\Delta x \rightarrow 0$, teremos (35)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial J(x)}{\partial x} \quad (35)$$

A expressão (35) é a equação da continuidade de carga (em uma dimensão espacial) e exprime o fato de que a carga total é conservada (REZENDE, 2004). Em três dimensões temos, por extensão, a expressão (36).

$$\nabla \cdot \vec{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (36)$$

Como $\rho = q(p - n)$, e considerando a variação temporal para um semiconductor do tipo N, temos que (36) será expressa conforme (37).

$$\nabla \cdot \vec{J} = q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (37)$$

Considerando (37) em (31), temos (38) e (39).

$$\nabla \cdot (q D_n \nabla n) = q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (38)$$

$$D_n \nabla^2 n - \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \quad (39)$$

A expressão (39) é a equação da difusão, que permite calcular a evolução espacial e temporal da concentração de elétrons em excesso, sujeitos apenas ao movimento de agitação térmica (REZENDE, 2004, p.156). O mesmo resultado pode ser encontrado de modo análogo para os buracos.

Na presença de um campo elétrico $\vec{\varepsilon}$, e lembrando que (42) é válida, teremos que a densidade de corrente total será composta por uma componente de deriva e outra de difusão, conforme (40) e (41).

$$\vec{J}_n = q \mu_n n \vec{\varepsilon} + q D_n \nabla n \quad (40)$$

$$\vec{J}_p = q \mu_p p \vec{\varepsilon} - q D_p \nabla p \quad (41)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (42)$$

Supondo que o semicondutor esteja em equilíbrio térmico e não haja campo elétrico externo agindo sobre ele, então a densidade de corrente total será igual a zero já que $\vec{J}_p = \vec{J}_n = 0$. Desta forma o único campo elétrico que existirá no semicondutor será o campo elétrico gerado devido ao movimento térmico das cargas, de forma a promover uma variação na concentração de cargas, o que produzirá uma corrente de deriva que será cancelada pela corrente de difusão (REZENDE, 2004). Como $\vec{\varepsilon} = -\nabla \phi$, a partir de (32) e (41) podemos obter uma relação entre a corrente de difusão e a mobilidade, dada em (43).

$$\frac{\mu_p}{D_p} \nabla \phi = -\frac{1}{p_0} \nabla p_0 \quad (43)$$

Relacionando com o nível de Fermi temos (44).

$$\frac{\mu_p}{D_p} \nabla \phi = -\frac{1}{KT} \nabla (E_i - E_F) \quad (44)$$

Como o semiconductor está em equilíbrio térmico não há um gradiente para E_F , logo $\nabla E_F = 0$, e também como a energia do elétron em um potencial eletrostático ϕ é $E = -e\phi$, então (44) resulta em (45) e (46).

$$\nabla E_i = -e \nabla \phi \quad (45)$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} \quad (46)$$

De maneira análoga a mesma relação pode ser obtida para os elétrons permitindo obter (47).

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} \quad (47)$$

A relação (47) é dita “relação de Einstein” (REZENDE, 2004).

2.1.9. Modelando um diodo como uma junção p-n

Chamamos de junção p-n em um semiconductor uma camada fina de transição que separa uma região tipo p de uma região tipo n.

O comportamento de elétrons e buracos nas junções de um dispositivo determina as características corrente-tensão (I-V) de seus diversos terminais (REZENDE, 2004, p.168).

Nas proximidades da junção p-n é criada uma barreira de potencial gerada pelo campo elétrico devido, a uma corrente de difusão estabelecida quando dois semicondutores, um do tipo p e outro do tipo n, são colocados em contato. Pelo fato de os elétrons e buracos possuírem cargas elétricas a

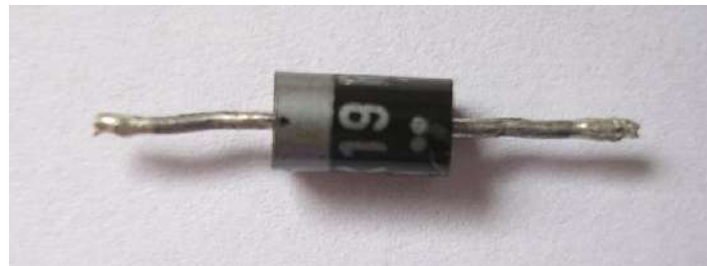
corrente de difusão gera o campo elétrico, que por sua vez gera uma corrente de deriva, de forma que a corrente de deriva e de difusão se anulam. No final do processo o que temos é uma densidade de corrente total igual a zero e um campo elétrico nas proximidades da junção p-n, que impede o fluxo de elétrons e buracos a continuar, atingindo assim uma configuração estacionária (MELLO, 1975; REZENDE, 2004).

De acordo com (REZENDE, 2004), para um tratamento matemático que descreva a carga e o potencial elétrico na junção p-n devem ser feitas as seguintes aproximações:

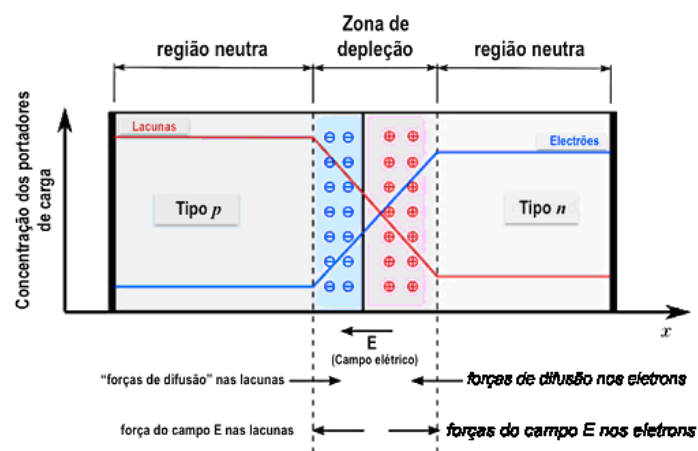
- Reduzir o problema para uma dimensão, considerando o fato que grande parte do movimento de elétrons e buracos ocorre na direção normal à superfície da junção;
- Supor que a junção é abrupta, isto é $N_a - N_d$ varia bruscamente de um valor constante e positivo em $x < 0$ para um valor constante e negativo em $x > 0$.

O campo elétrico criado na região de transição, também chamada de “carga espacial”, corresponde a uma diferença de potencial V_0 entre o lado p e o lado n. Esta diferença de potencial impede que os portadores cruzem a região de transição.

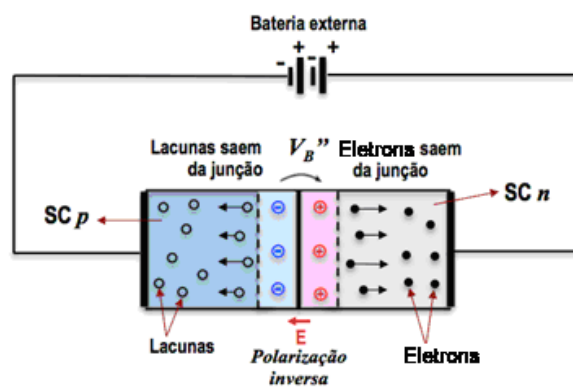
A figura 5 ilustra uma representação de uma junção p-n.



(a)



(b)



(c)

Figura 5. (a) Foto de um diodo. Fonte: (WIKIMEDIA COMMONS, 2019);
 (b) Diagrama esquemático de uma junção PN; (c) O diodo como uma junção PN. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013).

Como o nível Fermi, de energia E_F , deve ser o mesmo nos dois lados da junção, quando a junção é formada as referências dos níveis de energia se ajustam de forma que a diferença de energia formada na banda de condução e a diferença de energia formada na banda de valência correspondam a diferença de potencial gerado pelo campo. A figura 6 ilustra qualitativamente este processo, bem como os de polarização direta e inversa da junção.

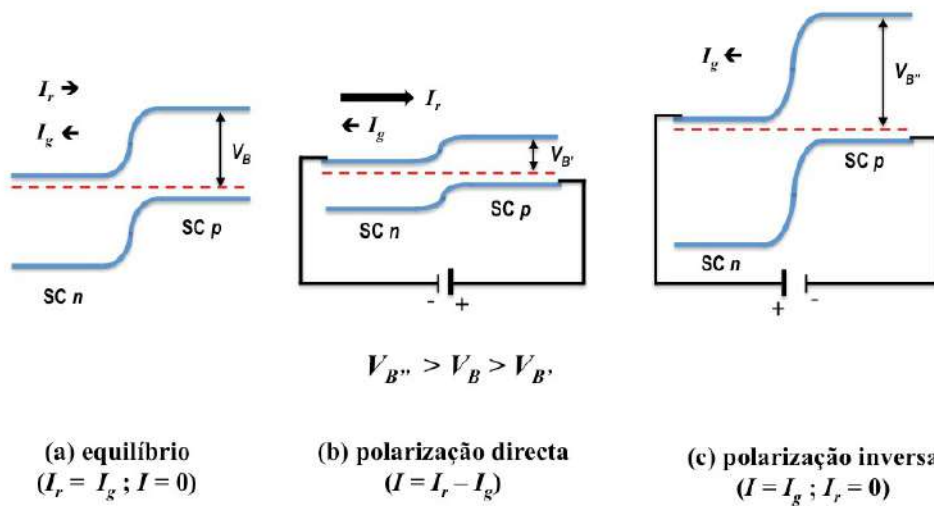


Figura 6. (a) Na situação de equilíbrio o fluxo total de carga é nulo, pois as correntes de recombinação e de fuga se compensam. (b) na polarização directa a corrente total I será um fluxo de elétrons de n para p pois as correntes não se compensam e. (c) Na polarização inversa o fluxo total de corrente será praticamente a corrente de fuga de P para N (movimento dos elétrons), pois a barreira de potencial aumenta drasticamente e a corrente de recombinação será desprezível. O deslocamento das bandas representa o nível de energia.

Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013).

Da eletrostática temos que $E = -q \phi$. Logo, seguem-se (48) e (49) que representa o valor limite da barreira de potencial (REZENDE, 2004; MELLO, 1975):

$$E_{vp} - E_{cn} = qV_0 \quad (48)$$

$$V_0 = \frac{E_g}{q} \quad (49)$$

Quando dois semicondutores P e N entram em contato as cargas fluem de um lado para o outro até que o nível Fermi se iguale e o sistema entre em equilíbrio, de forma que o potencial químico será constante.

As concentrações de equilíbrio de buracos para os lados p e n podem ser escritas conforme (50) e (51):

$$p_{p0} = n_i e^{(E_{ip} - E_F)/KT} \quad (50)$$

$$p_{n0} = n_i e^{(E_c - E_F)/KT} \quad (51)$$

Logo a razão entre as duas será

$$\frac{p_{p0}}{p_{n0}} = e^{(E_{ip} - E_c)/KT} \quad (52)$$

Temos que $E_{ip} - E_{in} = qV_0$ logo, substituindo e aplicando o exponencial na primeira parcela de (52), temos (53), (54) e (55).

$$e^{\ln\left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}}\right)} = e^{(E_{ip} - E_{in})/KT} \quad (53)$$

$$\ln\left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}}\right) = (E_{ip} - E_{in})/KT = (qV_0)/KT \quad (54)$$

$$V_0 = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}}\right) \quad (55)$$

De maneira análoga para os elétrons temos (56)

$$V_0 = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}} \right) \quad (56)$$

Comparando os resultados, temos (57)

$$\frac{p_{p0}}{p_{n0}} = \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{qV_0/KT} \quad (57)$$

Para exprimirmos o potencial da barreira em termos das concentrações de impurezas nos dois lados das junções precisamos lembrar que $p_{p0} \simeq N_A$ e $p_{n0} \simeq n_i^2 / N_D$. Substituindo, teremos (58).

$$V_0 \simeq \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (58)$$

Como já fizemos $np = n_i^2$ temos (59).

$$V_0 \simeq \frac{E_g}{q} - \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{N_c N_v}{N_A N_D} \right) \quad (59)$$

Estes resultados implicam que à medida que as impurezas aumentam de concentração, o potencial tende a E_g/q . Os valores máximos que o potencial pode alcançar de 0,68V para os semicondutores de germânio e 1,12V para os semicondutores de silício (REZENDE, 2004). Uma relação entre as camadas de cargas com as impurezas e o potencial V_0 é obtida em (REZENDE, 2004), de modo que (60) e (61) são válidas.

$$l = \left[\frac{2\epsilon V_0}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (60)$$

$$l = \left[\frac{2\epsilon KT}{e^2} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \right]^{1/2} \quad (61)$$

Em (60) e (61), l é uma espessura total $l=l_n+l_p$, sendo l_n e l_p as espessuras do lado N e do lado P respectivamente, que em função da concentração são dadas por:

$$l_p = \frac{N_D}{N_A+N_D}l \quad \text{e} \quad l_n = \frac{N_A}{N_A+N_D}l \quad (62)$$

2.1.10. Junção p-n polarizada

Polarizar uma junção p-n significa aplicar uma tensão externa nos terminais da mesma. Portanto, dependendo de como é aplicada a tensão externa a junção pode ser inversamente ou diretamente polarizada, isto como efeito de correntes em sentidos diferentes que geram efeitos diferentes na barreira de potencial.

Ao aplicarmos uma tensão externa V esta será somada ou subtraída do potencial V_0 , o que segundo a equação (61) irá provocar um aumento ou diminuição da região carga espacial. Se a tensão for aplicada tal que o lado p fique negativo e o lado n fique positivo, então a variação de potencial aumenta logo, a barreira de potencial aumenta e a junção está inversamente polarizada. Entretanto se a tensão for aplicada de tal modo que o lado p fique positivo e o lado n fique negativo então a variação de potencial diminui logo, a barreira de potencial diminui e a junção está diretamente polarizada (REZENDE, 2004; MELLO, 1975). Como resultado temos que a corrente que atravessa a junção na polarização direta é maior do que na polarização inversa.

É possível verificar através das (60) e (61) que, quando a região de carga espacial aumenta, o campo elétrico também aumenta, e quando a região de carga espacial diminui o campo elétrico também diminui (REZENDE, 2004).

Convencionando que a tensão aplicada no sentido direto será uma tensão positiva, quando aplicamos tal tensão, uma corrente I entra pelo lado p e vai em direção ao lado n , onde a corrente total será composta por uma corrente de deriva I_{der} gerada pelos portadores majoritários, e uma corrente de difusão I_{dif} gerada pelos portadores minoritários. Se olharmos para os buracos do lado p por exemplo, na região próxima da junção, a maioria se recombina com elétrons vindos do lado n . Aqueles que não sofreram recombinação entram na região de carga espacial, onde, por haver baixa concentração de portadores, não sofrem recombinação, chegando assim próximo ao limite da região de carga espacial, e ao lado n , na posição $x \approx +l_n$, onde são injetados para o lado n . No lado n eles se difundem e sofrem recombinação, promovendo uma variação na concentração. O comportamento dos elétrons pode ser observado de modo análogo (REZENDE, 2004).

Segundo (REZENDE, 2004), o potencial da barreira é modificado de V_0 para $V_0 - V$ quando se aplica uma tensão externa V , de modo que a diferença entre os níveis de Fermi intrínsecos nos dois lados fica $E_{ip} - E_{in} = q(V_0 - V)$, já que a junção não está em equilíbrio. Portando a razão entre as concentrações de buracos nas proximidades da região de carga espacial nos dois lados é dada em (63), onde $x' = -l_p = 0$ e $x = l_n = 0$.

$$\frac{p_p(x'=0)}{p_n(x=0)} = e^{q(V_0 - V)/KT} \quad (63)$$

Caso a corrente de junção não seja muito elevada, as concentrações de portadores majoritários praticamente não variam em relação aos valores de equilíbrio (REZENDE, 2004, p.182), podendo ser feita a seguinte aproximação:

$p_p(x'=0) \approx p_{p0}$, onde p_{p0} é a concentração de equilíbrio de buracos próximo dos limites da região carga espacial. Substituindo esta aproximação em (63), temos (64).

$$\frac{p_n(x=0)}{p_{n0}} = e^{qV_0/KT} \quad (64)$$

Lembrando que a corrente de difusão dos buracos é dada por

$$J_p^{dif} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx},$$

pode-se então encontrar a densidade de corrente de difusão dos buracos na direção de x positivo, na direção do lado n.

Segundo (REZENDE, 2004) deve-se considerar que no processo de injeção de buracos, o mecanismo de recombinação não pode ser desprezado, de maneira que os portadores são injetados em excesso da concentração de equilíbrio, então a equação da difusão com recombinação será, considerando um regime estacionário $\partial/\partial t=0$

$$D_p \nabla^2 \delta p - \delta \frac{p}{\tau_p} = 0 \quad (65)$$

Desta forma temos que $\delta p(x) = \Delta p e^{-x/L_p}$, com $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

Logo a concentração total de buracos será $p_n(x=0) = p_{n0} + \delta p_n(x=0)$, e então temos que:

$$\Delta p_n(x=0) = p_n(x=0) - p_{n0} = p_{n0}(e^{qV_0/KT} - 1) \quad (66)$$

Substituindo e derivando, temos:

$$\delta p_n(x) = p_{n0}(e^{qV_0/KT} - 1) e^{-x/L_p} \quad (67)$$

$$J_p^{dif}(x) = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0}(e^{qV_0/KT} - 1) e^{-x/L_p} \quad (68)$$

Como $J = I/A$ (em uma seção reta transversal fixa), sendo A a área da seção reta da junção, substituindo podemos encontrar então a intensidade de corrente de difusão no limite da região de carga espacial ($x=0$) que será dada por:

$$I_p^{dif}(0) = qA \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{qV/KT} - 1) \quad (69)$$

De forma análoga a corrente de difusão de elétrons na região carga espacial será:

$$I_n^{dif}(0) = qA \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{qV/KT} - 1) \quad (70)$$

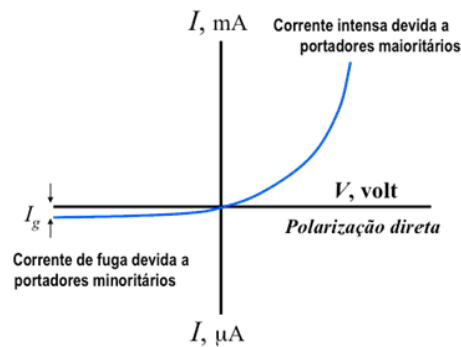
Segundo REZENDE, 2004 a corrente total é a soma das correntes de buracos mais elétrons de modo que $I = I_n + I_p$, uma vez que em regime estacionário a corrente total será a mesma que passa pelos contatos metálicos como a que passa em qualquer seção da junção então, somando (69) e (70) obteremos a equação do diodo ideal dada por (71):

$$I = I_S (e^{qV/KT} - 1) \quad (71)$$

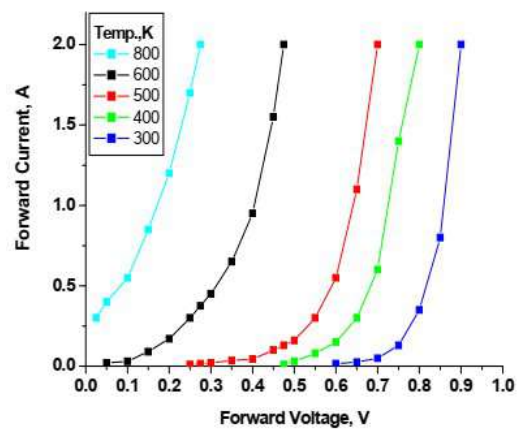
Em (71), I_S é a **corrente de saturação reversa**, pois para uma tensão negativa muito maior que KT/q temos que $I \rightarrow I_S$. Esta corrente de saturação reversa é dado conforme (72).

$$I_S = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right) \quad (72)$$

A Figura 7 ilustra esta relação funcional.



(a)



(b)

Figura 7. Gráficos corrente-tensão característicos (a) de uma junção PN,

Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013); (b) de diodos a diferentes temperaturas,

Fonte: (EL-GHANAM, 2015)

Nota-se que I_s depende apenas de parâmetros dos semicondutores e da temperatura, de forma que ela varia muito de um semicondutor para o outro.

A equação do diodo ideal foi deduzida por W. Shockley, que foi um dos ganhadores do prêmio Nobel em 1954. Ela permite calcular a corrente na junção em função da tensão externa aplicada nos terminais do semicondutor.

Ela também mostra que a corrente na junção é dominada pelos portadores minoritários (REZENDE, 2004).

Uma das características essenciais dos diodos é que na polarização reversa a corrente é desprezível compara da com a de polarização direta, isto porque com a polarização direta a corrente cresce exponencialmente com tensão. É possível observar no gráfico da equação do diodo ideal que existe uma valor crítico de tensão para o qual a corrente cresce abruptamente, isso acontece devido ao seu caráter exponencial e varia de acordo com o tipo de semicondutor.

Segundo Rezende:

“ (...) é preciso notar que em junções reais a resposta I-V desvia [da (71)] devido aos seguintes fatores: a recombinação na região de carga espacial não é completamente desprezível; a concentração de portadores majoritários não permanece em equilíbrio quando a corrente aumenta muito; a junção não é abrupta, como o modelo que consideramos nesta seção” (REZENDE, 2004, p.186).

Portanto, deve-se considerar um “fator de idealidade” (SEABRA, 2011), que representaremos por “ n ”, para $1 \leq n \leq 2$, o que modifica a equação (71) para o formato em (73):

$$I = I_S (e^{qV/nKT} - 1) \quad (73)$$

Vale lembrar que em (73), por “ q ” se expressa a carga fundamental e por “ K ” a constante de Boltzmann. Seus valores exatos atuais podem ser encontrados no site do *The National Institute of Standards and Technology* – NIST, do Governo dos Estados Unidos da América (NIST-e, 2019; NIST-k, 2019):

- Carga fundamental: $e = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- Constante de Boltzmann: $k = 1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$.

A influência da Temperatura nas curvas I-V de diodos pode ser determinada experimentalmente, como apresentado na Figura 7(b). Observa-se que a temperatura afeta a corrente de saturação e a concavidade das curvas. Neste último caso, significa que o **fator de idealidade deve mudar com a temperatura: $n = n(T)$** .

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentamos os materiais empregados na construção do módulo interativo e os métodos usados em sua construção e na pesquisa.

3.1. Instrumentação

3.1.1. A Célula Peltier

Neste trabalho a temperatura de um dispositivo eletrônico de dois terminais, um diodo, deverá ser controlada, variando de maneira programada e permitindo momentos de estabilização. Para isso, se propõe o uso de célula, ou pastilha, Peltier como instrumento para variar a temperatura da amostra (FERNANDES, 2018; MOURA, 2014) como vista na figura 8. Se propõe, também um sistema de potência e controle automatizados.



Figura 8. Pastilha Peltier. Fonte: (DANVIC, 2019).

As pastilhas Peltier são constituídas de placas cerâmicas “recheadas” de pequenos cubos de telureto de bismuto (FERNANDES, 2018; MOURA, 2014),

conforme representado na figura 9. Elas operam como bombas de calor utilizando tecnologia de matéria condensada através do efeito termoelétrico conhecido como efeito Peltier, onde um fluxo de corrente elétrica produz um fluxo de calor (FERNANDES, 2018; MOURA, 2014).



Figura 9. Esquema de uma Pastilha Peltier. Fonte: (YHAEFFNER, 2016).

O efeito Peltier, descoberto em 1834 e verificado na pastilha, faz com que após ser aplicada uma corrente elétrica, um fluxo de calor se estabelece de um lado para o outro lado da pastilha, onde deve ser removido com um dissipador.

Entre as diversas aplicações possíveis (FERNANDES, 2018; MOURA, 2014), uma das mais comuns é a aplicação no resfriamento de chips microprocessadores ou até mesmo como geladeiras portáteis. A aplicabilidade das pastilhas Peltier em grandes sistemas de refrigeração ainda não é viável devido ao grande consumo que a tecnologia atual apresenta. O empilhamento das pastilhas permite até chegar a temperaturas mais baixas, mas, para se alcançar níveis criogênicos, processos muito complexos são necessários (FERNANDES, 2018; MOURA, 2014).

A durabilidade, tamanho reduzido, ausência de barulho, vibração, peças móveis e gases nocivos ao meio ambiente faz o uso da célula Peltier ser muito

O sensor LM35 possui uma saída de tensão de 10mV para cada grau centígrado. A topologia usada para a montagem do sensor LM35 no kit proposto foi a que proporciona uma faixa de leitura de temperatura de 2°C a 150°C.

3.1.3. Microcontrolador ARDUINO

O Arduino uno é um hardware de domínio público, tendo sido criado por Massimo Banzi, do Interaction Design Institute, Ivrea, Itália, e David Cuartielles, da Universidade de Malmö, Suécia, com o intuito de facilitar atividades de pesquisas acadêmicas (EVANS, 2013; QUEIROZ, 2015; SILVA, 2018).

Por ser um hardware livre, e por sua praticidade, ele é utilizado para diversos fins, como pesquisa acadêmica, industrial, projeto pessoais e doméstico e outros. Isto fez com que sua disseminação aumentasse fazendo surgir no mercado vários clones dos projetos originais e também placas baseadas no Arduino que trazem modificações para aplicações mais específicas (EVANS, 2013).

Um dos grandes atrativos no Arduino Uno é que, apesar de utilizar uma linguagem de alto nível baseada em C/C++, o seu custo é relativamente baixo, e dispõe de um grande número de sensores oferecidos no mercado, de modo a permitir uma grande margem de utilização com um nível alto de precisão (SENNE, 2009).

O Arduino Uno possui um regulador de tensão de 5 volts, que transforma a tensão vinda da fonte de alimentação (entre 7 e 12V) em uma tensão constante de 3Vcc e 5Vcc. Após convertida, esta tensão fica disponível na placa através do pino 3V e 5V, permitindo sua utilização para a alimentação de dispositivos eletrônicos externos como sensores por exemplo (MONK, 2013).

Na placa do Arduino Uno encontramos um pino e um botão de Reset, que faz com que o microcontrolador seja reinicializado executando assim o seu sketch desde o início (MONK, 2013).

Os seis pinos de A0 a A5, localizados no mesmo lado dos pinos 3V e 5V, são entradas analógicas que podem ser usadas para medir tensão de 0 a 5Vcc, recebida de diversos dispositivos externos.

O Arduino Uno possui também quatorze pinos digitais de 0 a 13, que podem ser usados como entradas ou saídas.

No kit proposto para a medição da curva I – V do diodo em temperaturas diferentes foi selecionado o ARDUINO UNO, que possui as seguintes características (SILVA, 2018):

- ADC: Resolução de 10 bits, e faixa de tensão de 0 V a 5 V.
- Entradas Analógicas: seis entradas internamente ligadas a um conversor analógico/ digital ADC.
- Alimentação: USB ou fonte CC de 6 V a 20 V / Ideal de 7 V a 12 V (comutação automática).
- Microcontrolador: ATmega328 (da Atmel).
- Frequência máxima de operação: 20 MHz.
- Memória flash: 32 KB.
- EEPROM: 1 KB.
- SRAM: 2KB de SRAM.
- Conversor USB-Serial:

- Pinos digitais: 14 programáveis que podem ser definidos como entrada ou saída digital. OBS: seis desses pinos podem ser programados para fornecer uma saída de modulação por largura de pulso (PWM).

A linguagem do Arduino Uno é baseada em C/C++, através de uma estrutura básica de programação que usa blocos de funções.

A função **setup()** é a primeira a ser executada quando o processamento do programa se inicia. Ele tem por objetivo ditar as linhas de programação que são essenciais para todo o programa quando o Arduino é inicializado. Nela, por exemplo, é configurado se as portas se comportaram como entradas e saídas bem como as configurações para o estabelecimento da comunicação serial (EVANS, 2013).

Na função **loop()** são inseridas todas as informações que o programa precisa para executar a sua rotina, de modo que as informações contidas nele serão executadas repetidamente (EVANS, 2013).

As figuras 11 e 12 são, respectivamente, um esquema da placa Arduino Uno e um exemplo de programação utilizando o IDE.

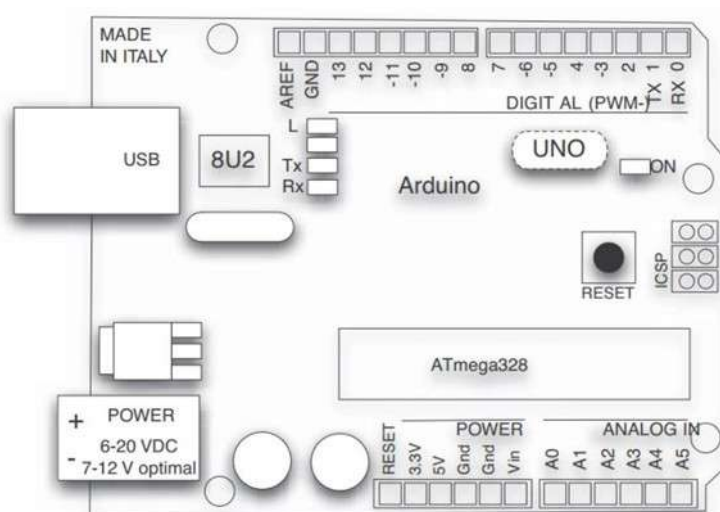


Figura 11. Exemplo de uma placa Arduino Uno. Fonte:(EVANS, 2013).



```

Blink | Arduino 1.8.9
Arquivo Editor Sketch Ferramentas Ajuda
Blink
1 /*
2  * Blink
3  *
4  * Turns an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.
5  *
6  * Most Arduinos have an on-board LED you can control. On the Uno, Mega and Zero
7  * it is attached to digital pin 13, on M0 and M0 Pro to pin 6. LED_BUILTIN is set to
8  * the correct LED pin independent of which board is used.
9  * If you want to know what pin the on-board LED is connected to on your Arduino
10 * model, check the Technical Specs of your board at:
11 * http://www.arduino.cc/en/Main/Products
12 */
13 modified 8 May 2014
14 by Scott Fitzgerald
15 modified 2 Sep 2015
16 by Arturo Sandoval
17 modified 8 Sep 2015
18 by Colby Newman
19
20 This example code is in the public domain.
21
22 http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
23 */
24
25 // the setup function runs once when you press reset or power the board
26 void setup() {
27   // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
28   pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
29 }
30
31 // the loop function runs over and over again forever
32 void loop() {
33   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
34   delay(1000); // wait for a second
35   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
36   delay(1000); // wait for a second
37 }

```

Figura 12: Exemplo de programação do Arduino utilizando a IDE. Fonte: Acervo do autor.

Foge do escopo desta monografia fornecer uma discussão extensa sobre a placa ARDUINO UNO e sua programação. Existe um grande número de referências de domínio público, bem como livros impressos em língua portuguesa.

3.1.4. Software *PLX-DAQ* e *PLX-DAQ versão 2*

A *Parallax Data Acquisition tool* (PLX-DAQ) é uma macro¹ criada pela empresa Parallax (PARALAX, 2019) para o software Microsoft Excel, propriedade da Microsoft Co.. É uma ferramenta de software *add-in* gratuita

1

Ver, por exemplo, (BLOCH, 2004.)

que possibilita a aquisição de dados em até 26 canais de dados enviados por microcontroladores, imprimindo os dados enviados através de comunicação serial em colunas, dentro de uma planilha Microsoft Excel em tempo real. Desta forma se possibilita a montagem de gráficos, cálculos e outras análises de acordo com o usuário, bastando apenas programar algumas linhas de código dentro do Arduino. A **Parallax Data Acquisition tool** (PLX-DAQ) está disponível somente para sistema operacional Windows e sua utilização facilita o recolhimento de dados de sensores analógicos ou digitais.

Esta macro permite que o Microsoft Excel funcione como qualquer outro programa de terminal, como uma interface homem-máquina, e tem a vantagem de produzir informações diretas para onde você realmente deseja, fornecendo gráficos em tempo real, bem como o armazenamento dos dados para análises posteriores.

Outra vantagem desse sistema é que ele utiliza os comandos do Microsoft Excel e pode ser adaptado de acordo com as necessidades do usuário, bastando, para isso, ter conhecimento em programação de macros através do Microsoft Excel. O **PLX-DAQ** está disponível gratuitamente em (PARALAX, 2019).

Uma vez instalado, o software deverá ser iniciado através do atalho na pasta do **PLX-DAQ**, ou na área de trabalho. Isto deverá abrir uma planilha do Excel contendo a janela apresentada na figura 13, que permitirá o estabelecimento e início da comunicação com Arduino.

A conexão entre o PC e o Arduino poderá ser feita via cabo USB, e a porta usada deverá ser a mesma usada pela IDE do Arduino, bem como a taxa de transmissão deverá ser a mesma utilizada no SCKETCH do Arduino.

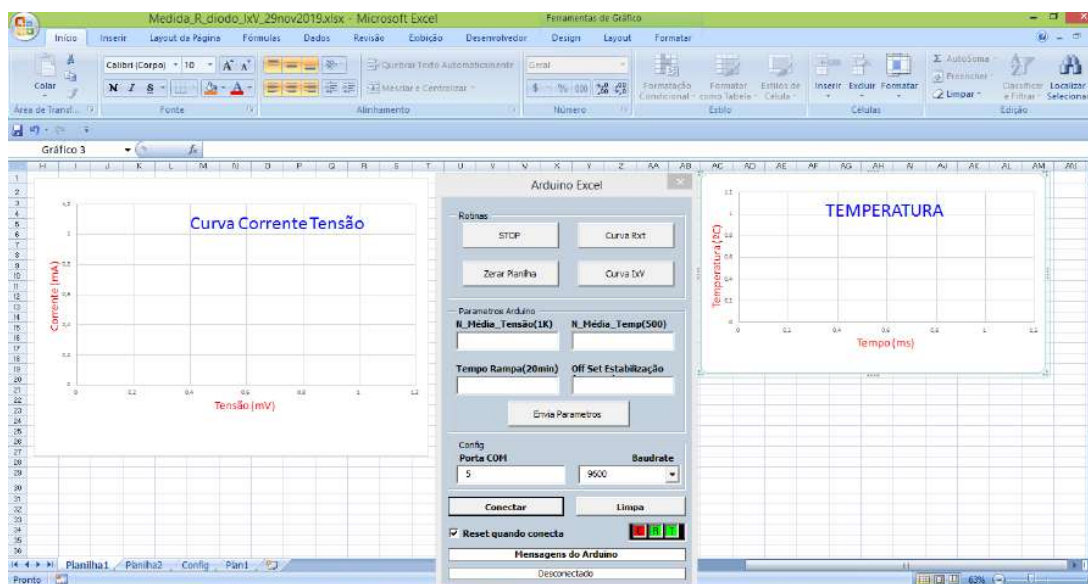
Realizando pesquisa na internet, verificamos que **uma nova versão do software PLX-DAQ** foi apresentada em uma proposta de experimento **justamente para a aquisição da curva IxV de dispositivos eletrônicos**, proposta esta disponibilizada no site YouTube pelo canal **Oficiencia** (OFICIENCIA, 2019).

O canal **Oficiencia** é um canal de divulgação científica e tecnológica para auxílio de alunos do ensino médio e alunos dos cursos de licenciatura em Ciências, que pode ser visualizado através do link <https://www.youtube.com/channel/UCiDKjLbFHsI0MIN5g6txuxA/about>. Ele é apresentado e escrito pelo Prof. Dr. Luiz Antônio de Oliveira Nunes, do Grupo de óptica CEPOF, Instituto de Física de São Carlos (IFSC) da Universidade de São Paulo. Esta adaptação da macro foi chamada "**PLX-DAQ VERSÃO 2**" pelo canal **Oficiencia**, e está disponível para *download* na URL: https://drive.google.com/drive/folders/1MnZ8k1dDYkaF3jHlqNuZnqlaS98r4f7f?usp=drive_open.

Esta versão desenvolvida pelo Oficiencia tem como principais modificações o formato da janela de interface, a adição de mais botões configuráveis para enviar comandos para o Arduino, e a possibilidade de se alterar valores de variáveis através do envio destes valores em parâmetros também configuráveis.



(a)



(b)

Figura 13: Interfaces do **PLX-DAQ**. (a) Configurações de acesso; (b) Configurações de operação. Fonte: Acervo do autor.

Para a utilização do **PLX-DAQ VERSÃO 2** deve-se primeiro executar a instalação do mesmo. Após baixar o software no link acima mencionado, deve-se proceder à instalação da maneira apresentada a seguir:

- Entre na pasta Instalador;
- Execute o arquivo **step1.exe** (o PLX-DAQ original será instalado);
 - Siga os passos do instalador;
 - Aguarde finalizar a instalação;
- Execute o **step2.bat** (Serão copiados os arquivos que estão na pasta **addin** para as pastas de instalação do Office)
- Abra um novo arquivo do Excel;
- Verifique se a aba Desenvolvedor está disponível;
 - Se não estiver disponível vá em Arquivo -> opções -> personalizar faixa de opções;
 - e marque a opção Desenvolvedor na coluna da direita;
 - clique em OK e prossiga;
- Na aba Desenvolvedor vá em "Suplementos do Excel";
- Marque a caixa "Plx-Daq-Sup" e clique em OK;
 - Se "Plx-Daq-Sup" não aparecer vá em Arquivo→opções→Suplementos→Gerenciar e procure o arquivo na pasta **addin**, que se encontra dentro da pasta do instalador;

Se a interface do PLX-DAQ não aparecer use o atalho através das teclas Ctrl + q e inicie a interface. O PLX-DAQ estará disponível em todas as planilhas sempre que o atalho Ctrl + q for acionado.

Para a desinstalação siga os passos abaixo:

- Vá na pasta C:\Users\[nome do usuário]\AppData\Roaming\Microsoft\AddIns;
- Substitua [nome do usuário] pelo nome de usuário do Windows;
- Exclua o arquivo plx-daq-sup.xlam;
- Execute novamente o arquivo step1.exe e selecione a opção "remove";

Para que o Arduino consiga estabelecer uma comunicação com o Excel alguns comandos específicos devem ser utilizados em seu sketch. Assim é possível montar um programa de acordo com a necessidade de cada usuário.

A seguir são apresentados os comandos que são enviados pelo Arduino para o Excel através da porta serial e são interpretados pela macro do PLX-DAQ:

- MSG,[String]

Descrição: Envia uma mensagem para a interface de aquisição;

Parâmetros: [String];

Exemplo: "MSG,Mensagem na interface" ;

- LABEL,[String],[String],...

Descrição: Define o cabeçalho dos dados;

Parâmetros: [String],[String],...,[String];

Exemplo: "LABEL,tempo,x,y,z";

OBS.: Seja consistente com o número de elementos no cabeçalho e nos dados passados, valores diferentes causam erro e não existe verificação para isso.

- DATA,[Dado],[Dado],...

Descrição: Envia os dados de uma linha como CSV;

Parâmetros: [Dado],[Dado],...,[Dado];

Exemplo: "DATA,1,2,3,0.2";

OBS.: Para os decimais utilize . (ponto);

- CLEARDATA

Descrição: Limpa os dados da tela;

Parâmetros: [Nenhum];

Exemplo: "CLEARDATA";

- RESETROW

Descrição: Limpa os dados da tela;

Parâmetros: [Nenhum];

Exemplo: "CLEARDATA";

- CELL,SET,[Celula],[Dado]

Descrição: Coloca o determinado dado na célula correspondente do Excel;

Parâmetros: [Celula],[Dado];

Exemplo: "SET,CELL,A1,1";

OBS.: o exemplo acima coloca o valor 1 na célula A1;

- CELL,GET,[Celula]

Descrição: Pede para o Excel enviar via porta serial o valor da célula;

Parâmetros: [Celula];

Exemplo: "GET,CELL,A1"

OBS.: O exemplo acima ira pedir para o excell o valor que esta na célula A1 esse valor sera retornado para a porta serial com o intuito de ser lido pelo Arduíno.

As limitações apresentadas pelo **PLX-DAQ VERSÃO 2** são o número de colunas, que é limitado a 26 (das colunas A até Z apenas), de forma que qualquer linha de dados que ultrapassar 26 colunas fará com que os dados não sejam corretamente exibidos no Microsoft Excel, exibindo apenas os dados iniciais porém, limitados ao número de dados que excedem 26. Por exemplo, 30 colunas faz com que o programa exiba apenas os 4 primeiros dados pois o resto da divisão de 30 por 26 é 4 e a macro entende que são apenas 4 dados para ler.

O **PLX-DAQ VERSÃO 2** tem como vantagem a possibilidade de configurar os parâmetros e os botões de envio de dados para o Arduino. Para isto basta selecionar a planilha **Config** e alterar os nomes dos botões e parâmetros, bem como os valores dos botões que serão enviados para o Arduino. Então basta programar no sketch do Arduino os mesmos valores configurados para cada botão e quais as variáveis irão receber os valores dos parâmetros.

Para que as alterações sejam realmente aceitas feche o PLX-DAQ e reinicie com a o atalho Ctrl+q.

Para que o envio de parâmetros funcione, quando se alterar um parâmetro, todos devem ser reenviados novamente.

As figuras 15, 15 e 16 ilustram o uso deste software.

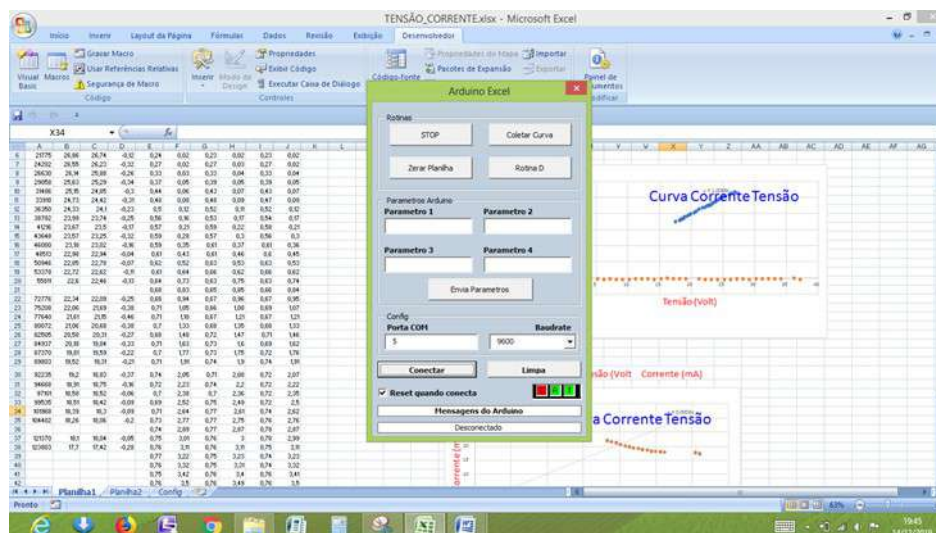


Figura 14: Microsoft Excel e interface do **PLX-DAQ VERSÃO 2**. . Fonte: Acervo do autor.

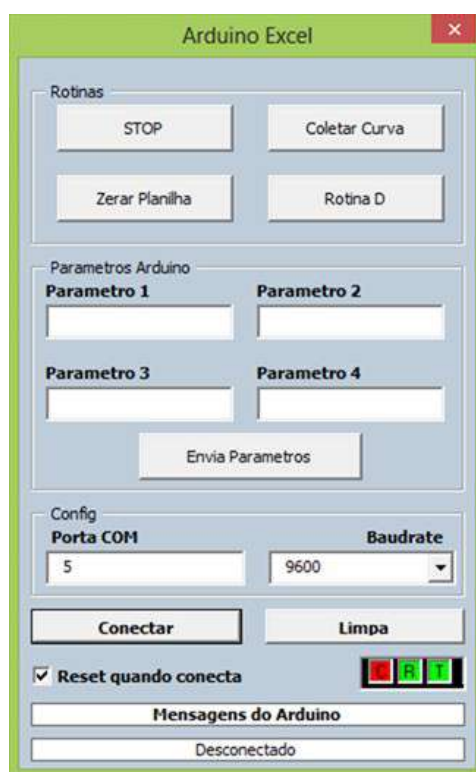


Figura 15: Interface do **PLX-DAQ VERSÃO 2**. . Fonte: Acervo do autor.

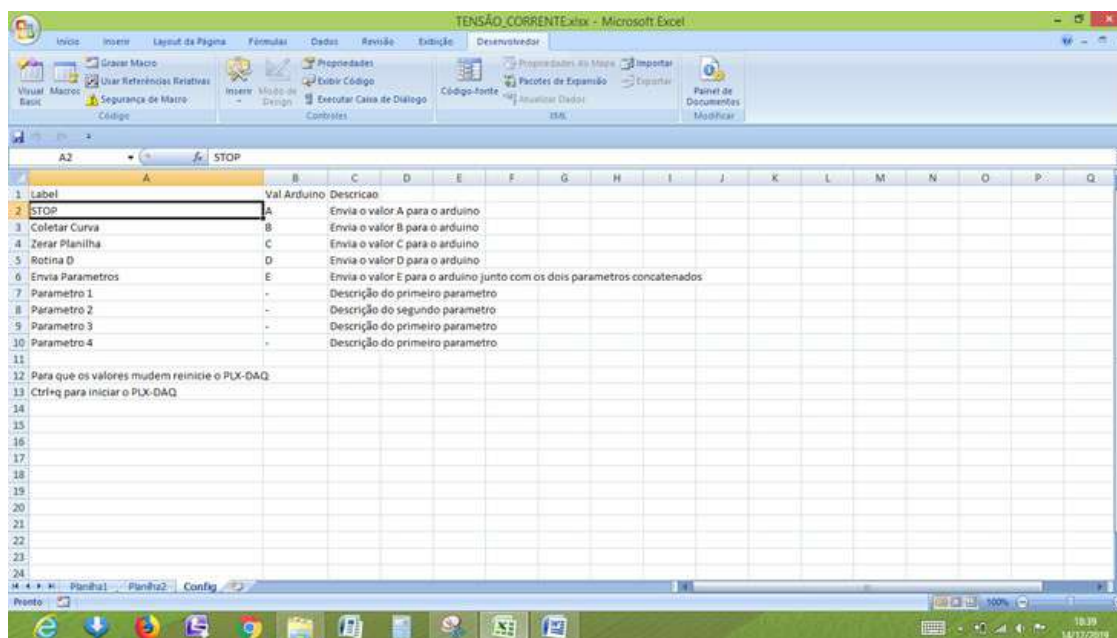


Figura 16: Planilha de configuração de parâmetros e botões do **PLX-DAQ VERSÃO 2**. . Fonte: Acervo do autor.

3.2. A Proposta de Módulo Experimental

Para o estudo da curva $I \times V$ do diodo em temperaturas diferentes é proposta a construção de um kit experimental que permita fazer variar a temperatura da amostra, e, ao mesmo tempo, gerar um fluxo de tensão variável sobre a mesma. A nossa proposta é um sistema automatizado que irá controlar e medir a temperatura, gerar e medir a tensão da amostra, e fazer a aquisição dos dados experimentais em tempo real, permitindo a sua visualização gráfica e o armazenamento dos dados para análise e cálculos posteriores. Para isso a nossa proposta é uma plataforma que utilizará o Microcontrolador Arduino e o Microsoft Excel, com a macro **PLX-DAQ VERSÃO 2**, que irá controlar e supervisionar uma célula Peltier através de uma placa de controle eletrônica e de um sensor de temperatura LM35.

No levantamento da curva $I-V$ se fará uso de um tradicional divisor de tensão, ilustrado na figura 17, em que um resistor em série com o diodo atuará como transdutor de corrente: a tensão elétrica no resistor permite calcular a corrente elétrica que passa nele e, por conseguinte, no diodo, e a tensão no diodo é lida diretamente.

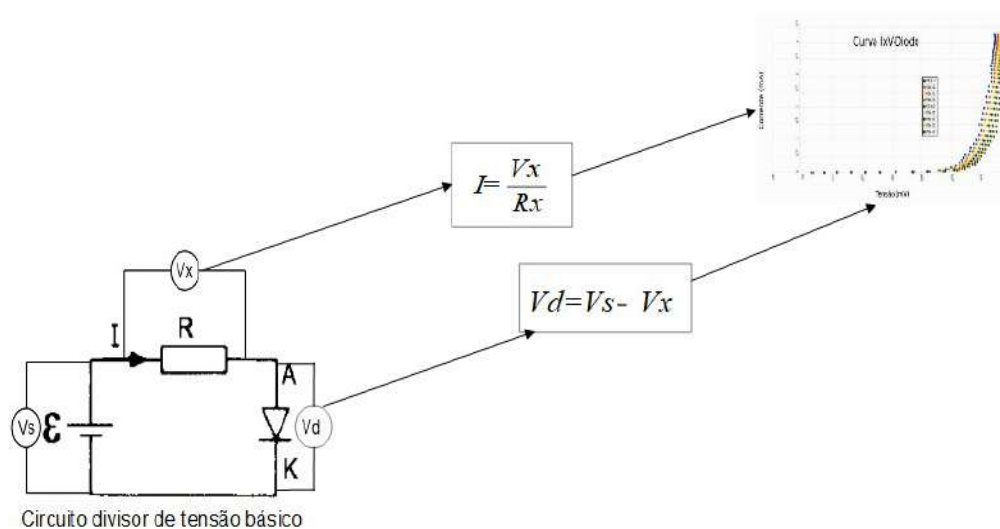


Figura 17. Circuito divisor de tensão básico usado como transdutor para os cálculos da corrente e tensão no diodo, e posterior geração de gráfico no Microsoft Excel. Fonte: Acervo do autor.

A seguir apresentamos os materiais utilizados para a construção do kit proposto e nas figuras 18 e 19 as montagens projetadas.

- Módulo de variação e controle da temperatura
 - 1 célula Peltier TEC1 12706, 12Vcc/6A;
 - 1 cooler ;
 - 1 dissipador de calor;
 - 1 tampa construída de isopo;
 - 1 Sensor de temperatura LM35;
 - 1 Fonte chaveada 12Vcc/8,5A;

- Shield de controle da célula Peltier
 - 1 MOSFET JCS50N06FH;
 - 1 Resistor de 10K Ω ;
 - 1 Placa PCB perfurada dupla 3x7cm;
 - 1 Dissipador de calor;
 - 1 Fonte chaveada 12Vcc 8,5A;

- Módulo de controle e aquisição de dados
 - 1 Microcontrolador Arduino Uno;
 - 1 Protoboard;
 - 1 Resistor de 1K Ω ;
 - 2 Capacitores de 100 μ F;
 - Computador Dell Inspiron 14Z, processador Core I5, 6GB DDR3;
 - Software PLX DAQ versão 2, encontrado no endereço eletrônico:
https://drive.google.com/drive/folders/1tgR7RiRo0VR1_fu1MY_jf1wXsDR-5aqT?usp=drive_open;
 - Cabo USB;

- Dispositivo de estudo:
 - 1 Diodo 1N4007;

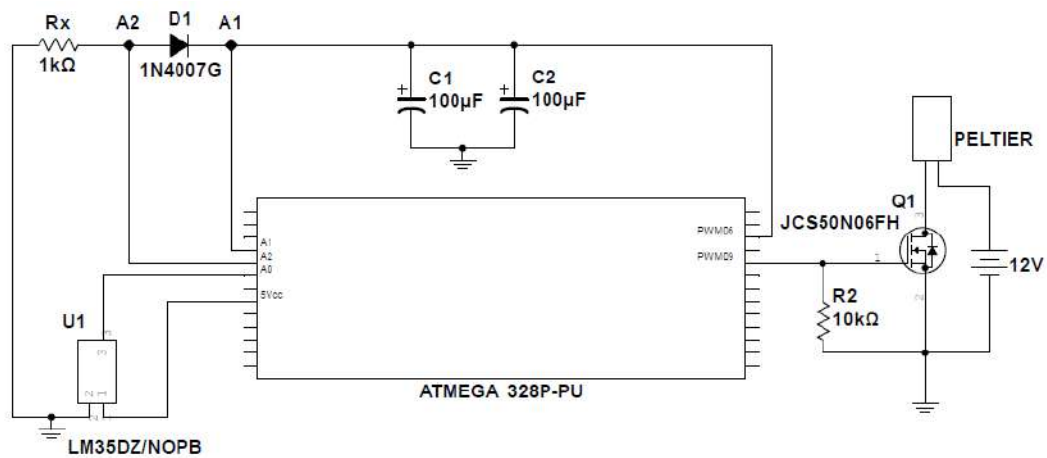


Figura 18: Circuito representativo do módulo proposto. Fonte: Acervo do autor.

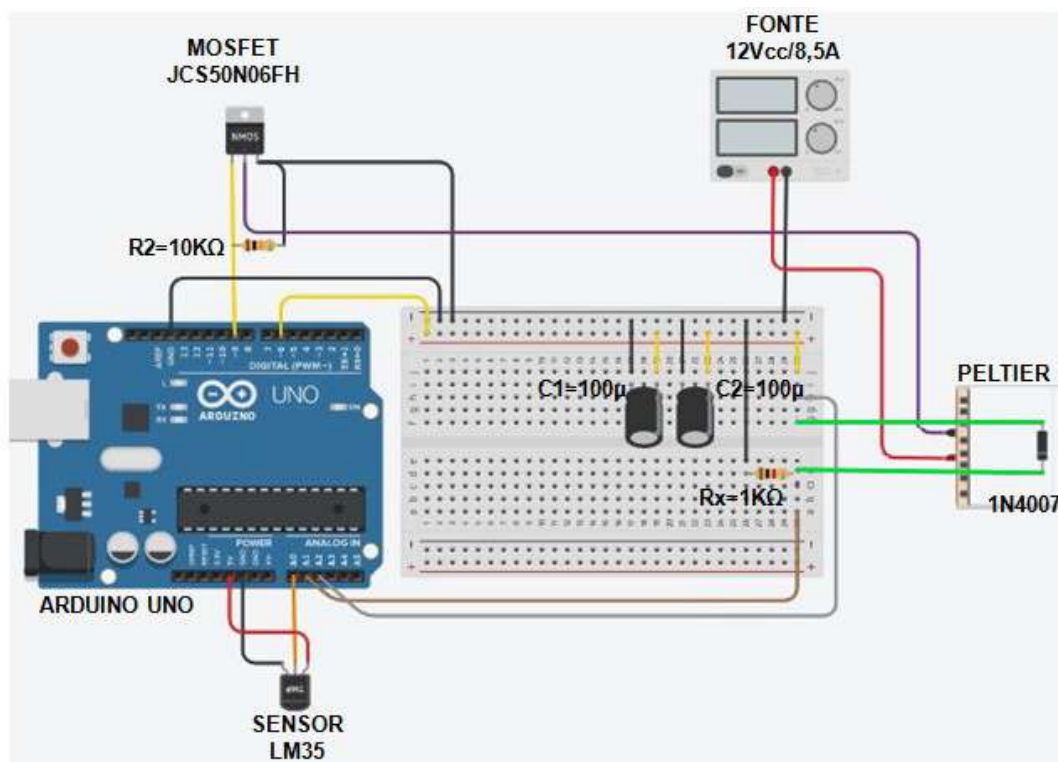


Figura 19: Proposta da Montagem Experimental. Fonte: Acervo do autor.

3.3. Processamento dos dados

Os dados coletados serão processados usando o software livre QtiPlot (QTIPLLOT, 2019), que é de uso corrente no Curso de Licenciatura em Física da UFRRJ. O manual está disponível em (QTIPLLOT, 2019), e um tutorial em língua portuguesa está disponível em (GOMES, 2019).

O QtiPlot permite a entrada de funções criadas pelo usuário, para realizar ajuste e traçado de funções a partir da interpolação de dados discretos. No nosso caso, serão os valores de corrente e tensão elétricas no diodo, adquiridas com o hardware e o software projetados.

Em especial, a função relevante deve traduzir fielmente a expressão (71) que descreve a curva $I(V)$ do diodo, conforme a expressão geral (99).

$$Y(X) = A * \exp(B*X) - A \quad (74)$$

Em (74), “Y” recebe o valor da corrente elétrica medida no diodo, “X” recebe o valor da respectiva tensão elétrica medida no diodo, “A” recebe o valor da corrente de saturação I_s , que pode ser calculada e, se necessário, ter seu valor manualmente ajustado para aprimorar o traçado da curva para melhor ajuste aos dados. Em especial, note-se que em (74), o parâmetro “B” expressa importantes parâmetros físicos, dados em (75).

$$B = q/nKT \quad (75)$$

Note que o parâmetro B envolve “T” como a temperatura da medida, “n” é o fator de idealidade do diodo, “q” é a carga fundamental, e “K” é a constante de Boltzmann (NIST-e, 2019; NIST-k, 2019):

- Carga fundamental: $e = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- Constante de Boltzmann: $k = 1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$.

O fator de idealidade n para uma dada temperatura T pode ser calculado a partir de (75) usando (76).

$$n = q / BKT \quad (76)$$

Explicitando n , uma função de interpolação seria expressa por (77).

$$Y(X) = A * \exp(C*X/n) - A \quad (77)$$

Neste caso, C é dado pela expressão (78).

$$C = q/KT \quad (78)$$

Note-se que as constantes carga fundamental e de Boltzmann podem ser encontradas experimentalmente, a partir de (78), usando (79) e (80).

$$q = C KT \quad (79)$$

$$K = q/CT \quad (80)$$

3.4. Os Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais consistiram em:

- 1– Montagem do hardware proposto, ilustrado nas figuras 18 e 19.
- 2– Elaborar, digitar e implementar todo o software de controle e aquisição de dados, em duas instâncias. Na primeira, codificação do “sketch” a ser compilado e carregado no Arduino UNO, e, na segunda, a programação da macro PLX-DAQ VERSÃO 2, a qual atuará em conjunto com o “sketch” no Arduino UNO.
- 3– Teste de operação do kit, para realização de eventuais ajustes.

- 4– Aquisição de 9 curvas $V \times I$ para um mesmo diodo, cada uma em temperatura diferente. Oito (8) destas curvas são ditas “curvas de ajuste” e a restante, “curva de teste”.
- 5– Realizar o ajuste matemático das curvas de ajuste no QTIPLLOT, utilizando as expressões (71) e (74) desta monografia, obtendo os parâmetros “A” e “B”.
- 6– Obtenção do índice de idealidade $n(T)$ para cada curva de ajuste, usando os dados obtidos no passo 2 e a expressão (77) desta monografia.
- 7– Obter uma curva $n(T)$ usando o QTIPLLOT, na qual se expressa a variação do índice de idealidade com a temperatura, usando os resultados obtidos no passo 3.
- 8– Obter o valor do índice de idealidade da curva de teste $I(V)$ com o resultado do passo 7, conforme sua temperatura de aquisição, por interpolação na curva $n(T)$.
- 9– Ajustar a curva de teste, utilizando no QTIPLLOT, mas agora usando a expressão (78), que explicita o correspondente valor $n(T)$, obtendo o parâmetro “C”.
- 10– Determinação do valor da carga fundamental utilizando a expressão (79) e comparar com o valor convencional (NISTE-e, 2019), calculado o desvio percentual relativo.

- 11– Determinação da constante de Boltzmann utilizando a expressão (80) e comparar com o valor convencional (NISTE-k, 2019), calculado o desvio percentual relativo.

- 12- A partir da resposta obtida com o *kit*, propor um Roteiro detalhado de utilização deste.

4. Resultados e Discussões

Nesta Monografia, a incerteza de medição será expressa na forma compacta (VUOLO, 1999). Neste formato, a incerteza na última casa decimal é transcrita justo ao lado desta, entre parênteses.

4.1 O Módulo experimental obtido

O primeiro resultado a ser apresentado é o conjunto de hardware e software obtidos para o estudo da curva $I \times V$ do diodo em diferentes temperaturas.

Foi construído o dispositivo experimental conforme proposto no capítulo 3, com um sistema automatizado, que permitiu a variação da temperatura através de uma célula Peltier, controlada e monitorada por um microcontrolador Arduino Uno.

Além de controlar e monitorar a temperatura, o microcontrolador Arduino também gerou um pulso de tensão, com o máximo de 5Vcc, sobre o transdutor construído usando a topologia do divisor de tensão, que permitiu a obtenção da tensão e da corrente da amostra utilizada. Este dispositivo experimental também realizou a aquisição dos valores de tensão, corrente e temperatura gerados e medidos, utilizando do software Excel e a interface PLX DAQ VERSÃO 2. A seguir detalhamos este resultado, primeiro a parte em hardware, e, em seguida, em software.

4.1.1 Módulo de variação e controle da temperatura construído

O módulo de variação e controle da temperatura no kit é responsável, como o próprio nome sugere, pela obtenção controlada da temperatura. Ele permitiu baixar a temperatura de maneira controlada numa faixa de 35°C até 1°C, possibilitando assim a variação da temperatura da amostra.

Na construção do sistema para a variação da temperatura utilizou-se uma célula Peltier, alimentada por uma fonte chaveada de 12Vcc e 8,5A e controlada por uma “placa *shield*”¹.

A placa *shield* foi construída com uma placa PCB Universal perfurada de 3cmx7cm, um MOSFET de canal N, um resistor de 10KΩ, um ventilador de refrigeração de microprocessador (“*cooler*”) e um dissipador de calor. Ela foi construída de maneira que consiga abrigar o sistema de controle da célula Peltier e interligar a fonte chaveada, a célula peltier, o cooler e o Arduino. Para isso ela recebeu uma tensão contínua de 12Vcc que veio da fonte chaveada, alimentando a célula Peltier e também o cooler.

O terminal S (*source*) do MOSFET de canal N foi conectado ao terminal negativo da fonte, e o terminal D (dreno) foi interligado ao terminal negativo da célula Peltier, controlando assim a corrente que alimenta a célula Peltier. Desta forma se obteve o controle da potência da mesma. Por sua vez o terminal G (*gate*) do MOSFET foi interligado ao pino digital 9 do Arduino, que gerou um sinal PWM fazendo a tensão no *gate* do MOSFET variar de 0 a 5Vcc. Assim, à

¹ Um shield, no estrito senso, é uma placa se acopla ao Arduino diretamente, sem fios. Usamos este termo aqui no sentido para explicitar que esta é a placa principal sob a qual a ação de controle do Arduino se dá.

medida que a tensão na saída PWM do Arduino varia, a tensão no terminal G do MOSFET também varia, fazendo a corrente que passa pelos terminais D e S variar. Desta forma o Arduino controlou a potência liberada para a célula Peltier através do MOSFET.

A célula Peltier foi instalada, utilizando-se pasta térmica, em um dissipador de calor que está fixado em um “cooler”. Esta montagem permitiu que a dissipação de calor da célula Peltier fosse otimizada, aumentando o seu potencial de resfriamento. A Figura 20 ilustra esta montagem.

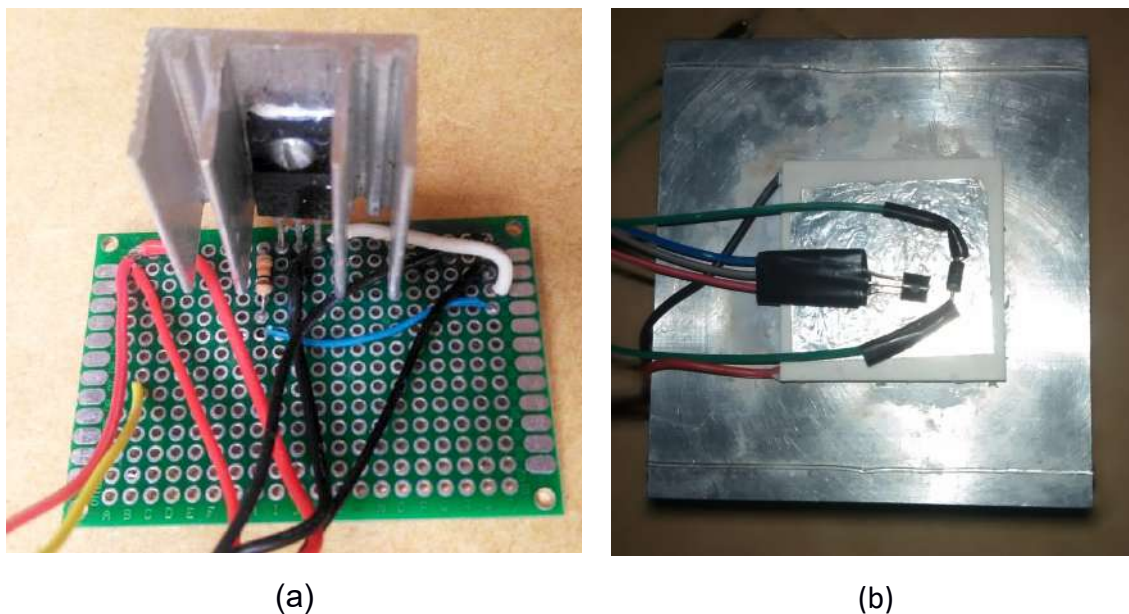


Figura 20: Fotos (a) do “Shield” de controle; (b) da Placa Peltier, da amostra e do sensor de temperatura LM35.

Para monitorar a variação da temperatura utilizou-se um sensor de temperatura LM35 conectado aos pinos 5Vcc, GND e A0 do Arduino. Desta forma, através da entrada analógica A0, o Arduino fez a leitura da temperatura da célula Peltier. Esta medida aconteceu em dois momentos diferentes, com um intervalo de tempo entre as medidas que pode ser ajustado através do

parâmetro “Off Set Estabilização(4000ms)”. Desta forma foi checado se a temperatura atingiu o intervalo de confiança para o estado de equilíbrio, levando-se em conta que a mesma varia devido às flutuações do sistema e à alta sensibilidade do sensor LM35.

Tendo em vista a necessidade de manter a amostra fixa na célula Peltier e ao mesmo tempo diminuir a troca de calor entre a amostra e o meio externo, foi preparado um bloco de isopor com uma fenda, revestido internamente de espuma, de maneira a envolver completamente a célula Peltier e, travar a amostra sobre a mesma. A Figura 21 ilustra esta montagem.



Figura 21. Foto do módulo experimental e tampa de fixação para a amostra.

4.1.2 Módulo gerador da curva $V \times I$ construído

Para se obter a curva $V \times I$ utilizou-se o Arduino para gerar um pulso variável de tensão indo de 0 a 5Vcc e, ao mesmo tempo, ler a tensão gerada na amostra.

A geração do pulso de tensão foi obtida através do pino digital 6 do Arduino, configurado como uma saída PWM, obtendo-se assim uma tensão variável de 0 a 5Vcc. Para que o fluxo de tensão se mantivesse linear, a tensão gerada pelo pino digital 6 do Arduino foi conectada a um circuito com dois capacitores de 100 μ F montados em uma *protoboard* e interligados conforme a figura 22.

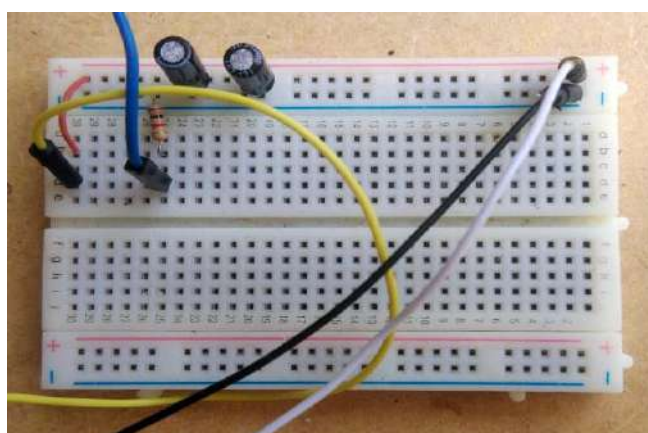


Figura 22. Foto do módulo gerador da curva $V \times I$.

Para a obtenção da tensão na amostra empregou-se o método do divisor de tensão, sendo utilizado um resistor de referência (R_x) de 1K Ω em série com a amostra (D) medida. Usando o método do divisor de tensão, a tensão no diodo (V_d) pode ser encontrada fazendo-se a diferença entre a tensão total injetada (V_s) no circuito e a queda de tensão lida pelo Arduino no resistor de referência (V_x).

A corrente (I) total do circuito foi encontrada através da lei de Ohm, usando-se o valor conhecido do resistor de referência $R_x=1K\Omega$ e o valor lido da queda de tensão V_x .

A tensão gerada pelo pino digital 6 foi dirigida aos capacitores, montados na matriz de contatos (*proto-board*), sendo que o pólo positivo do diodo foi conectado junto com o pino digital 6 do Arduino e aos capacitores C1 e C2 na *proto-board*, e o pólo negativo do diodo foi interligado em série ao resistor de referência, também montado na *proto-board*. As entradas analógicas A1 e A2 do Arduino foram interligadas à *proto-board* para ler, respectivamente, as tensões V_s e V_d conforme a figura 22. Tanto o cálculo para encontrar a queda de tensão no diodo V_d como para encontrar a corrente total do circuito I foram programadas dentro do sketch sendo assim calculados pelo software e já transmitidos ao Microsoft Excel.

4.1.3 Programação no Arduino

Para a realização da aquisição de dados da curva $I \times V$ do diodo com controle e variação da temperatura, foi verificada a necessidade de se criar uma rampa de temperatura através da célula Peltier, cuja temperatura deveria variar em níveis pré-determinados, de modo que, após iniciar uma estágio mudança, ela se estabiliza, estacionando em um determinado patamar, e em seguida, após a estabilização, um pulso de tensão deveria ser gerado somente uma vez, liberando assim a célula Peltier para iniciar o próximo nível de temperatura, de forma que esse ciclo de rampa de temperatura e pulso de tensão prosseguisse até a Peltier atingir a potência máxima.

A seguir se apresenta (emoldurado) o código do “sketch” construído para a programação do Arduino UNO.

```

/*
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA
Denis Paulo Neto
AQUISIÇÃO DA CURVA IxV DO DIODO COM VARIAÇÃO DA TEMPERATURA
/*=====AQUISIÇÃO DA CURVA IxV===== */

//Abaixo está a matriz que armazena a quantidade de colunas configuradas para receber dados no Excel//
char Letra [] = {'A','B','C','D','E','F','G','H','I','J','K','L','M','N','O','P','Q','R','S','T','U','V','W','X','Y','Z'};
int opcao; //Armazena o valor enviado pelo Excel através da porta serial//
int opcao_2; //Armazena o valor que, depois do pulso de tensão, ativa o próximo estágio da
rampa de temperatura//
int i, j, jj, ii=4; //Variáveis usadas para contagem//
int PWPin; //Configura o pino digital 06 como uma saída PWM para gerar o pulso de tensão
para a curva IxV//
int NPontos=1000, NMedias=500; //Armazena o número de pontos para as médias de temperatura e tensão
respectivamente//
float pot0, pot1,Vd,CORR, DV; // Variáveis que armazenam os valores da tensão e corrente//
#define PWMPin 6 // Configura o pino digital 06 como uma saída PWM para gerar o pulso de tensão
para a curva IxV//

/*=====MEDIDA E CONTROLE DA TEMPERATURA=====*/

//TEMPORIZAÇÃO DA RAMPA DE TEMPERATURA//

#include <Crescer.h> //Biblioteca de temporizadores usados para o estouro da rampa de temperatura//

//Temporizadores utilizados para fazer a rampa de temperatura da peltier//
Tempora temp1;
Tempora temp2;
Tempora temp3;
Tempora temp4;
Tempora temp5;
Tempora temp6;
Tempora temp7;

```

```

Tempora temp8;
Tempora temp9;
Tempora temp10;
Tempora temp11;
Tempora temp12;
Tempora temp13;
Tempora temp14;
Tempora temp15;
Tempora temp16;
Tempora temp17;
Tempora temp18;
Tempora temp19;
Tempora temp20;

unsigned long sp=1200000; //Armazena o tempo em milissegundos para o set point dos temporizadores da
rampa//

//As bobinas abaixo ligam e desligam os temporizadores//

boolean
bobina=false,bobina1=false,bobina2=false,bobina3=false,bobina4=false,bobina5=false,bobina6=false,bobina7=fals
e,bobina8=false,bobina9=false,bobina10=false;

//CONTROLE DE POTÊNCIA DO PELTIER//

int peltier = 9; // Variável que armazena o valor do pino para controle do MOSFET //

int power = 0; // Controle do nível de potência que o MOSFET irá liberar para a peltier.Este nível será de 0 a
99%//

int peltier_level; // = map(power, 0, 99, 0, 255); //Váriável que irá converter o valor de 0 a99% para 0 a 255, para
que a saída PWM do pino 9 posso controlar o MOSFET//

/*=====CÁLCULO DA RESISTÊNCIA Z=====*/
float Z; // Variável que irá armazenar o valor da calculado valor instantaneo do módulo da impedância//
float Rx=995.0; // Variável que irá armazenar o valor do resistor de referência//
float I; // Variável que irá armazenar o valor da calculado valor instantaneo do módulo da corrente//
float Vs; // Variável utilizada para armazenar o valor da tensão transformada em volts, usada para o cálculo
da impedância durante a curva IxV//
float Vx; // Variável utilizada para armazenar o valor da tensão transformada em volts sobre o resistor de
referência Rx//

/*=====MEDIDA DA TEMPERATURA=====*/

```

```

const int sensor=0;    // Variável que irá armazenar o valor lido so sensor de temperatura LM35 na entrada
analógica A1 do arduino//

float temperatura;    // Variável que irá armazenar o valor temperatura em °C//

float temperatura2;    // Armazena a média da temperatura feita com a variação máxima e mínima de
temperatura//

unsigned long tempol;    // Variável que irá armazenar o registro do momento em que a leitura da temperatura é
feita//

float tempMin;        // Armazena a temperatura mínima observada em um período de tempo//

float tempMax;        // Armazena a temperatura máxima observada em um período de tempo//

float deltaTemp;      // Armazena a diferença de temperatura em um determinado intervalo de tempo//

int dt=0;            // Variável usada para controle de pico de temperaturas intermitentes, que fogem do
intervalo de equilíbrio//

int delayEstabTemp=4000; // Variável que armazena o intervalo de tempo, setado pelo parâmetro "Off Set
Estabilização(4000)", para que o Arduino faça a leitura das

                        // temperaturas mínimas e máximas//

int P=0;            // Variável que armazena o estado para a liberação da rampa e da impressão da temperatura na
porta serial//

int linha=3; //Conta a quantidade de linhas para o Excel//

/
*=====*/

void setup(){

Serial.begin(9600);    //Inicia a comunicação do Arduino com a porta serial em uma velocidade de 9600//

Serial.println("LABEL,Tempo,TEMP,Z,Vpwm,V1,I1,V2,I2,V3,I3,V4,I4,V5,I5,V6,I6,V7,I7,V8,I8,V9,I9,V10,I10");
//Configura os títulos das colunas onde os dados serão lançados no Excel//

pinMode(PWMPin,OUTPUT); // Configura o pino digital 6 como saída//

pinMode(peltier, OUTPUT); // Configura o pino digital 9 como saída//

analogReference(DEFAULT); // Configura a referência interna do arduino para as medições realizadas nas
entradas analógicas em 5Vcc//

analogWrite(PWMPin, 0); // Zera o valor da saída PWM 6 toda vez que o programa for resetado//

i=5;                // Inicia a saída PWM no pino 6 iniciar em 5//

}

void loop(){

```

```

if (Serial.available(>0)){opcao = Serial.read();} // Verifica se há alguma coisa na sendo enviada do Excel pela porta
serial, se houver armazena na variável opcao//

switch(opcao){
// Verifica o que foi armazenado na variável opcao e, dependendo do
que for, seleciona um dos casos abaixo para executar//

// Quando clicamos o botão [STOP] no PLX-DAQ, o Excel envia a letra 'A' pela porta serial, o Ardui então executa o
CASE 'A', que faz com que a rampa de temperatura para e

//volte para o início//

case 'A':

Serial.read(); //*****Lendo Lixo

power=0;

P=0;

bobina1=false;bobina2=false;bobina3=false;bobina4=false;bobina5=false;bobina6=false;bobina7=false;bobina8=fa
lse;bobina9=false;bobina10=false;

opcao=100;

break;

/*=====CURVA IxV=====*/

case 'CurvaIV': // Quando o programa identifica o equilíbrio da temperatura, faz a variável opcao
igual a 'CurvaIV' fazendo com este case seja executado//

jj=1; // Inicia a contagem de linhas no Excel em 1//

Serial.println("RESETROW"); // Limpa o conteúdo do Excel antes de iniciar//

// O laço a seguir faz com que a variável i cresça de 5 em 5 até 255 e em cada ciclo do loop ele carrega o valor
armazenado em 'i' na variável PWMPin, fazendo com que o

//valor da tensão no pino 6 cresça//

for (int i=5; i <= 255; i=i+5){

analogWrite(PWMPin, i);

delay(10);

pot0=0;

```



```

for(j=0; j<NPontos; j++){
    delay(1);

    pot0 = pot0 + analogRead(1); // Lê o valor da tensão Vs através da entrada analógica A1 soma à variável pot0. O
    laço faz isso a quantidade de vezes setadas em NPontos e

        // depois o valor é usado para fazer a média//

    pot0=pot0/NPontos; // Divide a tensão pelo valor carregado na variável NPontos , que seta o número de pontos
    através do parâmetro N_Media_Tensao(1k) para a média da

        // tensão Vs através do Excel//

    pot1=0;

    for(j=0; j<NPontos; j++){
        delay(1);

        pot1 = pot1 + analogRead(2); // Lê o valor da tensão Vx através da entrada analógica A2 soma à variável pot1. O
        laço faz isso a quantidade de vezes setadas em NPontos e

            // depois o valor é usado para fazer a média//

        pot1=pot1/NPontos; // Divide a tensão pelo valor carregado na variável NPontos , que seta o número de
        pontos através do parâmetro N_Media_Tensao(1k) para a média

            // da tensão Vx através do Excel//

        DV= (pot0-pot1); // Cálculo do valor da queda de tensão no dispositivo que está sendo medido//

        CORR = (5000*pot1/1023)/Rx; // Calcula o valor da corrente em mA, tendo como referência Rx=995ohms, que foi
        o valor lido com o multímetro no resistor de 1Kohm//

        Vd = (5000.0*DV/1023); // Transforma o valor da tensão no diodo Vd em milivolts para ser enviado para o
        Excel//

        jj=jj+1; // Faz a impressão dos valores no Excel comece a partir da segunda linha//

        Serial.print("CELL,SET,"); // Envia dados para o Excel para que sejam recebidos em uma célula pré
        determinada//

        Serial.print (Letra [ii]); // Lê a letra armazenada na matriz informando para o Excel em qual coluna o dado
        deve ser armazenado//

        Serial.print (jj); // Informa para o Excel qual a próxima linha na qual o dado deve ser imprimido//

        Serial.print(",");

        Serial.println (Vd,3); // Imprime a voltagem com 3 casas decimais//

```

```

Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [ii+1]);
Serial.print (jj);
Serial.print(",");
Serial.println(CORR);          // Imprime o valor da corrente no Excel corrente//

delay(1);

}

ii=ii+2;                       //Faz com que as colunas sejam preenchidas de duas em duas//

//SINALIZA QUE O PULSO DE TENSÃO ACABOU E ATIVA O PRÓXIMO ESTÁGIO DA RAMPA//

if((temp1.Saida(bobina1)==true | dt>=9800) && power<10 ){if(temp1.Saida(bobina1)==true)
{bobina2=true;}opcao_2=20;}else{opcao=100;}

if((temp2.Saida(bobina2)==true | dt>=9800)&&power>=10&& power<20){if(temp2.Saida(bobina2)==true)
{bobina3=true;bobina2=false;}opcao_2=30;}else{opcao=100;}

if((temp3.Saida(bobina3)==true | dt>=9800)&&power>=20&&power<30){if(temp3.Saida(bobina3)==true)
{bobina4=true;}bobina3=false;opcao_2=40;}else{opcao=100;}

if((temp4.Saida(bobina4)==true | dt>=9800)&&power>=30&& power<40){if(temp4.Saida(bobina4)==true)
{bobina5=true;}bobina4=false;opcao_2=50;}else{opcao=100;}

if((temp5.Saida(bobina5)==true | dt>=9800)&&power>=40&&power<50){if(temp5.Saida(bobina5)==true)
{bobina6=true;}bobina5=false;opcao_2=60;}else{opcao=100;}

if((temp6.Saida(bobina6)==true | dt>=9800)&&power>=50&& power<60){if(temp6.Saida(bobina6)==true)
{bobina7=true;}bobina6=false;opcao_2=70;}else{opcao=100;}

if((temp7.Saida(bobina7)==true | dt>=9800)&&power>=60&&power<70){if(temp7.Saida(bobina7)==true)
{bobina8=true;}bobina7=false;opcao_2=80;}else{opcao=100;}

if((temp8.Saida(bobina8)==true | dt>=9800)&&power>=70&& power<80){if(temp8.Saida(bobina8)==true)
{bobina9=true;}bobina8=false;opcao_2=90;}else{opcao=100;}

if((temp9.Saida(bobina9)==true | dt>=9800)&&power>=80&&power<90){if(temp9.Saida(bobina9)==true)
{bobina10=true;}bobina9=false;opcao_2=98;}else{opcao=100;}

if((temp10.Saida(bobina10)==true | dt>=9800)&&power>=90&&power<99&&opcao==99)
{bobina1=false;opcao_2=0;}else{opcao=100;}

if(power==99){opcao=100;opcao_2=0;} // Verifica se a potência da Peltier já atingiu 99%, se sim faz com que o
pulso seja interrompido através de opcao e opcao_2//

```



```
ii=0; // Contador de columnas//
Serial.println("RESETROW");

opcao=100;
break;

case 'E':

Serial.read(); //*****Lendo Lixo
NPontos= Serial.parseInt();
NMedias= Serial.parseInt();
sp=Serial.parseInt();
delayEstabTemp=Serial.parseInt();
opcao=100;
break;

default:

delay(1);
}

/*=====FINAL DO LAÇO SWITCH E INÍCIO DO LOOP QUE EXECUTA A RAMPA E MEDIÇÃO DA
TEMPERATURA=====*/

dt=0; // Inicia em zero a variável usada para controle de pico de temperaturas intermitentes, que
fogem do intervalo de equilíbrio//

temp1.defiSP(sp); // Função usada pela biblioteca <Crescer.h> para receber o set pointe de cada temporizador//
temp2.defiSP(sp);
temp3.defiSP(sp);
temp4.defiSP(sp);
temp5.defiSP(sp);
temp6.defiSP(sp);
temp7.defiSP(sp);
temp8.defiSP(sp);
```

```

temp9.defiSP(sp);
temp10.defiSP(sp);

//CONTROLE DE POTÊNCIA DA PELTIER//

if(power > 99) power = 99;          //Limita o valor da potência da peltier para não ultrapassar de 99%//
if(power < 0){ power = 0;}         //Limita o valor da potência da peltier para não ficar menor que zero//
peltier_level = map(power, 0, 99, 0, 255); // Converte o valor percentual de 0 99% para o range de 0 255 para
enviar para a saída PWM//
analogWrite(peltier, peltier_level); //Escreve o valor de 0 a 255 na saída digital 9, controlando assim o sinal
PWM//

/*=====CÁLCULO DA RESISTÊNCIA Z=====*/
// Este trecho do programa calcula o valor da resistência do dispositivo que está sendo medido//

pot0=0;

for(j=0; j<NPontos; j++){pot0 = pot0 + analogRead(1);}

pot0=pot0/NPontos;
pot1=0;

for(j=0; j<NPontos; j++){pot1 = pot1 + analogRead(2);}

pot1=pot1/NPontos;
DV= (pot0-pot1);
Vx= (5.0*pot1/1023.0); // Transforma o valor da tensão lida no resistor de referência em volts//
Vd = (5.0*DV/1023.0);
Vs=(5.0*pot0/1023.0);
I=Vx/Rx;          //Calcula o valor da corrente que passa pelo resistor de referência//
Z=(Rx*DV)/pot1;   //Calcula o valor da impedância Z//

/*=====MEDIDA E CONTROLE DA TEMPERATURA=====*/

```

```

tempMax=0; //Inicia em zero, a cada ciclo, a variável que armazena a temperatura máxima em um intervalo de
tempo pré-determinado//

tempMin=100; //Inicia em 100, a cada ciclo, a variável que armazena a temperatura mínima em um intervalo de
tempo pré-determinado//

temperatura=0; //Inicia em zero a variável que armazena a temperatura a cada ciclo//

for(int t=0;t<NMedias;t++){temperatura=temperatura+analogRead(sensor);} // Faz a média temperatura lida pelo
sensor LM35 para eliminar o ruído//

temperatura=temperatura/Nmedias; // Divide a temperatura pelo parâmetro NMedias que pode seta o número
de pontos para a média da temperatura através do Excel//

if (temperatura>tempMax) {tempMax=temperatura;} // Armazena o valor máximo de
temperatura lido no intervalo de tempo pré-determinado//

delay(delayEstabTemp); // Intervalo de tempo, setado pelo parâmetro "Off Set Estabilização(4000)", para que o
Arduino faça a leitura das temperaturas mínimas e máximas//

for(int tmin=0;tmin<NMedias;tmin++){temperatura=temperatura+analogRead(sensor);} //Faz a média
temperatura lida pelo sensor LM35 para eliminar o ruído//

temperatura=temperatura/NMedias; //Divide a temperatura pelo parâmetro NMedias que pode seta o número de
pontos para a média da temperatura através do Excel//

if (temperatura< tempMin) {tempMin=temperatura;} else{ tempMin=tempMax;} // Armazena o valor máximo de
temperatura lido no intervalo de tempo pré-determinado//

delay(2);

temperatura2=0; //Inicia em zero, a cada ciclo, a variável que armazena a média da temperatura que usa o valor
máximo e mínimo em um intervalo de tempo pré-determinado//

temperatura2=(tempMax+tempMin)/2; // Média da temperatura usando o valor máximo e mínimo armazenados
pelas variáveis tempMax e tempMin//

deltaTemp=0; // Inicia em zero, a cada ciclo, a variável que armazena a diferença da
temperatura em um intervalo de tempo pré-determinado//

for(int t=0;t<NMedias;t++){deltaTemp=deltaTemp+(tempMin-tempMax);} // Média da diferença de temperatura
usando o valor máximo e mínimo armazenados pelas

// variáveis tempMax e tempMin//

deltaTemp=deltaTemp/NMedias; //Divide a diferença de temperatura pelo parâmetro NMedias que pode seta o
número de pontos para a média da temperatura//

deltaTemp=(deltaTemp*4.9/1024); // Transforma a diferença de temperatura lida na entrada analógica A0 em
tensão//

deltaTemp=deltaTemp*100; // Transforma a diferença de temperatura em °C//

```

```

if(deltaTemp>0.07||deltaTemp<-0.03){dt=dt-1;} // Seleciona quais os valores de temperatura estão fora
do intervalo de confiança para o equilíbrio//

if(deltaTemp<=0.07&&deltaTemp>=-0.03){dt=dt+10000;} // Seleciona quais os valores de temperatura estão
dentro do intervalo de confiança para o equilíbrio//

tempMax=(tempMax*4.9/1024); // Transforma a diferença de temperatura máxima lida na entrada analógica A0
em tensão//

tempMax=tempMax*100; // Transforma a temperatura máxima em °C//

tempMin=(tempMin*4.9/1024); // Transforma a diferença de temperatura mínima lida na entrada analógica A0
em tensão//

tempMin=tempMin*100; // Transforma a temperatura mínima em °C//

temperatura2=((temperatura2)*4.9/1024); // Transforma a diferença de temperatura média lida na entrada
analógica A0 em tensão//

temperatura2=(temperatura2)*100; // Transforma a temperatura média em °C//

tempol=millis(); //Registra o momento em que a temperatura foi medida//

//LÓGICA DE DESCIDA DA RAMPA DE TEMPERATURA DA PELTIER//

P=1; // Quando a variável P está carregada com o valor 1, faz com que o Arduino execute a rampa e imprima a
temperatura enquanto o pulso de tensão não está acontecendo//

if(opcao=='D'){ bobina1=true;opcao_2=10;power=0; } // Verifica se o botão [CURVA lxV] foi acionado. Se sim,
executa a lógica a seguir//

/*A lógica abaixo checa se a temperatura está dentro do intervalo de equilíbrio, em qual valor está a potência da
Peltier e se o pulso de tensão finalizou o loop para e liberou o início para um novo estágio da rampa ela também
checa se o tempo de estouro já foi alcançado, se sim faz o programa executar o pulso de tensão idependente do
equilíbrio da temperatura*/

if((temp1.Saida(bobina1)==true || dt>=9800)&& power<10&& opcao_2==10 ){opcao='CurvaIV';P=0;}

if((temp2.Saida(bobina2)==true || dt>=9800)&& power>=10&& power<20&&opcao_2==20){P=0;opcao='CurvaIV';}

if((temp3.Saida(bobina3)==true || dt>=9800)&& power>=20&&power<30&&opcao_2==30){P=0;opcao='CurvaIV';}

if((temp4.Saida(bobina4)==true || dt>=9800)&& power>=30&& power<40&&opcao_2==40){P=0;opcao='CurvaIV';}

if((temp5.Saida(bobina5)==true || dt>=9800)&& power>=40&&power<50&&opcao_2==50){P=0;opcao='CurvaIV';}

if((temp6.Saida(bobina6)==true || dt>=9800)&& power>=50&& power<60&&opcao_2==60){P=0;opcao='CurvaIV';}

```

```

if((temp7.Saida(bobina7)==true | dt>=9800)&& power>=60&&power<70&&opcao_2==70){P=0;opcao='CurvaIV'};
if((temp8.Saida(bobina8)==true | dt>=9800)&& power>=70&& power<80&&opcao_2==80){P=0;opcao='CurvaIV'};
if((temp9.Saida(bobina9)==true | dt>=9800)&& power>=80&&power<90&&opcao_2==90){P=0;opcao='CurvaIV'};
if((temp10.Saida(bobina10)==true | dt>=9800)&& power>=90&& power<99&&opcao_2==98)
{bobina1=false;P=0;opcao='CurvaIV'};

if(power==99){opcao=100;} // Verifica se a potência da Peltier já atingui 99%, se sim faz com que o comando
enviado pelo botão "CURA 1xV do PLXDAQ seja anulado//

//IMPRIME A TEMPERATURA NO EXCEL SOMENTE QUANDO case 'CurvaIV' NÃO ESTIVER SENDO EXECUTADO//
if(P==1) {
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [0]);          // Configuta a impressão da tempo na primeira coluna//
Serial.print (linha);
Serial.print(",");
Serial.println(tempol);           // Imprime o tempo no momento em que a temperatuta foi medida no Excel//
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [1]);          // Configuta a impressão da temperatura na segunda coluna//
Serial.print (linha);
Serial.print(",");
Serial.println((float) temperatura2,2); //Imprime na saída serial o valor do momento em que a temperatura foi
lida//
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [2]);          // Configuta a impressão da resistência na terceira coluna//
Serial.print (linha);
Serial.print(",");                // Separador que irá separar os valores nas colunas do Excel//
Serial.println(Z/1000,3);          // Imprime na saída serial o valor da tensão lida para o resistor de referência//
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [3]);          // Configuta a impressão da temperatura na quarta coluna do Excel//
Serial.print (linha);
Serial.print(",");
Serial.println(deltaTemp,3);
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [2]);          // Configuta a impressão da palavra "RAMPA" na terceira coluna do Excel//
Serial.print (2);                 // Configuta a impressão da palavra "RAMPA" somente na segunda linha do
Excel//

```



```

Serial.print(",");

if(dt>=5000){Serial.println("Temp OK");}else{Serial.println("RAMPA");} // Imprime no Excel a palavra "RAMPA"
quando a temperatura estiver fora do intervalo de equilíbrio e "Temp OK" quando estiver dentro do intervalo.//

Serial.print("CELL,SET,");

Serial.print (Letra [0]);

Serial.print (2);

Serial.print(",");

Serial.println(power);

Serial.print("CELL,SET,");

Serial.print (Letra [1]);

Serial.print (2);

Serial.print(",");

Serial.println(temperatura2);

}

linha=linha+1;

}

```

4.1.4. Programação no Software PLX-DAQ Versão 2 para aquisição de dados em conjunto com o Arduino

Em conjunto com o sketch, foi programado o Software PLX-DAQ Versão 2 para que no protótipo se realizassem nove ciclos até que a célula Peltier atingisse a potência máxima. Os parâmetros empregados no PLX-DAQ Versão 2 são descritos a seguir.

A. case 'CurvaIV'

- Laço para geração do Pulso de tensão
 - Incremento do sinal PWM no porta digital 06;

- Medida das tensões V_s e V_x ;
- Cálculo da tensão em V_d ;
- Cálculo da corrente;
- Medida da temperatura;
- Medida do tempo em milissegundos;
- Impressão dos dados no Excel;
- Lógica de incremento da potência e ativação do próximo estágio da rampa;

B. Configurações para o excel

- case 'B': serve para limpar os dados impressos no Excel;
- case 'E': carrega as variáveis do programa com os dados enviados do Excel para o Arduino;

C. Medida e controle da temperatura

- Controle da Peltier
 - Configuração do set point dos temporizadores através da variável sp ;
 - Lógica de controle da potência da Peltier transformando bits em percentual;
- Cálculo da resistência (opcional);
- Media da temperatura;

- Medida do tempo;
- Lógica da rampa de temperatura;
- Impressão no Excel.

4.1.5. Descrição do funcionamento geral do “sketch”

Ao iniciar o PLX-DAQ Versão 2, após a configuração da porta de comunicação COM e da velocidade de comunicação, clicando-se no botão [Conectar] o Arduino começará a comunicação com o Excel através da porta serial. Será iniciado assim o módulo de “MEDIDA E CONTROLE DA TEMPERATURA”, que irá checar se a variável **P** é igual a 1, e, se a resposta for “sim”, isto fará com que o programa registre a temperatura e o momento em que ela foi medida e imprima-os no Excel.

Para que os dados sejam impressos no Excel deve-se configurar qual a coluna e a linha em que se quer imprimir, e, para isso, usou-se **Serial.print("CELL,SET,")**, que envia para o Excel a informação de que o dado será impresso em uma célula específicas pré-determinada. Logo a seguir **Serial.print (Letra [ii])** e **Serial.print (jj)** enviam para o Excel em qual coluna e linha o dado deve ser impresso respectivamente. Quando o programa fizer **jj=jj+1**, a contagem das linhas é iniciada, incrementando uma linha cada vez que o programa refaz seu ciclo. Já para as colunas o programa carrega em **Letra [ii]** as letras de cada coluna armazenadas na matriz, sendo **Letra [0]** equivalente à coluna A. Desta forma **ii=0** e **jj=2** é igual à célula A2.

A medida da temperatura é feita conectando a saída do sensor LM35 à porta analógica A0 do Arduino. A variável denominada **sensor** é configurada no início do programa para receber a porta analógica A0, e a variável **temperatura** é usada para receber a soma do valor registrado em **sensor** a cada ciclo do programa. Esta soma é efetuada dentro de um laço **for**, que repete a soma até que a variável **t** atinja o valor armazenado na variável **NMedias**, que tem como default o valor de 500 pontos. Quando o valor de **NMedias** é atingido o programa calcula a média da temperatura dividindo o valor da leitura que foi somado pelo valor armazenado em **NMedias**. O cálculo da média da temperatura torna-se necessário devido ao fato de haver flutuações na alimentação +5Vcc do Arduino que alimenta o LM35, gerando ruído para leituras de temperatura com precisão maior que 0,5°C. Desta forma a realização da média da temperatura suaviza a medida da mesma.

O parâmetro **NMedias** tem o seu valor de default igual a 500 pontos, configurado no início do programa, mas também pode ser configurado através da interface do PLX-DAQ, conforme demonstrado no trecho em que explicamos as etapas para se fazer uma medida.

Para se conseguir estabelecer o momento em que a temperatura começa a atingir o equilíbrio foi necessário efetuar a medida da temperatura em dois momentos diferentes, sendo o intervalo de tempo entre as duas medidas configurado pela variável **delayEstabTemp**, que tem o seu valor de **default** configurado no início do programa em 4000 milissegundos, e também configurável pela interface do PLX-DAQ. Após a realização da média da primeira medida da temperatura, a mesma tem o seu valor máximo carregado

na variável **tempMax**, aguardando assim o valor de tempo estabelecido em **delayEstabTemp**, realizando novamente a medida da temperatura e a média da mesma e, carregando o seu valor mínimo na variável **tempMin** através da lógica estabelecida no programa. Com os valores de **tempMax** e **tempMin** é calculada a diferença **deltaTemp** que irá mostrar a qual foi a variação da temperatura medida em dois momentos diferentes. Uma vez estabelecida a metodologia para se encontrar o intervalo em que a temperatura se encontra em equilíbrio, o valor do intervalo onde os valores de **deltaTemp** devem permanecer (-0,03 a 0,07) foi encontrado realização medidas da temperatura ambiente com o sensor LM35 em contato apenas com o ar.

Ao clicar no botão [Curva IxV] do PLX-DAQ Versão 2 o Excel irá enviar a letra '**D**' pela porta serial, o Arduino irá verificar o valor encontrado na porta serial fazendo a variável **opcao = Serial.read()**, desta forma se **opcao == 'D'** ele começará a verificação do equilíbrio da temperatura, checando se a diferença de temperatura medida (**deltaTemp**) se encontra dentro do intervalo de -0,03°C a 0,07°C, que foi previamente programado no sketch. Para controlar picos intermitentes no valor de **deltaTemp** usou-se a variável **dt** que inicia com um valor de **dt=dt+10000** se a temperatura estiver dentro do intervalo de -0,03°C a 0,07°C, fazendo **dt=dt-1** se ela estiver fora deste intervalo, de forma que haja um decréscimo no valor de **dt**, se **dt>=9800**, a temperatura é considerada dentro do intervalo de equilíbrio e os valores de **deltaTemp** fora do intervalo são considerados flutuações ou ruído pela sensibilidade do sensor. Este ajuste foi necessário porque a velocidade de processamento do Arduino é em uma frequência de 16MHz, de maneira que

em um intervalo de 1s algumas destes picos intermitentes são capturados mesmo quando a temperatura está estabilizada.

Se a temperatura estiver dentro do intervalo de equilíbrio ($dt \geq 9800$), a potência da Peltier estiver abaixo de 10% ($power < 10$) e a liberação para iniciar o primeiro estágio tiver sido executada ($opcao_2 == 10$), então o programa executa $opcao = 'CurvaIV'$, fazendo com que a parte do programa que se encontra dentro do **case 'CurvaIV'** seja executado, dando início ao pulso de tensão e fazendo com que o módulo de “MEDIDA E CONTROLE DA TEMPERATURA” seja interrompido através da variável $P=0$.

Ao iniciar o conjunto de instruções contido no **case 'CurvaIV'**, o Arduino executará o laço **for**, responsável pelo pulso de tensão, incrementando: o valor da variável i em $analogWrite(PWMPin, i)$, da medida das tensões V_s e V_x , do cálculo da tensão em V_d , do cálculo da corrente, da medida da temperatura, da medida do tempo em milissegundos e da impressão dos dados no Excel. Este laço se repetirá até que $i=255$, obtendo assim uma variação do sinal na saída PWM configurada no pino digital 06 do Arduino.

A medida das tensões V_s e V_x é feita conectando as entradas analógicas A1 e A2 do Arduino. As variáveis $pot0$ e $pot1$ são usadas para receber a soma dos valores lidos pelas entradas analógicas A1 e A2, respectivamente, a cada ciclo do programa. Esta soma é efetuada dentro de um segundo laço **for**, que repete a soma até que a variável j atinja o valor armazenado na variável **NPontos**, que tem como default o valor de 1000 pontos. Quando o valor de **NPontos** é atingido o programa calcula a média das

tensões, dividindo o valor da leitura que foi somada às variáveis **pot0** e **pot1**, pelo valor armazenado em **NPontos**. O cálculo da média das tensões torna-se necessário devido ao fato de haver flutuações na alimentação +5Vcc do Arduino, que é usado como referência para a leitura das entradas analógicas do mesmo, suavizando assim as medidas de tensão no tempo.

A variável **NPontos** tem o seu valor de *default* igual a 1000 pontos, configurado no início do programa, mas também pode ser configurado através da interface do PLX-DAQ, no parâmetro N_Média_Tensão(1K), conforme demonstrado no trecho em que explicamos as etapas para se fazer uma medida.

Logo após a medida das tensões o programa realiza o cálculo da tensão do diodo $DV = (pot0 - pot1)$, da corrente (em mA) que passa pelo diodo $CORR = (5000 * pot1 / 1023) / Rx$ e a transformação de **DV** em milivolts através de $Vd = (5000.0 * DV / 1023)$, para ser enviado para o Excel.

Deve-se notar que para o cálculo da corrente do circuito o valor da tensão está sendo dividido pela variável **Rx**. Esta variável armazena o valor da resistência de referência usada no circuito eletrônico para o divisor de tensão. O resistor de referência utilizado para a construção do divisor de tensão foi um resistor com valor de 1K Ω , que, após medido com um multímetro apresentou um valor de resistência de 995 Ω . Por isso, para ajustar a precisão nas medidas das tensões este valor é carregado na variável **Rx**, no início do sketch.

Continuando ainda dentro do laço que é responsável pelo pulso de tensão, todo o procedimento para a medição da temperatura, do tempo e para

a impressão no Excel é repetido, de forma que os mesmos também sejam registrados no momento em que o pulso de tensão esteja acontecendo.

Seguindo, fora do laço **for**, mas ainda dentro do **case 'CurvalV'**, o Arduino executa uma lógica para verificar se o pulso de tensão acabou e ativar o próximo estágio da rampa. Ele verifica se a temperatura está em equilíbrio ou se o tempo do temporizador daquele estágio estourou, e, se a célula Peltier ainda não atingiu a potência que se deseja para o novo estágio e. Então, desliga o temporizador do estágio atual, liga o próximo temporizador e libera o sinal para que o próximo estágio seja liberado. No final da lógica o programa verifica se a potência da célula Peltier atingiu seu valor máximo e desliga o pulso e rampa. Se a potência da Peltier não atingir seu valor máximo ele incrementa o seu valor através de **power=power+11**.

Ao terminar o **case 'CurvalV'** o Arduino retorna a executar o módulo de “MEDIDA E CONTROLE DA TEMPERATURA” .

Ao clicar no botão [STOP] do PLX-DAQ Versão 2, o Excel irá enviar a letra '**A**' pela porta serial, o Arduino irá verificar o valor encontrado na porta serial fazendo a variável **opcao = Serial.read()**. Desta forma se **opcao == 'A'** ,o Arduino irá parar a rampa e o pulso de tensão, fazendo com que volte ao início.

Ao clicar no botão [Envia Parâmetros] do PLX-DAQ Versão 2 o Excel irá enviar a letra '**E**' pela porta serial, o Arduino irá verificar o valor encontrado na porta serial fazendo a variável **opcao = Serial.read()**, desta forma se **opcao ==**

'E' o Arduino irá carregar os valores dos parâmetros setados no PLX-DAQ nas variáveis que estão dentro do **case 'E'**.

Ao clicar no botão [Zerar Planilha] do PLX-DAQ Versão 2 o Excel irá enviar a letra '**C**' pela porta serial, o Arduino irá verificar o valor encontrado na porta serial, fazendo a variável **opcao = Serial.read()**. Desta forma se **opcao == 'C'** o Arduino irá zerar os valores impressos na planilha do Excel.

4.2. Testes do Módulo experimental

Após a construção do módulo experimental (kit), foram realizados diversos testes para verificar a variação de temperatura da placa Peltier, aquisição de dados pelo Excel e a geração do pulso de tensão pelo Arduino.

Estes testes ocorreram em bancada de trabalho no Laboratório de Materiais e Dispositivos Supercondutores DEFIS/ICE/UFRRJ, no Campus Seropédica desta IFES.

4.3. Aplicação com Diodo

Apresentamos agora como se prepara e posteriormente se usa este kit para uso didático. Como aplicação, o módulo experimental (kit) foi utilizado para obter as constantes carga fundamental e constante de Boltzmann a partir da curva $I - V$ de um diodo em uma certa temperatura. Os procedimentos experimentais utilizados estão descritos nos passos 4 a 12 da seção "3.4. Os Procedimentos Experimentais" do Capítulo 3 desta monografia.

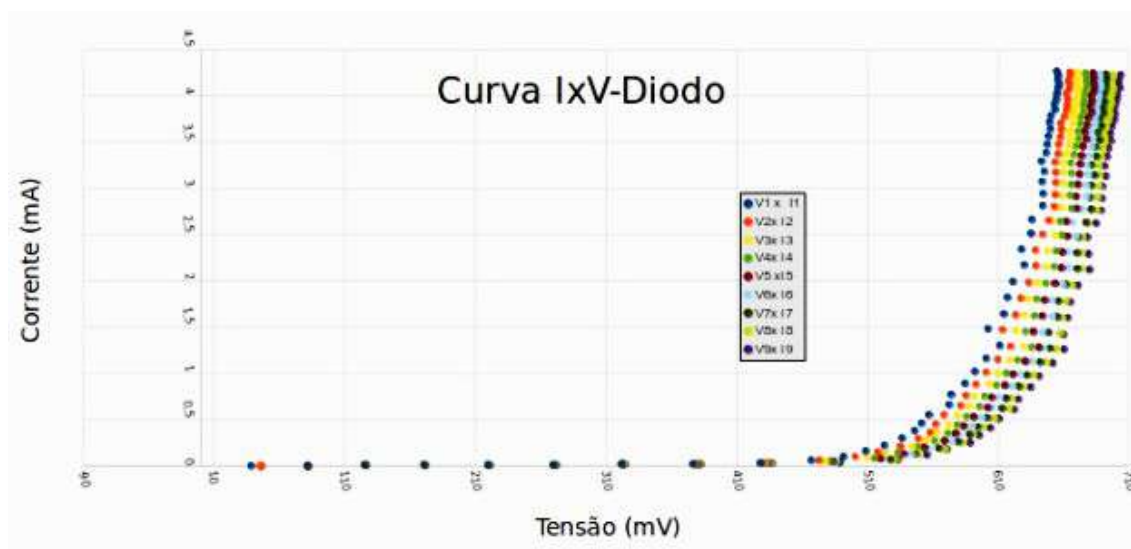
Foram coletados os valores da variação da corrente e da tensão no diodo para nove temperaturas diferentes. Os dados coletados foram analisados usando o software livre QTIPLLOT (QTIPLLOT, 2019).

A Figura 23 apresenta as curvas obtidas para um mesmo diodo em 9 temperaturas diferentes. Observa-se claramente o efeito da temperatura sobre as curvas, deslocando a tensão de condução do diodo para temperaturas maiores e promovendo alterações em suas concavidades.

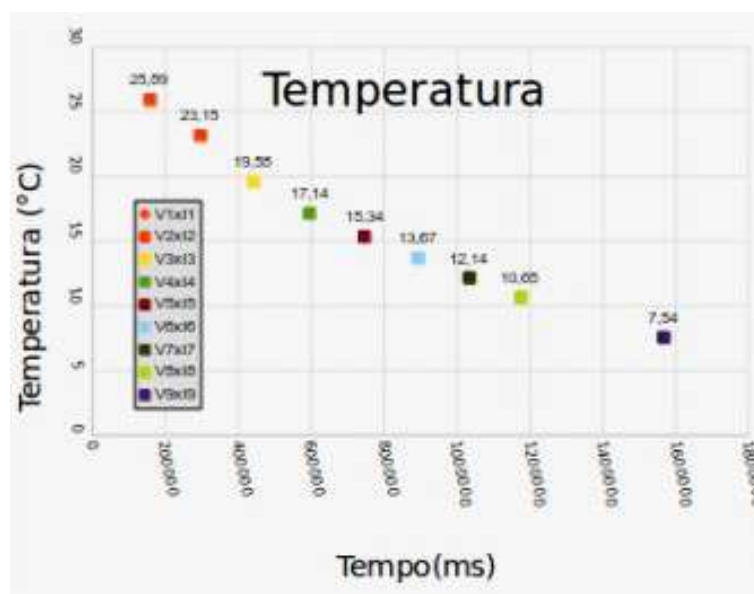
Este efeito é compatível com o apresentado na Figura 7 (b) (EL-GHANAM, 2015).

Logo, é necessário o levantamento da curva $n(T)$ de um diodo, para que o mesmo possa ser estudado em função da temperatura.

A curva de teste do kit foi realizada a uma temperatura estável $T=290,14K$. As oito demais foram usadas para determinar a curva $n(T)$ deste diodo.



(a)



(b)

Figura 23. Curvas obtidas (a) I – V para um mesmo diodo em 9 temperaturas diferentes; (b) Temperaturas das isothermas estabelecidas em função do tempo.

Mediante os ajustes das curvas, que constam na figura 24 a seguir, usando a expressão (76) se obtiveram os índices de idealidade deste diodo para diferentes temperaturas, agrupadas no Quadro 1.

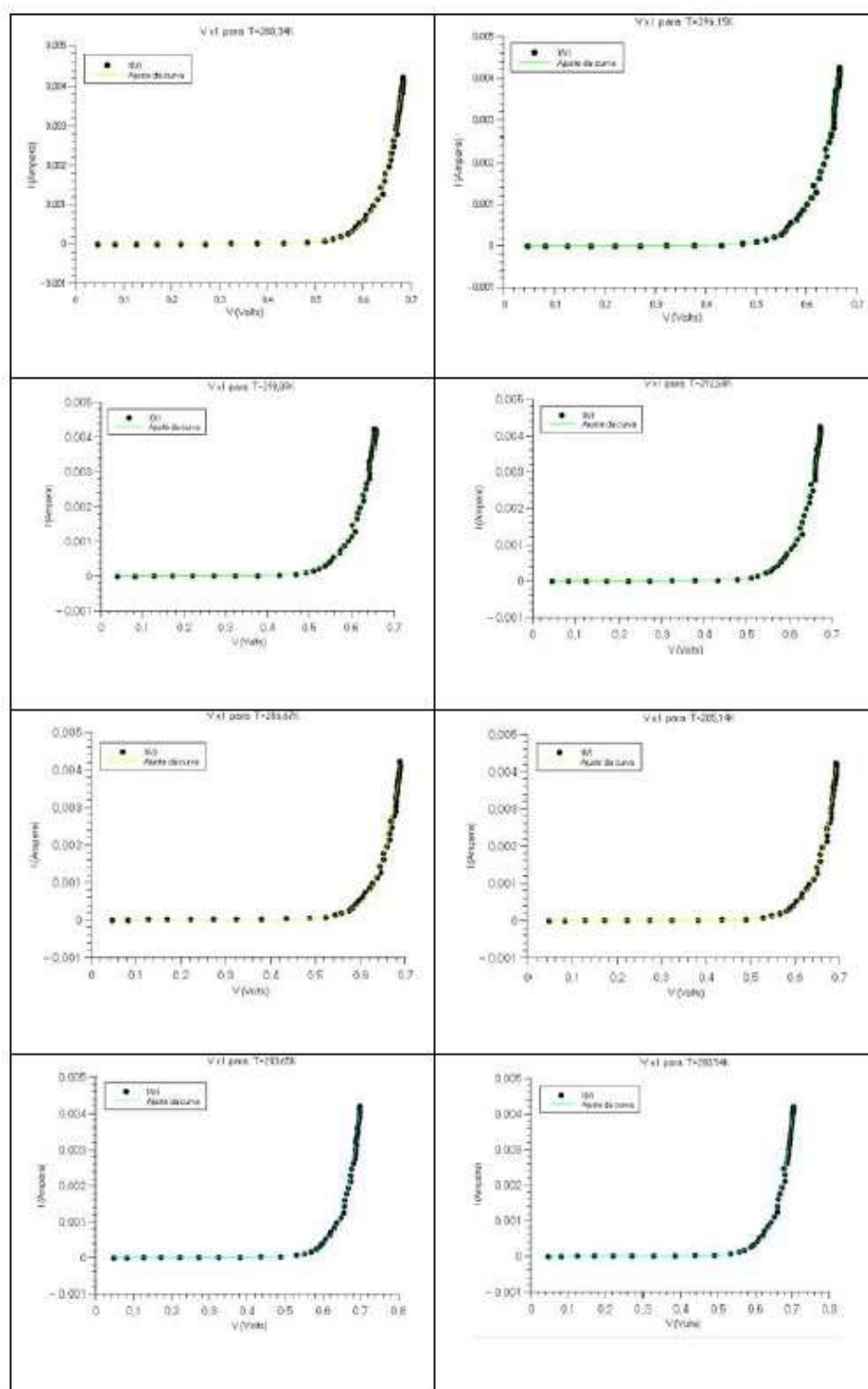
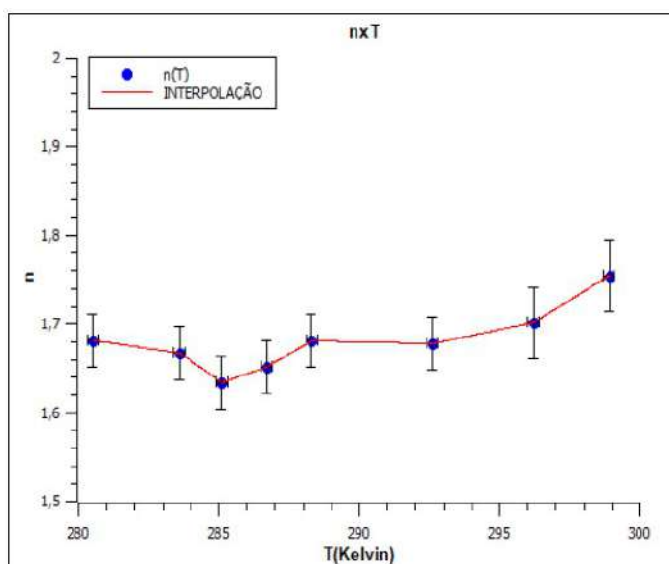


Figura 24. Ajuste das curvas $V \times I$ para as temperaturas 298,89K, 296,15K, 292,58K, 288,34K, 286,67K, 285,14K, 283,65K e 280,54K, identificadas em cada curva.

Tabela 1: Dados para determinação da curva $n \times T$

B	T(Kelvin)	n
22,1 (5)	298,9 (2)	1,75 (4)
23,0 (5)	296,2 (2)	1,70 (4)
23,6 (4)	292,6 (2)	1,68 (3)
23,9 (4)	288,3 (2)	1,68 (3)
24,5 (4)	286,7 (2)	1,65 (3)
24,9 (5)	285,1 (2)	1,63 (3)
24,5 (4)	283,6 (2)	1,67 (3)
24,6 (4)	280,5 (2)	1,68 (3)

A Figura 25, apresenta a curva $n(T)$ obtida para as 8 temperaturas diferentes.

Figura 25. Gráfico da curva $n \times T$.

Visto que a curva de teste do kit foi a realizada a uma temperatura estável $T=290,14\text{K}$, realizando interpolação na curva $n(T)$, obteve-se para o diodo medido: $n(290,14\text{K})=1,679921049918$. Usando o modelo da expressão (77), com $n=1,679921049918$ (valor interpolado), para o ajuste com QTIPLLOT da curva I-V de teste do kit, obtida a $290,14\text{K}$, obteve-se o resultado da Figura 26.

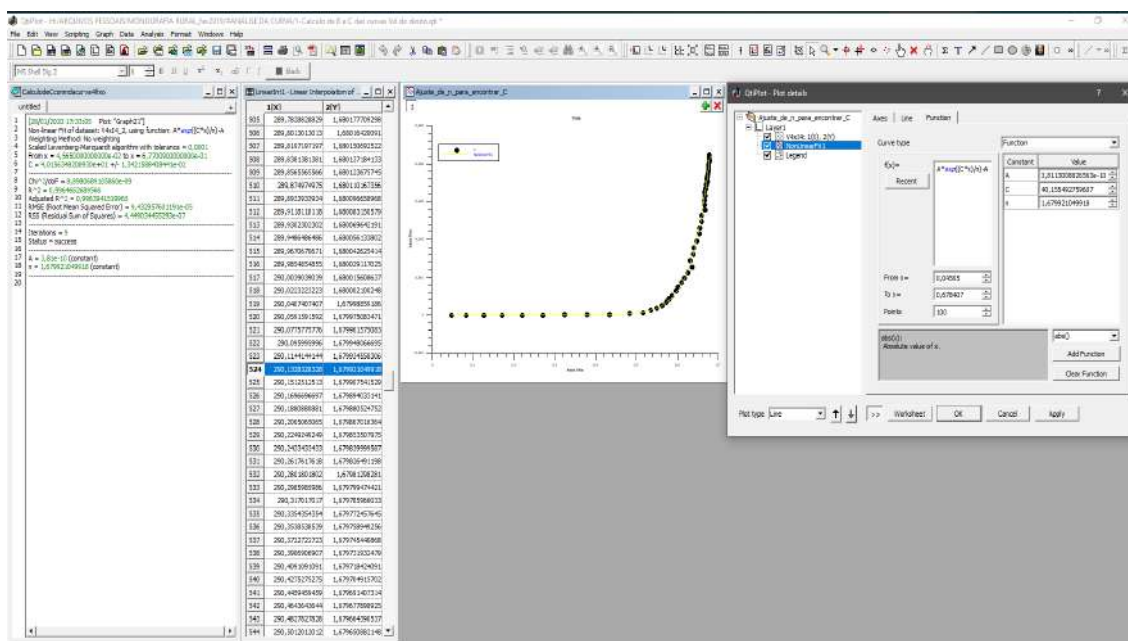


Figura 26: Janela com o ajuste computacional da dependência $I(V)$ da curva de teste a 290,14 K, usando a expressão $Y(X) = A * \exp(C * X/n) - A$, com $n=1,679921049918$ e $C = 40,156$ C/J.

Com a expressão para ajuste $Y(X) = A * \exp(C * X/n) - A$, após encontrar o valor $C = 40,16(1)$ C/J, foi possível obter a razão q/K com $n=1,679921049918$ e $T=290,14$ K:

$$q/K = 11650(9) \text{ CK/J.}$$

Desta forma, para a curva de teste, determinou-se o valor da constante de Boltzmann usando o valor exato da carga fundamental dada pelo NIST (NIST-e, 2019); e o valor da carga fundamental, usando o valor exato da constante de Boltzmann dado pelo NIST (NIST-k, 2019). Da mesma forma podem-se calcular os erros percentuais relativos na determinação destas constantes.

Os resultados encontrados estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 2 : Determinação da constante Boltzmann,

usando $q = e = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$.

K (medido)	$\Delta\%(K)$
$1,375(1) \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	0,40%
<i>Valor esperado: $K = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$</i>	

Tabela 3: Determinação da carga fundamental,

usando $K = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$.

e (medido)	$\Delta\%(e)$
$1,608 (1) \times 10^{-19} \text{ C}$	0,34%
<i>Valor esperado: $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ C}$</i>	

Desta forma, com os procedimentos adotados para obter o índice de idealidade em função da temperatura, curva $n(T)$, este kit pôde ser usado para determinar as constantes fundamentais carga fundamental e constante de Boltzann com erros percentuais relativos de 0,34% e 0,40% respectivamente.

4.4. Proposta de Roteiro Interativo (atividade)

Apresentamos a seguir um roteiro para uso do kit em nível superior, que pressupõe que o estudante já teve aulas sobre modelo de bandas de energia, semicondutores e conhecimentos básicos de medições elétricas e de informática. É um roteiro voltado para a disciplina usualmente denominada Física Experimental IV, cuja aplicação requer que o Professor ou técnico de

laboratório tenha previamente determinado a curva $n(T)$ para o diodo a ser utilizada, conforme discutido anteriormente nesta Monografia. Para as disciplinas de ciclo profissional, identificadas usualmente por “Física Moderna Experimental” ou “Estrutura da Matéria”, pode ser acrescentada como atividade para os estudantes a obtenção da curva $n(T)$, conforme discutido anteriormente nesta monografia.

Título do Experimento

Determinação de Constantes Fundamentais por meio do comportamento físico de um diodo.

Denis Paulo Neto

Objetivos.

Usando o comportamento físico de um diodo, determinar o valor da constante de Boltzmann usando o valor exato da carga fundamental; e o valor da carga fundamental, usando o valor exato da constante de Boltzmann dado pelo NIST (NIST-k, 2019).

Referencial teórico.

Um diodo é um dispositivo eletrônico de amplo uso, caracterizado por apresentar uma alta condutividade elétrica quando polarizado em um sentido, dito então sentido direto, e uma baixíssima condutividade, quando polarizado na direção reversa (CAPUANO, 1997). É possível modelar um diodo como sendo uma estrutura semicondutora denominada “junção p-n”, que consiste em

um semicondutor que, de um de seus terminais até certa extensão, tem como portadores majoritários de carga os “buracos” ou “lacunas” (parte p), e que, no restante de sua extensão, até outro terminal, tem como portadores majoritários de carga os elétrons “livres” (parte n). A figura 27 a seguir ilustra este modelo.

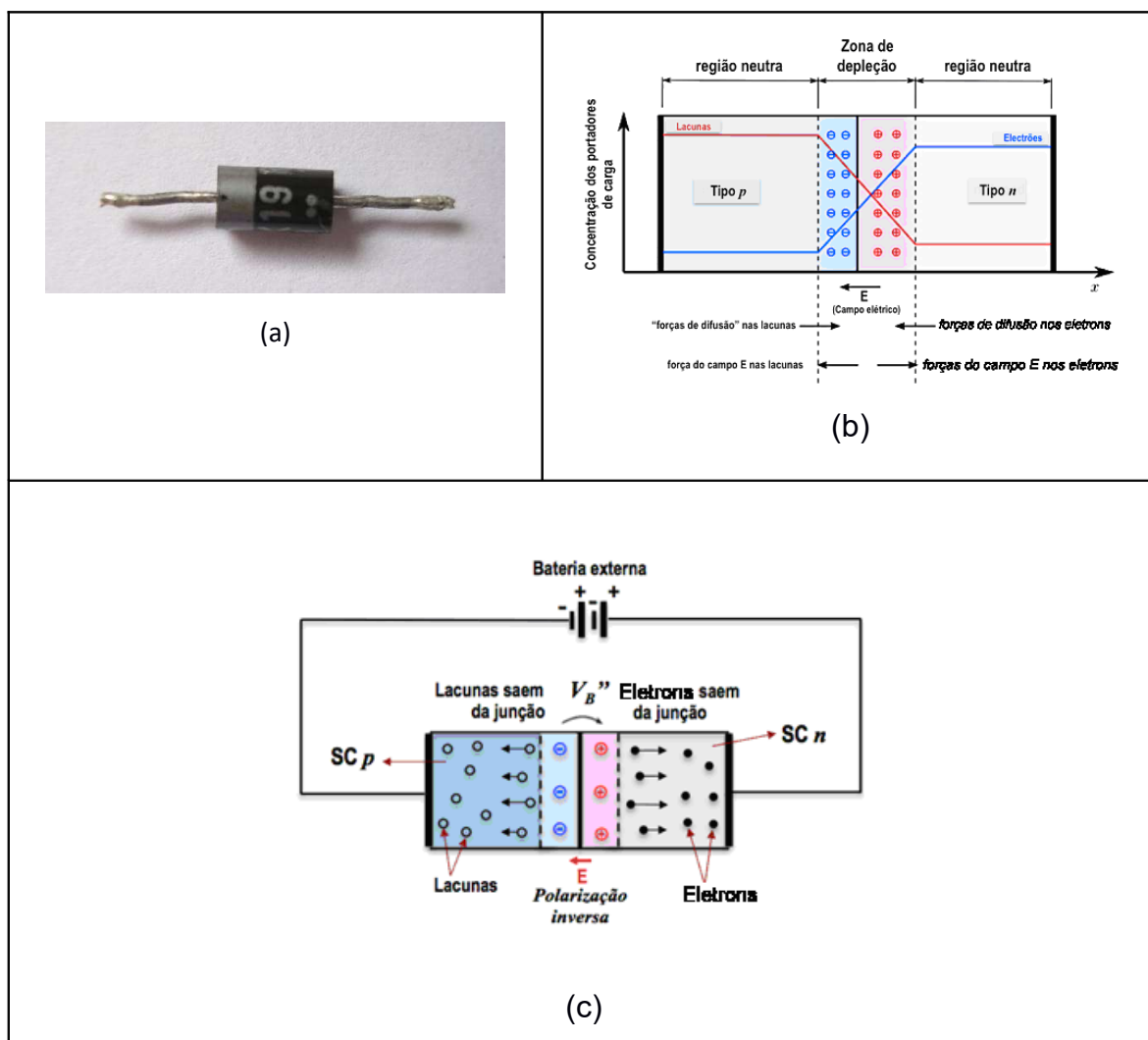


Figura 27. (a) Foto de um diodo. Fonte: (WIKIMEDIA COMMONS, 2019); (b) Diagrama esquemático de uma junção PN; (c) O diodo como uma junção PN. Fonte: (CONCEIÇÃO, 2013).

A curva característica de um diodo é dada na Figura 28 a seguir, e pode ser modelada pela equação a seguir, na qual I e V são, respectivamente, a

corrente e a atenção simultâneas no diodo, T é sua temperatura, e I_s é a chamada “corrente de saturação”.

$$I = I_s \left(e^{qV/nkT} - 1 \right) \quad (71)$$

Na expressão acima, temos ainda que “ q ” é a carga fundamental e “ k ” é a constante de Boltzmann. Seus valores exatos atuais são (NIST-e, 2019; NIST-k, 2019):

- Carga fundamental: $e = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- Constante de Boltzmann: $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$.

Por fim, na equação do diodo existe um “fator de idealidade” (SEABRA, 2011), que representamos por “ n ”, sendo $1 \leq n \leq 2$.

Desta forma, se obtemos experimentalmente a curva $I(V)$ de um diodo, para uma dada temperatura e se conhecemos também seu fator de idealidade em tal temperatura, podemos determinar a razão q/k . Conhecida uma das constantes, podemos determinar a outra.

Para o diodo a ser usado, a curva $n(T)$ é dada a seguir.

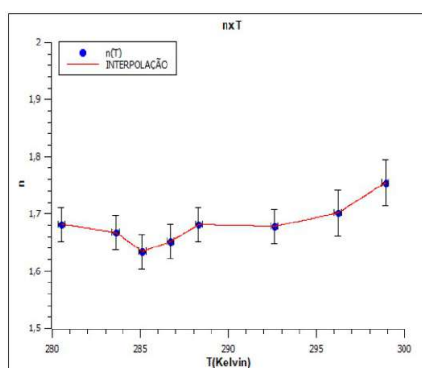


Figura 28. Curva $n \times T$ do diodo usado neste Roteiro.

Procedimentos Experimentais

Acompanhe com seu professor a discussão com seus colegas as características construtivas do módulo experimental a ser usado. Após haver se familiarizado com as partes constitutivas e suas funções, o experimento seguirá os seguintes passos, para a aquisição de 1 curva $V \times I$ para um diodo, a uma dada temperatura.

- 1- Colocar o sensor de temperatura LM35 e amostra sobre a placa Peltier, em seguida prendendo os dois com a tampa de isopor preparada para o travamento e isolamento térmico;

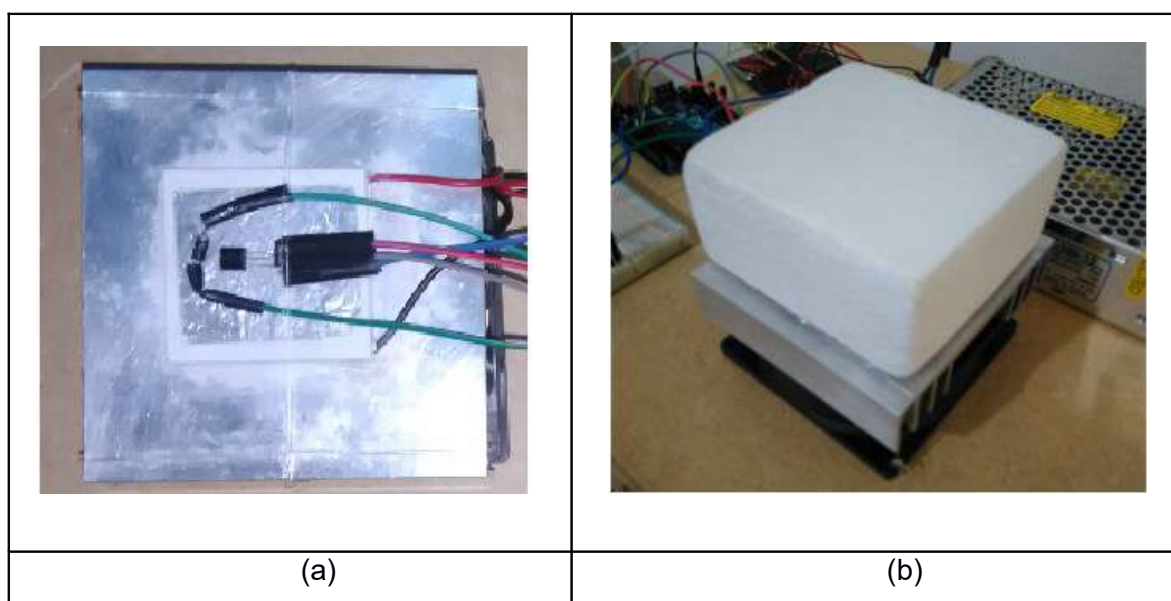


Figura 29: Fotos (a) da montagem da amostra sobre a placa Peltier; (b) do travamento da amostra sobre a placa.

- 2- Ligar a placa Arduino à fonte de 9Vcc e ao computador através da porta USB.
- 3- Ligar a fonte chaveada que alimenta a placa Peltier.
- 4- Abrir a IDE, checar qual a porta de comunicação na qual está conectada a placa Arduino e carregar o sketch. Se o Arduino já estiver com o sketch carregado,

apenas cheque em qual porta o Arduino está conectado, para que a mesma porta seja configurada no Excel.

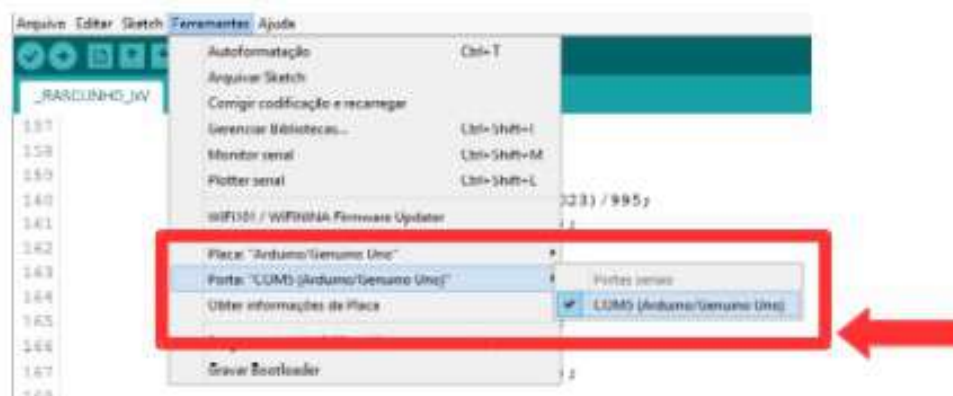


Figura 30: Configuração da comunicação serial na IDE.

5- Abra o arquivo Excel contendo o programa PLXDAQ Versão2, caso contrário pressione simultaneamente "Ctrl+Q" no teclado para abri-la.

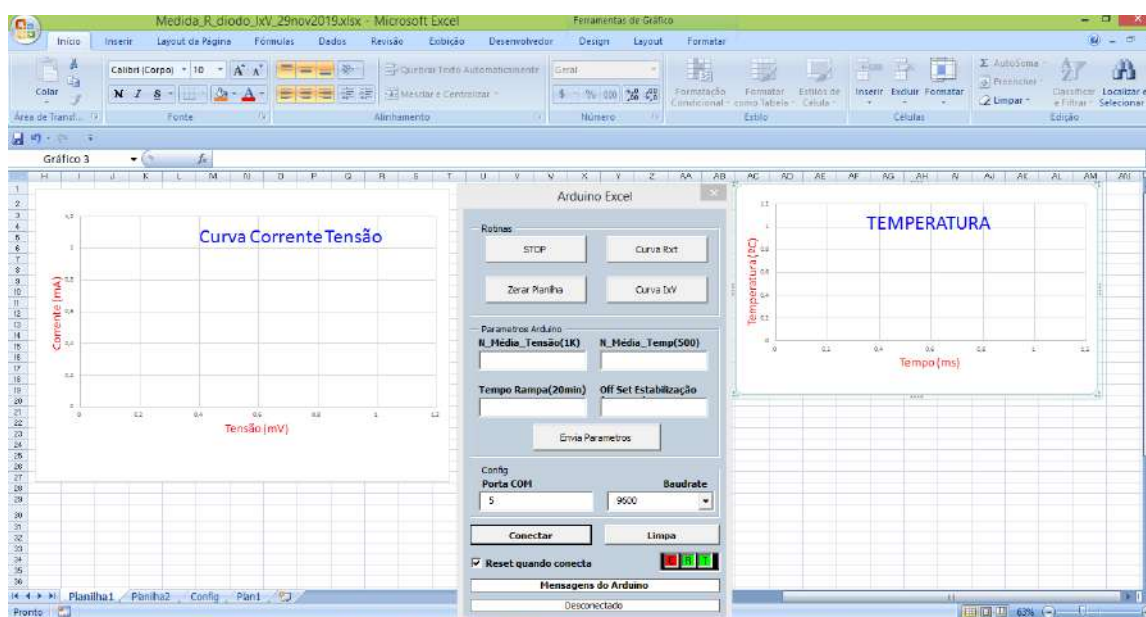


Figura 31: Interface PLXDAQ para curva I-V do diodo.

- 6– Na janela do PLXDAQ configure a porta de comunicação entre o Excel e o Arduino utilizando o mesmo endereço configurado no IDE do Arduino. Configure também a velocidade de comunicação com a mesma velocidade configurada no sketch do Arduino.

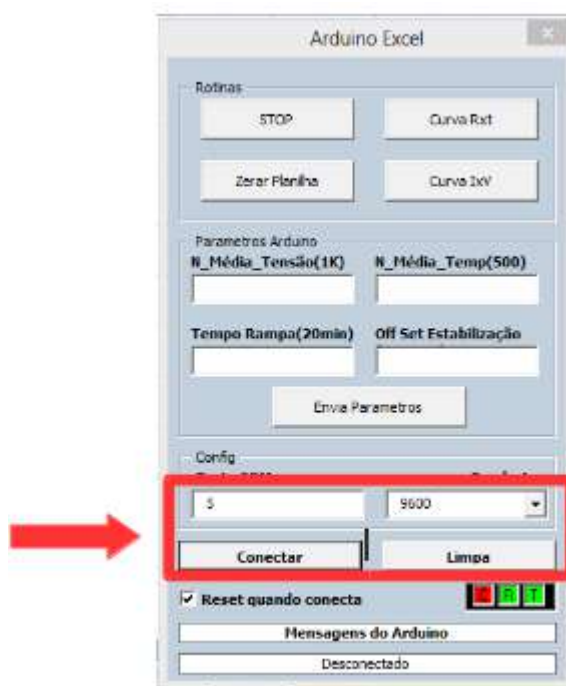


Figura 32: Porta e velocidade de comunicação

- 7– Clique no botão “CONECTAR”, localizado na interface do PLXDAQ Versão2 para iniciar a comunicação serial entre o Excel e o Arduino. Neste momento o Excel começará a receber os dados de leitura da temperatura vindos do Arduino.

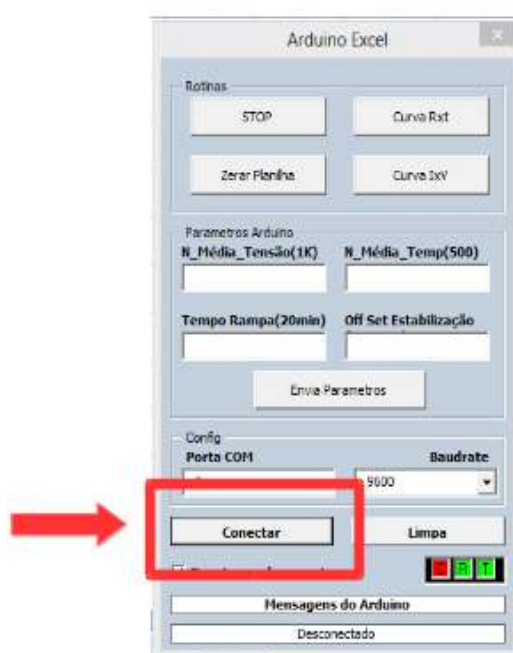


Figura 33: Botão conectar

- 8– Configure os parâmetros: “N_Média_Tensão(1K)”, N_Média_Temp(500), “Off Set Estabilização(4000ms)” e o “Tempo_Rampa(20min)” e clique no botão “ENVIAR PARÂMETROS” localizado na interface do PLXDAQ Versão 2.



Figura 34. Configuração de parâmetros

OBS: Descrição dos parâmetros:

- *N_Média_Tensão(1K): Este parâmetro altera o número de pontos usados para a média feita pelo Arduino nas tensões registradas pelas entradas analógicas. Esta média é necessária para suavizar o sinal lido pelo Arduino, uma vez que o mesmo usa uma referência interna de 5Vcc, que sofre flutuação, transferindo assim a mesma flutuação para a tensão lida pela entrada analógica. Possui um valor de default programado de 1000 pontos.*
 - *N_Média_Temp(500): Este parâmetro altera o número de pontos usados para a média feita pelo Arduino na temperatura registrada pela entrada analógicas. Esta média é necessária para suavizar o ruído gerado na leitura devido à sensibilidade do sensor LM35. Possui um valor de default programado de 500 pontos.*
 - *Off Set Estabilização(4000ms): Este parâmetro ajusta o intervalo de tempo programado para identificar o equilíbrio da temperatura, dentro do intervalo de temperatura -0,03°C a 0,07°C, que foi verificado experimentalmente para a construção da rampa de temperatura, identificando assim o momento em que deve ser feita a aquisição dos dados de corrente e tensão. O tempo é setado em milissegundos e possui um valor de default programado de 4000 milissegundos.*
 - *Tempo_Rampa(20min): Este parâmetro ajusta o tempo de estouro da rampa de temperatura, de forma que independente da estabilização da temperatura, no tempo programado, o programa faz a aquisição dos dados de corrente e tensão. O tempo é setado em milissegundos e possui um valor de default programado de 1200.000 milissegundos (20 minutos).*
- 9– Clique no botão “CURVA IxV”. Neste momento o Arduino começará a checar se a temperatura se encontra no intervalo de equilíbrio de -0,03°C a 0,07°C, setado no sketch, e se sim irá enviar os dados de tensão e corrente para o Excel.
- 10– Aguarde a medida terminar e clique em “DESCONECTAR”.



(a)

(b)

Figura 35. Botões para (a) inicializar e (b) desconectar uma medida

11–Consultando a curva do índice de idealidade $n(T)$ deste diodo, obter o valor do índice de idealidade da curva $I(V)$.

12–Ajustar uma curva aos dados medidos, utilizando no QTIPLLOT a expressão da equação do diodo $I(V)$. Avaliem, em discussão no grupo, como nomear os parâmetros, mas sempre considerando a temperatura da medida e o correspondente valor $n(T)$.

Questões:

- 1) Utilizando o valor convencional (exato) $k = 1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, qual é o valor medido da carga fundamental q ?
- 2) O quanto o valor medido para q diverge (em diferença percentual relativa) do valor convencional (exato) $e = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$?
- 3) Utilizando o valor convencional (exato) para a carga fundamental, qual é o valor medido da constante de Boltzmann K ?

- 4) O quanto o valor medido K , diverge (em diferença percentual relativa) do valor convencional (exato) $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$?
-

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS

Neste capítulo apresentamos as conclusões advindas da pesquisa realizada e as propostas de continuidade identificadas.

Foi realizado um estudo sobre a modelagem de um diodo como uma junção P-N, e um texto didático foi produzido e apresentado no Capítulo 2 desta monografia.

Foi realizado um estudo sobre a termodinâmica fora do equilíbrio, porém em regime linear, e um texto didático introdutório foi produzido e apresentado no Apêndice A desta monografia, com foco nos efeitos termoelétricos Seebeck e Peltier.

Foi realizado um estudo sobre a plataforma Arduino e como poderíamos utilizá-la para medição da curva I-V de um dispositivo de dois terminais. Diversas referências foram encontradas em mídia física e na internet.

Foi projetado e montado um hardware para medição de curvas I-V em dispositivos eletrônicos de dois terminais, com controle eletrônico de temperatura, usando materiais disponíveis comercialmente no Brasil e com custo relativamente baixo.

Foi produzido um código de controle (SKETCH) para o Arduino Uno e foi aprimorado o uso de uma plataforma freeware de aquisição de dados, a PLXDAQ Versão 2, que trata de uma macro de um software comercial (MS-EXCEL).

Foi testada e comprovada a funcionalidade do módulo para determinação da carga elétrica fundamental e da constante de Boltzman, com erros inferiores a 0,4 %.

Depois do trabalho experimental ter sido concluído com êxito, se propôs um Roteiro de atividade experimental para determinação destas constantes fundamentais, que pode ser utilizado em cursos de nível superior, tanto em aulas práticas de disciplinas de Ciclo Básico, como de Ciclo Profissional, em Física, Engenharias de materiais, eletrônica, e instrumentação. Também pode ser usado em cursos de formação de professores.

O sistema permite interação intensa entre estudantes e professor, facilitando o processo de ensino e aprendizagem.

O sistema de medida projetado, construído e testado é promissor e permite ampla continuidade na pesquisa. Propomos como continuidade, por exemplo, a integração do sistema de controle todo em um único *shield* apropriado para ser conectado direto ao Arduino, sem fios; o aprimoramento para uso com módulo bluetooth para aquisição de dados sem fio; aprimoramento da macro utilizada, para uso em planilha(s) eletrônica(s) freeware(s); teste do kit com LEDs, NTCs e PTCs; aprimoramento dos códigos e do módulo para usar célula Peltier também para caracterização I-V do material em condição de aquecimento.

Referências Bibliográficas

BARBOSA, Ademarlaudo F. **Eletrônica Analógica Essencial: Para Instrumentação Científica – 1ª Edição.** São Paulo, Livraria da Física.2010.

BLOCH, Sylvan Charles. **Excel para Engenheiros e Cientistas - 2a. Edição.** Rio de Janeiro, LTC. 2004.

CAPUANO, Francisco Gabriel, MARINO, Maria Aparecida Mendes. **Laboratório de eletricidade e eletrônica.** São Paulo: Érica, 1997.

CONCEIÇÃO, Betânia Tavares Cecilio da Projeto, **Montagem e Teste Operacional de Módulo Experimental Instrucional Interativo para Estudo Comparativo da Geração Fotovoltaica de Energia Elétrica.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Física). Instituto de Ciências Exatas, UFRRJ, Seropédica, 2013.

CORREIA, Evandro de Souza; DANTAS, Jeânderson de Melo; ANDRADE, José Elisandro de. “Considerações acerca dos conceitos de condutores, isolantes e semicondutores nos livros de Ensino Médio sob um olhar de teoria de bandas de energia” Scientia Plena, v.13. No. 1, p.(2017)

EL-GHANAM, S.M., ABD EL-MAKSOOD, A.M., SOLIMAN, F.A.S.. **Modeling the Dependence of Power Diode on Temperature and Radiation.**

International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), v.6, No.2, Junho de 2015, pp. 216-224.

EVANS M.; NOBLE J.; HOCHENBAUM J. **Arduino em Ação**. São Paulo: Novatec, 2013.

FERNANDES, Jainne Daniele F. S., BRAZ, Alailson de Freitas, MACHADO, Ludmila Sayonara S. X., PIMENTEL, Edfranklin de Souza, FARIAS, Aécio Vinícius Amorim, CAMPOS, Antonio Luiz Pereira de Siqueira. **Refrigeração utilizando pastilhas de efeito peltier**. HOLOS, Ano 26, v.2, 2010, p. 25-31.
Disponível online em: <https://www.researchgate.net/publication/277573278_REFRIGERACAO_UTILIZANDO_PASTILHAS_DE_EFEITO_PELTIER>. Acesso em: Maio de 2018.

GASPAR, Alberto. Atividades experimentais no Ensino de Física. 1ª ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

GOMES, Angelo M. **Tutorial Qtiplot** [online]. Disponível em: <https://www.if.ufrj.br/~amgomes/tutorialqtiplot-pag1.html>. Acesso em: Junho de 2019.

KONDEPUDI, Dilip. **Introduction to Modern Thermodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 2008.

ŁUKASIAK, Lidia, JAKUBOWSKI, Andrzej. **History of Semiconductors**. Journal of Telecommunications and Information Technology, v.1, 2010, p.3-9. Disponível online em: < http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BATA-0008-0020/c/httpwww_itl_waw_plczasopismajtit201013.pdf>. Acesso em: Maio de 2019.

MELLO, Hilton Andradde de. DE BIASI, Ronaldo Sérgio. **Introdução à Física dos Semicondutores**. São Paulo: Edgard Blücher, Brasília:INL, 1975. 136p.

MONK, Simon. **Programação com Arduino: começando com sketches**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MOREIRA, Marco Antônio. **Teorias de aprendizagem**. 2ª ed. São Paulo: EPU,1999.

MOURA, Paulo Roberto de, ALMEIDA, Danilo. **Refrigerador termoelétrico de peltier usado para estabilizar um feixe laser em experimentos didáticos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.36, n.1, 1308 (2014).

NIST-k. CODATA Value: Boltzmann constant [online]. Disponível em: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?k>. Acesso em: Outubro de 2019.

NIST-e. CODATA Value: elementary charge [online]. Disponível em: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e>. Acesso em: Outubro de 2019.

NUSSENZVEIG, Herch Moisés. **Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 437f.

OFICIENCIA. Curva Corrente Tensão com Arduino Excel [online]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Pn35UA01zR0>. Acesso: Março de 2019.

OLIVEIRA, C. L. V. ZANETTI, H.A.P. , **Arduino descomplicado: como elaborar projetos de eletrônica**. São Paulo: Érica, 2015.

PARALAX. PLX-DAQ [online]. Disponível em: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>. Acesso: Março de 2019.

PRIGOGINE, Ilya, KONDEPUDI, Dilip. **Termodinâmica: Dos Motores Térmicos às Estruturas Dissipativas**. Lisboa: Instituto Piaget, 2001.

QTIPLLOT. QtiPlot – Data Analysis and Scientific Visualization [online]. Disponível em: <http://www.qtiplot.com>. Acesso em: Outubro de 2019.

QUEIRÓS, Sílvio M, **Termodinâmica Moderna: Máquinas, Demónios e Nanossistemas**. 2015, 32f, Monografia. Centro Brasileiro de Pesquisas

Físicas, Rio de Janeiro, v.1, 2015, p. 1-30. Disponível em:
http://cbpf/publication_pdfs/137-469-2-PB.pdf.2018_04_09_11_30_05.pdf

QUEIROZ, Abraão Reis de, **Suporte ao desenvolvimento de sistemas de caracterização de fitas supercondutoras através da determinação da corrente crítica e do mapeamento de campo magnético aprisionado**. 2015, 71 f, Trabalho de Conclusão (Graduação em Bacharel em Matemática Aplicada e computacional). Instituto de Ciências Exatas, UFRRJ, Seropédica, 2015.

REZENDE, S.M., **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

SEABRA, Antonio Carlos. **Introdução a Eletrônica – PSI2223: Aula 4**. [online].Disponível em:http://www.lsi.usp.br/~acseabra/grad/222_files/Aula4%20Sedra42021_ch03c%20versao%20rede-8.pdf. Acesso em: Setembro de 2019.

SENNE, Edson Luiz França, **Primeiro Curso de Programação em C**. Florianópolis: Visual Books, 2009.

SILVA, Thalita Bruna do Nascimento, **Radiação ultravioleta: revisão bibliográfica e medição com arduino**. 2018, 106 f, Trabalho de Conclusão (Graduação em Licenciatura em Física), Instituto de Ciências Exatas, UFRRJ, Seropédica, 2018.

TI. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors [online]. Disponível em:<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. Acesso: Março de 2019.

TIPLER, Paul A; MOSCA, Gene. **Física Moderna: Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria**. 5 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 265p.

VIDA DE SILÍCIO. **LM35 - Medindo temperatura com Arduino** [online]. Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/lm35-medindo-temperatura-com-arduino/>. Acesso em: Outubro de 2019.

VUOLO, José Henrique. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 21, n. 3, p.350-358,1999.

WIKIMEDIA COMMONS. **File:Diodo.jpg-Wikimedia Commons** [online]. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diodo.jpg>. Acesso em: Outubro de 2019.

WIKIPÉDIA. **Efeito Peltier – Wikipédia, a enciclopédia livre** [online]. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Peltier. Acesso em: Dezembro de 2019.

Apêndice A

A.1.Efeitos Termoelétricos

A.1.1Termodinâmica fora do Equilíbrio: caso linear

No Formalismo da Termodinâmica Fora do Equilíbrio, a não existência de fluxos termodinâmicos em um sistema implica que, suas forças (generalizadas) geradoras são iguais a zero, conseqüentemente, o sistema deve encontrar-se em equilíbrio (PRIGOGINE, 1999; KONDEPUDI, 2008).

Se observarmos um sistema termodinâmico fora do equilíbrio, e se sua mudança no tempo for muito lenta, podemos então observar esse sistema de maneira local, de forma que ele se comportará como se estivesse em equilíbrio local (QUEIRÓS, 2015). Podemos assumir então que os fluxos sejam funções analíticas das forças generalizadas, e, por estarem localmente em equilíbrio eles são funções lineares delas (KONDEPUDI, 2008; QUEIRÓS, 2015). Desta forma fica possível a seguinte relação (81):

$$J_k = \sum_j L_{kj} F_j \quad (81)$$

Em (81), os L_{kj} são os coeficientes de Onsager e as F_j são as Forças generalizadas (PRIGOGINE, 1999).

Kondepudi chama a atenção que havendo como força generalizada o gradiente de $1/T$, levando-se em conta o que foi exposto acima, não ocorreria somente fluxo de calor, mas também de matéria e de corrente elétrica.

Portanto, um efeito termoelétrico é o que não produz somente um fluxo de calor, mas também um fluxo de corrente. Este efeito é caracterizado como um efeito cruzado (KONDEPUDI, 2008).

O caminho para uma teoria desse efeito cruzado é relacionar a produção de entropia e as leis fenomenológicas, levando em conta a necessidade de se observar a linearidade para tais leis (KONDEPUDI, 2008).

Segundo Kondepudi a Segunda Lei da Termodinâmica deve ser considerada como uma lei local (KONDEPUDI, 2008). De fato, se dividirmos um sistema em r partes a entropia produzida pelo sistema será:

$$d_i S = d_i S^1 + d_i S^2 + \dots + d_i S^r \geq 0 \quad (82)$$

Se pegarmos a k -ésima parte teremos:

$$d_i S^k \geq 0 \quad (83)$$

Desta forma, a Segunda Lei da Termodinâmica, como declarada em (83), não requer que o sistema seja isolado, sendo válida para todos os sistemas observando-se as condições de contorno (KONDEPUDI, 2008).

Para uma densidade de entropia $S(x,t)$ definimos a produção de entropia local

como:
$$\sigma(x,t) \equiv \frac{d_i S}{dt} \quad (84)$$

e a produção de entropia total no sistema como

$$\frac{d_i S}{dt} = \int_V \sigma(\mathbf{x},t) dV \quad (85)$$

Usando as leis de conservação para reescrever a equação (84) em termos de forças e fluxos termodinâmicos temos

$$\sigma = \sum_k F_k J_k \quad (86)$$

Observando as condições de linearidade para as leis fenomenológicas temos a seguinte forma quadrática para a entropia:

$$\sigma = \sum_{jk} L_{jk} F_j F_k > 0 \quad (87)$$

Por (87), temos que os L_{kk} tem que ser positivo e os L_{jk} ($j \neq k$) pode ser negativo e positivo (PRIGOGINE, 1999).

Verifica-se que os L_{jk} obedecem as relações recíprocas de Onsager, de forma que os $L_{jk} = L_{kj}$, o que implica equivalência dos efeitos do fluxo de calor na geração de corrente e do fluxo de corrente na geração de calor (tradução nossa) (PRIGOGINE, 1999).

Se tomarmos um fio condutor, sendo J_q o fluxo de calor e J_e o fluxo de elétrons, o fluxo de corrente elétrica ao longo do eixo x , a produção de entropia por unidade de volume (tendo em vista de se tratar de dois processos irreversíveis e observando a linearidade das leis fenomenológicas) se relacionam por (88), (89) e (90), sendo E campo elétrico (PRIGOGINE, 1999)

$$\sigma = J_q \frac{\partial}{\partial x} (1/T) + \frac{J_e E}{T} \quad (88)$$

$$J_q = L_{qq} \frac{\partial}{\partial x} (1/T) + L_{qe} \frac{E}{T} \quad (89)$$

$$J_e = L_{ee} \frac{E}{T} + L_{eq} \frac{\partial}{\partial x} (1/T) \quad (90)$$

Sendo a força termodinâmica o gradiente de $1/T$, ao derivarmos teremos

$-\frac{1}{T^2} \frac{\partial}{\partial x} x(T)$ e substituindo nas relações acima:

$$J_q = -\frac{1}{T^2} L_{qq} \frac{\partial}{\partial x} (T) + L_{qe} \frac{E}{T} \quad (91)$$

$$J_e = L_{ee} \frac{E}{T} - \frac{1}{T^2} L_{eq} \frac{\partial}{\partial x} (T) \quad (92)$$

$$J_q = -\kappa \frac{\partial}{\partial x} T(x) \quad (93)$$

A lei de Fourier dada em (93) para a condução de calor implica que, havendo um gradiente de temperatura, na direção desse gradiente haverá um fluxo de calor que atravessará o condutor. Então uma maneira de se caracterizar este fluxo é através de sua condutividade térmica κ , para isso segundo Kondepudi observa-se o fato de que a lei de Fourier é válida quando o campo elétrico tem intensidade nula ($E=0$), possibilitando assim uma comparação entre o fluxo de calor em um fenômeno termoelétrico e a lei de Fourier para a condução de calor (KONDEPUDI, 2008). Então quando $E=0$ temos:

$$J_q = -\frac{1}{T^2} L_{qq} \frac{\partial}{\partial x} (T) \quad (94)$$

Logo:

$$\kappa = \frac{L_{qq}}{T^2} \quad (95)$$

Segundo Kondepudi, o κ apresentado na lei de Fourier é uma constante, que é determinada pelas características do meio material por onde o fluxo de calor flui, isto implica que o termo L_{qq} / T^2 tem que ser constante. Então, para que isso seja verdade, tanto L_{qq} , quanto T^2 devem ser considerados como constantes (KONDEPUDI, 2008). Como $T(x)$ é função da posição, em uma situação real ela varia com a mesma. Portanto, uma condição de quase equilíbrio é desejada e para isto mudanças em $T(x)$ devem ser muito pequenas quando comparadas com $T_{\text{médio}}$, de maneira que $T^2(x) \approx T_{\text{médio}}^2$ e portando

$$\frac{(T(x) - T_{\text{médio}})}{T_{\text{médio}}} \ll 1 \text{ ao longo de todo comprimento (KONDEPUDI, 2008).}$$

De acordo com Prigogine e Kondepudi, pode-se verificar a existência de uma relação entre a resistência elétrica R e L_{ee} . Para isso devemos observar a (83), no momento em que $\frac{\partial}{\partial x}(T) = 0$. Assim verifica-se que o fluxo de corrente não depende da posição (PRIGOGINE, 1999), logo temos:

$$J_e = L_{ee} \frac{E}{T} \quad (96)$$

Como a tensão elétrica é $\int_0^l E dx = V$, se integramos (87) em ambos os

lados teremos que

$$\int_0^l J_e dx = \frac{L_{ee}}{T} \int_0^l E dx \quad (97)$$

Logo:

$$L_{ee} = \frac{T}{R/l} = \frac{T}{r} \quad (98)$$

A.1.2. Termodinâmica do Efeito Seebeck

O efeito Seebeck havia sido observado experimentalmente pela primeira vez em 1821, quando Thomas Johann Seebeck estudava os efeitos termoelétricos (WIKIPÉDIA, 2019). Ele verificou que quando dois materiais, sejam eles metais ou semicondutores, são conectados por junções, e estas junções estão submetidas à temperaturas diferentes, nestas condições estes materiais tendem a produzir uma diferença de potencial elétrico em função da diferença de temperatura em que se encontram (WIKIPÉDIA, 2019). Este é o efeito Seebeck.

Segundo Prigogine e Kondepudi, uma diferença de potencial elétrico, da ordem de $10^{-5} V/K$ é verificada quando há um gradiente de temperatura (tradução nossa). (PRIGOGINE, 1999).

Observa-se que a diferença de potencial elétrico depende apenas da temperatura para o caso quando o gradiente de temperatura é linear, de forma que a diferença de potencial fica diretamente proporcional à temperatura (PRIGOGINE, 1999). Portanto para encontrarmos uma relação entre a diferença de temperatura e a diferença de potencial que nos conduza ao efeito Seebeck é necessário observarmos que havia apenas a geração do fluxo de calor, de forma que , usando a equação (83) e fazendo $J_e = 0$ teremos:

$$0 = L_{ee} \frac{E}{T} - \frac{1}{T^2} L_{eq} \frac{\partial}{\partial x} (T) \quad (99)$$

Multiplicando os dois membros da equação (89) por T^2 , temos:

$$L_{ee}ET - L_{eq}\frac{\partial}{\partial x}(T) = 0 \quad (100)$$

integrando os dois lados de (100), temos

$$L_{ee}\int_0^l ETdx - L_{eq}\int_0^l \frac{\partial}{\partial x}(T)dx = 0 \quad (101)$$

Como temos que $\frac{\partial}{\partial x}(T)dx = \frac{dT}{dx}dx = dT$, então a integral (101) fica:

$$L_{ee}\int_0^l ETdx - L_{eq}\int_{T_0}^{T_1} dT = 0 \quad (102)$$

Conforme foi apresentado anteriormente, a Lei de Fourier implica que

$T^2(x) \approx T_{\text{médio}}^2$, para o caso do efeito termoelétrico, logo $T(x) \approx T_{\text{médio}}$ e portanto

$T \approx \text{constante}$, e desta forma teremos:

$$L_{ee}T\int_0^l Edx - L_{eq}\int_{T_0}^{T_1} dT = 0 \Rightarrow -L_{ee}T\Delta\varphi - L_{eq}\Delta T = 0 \quad (103)$$

Daí, temos:

$$\frac{L_{eq}}{L_{ee}} = -T\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta T}\right)_{J_e=0} \quad (104)$$

Prigogine e Kondepudi identificam $\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta T}\right)_{J_e=0}$ como um potencial termodinâmico (PRIGOGINE, 1999).

Pode-se notar também que L_{eq} / L_{ee} agora exprime os coeficientes em termos de grandezas mensuráveis (PRIGOGINE, 1999).

A.1.1. Termodinâmica do Efeito Peltier

Treze anos após a observação do efeito Seebeck, em 1834, Jean Charles Athanase Peltier observa pela primeira vez o efeito Peltier. Ele observou que, ao contrário do efeito Seebeck, quando introduzidas pequenas correntes elétricas em um termopar de bismuto-antimônio havia geração de efeitos termoelétricos no mesmo. Desta forma, quando em um circuito fechado, se gera na junção dos condutores ou semicondutores um gradiente de temperatura quando este circuito é submetido à uma diferença de potencial elétrico (WIKIPÉDIA, 2019).

Segundo (PRIGOGINE, 1999), no efeito Peltier as junções estão em temperatura constante, então, se $T = \text{constante}$ teremos:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (105)$$

Logo:

$$J_{qq} = L_{qe} \frac{E}{T} \quad (106)$$

$$J_e = L_{ee} \frac{E}{T} \quad (107)$$

A proporcionalidade Π entre o fluxo de calor e o fluxo de corrente pode ser mensurada.

Desta forma fazendo $\Pi = J_q/J_e$ é verdadeiro desde que $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ para as duas junções (PRIGOGINE, 1999).

Nestas condições:

$$\frac{J_q}{J_e} = \frac{L_{qe} \frac{E}{T}}{L_{ee} \frac{E}{T}} = \frac{L_{qe}}{L_{ee}} = \Pi \quad (108)$$

Lembrando (88): $L_{ee} = T/r$ então teremos:

$$L_{qe} = \Pi \frac{T}{r} \quad (109)$$

Como $L_{qe} = L_{eq}$, podemos mostrar que há uma relação entre os coeficientes fenomenológicos, o que é experimentalmente observado nos efeitos cruzados (PRIGOGINE, 1999).

Portanto explicitamos o surgimento do Efeito Peltier:

$$\frac{-\Delta\varphi}{\Delta T} = \frac{\Pi}{T} \quad (110)$$

Anexo: Folha de dados (datasheet) da Célula Peltier utilizada.



Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

**Thermoelectric
Cooler**

TEC1-12706

Performance Specifications

Hot Side Temperature (°C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (°C)	66	75
I _{max} (Amps)	6.4	6.4
V _{max} (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30



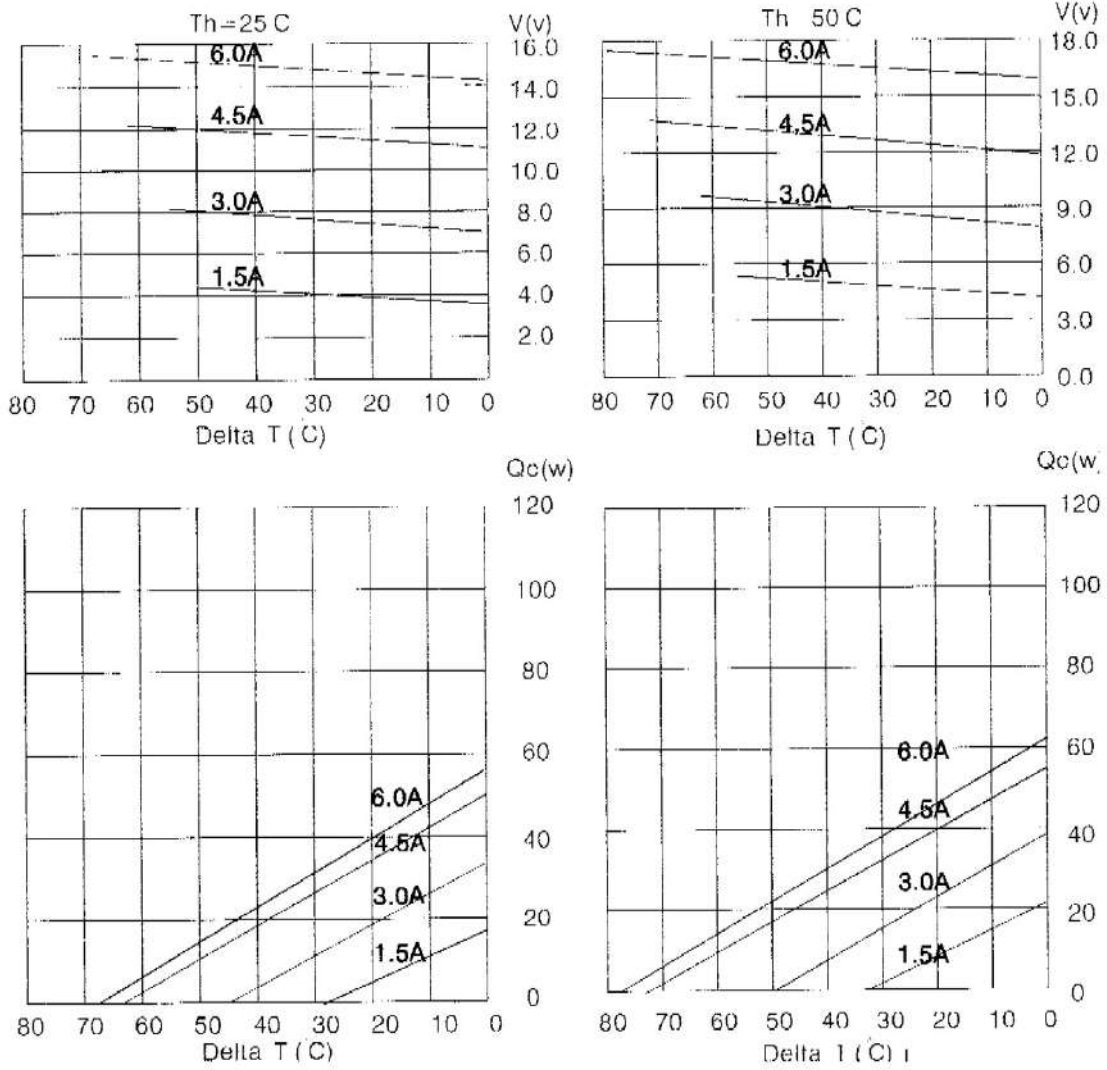


Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

Thermoelectric Cooler

TEC1-12706

Performance curves:

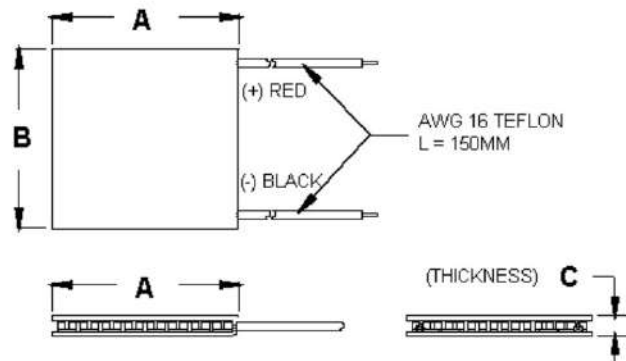




Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

Thermoelectric
Cooler

TEC1-12706



Ceramic Material: Alumina (Al_2O_3)
Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

Size table:

A	B	C			
40	40	3.9			

Operating Tips

- Max. Operating Temperature: 138°C
- Do not exceed I_{max} or V_{max} when operating module.
- Life expectancy: 200,000 hours
- Please consult HB for moisture protection options (sealing).
- Failure rate based on long time testings: 0.2%.

Anexo: Folha de dados (datasheet) do Sensor de temperatura utilizado.



November 2000

LM35 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 $60\ \mu\text{A}$ 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 pack-

aged 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-220 package.

Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°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 $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Typical Applications

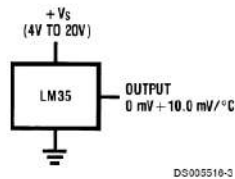
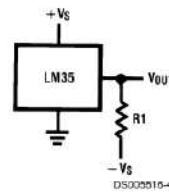


FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor
($+2^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$)

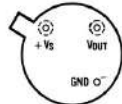


Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

Connection Diagrams

**TO-46
Metal Can Package***

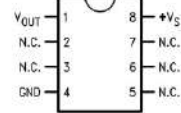


BOTTOM VIEW
DS000516-1

*Case is connected to negative pin (GND)

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

**SO-8
Small Outline Molded Package**



DS000516-21

N.C. = No Connection

Top View
Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

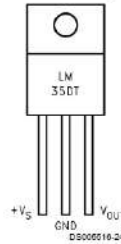
**TO-92
Plastic Package**



BOTTOM VIEW
DS000516-2

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

**TO-220
Plastic Package***



DS000516-24

*Tab is connected to the negative pin (GND)

Note: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP

Order Number LM35DT
See NS Package Number TA03F

Absolute Maximum Ratings (Note 10)		TO-92 and TO-220 Package, (Soldering, 10 seconds)		280°C	
If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.		SO Package (Note 12)		215°C	
Supply Voltage		+35V to -0.2V		220°C	
Output Voltage		+6V to -1.0V		2500V	
Output Current		10 mA		Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX}	
Storage Temp.:				(Note 2)	
TO-46 Package,		-60°C to +180°C		LM35, LM35A	
TO-92 Package,		-60°C to +150°C		-55°C to +150°C	
SO-8 Package,		-65°C to +150°C		LM35C, LM35CA	
TO-220 Package,		-65°C to +150°C		-40°C to +110°C	
Lead Temp.:				LM35D	
TO-46 Package, (Soldering, 10 seconds)		300°C		0°C to +100°C	

Electrical Characteristics								
(Notes 1, 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		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{MAX}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{MIN}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	$^\circ\text{C}$
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) $0 \leq I_L \leq 1$ 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
	$4V \leq V_S \leq 30V$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = +5V$	105		131	91		114	μA
	$V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		μA
	$V_S = +30V$	105.5		133	91.5		116	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		μA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		2.0	0.5		2.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
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	$T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

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	°C	
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	±0.5			±0.5	±1.5	°C	
	$T_A = T_{MAX}$	±0.8	±1.5		±0.8	±1.5	°C	
	$T_A = T_{MIN}$	±0.8		±1.5	±0.8	±2.0	°C	
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				±0.6	±1.5	°C	
	$T_A = T_{MAX}$				±0.9	±2.0	°C	
	$T_A = T_{MIN}$				±0.9	±2.0	°C	
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	±0.3		±0.5	±0.2		°C	
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.8, +10.2		+10.0		mV/°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	
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	±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	
	$4V \leq V_S \leq 30V$	±0.02		±0.2	±0.02		±0.2 mV/V	
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	80		56	80	µA	
	$V_S = +5V$	105		158	91		138 µA	
	$V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82	µA	
	$V_S = +30V$	105.5		161	91.5		141 µA	
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0	µA	
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		3.0	0.5		3.0 µA	
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.7	+0.39		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-220 package is 90°C/W junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

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 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 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.

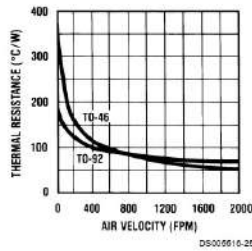
Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 kΩ 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.

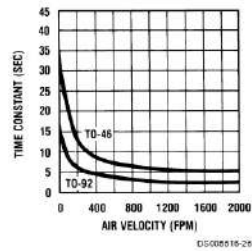
Typical Performance Characteristics

Thermal Resistance
Junction to Air



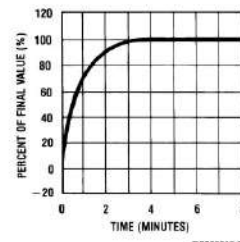
DS000516-25

Thermal Time Constant



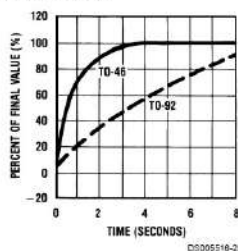
DS000516-26

Thermal Response
in Still Air



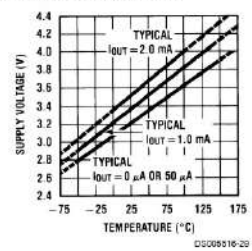
DS000516-27

Thermal Response in
Stirred Oil Bath



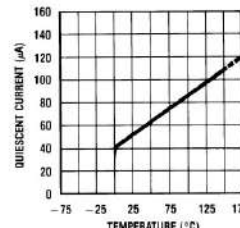
DS000516-28

Minimum Supply
Voltage vs. Temperature



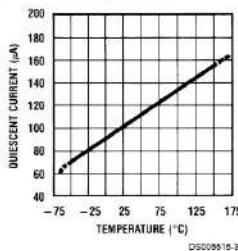
DS000516-29

Quiescent Current
vs. Temperature
(In Circuit of Figure 1.)



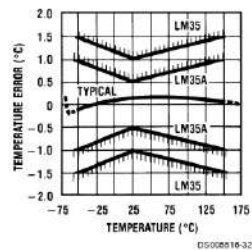
DS000516-30

Quiescent Current
vs. Temperature
(In Circuit of Figure 2.)



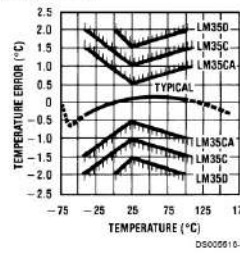
DS000516-31

Accuracy vs. Temperature
(Guaranteed)



DS000516-32

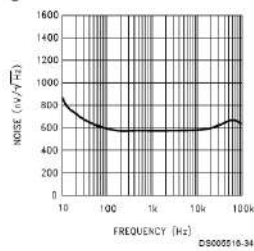
Accuracy vs. Temperature
(Guaranteed)



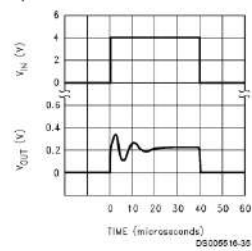
DS000516-33

Typical Performance Characteristics (Continued)

Noise Voltage



Start-Up Response



Applications

The LM35 can be applied easily in the same way as other integrated-circuit temperature sensors. It can be glued or cemented to a surface and its temperature will be within about 0.01°C of the surface temperature.

This presumes that the ambient air temperature is almost the same as the surface temperature; if the air temperature were much higher or lower than the surface temperature, the actual temperature of the LM35 die would be at an intermediate temperature between the surface temperature and the air temperature. This is especially true for the TO-92 plastic package, where the copper leads are the principal thermal path to carry heat into the device, so its temperature might be closer to the air temperature than to the surface temperature.

To minimize this problem, be sure that the wiring to the LM35, as it leaves the device, is held at the same temperature as the surface of interest. The easiest way to do this is to cover up these wires with a bead of epoxy which will insure that the leads and wires are all at the same temperature as the surface, and that the LM35 die's temperature will not be affected by the air temperature.

The TO-46 metal package can also be soldered to a metal surface or pipe without damage. Of course, in that case the V- terminal of the circuit will be grounded to that metal. Alternatively, the LM35 can be mounted inside a sealed-end metal tube, and can then be dipped into a bath or screwed into a threaded hole in a tank. As with any IC, the LM35 and accompanying wiring and circuits must be kept insulated and dry, to avoid leakage and corrosion. This is especially true if the circuit may operate at cold temperatures where condensation can occur. Printed-circuit coatings and varnishes such as Humiseal and epoxy paints or dips are often used to insure that moisture cannot corrode the LM35 or its connections.

These devices are sometimes soldered to a small light-weight heat fin, to decrease the thermal time constant and speed up the response in slowly-moving air. On the other hand, a small thermal mass may be added to the sensor, to give the steadiest reading despite small deviations in the air temperature.

Temperature Rise of LM35 Due To Self-heating (Thermal Resistance, θ_{JA})

	TO-46, no heat sink	TO-46*, small heat fin	TO-92, no heat sink	TO-92**, small heat fin	SO-8 no heat sink	SO-8** small heat fin	TO-220 no heat sink
Still air	400°C/W	100°C/W	180°C/W	140°C/W	220°C/W	110°C/W	90°C/W
Moving air	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W	105°C/W	90°C/W	26°C/W
Still oil	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W			
Stirred oil	50°C/W	30°C/W	45°C/W	40°C/W			
(Clamped to metal, infinite heat sink)		(24°C/W)				(55°C/W)	

*Wakefield type 201, or 1" disc of 0.020" sheet brass, soldered to case, or similar.

**TO-92 and SO-8 packages glued and leads soldered to 1" square of 1/16" printed circuit board with 2 oz. foil or similar.

Typical Applications

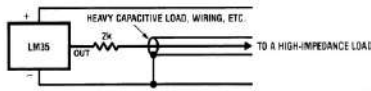


FIGURE 3. LM35 with Decoupling from Capacitive Load

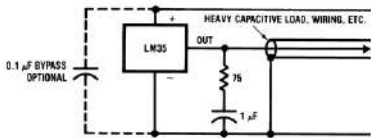


FIGURE 4. LM35 with R-C Damper

CAPACITIVE LOADS

Like most micropower circuits, the LM35 has a limited ability to drive heavy capacitive loads. The LM35 by itself is able to drive 50 pF without special precautions. If heavier loads are anticipated, it is easy to isolate or decouple the load with a resistor; see Figure 3. Or you can improve the tolerance of capacitance with a series R-C damper from output to ground; see Figure 4.

When the LM35 is applied with a 200Ω load resistor as shown in Figure 5, Figure 6 or Figure 8 it is relatively immune to wiring capacitance because the capacitance forms a bypass from ground to input, not on the output. However, as with any linear circuit connected to wires in a hostile environment, its performance can be affected adversely by intense electromagnetic sources such as relays, radio transmitters, motors with arcing brushes, SCR transients, etc, as its wiring can act as a receiving antenna and its internal junctions can act as rectifiers. For best results in such cases, a bypass capacitor from V_{IN} to ground and a series R-C damper such as 75Ω in series with 0.2 or 1 μF from output to ground are often useful. These are shown in Figure 13, Figure 14, and Figure 16.

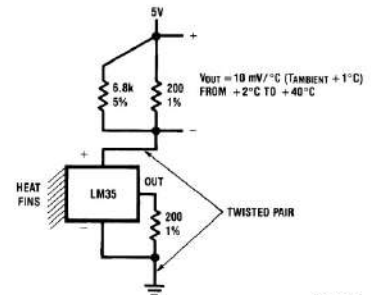


FIGURE 5. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Grounded Sensor)

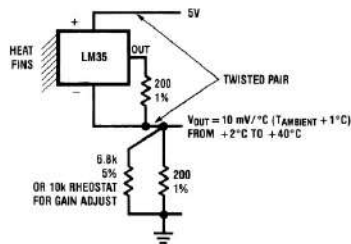


FIGURE 6. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)

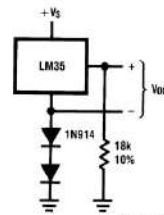


FIGURE 7. Temperature Sensor, Single Supply, -55° to +150°C

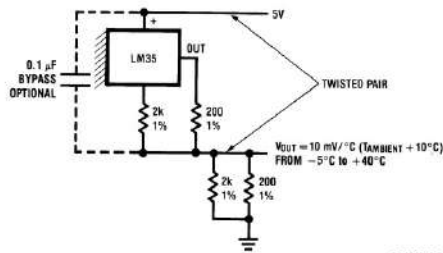


FIGURE 8. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)

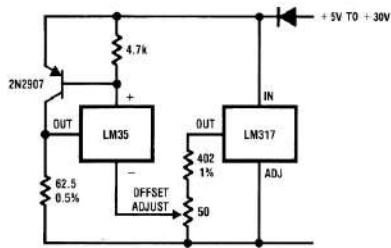
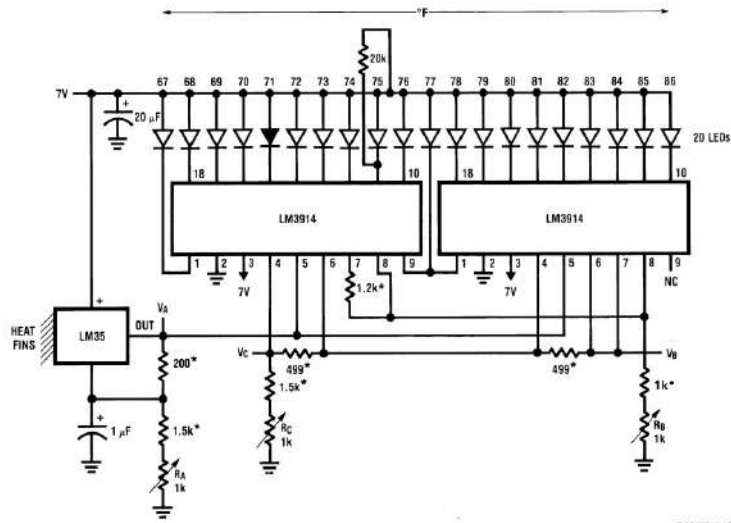


FIGURE 9. 4-To-20 mA Current Source (0°C to +100°C)

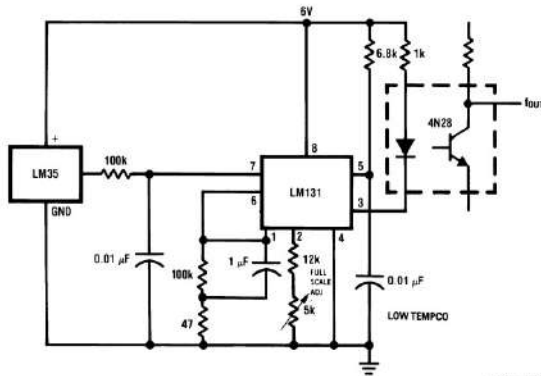
Typical Applications (Continued)



DS005516-18

* = 1% or 2% film resistor
 Trim R_B for $V_B = 3.075V$
 Trim R_C for $V_C = 1.955V$
 Trim R_A for $V_A = 0.075V + 100mV/^\circ C \times T_{ambient}$
 Example, $V_A = 2.275V$ at $22^\circ C$

FIGURE 15. Bar-Graph Temperature Display (Dot Mode)

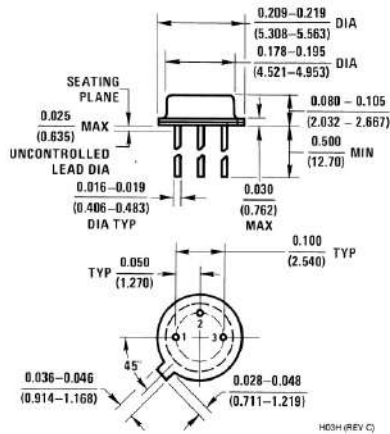


DS005516-18

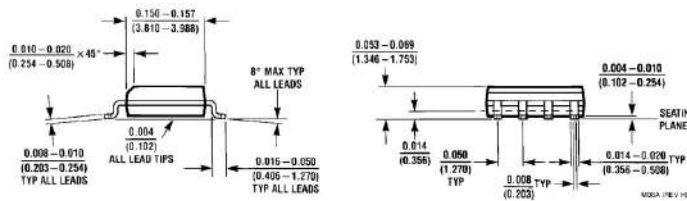
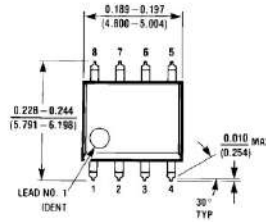
FIGURE 16. LM35 With Voltage-To-Frequency Converter And Isolated Output (2°C to +150°C; 20 Hz to 1500 Hz)

LM35

Physical Dimensions Inches (millimeters) unless otherwise noted



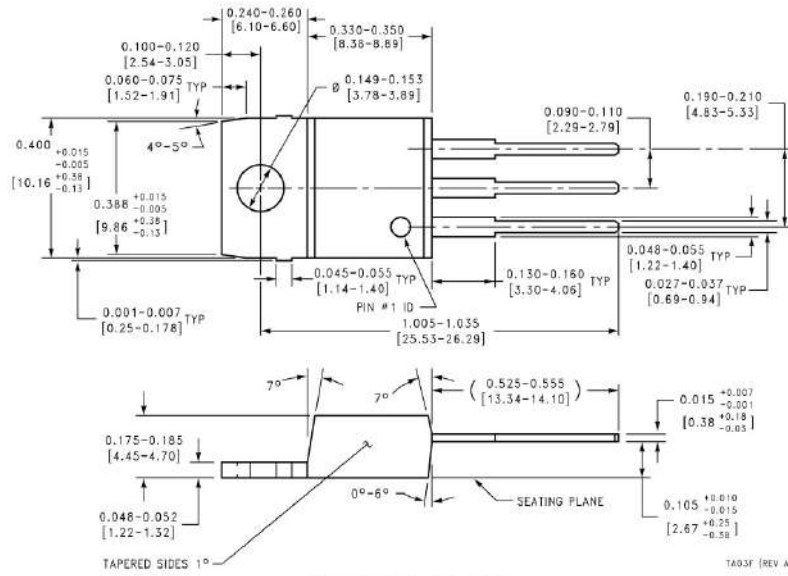
TO-46 Metal Can Package (H)
 Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH,
 LM35CAH, or LM35DH
 NS Package Number H03H



SO-8 Molded Small Outline Package (M)
 Order Number LM35DM
 NS Package Number M08A

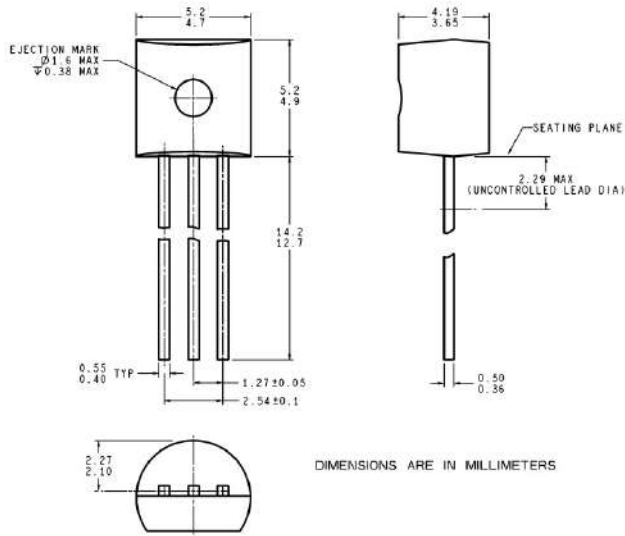
LM35

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Power Package TO-220 (T)
Order Number LM35DT
NS Package Number TA03F

Physical Dimensions Inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



TO-92 Plastic Package (Z)
Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
NS Package Number Z03A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

 <p>National Semiconductor Corporation Americas Tel: 1-800-272-9959 Fax: 1-800-737-7018 Email: support@nsc.com www.national.com</p>	<p>National Semiconductor Europe Fax: +49 (0) 180-530 85 86 Email: europe.support@nsc.com Deutsch: Tel: +49 (0) 69 9608 6208 English: Tel: +44 (0) 870 24 02171 Français: Tel: +33 (0) 1 41 91 8750</p>	<p>National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group Tel: 65-2544466 Fax: 65-2504466 Email: ap.support@nsc.com</p>	<p>National Semiconductor Japan Ltd. Tel: 81-3-5639-7560 Fax: 81-3-5639-7507</p>
--	---	--	---

National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

Anexo: Folha de dados (datasheet) do MOSFET JCS50N06FH utilizado.



N 沟道增强型场效应晶体管
N-CHANNEL MOSFET

JCS50N06H

主要参数 MAIN CHARACTERISTICS

I_D	50 A
V_{DS}	60 V
$R_{dson-max}$ (@ $V_{GS}=10V$)	23 m Ω
Q_g-typ	34 nC

用途

- 高频开关电源
- UPS 电源

产品特性

- 低栅极电荷
- 低 C_{rss}
- 开关速度快
- 产品全部经过雪崩测试
- 高抗 dv/dt 能力
- RoHS 产品

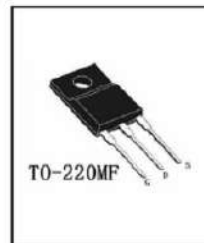
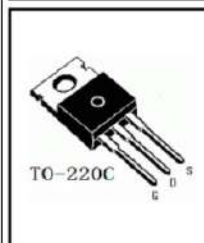
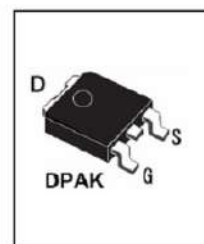
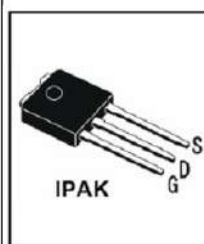
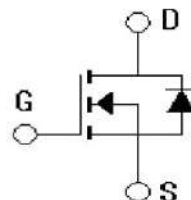
APPLICATIONS

- High frequency switch mode power supplies
- UPS

FEATURES

- Low gate charge
- Low C_{rss}
- Fast switching
- 100% avalanche tested
- Improved dv/dt capability
- RoHS product

封装 Package



订货信息 ORDER MESSAGE

订货型号 Order codes	印记 Marking	封装 Package	无卤素 Halogen Free	包装 Packaging	器件重量 Device Weight
JCS50N06CH-O-C-N-B	JCS50N06CH	TO-220C	否 NO	条管 Tube	2.06 g(typ)
JCS50N06FH-O-F-N-B	JCS50N06FH	TO-220MF	否 NO	条管 Tube	2.22 g(typ)
JCS50N06VH-O-V-N-B	JCS50N06VH	IPAK	否 NO	条管 Tube	0.35 g(typ)
JCS50N06RH-O-R-N-B	JCS50N06RH	DPAK	否 NO	条管 Tube	0.35 g(typ)
JCS50N06RH-O-R-N-A	JCS50N06RH	DPAK	否 NO	卷盘 Reel	0.35 g(typ)





JCS50N06H

绝对最大额定值 ABSOLUTE RATINGS ($T_C=25^\circ\text{C}$)

项 目 Parameter	符 号 Symbol	数 值 Value			单 位 Unit
		JCS50N06RH/VH	JCS50N06CH	JCS50N06FH	
最高漏极-源极直流电压 Drain-Source Voltage	V_{DSS}	60			V
连续漏极电流 Drain Current -continuous	I_D $T=25^\circ\text{C}$ $T=100^\circ\text{C}$	50		50*	A
		31.7		31.7*	A
最大脉冲漏极电流(注1) Drain Current - pulse (note 1)	I_{DM}	200*			A
最高栅源电压 Gate-Source Voltage	V_{GSS}	± 20			V
单脉冲雪崩能量(注2) Single Pulsed Avalanche Energy (note 2)	E_{AS}	500			mJ
雪崩电流(注1) Avalanche Current (note 1)	I_{AR}	50			A
重复雪崩能量(注1) Repetitive Avalanche Energy (note 1)	E_{AR}	8.75	10.3	5.6	mJ
二极管反向恢复最大电压变化速率 (注3) Peak Diode Recovery dv/dt (note 3)	dv/dt	7.0			V/ns
耗散功率 Power Dissipation	P_D $T_C=25^\circ\text{C}$ -Derate above 25°C	87.5	103.8	56	W
		0.70	0.83	0.45	W/ $^\circ\text{C}$
最高结温及存储温度 Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{STG}	-55~+150			$^\circ\text{C}$
引线最高焊接温度 Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes	T_L	300			$^\circ\text{C}$

*漏极电流由最高结温限制

*Drain current limited by maximum junction temperature

吉林华微电子股份有限公司
JILIN BING MICROELECTRONICS CO., LTD.



JCS50N06H

电特性 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

项 目 Parameter	符 号 Symbol	测试条件 Tests conditions	最小 Min	典型 Typ	最大 Max	单位 Units
关态特性 Off –Characteristics						
漏-源击穿电压 Drain-Source Voltage	BV_{DSS}	$I_D=250\mu A, V_{GS}=0V$	60	-	-	V
击穿电压温度特性 Breakdown Voltage Temperature Coefficient	$\Delta BV_{DSS}/\Delta T_J$	$I_D=250\mu A$, referenced to $25^\circ C$	-	0.6	-	V/°C
零栅压下漏极漏电流 Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS}=60V, V_{GS}=0V, T_C=25^\circ C$	-	-	1	μA
		$V_{DS}=48V, T_C=125^\circ C$	-	-	10	μA
正向栅极体漏电流 Gate-body leakage current, forward	I_{GSSF}	$V_{DS}=0V, V_{GS}=30V$	-	-	100	nA
反向栅极体漏电流 Gate-body leakage current, reverse	I_{GSSR}	$V_{DS}=0V, V_{GS}=-30V$	-	-	-100	nA
通态特性 On-Characteristics						
阈值电压 Gate Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D=250\mu A$	2.0	-	4.0	V
静态导通电阻 Static Drain-Source On-Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS}=10V, I_D=25A$	-	19	23	m Ω
正向跨导 Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS}=30V, I_D=25A$ (note 4)	-	30	-	S
动态特性 Dynamic Characteristics						
输入电容 Input capacitance	C_{iss}	$V_{DS}=25V,$ $V_{GS}=0V,$ $f=1.0MHz$	-	900	1125	pF
输出电容 Output capacitance	C_{oss}		-	430	540	pF
反向传输电容 Reverse transfer capacitance	C_{rss}		-	80	100	pF





JCS50N06H

电特性 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

开关特性 Switching Characteristics						
延迟时间 Turn-On delay time	$t_{d(on)}$	$V_{DD}=30V, I_D=50A, R_G=50\Omega$	-	40	90	ns
上升时间 Turn-On rise time	t_r	$V_{GS}=10V$	-	100	210	ns
延迟时间 Turn-Off delay time	$t_{d(off)}$	(note 4, 5)	-	90	190	ns
下降时间 Turn-Off Fall time	t_f		-	80	170	ns
栅极电荷总量 Total Gate Charge	Q_g	$V_{DS}=48V,$	-	34	45	nC
栅-源电荷 Gate-Source charge	Q_{gs}	$I_D=50A$	-	7	-	nC
栅-漏电荷 Gate-Drain charge	Q_{gd}	$V_{GS}=10V$ (note 4, 5)	-	17	-	nC
漏-源二极管特性及最大额定值 Drain-Source Diode Characteristics and Maximum Ratings						
正向最大连续电流 Maximum Continuous Drain-Source Diode Forward Current		I_S	-	-	50	A
正向最大脉冲电流 Maximum Pulsed Drain-Source Diode Forward Current		I_{SM}	-	-	200	A
正向压降 Drain-Source Diode Forward Voltage	V_{SD}	$V_{GS}=0V, I_S=50A$	-		1.4	V
反向恢复时间 Reverse recovery time	t_{rr}	$V_{GS}=0V, I_S=50A$	-	50	-	ns
反向恢复电荷 Reverse recovery charge	Q_{rr}	$di/dt=100A/\mu s$ (note 4)	-	80	-	nC

热特性 THERMAL CHARACTERISTIC

项 目 Parameter	符 号 Symbol	最大 Max			单 位 Unit
		JCS50N06RH/VH	JCS50N06CH	JCS50N06FH	
结到管壳的热阻 Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{th(j-c)}$	1.43	1.20	2.22	$^{\circ}C/W$
结到环境的热阻 Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{th(j-A)}$	62.5			$^{\circ}C/W$

注释:

- 1: 脉冲宽度由最高结温限制
- 2: $L=0.4mH, I_{AS}=50A, V_{DD}=25V, R_G=25\Omega$, 起始结温 $T_J=25^{\circ}C$
- 3: $I_{SD} \leq 50A, di/dt \leq 300A/\mu s, V_{DD} \leq BV_{DSS}$, 起始结温 $T_J=25^{\circ}C$
- 4: 脉冲测试: 脉冲宽度 $\leq 300\mu s$, 占空比 $\leq 2\%$
- 5: 基本与工作温度无关

Notes:

- 1: Pulse width limited by maximum junction temperature
- 2: $L=0.4mH, I_{AS}=50A, V_{DD}=25V, R_G=25\Omega$, Starting $T_J=25^{\circ}C$
- 3: $I_{SD} \leq 50A, di/dt \leq 300A/\mu s, V_{DD} \leq BV_{DSS}$, Starting $T_J=25^{\circ}C$
- 4: Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\mu s$, Duty Cycles $\leq 2\%$
- 5: Essentially independent of operating temperature

吉林华微电子股份有限公司
JILIN BING MICROELECTRONICS CO., LTD.

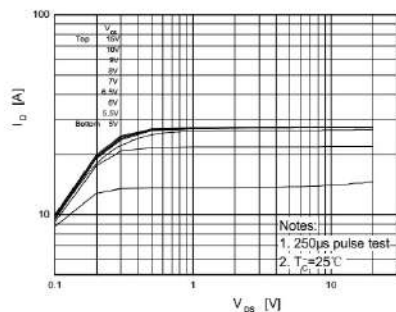
版本: 201510D

4/11

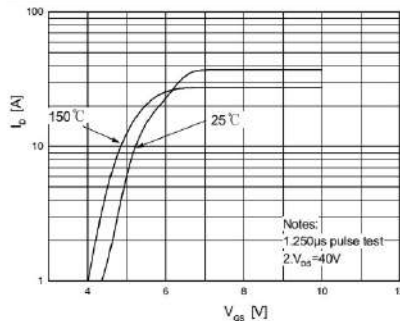


特征曲线 ELECTRICAL CHARACTERISTICS (curves)

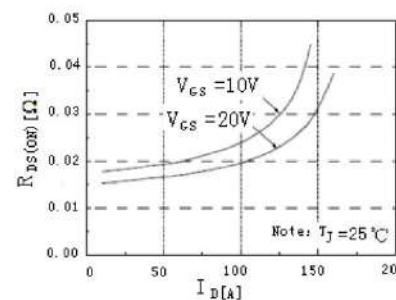
On-Region Characteristics



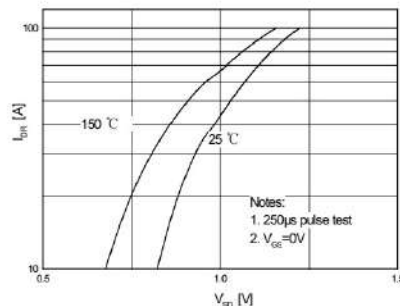
Transfer Characteristics



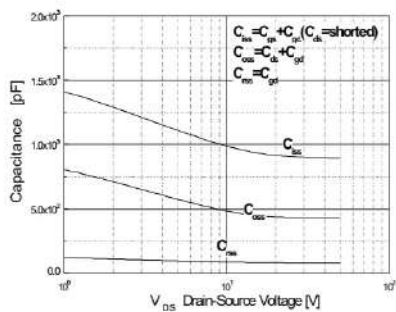
On-Resistance Variation vs. Drain Current and Gate Voltage



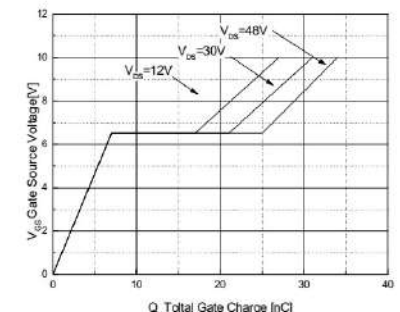
Body Diode Forward Voltage Variation vs. Source Current and Temperature



Capacitance Characteristics



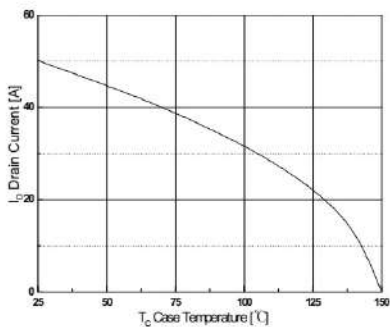
Gate Charge Characteristics



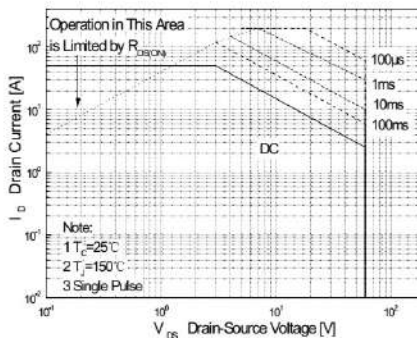


特征曲线 ELECTRICAL CHARACTERISTICS (curves)

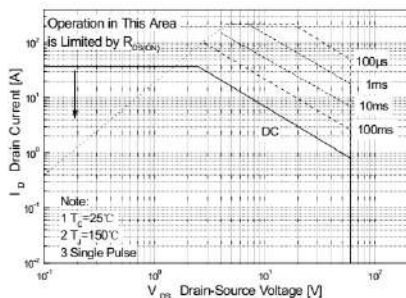
Maximum Drain Current vs. Case Temperature



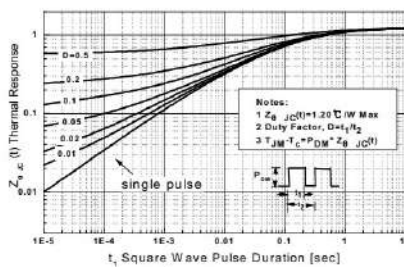
Maximum Safe Operating Area JCS50N06CH/RH/VH



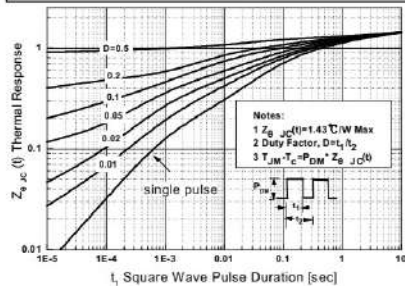
Maximum Safe Operating Area JCS50N06FH



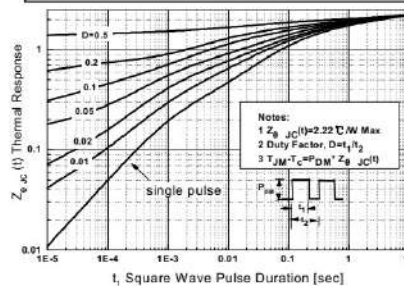
Transient Thermal Response Curve JCS50N06CH



Transient Thermal Response Curve JCS50N06VH/RH



Transient Thermal Response Curve JCS50N06FH



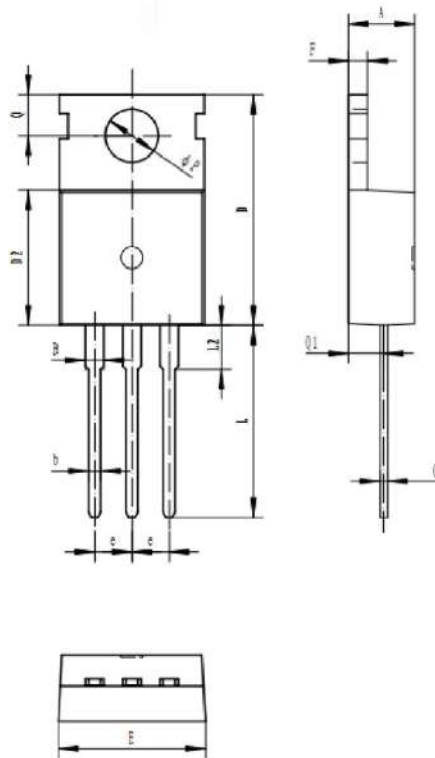


JCS50N06H

外形尺寸 PACKAGE MECHANICAL DATA

TO-220C

单位 Unit: mm



符号 symbol	MIN	MAX
A	4.50	4.70
B	1.22	1.40
b	0.70	0.95
c	0.40	0.65
D	15.20	16.20
D1	9.00	9.40
E	9.70	10.10
e	2.39	2.69
F	1.25	1.40
L	12.60	13.60
L1	2.80	3.20
Q	2.40	3.00
Q1	2.20	2.60
P	3.50	3.80



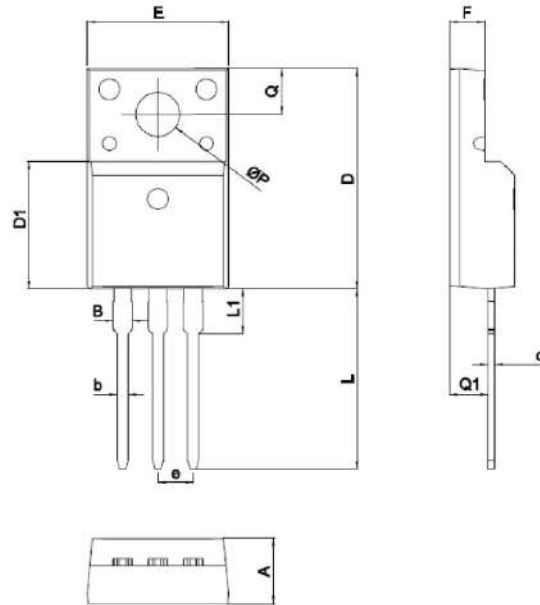


JCS50N06H

外形尺寸 PACKAGE MECHANICAL DATA

TO-220MF

单位 Unit: mm



SYMBOL	mm	
	MIN	MAX
A	4.5	4.9
B		1.47
b	0.7	0.9
c	0.45	0.60
D	15.67	16.07
D1	9.04	9.20
e	2.54TYPE	
E	9.96	10.36
F	2.34	2.74
L	12.58	13.38
L1	3.13	3.33
Q	3.2	3.4
Q1	2.56	2.96
ΦP	3.08	3.28



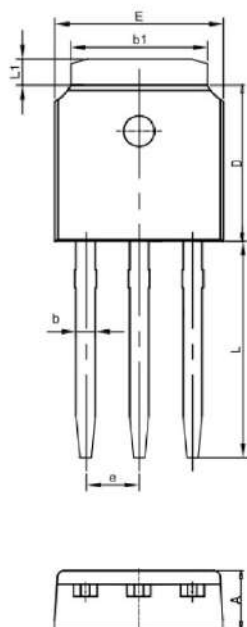


JCS50N06H

外形尺寸 PACKAGE MECHANICAL DATA

IPAK

单位 Unit: mm



SYMBOL	MM	
	MIN	MAX
A	2.1	2.5
A1	0.87	1.27
b	0.63	0.93
b1	5.13	5.53
c	0.40	0.60
D	5.80	6.40
E	6.30	6.90
L	9.10	9.70
e	2.286BSC	
L1	0.82	1.22



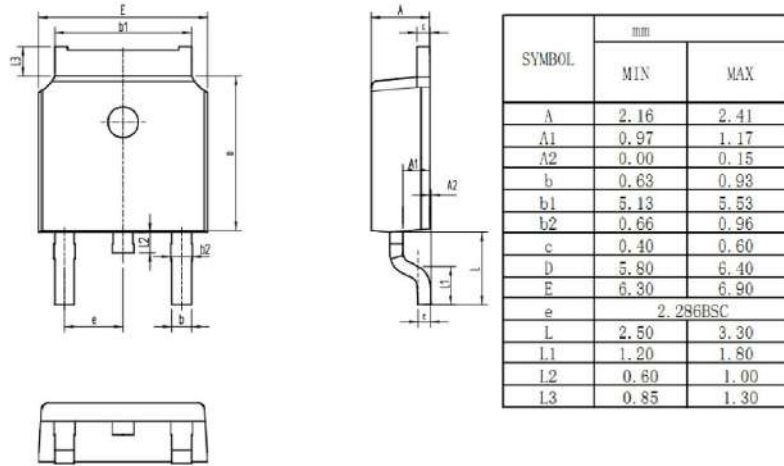


JCS50N06H

外形尺寸 PACKAGE MECHANICAL DATA

DPAK

单位 Unit: mm





JCS50N06H

注意事项

1. 吉林华微电子股份有限公司的产品销售分为直销和销售代理，无论哪种方式，订货时请与公司核实。
2. 购买时请认清公司商标，如有疑问请与公司本部联系。
3. 在电路设计时请不要超过器件的绝对最大额定值，否则会影响整机的可靠性。
4. 本说明书如有版本变更不另外告知

NOTE

1. Jilin Sino-microelectronics co., Ltd sales its product either through direct sales or sales agent , thus, for customers, when ordering , please check with our company.
2. We strongly recommend customers check carefully on the trademark when buying our product, if there is any question, please don't be hesitate to contact us.
3. Please do not exceed the absolute maximum ratings of the device when circuit designing.
4. Jilin Sino-microelectronics co., Ltd reserves the right to make changes in this specification sheet and is subject to change without prior notice.

联系方式**吉林华微电子股份有限公司**

公司地址：吉林省吉林市深圳街 99 号

邮编：132013

总机：86-432-64678411

传真：86-432-64665812

网址：www.hwdz.com.cn**市场营销部**

地址：吉林省吉林市深圳街 99 号

邮编：132013

电话：86-432-64675588

64675688

64678411

传真：86-432-64671533

CONTACT**JILIN SINO-MICROELECTRONICS CO., LTD.**

ADD: No.99 Shenzhen Street, Jilin City, Jilin Province, China.

Post Code: 132013

Tel: 86-432-64678411

Fax: 86-432-64665812

Web Site: www.hwdz.com.cn**MARKET DEPARTMENT**

ADD: No.99 Shenzhen Street, Jilin City, Jilin Province, China.

Post Code: 132013

Tel: 86-432-64675588

64675688

64678411

Fax: 86-432-64671533

吉林华微电子股份有限公司
JILIN SINO-MICROELECTRONICS CO., LTD.