

CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS DE ELETRÔNICA ANALÓGICA

Isnaldo José de Souza Coêlho – isnaldo.coelho@univasf.edu.br

CENEL - Colegiado de Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF

Campus Juazeiro – Av. Antônio Carlos Magalhães, 510 – Santo Antônio

CEP 48902-300 – Juazeiro – BA, Brasil.

Fabício Braga Soares de Carvalho – fabricio.braga@univasf.edu.br

CECOMP - Colegiado de Engenharia da Computação

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF

Campus Juazeiro – Av. Antônio Carlos Magalhães, 510 – Santo Antônio

CEP 48902-300 – Juazeiro – BA, Brasil.

Guilherme Moreira Farias – gui.ibce@gmail.com

Paulo Junior Dias da Silva – pauljunior_pj@hotmail.com

***Resumo:** A partir de procedimentos sugeridos para verificação em aulas práticas de conceitos fundamentais da teoria dos dispositivos semicondutores, este trabalho relata uma estratégia adotada na disciplina Laboratório de Eletrônica Analógica para associar a construção de conhecimentos teóricos à aplicação prática imediata, conduzindo a resultados consistentes relativamente à formação de competências para caracterização de artefatos com apelo tecnológico atual nas Engenharias Elétrica e da Computação.*

***Palavras-chave:** Semicondutores, Diodos Retificadores, LEDs, Diodos Zeners, Ensino Orientado a Projetos.*

1 INTRODUÇÃO

A inclusão de conteúdos relacionados à física de materiais e de dispositivos semicondutores nos currículos dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação ainda é cercada de reticências. Ao que parece há um paradigma estabelecido historicamente no Brasil que remete o assunto ao contexto científico puro, em um ramo no campo da física da matéria condensada em que são estudados os fenômenos de transporte de cargas elétricas e seus processos de interação com radiações eletromagnéticas. À Engenharia é relegada a tarefa de “aplicar” dispositivos semicondutores — componentes eletrônicos não-lineares em sua natureza — à implementação de circuitos de interesse prático, quase sempre por meio de métodos de síntese ou de análise que levam em conta “modelos equivalentes linearizados”, a fim de permitir o emprego das teorias convencionais de circuitos.

Suprimir a abordagem científica que enfoca os fenômenos de injeção, transporte, criação e aniquilação de portadores de carga no interior dos dispositivos, contudo, pode isentar os

novos profissionais do compromisso de dominar muitas das tecnologias atuais, evidentes para a sociedade moderna, e inibir a formação da competência para inovação tecnológica em campos de crescente apelo mercadológico, à semelhança de outros países em desenvolvimento (EKEKWE & EKENEDU, 2007). A curto prazo, este paradigma estabelecido pode comprometer a empregabilidade de nossos engenheiros na promissora indústria de semicondutores, bem como nas indústrias de base tecnológica que fazem aplicações avançadas de componentes semicondutores agregando valor a sistemas eletrônicos e optoeletrônicos sofisticados, tais como os atuais aparelhos de gravação e reprodução de mídia. A longo prazo, compromete as aspirações do Brasil de integrar o seleto grupo das nações que detêm o domínio das tecnologias de informação vigentes, através das ações de fomento à fixação de uma indústria de semicondutores nacional. Esta prática é antagônica à política nacional encampada pelo MCT, que aponta a área de semicondutores como uma das cinco linhas estratégicas prioritárias para ações de fomento em seus planos plurianuais de investimento no setor (MCT, 2006).

2 METODOLOGIA

A estratégia, sugerida para apresentar os dispositivos semicondutores como *soluções* para realização de funções essenciais no processamento de sinais elétricos, visa desmistificar a essência de sua natureza não-linear perante as técnicas de análise de circuitos lineares apresentadas nas componentes curriculares mais usuais nas matrizes dos citados cursos de graduação. A metodologia consiste em motivar o interesse pela compreensão plena do comportamento dos dispositivos semicondutores, através da percepção de que o domínio da realidade física desses componentes conduz a projetos mais consistentes e precisos. Dito de outro modo, consiste na verificação experimental do comportamento de componentes, *estimados precisamente* em etapa experimental anterior à aplicação.

Sob este argumento procede-se à estimativa dos parâmetros da *equação de Shockley simplificada* __ que ajusta os modelos do diodo de junção *pn* e do LED (diodo emissor de luz) às *curvas características I-V estáticas* medidas na “região de polarização direta” __ bem como à estimativa dos parâmetros do modelo linearizado para um diodo Zener operando na “região de ruptura reversa”, todos dispositivos comerciais.

Uma turma de estudantes dos cursos de Engenharia Elétrica e de Engenharia da Computação da UNIVASF – Universidade Federal do Vale do São Francisco – foi submetida à metodologia apresentada neste artigo ao cursar a disciplina Laboratório de Eletrônica Analógica, no semestre 2011.1, em que o planejamento das aulas práticas seguiu a estratégia descrita. O principal aspecto observado foi a *aderência das curvas teóricas* dos diodos (de junção *pn*, Zener e LED) __ geradas pelos modelos adotados com os parâmetros estimados a partir dos dados experimentais medidos __ às curvas I-V adquiridas.

3 ELETRÔNICA ANALÓGICA NA UNIVASF

A disciplina de Eletrônica Analógica é classificada como componente curricular de conteúdo essencial à formação nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação da UNIVASF. Os conteúdos essenciais são formados pelo conjunto de conhecimentos comuns a todo engenheiro electricista e da computação, constituindo a base para a sua formação, independente da formação profissional específica que possa escolher. Abrangem o estudo de matérias relacionadas à formação profissional geral em Eletricidade, Circuitos Elétricos, Eletrônica, Eletromagnetismo, Comunicações, Materiais Elétricos, Conversão de Energia, Controle e Servomecanismos e Técnicas Digitais.

Perfazendo um total de 60 horas/aula, a disciplina de Eletrônica Analógica é ministrada conjuntamente com o Laboratório de Eletrônica Analógica. O Laboratório de Eletrônica Analógica contempla um total de 30 horas/aula de atividades práticas, em que os discentes são convidados a embasar e a comprovar experimentalmente os conceitos da teoria de Eletrônica. Alguns dos tópicos abordados nas disciplinas Eletrônica Analógica e Laboratório de Eletrônica Analógica são (UNIVASF, 2008), (UNIVASF, 2011):

- Análise de circuitos com diodos;
- Circuitos retificadores;
- Circuitos amplificadores com transistores bipolares de junção (TBJ);
- Circuitos amplificadores com transistores a efeito de campo (MOSFET);
- Modelos para circuitos amplificadores de sinais;
- Amplificadores operacionais.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Modelos adotados para os dispositivos

A equação modificada de Shockley (1) expressa o comportamento I-V de dispositivos baseados em propriedades eletrônicas de junções semicondutoras (tipo *pn*) ou de junções metal-semicondutor (tipo *Schottky*) (SZE, 2002), sendo também largamente adotada em modelos eletrônicos equivalentes para dispositivos optoeletrônicos, tais como células solares e LEDs (SINGH, 1996). Na sua forma mais completa exprime, através de uma *relação transcendental*, a corrente que flui entre os terminais do dispositivo por duas componentes: uma *predominante* devida à injeção de portadores através da junção; outra *espúria* devida ao trânsito de portadores por “caminhos alternativos” à junção.

$$i = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(v - R_s i)}{nkT} \right] - 1 \right\} + \frac{v - R_s i}{R_p} \quad (1)$$

sendo I_0 a *corrente de saturação reversa* (que está relacionada a uma barreira de potencial interna), R_s a *resistência serial* (modelando resistências de contato dos eletrodos e o efeito da resistividade dos materiais semicondutores), n o *fator de idealidade da junção*, $kT/e \sim 0,026$ V à temperatura ambiente, e R_p a *resistência paralela* (modelando o caminho para a componente espúria de corrente entre os eletrodos).

Os parâmetros de (1) traduzem os fenômenos de injeção e transporte dos portadores na estrutura interna dos dispositivos semicondutores, de modo que sua estimativa fornece informações úteis para análise das suas curvas características I-V experimentais. Para fins didáticos mais imediatos, desconsideramos os efeitos das “resistências parasitas” R_s e R_p , o que conduz à *equação de Shockley simplificada*, cujos parâmetros (I_0 e n) serão estimados a partir das curvas I-V medidas experimentalmente.

$$i = I_0 \left[\exp \left(\frac{ev}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

5 PROCEDIMENTOS

5.1 Aquisição das curvas I-V

A finalidade do procedimento descrito a seguir — compondo a primeira aula prática da seqüência explorada — é dar aos estudantes a exata noção das implicações do comportamento não-linear dos dispositivos semicondutores para o funcionamento dos circuitos.

A montagem sugerida para a aquisição dos pontos I vs V das curvas características estáticas está ilustrada na Figura 1, que proporciona a verificação do conceito de *acoplamento* entre a resistência de saída de uma fonte e a resistência da sua carga, tirando proveito do fato de que cada *diodo sob teste* (DST) representa uma carga variável para a montagem, cuja resistência é definida em função do valor da tensão cc aplicada aos seus terminais. O voltímetro conectado ao ponto A mede o potencial no terminal deslizante (cursor) do potenciômetro relativamente à referência zero (terra) do kit didático, que também tem sua fonte simétrica explorada para fornecer os potenciais externos +15 V e -15 V. O amperímetro fornece a leitura da corrente drenada pelo mesmo terminal para o terra. O DST terá seu ânodo conectado ao ponto A e seu cátodo conectado ao terra. Ou seja, o conjunto formado pelas fontes cc (+15V, -15V), pelos dois resistores fixos (R_1 , R_2) e pelo resistor variável (potenciômetro) permite o ajuste contínuo do ponto de operação do DST.

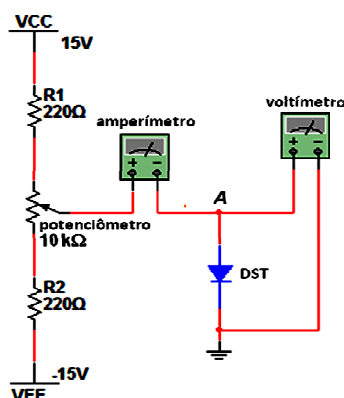


Figura 1. Circuito proposto para aquisição dos pontos I vs. V da característica estática de um diodo específico (DST).

Deste modo, todos os pontos da característica I-V de um dado diodo podem ser registrados por anotação direta das leituras dos instrumentos, ao passo que três *teoremas fundamentais na teoria dos circuitos lineares* podem ser vivenciados na prática: o *Princípio da Superposição*, ao verificar o potencial no ponto A em função das fontes simétricas do kit e da posição do cursor, na ausência do DST; o *Teorema de Thèvenin*, ao verificar o controle pleno do potencial no ponto A quando o DST opera em condições de alta resistência; e o *Teorema de Norton*, ao verificar o controle pleno da corrente fornecida ao DST quando este opera em condições de baixa resistência. O aparato experimental proposto na Figura 1 permite a *construção* das características elétricas dos diodos, ponto a ponto, juntamente com o conhecimento do domínio de validade de cada modelo equivalente empregado na análise das observações *in loco*.

A confirmação do perfil dos comportamentos I vs. V dos dispositivos é feita de forma dinâmica, com o auxílio do osciloscópio de bancada, através da montagem ilustrada na Figura 2 abaixo. A leitura da corrente que atravessa o diodo (em mA) é feita através da aquisição do

potencial no resistor de $1\text{ k}\Omega$. A curva I-V adquirida pode ser rebatida com relação ao eixo das abscissas através de um recurso disponível no equipamento. Esta forma de aquisição das curvas, apesar de bastante rápida, não é eficaz em termos de registro dos pares ordenados porque o efeito do ruído dá origem a pontos espúrios de difícil identificação (e eliminação) no tabelamento gerado automaticamente pelo osciloscópio digital (ver Figura 3).

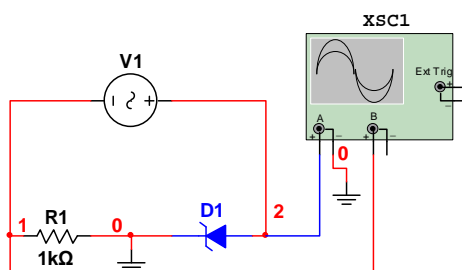


Figura 2. Circuito proposto para aquisição dinâmica dos pontos I vs V .

6 RESULTADOS

6.1 Análise das curvas I-V

Os pares ordenados I vs V obtidos a partir da aplicação da montagem ilustrada na Figura 1 estão reunidos no gráfico da Figura 3 abaixo, juntamente com as curvas teóricas obtidas para ajuste das curvas experimentais na região de polarização direta de cada diodo, e também os segmentos de reta que representam a “linearização por partes” destas curvas. O gráfico na parte inferior esquerda mostra as regiões de limiar para os diodos retificador e Zener (em escala expandida, com os respectivos ajustes segundo a equação Equação 2). Os segmentos de reta representam os modelos lineares (aproximações “por partes” [SEDRA, 2007]) correspondentes aos diodos retificador, LED e Zener utilizados. A curva obtida de forma dinâmica com auxílio do osciloscópio digital (na parte superior esquerda) confirma o perfil da característica do Zener.

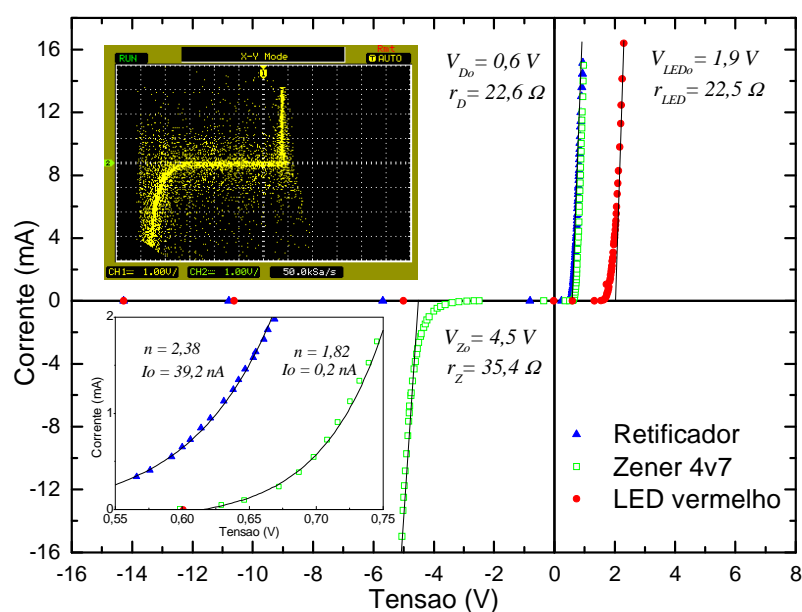


Figura 3. Curvas características estáticas I-V obtidas ponto a ponto.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aspectos construtivistas podem ser destacados na proposta apresentada, quando se enfatiza a aquisição ponto a ponto das características I-V dos dispositivos semicondutores. Apesar do anúncio preliminar do comportamento *exponencial* do perfil das curvas pela abordagem da equação de Shockley, a ordem inversa poderia ser adotada: as curvas poderiam ser obtidas *a priori*, antes da abordagem teórica das junções *pn*. Com isso, o conhecimento das características elétricas teria sido “construído” com base na experimentação, e aspectos relacionados ao comportamento matemático da função $i(v)$ poderiam ser explorados, tais como a dependência com a temperatura, o crescimento rápido da corrente com o potencial aplicado no ânodo (ponto A, na Figura 1) e o alinhamento dos pontos experimentais traçados num gráfico mono-logarítmico.

Alguns aspectos teóricos omissos também podem ser revelados na análise da montagem proposta na Figura 1. A montagem utilizando o conjunto de resistências e a fonte simétrica do kit possui um *equivalente de Thèvenin*, com tensão (V_{Th}) e resistência (R_{Th}) variáveis em função da posição do cursor do potenciômetro. A tensão de Thèvenin varia linearmente na faixa $-14,4 < V_{Th} < +14,4$ Volts, enquanto a *resistência de Thèvenin* varia de forma *quadrática*, com valor máximo na metade da excursão do potenciômetro, exatamente quando a tensão é nula. Partindo de um dos extremos até a metade da excursão tem-se uma variação na faixa $215\Omega < R_{Th} < 2,6k\Omega$. Uma vez que todos os DSTs possuem limiar de condução direta (e no caso do Zener, também reversa) próximo à origem no plano I-V, quando R_{Th} assume seus maiores valores, a alta resistência do diodo garantirá pleno controle da tensão aplicada aos seus terminais através do ajuste do potenciômetro em torno de sua posição central. Com exceção do Zener, o controle do potencial é verificado também em todo intervalo $V_{Th} < 0$. Tem-se aí um bom acoplamento entre a fonte de Thèvenin e a carga (DST).

Ao alcançar algum dos potenciais críticos de condução direta ou reversa, contudo, a resistência do DST cai bruscamente e o controle da tensão nos seus terminais é severamente dificultado. Uma vez operando em regime de condução (i.é, além da tensão de limiar) o DST sofre grandes variações de corrente para pequenas variações da posição do cursor. A explicação é sutil: acima do limiar de condução direta a *resistência dinâmica* dos diodos decai exponencialmente com o potencial aplicado (SZE, 2002) (e, portanto, com a posição do cursor), enquanto a resistência de Thèvenin decai de forma quadrática, muito mais lentamente. Com isso, a tensão máxima medida no *terminal A* se limita a um valor muito aquém dos 14,4 Volts previstos (e verificados experimentalmente) alcançados quando nenhuma carga está conectada ao terminal do cursor do potenciômetro. Esta constatação “intrigante” pode ser usada como provocação aos estudantes: *para onde foi a diferença, em Volts, entre o valor máximo previsto no final da excursão do potenciômetro, e o valor medido no anodo do DST?* E a resposta: foi para R_{Th} ! De fato a resistência do DST, nestas circunstâncias, compete com a resistência de Thèvenin do equivalente porque não há um bom acoplamento entre a “fonte de tensão” e a carga.

É um bom momento para resgatar o conceito de *equivalente de Norton* do circuito visto a partir do *terminal A*. Tratando-se agora de uma “fonte de corrente” para o DST, é o controle da corrente que passa a ser efetivo através do ajuste do cursor, uma vez que a resistência de saída (ainda dada por R_{Th}) da fonte passa a ser muito superior à do DST.

Uma vez justificada a eficácia do método de aquisição dos pontos I vs. V, a análise desses dados com a estimativa dos parâmetros da Equação 2 pode ser avaliada pela aderência do gráfico de cada função $i(v)$ aos pontos experimentais. Posteriormente, os valores dos parâmetros podem ser criticados com base na interpretação de seus respectivos significados físicos à luz da teoria das junções *pn*. Assim, semelhanças entre os comportamentos dos

diodos retificador e Zener na polarização direta são justificadas com base nas propriedades do material semiconductor em comum, ao passo que discrepâncias com o comportamento do LED podem ser justificadas com base nos mesmos argumentos, tendo em vista que o material semiconductor deste dispositivo tem propriedades específicas distintas (SINGH, 1996). Provocações aos estudantes podem ser formuladas com base nas análises: *por que o limiar de condução direta do Zener é ligeiramente superior ao do retificador, e ambos são muito inferiores ao do LED?* Segue a resposta: retificador e Zener são feitos de Silício, de modo que seus limiares de condução direta são afetados apenas pelos níveis de dopagem nas regiões tipo-p e tipo-n. No Zener esses níveis são mais altos para promover o “efeito Zener”, o que lhe confere uma “barreira de potencial” um pouco superior (SEDRA & SMITH, 2007). *Por sua vez o LED é confeccionado de material semiconductor de “gap” bem mais largo, razão pela qual sua barreira de potencial é significativamente superior.* O comportamento do Zener pode ser ainda mais explorado: *por que o limiar de condução na ruptura reversa é mais suave?* A explicação é: *porque o mecanismo de ruptura não é o mesmo que leva ao limiar de condução direta, ou seja, a relação $i(v)$ não é exponencial.* A credibilidade da teoria poderia ser suscitada com uma pergunta conceitual: *o processo de regulação da tensão poderia ser conduzido com o emprego de 8 retificadores associados em série, ou seja, o Zener de 4,7 Volts poderia ser substituído pelo conjunto sugerido de diodos retificadores? Quais seriam as vantagens e as desvantagens desta estratégia de substituição do elemento regulador?* Seguem possíveis respostas: *a substituição é possível, uma vez que o limiar de condução da associação seria de 4,8 Volts. A única vantagem seria um aparente aumento de linearidade no comportamento I-V na região de regulação, acompanhado de uma redução da corrente (e, portanto, da potência dissipada) no “elemento regulador”. Desvantagens relevantes seriam: a redução da confiabilidade (aumento da probabilidade de falha), o aumento da alocação de área na placa de circuito impresso, e o aumento da resistência dinâmica do “elemento regulador”.*

8 CONCLUSÕES

Diversos aspectos conceituais estão envolvidos no suporte teórico dado ao experimento formulado para aquisição dos pontos das curvas I-V dos dispositivos. Apenas os mais básicos foram ressaltados, com o apelo de sensibilizar o leitor para o potencial incremento de eficiência do processo ensino-aprendizagem resultante dessa estratégia de “mão na massa” na abordagem e aplicação da teoria dos dispositivos semicondutores. Princípios e teoremas tão básicos como o da superposição, o de Thèvenin e o de Norton foram verificados, já que o circuito proposto na Figura 1 é linear nas suas duas condições de operação.

Os experimentos descritos neste artigo levam o discente à comprovação de que a caracterização apropriada de dispositivos semicondutores permite que os resultados experimentais sejam muito próximos àqueles esperados via análise teórica, o que permite a familiarização e o amadurecimento dos futuros engenheiros na aplicação destes componentes em situações mais complexas e modernas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EKEKWE, N., EKENEDU, C. Challenges and Innovations in Microelectronics Education in Developing Nations. 2007 IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education. 2007.

SZE, S. M. Semiconductor Devices, Physics and Technology. 2ª edição. Nova York: Willey, 2002.

UNIVASF. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia da Computação da Universidade Federal do Vale do São Francisco**. 06 Abril 2011. Disponível em <http://www.univasf.edu.br/~ccomp/arquivos/ppc.pdf>, acessado em Junho 2011.

UNIVASF. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Vale do São Francisco**. 2008. Disponível em http://www.graduacao.univasf.edu.br/eletrica/arquivos/Projeto_Pedagogico_do_curso_de_Engenharia_Eletrica.pdf, acessado em Junho 2011.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Nacional – Plano de Ação 2007-2010**.

SEDRA, A.S., SMITH, K.C. **Microeletrônica**. 5ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2007.

SINGH, J. **Optoelectronics – An Introduction to Materials and Devices**. Singapore: McGraw-Hill, 1996.

SEMICONDUCTOR DEVICES CHARACTERIZATION THROUGH ANALOG ELECTRONICS EXPERIMENTS

***Abstract:** Theoretical aspects related to semiconductor devices are faced along with procedures which were formulated for immediate association of knowledge and application, directed to easy learning of technologies with actual appeal both in Electrical and Computational Engineering. Such a strategy is presented as part of the effort to embody fundamentals of Semiconductor Theory to the Analog Electronics Laboratory contents aiming to give engineers familiarity with non-linear circuitry in conceptual projects.*

***Key-words:** Semiconductor, Rectifier Diodes, LEDs, Zener Diodes, Education-oriented Projects.*