

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO DIODO PARA A OBTENÇÃO DE UMA SOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO REAL.

André Silva Andrade – andreandrade0394@gmail.com

Gislan Silveira Santos – gislan.santos@ifba.edu.br

Juan Lieber Marin – juan.marin@ifba.edu.br

IFBA – Instituto Federal da Bahia, Campus Vitória da Conquista
Av. Sérgio Vieira de Mello, 3150 – Zabelê
45078-900 – Vitória da Conquista – Bahia

Resumo: *O comportamento do diodo e os fatores que o influenciam, tem sido estudado desde o seu surgimento, para melhor aplicabilidade do mesmo na eletrônica, visto que, é um componente fundamental. Dessa maneira, questiona-se: como obter uma solução numérica da curva característica deste componente eletrônico, levando em consideração, a resistividade do circuito e a temperatura? Objetiva-se aplicar/avaliar modelos matemáticos que estudem circuitos elétricos com a inserção do diodo, utilizando ferramentas computacionais no intuito de executar simulações numéricas satisfatórias. Dessa forma, realiza-se um levantamento bibliográfico e uma análise quantitativa de dados, ainda, utiliza-se o software (Multisim) para a coleta de dados teóricos, e utilizará o software (MATLAB), posteriormente, para aplicação do método numérico com maior precisão. A pesquisa demonstra que tanto a resistência quanto a temperatura são variáveis influenciadoras na curva característica do diodo, pois através da análise gráfica, quanto maior a temperatura ambiente, maior o deslocamento da curva característica do diodo para a esquerda e, ainda, quanto maior a resistência do circuito, menor é a tensão de joelho deste dispositivo.*

Palavras-chave: *Diodo. Curva característica. Solução Numérica. Modelo Matemático. Temperatura.*

1 INTRODUÇÃO

Parte dos problemas existentes nas Engenharias possui, basicamente, a ideia de solucionar equações (equações algébricas, diferenciais, parciais, integro-diferenciais, etc.) que expliquem os fenômenos que estão sendo verificados/avaliados através da linguagem matemática (ZILL, 2011).

Em geral, o diodo é um componente semiconductor de suma importância na área da eletrônica, com várias aplicabilidades, dentre as quais, a mais utilizada na área da engenharia elétrica é atuar como um retificador, ou seja, converter tensão alternada em contínua. Na

literatura empregada para o ensino de resolução de circuitos elétricos com a presença do diodo de silício, considera-se um valor fixo na queda de tensão para este dispositivo de 0,7 V, visto que, para esse valor de tensão, o diodo passa a conduzir corrente elétrica quando diretamente polarizado, ou seja, a corrente flui do anodo para o catodo.

Levando em consideração a grande importância da abordagem teórica e prática deste dispositivo no ensino da engenharia elétrica, o presente artigo se refere a uma investigação matemática das equações não lineares, das curvas características, tensão versus corrente que regem o comportamento do diodo, com auxílio de ferramentas computacionais no intuito de executar simulações numéricas satisfatórias, considerando, fatores externos que podem influenciar no comportamento da passagem de corrente elétrica e queda de tensão neste componente no momento da condução, tais como, a resistência presente no circuito e a variação da temperatura ambiente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Malvino (2012), o diodo é um dispositivo eletrônico com comportamento não linear, o seu funcionamento de uma forma simplificada é conduzir corrente apenas em um sentido, assim bloqueando no sentido oposto, além disso, o mesmo passa por um processo chamado de dopagem no meio da construção, que é um meio de aumentar a condutividade do componente, adicionando impurezas trivalentes (possuem 3 átomos na camada de valência) e pentavalentes (possuem 5 átomos na camada de valência) ao silício fundido. A temperatura é um fator que influencia diretamente na condutividade do diodo, pois o dispositivo em questão é constituído por um material chamado de silício, e sendo assim, quando ocorre um aumento de temperatura, o aquecimento deste ambiente provoca uma agitação no cristal de silício. Ainda, quanto maior a temperatura ambiente, maior a vibração mecânica dos átomos, que consequentemente pode acarretar em um deslocamento dos elétrons da órbita de valência. Quando isso ocorre, o elétron liberado ganha energia suficiente para mudar para outra órbita mais externa, dessa maneira o elétron se torna livre. Por conseguinte, quanto maior a quantidade de elétrons livres, maior é a condutividade do semicondutor.

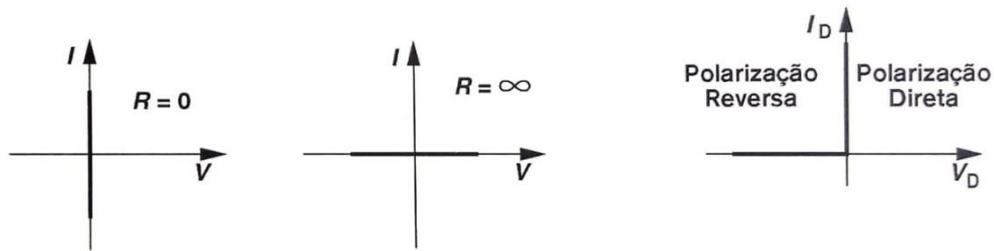
Em suma, "A corrente de saturação reversa I_s , terá sua amplitude praticamente dobrada para cada aumento de 10 °C na temperatura" (BOYLESTAD, 2004, p. 12).

Para Malvino (2012) este semicondutor é constituído por duas partes: o anodo e o catodo, entre ambas possuem uma barreira de potencial, mais conhecido como camada de depleção. O diodo pode ser polarizado de duas maneiras, diretamente, quando o terminal positivo da fonte é conectado ao anodo e o negativo da fonte ao catodo do diodo. Essa é a configuração onde o diodo conduz corrente. A outra forma de polarização é a reversa, quando o terminal positivo da fonte está conectado ao catodo do diodo, e, consequentemente, o negativo da fonte está conectado ao anodo do diodo.

Segundo Boylestad (2004), o diodo em uma situação ideal se comporta como um curto circuito na região de condução e um circuito aberto na região reversa.

A Figura 1 representa o comportamento gráfico de um diodo ideal.

Figura 1 – Comportamento na região direta e reversa de um diodo ideal.

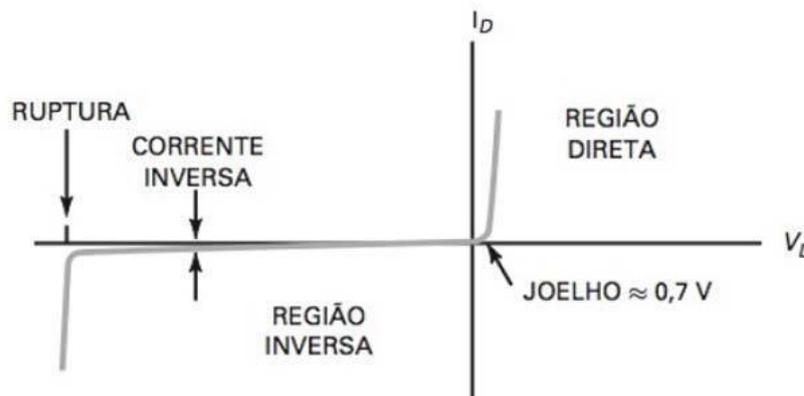


Fonte: Razavi, 2013.

Nas palavras de Razavi (2013), o diodo diretamente polarizado, corresponde a uma resistência tendendo a 0 e reversamente polarizado, corresponde a uma resistência tendendo ao infinito.

Na Figura 2, tem-se uma representação do comportamento do diodo real.

Figura 2 – Comportamento do diodo real na região direta e reversa.

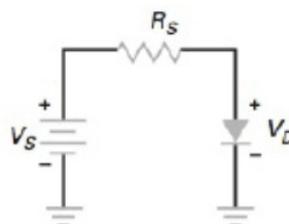


Fonte: Malvino, 2012.

Malvino (2012) declara que a região direta é quando o diodo está diretamente polarizado, porém, o diodo de silício só começa a conduzir, quando a tensão em cima do mesmo é de aproximadamente 0,7 V, pois isso faz com que os elétrons livres ganhem energia suficiente para vencer a camada de depleção. Já a região caracterizada reversa, é quando o diodo está inversamente polarizado, assim, bloqueando qualquer passagem de corrente, ele opera em uma faixa de tensão até um valor máximo que é chamado de tensão de ruptura.

O circuito mais elementar com um diodo pode ser visto na Figura 3:

Figura 3 – Circuito composto por diodo, resistor e uma fonte.



Fonte: Malvino, 2012.

Em que é composto por um diodo em série com um resistor e alimentado por uma tensão V_s . Segundo Smith (2004), aplicando a lei de Kirchhoff em uma malha fechada composta por: uma fonte de tensão V_{DD} em série com um diodo e um resistor R tem-se a Equação (1), onde V_D é a tensão no diodo e I_D a corrente no diodo.

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} \quad (1)$$

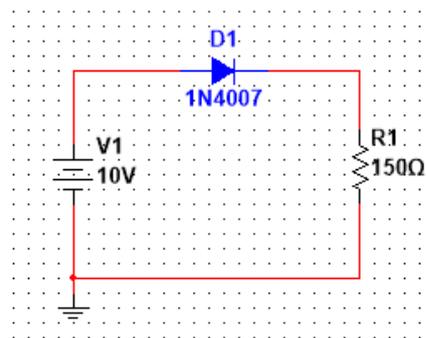
Ainda, de acordo com Smith (2004), a corrente do diodo é descrita pela Equação (2), onde I_D é a corrente do diodo, I_S é a corrente de saturação, V_D é a tensão do diodo, n é o fator de idealidade e V_T é uma constante que relaciona a carga do elétron, a temperatura e a constante de Boltzmann.

$$I_D = I_S e^{V_D/nV_T} \quad (2)$$

3 METODOLOGIA EMPREGADA/MÉTODOS

Primeiramente, adotou-se o circuito para estudo representado pela Figura 4:

Figura 4 – Circuito elementar diodo e resistor.



Fonte: Autoria própria (2018).

Este é um circuito simples, somente composto por um diodo modelo 1N4007 e um resistor de $10\text{ k}\Omega$ em série, alimentado por uma fonte de tensão.

Para a coleta dos dados experimentais, utilizou-se um Multímetro (Amperímetro) em série com o resistor e o diodo para medir a corrente que passava pelo diodo e um Multímetro (Voltímetro) em paralelo com a diodo a fim de medir a tensão no diodo.

Em seguida, a fonte foi ajustada em 0 V e variou-se a mesma até $10,5\text{ V}$, em intervalos de $0,3\text{ V}$, em seguida, variou-se a tensão de alimentação do circuito até 20 V , em intervalos de $0,5\text{ V}$, totalizando um valor de 55 valores de corrente e 55 valores de tensão.

Por conseguinte, foi mantido o mesmo circuito, porém o valor da resistência foi alterado para $20\text{ k}\Omega$. A princípio, o procedimento foi o mesmo do circuito com o resistor de $10\text{ k}\Omega$, ou seja, a tensão de alimentação foi variada de 0 à $10,5\text{ V}$, em intervalos de $0,3\text{ V}$, em seguida,

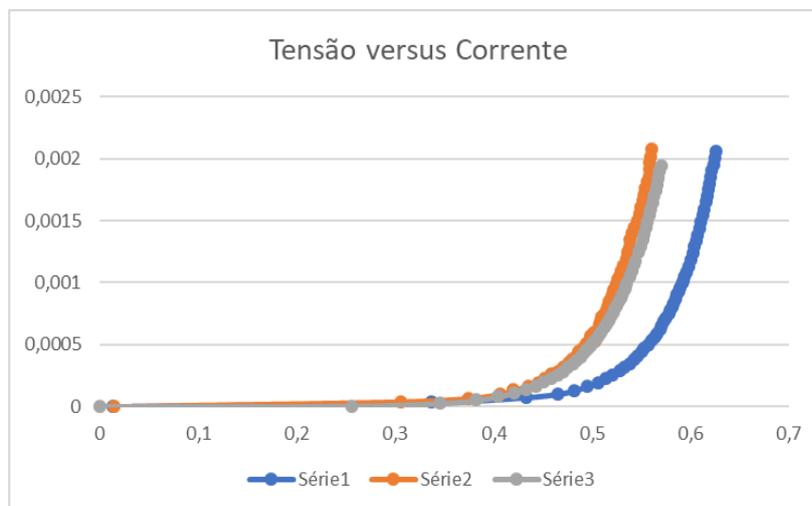
em intervalos de 0,5 V até que a tensão da fonte atingiu um valor de 20 V e por fim, variou-se a tensão em intervalos de 1 V, até que a tensão da fonte obteve um valor de 30 V. Nesta última configuração com uma resistência maior, optou-se por coletar uma faixa de dados com um valor de tensão até 30 V, devida a resistência ser alta e a fim de obter dados suficientes para plotagem de um gráfico com mais pontos para melhor análise totalizando um valor de 65 valores de corrente e 65 valores de tensão. A coleta de dados para o circuito de 10 kΩ parou com uma tensão de 20 V devido a dois fatores: a quantidade de dados foi o suficiente para a plotagem do gráfico e preservação dos componentes eletrônicos do circuito, visto que, neste caso a resistência era menor.

Para os dados teóricos, foi tomado como base o simulador de circuitos eletrônicos Multsim, onde o circuito da Figura 4 foi montado e os dados foram coletados utilizando o mesmo processo da coleta de dados experimentais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados teóricos e experimentais obtidos foi possível plotar o gráfico, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Gráfico tensão versus corrente circuito elementar do diodo com resistor de 10 kΩ.



Fonte: Autoria própria (2018).

O gráfico representado pela Figura 5 é referente ao primeiro circuito analisado em laboratório, um circuito elementar constituído por um diodo modelo 1N4007 em série com um resistor de 10 kΩ.

Como se pode notar, o gráfico possui três curvas: a curva plotada em azul se refere aos valores experimentais com uma temperatura ambiente de 27 °C, a curva plotada em laranja se refere aos valores experimentais com uma temperatura de aproximadamente 59 °C e a curva plotada em cinza se refere aos valores teóricos.

Primeiramente, pode-se observar que a curva em azul possui uma tensão de joelho de aproximadamente 0,6 V, o que é esperado com a literatura. Visto que, de acordo com a Lei de Ohm, a resistência limita a passagem de corrente elétrica, em outras palavras, quanto maior a resistência, menor é a corrente que o diodo irá conduzir e, conseqüentemente, menor será a

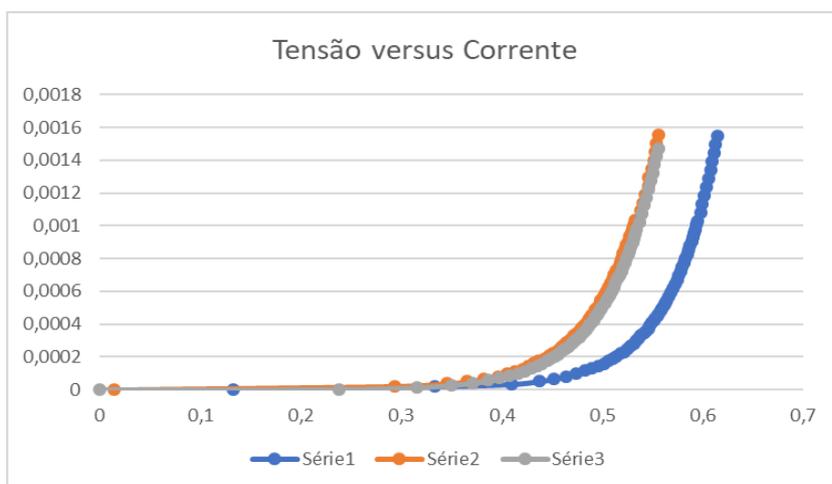
tensão de joelho. Outra observação relevante, é que existe uma pequena diferença entre os valores de corrente elétrica experimental e teórico, como por exemplo, para um valor de tensão de alimentação do circuito de 20 V, obtém-se uma corrente experimental de 0,002058 A, enquanto o valor teórico é de 0,001943 A, o que pode ter sido ocasionado pela imprecisão dos instrumentos de medição e até mesmo pelos próprios componentes eletrônicos. Visto que, o resistor de 10 k Ω possui uma tolerância informada pelo fabricante de 5%, o nível de dopagem do diodo pode ter contribuído para tal diferença. Além disso, existe a imprecisão entre o valor da tensão informada no visor e o valor de tensão de saída da fonte fornecida.

Já a curva em laranja, percebe-se que os valores de corrente são praticamente iguais, porém, há uma diferença considerável nos valores de tensões entre as curvas laranja e azul, levando em consideração que a resistência do circuito foi a mesma, a única variável que foi alterada entre estas duas análises foi a temperatura, o que remete uma análise da tensão térmica V_T , presente na Equação (2), que depende de três fatores, a constante de Boltzmann, a carga do elétron e uma única variável, a temperatura, visto que este fator influencia diretamente na condutividade do material, quanto maior a temperatura, menor a tensão necessária para que o dispositivo passe a conduzir visto que a energia térmica tem a capacidade de quebrar algumas ligações covalentes da estrutura, acarretando no aparecimento de mais portadores livres para a condução de corrente elétrica, ainda, como o comportamento é uma função exponencial com a variável temperatura no seu expoente, logo, com a alteração da temperatura, tem-se um deslocamento da curva característica do diodo, ainda, através desta análise, percebe-se que, quanto maior a temperatura, maior o deslocamento do gráfico para esquerda.

Por fim, a diferença de deslocamento entre as curvas da temperatura ambiente (azul) e a teórica (cinza), pode ter sido ocasionada devido ao software de simulação (Multisim) levar em consideração um valor de temperatura fixo nos cálculos internos, o qual foi diferente do valor da temperatura no dia da coleta de dados.

Novamente, manteve-se a mesma configuração utilizando o diodo modelo 1N4007, trocando somente o valor da resistência para 20 k Ω , logo em seguida, os dados experimentais e teóricos foram obtidos e por fim traçado as curvas como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico tensão versus corrente circuito elementar do diodo com resistor de 20 k Ω .



Fonte: Autoria própria (2018).

De acordo com o Figura 6, o gráfico possui três curvas: a primeira em azul foi plotada com os valores experimentais em temperatura ambiente, a segunda em laranja foi plotada com

os valores experimentais com uma variação de temperatura de aproximadamente 32 °C e a terceira em cinza foi plotada com os valores teóricos.

A curva em azul percebe-se que a tensão de joelho é entre 0,5 e 0,6 V, um pouco menor da situação anterior do circuito com uma resistência 10 k Ω , essa diferença ocorre justamente pelo aumento da resistência para 20 k Ω . Por conseguinte, pode-se observar que, existe uma pequena diferença no valor da corrente elétrica teórica e experimental para uma tensão de alimentação de 30 V, sendo ambas 0,001472 e 0,001545 A respectivamente, isso pode ter acontecido, como explicado anteriormente, por imprecisão dos instrumentos de medição e/ou porcentagem de tolerância dos componentes eletrônicos.

Ainda vale salientar que o deslocamento entre as curvas azul e laranja é esperado, pois o circuito foi submetido a uma temperatura por volta de 59 °C para a coleta dos dados da curva laranja, sendo que a temperatura ambiente estava por volta de 27 °C quando foram coletados os dados da curva azul.

Novamente, a diferença de deslocamento entre as curvas da temperatura ambiente (azul) e a teórica (cinza), pode ter sido ocasionada devido ao software de simulação (Multisim) levar em consideração na sua programação para cálculos internos, um valor de temperatura fixo diferente ao valor da temperatura coletado no dia da coleta de dados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos resultados apresentados, pode-se concluir alguns pontos, tanto a temperatura quanto a resistência foram fatores que influenciaram no comportamento não linear da curva característica, pois em todos os casos apresentados, houve um deslocamento da curva quando comparados aos valores experimentais em temperatura ambiente e teóricos, o surgimento desta diferença, pode ser devido o valor da temperatura da ferramenta computacional (Multisim) seja diferente da temperatura ambiente do dia da coleta dos dados. Por conseguinte, a influência da temperatura no comportamento do diodo, fica evidente nas diferenças entre as curvas azul e laranja, presente nas Figuras 5 e 6, pois os dados foram coletados no mesmo dia e em temperaturas distintas o que ocasionou deslocamento.

Outro fator que se pode observar, é que quanto maior o valor da resistência presente no circuito, menor é o valor da tensão de joelho, pois com a presença de uma resistência de 10 k Ω em série com o diodo, observa-se que a tensão de joelho foi por volta de 0,6 V, que é um valor próximo apresentado na literatura, porém, conforme o valor da resistência aumenta, como foi visto na situação onde a resistência do circuito é equivalente a 20 k Ω , o valor da tensão de joelho diminui.

Na presente pesquisa, toda a análise experimental já foi finalizada até o momento, tendo em vista como objetivos específicos a partir de agora, através dos métodos numéricos e ferramentas computacionais: comparar e ajustar soluções numéricas com os dados reais; investigar a relação do deslocamento da posição da curva característica com a alteração da temperatura.

Diante dos fatores externos que influenciam no comportamento do diodo, o presente artigo objetivou, de forma prática, a investigar tais influências como a temperatura e resistência. Desta forma, este trabalho contribui para a educação em engenharia na perspectiva experimental, visto que, o que é apresentado na literatura são situações ideais, o qual não ocorre nos experimento, logo, é de suma importância mostrar aos estudantes de engenharia que é normal encontrar resultados com uma margem de erro entre os valores práticos e experimentais. Ademais, esta pesquisa teve como base o estudo para o ajuste de

solução numérica para as situações onde o diodo está sob temperatura ambiente e temperatura elevada e a determinação de um fator de correção do deslocamento da curva característica deste semiconductor com uma temperatura elevada.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal da Bahia (IFBA) pela bolsa de Iniciação Científica do PIBIC.

REFERÊNCIAS

ZILL, Dennis G. **Equações diferenciais com aplicações em modelagem**. 9ª edição, São Paulo: Cengage Learning, 2011.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 8ª edição, São Paulo: Pearson, 2004.

RAZAVI, Behzad. **Fundamentos de Microeletrônica**. 1ª edição, Rio de Janeiro: Gen, 2013.

BATES, David J.; MALVINO, Albert. **Eletrônica**. Porto Alegre: Bookman. 2012.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. São Paulo: Pearson. 2004.

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE CHARACTERISTIC CURVE OF THE DIODE FOR THE OBTENTION OF A NUMERICAL SOLUTION OF THE REAL MODEL.

Abstract: *The behavior of the diode and the factors influencing it have been studied since its inception, to better apply it in electronics since it is a fundamental component. In this way, it questions: how to obtain a numerical solution of the characteristic curve of this electronic component, taking into account the circuit resistivity and temperature? The objective is to apply / evaluate mathematical models that study electrical circuits with diode insertion, using computational tools in order to perform satisfactory numerical simulations. Thus, a bibliographic survey is carried out, and a quantitative analysis of data is also used (Multisim) for the collection of theoretical data and will use the software (MATLAB), later, for the application of the numerical method with accuracy. The research demonstrates that both resistance and temperature are variables that influence the diode characteristic curve, because through the graphical analysis, the higher the ambient temperature, the greater the displacement of the diode characteristic curve to the right, and the higher the resistance of the circuit, the lower the knee tension of this device.*

Key-words: *Diode. Characteristic curve. Numerical Solution. Mathematical Model. Temperature.*