

O ESTUDO DOS NÍVEIS DE RESISTÊNCIA DE UM DIODO SEMICONDUTOR COMO CONTEXTO PARA A ABORDAGEM DE FUNÇÃO, LIMITE E DERIVADA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4468

Eloiza Gomes - eloiza@maua.br
IMT

Barbara Lutaif Bianchini - barbaralb@gmail.com
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo

Gabriel Loureiro de Lima - gloureirolima@gmail.com
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo

Resumo: *A preocupação com o ensino e a aprendizagem de Matemática em cursos de Engenharia nos levou a buscar caminhos alternativos que possam motivar os estudantes a perceber a importância desta ciência em suas formações. Nesse artigo apresentamos detalhadamente a análise de um evento contextualizado (problema vinculando a Matemática com outra área de conhecimento, no caso a Eletrônica Analógica) que elaboramos a partir de subsídios teóricos e metodológicos da Teoria A Matemática no Contexto das Ciências, no intuito de analisar os níveis de resistência de um diodo semiconductor operando em corrente contínua e em corrente alternada. O objetivo do evento contextualizado, planejado tendo como público-alvo estudantes ingressantes, é explorar os conceitos de limite e de derivada de uma função real de uma variável real, além de exercitar a habilidade de análise de representações gráficas de funções. Apresentamos ainda, como uma sugestão para o leitor que desejar implementar o evento, uma proposta de organização didática.*

Palavras-chave: *eletrônica analógica, níveis de resistência de um diodo semiconductor, matemática, função, limite, derivada.*

O ESTUDO DOS NÍVEIS DE RESISTÊNCIA DE UM DIODO SEMICONDUTOR COMO CONTEXTO PARA A ABORDAGEM DE FUNÇÃO, LIMITE E DERIVADA

1 INTRODUÇÃO

Em nossas pesquisas relacionadas à Educação em Engenharia, temos adotado, como subsídio a Teoria A Matemática no Contexto das Ciências (TMCC), elaborada pela pesquisadora mexicana Patricia Camarena Gallardo. Na estratégia didática inerente a este referencial, o principal instrumento é denominado de *evento contextualizado* (doravante indicado por EC), um problema ou um projeto articulando a Matemática com outras áreas do conhecimento.

Desde que passamos a nos preocupar com o ensino e com a aprendizagem de Matemática em cursos de Engenharia, temos buscado meios de abordar esta ciência de forma contextualizada, já desde o ingresso do estudante no ensino superior. E, neste sentido, a elaboração, a implementação e a análise de EC tem sido o foco central de nossas investigações.

Um destes eventos por nós elaborados teve como contexto o estudo da curva característica de um diodo semicondutor para a revisita às funções reais de uma variável real, particularmente as exponenciais. Os resultados de sua implementação com um grupo de estudantes do 1º ano de um curso de Engenharia e o impacto positivo deste trabalho na percepção de tais sujeitos, evidenciou a potencialidade deste contexto para explorar outros conceitos matemáticos. Alguns destes resultados, analisados sob diferentes perspectivas teóricas, estão detalhadamente apresentados em Gomes, Bianchini e Lima (2021a), Bianchini, Gomes e Lima (2022), Lima, Bianchini e Gomes (2022), Gomes, Bianchini e Lima (2022) e Bianchini, Gomes e Lima (no prelo).

Analisando mais a fundo a questão do estudo de um diodo semicondutor, percebemos que outros conceitos matemáticos poderiam ser explorados a partir deste contexto. Especialmente, ao analisar os níveis de resistência deste dispositivo eletrônico, em corrente contínua e em corrente alternada, além de continuar sendo necessário recorrer ao conceito de função, são requeridas ideias vinculadas ao conceito de limite e à aplicação do conceito de derivada.

Optamos então por elaborar um EC dando continuidade ao anteriormente formulado, de modo que, após revisitar as funções reais de uma variável real, a partir do contexto do estudo da curva característica de um diodo, para explorar os níveis de resistência estática (em corrente contínua) e dinâmica (em corrente alternada) do referido dispositivo eletrônico. Os estudantes pudessem mobilizar conhecimentos acerca de limite e de derivada, além de exercitar a habilidade de análise de representações gráficas de funções.

Neste artigo, além de explicitar alguns elementos do referencial teórico que subsidiou o trabalho, apresentamos o EC elaborado, uma sugestão para sua implementação (que deve ser por nós realizada no segundo semestre de 2023) com uma proposta de organização didática – contemplando uma atividade de preparação prévia e uma série de questões norteadoras – e que conceitos matemáticos podem ser explorados – e de que modo – a partir de tal organização.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

Do ponto de vista teórico, a elaboração do EC que apresentamos neste artigo, sustentou-se por preceitos da TMCC (CAMARENA, 2021), quadro teórico elaborado especialmente para subsidiar reflexões acerca do ensino e da aprendizagem de Matemática em cursos de graduação que não tem por objetivo formar matemáticos, como é o caso da Engenharia. Neste referencial, o ambiente de ensino e de aprendizagem é considerado um sistema complexo. Este é constituído por cinco subsistemas, profundamente interconectados, que são considerados as fases da teoria que, por sua vez, denominam-se: curricular, epistemológica, didática, docente e cognitiva. Para maiores esclarecimentos acerca deste referencial, sugerimos a consulta à Camarena (2021) e Lima, Bianchini e Gomes (2022). Neste artigo, tecemos maiores considerações acerca de duas destas fases: a epistemológica e a didática.

A elaboração de um EC é uma atividade inerente à fase epistemológica, na qual, por meio de uma série de procedimentos metodológicos específicos (LIMA; BIANCHINI; GOMES, 2021), busca-se compreender a vinculação entre o conteúdo matemático com o qual se deseja trabalhar e uma determinada área específica do curso em que ele será utilizado. Em nosso caso, decidimos, *a priori*, que daríamos continuidade ao contexto explorado em um evento anterior: a Eletrônica Analógica e, mais especificamente, o estudo do comportamento de um diodo semicondutor. Analisamos então como esse assunto é tratado no livro adotado como referência em cursos de Engenharia de Controle e Automação (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013) e de que modo, nesta abordagem, são mobilizados os conhecimentos relativos a aspectos da noção de limite e da aplicação de derivada de uma função real de uma variável real. Tendo por base este tratamento presente na mencionada obra, elaboramos o EC com o qual trabalharíamos. E, no intuito de possibilitar aos estudantes uma aproximação gradual à sua solução, elaboramos uma série de questões norteadoras para serem trabalhadas nos diferentes momentos que comporiam a organização didática que proporíamos para o EC.

Para organizar didaticamente o EC e, posteriormente desenvolvê-lo em sala de aula (ressaltando-se que no caso deste evento descrito, essa etapa ainda não ocorreu, estando prevista para o segundo semestre de 2023), recorreremos ao que é preconizado na fase didática da TMCC e, especificamente, ao modelo didático a ela atrelado: Modelo Didático da Matemática em Contexto (MoDiMaCo). De modo consonante ao MoDiMaCo, planejamos que o trabalho com as questões norteadoras que subsidiarão a resolução do EC seja desenvolvido em grupos compostos por estudantes com diferentes estilos de aprendizagem, visando uma efetiva e rica colaboração entre estes integrantes. Maiores detalhes acerca do MoDiMaCo e da composição dos grupos de estudantes podem ser obtidos em Lima et al. (2021). Passemos então à apresentação do EC e da organização didática para ele proposta.

3 O EC E UMA PROPOSTA DE ORGANIZAÇÃO DIDÁTICA

Como resultado da implementação dos procedimentos metodológicos inerentes à fase epistemológica da TMCC anteriormente apresentados, elaboramos o EC explicitado no Quadro 1.

Quadro 1 – O EC relativo aos níveis de resistência (EC2)

Evento Contextualizado: Considere um diodo semiconductor de silício do modelo 1N4148 operando à uma temperatura de 25°C e à uma corrente direta de 30 mA. Assumindo que, nesta temperatura, a corrente de saturação reversa é determinada tomando por base uma tensão de polarização reversa de 20 V e que para conduzir uma corrente direta de 10 mA, o diodo 1N4148 necessita, em geral, de uma tensão direta de 0,86 V:

- (i) Determine os níveis de resistência, considerando esses dois tipos de corrente, no ponto de operação de 30 mA.
- (ii) E se o mesmo diodo estivesse operando em 15°C e a uma corrente direta de 22 mA, quais seriam os níveis de resistência estática e de resistência dinâmica?

Fonte: elaborado pelos autores

Para o trabalho com este EC2, entendemos como essencial o estudante ter vivenciado a implementação do outro evento por nós elaborado (EC1), relacionado ao estudo da curva característica de um diodo semiconductor e apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – O EC relativo à curva característica (EC1)

Um diodo, assim como os demais componentes eletrônicos, precisa de certo tempo para passar do seu estado de condução para não condução; é o chamado tempo de recuperação do diodo. Muitas aplicações práticas exigem diodos que “se recuperem” com facilidade, isto é, que passem no mínimo intervalo de tempo possível do estado de condução para não condução. Um dos diodos de silício com essa característica é o 1N4148, um dos mais empregados na eletrônica e que possui tempo de recuperação de 4 nA. O *Datasheet* do diodo 1N4148 no qual são destacadas as características elétricas deste dispositivo pode ser acessado em <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/551820/WINNERJOIN/1N4148.html>.

Considere esse diodo 1N4148 submetido a uma corrente de 30 mA e determine a queda de tensão direta através dele e os valores aproximados de suas correntes de saturação nas seguintes temperaturas: - 45°C, 50°C e 125°C.

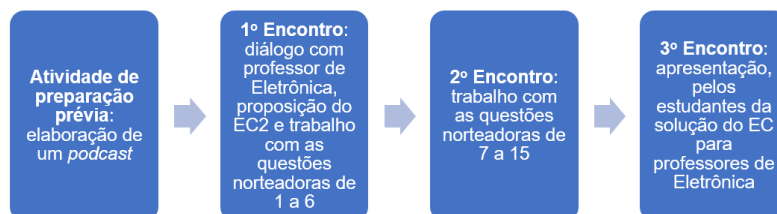
Por meio do estudo de conceitos relacionados à Física do Estado Sólido, demonstra-se que as características gerais de um diodo semiconductor podem ser relacionadas, para as regiões de polarização direta e reversa, por uma equação chamada equação de Shockley: $I_F = I_R \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)$. Nesta equação, I_F : corrente direta que passa pelo diodo, I_R : corrente de saturação reversa, V_F : tensão de polarização direta aplicada ao diodo, n : fator de idealidade, que depende das condições de operação e de construção física do diodo e V_T : tensão térmica, definida por: $V_T = \frac{kT_K}{q}$ em que k é a constante de Boltzmann cujo valor é $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, T_K é a temperatura absoluta em Kelvin, que é dada pela adição entre 273 e a medida da temperatura em graus Celsius, q é a magnitude da carga elétrica elementar, que é dada por $1,6 \times 10^{-19}$ C.

Fonte: Gomes, Bianchini e Lima, 2021a, p. 708

Detalhes acerca da potencialidade do EC1 para a exploração de conceitos matemáticos, de competências matemáticas e de competências gerais podem ser obtidos em Lima, Bianchini e Gomes (2021) e Gomes, Bianchini e Lima (2021b). Além disso, o detalhamento acerca da organização didática proposta para este EC1 está disponível em: <https://encurtador.com.br/ilnRZ>.

Em nossa visão, o EC2 poderia ser trabalhado pelo professor, em uma unidade curricular inicial de Cálculo Diferencial e Integral, após a revisita ao estudo de funções reais de uma variável real, momento que inclui o trabalho com o EC1, e uma primeira abordagem da ideia de derivada (que, na estrutura mais usual dos cursos de Cálculo, sucede à compreensão, ao menos intuitiva, do conceito de limite). Nossa sugestão para a organização didática do EC2 é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Organização didática para o EC2



Fonte: elaborado pelos autores

Como Atividade de preparação prévia, sugerimos que os estudantes elaborem um episódio de um *podcast* destinado à apresentação de conceitos de Eletrônica para um público leigo no assunto, mas assíduo no acompanhamento de tal *podcast* e, portanto, já conhecedor de tópicos anteriormente discutidos. Consideramos essa uma estratégia potencialmente interessante para engajar os estudantes em pesquisas relativas a temas diretamente vinculados e essenciais para o trabalho que será desenvolvido. As orientações para a elaboração do episódio do *podcast*, que levam em consideração os conhecimentos construídos pelos estudantes por meio do EC1, são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Orientações para a Atividade de preparação prévia

Atividade de preparação prévia: suponha que você seja o produtor/apresentador de um *podcast* de grande sucesso nas plataformas de *streaming*, no qual conceitos essenciais de Eletrônica são apresentados aos ouvintes de modo científico, mas em linguagem bastante acessível ao público leigo. Considere que, nos episódios anteriores, os ouvintes já tiveram a oportunidade de entrar em contato com as ideias que subsidiam a compreensão do que será discutido no presente episódio. Admita ainda que, no penúltimo episódio, as discussões centraram-se nas seguintes temáticas: materiais semicondutores, diodo, materiais intrínsecos, dopagem, materiais do tipo n e do tipo p , junção pn , polarização direta e reversa de um diodo, *datasheet* e principais aplicações de um diodo.

Assuma, por fim, que, o último episódio tenha sido dedicado às explicações acerca do fato de as características gerais de um diodo semicondutor poderem ser relacionadas, para as regiões de polarização direta e reversa, por uma equação chamada equação de Shockley e que, por meio de tais explicações e analisando a representação gráfica da função descrita pela equação de Shockley, o ouvinte tenha percebido que: (i) considerando uma dada temperatura, a corrente direta que passa pelo diodo depende da tensão de polarização direta nele aplicada, (ii) que a partir de um determinado valor de tensão de polarização direta, chamado de tensão de joelho, os valores da corrente direta passam a aumentar rapidamente; (iii) que à medida em que os valores da tensão de polarização direta decrescem ilimitadamente, os valores da corrente direta tendem a um valor denominado corrente de saturação do diodo; (iv) que a tensão de joelho é o ponto a partir do qual a corrente elétrica circula livremente pelo diodo; e (v) que o fator de idealidade de um diodo representa o quão próximo de um diodo ideal é um diodo real.

Elabore então o episódio atual contemplando as seguintes ideias:

- O que é resistência elétrica?
- De quais fatores dependem a resistência elétrica e como ela pode ser calculada?
- O que é corrente contínua? E corrente alternada?
- O que acontece ao aplicarmos uma tensão de corrente contínua a um diodo?
- O que acontece ao aplicarmos uma tensão de corrente alternada a um diodo?
- Considerando a função de um diodo semicondutor, idealmente qual deveria ser o comportamento da resistência elétrica durante a operação deste dispositivo eletrônico?

Finalizar o episódio convidando o ouvinte para o próximo, no qual se discutirá a fundo essa questão, comparando o funcionamento de um diodo real com o que é idealmente esperado de um dispositivo como este.

Fonte: elaborado pelos autores

Finalizadas as elaborações do episódio do *podcast*, as produções dos estudantes deveriam ser por eles disponibilizadas aos colegas e aos professores, por meio de um Ambiente Virtual de Aprendizagem (AVA). Todos então deveriam ouvir os episódios elaborados antes do primeiro encontro para o trabalho com o EC2.

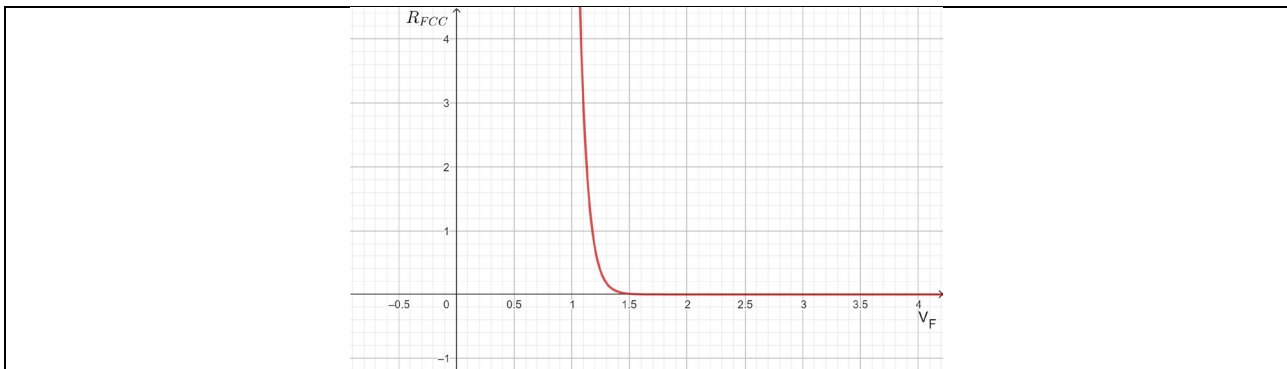
3.1 Descrição do 1º encontro

O primeiro encontro terá início com uma discussão acerca dos *podcasts* que já terão sido ouvidos por todos os estudantes, por nós professores de Matemática e pelo professor especialista em Eletrônica, que será nosso convidado neste primeiro encontro. A partir desta discussão, o professor de Eletrônica compartilhará suas considerações de modo a complementar ideias, corrigir possíveis erros conceituais e formalizar os conhecimentos construídos pelos estudantes durante a elaboração dos *podcasts* acerca das noções da área específica, fundamentais para a compreensão do trabalho que será desenvolvido.

Depois desta intervenção do docente da área específica relacionada ao EC, que desempenhará também um papel de reforço para os conhecimentos prévios necessários ao enfrentamento do evento, este será apresentado aos estudantes contendo as seis primeiras questões norteadoras que auxiliarão o processo de resolução do EC. Tais questões são explicitadas no Quadro 4, no qual indicam-se também seus objetivos e os conceitos matemáticos que serão explorados.

Quadro 4 – Questões norteadoras, objetivos e conceitos matemáticos relativos ao 1º encontro

Q1. Apresente a curva característica deste diodo.
Objetivo
Retomar a equação de Shockley, as grandezas nela envolvidas e seus valores para o diodo considerado, bem como a representação gráfica da função descrita pela mencionada equação.
Conceitos matemáticos que podem ser explorados
Conceito de função , variável dependente e de variável independente de uma função, representações algébrica e gráfica de uma função.
Q2. Que expressão pode ser utilizada para calcular os níveis de resistência deste diodo considerando que ele está operando em corrente contínua? Justifique sua resposta.
Objetivo
Mobilizar os conhecimentos construídos por meio da elaboração do <i>podcast</i> acerca das noções de resistência elétrica, de corrente contínua e da aplicação de uma tensão de corrente contínua em um diodo.
Conceitos matemáticos que podem ser explorados
Reconhecimento da variável da qual depende a resistência estática de um diodo (V_F). Estabelecimento de uma relação funcional entre resistência estática (R_{FCC}) e tensão direta (V_F). Representação algébrica de uma função, $R_{FCC} = \frac{V_F}{I_F} = \frac{V_F}{I_R \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)}$ e imagem da função R_{FCC} para um dado valor de V_F pertencente ao domínio da função .
Q3. Esboce a curva que representa a resistência estática (isto é, em corrente contínua) em função da tensão direta do diodo considerado.
Objetivo
Apresentar uma representação gráfica descrevendo o comportamento da resistência estática de um diodo na medida em que se variam os valores de tensão direta, em corrente contínua, aplicados a este dispositivo.
Conceitos matemáticos que podem ser explorados
Representação gráfica da função dada algebricamente por $R_{FCC} = \frac{V_F}{25 \times 10^{-9} \left(e^{\frac{V_F}{0,06666971475} - 1} \right)}$, a saber:



Q4. Considerando especificamente a região de polarização direta e a operação do diodo em corrente contínua, descreva o comportamento dos níveis de resistência, justificando cuidadosamente sua resposta.

Objetivo

Análise, a partir da representação gráfica, do comportamento, na região de polarização direta, da resistência estática de um diodo.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Análise e interpretação no primeiro quadrante da **representação gráfica** da função R_{FCC} . Determinação da **imagem da função** R_{FCC} para um dado valor V_F pertencente ao seu **domínio**. **Limite no infinito:** $\lim_{V_F \rightarrow \infty} \frac{V_F}{I_F}$, que pode ser explorado intuitivamente, percebendo que à medida em que os valores de V_F aumentam, os valores de I_F aumentam muito mais rapidamente, fazendo com que esse limite seja zero ou, dependendo dos conhecimentos prévios dos estudantes, algebricamente via **regra de L'Hospital**:

$$\lim_{V_F \rightarrow \infty} \frac{V_F}{I_F} = \lim_{V_F \rightarrow \infty} \frac{V_F}{I_R \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)} = \lim_{V_F \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{I_R}{nV_T} e^{\frac{V_F}{nV_T}}} = 0.$$

Q5. Qual o comportamento, na região de polarização reversa, dos níveis de resistência para o diodo operando em corrente contínua?

Objetivo

Análise, a partir da representação gráfica, do comportamento, na região de polarização reversa, da resistência estática de um diodo.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Análise e interpretação do terceiro quadrante da **representação gráfica** da função R_{FCC} . Determinação da **imagem da função** R_{FCC} para um dado valor V_F pertencente ao seu **domínio**. **Limite no infinito:** $\lim_{V_F \rightarrow -\infty} \frac{V_F}{I_F}$, que pode ser explorado intuitivamente, percebendo que, na região de polarização reversa, os valores de I_F são muito pequenos. Assim, à medida em que os valores de V_F decrescem (se tornam cada vez mais negativos), o limite indicado é infinito. Além disso, o limite mencionado pode ser determinado algebricamente: $\lim_{V_F \rightarrow -\infty} \frac{V_F}{I_F} = \lim_{V_F \rightarrow -\infty} \frac{V_F}{I_R \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)} = +\infty$.

Q6. A resistência em corrente contínua do diodo considerado depende da forma da curva característica na região que circunda o ponto de interesse (no caso 30 mA)? Por quê?

Objetivo

Finalizar o estudo da resistência estática de um diodo, compreendendo que, devido ao fato de a corrente ser contínua, não haverá variação, com o tempo, no ponto de operação do diodo (isto é, no valor considerado para a corrente I_F) e, desta forma, o que acontece na região que circunda o ponto de interesse não terá qualquer influência no comportamento do diodo.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Não há nenhum conceito matemático diferente dos já mencionados a ser explorado.

Fonte: elaborado pelos autores

Como pode ser observado por meio da análise do Quadro 4, as questões norteadoras que serão solucionadas no 1º encontro estão relacionadas exclusivamente ao caso do diodo operando em corrente contínua e, portanto, à determinação dos níveis de

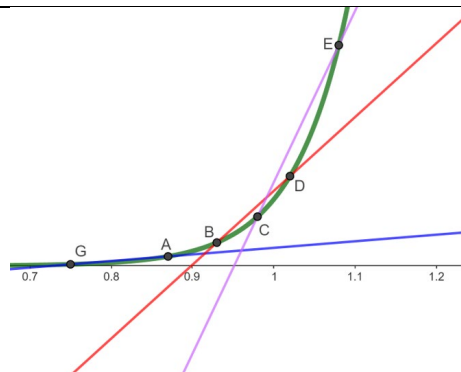
resistência estática deste componente eletrônico. O 2º encontro, por sua vez, será destinado às reflexões acerca da resistência dinâmica, conforme descrevemos a seguir.

3.2 Descrição do 2º encontro

No segundo encontro, os estudantes trabalharão com outras oito questões norteadoras, apresentadas no Quadro 5. Nestas, serão explorados os níveis de resistência dinâmica de um diodo, isto é, os valores da resistência no caso em que o diodo opera em corrente alternada.

Quadro 5 – Questões norteadoras, objetivos e conceitos matemáticos relativos ao 2º encontro

Q7. O que acontece com o ponto de operação instantâneo do diodo (no caso 30 mA) caso seja aplicada a ele uma corrente alternada ao invés de uma corrente contínua?
Objetivo
Perceber que o ponto de operação irá sofrer variações com o tempo, uma vez que a corrente será senoidal (isto é, alternada). Ou seja, uma entrada variável “moverá o ponto de operação instantâneo para cima e para baixo em uma região da curva característica” e, assim, definirá uma alteração específica em corrente e tensão.
Conceitos matemáticos que podem ser explorados
Representação gráfica de uma curva senoidal . Vizinhança de um ponto sobre uma curva que é a representação gráfica de uma função (no caso, a curva característica de um diodo semicondutor).
Q8. Que expressão pode ser utilizada para calcular os níveis de resistência deste diodo no caso em que opera em corrente alternada? Justifique sua resposta.
Objetivo
Retomar a ideia elaborada em Q7 e, a partir dela, perceber que, no caso de a operação do diodo ocorrer em corrente alternada, a resistência será obtida por meio de uma taxa de variação média.
Conceitos matemáticos que podem ser explorados
Taxa de variação média: é preciso considerar, neste caso, que a variação no ponto de operação produzirá variações na tensão (ΔV_F) e na corrente (ΔI_F) e, desta forma, adaptando a expressão para o cálculo da resistência estática, mas considerando agora não um valor V_F e um valor I_F , mas as variações em cada um desses valores decorrentes da entrada variável, teremos: $R_{FCA} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F}$.
Q9. Considerando especificamente a região de polarização direta e a operação do diodo em corrente alternada, descreva o comportamento dos níveis de resistência, justificando cuidadosamente sua resposta.
Objetivo
Análise, a partir da curva característica do diodo semicondutor, do comportamento, na região de polarização direta, da resistência dinâmica do diodo.
Conceitos matemáticos que podem ser explorados
Taxa de variação média; relação entre a razão incremental que possibilita a determinação da resistência dinâmica $R_{FCA} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F}$ e a inclinação da reta secante à curva característica do diodo semicondutor traçada pelos pontos (V_F, I_F) e $(V_F + \Delta V_F, I_F + \Delta I_F)$. Podemos observar que, quanto mais vertical a região da curva característica na qual o ponto de operação está variando, menor o valor de ΔV_F para a mesma variação em ΔI_F . Portanto, quanto menor o valor de ΔV_F para a mesma variação em ΔI_F teremos menor resistência. A resistência dinâmica (em corrente alternada) na região de elevação vertical da curva característica é, portanto, bem pequena, enquanto a resistência dinâmica é muito mais alta em baixos níveis de corrente.



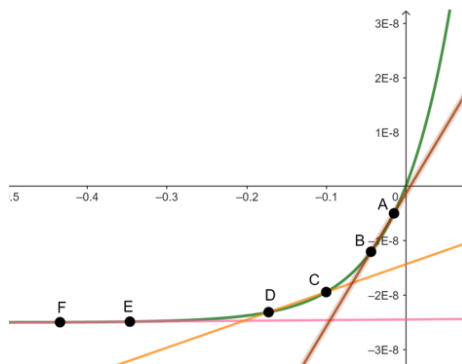
Q10. Qual o comportamento, na região de polarização reversa, dos níveis de resistência para o diodo operando em corrente alternada?

Objetivo

Análise, a partir da curva característica do diodo semiconductor, do comportamento, na região de polarização reversa, da resistência dinâmica do diodo.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Taxa de variação média; relação entre a **razão incremental** que possibilita a determinação da resistência dinâmica $R_{FCA} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F}$ e a **inclinação da reta secante** à curva característica do diodo semiconductor traçada pelos pontos (V_F, I_F) e $(V_F + \Delta V_F, I_F + \Delta I_F)$. Nota-se, deste modo que os níveis de resistência se tornam cada vez maiores à medida em que os valores da tensão reversa se tornam maiores em valor absoluto.



Q11. A resistência em corrente alternada do diodo considerado depende da forma da curva característica na região que circunda o ponto de interesse (no caso 30 mA)? Por quê?

Objetivo

Concluir, a partir do que percebeu em Q9 e Q10 que, ao contrário do que ocorre no caso da corrente contínua, se o diodo está operando em corrente alternada, a resistência depende da forma da curva característica na região que circunda o ponto de operação.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Vizinhança de um ponto sobre a curva característica do diodo; **inclinação de reta secante**. Percepção de que, ao considerar dois pontos vizinhos em uma região “quase vertical” da curva característica, a inclinação da reta secante à curva por estes dois pontos será significativamente maior do que a inclinação da reta secante obtida por dois pontos vizinhos em uma região “quase horizontal” da curva característica.

Q12. Do ponto de vista matemático, como poderíamos garantir que as alterações na corrente e na tensão sejam tão pequenas quanto possíveis na região que circunda o ponto de operação em foco (30 mA) no caso de operação em corrente alternada?

Objetivo

Determinar de maneira mais precisa possível a resistência dinâmica em um ponto de operação considerado, fazendo com as variações na corrente (e, conseqüentemente na tensão) sejam tão pequenas quanto se queira, ou seja, obtendo uma taxa de variação instantânea da tensão pela corrente.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Taxa de variação instantânea e limite de uma função em um ponto.

Para garantir o que se pede na questão, devem ser considerados pontos de operação tão próximos quanto se queira do ponto original, fazendo, para isso, $\Delta V_F \rightarrow 0$. Em outras palavras:

$$\lim_{\Delta V_F \rightarrow 0} \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \lim_{\Delta V_F \rightarrow 0} \frac{\Delta V_F}{I_R \left(e^{\frac{V_F + \Delta V_F}{nV_T}} - 1 \right) - I_R \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)}$$

Q13. Observando a Q11, determine a expressão que pode ser utilizada para calcular, com maior precisão do que a obtida em Q7, os níveis de resistência deste diodo no caso em que a corrente é alternada.

Objetivo

Determinar a expressão que possibilita obter a resistência dinâmica de um diodo em um dado ponto.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Definição de derivada de uma função em um ponto. **Cálculo, via regras de diferenciação, da derivada** de uma função (aquela que é representada pela equação de Shockley).

$$R_{FCA} = \lim_{\Delta V_F \rightarrow 0} \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \lim_{\Delta V_F \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\frac{\Delta I_F}{\Delta V_F}} \right) = \frac{1}{\lim_{\Delta V_F \rightarrow 0} \left(\frac{I_F(V_F + \Delta V_F) - I_F(V_F)}{\Delta V_F} \right)} = \frac{1}{I'_F}$$

Como $I_F = I_R \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right) \Rightarrow I'_F = \frac{I_R}{nV_T} e^{\frac{V_F}{nV_T}}$ e $R_{FCA} = \frac{1}{I'_F} = \frac{nV_T}{I_R e^{\frac{V_F}{nV_T}}}$

Para o diodo em questão operando em 30 mA, temos: $R_{FCA} = 2,66678859 \times 10^{-3} \cdot e^{-\left(\frac{V_F}{0,06666971475}\right)}$.

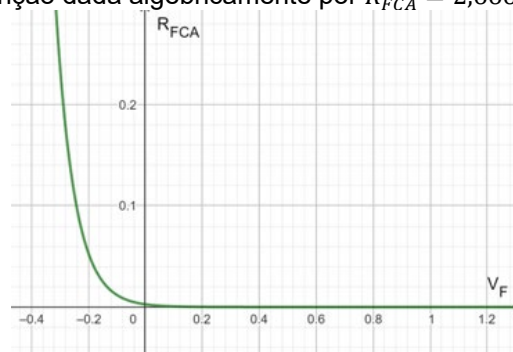
Q14. Esboce a curva que representa a resistência dinâmica em função da tensão do diodo considerado.

Objetivo

Apresentar uma representação gráfica descrevendo o comportamento da resistência dinâmica de um diodo quando se variam os valores de tensão direta, em corrente alternada aplicados a este dispositivo.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Representação gráfica da função dada algebricamente por $R_{FCA} = 2,66678859 \times 10^{-3} \cdot e^{-\left(\frac{V_F}{0,06666971475}\right)}$



Q15. Em um mesmo sistema de eixos cartesianos, esboce as curvas que representam as resistências estática e dinâmica, em função da tensão, do diodo considerado. O que você pode concluir analisando conjuntamente essas curvas?

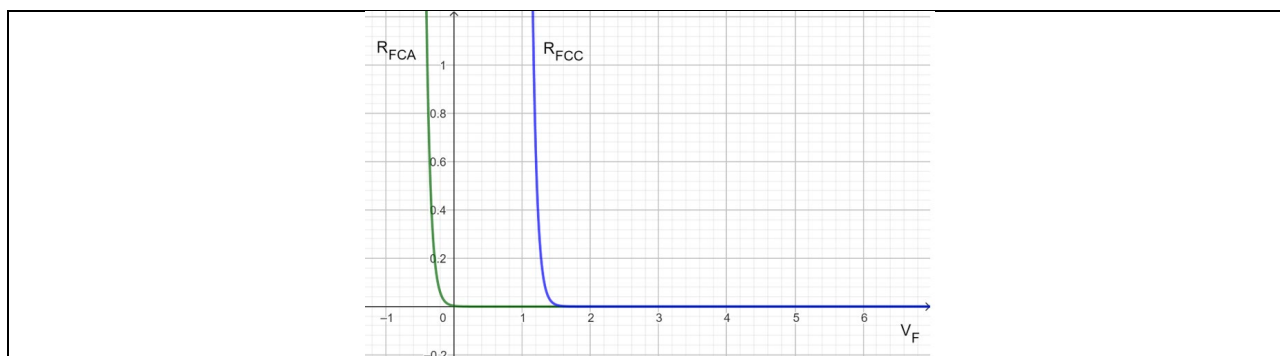
Objetivo

Analisar, comparativamente, por meio de suas representações gráficas os comportamentos dos níveis de resistência, em corrente contínua e em corrente alternada, de um diodo semiconductor.

Conceitos matemáticos que podem ser explorados

Representações gráficas das funções dadas algebricamente por

$$R_{FCC} = \frac{V_F}{25 \times 10^{-9} \left(e^{\frac{V_F}{0,06666971475}} - 1 \right)} \quad \text{e} \quad R_{FCA} = 2,66678859 \times 10^{-3} \cdot e^{-\left(\frac{V_F}{0,06666971475}\right)}$$



Fonte: elaborado pelos autores

Após esses dois encontros e tendo os estudantes respondido às quinze questões norteadoras, estes já estarão em condições de apresentar a efetiva solução do EC. Em nossa proposta de organização didática, a ideia é que, autonomamente os estudantes solucionem o EC antes do 3º encontro. Além disso, para esta ocasião, intencionamos que preparem uma pequena apresentação na qual explicitem a solução que encontraram e que destaquem os aprendizados, dificuldades e possíveis dúvidas que tenham surgido durante a atividade de preparação prévia e os encontros.

3.3 Descrição do 3º encontro

Esse encontro, que contará com a participação de professores da área de Eletrônica, terá início com a apresentação pelos estudantes das soluções que obtiveram para o EC, ou seja, com suas respostas para as seguintes questões:

- (i) Determine os níveis de resistência, considerando esses dois tipos de corrente, no ponto de operação de 30 mA .
- (ii) E se o mesmo diodo estivesse operando em 15°C e à uma corrente direta de 22 mA , quais seriam os níveis de resistência estática e de resistência dinâmica?

Para responder a estas questões, os estudantes, além de mobilizarem os conhecimentos relativos a conceitos específicos de Eletrônica Analógica que puderam introjetar durante a atividade de preparação prévia e dos encontros anteriores, precisarão recorrer, algébrica ou graficamente, ao conhecimento matemático de imagem de uma função em um ponto de seu domínio. No caso, precisarão determinar as imagens das funções R_{FCA} e R_{FCC} em pontos particulares de seus respectivos domínios, a saber o valor de V_F correspondente ao ponto de operação de 30 mA (na questão (i)) e de 22 mA (na questão (ii)). Em relação especificamente à questão (ii), será necessário ainda determinar o valor da imagem da função tensão térmica (V_T) para a temperatura de 15°C . Os estudantes precisarão também recorrer à equação de Shockley e resolvê-la considerando $I_F = 22 \text{ mA}$ para determinar o valor de V_F relativo a esta corrente. Concluídas essas etapas, os próximos passos da solução serão os mesmos empregados na questão (i).

Após as apresentações, os professores convidados farão seus apontamentos acerca do que ouviram e sinalizarão – buscando esclarecer – possíveis equívocos ou incompreensões dos estudantes a respeito dos conceitos específicos. Por sua vez, os proponentes do EC farão uma síntese dos conceitos matemáticos trabalhados durante a atividade e responderão às possíveis dúvidas desta natureza que, porventura, surgirem.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nossa experiência com a elaboração e a aplicação de EC para alunos ingressantes em cursos de Engenharia tem evidenciado que este trabalho é bastante promissor para os estudantes, para os professores que o elaboram e para aqueles que só irão implementá-lo.

Os estudantes, quando expostos a vivências como esta, se tornam mais participativos, assumem uma postura mais ativa e de maior responsabilidade em seu processo de aprendizagem, além de adquirirem mais clareza acerca das conexões entre diferentes conceitos da Matemática e de tópicos desta ciência com outras áreas do conhecimento. Por meio de organizações didáticas adequadamente planejadas, podem ser incentivados a produzir diferentes tipos de materiais para verificação de suas aprendizagens, como *podcasts*, vídeos e apresentações. Momentos como o previsto para o primeiro encontro do EC apresentado, nos quais estudantes ingressantes podem entrar em contato com professores especialistas que lhes darão aulas em semestres subsequentes, oportunizam a eles compartilhar ideias com futuros colegas de profissão de "igual" para "igual": um engenheiro dialogando com um futuro engenheiro. A nosso ver, esse tipo de interação, desde o início do curso, pode trazer benefícios para a formação dos graduandos.

É relevante salientar que, muitas vezes, os estudantes se mostram admirados ao se depararem, nestas atividades, com certos conceitos matemáticos já estudados por eles no Ensino Médio ou no início do curso superior. Ao perceberem uma situação efetivamente real na qual tais conceitos podem ser aplicados, atribuem a estes novos significados.

Para o docente ou pesquisador que irá elaborar um EC, apresenta-se um desafio, uma vez que necessariamente precisará buscar conhecimentos de áreas diferentes de sua formação principal. Este desafio, no entanto, pode ser convertido em uma oportunidade de ampliar seus horizontes e de ser catalizador para o estabelecimento de diálogos mais constantes com docentes de outras áreas.

O professor que desenvolverá as atividades, por sua vez, obrigará-se a planejar com maior atenção elementos de mediação para auxiliar os estudantes, mas sem lhes dar respostas prontas, potencializando ainda os seus engajamentos no processo de solução do problema.

Esperamos que este artigo possa inspirar professores e pesquisadores para que deem continuidade a esta desafiadora, mas importante tarefa de vincular conceitos matemáticos e conceitos da área específica durante todo o processo formativo do estudante.

REFERÊNCIAS

BIANCHINI, Barbara Lutaif; GOMES, Eloiza; LIMA, Gabriel Loureiro de. Uma abordagem contextualizada da matemática na engenharia: as potencialidades das perguntas dos professores. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 3, 2022, p. 1-28.

BIANCHINI, Barbara Lutaif; GOMES, Eloiza; LIMA, Gabriel Loureiro de. Uma atividade contextualizada na Eletrônica Analógica e o enfrentamento de obstáculos epistemológicos relativos à noção de função: uma análise a partir de *podcasts* produzidos por futuros engenheiros. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, 9, 2022, São Paulo. **Anais**. no prelo.

BOYLESTAD, Robert L., NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

CAMARENA, Patricia. **Teoría de la matemática en el contexto de las ciencias**. 1a ed. - Santiago del Estero: EDUNSE, 2021.

GOMES, Eloiza; BIANCHINI, Barbara Lutaif.; LIMA, Gabriel Loureiro de. Desenvolvimento de competências matemáticas e competências gerais por meio de uma atividade contextualizada no estudo de um diodo semicondutor. In: XLIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – Associação Brasileira de Educação em Engenharia, 2021, **Anais**. Evento Online, p. 01-14, 2021b.

GOMES, Eloiza; BIANCHINI, Barbara Lutaif; LIMA, Gabriel Loureiro de. As potencialidades das perguntas dos professores em uma abordagem contextualizada da Matemática na Engenharia. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, 8., 2021, Uberlândia. **Anais**. Uberlândia, Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2021a, p. 699-717.

LIMA, Gabriel Loureiro de, BIANCHINI, Barbara Lutaif, GOMES, Eloiza. Estudando a Curva Característica de um Diodo Semicondutor na disciplina inicial de Cálculo Diferencial e Integral: oportunidade para o desenvolvimento de competências matemáticas e gerais na Engenharia. In: ENCUESTRO NACIONAL Y XIV INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN MATEMÁTICA EN CARRERAS DE INGENIERÍA, 22., 2021, Montevideo. **Libro de Actas**. Montevideo, Uruguay: Universidad Católica del Uruguay, 2021. p. 178-189.

LIMA, Gabriel Loureiro de; BIANCHINI, Barbara Lutaif; GOMES, Eloiza; PHILLOT, Juliana Martins. Ensino da Matemática na Engenharia e as atuais Diretrizes Curriculares Nacionais: o Modelo Didático da Matemática em Contexto como possível estratégia. **Currículo sem Fronteiras**, v. 21, n. 2, 2021, p. 785-816.

LIMA, Gabriel Loureiro de; BIANCHINI, Barbara Lutaif; GOMES, Eloiza. Abordagem contextualizada da Matemática na Engenharia sob a perspectiva das disfunções cognitivas. **Acta Scientiae**, v. 24, n. 7, p. 35-77, 2022.

THE STUDY OF THE RESISTANCE LEVELS OF A SEMICONDUCTOR DIODE AS A CONTEXT FOR ADDRESSING FUNCTION, LIMIT, AND DERIVATIVE

Abstract: *The concern with the teaching and learning of Mathematics in Engineering Programs has led us to seek alternative ways that can motivate students to realize the importance of this science in their education. In this article we present in detail the analysis of a contextualized event (problem linking Mathematics with another area of knowledge, in this case Analog Electronics) that we developed from theoretical and methodological subsidies of the Theory of Mathematics in the Context of Science, to analyze the levels of resistance of a semiconductor diode operating in direct and alternating current. The objective of the contextualized event planned to have as target audience beginning students, is to explore the concepts of limit and derivative of a real function of a real variable, besides exercising the ability to analyze graphical representations of functions. We also present, as a suggestion to the reader who wishes to implement the event, a didactic organization proposal.*

Keywords: *analog electronics, resistance levels of a semiconductor diode, mathematics, function, limit, derivative.*