

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

SIMULAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS TRANSISTORES DE FILME
FINO

Isabela Bragança Roque

Prof.Dr. Lucas Fugikawa Santos

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ISABELA BRAGANÇA ROQUE

SIMULAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS
TRANSISTORES DE FILME FINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade Esta-
dual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para ob-
tenção do grau de Bacharel em Física.

Rio Claro – SP

2022

R786s Roque, Isabela Bragança
Simulação das curvas características dos transistores de filme fino /
Isabela Bragança Roque. -- Rio Claro, 2022
55 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Física) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e
Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Lucas Fugikawa Santos

1. Transistor de filme fino. 2. Simulação. 3. Software. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ISABELA BRAGANÇA ROQUE

SIMULAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS
TRANSISTORES DE FILME FINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Lucas Fugikawa Santos

Prof. Dr. Edson Denis Leonel

Prof. Dr. Fábio Simões de Vicente

Rio Claro, 11 de fevereiro de 2022.



Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) orientador(a)

Dedicatória

Dedico este trabalho de conclusão do curso de graduação em física aos meus familiares e amigos que acompanharam minha trajetória e agradeço principalmente a minha mãe que sempre me apoiou e me incentivou a ter serenidade para a realização deste sonho.

Isabela Bragança Roque

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer o professor Dr. Lucas Fugikawa Santos por todos os ensinamentos, apoio e prontidão que foram fundamentais para realização desse projeto.

Agradeço todos meus amigos da graduação, especialmente o Guilherme de Araujo Nogueira e o Vinicius Alencar de Lima que participaram ativamente do meu processo de formação, através do nosso grupo de estudos e parceria durante o curso, a minha amiga Patrícia Lourenço Moreira pelas noites no departamento estudando, rindo e compartilhando momentos de descontração que foram fundamentais para meu equilíbrio mental.

Aos colegas do E-IMP (Laboratório de Eletrônica Impressa) que me receberam no laboratório de pesquisa onde me ensinaram a construir meus primeiros dispositivos eletrônicos. As instituições parceiras como CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES e FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo).

Aos professores e professoras da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em Rio Claro – SP, pela troca de conhecimentos e comprometimento com a física.

À minha família que mesmo distante, incentivou minha autonomia e meu desenvolvimento.

RESUMO

Esse projeto trata de um estudo formal da realização de simulações, que visa detalhar o modelo físico de transistores de filme fino a partir da criação de um algoritmo computacional, a linguagem de programação python é utilizada, a fim de realizar a análise dos valores calculados a partir das equações de modelamento e da construção das curvas características simuladas, devido a inserção dos parâmetros de dispositivo que podem ser variados, verifica-se os resultados obtidos com os dados coletados experimentalmente em dispositivos manufaturados utilizando os mesmos parâmetros. O simulador permite a inserção dos parâmetros de entrada, sendo eles a espessura do dielétrico, a mobilidade, a tensão de *threshold*, a largura e o comprimento do canal, com a inserção dos dados na interface o programa realiza os cálculos para determinar os valores de corrente e plotar as curvas características, ou seja, irá gerar as curvas de saída e as curvas de transferência a partir dos dados inseridos pelo usuário e calculados pelo *software*. Com a obtenção dos resultados simulados, serão comparados com dados dos TFTs manufaturados coletados pelos colegas do referido laboratório, com parâmetros similares aos simulados e a partir disto, esses dados serão importados para o simulador resultando na plotagem das curvas características experimentais no mesmo gráfico que as curvas simuladas, a fim de compará-las para análises dos parâmetros de desempenho e extração de métricas do simulador.

Palavras-chave: microeletrônica, transistores de filme fino, curvas características, simulação, *software*.

Abstract

This project deals with a formal study of simulations, which aims to detail the physical model of thin film transistors from the creation of a computational algorithm, the python programming language is used, in order to perform the analysis of the calculated values at from the modeling equations and the construction of the simulated characteristic curves, due to the insertion of the device parameters that can be varied, the results obtained with the data collected experimentally in devices manufactured using the same parameters are verified. The simulator allows the insertion of input parameters, which are the dielectric thickness, mobility, threshold voltage, channel width and length. current and plot the characteristic curves, that is, it will generate the output curves and the transfer curves from the data entered by the user and calculated by the software. Once the simulated results are obtained, they will be compared with data from the manufactured TFTs collected by colleagues from the due laboratory, with parameters similar to the simulated ones and from this, these data will be imported into the simulator resulting in the plotting of the experimental characteristic curves on the same graph as the simulated curves, in order to compare them for analysis of performance parameters and extraction of metrics from the simulator.

Keywords: microelectronics, thin-film transistors, characteristic curves, simulations, software.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Imagem do primeiro computador eletrônico da história, ENIAC, sendo operado pelas programadoras Ruth Lichterman e Marlyn Wescoff	13
Figura 2 - Representação dos semicondutores do tipo n e tipo p	15
Figura 3 - Representação dos semicondutores do tipo n, formado por silício ao redor do chumbo, onde o silício apresenta quatro elétrons na camada de valência e o chumbo apresenta cinco, e do tipo p, formado por silício ao redor do boro, onde boro apresenta três elétrons na camada de valência.	16
Figura 4 - Fotografia do primeiro transistor	17
Figura 5 - Imagem do primeiro circuito integrado	18
Figura 6 - Representação da estrutura dos terminais, com e sem o substrato do dispositivo. Representação da estrutura dos terminais	19
Figura 7 - Quatro diagramas das configurações de estrutura dos transistores de filme fino	20
Figura 8 - Representação isométrica de um TFT com configuração bottom gate	21
Figura 9 - Representação do MOSFET com canal tipo N operando no modo triodo	22
Figura 10 - Curva de saída de um MOSFET tipo n	26
Figura 11 - Curva de transferência, em função da tensão de drenagem ilustrando DIBL	26
Figura 12 - Estrutura molecular hexagonal wurtzita do óxido de zinco, esferas amarelas são átomos de zinco e esferas cinzas são átomos de oxigênio	28
Figura 13 - Ilustração das etapas da técnica de deposição spin-coating	29
Figura 14 - Representação esquemática de um exemplo de revestimento CVD	29
Figura 15 - Captura da tela inicial da execução do algoritmo, indicando a seleção do “Type N”.	33
Figura 16 - Captura da tela com a inserção dos parâmetros do dispositivo	34
Figura 17 - Captura da tela que permite a visualização dos parâmetros inseridos pelo usuário transformados em metros, indicando a seleção do botão “Plot Graphic”	34
Figura 18 - Captura da tela com indicação da seleção do botão “Output Curve”	34
Figura 19 - Curva de saída simulada pelo algoritmo desenvolvido em octave	35

Figura 20 - Captura da tela com a plotagem do gráfico de “Transfer curve”	35
Figura 21 - Curva de transferência simulada pelo algoritmo desenvolvido em octave.	36
Figura 22 - Interface principal do software desenvolvido em python	38
Figura 23 - Lateral esquerda superior da interface principal do software ao clicar em “File”	39
Figura 24 - Janela informativa ao clicar no botão “About”	39
Figura 25 - Janela informativa ao clicar no botão “Help”	40
Figura 26 - Interface principal com possíveis dados preenchidos	41
Figura 27 - Gráfico da curva de saída simulada pelo software em python	42
Figura 28 - Gráfico da curva de transferência simulada pelo software em python	42
Figura 29 - Interface principal do software preenchida com valores equivalentes aos experi- mentais do dispositivo 1	48
Figura 30 - Curva de saída com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 1)	49
Figura 31 - Curva de transferência com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 1)	49
Figura 32 - Interface principal do software preenchida com valores equivalentes aos experi- mentais do dispositivo 2	50
Figura 33 - Curva de saída com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 2)	51
Figura 34 - Curva de transferência com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 2)	51
Figura 35 - Interface principal do software preenchida com valores equivalentes aos experi- mentais do dispositivo 3	52
Figura 36 - Curva de saída com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 3)	53
Figura 37 - Curva de transferência com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 3)	53
Figura 38 - Curva de saída e curva de transferência ajustadas (dispositivo 1)	54
Figura 39 - Curva de saída e curva de transferência ajustadas(dispositivo 2)	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de três dispositivos manufaturados	48
Tabela 2 - Desvio Padrão Análise 1	51
Tabela 3 - Desvio Padrão Análise 2	51
Tabela 4 - Desvio Padrão Análise 3	51
Tabela 5 - Valores dos coeficientes de determinação calculados pelo simulador e os fatores de idealidade referentes a cada curva, das curvas de saída, relacionados às três análises	52
Tabela 6: Valores dos coeficientes de determinação calculados pelo simulador e os fatores de idealidade referentes a cada curva, das curvas de transferência, relacionados às três análises	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Semicondutores	14
1.2. Transistores	15
1.3. Transistor de filme fino	17
1.3.1 Equações de modelamento.....	20
1.3.2 Regiões de operação.....	24
1.3.3 Desenvolvimento de filmes finos de óxidos metálicos por via úmida	26
1.3.3.1 Óxido de zinco (ZnO)	26
1.3.3.2 Métodos de deposição dos filmes finos	27
2. SIMULAÇÕES	29
2.1. Softwares laboratoriais para simulações	29
2.2. Simulação com Octave	30
2.2.1. Funções das interfaces	31
2.2.2. Exemplificação	32
2.3 Simulação com Python	34
2.3.1 Funções das interfaces	35
2.3.2 Exemplificação	38
2.3.3 Formatação dos dados	41
3. ANÁLISES	41
3.1. Fabricação dos dispositivos comparados com valores simulados	43
3.1.1. Materiais e métodos utilizados.....	43
3.2. Parâmetros experimentais	44
3.3. Análise 1.....	45
3.4. Análise 2	47
3.5. Análise 3	49
3.6. Comparação e ajustes dos valores experimentais com os simulados	51
4. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	53
REFERÊNCIAS	54
APENDICE I – Código fonte e bibliotecas utilizadas	56

1. INTRODUÇÃO

O primeiro computador eletrônico surgiu em meados do ano de 1946, anunciado como o ENIAC (Eletrical Numerical Integrator and Calculator), criado pelos pesquisadores John W. Mauchly e John Presper Eckert, formado pela memória principal, equivalente a uma área de trabalho, a memória auxiliar, que armazena conjuntos de dados a unidade central de processamento que funciona como o “cérebro da máquina”, que permite a execução de informações.

Sua estrutura era composta por cerca de dezoito mil válvulas, que funcionavam a partir do fluxo dos elétrons no vácuo, sendo rápidas, chegando próximo de megahertz de frequência, porém eram muito caras e tinham grande consumo de eletricidade, devido a isso queimavam rápido. O funcionamento das válvulas é simples, onde a partir do aquecimento do seu filamento metálico, há emissão de elétrons, vencendo a barreira do metal e conseguindo fechar o circuito com outro filamento próximo.

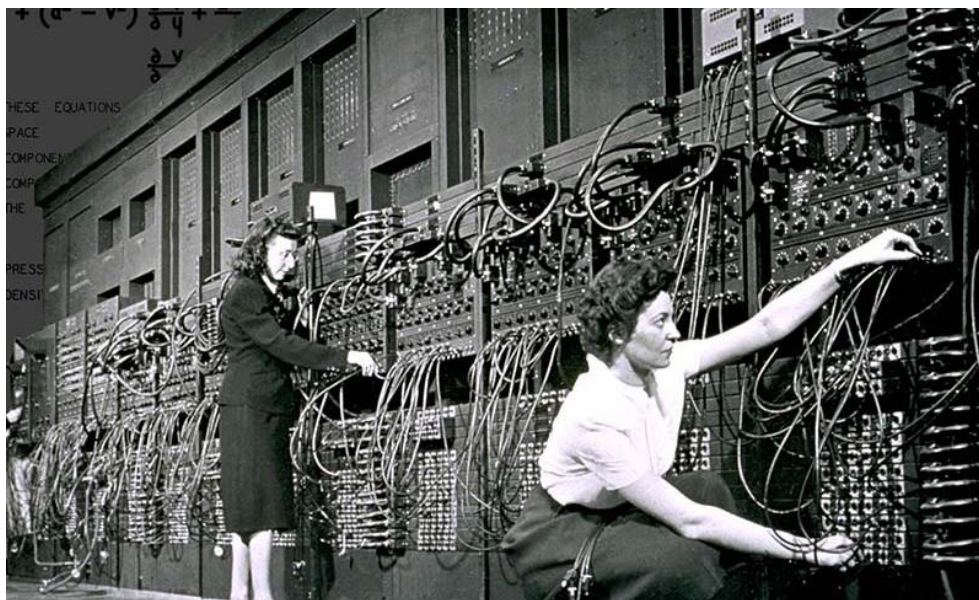


Figura 1: Imagem do primeiro computador eletrônico da história, ENIAC, sendo operado pelas programadoras Ruth Lichterman e Marlyn Wescoff. Fonte: ARL Technical Library/U.S Army

O surgimento do novo dispositivo eletrônico trouxe uma grande revolução na área da eletrônica, o transistor (seção 1.2 da camada introdutória) responsável por aumentar a

velocidade das máquinas, substituiu as válvulas termoiônicas, passando a controlar a intensidade da corrente elétrica com maior eficácia, além de possuir peso e volume menores e consumir menos energia.

A popularidade do transistor foi crescendo e as pesquisas para aprimorar esses dispositivos dispararam após sua invenção, com isso a redução de tamanho e peso, deu origem a equipamentos portáteis, ofertando muitas inovações tecnológicas, tanto na parte do hardware quanto nos softwares.

Entrando na área sobre os softwares, inicialmente surgiram para atender as necessidades dos primeiros computadores, para que houvesse uma comunicação na qual a máquina respondesse de maneira que o ser humano entendesse, esse meio é através do código binário, ou seja, base de dois números, séries de zero e um. A partir disso surgiram as linguagens de programação, que possuem regras e determinadas semânticas, ao serem compiladas, são traduzidas para o código da máquina e assim executadas através do microprocessador.

A relevância do desenvolvimento de softwares nos possibilita estudar constantemente o comportamento do hardware e como evoluí-lo, a fim de possibilitar o uso de interfaces, análises de dados, automatização de processos, previsão de resultados, simulações, entre outros benefícios. Para facilitar e otimizar estudos que promovam o desenvolvimento dos próprios hardwares, como o caso desse projeto; ao pensar no aumento de produtividade, análise e previsão de dados, para que haja um estudo com maior praticidade e completude, a ferramenta desenvolvida nesse projeto de conclusão de curso visa, a partir dos parâmetros dos transistores de filmes finos, o qual será detalhado na seção 1.3 da introdução, realizar a simulação das curvas características.

Pesquisas sobre *hardwares* estão em constante evolução, a implementação e/ou manutenção de softwares laboratoriais são fundamentais para o progresso em cada etapa da tecnologia, visando automatizar o fluxo de trabalho que apresenta falhas humanas, evitando-as, ter o acesso de maneira rápida e segura ao armazenamento de dados, a fim de analisá-los monitorando a execução das amostras.

1.1 Semicondutores

Os semicondutores são sólidos com capacidade de mudar seu comportamento de isolante, onde não tem passagem de corrente elétrica, para comportamento condutor, a partir da movimentação dos portadores de cargas, isso ocorre devido a algumas circunstâncias que serão vistas no decorrer dessa camada introdutória, e devido a essa característica intermediária entre os dois estados, tornam-se muito utilizados na indústria eletrônica.

Em uma classificação generalizada, são conhecidos como semicondutores extrínsecos aqueles que possuem a capacidade da passagem dos portadores de cargas ao adicionar impurezas nesses elementos, conduzindo energia, quando não apresentam dopagem, estão em seu estado puro, esses são conhecidos como semicondutores intrínsecos que se comportam como bons isolantes, sem portadores de cargas livres em sua estrutura.

Esses elementos possuem estruturas covalentes, ou seja, estabelecem ligações com oito elétrons na camada de valência, átomos estabilizados. Quando adicionadas impurezas que apresentam cinco elétrons na camada de valência, há um excedente que gera o movimento dos elétrons livres, agindo como um canal, nesse caso são conhecidos como semicondutores do tipo n, se a dopagem for de impurezas que apresentam três elétrons na camada de valência, elétrons ficam em déficit formando lacunas que são responsáveis pela passagem dos elétrons, esse comportamento ocorre nos semicondutores de tipo p.

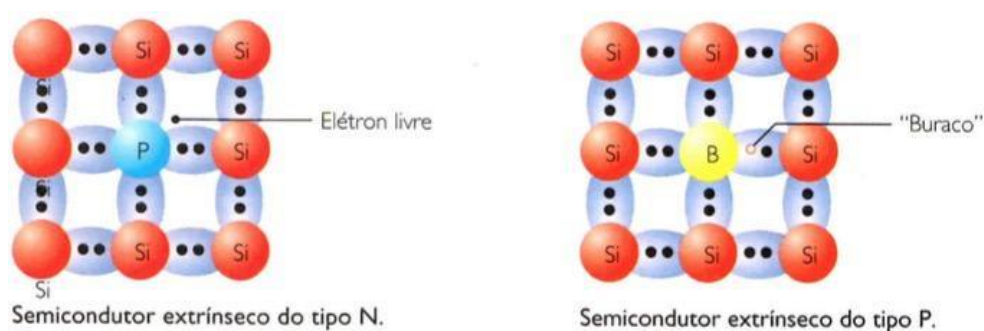


Figura 2: Representação dos semicondutores do tipo n e do tipo p. Fonte: [6]

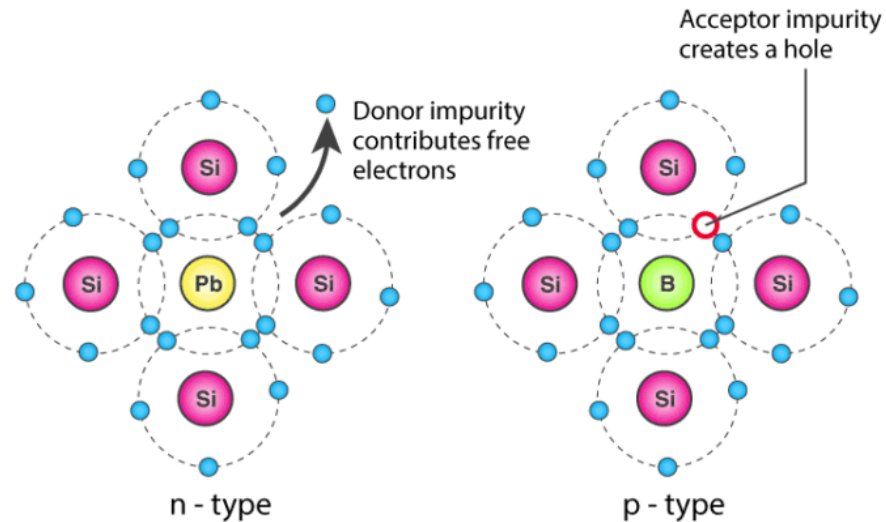


Figura 3: Representação dos semicondutores do tipo n, formado por silício ao redor do chumbo, onde o silício apresenta quatro elétrons na camada de valência e o chumbo apresenta cinco, tendo a formação de elétrons livres, e do tipo p, formado por silício ao redor do boro, onde boro apresenta três elétrons na camada de valência, formando lacunas. Fonte:[7]

O caráter elétrico de um material é fundamental para indicar sua capacidade de transportar cargas elétricas, isso é conhecido como a condutividade, onde o material semiconductor geralmente é sensível à luz, temperatura e ao campo magnético, essa sensibilidade na condutividade o torna muito visado nas aplicações eletrônicas. Onde materiais que são bons condutores de eletricidade como os metais, possuem uma condutividade da ordem de $10^{-7}(\Omega\text{m})^{-1}$, os isolantes na ordem de 10^{-20} e $10^{-10}(\Omega\text{m})^{-1}$ e os semicondutores entre 10^{-6} e $10^{-4}(\Omega\text{m})^{-1}$.

1.2 Transistores

Os transistores são dispositivos eletrônicos que utilizam material semiconductor em sua composição, responsáveis por amplificar a intensidade da corrente elétrica ou controlar a passagem da corrente em circuitos eletrônicos, sendo capaz de ligá-los ou desligá-los, funcionando como uma chave.

Em 1946, um grupo de pesquisa em física do estado sólido, formado por Bell Labs, sob o comando de William Shockley, foi responsável pela invenção do primeiro transistor, nomeado em virtude de suas propriedades intrínsecas “*transfer resistor*”, fato ocorrido em 1947,

devido ao foco na pesquisa dos materiais semicondutores como o silício e germânio, além dos estudos sobre o transistor de efeito de campo.

Walter Brattain e John Bardeen, pesquisadores pertencentes ao grupo de pesquisa liderado por Shockey, ao estudarem a obtenção dos dispositivos FET (transistor de efeito de campo), fazem uma descoberta do efeito do transistor bipolar, tendo sua teoria desenvolvida pelo Shockley, na qual explicava o funcionamento da injeção de portadores de cargas pela junção base e emissor, o qual fora produzido somente em meados de 1953, por George C. Dacey e Ian M. Ross.

Pela descoberta do transistor de ponto de contato, Shockey, Brattain e Bardeen ganharam o prêmio Nobel de física de 1956, pela pesquisa sobre semicondutores e a descoberta do efeito transistor.



Figura 4: Fotografia do primeiro transistor. Fonte: [8]

A produção dos transistores foi aumentando de modo exponencial após sua descoberta tornando-a comum em vários eletrônicos como rádios, telefones e computadores. Diversos grupos de pesquisam começaram a querer melhorá-los em vários aspectos, principalmente em relação ao seu tamanho, pois eles precisavam ser conectados a fios e outros materiais

eletrônicos, então em 1958, Jack Kilby a ideia inicial para formação de um monolito que permitia a conexão de vários transistores, conhecido como circuito integrado, ou seja, cada vez mais a redução do tamanho do transistor foi se tornando essencial, pois quanto mais transistores em um monolito, maior o tamanho do seu processamento.

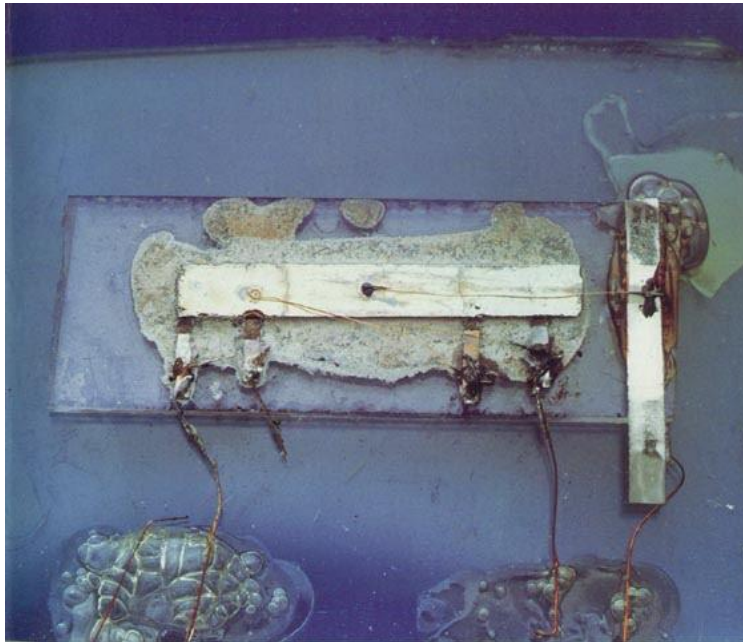


Figura 5: Imagem do primeiro circuito integrado. Fonte [9]

O desenvolvimento dos transistores vem sendo fundamental para evolução tecnológica, atualmente a maioria dos aparelhos eletrônicos detém de processadores modernos, contendo bilhões de transistores em uma única placa, capazes de resolver operações muito rápidas, resultando em um melhor desempenho, pois possuem tempo de resposta muito pequeno, onde por terem uma alta capacidade de velocidade podem trabalhar com sinais alternados muito rápidos.

1.3 Transistor de filme fino (TFT)

Os transistores de efeito de campo (FETs) foram fundamentais para o desenvolvimento tecnológico, pois possuem características que melhoraram a performance de vários eletrônicos, podendo acionar circuitos de grandes tensões sem desviar a energia do circuito.

Usados na fabricação de circuitos integrados, possuem uma impedância maior do que os transistores de junção bipolar (BJTs) que podem ser divididos em dois tipos (NPN e PNP), que são controlados pela corrente com um circuito base, assim consome uma parte da energia ao fazer o controle, já os FETs são controlados pela tensão e não consomem quase nada de energia ao realizar seu controle, sendo mais estáveis.

Os transistores de filme fino (TFTs) possuem modos similares aos MOSFETs (transistor de efeito de campo de metal óxido semiconductor), com comportamento comum das curvas características e das regiões de operação. Os TFTs possuem uma ampla variedade de materiais os quais podem ser produzidos, possuindo diversas características elétricas, viabilizando muitas áreas a serem pesquisadas, as áreas que mais são responsáveis pelos estudos dos TFTs, são espaços da microeletrônica que visam aplicações inovadoras de materiais transparentes e flexíveis, além desses dispositivos de óxido metálico serem de baixo custo, consequentemente podendo ser produzido em grande escala.

Os TFTs são formados por três terminais: a porta, o dreno e a fonte, mais conhecidos no inglês como *gate*, *drain* e *source*, apresentados pela figura abaixo (figura 5).

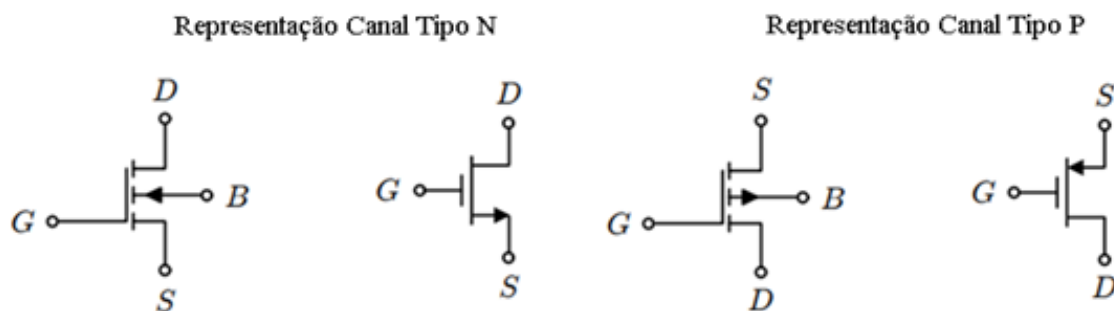


Figura 6: Representação da estrutura dos terminais, com e sem o substrato do dispositivo.

Na representação do canal Tipo N observa-se na imagem a esquerda, um campo denominado pela letra “B”, isso indica quando é feita a representação do dispositivo com o *body*, o corpo do transistor, a seta está apontando para a região negativa do dispositivo indicando a passagem de cargas negativas, a imagem direita ainda do Tipo N é a representação sem o substrato, assim a seta aponta para onde a corrente se desloca, saindo do dreno e indo para a fonte e na representação do canal Tipo P as indicações são similares ao do Tipo N, porém como possuir cargas positivas, o comportamento é o contrário, seguindo direções opostas.

O formato dos TFTs possui uma estrutura padrão, mas que podem conter algumas diferenças na ordem de montagem, tem-se quatro estruturas mais comuns representadas na imagem abaixo (figura 7). O “BG” presente em algumas siglas da figura mencionada, representa *bottom gate*, indicando a porta inferior, “TG”, significa *top gate*, porta superior, “BC”, contato inferior, referente aos eletrodos *drain-source* estão inferiores e “TC”, *top contact*, indicando os eletrodos *drain-source* superiores.

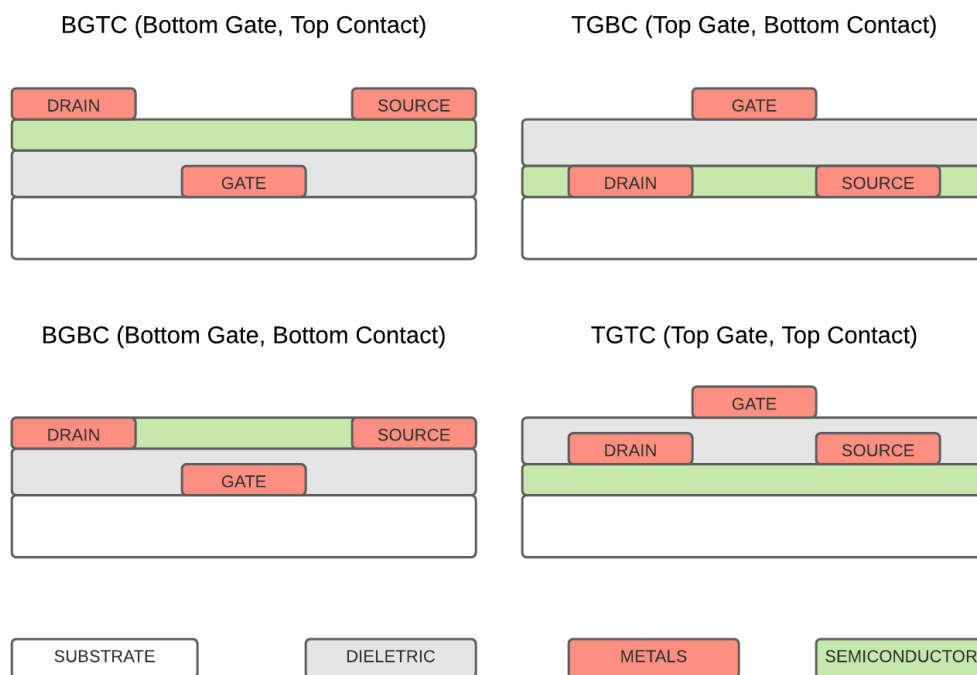


Figura 7: Quatro diagramas das configurações de estrutura dos transistores de filme fino.

Em relação as dimensões dos TFTs a visão da perspectiva do dispositivo é fundamental para observação dos parâmetros geométricos, que são de grande influência nos resultados da corrente elétrica.

O comprimento do canal é dado por “Z” ou também por “W” como na figura 8, a largura do canal é “L” e “d” é a espessura do óxido isolante, conforme visto na imagem abaixo (figura 8), a fonte é representada pelo “S” e o dreno por “D”.

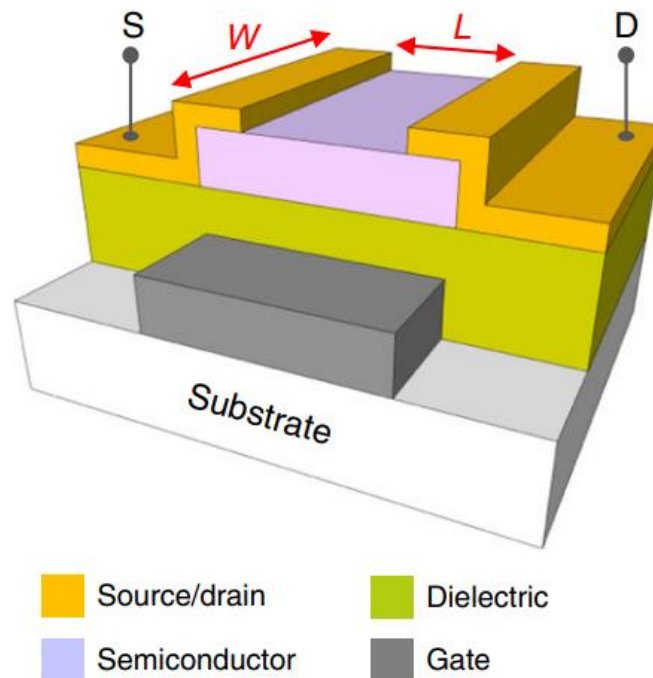


Figura 8: Representação isométrica de um TFT com configuração *bottom gate*. Fonte [10]

1.3.1 Equações de modelamento

Os TFTs apresentam equações de modelamento similares aos MOSFETs, a partir do conceito da capacitância, há a definição dessas expressões matemáticas que caracterizam as curvas características desses dispositivos eletrônicos.

A capacitância é uma grandeza física relacionada com a quantidade de cargas elétricas que estão armazenadas por uma diferença de potencial, considerando uma quantidade infinitesimal de carga dq , para maior compreensão observa-se a imagem abaixo (figura 9) com indicação das localizações das variáveis que serão descritas nas equações.

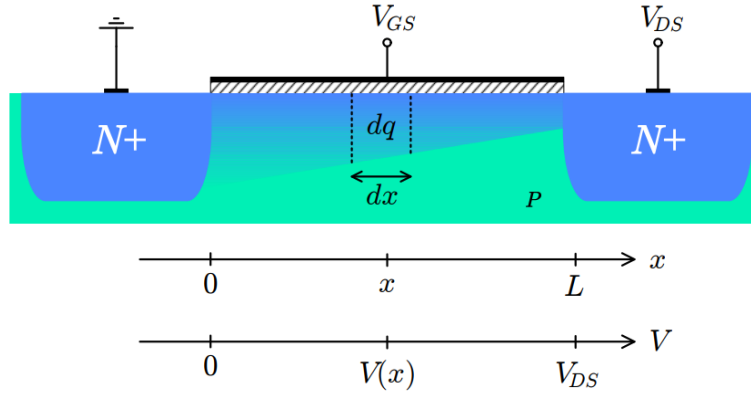


Figura 9: Representação do MOSFET com canal tipo N operando no modo triodo. Fonte[11].

A quantidade infinitesimal de carga, contida em um comprimento dx , é representada por:

$$dq = dc \cdot \Delta V \quad (1)$$

A variação de tensão ΔV , representa a tensão do *gate* subtraída pela tensão de limiar V_{Th} , menos a tensão de x , que consta no ponto dx onde a quantidade infinitesimal de carga está inserida, visto na figura 8, isto é:

$$\Delta V = (V_G - V(x) - V_{Th}) \quad (2)$$

Se multiplicarmos o comprimento do canal Z pela quantidade de comprimento dx , tem-se dA , onde dA multiplicado pela capacitância do óxido resulta em dc , isto é:

$$dc = C_{ox} \cdot dA \quad \text{sendo} \quad dA = Z \cdot dx \quad (3)$$

Substituindo (2) em (1):

$$dq = C_{ox} \cdot Z \cdot dx \cdot (V_G - V(x) - V_{Th}) \quad (4)$$

$$\frac{dq}{dx} = C_{ox} \cdot Z \cdot (V_G - V(x) - V_{Th}) \quad (5)$$

A diferença de potencial dividida pela distância entre as superfícies, tem-se o campo elétrico e a quantidade infinitesimal de carga dq está contida em um campo elétrico, o campo elétrico é dado por:

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (6)$$

A velocidade de deriva dos elétrons é a mobilidade vezes o campo elétrico, a velocidade que os elétrons livres se movimentam, dada por:

$$V_{el} = \frac{dx}{dt} = -\mu E(x) \rightarrow \mu \frac{dV(x)}{dx} \quad (7)$$

Observa-se um sinal negativo na expressão, pois representa que os elétrons estão se movimentando em direção contrária ao campo elétrico.

Quando o transistor é ligado, ocorre a passagem de corrente elétrica entre o dreno e a fonte, a corrente é I_D , sendo a carga infinitesimal pelo tempo, dada por:

$$I_D = \frac{dq}{dt} \rightarrow \frac{dq}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

Realizando a substituição das equações (5) e (7) na equação (8):

$$I_D = C_{ox} \cdot Z \cdot (V_G - V(x) - V_{Th}) \cdot \mu \cdot \frac{dV(x)}{dx} \quad (9)$$

$$I_D \cdot dx = \mu \cdot C_{ox} \cdot Z \cdot (V_G - V(x) - V_{Th}) \cdot dV(x) \quad (10)$$

Aplica-se a integração na equação (10) de 0 à L de 0 à V_{DS} :

$$\int_0^L I_D \cdot dx = \int_0^{V_{DS}} \mu \cdot C_{ox} \cdot Z \cdot (V_G - V(x) - V_{Th}) \cdot dV(x) \quad (11)$$

$$\int_0^L I_D \cdot dx = \mu \cdot C_{ox} \cdot Z \cdot \int_0^{V_{DS}} (V_G - V(x) - V_{Th}) \cdot dV(x) \quad (12)$$

Resolvendo a integral pelo método de separação de variáveis:

$$\int_0^L I_D \cdot dx = \mu \cdot C_{ox} \cdot Z \cdot \int_0^{V_{DS}} V_G \cdot dV(x) - \int_0^{V_{DS}} V(x) \cdot dV(x) - \int_0^{V_{DS}} V_{Th} \cdot dV(x) \quad (13)$$

$$I_D \cdot x|_0^L = \mu \cdot C_{ox} \cdot Z \cdot \left[V_G \cdot V(x)|_0^{V_{DS}} - V_{Th} \cdot V(x)|_0^{V_{DS}} - \frac{V(x)^2}{2} \Big|_0^{V_{DS}} \right] \quad (14)$$

$$I_D \cdot L = \mu \cdot C_{ox} \cdot Z \cdot \left[(V_G - V_{Th}) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (15)$$

$$I_D = \frac{\mu \cdot C_{ox} \cdot Z}{L} \cdot \left[(V_G - V_{Th}) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (16)$$

Quando o valor de saturação da corrente é atingido, atinge o limiar: $V_{DS} = V_G - V_{Th}$, realizando a substituição quando atinge esse limiar na equação (14):

$$I_D = \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{Z}{L} \cdot \left[(V_G - V_{Th}) \cdot (V_G - V_{Th}) - \frac{1}{2} (V_G - V_{Th})^2 \right] \quad (17)$$

$$I_D = \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{Z}{L} \cdot \left[(V_G - V_{Th})^2 - \frac{1}{2} (V_G - V_{Th})^2 \right] \quad (18)$$

$$I_D = \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{Z}{L} \cdot (V_G - V_{Th})^2 \quad (19)$$

1.3.2 Regiões de Operação

Para operar o TFT, existem três regiões de operação do dispositivo que são caracterizadas a partir de determinadas condições, a primeira região é conhecida como corte, ocorre quando a tensão de *gate* é menor que a tensão de *threshold* $V_G < V_{Th}$, ou seja, nessa condição o transistor permanece desligado, não há condução entre o dreno e a fonte, resultando em $I_D = 0$.

Quando a tensão de *gate* é maior que a tensão de *threshold* $V_G > V_{Th}$ e a tensão de *drain* e *source* é maior que a tensão de *gate* subtraindo a tensão de *threshold* $V_{DS} < V_G - V_{Th}$, o transistor é ligado havendo a passagem de corrente entre dreno e a fonte, nessa situação a curva inicia com um comportamento linear, conforme a tensão de *drain* e *source* vai ficando muito pequena $V_{DS} \ll V_G - V_{Th}$, a curva começa a “entortar”, quando $V_{DS} = V_G - V_{Th}$, que é o momento em que a curva começa a saturar, a criação dessa região é chamada de “pinch-off” que limita a corrente máxima e a partir desse momento V_{DS} não afeta mais o canal, o canal estrangula e temos um comportamento constante que ocorre na região de saturação quando $V_{DS} > V_G - V_{Th}$.

O comportamento da curva nessas três regiões de operações pode ser observado em duas curvas características, a curva de saída, gráfico da corrente em função da tensão de *drain* e *source*, sendo possível a variação da tensão de *gate*, e a curva de transferência, que será a curva da corrente em função da tensão do *gate*, obtendo diferentes valores para tensão de *drain* e *source*.

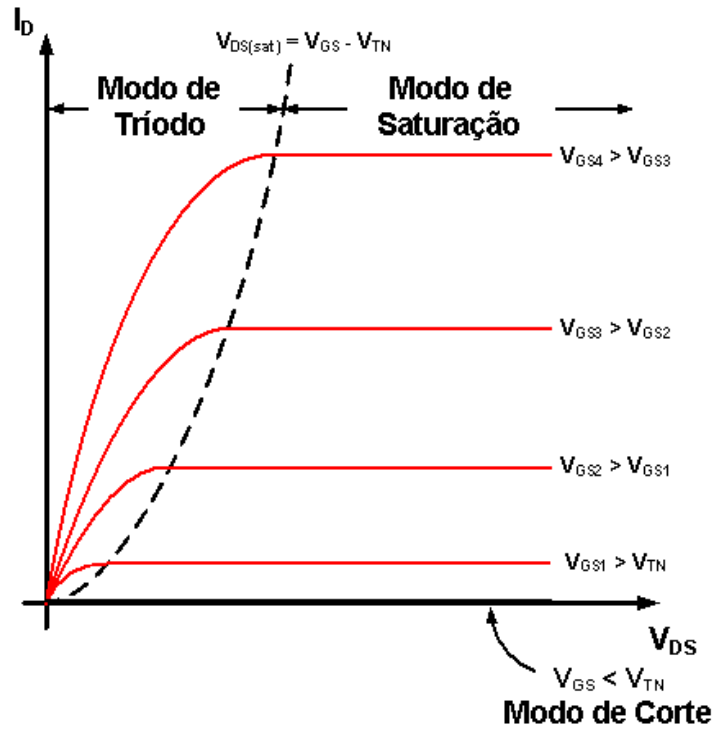


Figura 10: Curva de saída de um MOSFET tipo n. Fonte [12].

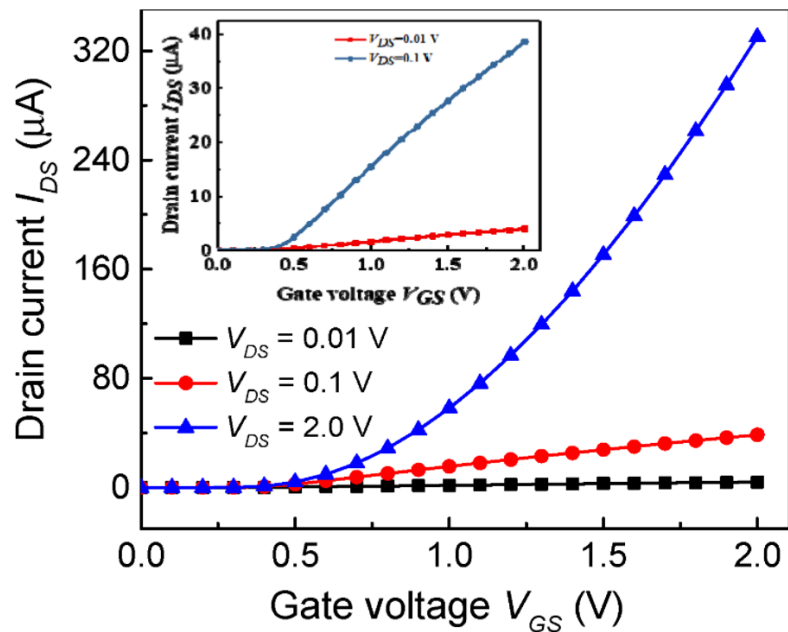


Figura 11: Curva de transferência, em função da tensão de drenagem ilustrando. Fonte: [13]

1.3.3 Desenvolvimento de filmes finos de óxidos metálicos por via úmida

O desempenho dos óxidos metálicos semicondutores classifica-os como promissores para formação dos TFTs, pois possuem grande variedade de fenômenos fundamentais para diversas aplicações, além de serem comparados aos semicondutores covalentes convencionais como o silício (Si).

Vantagens como alto grau de transparência óptica, alta condutividade, baixa temperatura de processamento que possibilita deposição em materiais flexíveis e alta capacidade de produção em larga escala, é de grande motivação para aplicações e pesquisas.

O tempo de espalhamento dos portadores de carga vezes a carga elétrica, dividido pela massa efetiva da portadora de carga obtém-se a mobilidade da portadora, ou seja, quanto menor a massa efetiva do elétron no óxido metálico, resulta num maior transporte dos elétrons, então a interação dos orbitais dos óxidos metálicos indica melhor transporte dos portadores de cargas, isso ocorre devido o conjunto dos orbitais do metal e do óxido, que gera uma massa efetiva menor. Exemplos de alguns semicondutores de óxidos metálicos utilizados são o óxido de zinco (ZnO), visto no próximo tópico, dióxido de estanho (SnO₂) e óxido de índio (In₂O₃), apresentam características condutoras predominantemente do tipo n, alguns semicondutores de óxidos metálicos do tipo p que se destacam na pesquisa, é o óxido de níquel (NiO), óxido cuproso (Cu₂O) e (CuAlO₂).

Em temperaturas relativamente baixas há possibilidade de processar os óxidos metálicos por solução, ou seja, por via úmida, para realizar a deposição dos óxidos em um substrato é possível a partir de algumas técnicas, os métodos de deposição, que serão detalhados na seção 1.3.3.2.

1.3.3.1 Óxido de Zinco (ZnO)

Na fabricação dos TFTs a utilização do ZnO na produção de filmes finos de óxidos metálicos semicondutores transparentes têm recebido maior visibilidade nas pesquisas científicas, é resultado da reação do cátion Zn^{+2} - metal com ânions O^{-2} - não metal, conforme figura 11, observada abaixo.

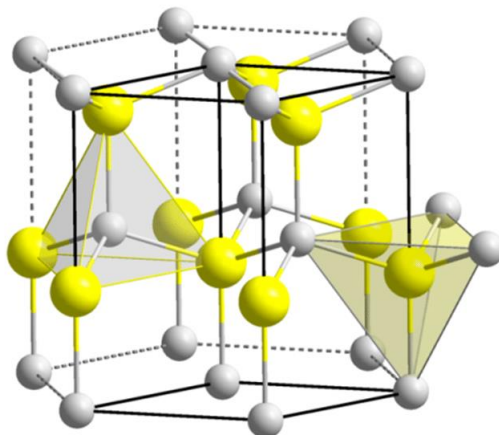


Figura 12: Estrutura molecular hexagonal wurtzita do óxido de zinco, esferas amarelas são átomos de zinco e esferas cinzas são átomos de oxigênio. Fonte: [5]

O óxido de zinco é um semicondutor do tipo n, com um *gap* de energia entre a banda de valência e a banda de condução em torno de $\sim 3,4$ eV [3], possui alta transparência óptica do material à luz visível, alta energia de ligação de ~ 60 meV [3] (temperatura ambiente) e alta estabilidade termodinâmica do sistema químico, detém uma estrutura cristalina hexagonal do tipo wurtzita, estrutura aberta onde tem parte de seu volume vazio, devido a isto, há facilidade de incorporar impurezas em sua estrutura.

1.3.3.2 Métodos de deposição dos filmes finos

A técnica de deposição spin-coating, é usada para deposição de filmes fino de óxidos metálicos por via-úmida, consiste na deposição da solução precursora em toda a superfície do substrato, a partir disto ao selecionar um intervalo de tempo a amostra irá rotacionar em uma determinada velocidade, sendo uma boa técnica para que haja um espalhamento uniforme do óxido no corpo do dispositivo, esse método permite o controle manual da espessura do óxido depositado, na qual depende da velocidade de rotação da amostra, do tempo de execução da rotação, e dos fatores químicos, como a volatilidade do solvente e a concentração e viscosidade da solução. Um fator importante sobre esse método é onde a solução é depositada, que é em uma placa de aquecimento onde se tem o controle da temperatura, função fundamental para que haja a calcinação do filme fino na amostra.

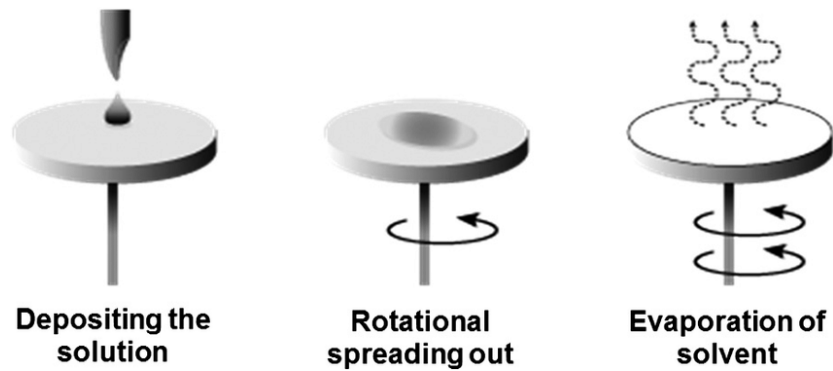


Figura 13: Ilustração das etapas da técnica de deposição spin-coating. Fonte [14]

Outra técnica de deposição bastante utilizada na produção dos filmes finos é o método de deposição de vapor químico (CVD), a partir da adição do precursor ao substrato há uma reação química em forma de vapor, feita dessa deposição a vácuo, pode-se formar uma reação heterogênea, com muita aderência e pouca concentração de desvios, ou reação homogênea com aderência baixa e alguns defeitos. Esse tipo de técnica pode possuir diversos formatos, classificados como APCVD, quando o CVD é à pressão atmosférica, LPCVD quando é à pressão subatmosféricas e UHVCVD quando submetido à pressão muito baixas.

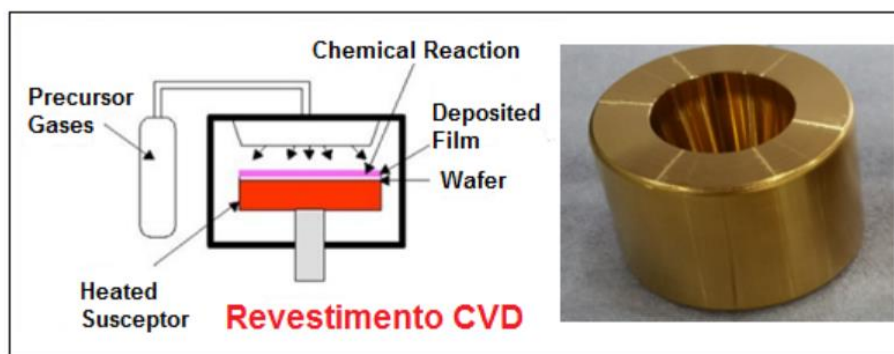


Figura 14: Representação esquemática de um exemplo de revestimento CVD. Fonte [15].

2. SIMULAÇÕES

A aplicabilidade de técnicas matemáticas como operações lógicas é fundamental para a implementação de um software que tem como objetivo realizar determinadas funções com certa compatibilidade à realidade, a partir da situação descrita, através de expressões

matemáticas esse comportamento pode ser reproduzido por um programa, acarretando a simulação computacional de sistemas por linhas de códigos.

A partir da criação de simuladores que visam descrever o comportamento de sistemas, ou no caso de determinados dispositivos eletrônicos, consegue prever um comportamento futuro bem próximo a realidade, gerando dados compatíveis com maior exatidão sem interferências manuais que poderiam impactar nos resultados, sendo fundamental para descobrir quais resultados esperados e até compará-los com resultados experimentais para ver qual parâmetro tem mais influência e poder ajustá-lo até um valor apropriado.

De maneira objetiva a citação segundo Jerry Banks:

“A simulação é a imitação da operação de um mundo real processo ou sistema ao longo do tempo. A simulação envolve a geração de uma história artificial do sistema, e a observação dessa história artificial para tirar inferências sobre as características operacionais do sistema real que está representado. A simulação é uma solução de problemas indispensável metodologia para a solução de muitos problemas do mundo real. A simulação é usada para descrever e analisar o comportamento de um sistema, faça perguntas "e se" sobre o sistema real, e ajuda no projeto de sistemas reais.”
(BANKS, J., 2000, “*Introduction to Simulation*”, p.9) [3]

2.1 Softwares Laboratoriais para simulações

Para desenvolver simuladores são usados softwares específicos que permitem analisar dados e plotar gráficos, com interfaces que possibilitam qualquer pessoa fazer seu uso, outros softwares há necessidade de saber sobre lógica de programação com linguagens próprias para ter o desenvolvimento do algoritmo para realizar as simulações, também há o uso das linguagens de programação propriamente ditas para criar softwares que atendam às necessidades de maneira individual e específica para cada projeto.

Os três casos citados são escolhidos de acordo com demandas particulares, no caso desse projeto inicialmente houve a escolha de utilizar o octave que é considerado um *open-source* do matlab, isso significa uma plataforma aberta sem custos para utilizá-la, direcionada para cálculos numéricos, criação e manipulação de matrizes e plotagem de gráficos, ou seja, computação matemática, conforme necessidades foram aparecendo no decorrer desse projeto houve a mudança para python, uma linguagem de programação de alto nível que possui inúmeras ferramentas para ter maior variabilidade nas funções do *script* executado, como suas

inúmeras bibliotecas que possibilitam a criação de interfaces dinâmicas, podendo escolher tamanhos, fontes, cores preferíveis do programador, frameworks que facilitam o tratamento dos dados e criação de *data frames*, promovendo a organização dos dados, o trabalho com matrizes/listas é mais simplificado ao utilizar bibliotecas específicas para cada caso.

O desenvolvimento do algoritmo utilizando octave foi interrompido porque conforme o surgimento de novas necessidades, a utilização de uma linguagem de programação que possuísse diversas bibliotecas e o conhecimento da orientação a objeto, tornaram a programação mais simples e com maior completude, essas foram motivações que influenciaram a mudança para python.

O algoritmo do octave possuía alguns bugs que precisavam ser tratados, apresentava falta de opções de elementos visuais, muitas tratativas deveriam ser feitas para que o programa chegasse ao esperado, como python é uma linguagem de programação muito simples de aprender, além de possuir funções mínimas padrões da sua formação e a possibilidade de uso de bibliotecas e *frameworks*, diferente do octave, há funções clássicas da matemática que são carregadas por padrão, no caso desse projeto a mudança acarretou na melhora de performance do programa.

2.2 Simulação com Octave

A ideia inicial fora utilizar o octave que atende questões de cálculos numéricos, cálculos matriciais e a construção de gráficos, a partir dos parâmetros inseridos pelo usuário, os parâmetros geométricos e elétricos dos TFTs, o algoritmo calcula a partir das equações de modelamento (seção 1.3.1), os valores de corrente para ambas as curvas características, formando dados em formato de matrizes, a partir disso é possível a plotagem dos gráficos, sendo a curva de saída e/ou a curva de transferência.

Para curva de saída o algoritmo varia o valor de V_{DS} de 0.1 até 10, ou seja, permite cem valores para V_{DS} , conseqüentemente cem valores calculados para I_D , com cinco valores fixados de V_G sendo eles cinco números pares (2,4,6,8,10), acarretando cinco curvas presentes no gráfico plotado. De maneira similar para curva de transferência o algoritmo varia o valor de V_G de 0.1 até 10, ou seja, permite cem valores para V_G , acarretando cem valores

calculados para I_D , com cinco valores fixados de V_{DS} , sendo eles cinco números pares (2,4,6,8,10) realizando a plotagem de cinco curvas no gráfico.

Os valores calculados de I_D e os valores de V_{DS} , podem ser vistos na própria ferramenta do octave, como o algoritmo gera uma matriz de duas colunas e cem linhas essa matriz com os dados é vista no ambiente de trabalho do octave.

2.2.1 Funções das interfaces

Ao executar o software octave com o algoritmo criado para simulação, inicialmente aparece na tela uma janela para questionar qual tipo de canal que o usuário pretende realizar a simulação, selecionando qual opção deseja através de botões, se é tipo n, tipo p ou se deseja sair da janela.

Após selecionar o tipo de canal desejado vem a próxima janela que possibilita a inserção dos parâmetros de entrada, o usuário deve colocar valores com as seguintes unidades de medida, pois o programa converterá tudo para metros, sendo eles a mobilidade μ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), comprimento do canal Z (mm), espessura do óxido d (nm), largura do canal L (μm) e a tensão de *threshold* V_{th} (V).

Com os valores inseridos, ao apertar no botão “Ok” outra janela vai abrir mostrando na tela os valores inseridos transformados em metros com os botões para execução da plotagem dos gráficos da curva de saída e/ou da curva de transferência, se o usuário pretende mudar os valores ou se deseja cancelar a execução, a próxima interface questiona o usuário de qual gráfico ele deseja plotar e ao escolher a curva o programa executará a plotagem do gráfico, para que o entendimento do programa seja completo a seção 2.2.1 irá mostrar as curvas plotada a partir de uma exemplificação de dados inseridos.

2.2.2 Exemplificação

Essa seção busca apresentar uma aplicação concreta do uso da ferramenta desenvolvida, ao inserir alguns dados genéricos para executar o algoritmo do octave. Os dados são exemplos de dados reais coerentes para exemplificação. Ao executar o programa, o canal tipo n fora escolhido, conforme imagem abaixo.

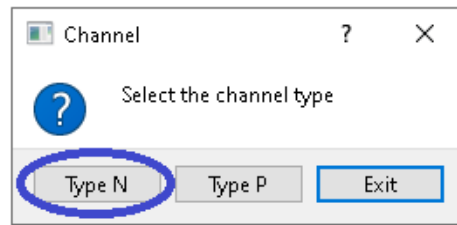


Figura 15: Captura da tela inicial da execução do algoritmo, indicando a seleção do “Type N”.

Ao clicar no botão “Type N”, a janela de inserção dos parâmetros será aberta, com isso são inseridos os valores para exemplificação..

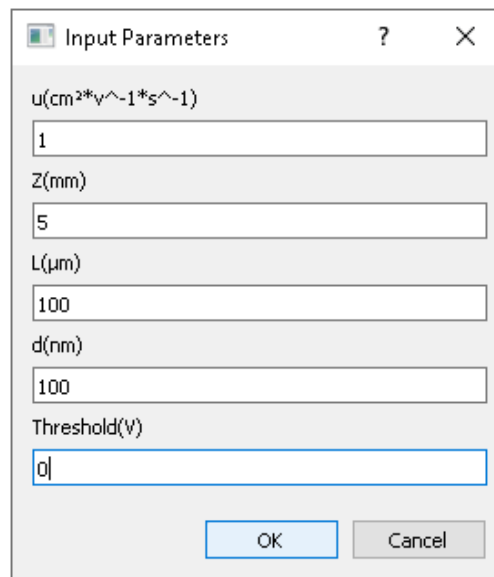


Figura 16: Captura da tela com a inserção dos parâmetros do dispositivo.

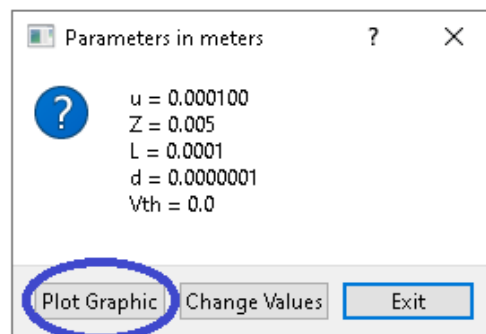


Figura 17: Captura da tela que permite a visualização dos parâmetros inseridos pelo usuário transformados em metros, indicando a seleção do botão “Plot Graphic”.

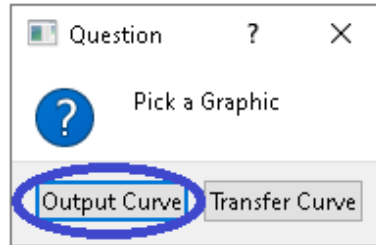


Figura 18: Captura da tela com indicação da seleção do botão “Output Curve”.

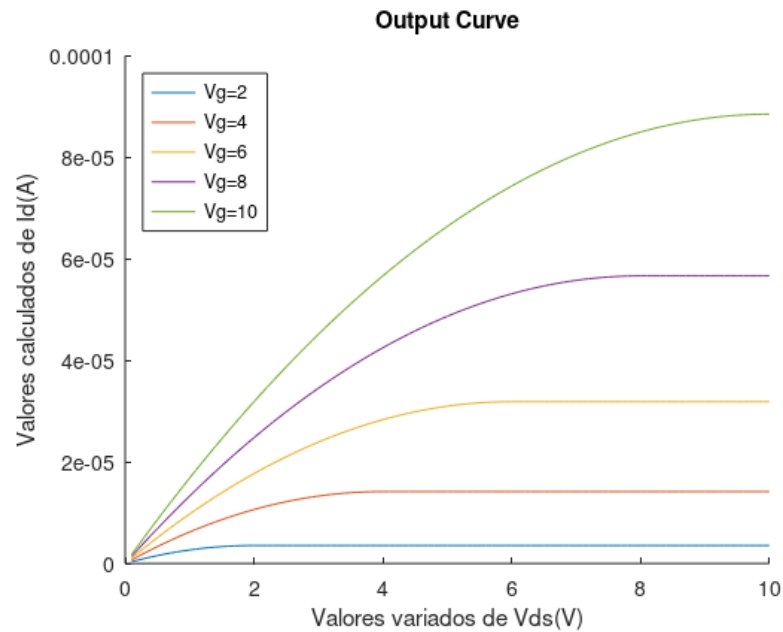


Figura 19: Curva de I_D versus V_{DS} , simulada pelo algoritmo desenvolvido em octave.

Ao clicar novamente que deseja plotar outro gráfico com os mesmos valores que foram inseridos na figura 18, retornará para a janela que questiona qual gráfico gostaria de plotar.

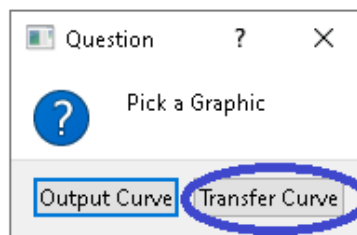


Figura 20: Captura da tela com a plotagem do gráfico de “Transfer curve”.

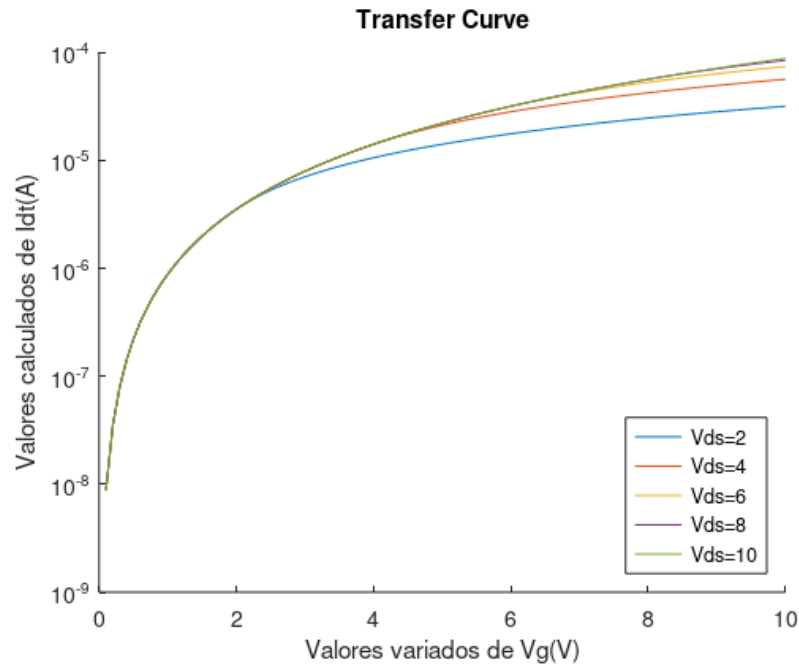


Figura 21: Curva de I_D versus V_G , simulada pelo algoritmo desenvolvido em octave.

2.3 Simulação com Python

O python permite a utilização de bibliotecas específicas que auxiliam na construção da simulação, há muitas documentações disponíveis e conhecidas da comunidade científica que auxiliam o uso dessas ferramentas importadas no código, algumas bibliotecas usadas são caracterizadas pelo seu uso em análise e modelagem de dados que realizam operações multidimensional em *arrays* (estrutura de dados/listas) e também o uso das interfaces características das bibliotecas utilizadas que permitem a criação completa de sua “roupagem”, permitindo estilos, cores e formas que são de preferência do programador, bibliotecas que fazem a interação do software com o explorador de arquivos da máquina que for executado, isso permite a importação e armazenamento de dados com formatos específicos definidos no algoritmo, dentro de outras ferramentas que possuem inúmeras aplicabilidades.

Esse software permite o usuário selecionar o tipo de canal desejado e inserir os dados dos parâmetros do dispositivo, na mesma janela também há inserção do valor que a curva irá iniciar, o valor de variação dos pontos da curva e o valor final da curva, além de aderir a quantidade de curvas com os valores fixados de V_{DS} ou V_G determinados também pelo usuário, dependendo da curva específica, e assim realiza os cálculos dos valores de I_D

gerados a partir dos valores inseridos, essa é a principal diferença ao comparar o software desenvolvido em python com o algoritmo em octave, possibilitar a partir da iteração direta do usuário com mais elementos que interferem nos resultados calculados.

Além disso a ferramenta desenvolvida permite que através dos dados de V_{DS} , V_G , dos parâmetros inseridos e dos valores de I_D calculados, a gráfica das curvas características, a curva de saída e a curva de transferência, assim cada vez que uma curva é gerada os dados são salvos automaticamente. Por fim o software realiza a função de importar dados e assim possibilita a realização da plotagem das curvas características, essa etapa é fundamental para observar através das curvas a diferença dos valores importados experimentais com os valores simulados, extraindo qual parâmetro influencia mais para que consiga ajustar as curvas e produzir resultados relevantes para pesquisa dos TFTs.

Outras funções também desse software incluem um botão de ajuda, que mostra instruções de uso do programa com regras de como inserir os dados corretamente em conjunto com o fluxo de execução e um botão sobre o programa contendo o contato do responsável pelo software.

2.3.1 Funções das interfaces

Ao executar o software desenvolvido nesse projeto, uma interface irá aparecer na tela é considerada a interface principal, pois todas as informações inseridas nela o algoritmo realiza os cálculos para obter os valores da corrente I_D .

Na interface principal inicialmente permite a seleção de qual tipo de canal compõe o dispositivo que deseja realizar a simulação, ao selecionar “Type N” ou “Type P” que está na forma de *radio button* que significa rádio botão, um tipo de botão que limita a escolha do usuário, como há dois tipos de canais possíveis a aplicabilidade desse tipo de botão é válida.

Abaixo do campo para selecionar o tipo do canal, é composto pelos parâmetros elétricos e geométricos do dispositivo com as unidades de medida impostas, logo após o campo “Values of Curve” dispõe de outros dois campos que permitem a inserção dos dados referentes a curva de saída e a curva de transferência, conforme visto na figura abaixo.

Figura 22: Interface principal do software desenvolvido em python.

Os dois campos referentes aos dados das curvas características, o início (*Start*), a variação entre os pontos (*Step*) e de fim (*End*), observa-se os *combobox* indicados nas variáveis de “*N° curves*”, uma caixa de combinações que possui a quantidade de curvas desejadas limitada em até seis curvas no mesmo gráfico, ao realizar a seleção de ambos os campos aparece a quantidade de campos equivalentes para inserir os valores de V_{DS} e V_G fixados, sendo a próxima etapa a plotagem dos gráficos da curva de saída e da curva de transferência ao clicar nos botões inferiores “*Plot Output Curve*” e “*Plot Transfer Curve*”.

No canto superior esquerdo da interface principal, tem um botão “*File*” que ao clicar nele parece duas opções, “*Help*” que indica etapas de instrução do uso do software para ajuda e “*About*”, que o objetivo do software e o contato para maiores informações.

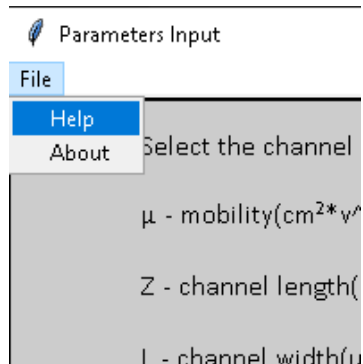


Figura 23: Lateral esquerda superior da interface principal do software ao clicar em “*File*”.

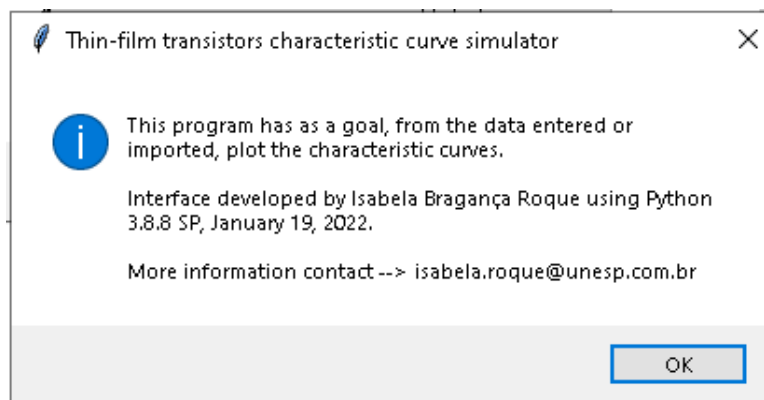


Figura 24: Janela informativa ao clicar no botão “*About*”.

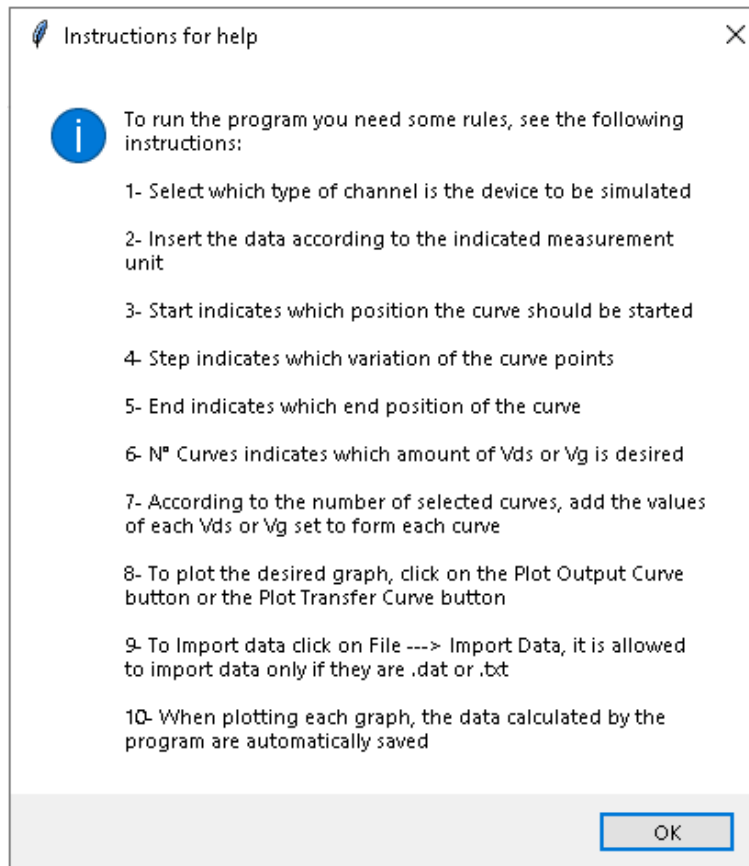
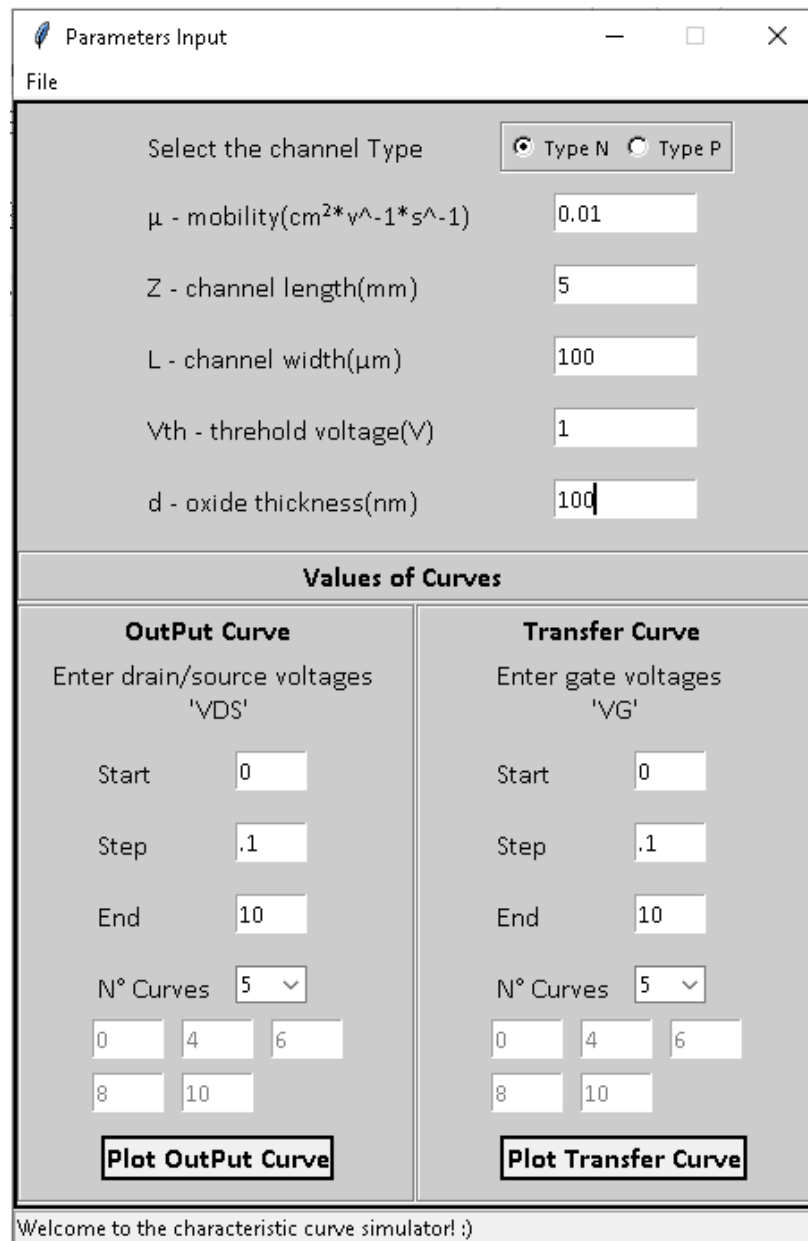


Figura 25: Janela informativa ao clicar no botão “Help”.

2.3.2 Exemplificação

De maneira similar ao realizado na seção 2.2.2, para demonstrar o funcionamento do software desenvolvido em python, segue exemplos de possíveis dados inseridos no programa conforme figura 26, para que seja feita a simulação.



Parameters Input

File

Select the channel Type Type N Type P

μ - mobility($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 0.01

Z - channel length(mm) 5

L - channel width(μm) 100

V_{th} - threhold voltage(V) 1

d - oxide thickness(nm) 100

Values of Curves

OutPut Curve		Transfer Curve	
Enter drain/source voltages 'VDS'		Enter gate voltages 'VG'	
Start	0	Start	0
Step	.1	Step	.1
End	10	End	10
N° Curves	5	N° Curves	5
0	4	6	
8	10		
Plot OutPut Curve		Plot Transfer Curve	

Welcome to the characteristic curve simulator! :)

Figura 26: Interface principal com possíveis dados preenchidos.

Depois de marcar o tipo do canal e preencher com os dados, ao selecionar o botão “*Plot OutPut Curve*” ou “*Plot Transfer Curve*”, o software importa os parâmetros do dispositivo inseridos e adiciona nas equações características (14) e (17) para realizar os cálculos dos valores de I_D , que são fundamentais para a plotagem de ambos os gráficos.

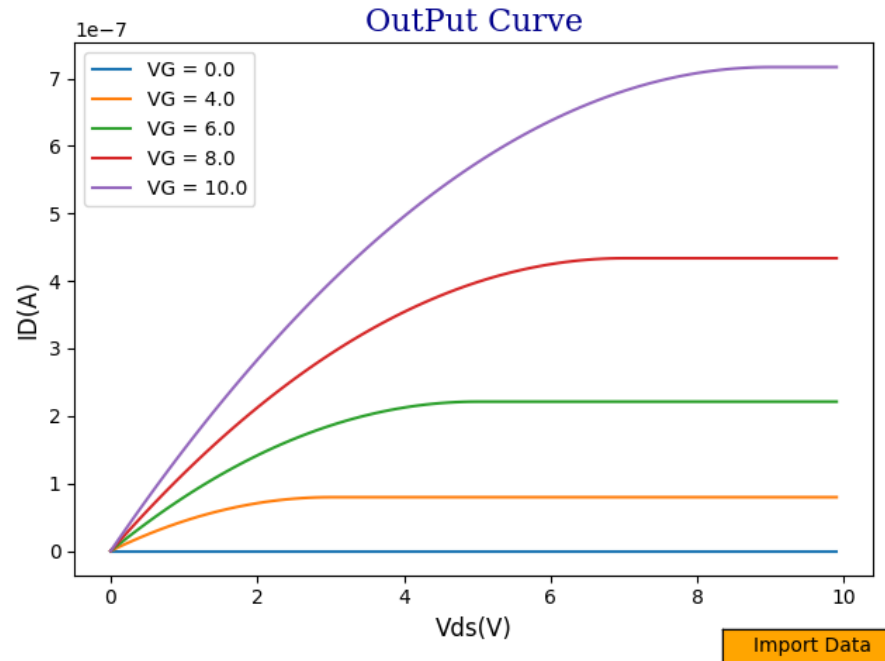


Figura 27: Curva de I_D versus V_{DS} , simulada pelo software em python.

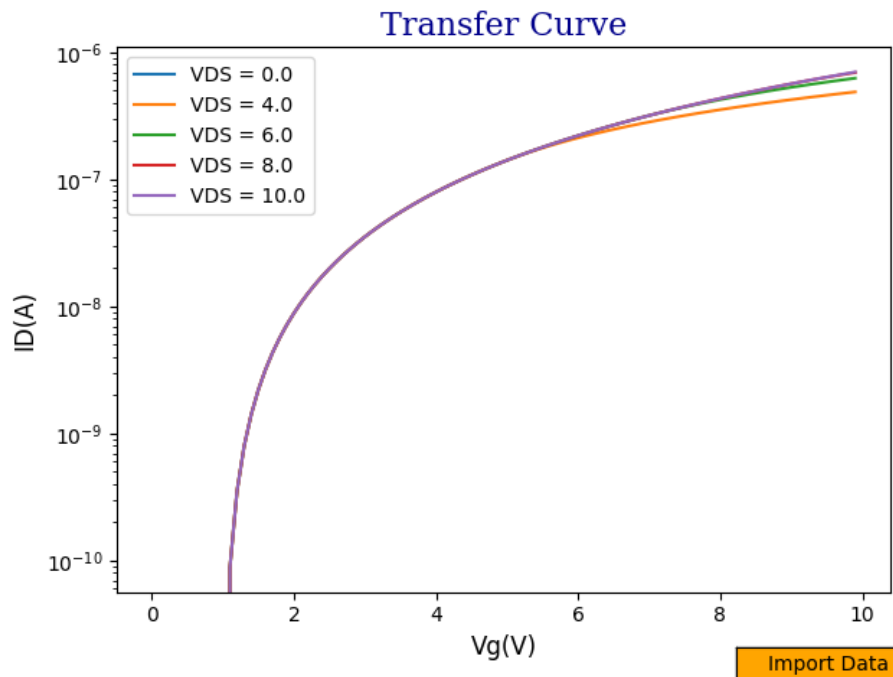


Figura 28: Curva de I_D versus V_G , simulada pelo software em python.

2.3.3 Formatação dos dados

As curvas simuladas são formadas a partir dos parâmetros inseridos e calculados através das equações de modelamento dos TFTs, ao realizar a plotagem das curvas no simulador, os dados da curva de saída e da curva de transferência são salvos automaticamente no mesmo diretório que se encontra o executável do programa, ou seja, cada vez que clicar nos botões responsáveis por plotar os gráficos as informações dos valores de I_D de cada curva, em conjunto com os dados inseridos de V_{DS} e V_G são organizados em um dataframe e salvos em um arquivo “.dat”.

A fim de realizar a comparação dos dados simulados com os dados experimentais, o surgimento de um botão “*Import Data*” presente nos gráficos plotados tem como objetivo realizar a importação dos dados necessários para plotagem das curvas experimentais no mesmo gráfico das curvas simuladas, os dados importados precisam ser do tipo arquivo data (.dat) ou arquivo de texto(.txt), essa função do *software* é fundamental para extrair informações importantes como o desvio padrão, o fator de idealidade e o coeficiente de determinação da curva, detalhados nas próximas sessões.

Após a importação dos dados há o aparecimento de outro botão na interface gráfica, “*Deviation*”, ao ser selecionado tem como funcionalidade salvar os valores dos desvios padrões calculados entre a curva simulada e a curva experimental, além de fazer os cálculos do coeficiente de determinação de cada curva detalhado nas próximas sessões.

3. ANÁLISES

A ferramenta construída permite a comparação dos valores obtidos experimentalmente com valores simulados teoricamente, com isso é possível investigar a partir dos parâmetros geométricos e elétricos dos TFTs quais dados interferem de maneira significativa na formação das curvas.

Para realizar as análises, dados experimentais compartilhados de dispositivos manufaturados do laboratório E-IMP (Laboratório de Eletrônica Impressa) na UNESP de Rio Claro permitiu essa comparação e extração de métricas significativas.

Além de a interface gráfica permitir a análise das curvas, o *software* faz o cálculo do desvio padrão, que são calculados e salvos em um arquivo com data e hora, após realizar a importação dos dados, o cálculo do desvio padrão foi realizado a partir de bibliotecas do python que realizam a média dos dados e o cálculo da raiz quadrada da variância que resulta no desvio padrão, dado por:

$$s = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad 20$$

No mesmo arquivo que é salvo os valores do desvio padrão outros dados importantes são calculados como o coeficiente de determinação (R^2), dado fundamental para fornecer informações sobre a qualidade do ajuste do modelo construído, ao medir o quão o alinhamento de regressão se aproxima dos dados experimentais, feita por subtração de um pela regressão de soma quadrada (SSR) dividido pela soma total dos quadrados (SST).

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{\sum(y_{eu} - \hat{y}_{eu})^2}{\sum(y_{eu} - \bar{y})^2} \quad 21$$

Onde y_{eu} é referente aos valores experimentais de y , \hat{y}_{eu} valores previstos para y , ou seja, os simulados e \bar{y} indica a média dos valores dada por:

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n} \quad 22$$

Após realizar as etapas descritas, a fim de obter um fator de idealidade (A^*), a análise das curvas é fundamental para obtê-lo, responsável por ajustar os dados experimentais em relação aos simulados, é um fator adimensional que geralmente varia de $1 \leq A^* \leq 2$, depois que sugerido e verificado, possibilita o estudo se um mesmo fator de idealidade se aplica ou se há proximidade para diferentes curvas de um mesmo dispositivo, a possibilidade de à partir da variação do fator de idealidade verificar quais parâmetros devem ser ajustados para melhor coincidência visual das curvas simuladas com as curvas experimentais e realizar o estudo nos demais dispositivos para verificar a diferença dos fatores de idealidade.

$$I(V) = A^* \cdot I_{ideal}(V) \quad 23$$

3.1 Fabricação dos dispositivos comparados com valores simulados

Os dados experimentais comparados com os dados simulados foram extraídos de dispositivos manufaturados TFTs fabricados com camada ativa de óxido de zinco como camada semicondutora, processados via úmida pela técnica *spray*-pirólise, método de deposição utilizado pois possui vantagens como baixo custo de equipamentos, facilidade de preparo dos filmes e produção de multicamadas que ocorre ao acionar um aerógrafo que expeli o *spray* da solução.

3.1.1 Materiais e métodos utilizados

O preparo das soluções precursoras que foram usadas para confecção dos TFTs fora feito a partir do precursor metálico acetato de zinco di-hidratado e álcool metílico como solvente, a concentração do acetato de zinco utilizada foi de 3% em 0,1M, relação massa por massa, onde fora agitada por um período de uma hora para que a dissolução fosse garantida.

O substrato utilizado foi o *wafer* de silício do tipo p, uma camada fina de material semicondutor com espessura de 100, 200 e 300nm, que serve como isolante, uma camada de 100nm de alumínio foi depositada na área inferior do substrato, para garantir melhor contato com o *gate*, depois dessa deposição houve a fragmentação das amostras em arestas de 15 mm.

Etapa fundamental para produção dos dispositivos eletrônicos é a limpeza dos substratos, processo de remoção de impurezas e gorduras que podem causar má formação dos filmes finos, onde fora realizado a imersão dos substratos em uma solução de 5% de detergente e 95% de água deionizada em um banho de ultrassom, durante 15 minutos á 55°C, depois foram retirados e submetidos em água destilada para remoção de todo detergente, submeteu-se as amostras em jatos de ar comprimido e depois inseridas em uma estufa à 130°C por 20 minutos para certificar que a remoção de possíveis resíduos de detergente fosse completa, ao término desse processo outro banho de ultrassom é realizado, mas com a imersão dos

substratos em acetona P.A por 15 minutos, após esse período ao retirar os substratos foram submetidos ao jato de ar comprimido seco e limpo.

Partículas muito pequenas podem ficar na superfície das amostras mesmo depois dos processos de limpeza descritos, para isso o tratamento da superfície com plasma é eficaz para remoção dessas impurezas garantindo uma melhor adesão do filme fino depositado, pois torna a superfície hidrofílica ao ser ionizada pelo plasma, isso ocorre através da relação dos contaminantes na superfície com o gás reativo do plasma.

Ao término dos processos descritos a próxima etapa é a deposição das camadas ativas pelo método de spray pirólise, assim a deposição dos filmes ocorre através de um aerógrafo mantido por uma placa de Arduino com USB, assim ao acionado há exposição de uma borrifada da solução no substrato sob uma placa aquecida á 300°C, com três camadas depositadas, depois as amostras passar pelo processo de calcinação submetidas a temperatura de 300, 400 e 500°C por uma hora. A última etapa é a deposição dos eletrodos de dreno e fonte dos dispositivos, para os TFTs produzidos fora usada uma evaporadora térmica de metais em conjunto com uma máscara mecânica, na qual evaporou uma camada de 10nm de alumínio.

3.2 Parâmetros experimentais

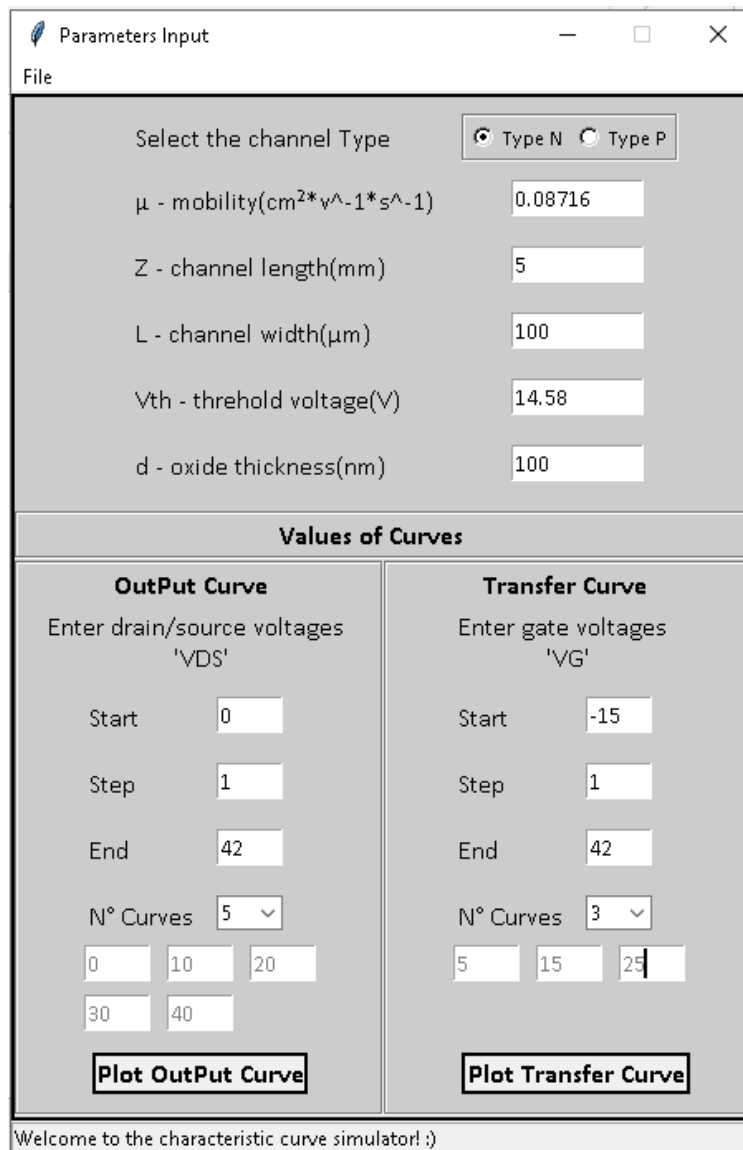
Para realizar a análise das curvas simuladas com as curvas experimentais alguns parâmetros dos dispositivos manufaturados são fundamentais, ao serem inseridos no simulador para obter as curvas teóricas, com isso, dados foram compartilhados para realização desse projeto, possibilitando a comparação das curvas, segue propriedades relevantes dos TFTs todos de tipo n, usados para análises.

	Dispositivo 1	Dispositivo 2	Dispositivo 3
μ (cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	0.08716	0.64872	0.7753
d(nm)	100	200	300
V_{th} (V)	14.58	25.14996	33.06943
L(μ m)	100	100	100
Z(mm)	5	5	5

Tabela 1: Parâmetros de três dispositivos manufaturados.

3.3 Análise 1

A primeira análise foi realizada através da inserção dos dados similares ao do primeiro dispositivo apresentados na tabela 1, ao selecionar os botões responsáveis por plotar os gráficos tem-se a plotagem das curvas simuladas em linhas com traços contínuos, para realizar essa análise valores foram importados dos dados de I_D medidos experimentalmente, plotados no mesmo gráfico dos valores simulados, em linhas tracejadas.



Parameters Input

File

Select the channel Type Type N Type P

μ - mobility($\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 0.08716

Z - channel length(mm) 5

L - channel width(μm) 100

Vth - threshold voltage(V) 14.58

d - oxide thickness(nm) 100

Values of Curves

OutPut Curve
Enter drain/source voltages 'VDS'

Start 0

Step 1

End 42

N° Curves 5

0 10 20

30 40

Plot OutPut Curve

Transfer Curve
Enter gate voltages 'VG'

Start -15

Step 1

End 42

N° Curves 3

5 15 25

Plot Transfer Curve

Welcome to the characteristic curve simulator! :)

Figura 29: Interface principal do software preenchida com valores equivalentes aos experimentais do dispositivo 1.

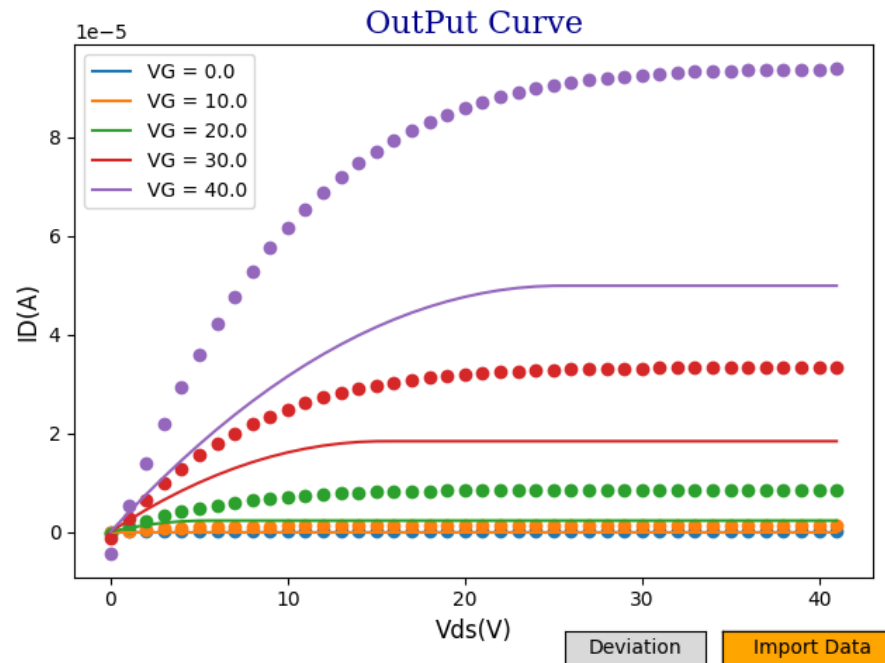


Figura 30: Curva de saída com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 1).

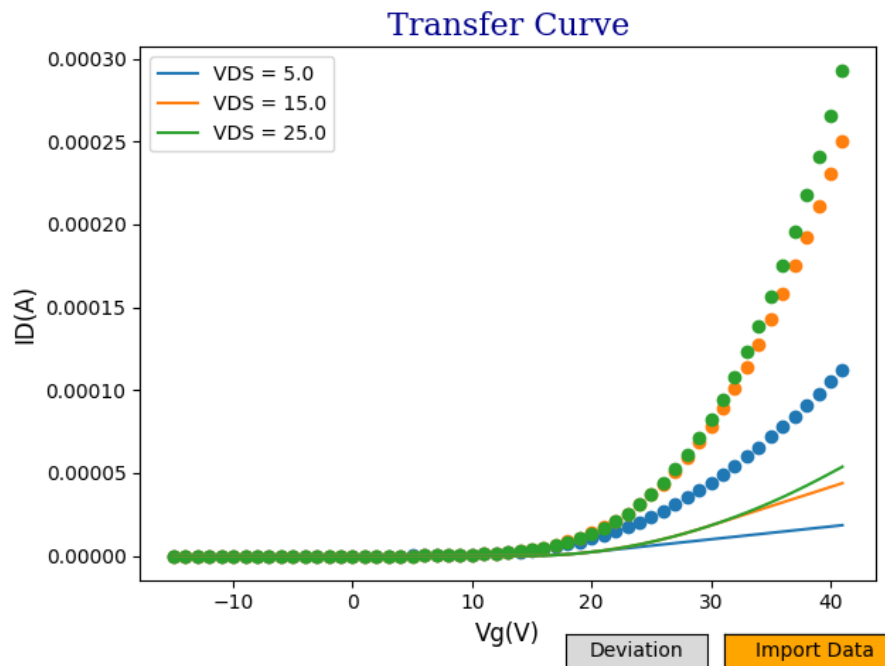
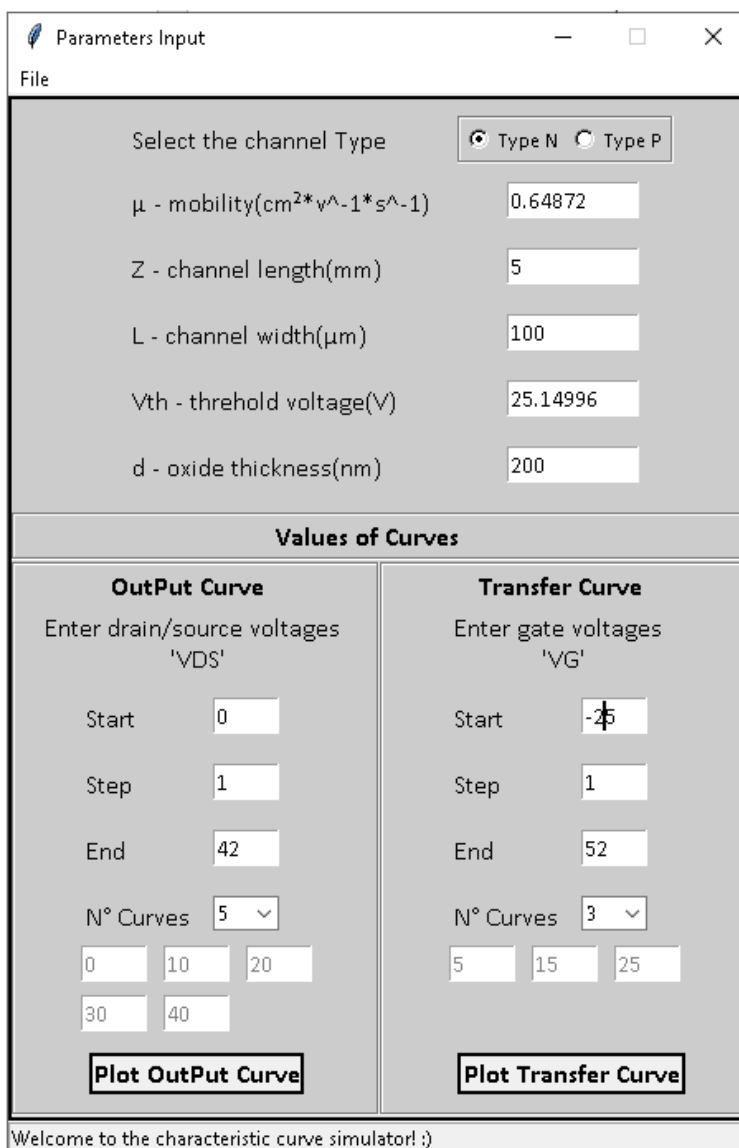


Figura 31: Curva de transferência com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 1).

3.4 Análise 2

Para segunda análise outro dispositivo fora comparado, o dispositivo 2 da tabela 1, assim fora possível inserir os parâmetros característicos do segundo dispositivo no simulador, ao plotar os gráficos linhas contínuas dos valores simulado se mostram e ao clicar no botão para importar os dados experimentais da corrente de dreno, as curvas experimentais foram plotadas novamente em linhas tracejadas.



Parameters Input

File

Select the channel Type Type N Type P

μ - mobility($\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 0.64872

Z - channel length(mm) 5

L - channel width(μm) 100

Vth - threshold voltage(V) 25.14996

d - oxide thickness(nm) 200

Values of Curves

OutPut Curve		Transfer Curve	
Enter drain/source voltages 'VDS'		Enter gate voltages 'VG'	
Start	0	Start	-25
Step	1	Step	1
End	42	End	52
N° Curves	5	N° Curves	3
0	10	20	5
30	40	15	25
Plot OutPut Curve		Plot Transfer Curve	

Welcome to the characteristic curve simulator! :)

Figura 32: Interface principal do software preenchida com valores equivalentes aos experimentais do dispositivo 2.

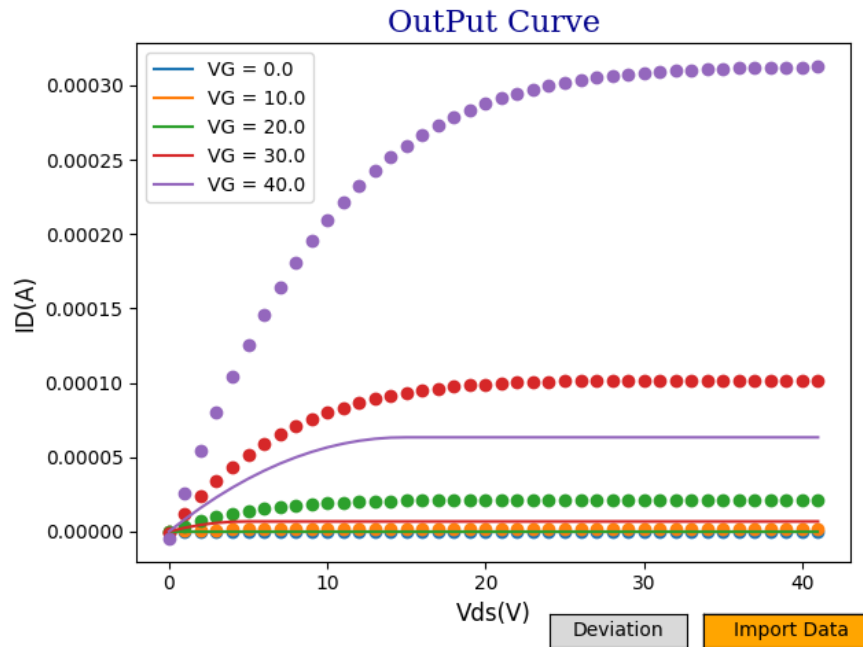


Figura 33: Curva de saída com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 2).

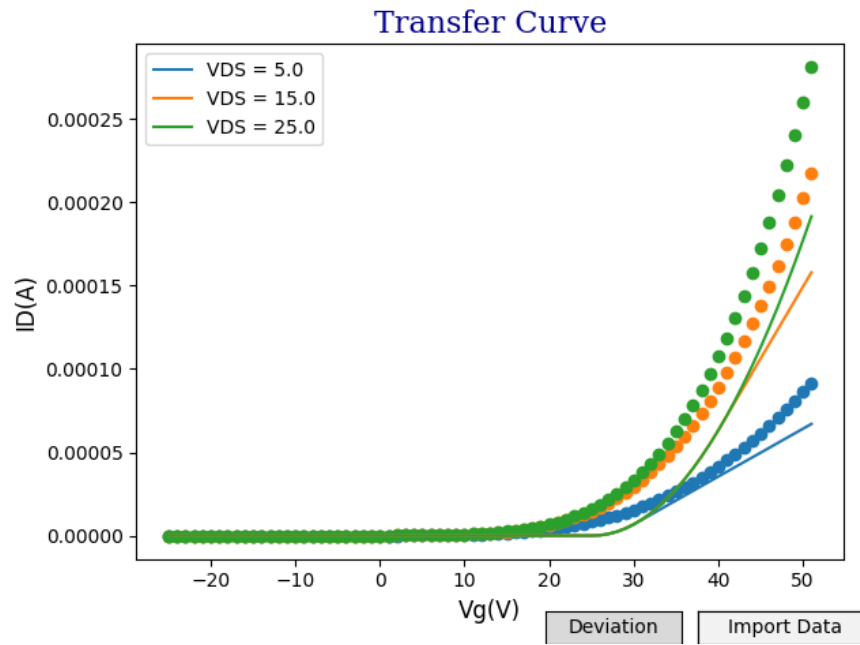
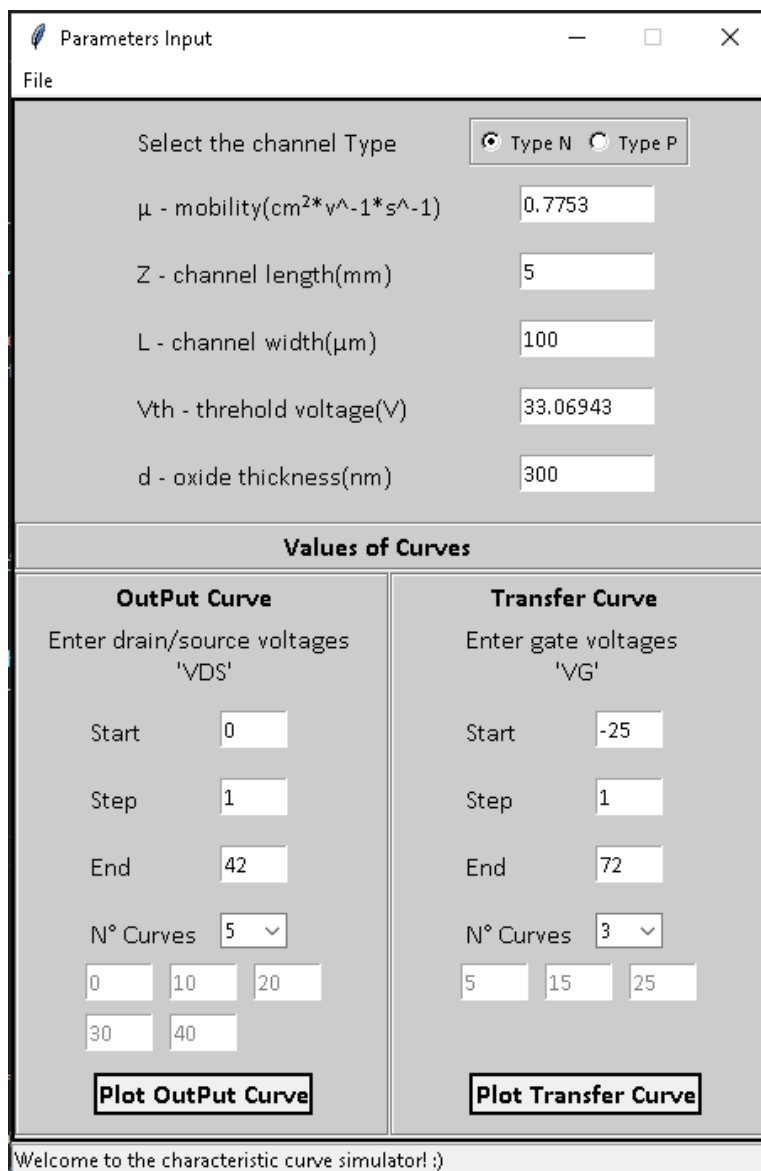


Figura 34: Curva de transferência com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 2).

3.5 Análise 3

De modo similar as análises um e dois, a análise três também segue os mesmos passos, utiliza-se os parâmetros do terceiro dispositivo da tabela 1, inseridos no simulador e após a plotagem das curvas simuladas há importação dos valores da corrente medidos experimentalmente e plotados no mesmo gráfico.



Parameters Input

File

Select the channel Type Type N Type P

μ - mobility($\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 0.7753

Z - channel length(mm) 5

L - channel width(μm) 100

V_{th} - threshold voltage(V) 33.06943

d - oxide thickness(nm) 300

Values of Curves

OutPut Curve
Enter drain/source voltages 'VDS'

Start 0

Step 1

End 42

N° Curves 5

0 10 20

30 40

Plot OutPut Curve

Transfer Curve
Enter gate voltages 'VG'

Start -25

Step 1

End 72

N° Curves 3

5 15 25

Plot Transfer Curve

Welcome to the characteristic curve simulator! :)

Figura 35: Interface principal do software preenchida com valores equivalentes aos experimentais do dispositivo 3.

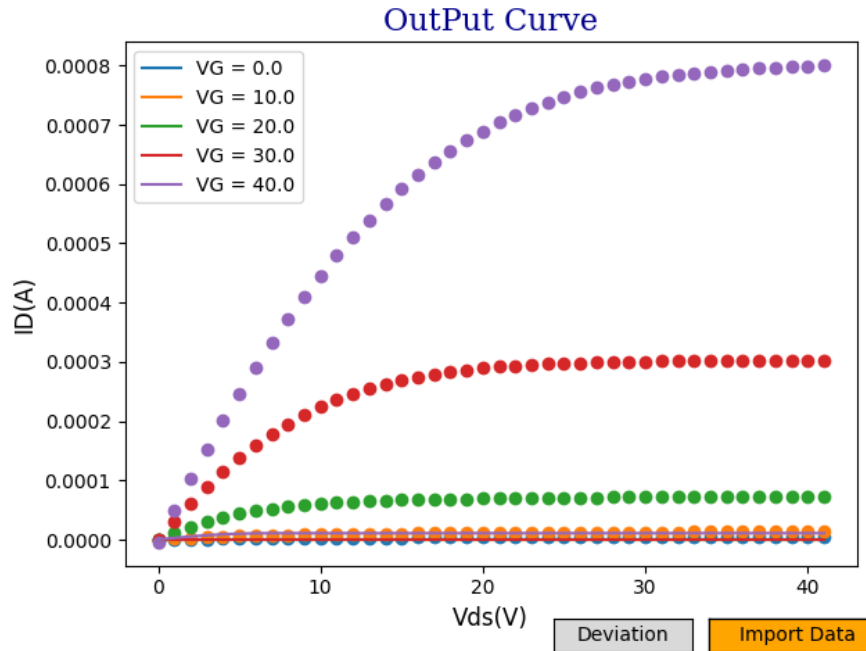


Figura 36: Curva de saída com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 3).

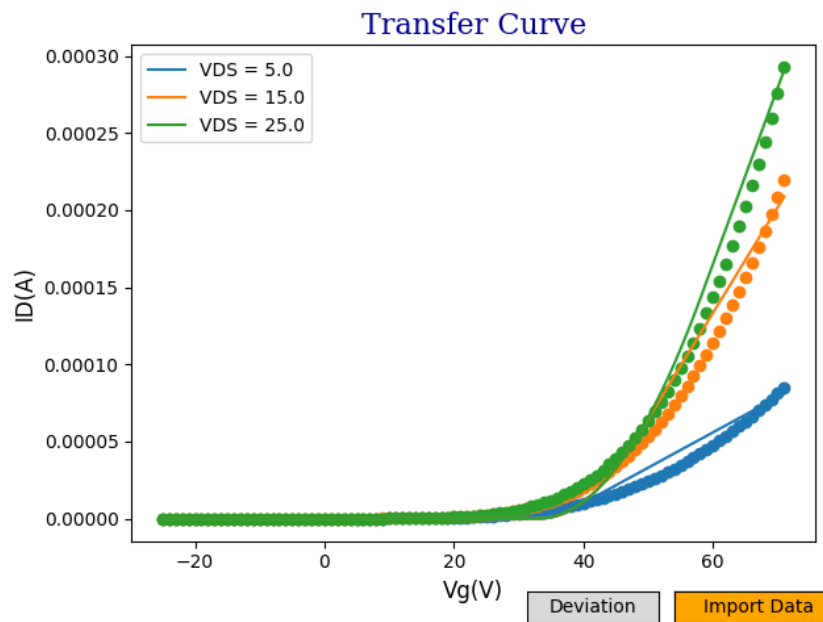


Figura 37: Curva de transferência com curvas simuladas e experimentais (dispositivo 3).

3.6 Resultados e ajustes dos valores experimentais com os simulados

Conforme descrito nos tópicos anteriores, o software realiza o cálculo do desvio padrão (equação 20) e salva os dados referentes as respectivas curvas no mesmo diretório que se encontra o software. Segue abaixo as tabelas contendo os desvios padrões entre as curvas simuladas e experimentais calculados nas três análises realizadas para as curvas de saída e curvas de transferência.

Desvio Padrão - Análise 1		
	Curva de saída	Curva de transferência
Curva (1)	8,11E-08	3,61E-05
Curva (2)	1,20E-06	7,45E-05
Curva (3)	5,64E-06	8,40E-05
Curva (4)	1,47E-05	-
Curva (5)	4,38E-05	-

Tabela 2: Valores dos desvios padrões calculados pelo simulador a partir da análise 1.

Desvio Padrão - Análise 2		
	Curva de saída	Curva de transferência
Curva (1)	2,53E-08	2,46E-05
Curva (2)	1,74E-06	5,67E-05
Curva (3)	1,94E-05	7,22E-05
Curva (4)	8,40E-05	-
Curva (5)	2,12E-04	-

Tabela 3: Valores dos desvios padrões calculados pelo simulador a partir da análise 2.

Desvio Padrão - Análise 3		
	Curva de saída	Curva de transferência
Curva (1)	3,90E-06	2,26E-05
Curva (2)	1,10E-05	5,63E-05
Curva (3)	6,49E-05	7,32E-05
Curva (4)	2,64E-04	-
Curva (5)	3,12E-04	-

Tabela 4: Valores dos desvios padrões calculados pelo simulador a partir da análise 3.

O desvio padrão expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados, no caso entre dados experimentais e dados simulados, os desvios calculados na primeira análise para curva de saída tem variação entre as curvas com ordem de grandeza 10^{-8} , 10^{-6} e 10^{-5} , na segunda análise equivalente as ordens de grandeza da primeiras porém com mais uma de 10^{-4} e na terceira análise possui ordens de 10^{-6} , 10^{-5} e 10^{-4} .

Para as curvas de transferência nas três análises ficaram em ordem de 10^{-5} . Isso indica que todos os dados calculados do desvio padrão estão relativamente próximos de zero, ou seja, são valores baixos, mostrando que os valores experimentais estão agrupados perto da média dos valores simulados.

A interface gráfica torna possível a verificação dos fatores de idealidade e calcula os possíveis valores dos coeficientes de determinação (equação 21), ao ajustar as curvas com os fatores de ajuste, o software realiza os cálculos do coeficiente de determinação, para isso se-guem os dados nas tabelas abaixo específicas de cada análise.

Análise 1 - Curva de Saída		
Curva	Coef. Determinação (R²)	Fator de idealidade (A*)
3° (Vg = 20)	0,75855634	3,4
4° (Vg = 30)	0,970727166	1,7
5° (Vg = 40)	0,991945758	1,9
Análise 2 - Curva de saída		
Curva	Coef. Determinação (R²)	Fator de idealidade (A*)
4° (Vg = 30)	0,675051058	13
5° (Vg = 40)	0,921747803	4,6
Análise 3 - Curva de saída		
Curva	Coef. Determinação (R²)	Fator de idealidade
5° (Vg = 40)	0,584364661	60

Tabela 5: Valores dos coeficientes de determinação calculados pelo simulador e os fatores de idealidade referentes a cada curva, das curvas de saída, relacionados às três análises.

Análise 1 - Curva de Transferência		
Curva	Coef. Determinação (R²)	Fator de idealidade (A*)
1° (Vg = 5)	0,983126256	5,3
2° (Vg = 15)	0,990652156	5.1
3° (Vg = 25)	0,99600489	5.1
Análise 2 - Curva de Transferência		
Curva	Coef. Determinação (R²)	Fator de idealidade (A*)
1° (Vg = 5)	0,985470715	1,3
2° (Vg = 15)	0,983008985	1,4
3° (Vg = 25)	0,984849993	1,5
Análise 3 - Curva de Transferência		
Curva	Coef. Determinação (R²)	Fator de idealidade (A*)
1° (Vg = 5)	0,984748148	0,9
2° (Vg = 15)	0,987842523	0,9
3° (Vg = 25)	0,993265181	0,9

Tabela 6: Valores dos coeficientes de determinação calculados pelo simulador e os fatores de idealidade referentes a cada curva, das curvas de transferência, relacionados às três análises.

Os fatores de idealidade são valores responsáveis pelo ajuste dos dados, onde melhoraram a visualização das curvas, assim indica o quanto devem ser multiplicados cada ponto dos valores de correntes simulados para aproximar-se dos valores reais, os fatores de idealidade presentes nas três análises das curvas de saída, não seguem um padrão, cada curva tem um valor específico para que seja ajustada. Para as curvas de transferência observa-se um padrão de dados para cada análise, os fatores de ajustes das curvas são próximos para diferentes curvas em um mesmo dispositivo, onde na terceira análise a taxa de idealidade é próxima à 1, ou seja, os dados experimentais já estão bem próximos aos dados simulados, sem necessidade de maiores ajustes.

O ajuste dos dados a partir do fator de idealidade, há o cálculo dos coeficientes de determinação, quanto mais próximo de 100%, maior é a qualidade de ajuste do modelo

apresentado, nas análises das curvas de saída a variação da primeira análise mostra que a terceira curva tem 76%, a quarta com 97% e a quinta com 92%, assim as duas últimas curvas apresentam maior proximidade a linha de regressão ajustada, na segunda análise a quarta curva tem 67% e a quinta explica 92% e na terceira análise a única curva possível de realizar os cálculos teve como resultado de 58%, um valor mais distante do ideal ao realizar o ajuste. Para as análises das curvas de transferências os valores do coeficiente de determinação variaram entre 98% e 99%, isso significa que são valores próximos à $R^2 = 1$, dados que indicam maior explicação da variabilidade do modelo em torno de sua mediana.

Segue alguns exemplos das curvas de saída e transferência com os valores ajustados pelos fatores de idealidade presentes nas tabelas apresentadas (tabela 5 e tabela 6);

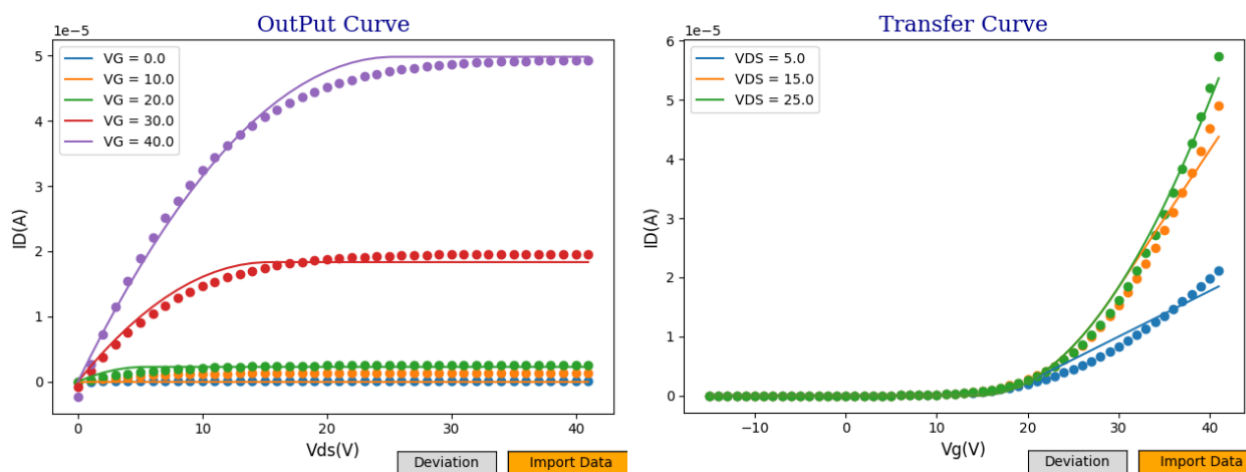


Figura 38: Curva de saída e curva de transferência ajustadas referentes ao dispositivo 1.

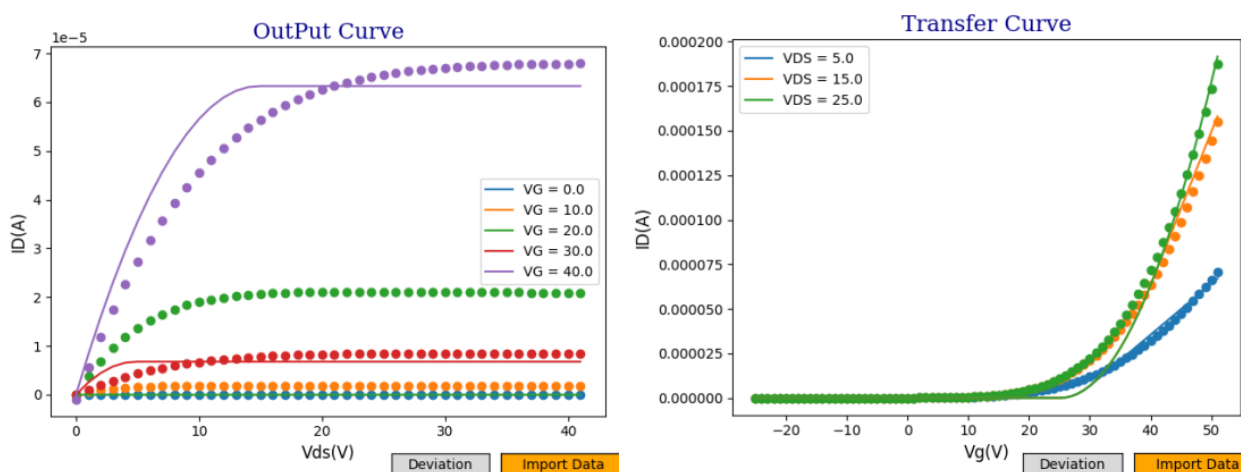


Figura 39: Curva de saída e curva de transferência ajustadas referentes ao dispositivo 2.

4. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

De acordo com as análises realizadas, o software cumpre seu objetivo da realização das curvas características simuladas a partir dos parâmetros inseridos e ao importar os dados experimentais a comparação entre eles permite a investigação para possíveis ajustes de parâmetros experimentais a fim de obter um melhor resultado, além de agilizar a resposta de possíveis resultados para suposições da variação dos parâmetros e das tensões aplicadas.

Em relação aos desvios padrão analisados, os dados calculados indicaram que de uma maneira geral há uma menor dispersão do conjunto de dados, menor magnitude do desvio entre os dados experimentais e a média dos dados simulados, ou seja, os pontos experimentais tendem a estar próximos aos centros de distribuição dos valores simulados.

Os fatores de idealidades informados são fundamentais para realizar o ajuste das curvas, os resultados mostram que para as curvas de saída não obedecem a nenhum padrão, somente para as curvas de transferência os fatores são próximos para um mesmo dispositivo, a partir disso os cálculos dos coeficientes de determinação foram realizados, informando que a partir dos ajustes, a qualidade dos mesmos é analisada, para as curvas de transferência significa que o modelo se ajusta aos dados da melhor forma, porém para curva de saída os valores foram variados.

As curvas simuladas são executadas a partir dos valores calculados I_D , dados gerados a partir das equações de modelamento das regiões de operação linear e de saturação que obedecem a condição de $V_G > V_{th}$, ou seja, o simulador atende seu objetivo para o modo de intensificação, onde a condução de corrente começa quando a tensão da porta chega ao ponto da tensão de limiar, no modo de depleção quando a tensão da porta é negativa para $V_G < V_{th}$, há necessidade de uma equação apropriada para descrever o comportamento dos elétrons e conseqüentemente a formação da curva nessa região, objetivo futuro desse projeto realizar esse estudo para aplicar ao algoritmo, uma pesquisa que contemple o escopo mais real possível, pois esse projeto as simulações atendem uma visão idealizada e generalizada do detalhamento do modelo físico dos transistores de filme fino.

REFERÊNCIAS

- [1] Simon M. Sze; Mig-Kwwei Lee. Semiconductor: devices physics and technology. 3rd Edition, Third Avenue, New York. Publishing Company: Copyright John Wiley e Sons, 1985,2002,2012.
- [2] Dieter K. Schroder. Semiconductor Material and Device Characterization. 3rd Edition. Hoboken, New Jersey and Canada. Publishing Company: Copyright John Wiley e Sons, 2006.
- [3] Banks, K. “Introduction to Simulation”. Brooks Automation, AutoSimulations Division Atlanta, GA 30067, U.S.A. 2000. – Site: <https://www.informs-sim.org/wsc00papers/003.PDF>
- [4] Vinicius Ramos Zanchini. “Análise do desempenho elétrico de transistores orgânicos visando a fabricação sobre substratos flexíveis.” Mestrado, Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), 2013.
- [5] H.B. de Carvalho. Luiz de Melo Campos Júnior. “Síntese e caracterização de óxidos magnéticos diluídos nanoestruturas preparadas por moagem mecânica.” Mestrado, Unifal(Universidade Federal de Alfenas). 10.13140/RG.2.2.21463.73127. June 2014.
- [6] Miguel de Castro Oliveira. Eletricidade - Semicondutores. Site: [Semicondutores - Cola da Web](#). © 2000 - 2022 Cola da Web.
- [7] Emma Ashely. What are semiconductors? Definition, types, industries. Design Spark. Site: [What are semiconductors? definition, types, industries. \(rs-online.com\)](#). 6 Apr 2021.
- [8] Francesco Sacco. A história do primeiro Transistor. Embarcados. Site: [Conheça a história do primeiro Transistor - Embarcados](#). 23/12/2017.

- [9] Imagem retirada da Url - [augarten-1958-image.jpg \(562×480\) \(si.edu\)](#).
- [10] Alexandra F. Paterson, Thomas D. Anthopoulos. Enabling thin-film transistor Technologies and the device metrics that matter. Nature Communications. DOI: 10.1038/s41467-018-07424-2. December 2018.
- [11] Carlos Fernando Teodósio Soares. Transistores de Efeito de Campo MOSFET – Apostila - Capítulo V. EEL410 Eletronica II – Poli/UFRJ. Site: http://www.pads.ufrj.br/~cfts/index_arquivos/Elet2/Apostila/Capitulo_05.pdf
- [12] Laboratório Electrónico. Como Funciona um TECI(MOSFET) Canal n. Museo das Comunicações. Site: [Como Funciona um TECI \(MOSFET\) Canal n \(cmm.gov.mo\)](#). 22/12/2021.
- [13] Zhu, Jia-He, Da-Wei Wang, Wen-Sheng Zhao, Jia-Yun Dai, and Gaofeng Wang. 2021. "A Proposal of Vertical MOSFET and Electrothermal Analysis for Monolithic 3-D ICs" *Electronics* 10, no. 18: 2241. <https://doi.org/10.3390/electronics10182241>
- [14] Amokrane, Gana, Ramtani, S., Migonney, Véronique, Falentin-Daudré, Célin. A Simple Method to Functionalize PCL Surface by Grafting Bioactive Polymers Using UV Irradiation. DOI:10.1016/j.irbm.2018.07.002. July 2018. Site: https://www.researchgate.net/publication/326537310_A_Simple_Method_to_Functionalize_PCL_Surface_by_Grafting_Bioactive_Polymers_Using_UV_Irradiation
- [15] Hamilton Nunes da Costa. Limpeza revestimento cvd pvs texturização. Atualização janeiro 29,2022. Site: [REVESTIMENTOS CVD \(Chemical Vapor Deposition\) E PVD \(Physical Vapor Deposition\) - Molde Injeção Plásticos \(moldesinjecaoplasticos.com.br\)](#).
- [16] Zhang, X., Zhang, J., W. et al. Fabrication and comparative study of top-gate and bottom-gate ZnO- TFTs with various insulator layers. J Mater Sci: Mater Electron 21, 671-675(2010). <https://doi.org/10.1007/s10854-009-9975-3>

APENDICE I – Código fonte e bibliotecas utilizadas

O código fonte encontra-se no repositório do GitHub, no seguinte link:

<https://github.com/IsabelaBrag/SimuladorCurvasCaracteristicas/blob/main/SimuladorCurvasCaracteristicas.py>

Para o desenvolvimento desse projeto, segue bibliotecas utilizadas na construção do software:

- *Statistic*: Uso de funções que realizam cálculos de média de um conjunto de dados e que calcula a variância e o desvio padrão amostral.

- *Tkinter*: Responsável por funções que auxiliam na construção das janelas e personalização das interfaces presentes no projeto.

- *Sys*: Usada para indicar o passo de execução do término no programa.

- *Numpy*: Biblioteca responsável por realizar manipulações matemáticas de arrays.

- *Matplotlib*: Utilizada para realizar a plotagem das curvas características.

- *Pandas*: Responsável pela manipulação e análise dos dados, gerencia data frames.

- *Copy*: Fundamental para o uso de uma função (deepcopy) que não permite sobrescrever dados.

- *Datetime*: Usada para salvar dados com a data e hora exata da execução de determinadas etapas.