

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA CRISTINA DE PAULA

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM EGOFET BASEADO EM DNTT COMO CANAL
SEMICONDUTOR E MEL COMO ELETRÓLITO

CURITIBA

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA CRISTINA DE PAULA

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM EGOFET BASEADO EM DNTT COMO CANAL
SEMICONDUTOR E MEL COMO ELETRÓLITO

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Física, no Setor
de Exatas, na Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. José Pedro Mansueto Serbena

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Paula, Ana Cristina de

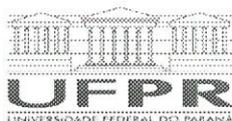
Estudo da estabilidade de um EGO-FET baseado em DNNT como canal semicondutor e mel como eletrólito/ Ana Cristina de Paula. - Curitiba, 2024.

1 recurso on-line: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física. Defesa: 15/05/2024.

Orientador: Prof. Dr. José Pedro Mansueto Serbena

1. Transistores de efeito de campo. 2. Mel. 3. Estabilidade. 4. Eletrólitos. I. Serbena, José Pedro Mansueto. II. Universidade Federal do Paraná. III. Programa de Pós-Graduação em Física. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO FÍSICA - 40001016020P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação FÍSICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANA CRISTINA DE PAULA** intitulada: "**Estudo da Estabilidade de um EGOFET Baseado em DNTT como Canal Semicondutor e Mel como Eletrólito**", sob orientação do Prof. Dr. JOSÉ PEDRO MANSUETO SERBENA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 15 de Maio de 2024.

JOSÉ PEDRO MANSUETO SERBENA
Presidente da Banca Examinadora

MARLIO JOSÉ DO COUTO BONFIM
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

CELSO DE ARAUJO DUARTE
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Este trabalho é dedicado a todos os momentos em que eu escolhi não desistir.

Agradecimentos

Ao Criador e à Nossa Senhora Aparecida, por nunca desistirem de mim.

Ao Prof. José Pedro Mansueto Serbena, por todos os anos de trabalho juntos e por todas as oportunidades de novos trabalhos.

À Prof.^a. Keli Fabiana Seidel e ao Prof. Marlus Koehler, por todas as valiosas contribuições para as apresentações da pré-defesa e da defesa.

Ao Prof. Ivo Alexandre Hümmelgen, por tudo que eu pude aprender com ele.

Ao Prof. Neri Alves e aos membros do LaDSor, da UNESP, pelo fornecimento dos eletrodos interdigitados e do polímero DNNT.

Aos meus queridos amigos do Grupo de Dispositivos Optoeletrônicos Orgânicos: Ângela, Clara, Denny, Gabriela, Jean, Jéssica, Jonas, Marcelo, Maria, Raquel, Renan, Thayna, Thiago e Wesley, por todas as conversas, risadas e as sugestões para as apresentações da pré-defesa e da defesa.

Aos meus pais, Dirce e João, por sempre torcerem por mim e por sempre estarem ao meu lado.

Ao Diogo Luis Siim Salles Viana, pela imensa ajuda com a Física Quântica.

Ao Dudu, pelas conversas e pelo apoio desde que ingressei na UFPR.

À Ana Cláudia, que faz o melhor café e sempre está disponível para uma boa conversa, não importa o assunto.

À toda a equipe de médicos e servidores dos CASA 3 e CASA 4 da UFPR, em especial ao Dr. João Guilherme e ao Dr. Fausto, as psicólogas Michele, Juliana e a Lúcia, por todo o imenso acolhimento que tive desde que ingressei na UFPR, por me fornecerem as ferramentas necessárias para que eu pudesse chegar até aqui e por sempre terem cuidado de mim quando eu mais precisei.

À minha avó Ana, ao meu avô Antônio e a meu tio Cláudio, em homenagem às suas memórias.

Ao Djonata Rafael Andruchechen, por sempre ter me apoiado.

À coordenação e à secretaria do Programa de Pós-Graduação em Física, por todo o suporte fornecido durante o mestrado.

Aos professores membros das bancas de qualificação e defesa, pelas contribuições a este trabalho.

À CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPQ, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

Darling, look into my eyes

And tell me what's inside

Truth be told, my dear

You don't know what is like

To leave all behind...

Yohio — My Nocturnal Serenade

*"Remember my friend, that knowledge is stronger than memory,
and we should not trust the weaker."*

Van Helsing — Dracula — Bram Stoker

RESUMO

Uma das vantagens do uso de semicondutores orgânicos (SOs) é o custo reduzido em relação aos inorgânicos, que podem ser aplicados em dispositivos biocompatíveis, cujas pesquisas permitiram o desenvolvimento de dispositivos capazes de diagnosticarem doenças no local onde o paciente está. No entanto, algumas características dos SOs necessitam de aperfeiçoamento, como a estabilidade e a degradação ao longo do tempo. Neste trabalho, foi estudado o comportamento do transistor baseado na molécula orgânica dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNNT) e na estrutura Au/DNNT(Mel)/Au, ao longo de cinco semanas, através de medidas de caracterização elétricas ($I \times V$, transferência e saída) e dos parâmetros razão On/Off, limiar de operação, transcondutância e produto da mobilidade efetiva pela capacitância. Os eletrodos fonte e dreno, ambos de ouro, foram depositados por litografia, sobre um substrato rígido de vidro, e sobre ele foi depositado a molécula orgânica conjugada DNNT através de evaporação térmica a vácuo, na espessura de 100 nm. Sobre o DNNT foi depositado uma gota de mel de 5 μL através da técnica de gotejamento e o eletrodo de porta utilizado foi um fio de platina, que perfurou a gota de mel. Das medidas de caracterização, concluiu-se que o transistor é um transistor de efeito de campo com porta eletrolítica (EGOFETs, do inglês *electrolyte-gated field effect transistor*), porque não apresentou dopagem no canal, logo a interação entre o mel e o DNNT ocorreu de maneira superficial, sem a penetração efetiva dos íons presente no mel no DNNT. A razão On/Off é estável ao longo dos ciclos de medidas, mas diminui com o passar das semanas, e a tensão do limiar de operação, o produto da mobilidade pela capacitância e a transcondutância não apresentaram variação expressiva, permanecendo estável durante as medidas e as semanas.

Palavras-chave: EGOFET, DNNT, mel, estabilidade.

ABSTRACT

One of the advantages of using organic semiconductors (SOs) is the reduced cost compared to inorganic ones, which can be applied in biocompatible devices, whose research has allowed the development of devices capable of diagnosing diseases where the patient is. However, some characteristics of OSs require improvement, such as stability and degradation over time. In this work, the behavior of the transistor based on the organic molecule dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNNT) and the Au/DNNT(Honey) structure was studied. /Au, over five weeks, through electrical characterization measurements ($I \times V$, transfer and output) and the parameters On/Off ratio, operating threshold, transconductance and product of effective mobility by capacitance. The source and drain electrodes, both made of gold, were deposited by lithography, on a rigid glass substrate, and the conjugated organic molecule DNNT was deposited on it through vacuum thermal evaporation, at a thickness of 100 nm. A 5 μ L drop of honey was deposited on the DNNT using the dripping technique and the gate electrode used was a platinum wire, which pierced the honey drop. From the characterization measurements, it was concluded that the transistor is an electrolyte-gated field effect transistor (EGOFETs), because there was no doping in the channel, therefore the interaction between the honey and the DNNT occurred superficially, without effective penetration of the ions present in the honey into the DNNT. The On/Off ratio is stable throughout the measurement cycles, but decreases over the weeks, and the operating threshold voltage, the product of mobility by capacitance and transconductance did not show significant variation, remaining stable during measurements and the weeks.

Keywords: EGOFET, DNNT, honey, stability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: (a) Monitor com a tela baseada em OLED; (b) Televisão com tela baseada em OLED; (c) Celular dobrável com a tela baseada em OLED. Fonte: Samsung..... | 17 |
| Figura 2.1: Esquema da válvula de diodo, inventada por J. A. Fleming em 1904. Ela é composta de um anodo e um catodo, que estão em temperaturas diferentes e o espaço entre eles possui uma condutividade elétrica unilateral, fazendo com que a corrente passe por ela em apenas uma direção. [1] | 19 |
| Figura 2.2: Tríodo. Fonte da imagem: Wikipedia..... | 20 |
| Figura 2.3: Televisão de válvula. Fonte da imagem: General Electric S. A..... | 20 |
| Figura 2.4: (a) Réplica do transistor de contato pontual, inventado por J. Bardeen e W. H. Brattain. (b) Transistor de junção bipolar, inventado por W. Shockley. Fonte das imagens: Wikipedia..... | 21 |
| Figura 2.5: Algumas das formas alotrópicas do carbono: (a) diamante, (b) grafite, (c) fulereno e (d) nanotubo. Fonte das imagens: Wikipedia..... | 22 |
| Figura 2.6: Arranjos dos átomos de carbono que são extremamente importantes para os semicondutores orgânicos: (a) benzeno e (b) tiofeno. Figura da autora..... | 22 |
| Figura 2.7: Smartphone Samsung Galaxy Z Fold, 2023. Fonte: Samsung..... | 23 |
| Figura 2.8: Esquema da estrutura de um transistor de efeito de campo (fora de escala). Figura da autora..... | 24 |
| Figura 2.9: Esquema de um EGOFET e de um OECT. Figura da autora..... | 25 |
| Figura 2.10: Esquema do transistor para o cálculo de seus parâmetros. Retirado de [23].... | 26 |
| Figura 2.11: (a) Imagem do equipamento SiMoT ELISA, que contém os transistores, (b) Vista de cima dos 96 EGOFETs usados como sensores para a análise de amostras clínicas de tecidos pancreáticos, (c) Esquema do transistor, (d) Visão aumentada de onde as amostras dos fluidos dos cistos são colocadas, compostas por 16 portas sensíveis a elas. Retirado de [26] | 35 |
| Figura 2.12: (a) Imagem óptica do EGOFET impresso por jato de tinta, com uma camada de PMMA depositada em volta da área ativa. (b) Imagem óptica mostrando o detalhe entre o canal e o eletrodo de porta do transistor. Retirado de [30] | 36 |
| Figura 2.13: Sumário das potenciais aplicações dos transistores orgânicos, com enfoque na bioeletrônica. Duas de suas vantagens são: a biocompatibilidade, que permite o contato com um sistema vivo sem efeitos adversos, e a biodegradabilidade, que permite uma eletrônica transiente e sem desperdício de dispositivos. Estes podem ser aplicados | |

| | |
|---|----|
| em circuitos integrados, em dispositivos biomédicos, em eletrônica comestível e em dispositivos de sinapse artificial. Retirada de [34] | 37 |
| Figura 2.14: (a) Esquema do dispositivo portátil baseado em EGOFET que é capaz de identificar a presença do vírus influenza em uma amostra líquida. (b) Foto da vista lateral. (c) Foto da vista de cima. Retirada de [37] | 37 |
| Figura 3.1: Esquema em cores fantasiosas, enfatizando a estrutura planar do transistor. A fonte e o dreno são de ouro, o canal é o polímero dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNNT), o mel (comercial, da marca Baldoni) é a camada eletrolítica e a porta é um fio de platina, que perfura a gota de mel. Figura da autora..... | 38 |
| Figura 3.2: Foto do eletrodo interdigitado, composto por 20 nm de cromo e 100 nm de ouro, com o DNNT (em amarelo) depositado sobre ele. Figura da autora..... | 39 |
| Figura 3.3: Dimensões do eletrodo interdigitado. Figura da autora..... | 39 |
| Figura 3.4: Estrutura molecular do DNNT. Fonte: Site da MERCK..... | 39 |
| Figura 3.5: Foto do transistor com os três eletrodos de fonte, dreno e porta. Figura da autora..... | 40 |
| Figura 3.6: Foto do (a) mel utilizado como eletrólito e (b) recipiente de armazenamento do dispositivo durante o período de medidas. Figura da autora..... | 40 |
| Figura 3.7: Foto das ligações elétricas do transistor. Imagem da autora..... | 41 |
| Figura 4.1: Medidas de $I \times V$ para a região Au/DNNT/Au, onde os pontos em preto se referem à medida sem a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída e os pontos em vermelho se referem à medida com a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída. Foram realizados três ciclos em cada medida..... | 43 |
| Figura 4.2: Curva de transferência ($I_{DS} \times V_{GS}$) (pontos fechados) e a corrente de fuga ($I_{GS} \times V_{GS}$) (pontos abertos) referente ao 1º ciclo da Semana 1, com $V_{DS} = -1$ V..... | 44 |
| Figura 4.3: (a) Curva de saída ($I_{DS} \times V_{DS}$) e da (b) corrente de fuga ($I_{GS} \times V_{DS}$) para a medida da Semana 1..... | 45 |
| Figura 4.4: Medidas de $I \times V$ para a região Au/DNNT/Au, onde os pontos em preto se referem à medida sem a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída, os pontos em vermelho se referem à medida com a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída e os pontos em azul se referem à medida com a presença do mel, após todas as medidas de transferência e saída..... | 46 |
| Figura 4.5: (a) Curva de transferência ($I_{DS} \times V_{GS}$) (pontos fechados) e (b) Curva de saída ($I_{DS} \times V_{DS}$) (pontos abertos) obtidas na Semana 5, com $V_{DS} = -1$ V..... | 47 |
| Figura 4.6: Curva de transferência para a obtenção da razão On/Off do transistor, com $V_{DS} = -1$ V..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.7: Curva para a obtenção do limiar de operação, com $V_{DS} = -1$ V..... | 49 |
| Figura 4.8: Curva da transcondutância a $V_{DS} = -1$ V..... | 50 |
| Figura 4.9: Medidas de transferência ($I_{DS} \times V_{GS}$) (pontos fechados) e da corrente de fuga ($I_{GS} \times V_{GS}$) (pontos abertos) para (a) 1º ciclo, (b) 5º ciclo, (c) 10º ciclo e (d) 15º ciclo para as cinco semanas de caracterização elétrica do transistor..... | 52 |
| Figura 4.10: Gráfico de I_{ON} , plotados em função do número de ciclos..... | 53 |
| Figura 4.11: Gráfico de I_{OFF} , plotados em função do número de ciclos..... | 54 |
| Figura 4.12: Gráficos de I_{ON}/I_{OFF} para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos..... | 54 |
| Figura 4.13: Gráficos dos valores médios de I_{ON}/I_{OFF} para cada semana de medida..... | 55 |
| Figura 4.14: Gráfico da tensão do limiar de operação (V_T) para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos..... | 55 |
| Figura 4.15: Gráfico dos valores médios da tensão do limiar de operação (V_T) para cada semana de medida..... | 56 |
| Figura 4.16: Gráfico de μC para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos..... | 56 |
| Figura 4.17: Gráfico dos valores médios de μC para cada semana de medida..... | 57 |
| Figura 4.18: Gráfico da transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos..... | 57 |
| Figura 4.19: Gráfico dos valores médios da transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4..... | 58 |
| Figura 4.20: Gráfico da tensão associada à transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos..... | 58 |
| Figura 4.21: Gráfico dos valores médios da tensão associada à transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4..... | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1: Parâmetros utilizados nas medidas de caracterização elétrica do transistor.... | 41 |
| Tabela 3.2: Datas das medidas feitas ao longo das semanas..... | 41 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------------|---|
| SIs | Semicondutores inorgânicos |
| SOs | Semicondutores orgânicos |
| OLEDs | Dispositivos emissores de luz orgânicos |
| PET | Polietileno tereftalato |
| FET | Transistores de efeito de campo |
| MOSFET | Transistor de efeito de campo de metal óxido semicondutor |
| VOFET | Transistor de efeito de campo vertical |
| OFET | Transistor de efeito de campo orgânico |
| EGOFET | Transistor de efeito de campo de porta eletrolítica |
| OEET | Transistor orgânico eletroquímico |
| DNTT | <i>dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene</i> |
| Au | Ouro |
| Pt | Platina |
| W | Comprimento do canal |
| L | Largura do canal |
| I_{DS}, I_{DSAT} | Corrente entre fonte e dreno no regime de saturação |
| V_{DS}, V_{DSAT} | Tensão entre fonte e dreno no regime de saturação |
| I_{GS} | Corrente entre fonte e porta, corrente de fuga |
| V_{GS} | Tensão entre fonte e porta |
| V_T | Tensão do limiar de operação |
| I_{ON} | Corrente máxima no estado ligado do transistor |
| I_{OFF} | Corrente mínima no estado desligado do transistor |
| g_m | Transcondutância |
| C | Capacitância |
| μ | Mobilidade |
| μC | Produto da mobilidade e da capacitância |
| AS | Armadilhas superficiais |
| AP | Armadilhas profundas |
| HMF | <i>5-hydroxymethyl furfural</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1 - Introdução..... | 17 |
| 1.1 Introdução..... | 17 |
| 1.2 Objetivos gerais..... | 18 |
| 1.3 Objetivos específicos..... | 18 |
| Capítulo 2 – Teoria e Estado da Arte | 19 |
| 2.1 Breve introdução histórica dos transistores..... | 19 |
| 2.2 Transistores orgânicos..... | 23 |
| 2.3 Modelos teóricos para a obtenção dos parâmetros do transistor..... | 26 |
| 2.3.1 Modelo de G. Horowitz para EGOFETs..... | 26 |
| 2.3.2 Modelo de Malliaras para OECTs..... | 30 |
| 2.4 Estado da arte..... | 35 |
| Capítulo 3 – Métodos Experimentais..... | 38 |
| 3.1 Montagem do dispositivo..... | 38 |
| 3.2 Medidas de caracterização elétrica..... | 41 |
| Capítulo 4 – Resultados e Análise..... | 43 |
| 4.1 Resultados obtidos..... | 43 |
| 4.2 Parâmetros obtidos..... | 48 |
| 4.2.1 Razão On/Off..... | 48 |
| 4.2.2 Tensão do limiar de operação..... | 49 |
| 4.2.3 Transcondutância..... | 49 |
| 4.2.4 Análise dos parâmetros..... | 50 |
| Capítulo 5 – Conclusão..... | 61 |
| Capítulo 6 – Trabalhos Futuros | 62 |
| Referências bibliográficas..... | 63 |
| Anexo..... | 68 |
| Apêndice..... | 70 |

CAPÍTULO 1

Introdução

Neste capítulo será feita uma breve introdução sobre os transistores e serão listados os objetivos gerais e os específicos deste trabalho.

1.1 Introdução

Nos últimos anos, a eletrônica baseada em semicondutores orgânicos (SOs) tem sido cada vez mais pesquisada e inúmeros avanços já foram feitos nesta área, já sendo fabricadas telas de celulares, monitores e televisões compostas por dispositivos baseados no SOs, como os diodos emissores de luz orgânicos (OLEDs, do inglês: *Organic Light-Emitting Diode*). Estes materiais podem ser depositados tanto em superfícies rígidas, como o vidro, quando em superfícies flexíveis, como o polietileno tereftalato (PET), como mostrado na Figura 1.1.

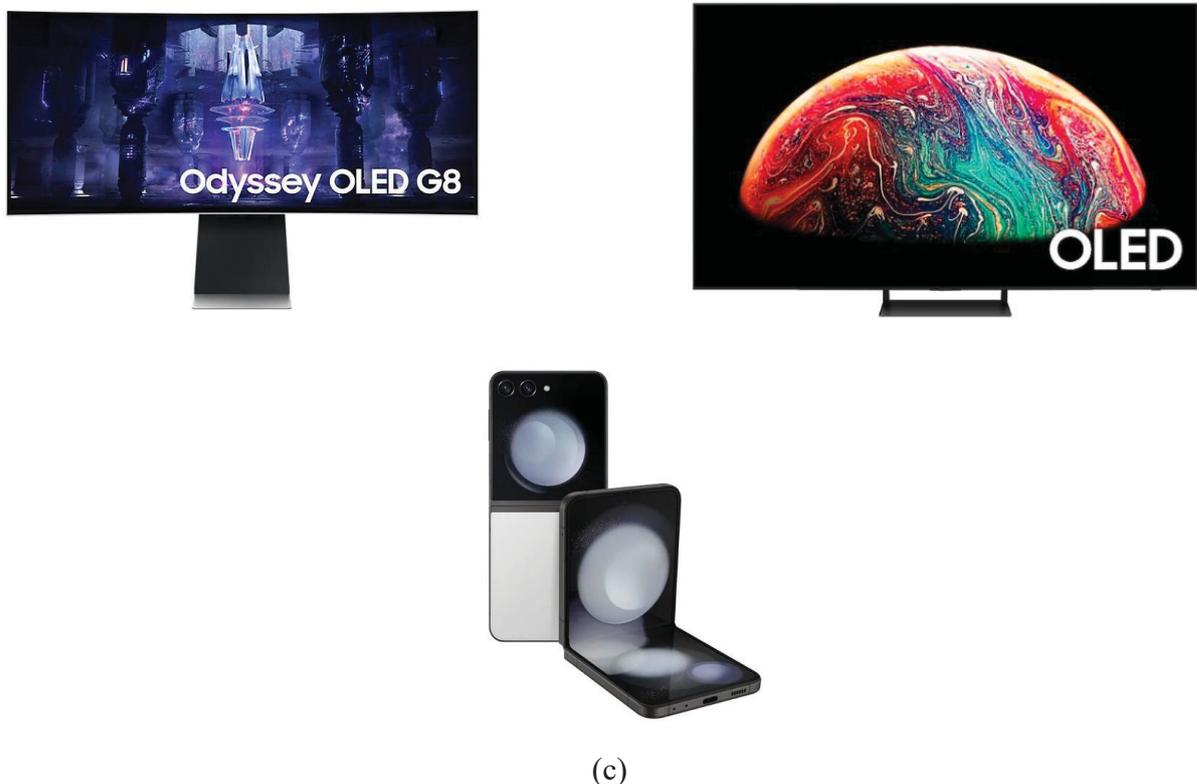


Figura 1.1: (a) Monitor com a tela baseada em OLED; (b) Televisão com tela baseada em OLED; (c) Celular dobrável com a tela baseada em OLED. Fonte: Samsung.

Dispositivos baseados em SOs podem ser usados não apenas na fabricação de dispositivos eletrônicos, mas também podem ser aplicados na área da saúde, especialmente na fabricação de sensores e transistores biocompatíveis, como será discutido no próximo capítulo, e também no desenvolvimento de aparelhos que possam ser vestidos. Mas apesar de tantos avanços, os SOs ainda possuem alguns aspectos que necessitam mais estudos, entre eles a estabilidade e a degradação ao longo do tempo.

Neste trabalho serão apresentadas medidas semanais de caracterização elétrica em um transistor planar na estrutura Au/DNTT(Mel)/Au, para analisar como a degradação do dispositivo ocorre ao longo do tempo.

1.2 Objetivos gerais

Estudar o efeito do envelhecimento e da estabilidade ao longo do tempo em um transistor planar baseado no polímero DNTT, através de medidas de caracterização elétrica e dos parâmetros associados a elas para analisar o seu desempenho neste período.

1.3 Objetivos específicos

1. Realizar a caracterização elétrica do transistor através das medidas de $I \times V$, de transferência e de saída, e obter a razão On/Off, tensão do limiar de operação, transcondutância e produto entre a mobilidade e a capacitância.
2. Realizar medidas semanais no transistor e avaliar a sua evolução ao longo do tempo.
3. Determinar as condições de operação do transistor, bem como os seus fatores de degradação, para compreender melhor seu funcionamento.

CAPÍTULO 2

Teoria e Estado da Arte

Neste capítulo, será feita uma discussão sobre o funcionamento do transistor, enfatizando o transistor de efeito de campo orgânico e o transistor orgânico eletroquímico, e sobre o estado da arte destes dispositivos.

2.1 Breve introdução histórica dos transistores

No começo do século XX, a eletrônica conhecida era baseada em válvulas termiônicas, que foram inventadas por J. A. Fleming em 1904, como ilustrado na Figura 2.1 abaixo:

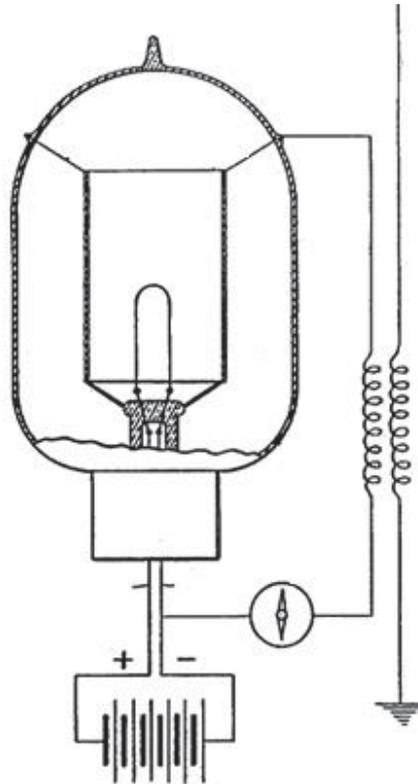


Figura 2.1: Esquema da válvula de diodo, inventada por J. A. Fleming em 1904. Ela é composta de um anodo e um catodo, que estão em temperaturas diferentes e o espaço entre eles possui uma condutividade elétrica unilateral, fazendo com que a corrente passe por ela em apenas uma direção. [1]

A ideia por trás da válvula de diodo consiste em dois condutores selados em uma ampola a vácuo, sendo um deles em alta e o outro em baixa temperatura. O espaço entre eles vai possuir uma condutividade elétrica unilateral, ou seja, a corrente pode passar do condutor quente para o condutor frio, mas não o contrário. [1]

Já em 1907, Lee De Forest patenteou o tríodo, que utiliza a mesma estrutura da válvula de Fleming, mas com um eletrodo de grade colocado entre o cátodo e o ânodo, capaz de controlar a corrente elétrica, conforme ilustra a Figura 2.2 [2,3], com isso, foi possível fabricar diversos equipamentos eletrônicos, como televisões, que está ilustrada na Figura 2.3. No ano de 1926, J. E. Lilienfeld patenteou o primeiro transistor de efeito de campo [4], mas ainda não era possível reproduzi-lo com precisão e reprodutibilidade por não haver o instrumental necessário para isto.

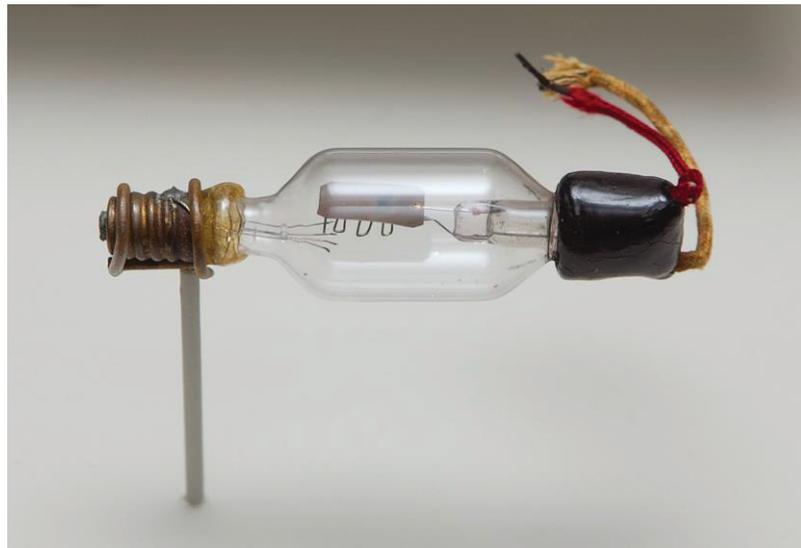
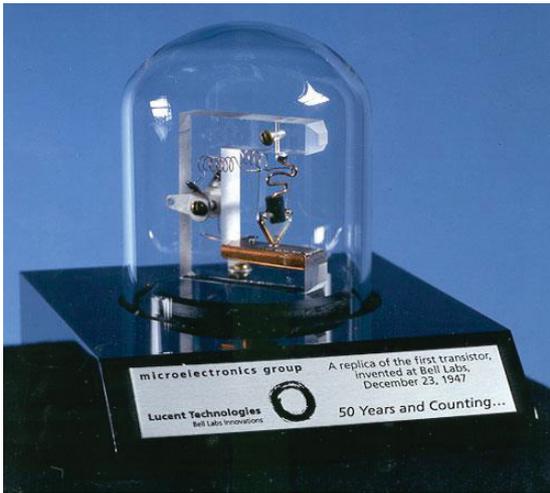


Figura 2.2: Tríodo. Fonte da imagem: Wikipedia.

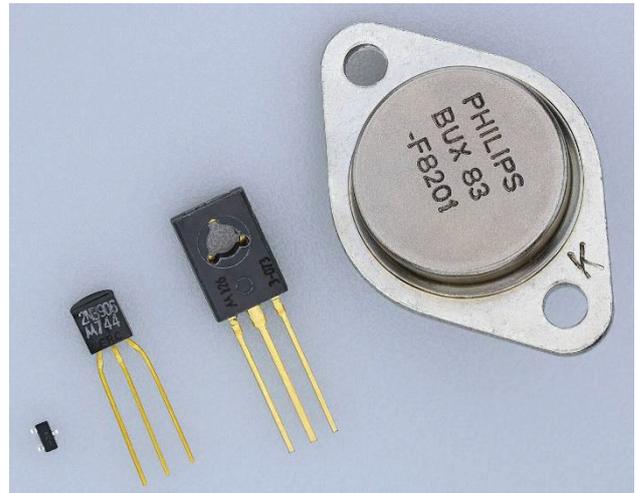


Figura 2.3: Televisão de válvula. Fonte da imagem: General Electric S. A.

Décadas depois, em 1948, J. Bardeen e W. H. Brattain, da Bell Laboratories, e W. Shockley em 1949, inventaram o transistor de contato pontual, que era composto por uma placa de germânio e por dois eletrodos de ouro que tocavam a placa em um único ponto (como está ilustrado na Figura 2.4), fazendo com que ocorresse a modulação dentro do transistor. [5,6] Mas por apresentar instabilidade durante a sua operação, por possuir apenas um ponto de contato, ele foi substituído em 1948 pela invenção do transistor de junção bipolar, feita por W. Shockley [7], que era composto por dois semicondutores do tipo p (que transporta buracos) e do tipo n (que transporta elétrons) que formam uma junção n-p-n ou p-n-p, permitindo que a corrente passe em apenas uma direção.



(a)



(b)

Figura 2.4: (a) Réplica do transistor de contato pontual, inventado por J. Bardeen e W. H. Brattain. (b) Transistor de junção bipolar, inventado por W. Shockley. Fonte das imagens: Wikipedia.

Usualmente, os transistores comerciais são feitos de semicondutores inorgânicos (SIs), como o germânio e o silício, mas com o avanço nas pesquisas, surgiu uma nova geração de transistores baseados em semicondutores orgânicos (SOs), que podem ser moléculas ou polímeros baseados em carbono.

Ele é um elemento químico de número atômico seis, possuindo quatro elétrons na camada de valência e que pode realizar quatro ligações covalentes, podendo ser do tipo π ou σ , onde as ligações π precisam de menos energia para serem rompidas do que as ligações σ . [8] O carbono ainda possui diversas formas alotrópicas, dentre elas o diamante, o grafite, o fulereno e os nanotubos, ilustrados na Figura 2.5.

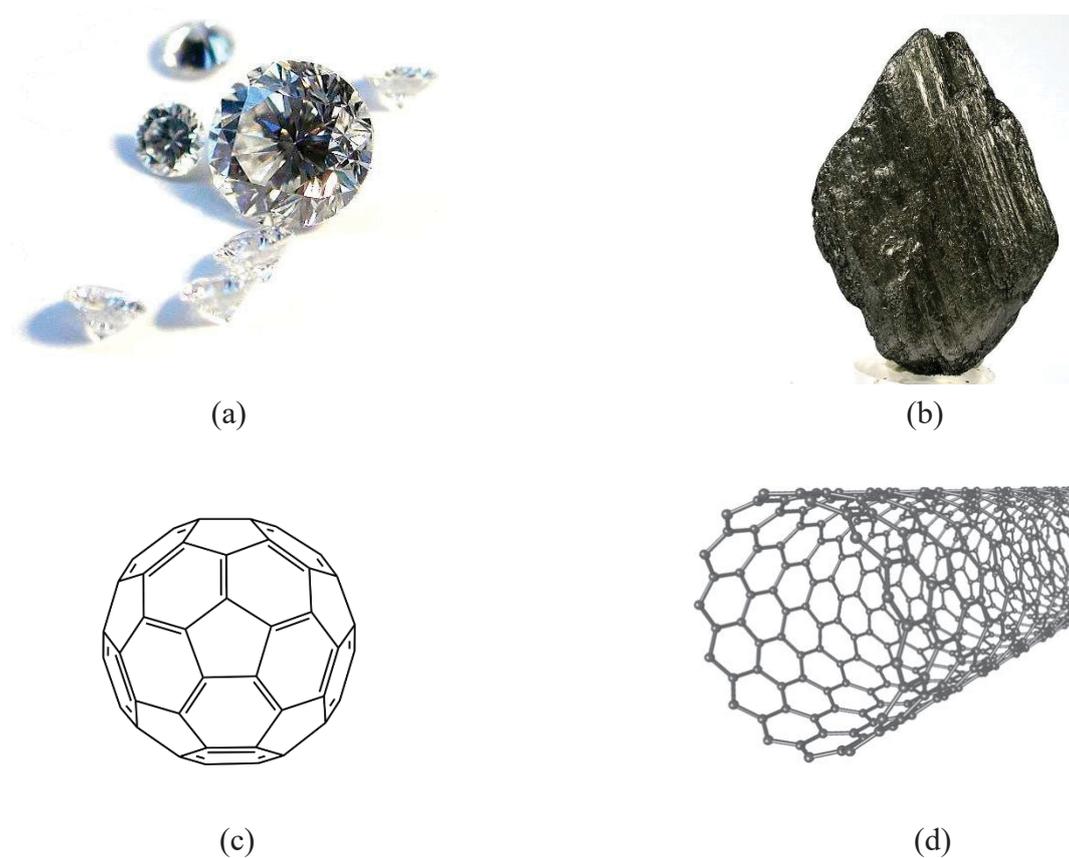


Figura 2.5: Algumas das formas alotrópicas do carbono: (a) diamante, (b) grafite, (c) fulereno e (d) nanotubo. Fonte das imagens: Wikipedia.

Ademais, o carbono também pode estar arranjado em duas estruturas que são extremamente importantes para os SOs: o anel benzênico, que é composto por seis átomos de carbono, três ligações duplas e três ligações simples, e o anel tiofênico, que é composto por quatro átomos de carbono e um de enxofre, com duas ligações duplas e três simples, como ilustrado na Figura 2.6 abaixo.

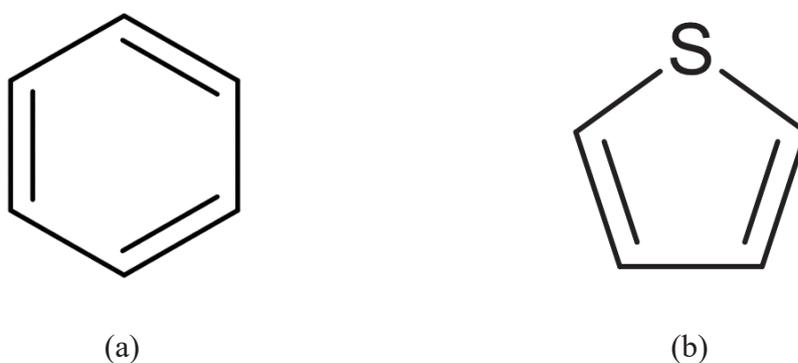


Figura 2.6: Arranjos dos átomos de carbono que são extremamente importantes para os semicondutores orgânicos: (a) anel benzênico e (b) anel tiofênico. Figura da autora.

Estas estruturas podem se combinar através de ligações simples, duplas e triplas, formando polímeros, que são macromoléculas formadas por monômeros que se repetem n vezes. Em 1984, White H. S., Kittlesen G. P., e Wrighton M. S produzem o primeiro transistor com moléculas orgânicas [9], e em 1986, Tsumura A., Koezuka H. e Ando T. produzem o primeiro transistor de efeito de campo orgânico [10].



Figura 2.7: Smartphone Samsung Galaxy Z Fold, 2023. Fonte: Samsung.

Desde então, inúmeras pesquisas têm sido feitas na área [11-15] e com isso já existem diversos eletrônicos que são construídos usando os SOs, como os celulares de telas dobráveis, ilustrados na Figura 2.7. Infelizmente, nem todos os semicondutores orgânicos são estáveis ao longo do tempo [16-18], fazendo com que seja necessário o estudo aprofundado destes materiais e sua degradação.

2.2 Transistores orgânicos

Desde a sua invenção, alguns dos transistores ainda mantêm a mesma estrutura de três eletrodos, como o que está representado na Figura 2.8. A partir desta estrutura, inúmeros transistores foram propostos, dentre eles os que operam por efeito de campo (FETs, do inglês *field-effect transistors*) e que foram idealizados primeiramente por J. E. Lilienfeld. Neste caso, além dos eletrodos, o transistor possui um canal semiconductor que separa a fonte e o dreno, por onde passa a corrente elétrica do dispositivos, e um dielétrico isolante entre o canal e a porta, que será responsável por controlar a corrente elétrica no canal, mas sem adicionar (idealmente) alguma corrente no dispositivo.

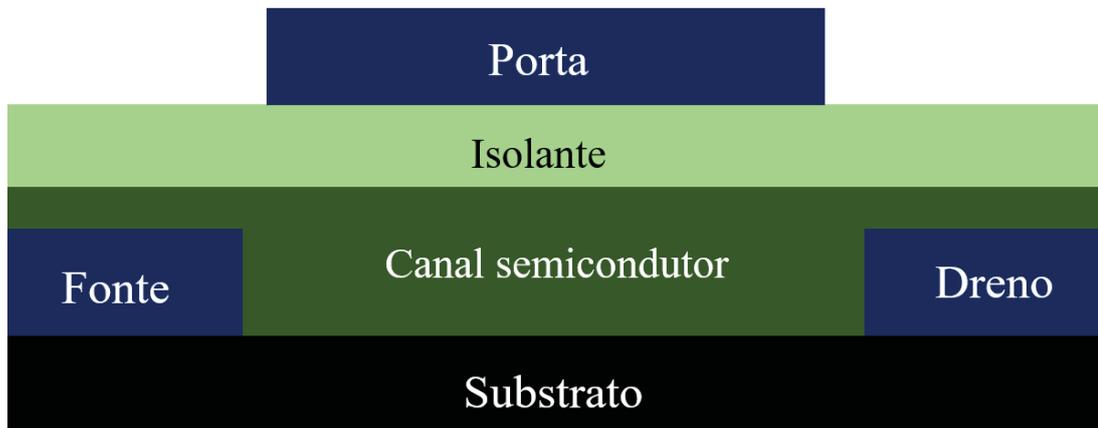


Figura 2.8: Esquema da estrutura de um transistor de efeito de campo (fora de escala). Figura da autora.

Pode-se pensar neste transistor como sendo composto por duas partes: uma que atua de maneira similar a um capacitor, composta pelo eletrodo de porta, o isolante e o semicondutor, e a outra é responsável pelo controle da corrente que passa pelo transistor, composta pelos eletrodos de fonte e dreno e pelo canal semicondutor.

Desde então, diversos tipos de transistores foram desenvolvidos, dentre eles:

- ❖ Transistor de efeito de campo de metal óxido semicondutor (MOSFET, do inglês *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*): este foi o transistor idealizado por J. E. Lilienfeld e nele o eletrodo de porta é isolado e é capaz de alterar a condutividade do canal, podendo amplificar os sinais eletrônicos. [4]
- ❖ Transistores de efeito de campo orgânicos (OFETs, do inglês *Organic Field-Effect Transistor*): são transistores orgânicos que operam pelo efeito de campo. Podem apresentar diversas estruturas, como os VOFETs e os EGOFETs. [19]
- ❖ Transistores de efeito de campo verticais orgânicos: (VOFETs, do inglês *Vertical Organic Field-Effect Transistor*): nestes transistores, fonte, dreno e porta são colocados na vertical, e o campo elétrico produzido na célula capacitiva é capaz de modular a corrente no canal, fazendo com que o dispositivo opere através do efeito de campo. [15]

Além destes, existem os de efeito de campo com porta eletrolítica (EGOFETs, do inglês *Electrolyte-Gated Field Effect Transistor*), e os transistores orgânicos eletroquímicos (OECTs, do inglês *Organic Electrochemical Transistors*), esquematizados na Figura 2.10.

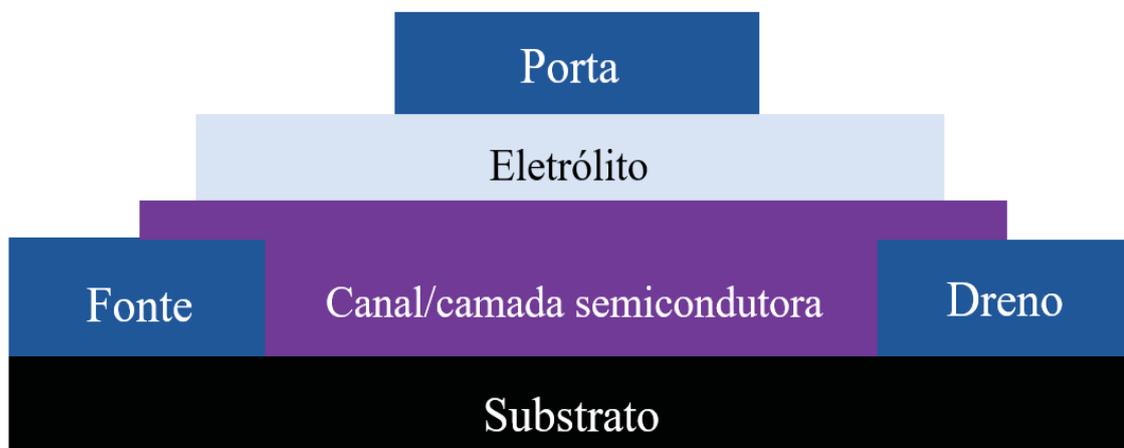


Figura 2.9: Esquema de um EGOFET e de um OEET. Figura da autora.

Ambos os transistores possuem a mesma estrutura, porém o modo de operação de cada um é diferente. Nos EGOFETs, a modulação da corrente presente no canal ocorre apenas pelo efeito de campo, se restringindo à interface entre o canal e o eletrólito e sem que haja a penetração dos íons do eletrólito no canal. Já nos OEETs, a corrente no canal é modulada através da dopagem e desdopagem do canal. Em alguns tipos de transistores, o mesmo dispositivo pode atuar como um EGOFET ou um OEET dependendo das condições em que está operando. [20,21] Assim como os SIs, os SOs também podem ser do tipo p e do tipo n, e nesse caso, os portadores de carga podem ser elétrons (negativos), buracos (positivos) ou íons.

Além disso, os SOs também podem conter armadilhas, que são regiões do transistor onde os portadores de carga são aprisionados e só conseguem sair se tiverem energia suficiente para isto. Se for necessário pouca energia, as armadilhas são superficiais (AS), e se for preciso muita, as armadilhas são profundas (AP). [22]

Para que um EGOFET ou OEET comece a operar, é necessário que as AS presentes no canal sejam preenchidas através de uma tensão aplicada entre os eletrodos de porta e fonte, chamada de tensão de limiar de operação (em inglês, *threshold voltage*), que fará com que o transistor consiga modular a corrente no canal. Porém, pode ocorrer de que em algum momento o SO do transistor irá degradar, fazendo com que inicialmente ele ainda consiga conduzir corrente elétrica, mas perdendo a modulação, até o ponto em que já não haja mais transporte nenhum.

A tensão do limiar de operação é um dos parâmetros utilizados para analisar o comportamento de um transistor, junto com a transcondutância, a mobilidade, a capacitância e a razão On/Off, que podem ser extraídos através de diversos modelos matemáticos, sendo dois deles descritos na próxima seção.

2.3 Modelos teóricos para a obtenção dos parâmetros do transistor

Para saber se um transistor está operante ou não, é necessário fazer medidas de caracterização elétrica, que consistem nas medidas de corrente e tensão entre fonte, dreno e porta, chamadas de curvas de saída e de transferência. A partir destas é possível obter os parâmetros de operação do transistor através da aplicação de modelos teóricos.

2.3.1 Modelo de G. Horowitz

Apesar de não ter sido criado exclusivamente para os EGOFETs, ainda é possível usar este modelo para obter os parâmetros associados a eles, por ser de aplicação simples e rápida. Nele, a corrente do dreno é proporcional à densidade de cargas no canal, que varia linearmente com a polarização do eletrodo de porta. Para calcular esta corrente, é estimada a carga dq induzida no canal através da aplicação de uma tensão V_G na porta numa faixa infinitesimal de largura dx que está a uma distância x do eletrodo de fonte, conforme ilustrado na Figura 2.11 abaixo. [23]

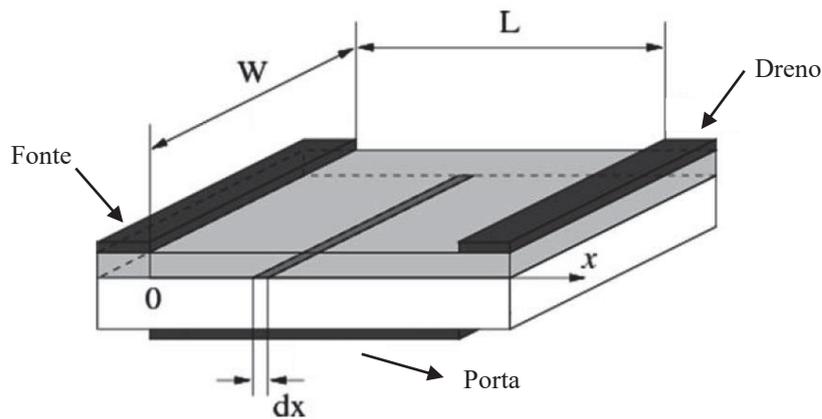


Figura 2.10: Esquema do transistor para o cálculo de seus parâmetros. Retirado de [23].

Abaixo da tensão do limiar de operação, V_T , a carga é zero, e acima é dada pela Eq. 2.1:

$$dq = -C[V_G - V_T - V(x)]Wdx, \quad 2.1$$

onde C é a capacitância da célula capacitiva, V_G é a tensão aplicada no eletrodo de porta, $V(x)$ é o potencial na posição x do canal, sendo $V(x) = 0$ no eletrodo de fonte e $V(x) = V_{DS}$ no eletrodo do dreno. W é o comprimento do canal e L é a sua largura. O sinal negativo da Eq. 2.1 é devido à V_G , que atua como uma das placas do capacitor, enquanto que será efetivamente usado as cargas da outra placa, que é o canal.

Sendo assim, a corrente I_D entre a fonte e o dreno corresponde à passagem da carga infinitesimal dq no intervalo de tempo dt , conforme a Eq. 2.2 abaixo:

$$I_D = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad 2.2$$

Aqui a mobilidade dos portadores de carga no canal é definida como a razão entre a velocidade média dos portadores de carga $v = \frac{dx}{dt}$ e o campo elétrico $E = -\frac{dV}{dx}$, então:

$$\frac{dx}{dt} = -\mu \left(\frac{dV}{dx} \right). \quad 2.3$$

Assim, usando a Eq. 2.1 e a Eq. 2.3, a Eq. 2.2 pode ser rearranjada como:

$$I_D dx = WC\mu[V_G - V_T - V(x)]dV. \quad 2.4$$

Integrando a Eq. 2.4, obtemos a corrente no dreno. Numa situação real, a mobilidade é variável e pode ser complexo descrevê-la, então neste modelo assume-se que ela é constante.

$$\int_0^L I_D dx = \int_0^{V_D} WC\mu[V_G - V_T - V(x)]dV, \quad 2.5$$

E então obtemos que:

$$I_D = \frac{W}{L} C\mu \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D. \quad 2.6$$

A Eq. 2.6 descreve a corrente no regime linear, que ocorre quando $V_D < V_G - V_T$. Quando V_D aumenta, o potencial dentro do canal é alterado e quando a zona de saturação desaparece no contato com o eletrodo, tem-se o ponto de fechamento (em inglês: *pinch-off tension*), que ocorre quando $V_D = V_G - V_T$. Através dele, uma zona de depleção se forma próxima ao eletrodo de dreno, porque o potencial local é menor do que V_T .

Um aumento adicional de V_D leva a um aumento desta zona e com isso ocorre um desvio do ponto de fechamento através do eletrodo da fonte, pois neste ponto, a corrente no dreno se torna independente da tensão aplicada nele, fazendo com que o transistor atinja o regime de saturação.

Para obter a equação da corrente no dreno correspondente a este regime, iguala-se V_D à $V_G - V_T$ na Eq. 2.6, resultando na Eq. 2.7:

$$I_D = \frac{W}{L} C \mu \left(V_G - V_T - \frac{V_G - V_T}{2} \right) V_G - V_T, \quad 2.7$$

$$I_D = \frac{W}{L} C \mu \left(\frac{V_G - V_T}{2} \right) V_G - V_T, \quad 2.8$$

$$I_{DSAT} = \frac{W}{2L} C \mu (V_G - V_T)^2. \quad 2.9$$

Devido a estes regimes, as curvas de $I \times V$ que descrevem o transistor são de dois tipos:

- $I_{DS} \times V_{DS}$: chamada de curva de saída (em inglês: *output curve*), é feita para várias tensões constantes aplicadas no eletrodo de porta.
- $I_{DS} \times V_{GS}$: chamada de curva de transferência (em inglês: *transference curve*), é feita para uma mesma tensão constante aplicada no eletrodo de dreno.

Em alguns casos, como o dispositivo estudado neste trabalho, o transistor opera no regime de saturação, regido pela Eq. 2.9. Para obter a V_T e a mobilidade μ , é necessário linearizar esta equação:

$$\sqrt{I_{DSAT}} = V_G \sqrt{\frac{w}{2L} \mu C} - V_T \sqrt{\frac{w}{2L} \mu C}. \quad 2.10$$

Comparando com a equação da reta:

$$y = ax + b, \quad 2.11$$

obtemos que:

$$y = \sqrt{I_{DSAT}}, \quad 2.12$$

$$a = \sqrt{\frac{w}{2L}} \mu C, \quad 2.13$$

$$x = V_G, \quad 2.14$$

$$b = -V_T \sqrt{\frac{w}{2L}} \mu C = -aV_T. \quad 2.15$$

Da Eq. 2.15, obtemos V_T :

$$V_T = -\frac{b}{a}. \quad 2.16$$

E da Eq. 2.13 obtemos μC :

$$\mu C = \frac{a^2 \cdot 2L}{w}. \quad 2.17$$

Como μ e C estão associados a propriedades intrínsecas do semiconductor do canal e com o eletrólito, respectivamente, a análise individual se torna complexa e o uso de μC se torna mais simples.

Já a razão On/Off é a razão entre a maior corrente no estado ligado e a menor corrente no estado desligado, e por fim, a transcondutância – parâmetro que está relacionado com o quanto que o transistor consegue amplificar de um sinal - é a variação da corrente no dreno em função da tensão aplicada na porta para V_{DS} constante, conforme a equação abaixo:

$$g_m = \left[\frac{\partial I_{D_{SAT}}}{\partial V_G} \right]_{V_{DS} \text{ constante}}. \quad 2.18$$

2.3.2 Modelo de Malliaras para OECTs

Como a maioria dos semicondutores orgânicos usados em OECTs transportam buracos, este modelo se refere à dopagem do tipo p, com os buracos estando livres para se movimentarem no dispositivo e os íons espacialmente fixados. A corrente que passa pelo SO (I_{DS}) pode ser escrita como uma função da tensão aplicada no eletrodo de porta (V_G) e para modelar este dispositivo, o OECT pode ser dividido em duas partes: uma composta por um circuito eletrônico e a outra composta por um circuito iônico.

O circuito eletrônico consiste em um filme de um SO do tipo p que transporta buracos entre a fonte e o dreno e é descrito pela lei de Ohm, sendo o transporte de portadores de cargas determinados pela densidade e mobilidade dos buracos. Já o circuito iônico é responsável pelo transporte de cargas iônicas no eletrólito e é descrito pela combinação de elementos de circuitos lineares. A interação destes dois componentes – o transporte de íons do eletrólito para o filme semiconductor – é fundamental para o comportamento dos OECTs. [24]

Parte 1. Circuito Eletrônico

Nesta parte do modelo, parte-se da lei de Ohm abaixo:

$$J(x) = q\mu p(x) \frac{dV}{dx}, \quad 2.19$$

onde $J(x)$ é a densidade de corrente, q é a carga elementar, μ é a mobilidade, $p(x)$ é a densidade de buracos e $\frac{dV}{dx}$ é o campo elétrico. Neste caso, a mobilidade será considerada constante, pois isto despreza o campo elétrico e a dependência com a concentração observados em semicondutores orgânicos, mas simplifica a análise. Seguindo este mesmo raciocínio, a condutividade do SO não dopado é assumido ser desprezível. Usando esta estrutura, uma expressão para a densidade efetiva do dopante no volume, v , de um material semiconductor vai ser:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{Q}{qp_0v}\right), \quad 2.20$$

onde p_0 é a densidade de buracos no semiconductor antes da aplicação de uma tensão na porta e Q é a carga total dos cátions injetados na camada orgânica do eletrólito. Para simplificar, assume-se que a introdução dos íons negativos não afetem o semiconductor.

Para simplificar os cálculos, todas as densidades de carga são assumidos que sejam uniformes através da espessura da camada semiconductor orgânica, uma aproximação que limite a validade deste modelo a filmes finos.

Parte 2. Circuito Iônico

O circuito iônico pode ser descrito através de um resistor e um capacitor ligados em série. O resistor descreve a condutividade do eletrólito e o capacitor é responsável pela polarização nas interfaces da camada semicondutora com o eletrólito e com a porta e o eletrólito (esse modelo de eletrólito assume que não ocorrem reações no eletrodo de porta e pode não ser adequado para dispositivos onde a oxidação ou redução nele é significativa).

O componente transiente deste elemento sob a aplicação de uma tensão na porta exhibe as mesmas características de um capacitor durante a sua carga, dada pela equação abaixo:

$$Q(t) = Q_{SS} \left(1 - e^{-t/\tau_i}\right), \quad 2.21$$

onde $Q_{SS} = C_D \Delta V$ é a carga total que passa através do circuito, ΔV é a tensão aplicada através do eletrólito e τ_i é o tempo de trânsito iônico. Como C_D depende da área do dispositivo, é conveniente usar $C_D = c_D A$ para a maioria da análise, sendo c_D a capacitância por unidade de área e A é a área do dispositivo. Assume-se que a concentração e a dependência com o potencial presente na camada iônica podem ser desprezadas e que c_D é constante.

Comportamento em estado estacionário

Para descrever este comportamento do OECT, é preciso descobrir qual é a densidade efetiva do dopante através de toda a camada orgânica. Tomando uma faixa infinitesimal dx e escrevendo em função da posição x , a carga nesta região fica:

$$Q(x) = c_D W dx (V_g - V(x)), \quad 2.22$$

onde V_g é a tensão aplicada na porta, $V(x)$ é o potencial espacial na camada orgânica e W é o comprimento do filme. Neste caso, a desdopagem pode acontecer em qualquer região do filme e não é restrita às regiões próximas aos contatos. Isso só é possível devido à alta densidade de portadores de cargas presentes na camada orgânica que podem atuar como fonte ou dreno para as cargas resultantes da desdopagem eletroquímica. Agora, combinando as Eqs. 2.19, 2.20, 2.21 e 2.22 desta seção, chega-se a:

$$J(x) = q\mu p_0 \left[1 - \frac{V_g - V(x)}{V_p}\right] \frac{dV(x)}{dx}, \quad 2.23$$

onde V_p é a tensão de ponto de fechamento (em inglês: *pinch-off tension*) e é definida como:

$$V_p = \frac{q\mu_0 T}{c_D}. \quad 2.24$$

Neste caso, a continuidade da equação de $J(x)$ requer que a densidade de corrente entre fonte e dreno seja espacialmente constante, então a Eq. (5) deve ser resolvida para os seguintes regimes de operação:

1º regime: Quando $V_d > 0$ e $V_d < V_g$

Aqui a desdopagem ocorre em toda a extensão da camada orgânica. Fazendo as mesmas suposições usadas anteriormente neste modelo, a Eq. 5 pode ser reescrita em termos da corrente, com a fonte estando em $x = 0$ e o dreno em $x = L$, assim:

$$I = \frac{q\mu p_0 WT}{L} \left[1 - \frac{V_g - \frac{1}{2}V_d}{V_p} \right] V_d, \quad 2.25$$

2º regime: Quando $V_d > 0$ e $V_d > V_g$

Aqui a desdopagem irá ocorrer apenas nas regiões do dispositivo onde $V(x)$ seja menor que V_g . Este regime é descrito por:

$$I = \frac{q\mu p_0 WT}{L} \left[V_d - \frac{V_g^2}{2V_p} \right], \quad 2.26$$

onde a corrente apresenta um comportamento linear com a tensão no dreno e seu início ocorre quando $V_d = V_g$.

3º regime: Quando $V_d < 0$

Nesta situação é possível desdopar completamente regiões localizadas da camada orgânica quando a densidade local dos cátions injetados nela se torna igual à densidade dos dopantes do material semiconductor. Matematicamente isto é verdade quando

$$(V_g - V_d) \geq V_p, \quad 2.27$$

onde a tensão crítica do dreno para a saturação pode ser escrita como:

$$V_d^{SAT} = V_g - V_p, \quad 2.28$$

Localmente o semiconductor vai estar numa zona de depleção formada próxima ao eletrodo do dreno, mas os buracos injetados nesta região ainda serão transportados para o dreno. Se a magnitude de V_d aumentar além de V_d^{SAT} , a extensão da zona de depleção vai se mover ligeiramente em direção ao eletrodo de fonte.

Para transistores que operam no modo de depleção (diferente do transistor estudado neste trabalho, que opera no modo de acumulação), a localização desta zona próxima à fonte não terá uma mudança expressiva com V_d e a corrente entre fonte e dreno irá saturar. Se a extensão da região de depleção se mover de modo expressivo com uma variação em V_d , a corrente não irá saturar, mas irá continuar a aumentar – um efeito que pode ser observado em dispositivos com um curto espaço entre os eletrodos de fonte e dreno. No limite de canais longos, para $V_d < V_d^{SAT}$, a corrente vai depender apenas da tensão no dreno na saturação (para uma tensão particular na porta), conforme a equação abaixo:

$$I = - \frac{q\mu p_0 WT}{L} \frac{(V_d^{SAT})^2}{2V_p}, \quad 2.29$$

A desdopagem completa em $V_d > 0$ também é possível e irá ocorrer primeiramente quando $V_d = V_p$.

Comportamento transiente

Neste caso, o comportamento transiente dos OECTs será dominado por dois efeitos: a injeção de cátions do eletrólito na camada orgânica e a remoção de um buraco no eletrodo de fonte ($V_d > 0$). Para fazer um cálculo da resposta transitória tratável, a variação espacial da

tensão e da densidade de buracos será ignorada e uma corrente iônica média e a densidade de buracos serão utilizados.

Ao utilizar a corrente associada à remoção dos buracos devido à desdopagem, em adição à lei de Ohm, a corrente resultante é escrita como:

$$J(t) \cong q\mu p(t) \frac{V_d}{L} + qfL \frac{dp(t)}{dt}, \quad 2.30$$

onde f é uma constante de proporcionalidade que foi inserida para considerar a não uniformidade do processo de desdopagem espacial. O intervalo característico para f é de 0 (por exemplo, quando $V_d \gg V_g$ com V_d positivo) a $1/2$ (por exemplo, quando $V_g \gg V_d$). Muito da complexidade da resposta dependente do tempo é incorporada em f , que é esperada que apresente dependências com as tensões de porta e dreno.

Usando agora a Eq. 2.20, a resposta transiente da Eq. 2.26 pode ser obtida exatamente:

$$J(t) \approx G \left(1 - \frac{Q(t)}{qp_0v} \right) V_d - \frac{fdQ(t)}{dt}, \quad 2.31$$

onde $Q(t)$ é a resposta transiente da corrente iônica no circuito e G é a condutância do filme semicondutor ($G = qIp_0WT/L$). Duas condições experimentais devem ser consideradas para o circuito iônico: a corrente e a tensão constantes no eletrodo de porta. Enquanto que a corrente constante na porta não é um típico regime de operação, ela é capaz de mudar o comportamento elétrico do OECT. Neste caso, o comportamento transiente passa a incorporar a corrente na porta (I_g) e é dado pela equação abaixo:

$$I(t, I_g) = I_0 - I_g \left(f + \frac{t}{\tau_e} \right), \quad 2.32$$

onde I_0 é a corrente entre fonte e dreno antes da aplicação da corrente na porta e τ_e é o tempo eletrônico de trânsito, dado por:

$$\tau_e = \frac{L^2}{\mu V_d}, \quad 2.33$$

Essa equação é uma ferramenta útil para verificar o modelo transiente independentemente do circuito iônico escolhido. Adicionalmente, ela fornece uma rota simples para extrair a mobilidade efetiva de buracos na camada semicondutora orgânica.

2.4 Estado da Arte

Com o avanço nas pesquisas em semicondutores orgânicos, novos tipos de transistores foram desenvolvidos ao longo dos anos. Como vários parâmetros podem ser extraídos de um transistor, ele pode ser usado para atuar como um sensor, possuindo aplicações na área médica e podendo ser usado para identificar doenças e a presença de vírus em pacientes contaminados, por exemplo.

Em 2023, Q. H Liang *et al* publicaram um artigo de revisão em que um FET baseado em grafeno é utilizado para identificar a presença do vírus SARS-COV-2, causador da COVID-19. [25] No mesmo ano, C. Scandurra *et al* publicaram outro artigo onde foi utilizado 96 EGOFETs para a análise de amostras clínicas de cistos pancreáticos, ilustrado na Figura 2.12. [26]

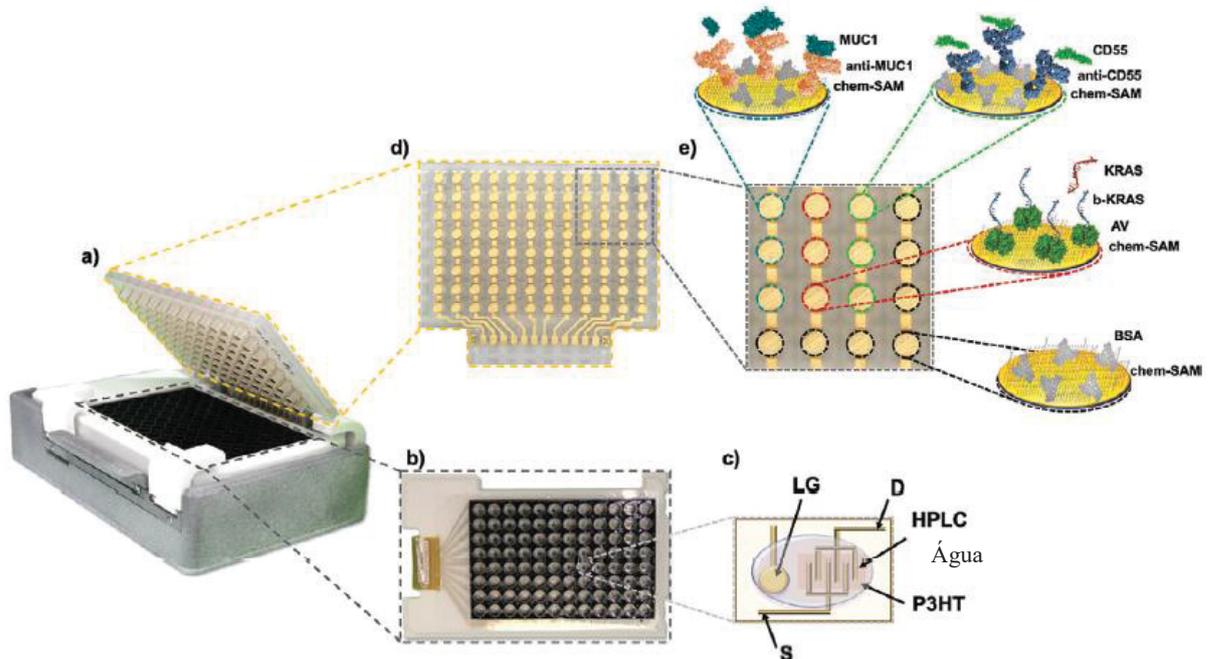


Figura 2.11: (a) Imagem do equipamento SiMoT ELISA, que contém os transistores, (b) Vista de cima dos 96 EGOFETs usados como sensores para a análise de amostras clínicas de tecidos pancreáticos, (c) Esquema do transistor, (d) Visão aumentada de onde as amostras dos fluidos dos cistos são colocadas, compostas por 16 portas sensíveis a elas. Retirado de [26].

Seguindo nesta mesma linha de pesquisa, foram publicados estudos onde os EGOFETs foram usados para a detecção de dopamina (que é um neurotransmissor responsável por regular a sensação de recompensa no cérebro), por S. Casalini *et al* [27] e também aplicados para a detecção de doenças nos estágios iniciais, como feito por Y. Wang *et al* [28].

Outra aplicação dos transistores orgânicos, em especial os EGOFETs e os OECTs, são na área de bioeletrônica, que visa desenvolver dispositivos biocompatíveis com o corpo humano, sem que haja rejeição. Também no ano de 2023, Krauhausen *et al* destacaram algumas aplicações dos transistores orgânicos, entre eles o uso no estudo e na análise de sinais eletrofisiológicos,

além da diferenciação de células tronco neurais e também na aplicação em sistemas artificiais baseados no cérebro humano utilizando OFETs e OECTs. [29]

Porém, estes transistores também podem ser impressos através de uma impressora jato de tinta, como mostrado por K. Chennit *et al.* Nessa pesquisa, foram utilizados substratos feitos de papel Kapton para a impressão dos eletrodos do transistor, como pode ser visto na Figura 2.13, e estes podem ser utilizados como um sensor de DNA. [30]

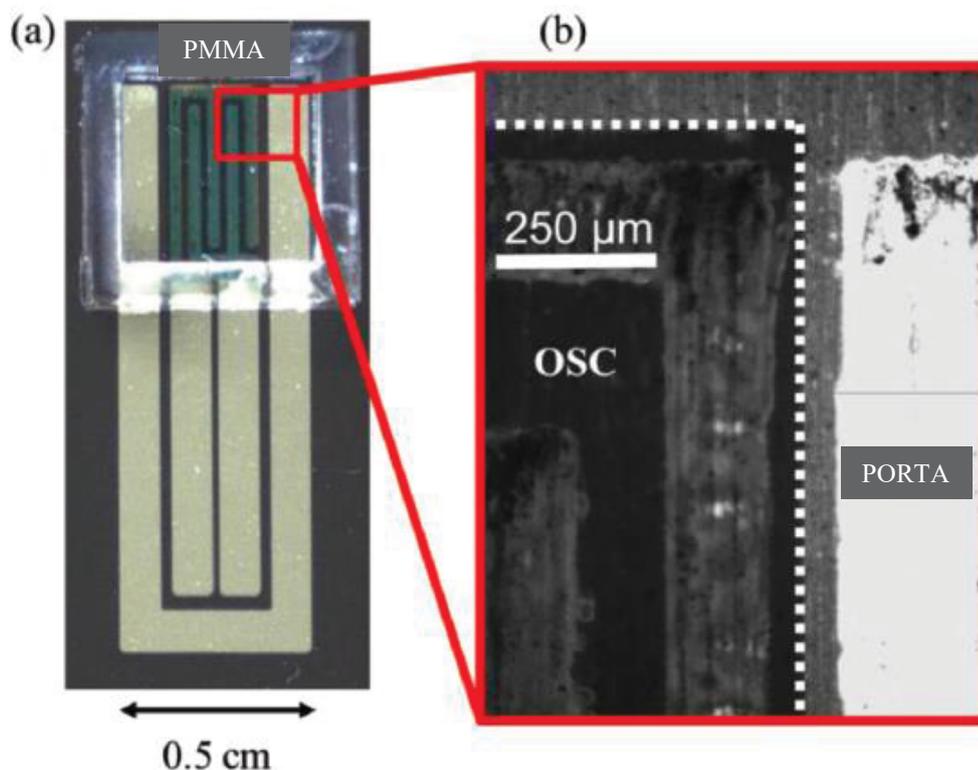


Figura 2.12: (a) Imagem óptica do EGO-FET impresso por jato de tinta, com uma camada de PMMA depositada em volta da área ativa. (b) Imagem óptica mostrando o detalhe entre o canal e o eletrodo de porta do transistor. Retirado de [30].

Diversas pesquisas estão sendo feitas nesta área [31,34], que podem ser sumarizadas na Figura 2.14. Seguindo esta linha de uma eletrônica sustentável, pesquisas com materiais alternativos – como o uso do mel como eletrólito - estão sendo feitas [34,35], como feito por Vieira *et al.*, que caracterizou eletricamente um transistor de porta líquida, utilizando óxido de zinco como camada ativa, e fez a comparação entre o uso do mel e da água como eletrólitos, com o transistor com o mel obtendo uma melhor performance do que com a água. [36]

Em outra pesquisa, Poimanova *et al.* desenvolveram um dispositivo portátil baseado em EGO-FETs que é capaz de identificar a presença do vírus influenza em uma amostra líquida, como ilustrado na Figura 2.15. [37] As duas principais vantagens do uso de transistores orgânicos são a biocompatibilidade, que permite o contato com um sistema vivo sem que ocorra efeitos adversos, e a biodegradabilidade, de modo que o descarte destes dispositivos interfira o menos possível no meio ambiente.

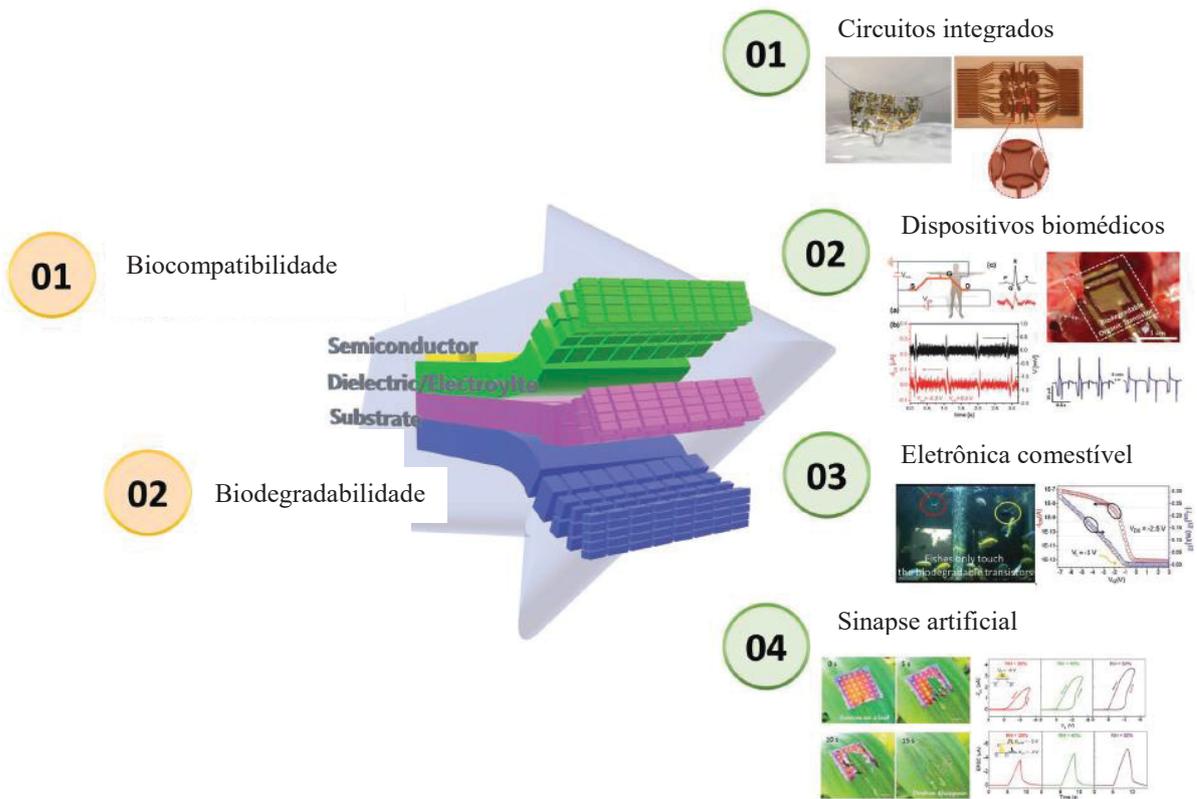


Figura 2.13: Sumário das potenciais aplicações dos transistores orgânicos, com enfoque na bioeletrônica. Duas de suas vantagens são: a biocompatibilidade, que permite o contato com um sistema vivo sem efeitos adversos, e a biodegradabilidade, que permite uma eletrônica transiente e sem desperdício de dispositivos. Estes podem ser aplicados em circuitos integrados, em dispositivos biomédicos, em eletrônica comestível e em dispositivos de sinapse artificial. Retirada de [34].

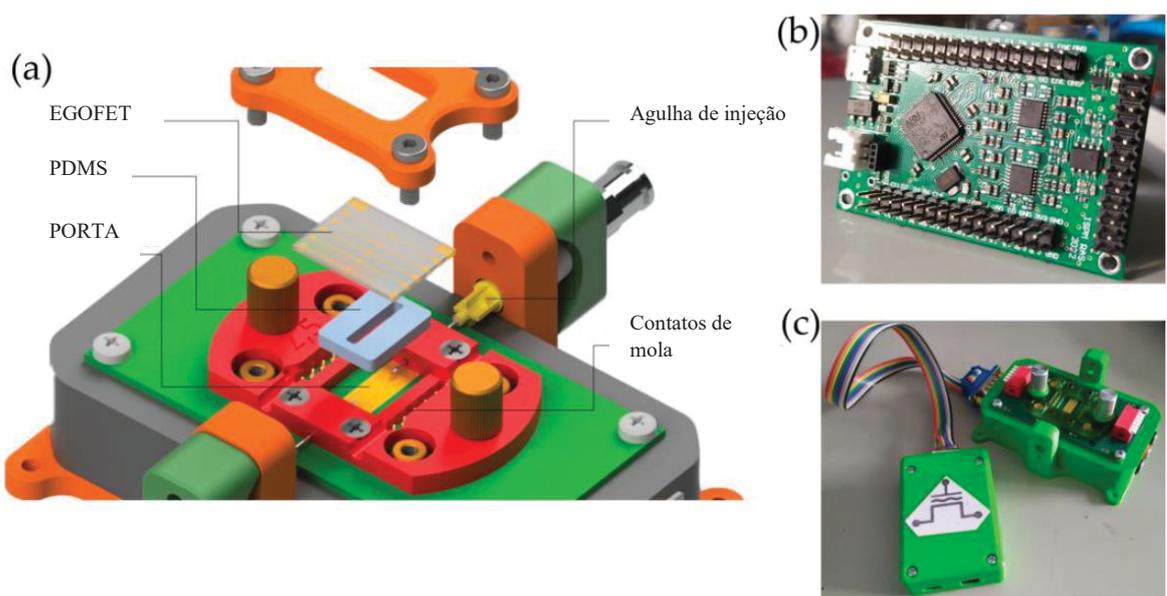


Figura 2.14: (a) Esquema do dispositivo portátil baseado em EGOFET que é capaz de identificar a presença do vírus influenza em uma amostra líquida. (b) Foto da vista lateral. (c) Foto da vista de cima. Retirada de [37]

CAPÍTULO 3

Métodos Experimentais

Neste capítulo será descrito como foi feita a montagem e a caracterização elétrica do transistor.

3.1 Montagem do dispositivo

O transistor analisado neste trabalho possui estrutura planar, onde os eletrodos de fonte e dreno são feitos de ouro (Au), o eletrodo de porta é feito de platina (Pt), o canal é composto pelo polímero dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (cuja sigla é DNTT) e a camada eletrolítica é composta pelo mel (comercial, da marca Baldoni), conforme o esquema da Figura 3.1.

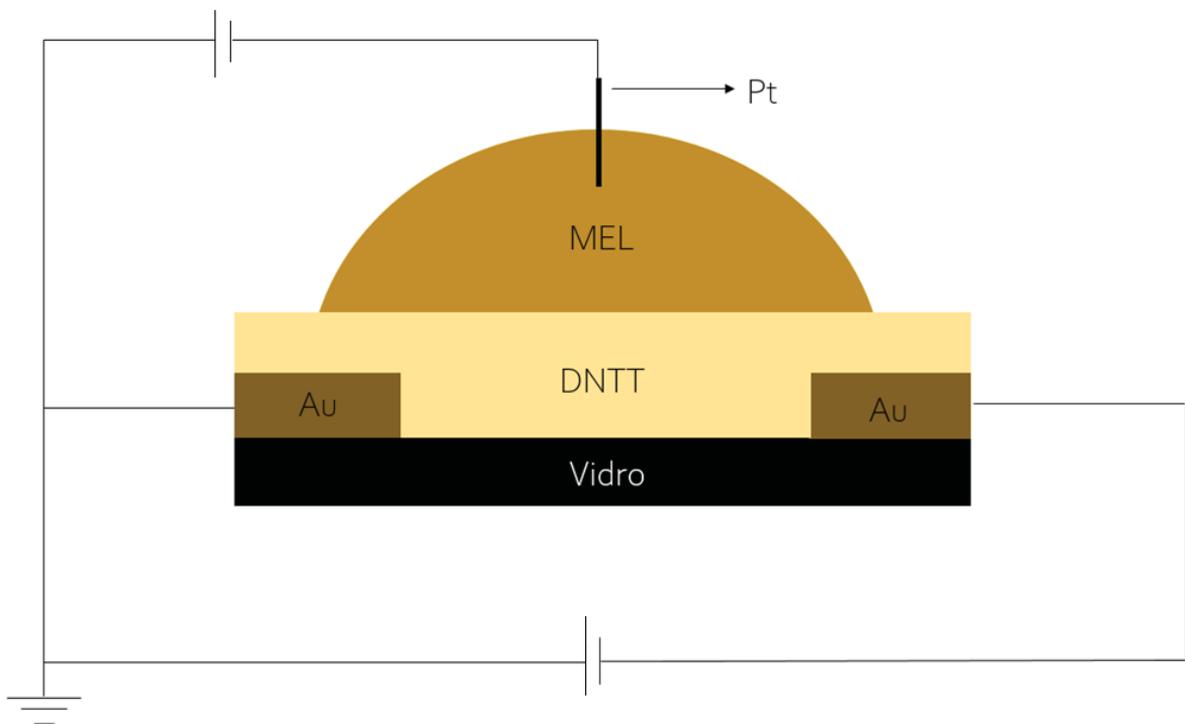


Figura 3.1: Esquema em cores fantasiosas, enfatizando a estrutura planar do transistor. A fonte e o dreno são de ouro, o canal é o polímero dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNTT), o mel (comercial, da marca Baldoni) é a camada eletrolítica e a porta é um fio de platina, que perfura a gota de mel. Figura da autora.

Os eletrodos de fonte e dreno foram fornecidos pelo Laboratório de Dispositivos e Sensores Orgânicos (LaDSor), situado na UNESP, de Presidente Prudente, na forma de eletrodos interdigitados, através da técnica de fotolitografia e compostos de uma camada de 20 nm de cromo seguida de uma camada de 100 nm de ouro, nas dimensões de 3 mm de comprimento e 10 μm de largura, como ilustrado na Figura 3.3. Sobre eles foram depositados uma camada de 100 nm de espessura do DNTT, cuja estrutura química está presente na Figura 3.4, através de evaporação térmica a vácuo, também realizada no LaDSor.



Figura 3.2: Foto do eletrodo interdigitado, composto por 20 nm de cromo e 100 nm de ouro, com o DNTT (em amarelo) depositado sobre ele. Figura da autora.

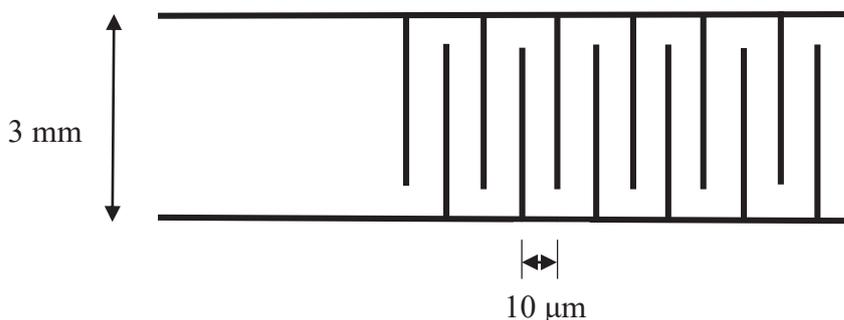


Figura 3.3: Dimensões do eletrodo interdigitado. Figura da autora.

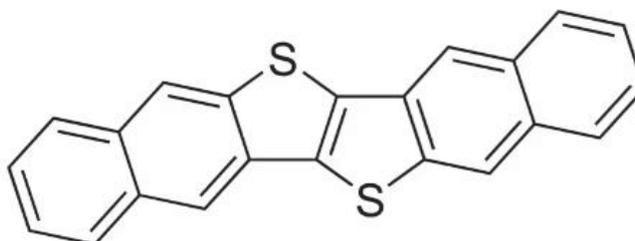


Figura 3.4: Estrutura molecular do DNTT. Fonte: Site da MERCK.

Antes de ser utilizado neste trabalho, este dispositivo já havia sido usado em outras medidas de teste (mantendo a mesma estrutura apresentada na Figura 3.1). Como o DNTT é hidrofóbico, foi possível retirar a gota de mel utilizada com um cotonete embebido em água deionizada de

maneira suave e de modo que o cotonete tocasse apenas o mel, tomando o devido cuidado para não riscar o filme de DNNT. Após isto, o restante de água foi retirado com um fraco jato de nitrogênio, então o dispositivo já pôde ser reutilizado novamente.

Sobre o DNNT foi depositada uma gota de 5 μL de mel, através da técnica de gotejamento, que consiste em pingar a solução ou o eletrólito sobre a área desejada, de modo a cobrir todo o eletrodo interdigitado. Por fim, o eletrodo de porta usado foi um fio de platina que penetrou na gota de mel, de modo a não encostar no eletrodo interdigitado, conforme mostrado na Figura 3.4. O fio de platina foi limpo previamente com algodão embebido em ácido acético e depois o ácido foi retirado com outro algodão embebido em água deionizada, também sendo seco com o jato de nitrogênio.

As medidas foram feitas na mesma amostra, que ficou armazenada em um recipiente fechado, como mostra a Figura 3.5.b, em condições ambiente, durante todo o período das medidas, e com a mesma gota de mel em todas as medidas.

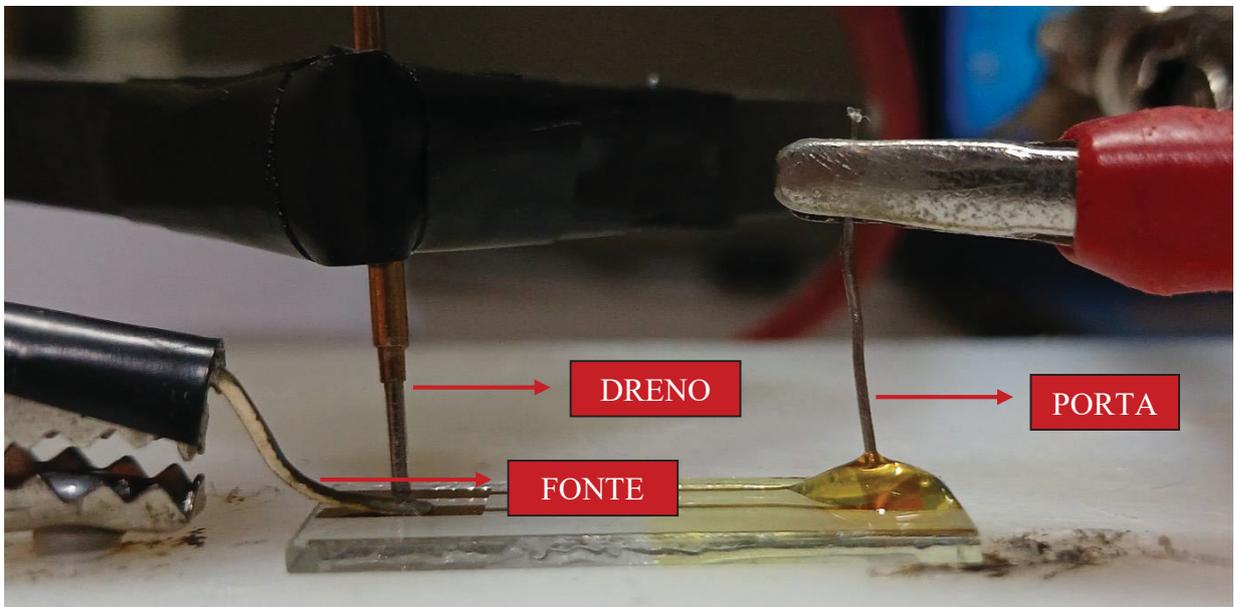


Figura 3.5: Foto do transistor com os três eletrodos de fonte, dreno e porta. Figura da autora.



(a)



(b)

Figura 3.6: Foto do (a) mel utilizado como eletrólito e (b) recipiente de armazenamento do dispositivo durante o período de medidas. Figura da autora.

3.2 Medidas de caracterização elétrica

As medidas de caracterização do transistor foram feitas através de um Keithley 2602 System SourceMeter. O eletrodo de fonte foi conectado no canal A, o eletrodo de dreno foi aterrado e colocado no canal B e o eletrodo de porta foi conectado no canal C do Keithley 2602, conforme a Figura 3.7.

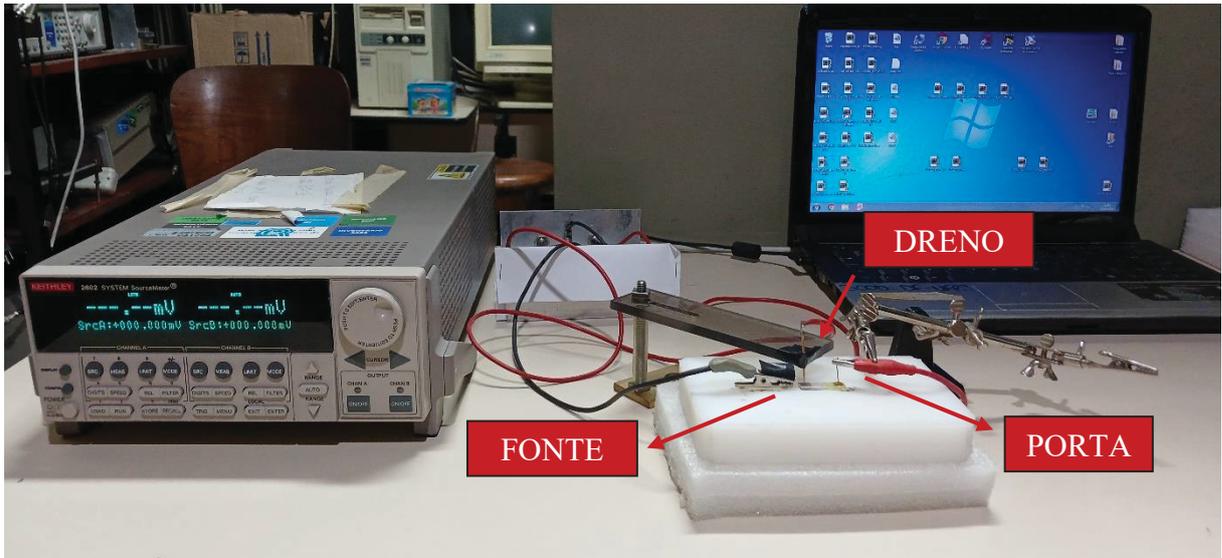


Figura 3.7: Foto das ligações elétricas do transistor. Imagem da autora.

Para analisar o efeito do envelhecimento do transistor, foram feitas medidas semanais de caracterização elétrica, sempre usando os mesmos parâmetros, que estão listados na Tabela 3.1, as mesmas configurações de medidas e sempre feitas no mesmo dia da semana, conforme a Tabela 3.2, para que o intervalo entre elas fosse o mesmo.

| Medida | Parâmetros |
|------------------------|--|
| $I \times V$ | De -1 V a $+1\text{ V}$, com taxa de varredura de 20 mV/s |
| $I_{DS} \times V_{GS}$ | $V_{DS} = -1\text{ V}$, partindo de $V_{GS} = +0,5\text{ V}$ até $V_{GS} = -2,5\text{ V}$, com taxa de varredura de 20 mV/s |
| $I_{DS} \times V_{DS}$ | $V_{GS} = +0,5\text{ V}$ até $V_{GS} = -2,5\text{ V}$, com taxa de varredura de 20 mV/s |

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados nas medidas de caracterização elétrica do transistor.

| Medida | Data | Curvas no gráfico |
|--------|------------|-------------------|
| 1 | 13/12/2023 | Semana 1 |
| 2 | 20/12/2023 | Semana 2 |
| 3 | 27/12/2023 | Semana 3 |
| 4 | 03/01/2024 | Semana 4 |
| 5 | 10/01/2024 | Semana 5 |

Tabela 3.2: Datas das medidas feitas ao longo das semanas

E as medidas feitas na seguinte ordem:

- 1^a. Medida de $I \times V$ apenas entre os eletrodos de fonte e dreno, sem o mel e sem a porta;
- 2^a. Medida de $I \times V$ apenas entre os eletrodos de fonte e dreno, com o mel e sem a porta;
- 3^a. Medida de transferência ($I_{DS} \times V_{GS}$), feita entre fonte e porta e mantendo a tensão no dreno constante ($V_{DS} = -1 \text{ V}$);
- 4^a. Medida de saída ($I_{DS} \times V_{DS}$), também feita entre fonte e dreno, mas variando a tensão na porta ($V_{GS} = 0,5 \text{ V}$ a $V_{GS} = -2,5 \text{ V}$);
- 5^a. Medida de $I \times V$ apenas entre os eletrodos de fonte e dreno, com o mel e sem a porta, após todas as medidas anteriores.

Nas 1^a e 2^a medidas, é feito o $I \times V$ para saber se há a dopagem do canal após a deposição do mel, e na 5^a medida ele é feito para saber se houve a dopagem do canal após as medidas de transferência e de saída, com os parâmetros respectivos de cada curva sendo calculados através das Eqs. 2.16, 2.17 e 2.18.

CAPÍTULO 4

Resultados e Análise

Neste capítulo serão apresentados os resultados das medidas de caracterização e as discussões referentes a eles. Como os gráficos obtidos foram semelhantes entre si, serão apresentados aqui o primeiro conjunto de medidas e então serão analisados todos os parâmetros calculados.

4.1 Resultados obtidos

Seguindo a ordem das medidas mostrada no item anterior, os primeiros resultados obtidos foram as medidas de $I \times V$ (feitas entre os eletrodos de fonte e dreno), realizadas antes das medidas de transferência e saída, sem (curva em preto) e com (curva em vermelho) a presença do mel, por 3 ciclos cada, que estão na Figura 4.1 abaixo.

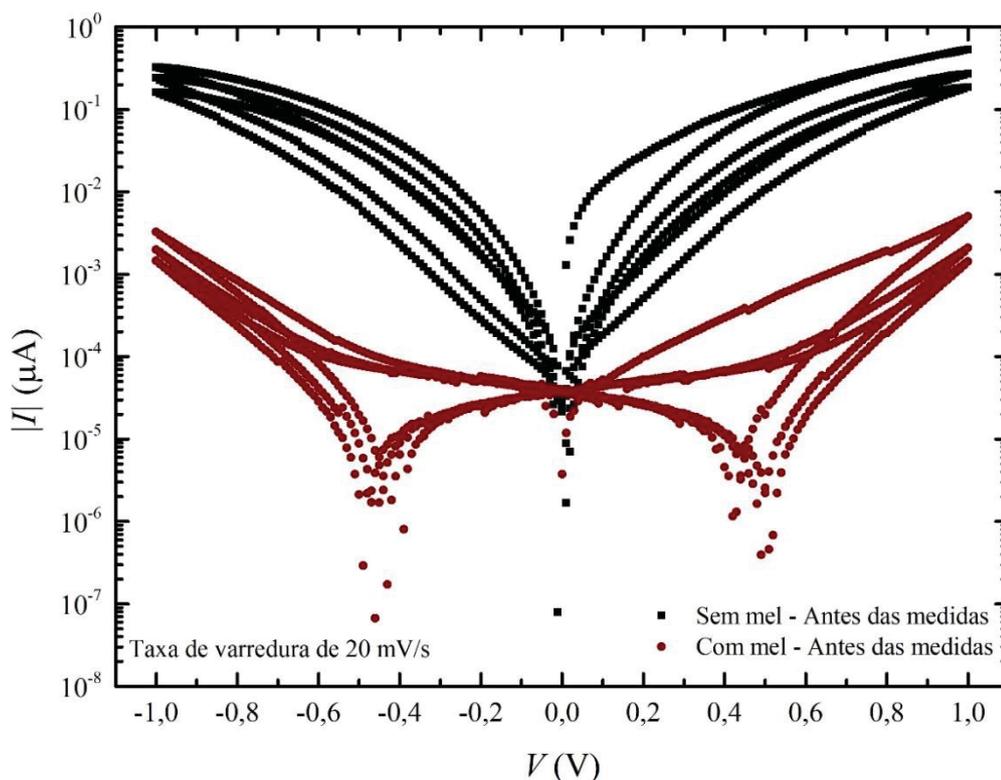


Figura 4.1: Medidas de $I \times V$ para a região Au/DNTT/Au, onde os pontos em preto se referem à medida sem a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída e os pontos em vermelho se referem à medida com a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída. Foram realizados três ciclos em cada medida.

Da Figura 4.1, nota-se que houve uma diferença expressiva entre as correntes máximas atingidas sem e com a presença da gota de mel, com a corrente máxima para a curva sem mel sendo maior do que a corrente máxima para a curva com o mel. Esse comportamento possivelmente foi causado pela limpeza com a água deionizada, que pode ter permitido a interação do oxigênio na superfície do DNNT, e pelas medidas de teste realizadas anteriormente, que podem ter deixados cargas residuais no canal. [38,39]

A próxima medida de caracterização feita foi a de transferência, que está na Figura 4.2, feita no primeiro ciclo da Semana 1, e posteriormente serão analisadas as demais curvas, que estão na Figura 4.9.

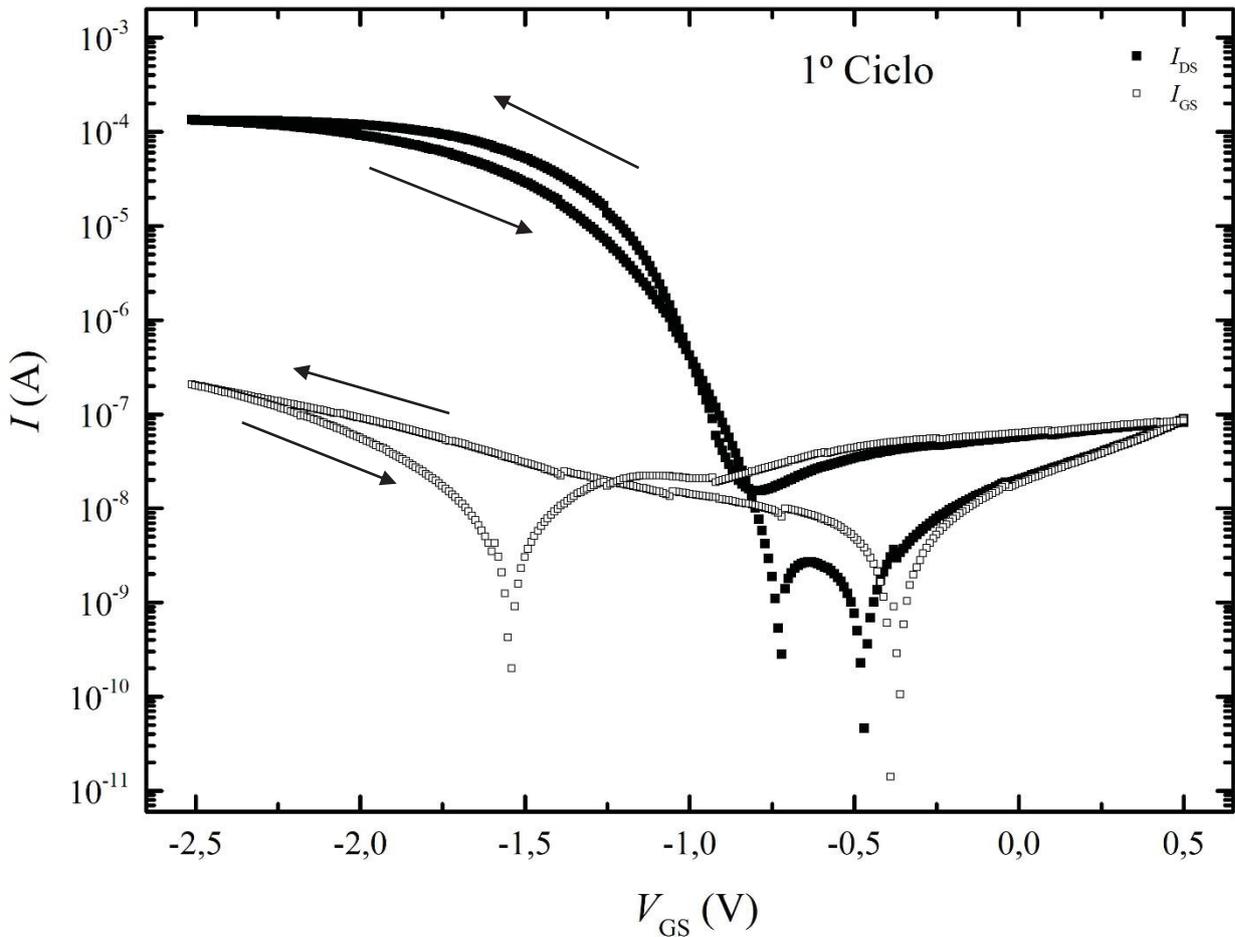


Figura 4.2: Curva de transferência ($I_{DS} \times V_{GS}$) (pontos fechados) e a corrente de fuga ($I_{GS} \times V_{GS}$) (pontos abertos) referente ao 1º ciclo da Semana 1, com $V_{DS} = -1$ V.

Nesta medida vê-se que há a modulação da corrente e que também existe uma diferença expressiva na ordem de grandeza entre I_{DS} e I_{GS} , significando que a corrente que escapa pela porta é muito menor do que a corrente presente no canal, logo o transistor está operante. Este comportamento foi obtido em todas as outras medidas das Semanas 1 a 4. O sentido da curva de transferência é anti-horário, conforme a indicação das setas na Figura 4.2, e todos os parâmetros foram calculados considerando apenas a curva de ida (usando as Eqs. 2.13, 2.16,

2.17 e 2.18), pois poderia haver alguma mudança no canal durante a curva de volta (como alguma dopagem, por exemplo) e isso seria refletido nos parâmetros obtidos.

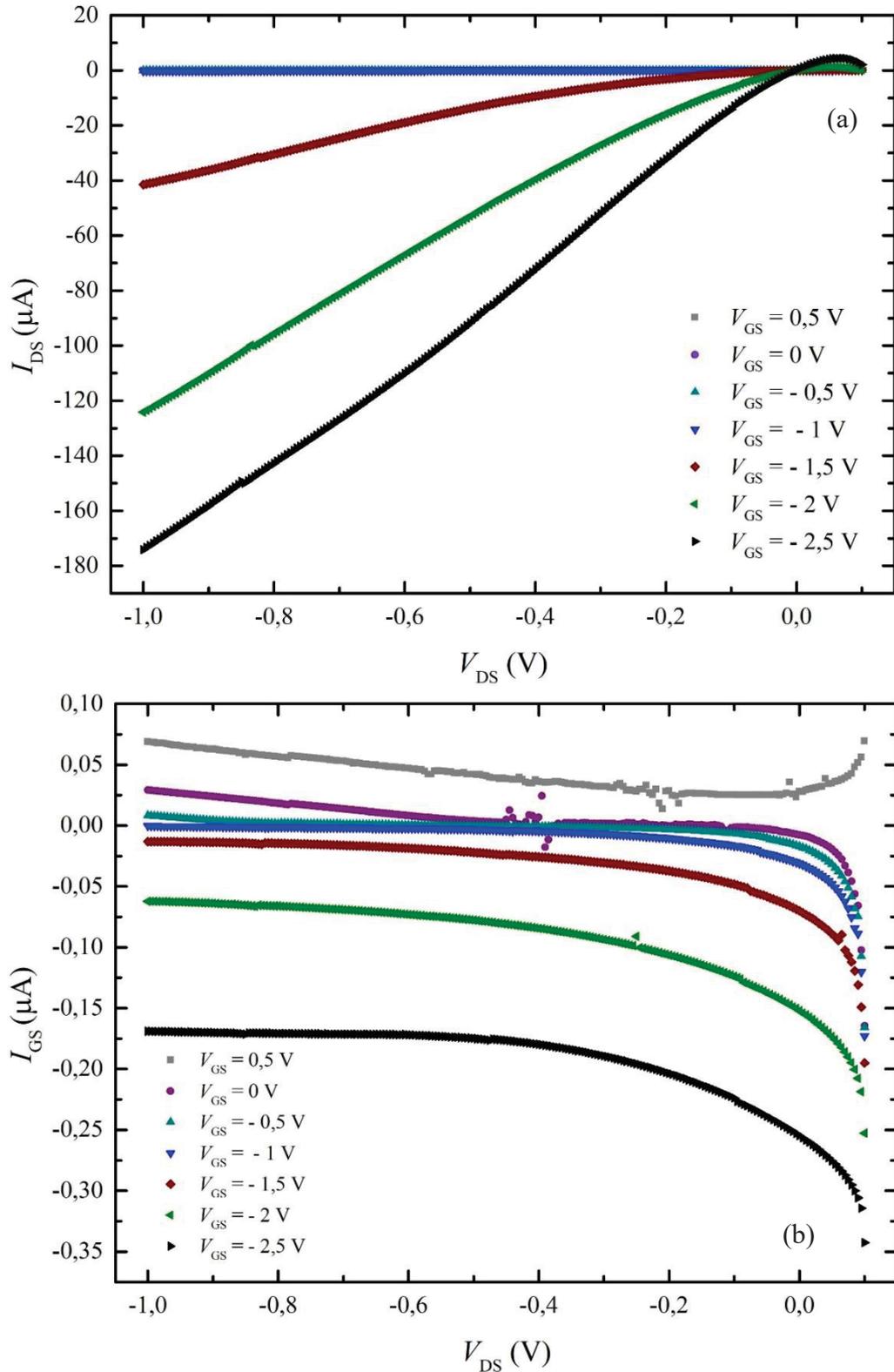


Figura 4.3: (a) Curva de saída ($I_{DS} \times V_{DS}$) e da (b) corrente de fuga ($I_{GS} \times V_{DS}$) para a medida da Semana 1.

Os próximos resultados foram as medidas das curvas de saída, que estão na Figura 4.3. Da mesma forma que as curvas de transferência, todos os resultados obtidos foram semelhantes entre si e por questão de clareza, apenas os gráficos referentes à Semana 1 serão mostrados. Na Figura 4.3.a, está a medida de $I_{DS} \times V_{DS}$ e na Figura 4.3.b está a medida de $I_{GS} \times V_{DS}$, que é a corrente de fuga para este caso e que reproduziu o mesmo comportamento das medidas de transferência.

Finalizadas as medidas de transferência e saída, a medida de $I \times V$ foi refeita e está na Figura 4.4, onde novamente foram feitos 3 ciclos de medida para cada situação. As curvas em vermelho e preto são as mesmas apresentadas na Figura 4.1, e a curva em azul é referente às medidas de $I \times V$ após as medidas de saída e transferência. Destas medidas, percebe-se claramente que a corrente máxima atingida pela curva azul foi menor que as das curvas preta e vermelha. Este é um indício de que não houve dopagem no canal (pois se tivesse acontecido, a corrente máxima atingida seria maior do que as outras), sendo que é mais provável que esse comportamento aconteça devido ao envelhecimento do transistor.

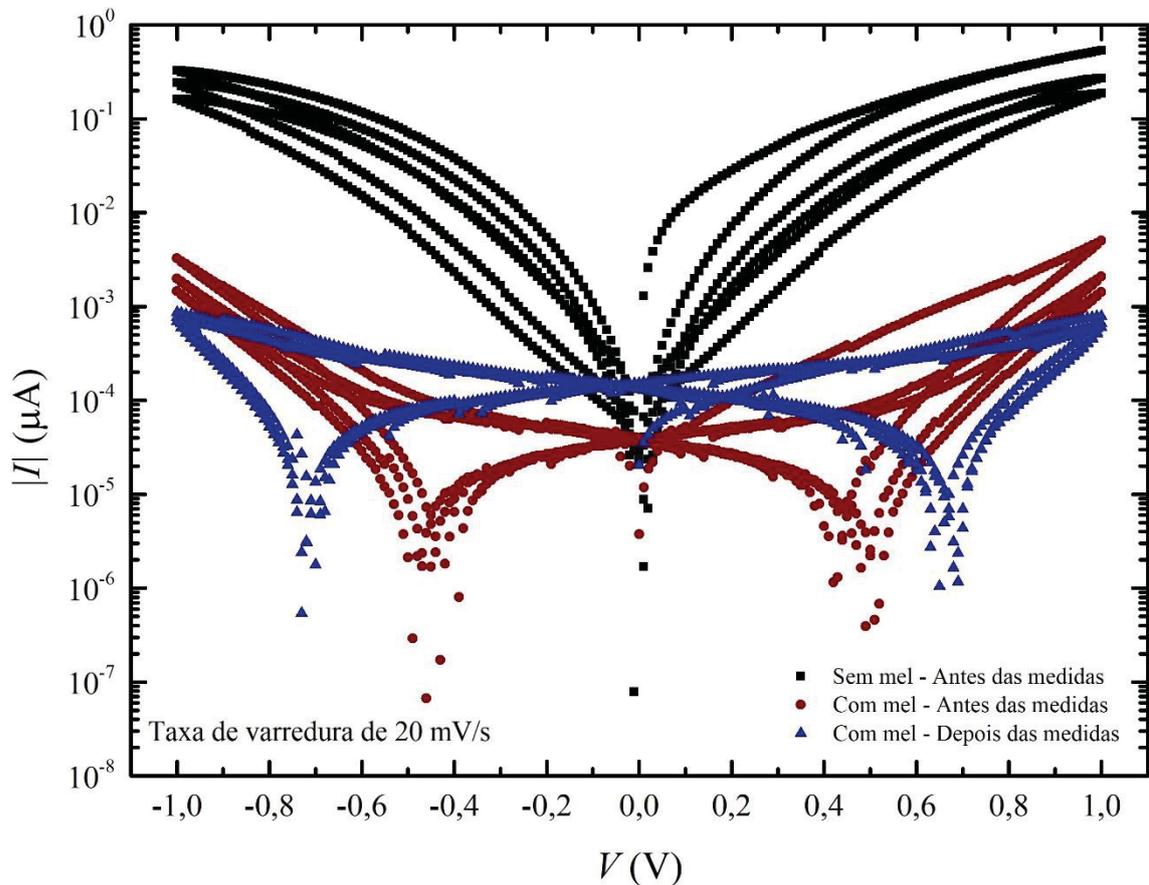


Figura 4.4: Medidas de $I \times V$ para a região Au/DNTT/Au, onde os pontos em preto se referem à medida sem a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída, os pontos em vermelho se referem à medida com a presença do mel, antes das medidas de transferência e saída e os pontos em azul se referem à medida com a presença do mel, após todas as medidas de transferência e saída.

De todas as medidas de caracterização realizadas, conclui-se que, pelos valores máximos de corrente atingidos nas medidas de $I \times V$ terem diminuído e pelos valores máximos da corrente atingidos nas medidas de transferência não terem uma variação expressiva, não houve dopagem do canal e o mecanismo pelo qual o transistor opera é o de efeito de campo, sendo assim um EGOFET. Na Semana 5 o transistor parou de funcionar, pois a modulação da corrente não aconteceu, além da ordem de grandeza entre I_{DS} e I_{GS} terem sido a mesma, como mostrado nos gráficos da Figura 4.5.

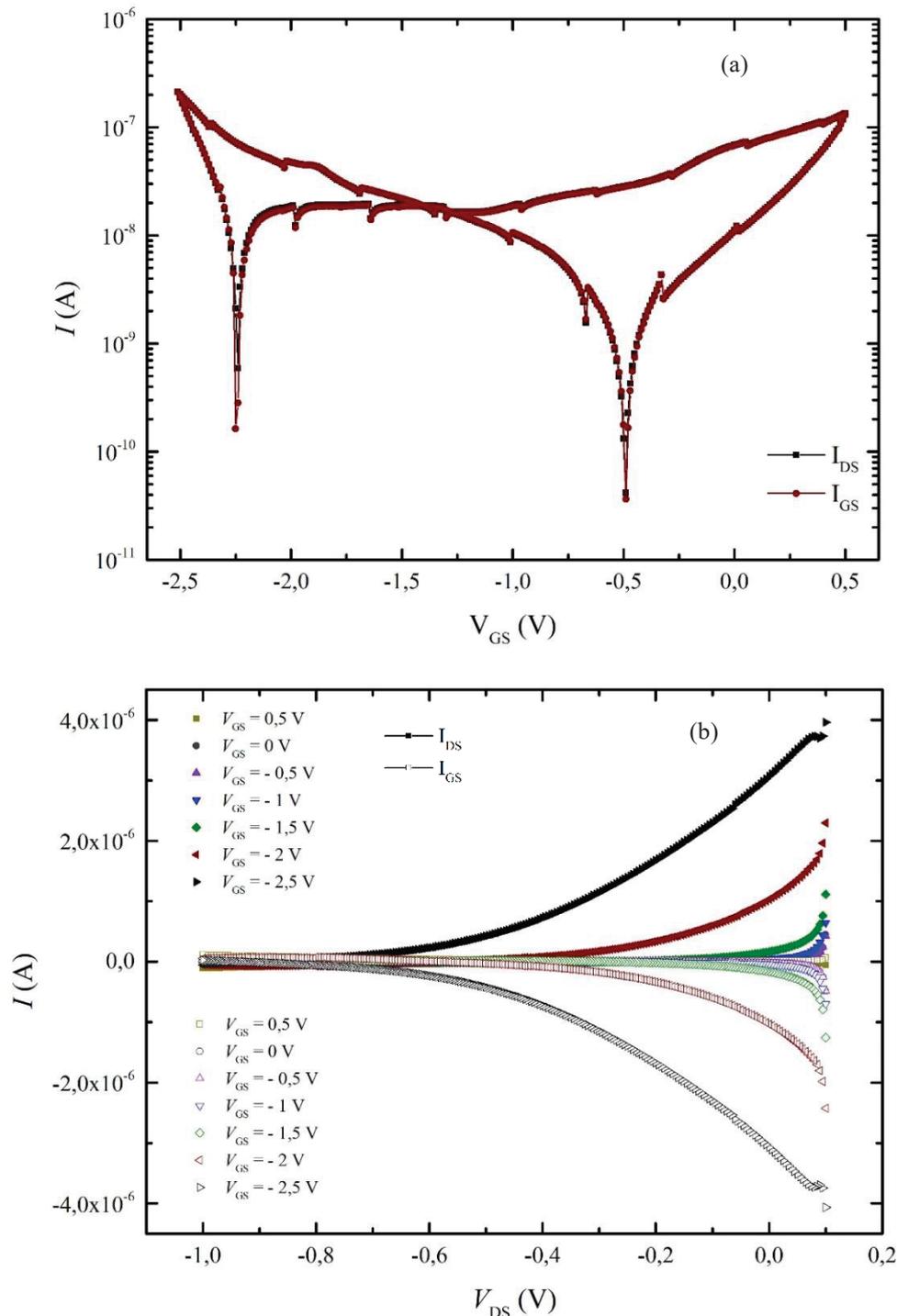


Figura 4.5: (a) Curva de transferência ($I_{DS} \times V_{GS}$ e $I_{GS} \times V_G$) e (b) Curva de saída ($I_{DS} \times V_{DS}$), onde os pontos fechados se referem à I_{DS} e os pontos abertos se referem à I_{GS} obtidas na Semana 5, com $V_{DS} = -1$ V.

4.2 Parâmetros obtidos

Todos os cálculos presentes nesta seção foram feitos para todos os ciclos de todas as medidas, mas novamente, por questão de clareza, será mostrado aqui apenas os gráficos referentes às medidas da Semana 1, já que todos foram semelhantes entre si.

4.2.1 Razão On/Off

Na Figura 4.6 abaixo está o gráfico da curva de transferência, sem a corrente de fuga. Como a corrente I_{ON} é a maior corrente atingida pelo transistor no estado ligado e a corrente I_{OFF} é a menor corrente atingida pelo transistor no estado desligado, os valores foram coletados para cada curva nas regiões indicadas pelas setas, utilizando a curva de ida, e as razões foram calculadas fazendo I_{ON}/I_{OFF} .

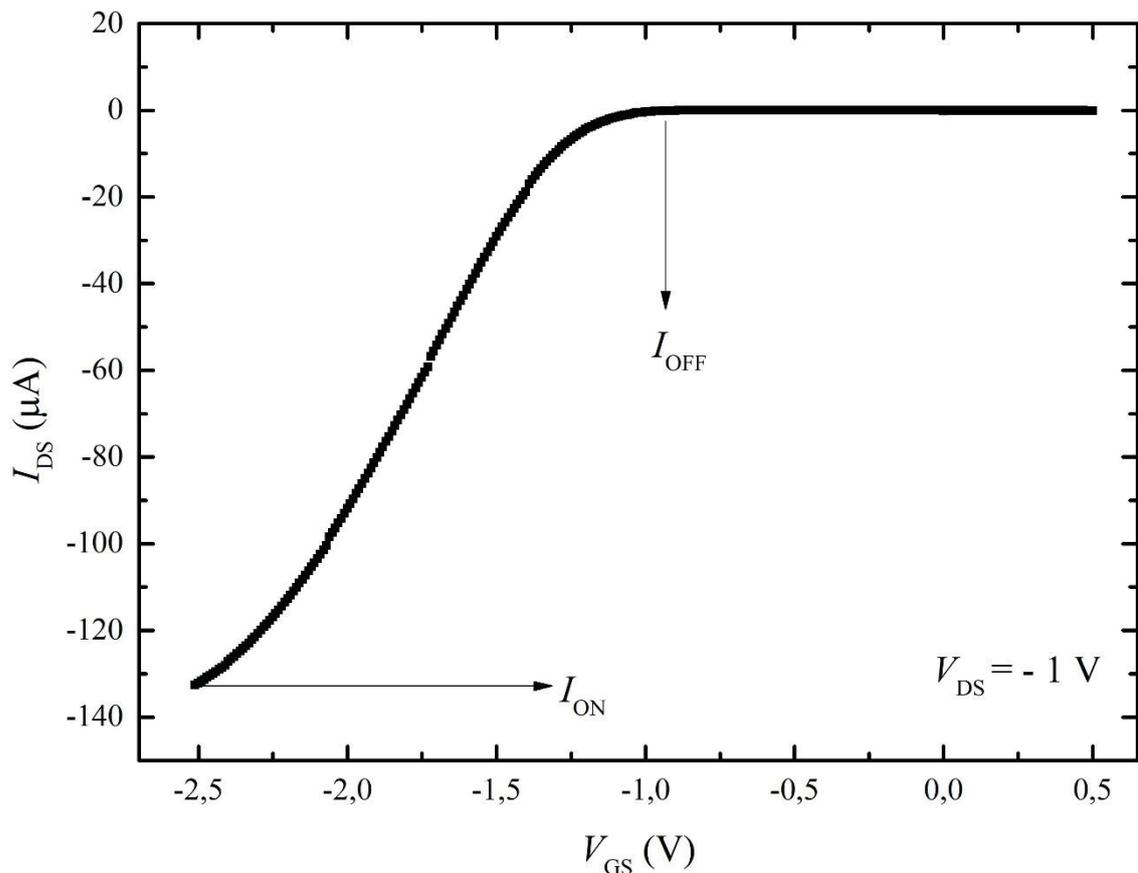


Figura 4.6: Curva de transferência para a obtenção da razão On/Off do transistor, com $V_{DS} = -1$ V.

4.2.2 Tensão do limiar de operação

A partir da curva de transferência, foi feito o gráfico de $I_{DS}^{1/2} \times V_{GS}$, que está na Figura 4.7. Como feito com a razão On/Off, também foi utilizado apenas a curva de ida. Este possui uma parte linear, onde o modelo de G. Horowitz pode ser aplicado e com isso obter os coeficientes da equação da reta, além de V_T , através da Eq. 2.16.

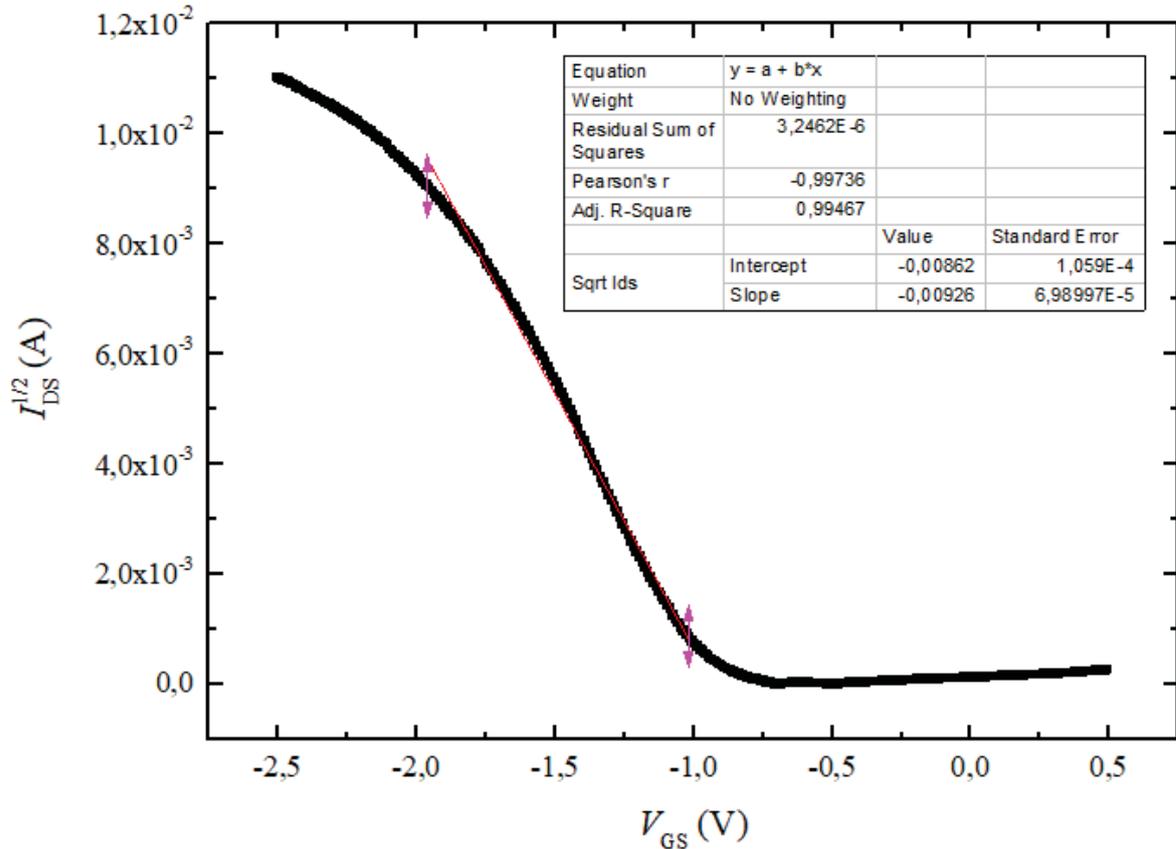


Figura 4.7: Curva para a obtenção do limiar de operação, com $V_{DS} = -1$ V.

4.2.3 Transcondutância

A curva de transcondutância pode ser obtida através da derivada da curva de transferência, conforme a Eq. 2.18 e que resultou na Figura 4.8 abaixo. Cada ponto máximo de cada gráfico foi coletado porque é onde ocorre a máxima eficiência do transistor. No gráfico, está na região indicada pela seta em preto.

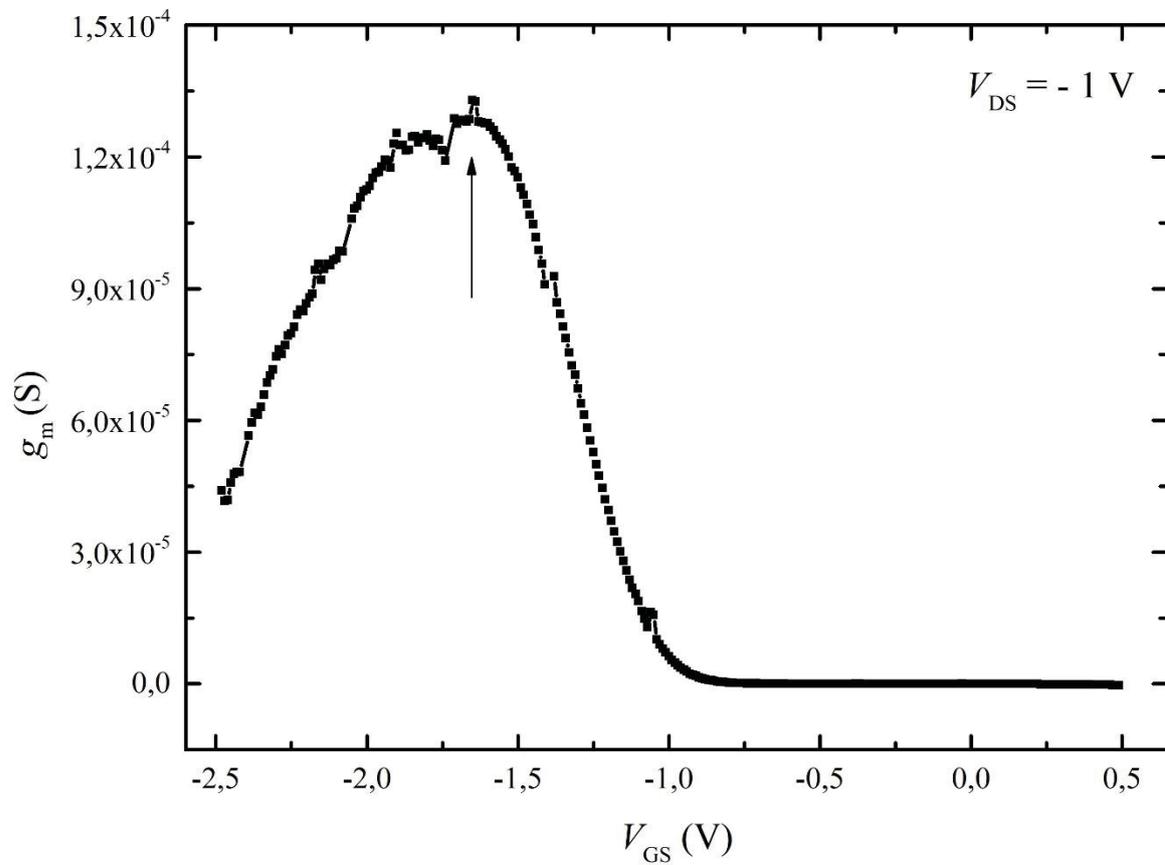
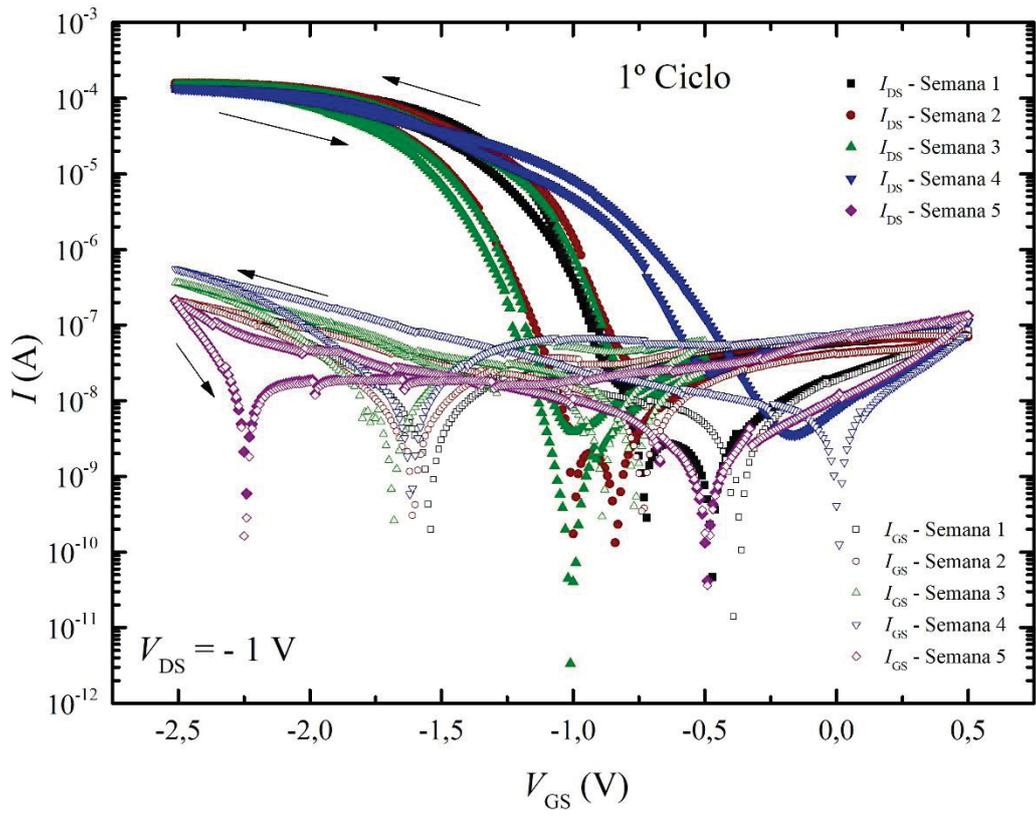


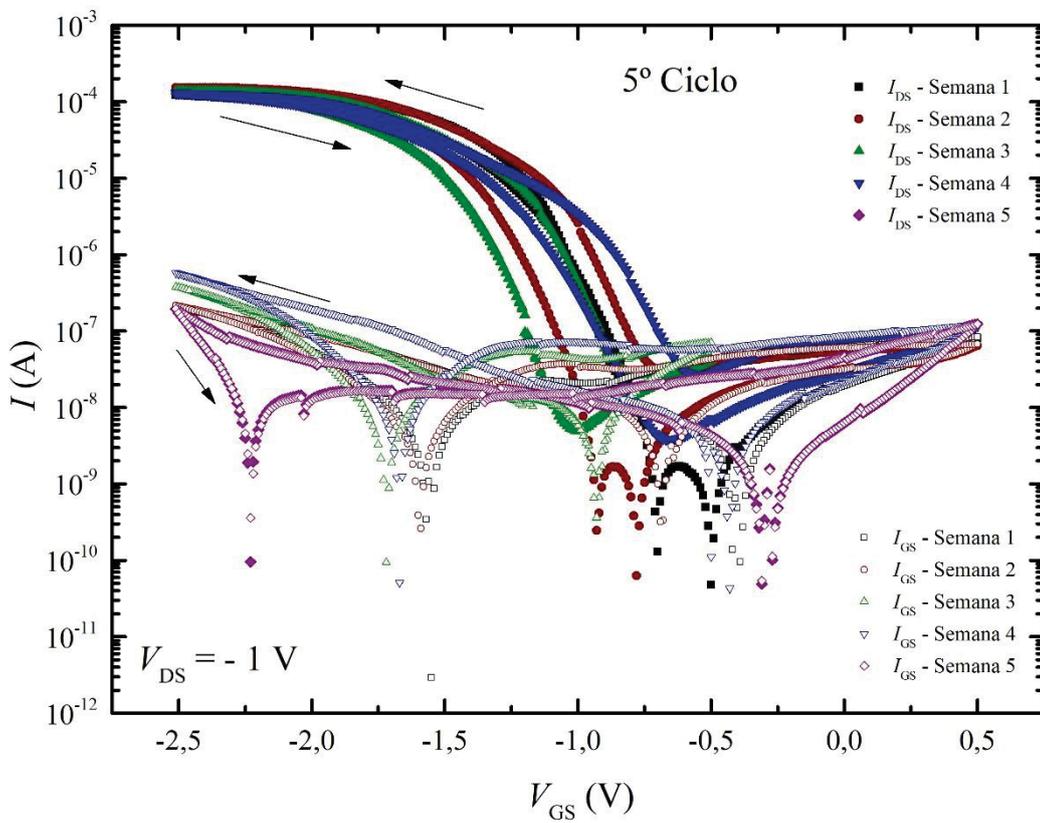
Figura 4.8: Curva da transcondutância a $V_{DS} = -1$ V.

4.2.4 Análise dos parâmetros

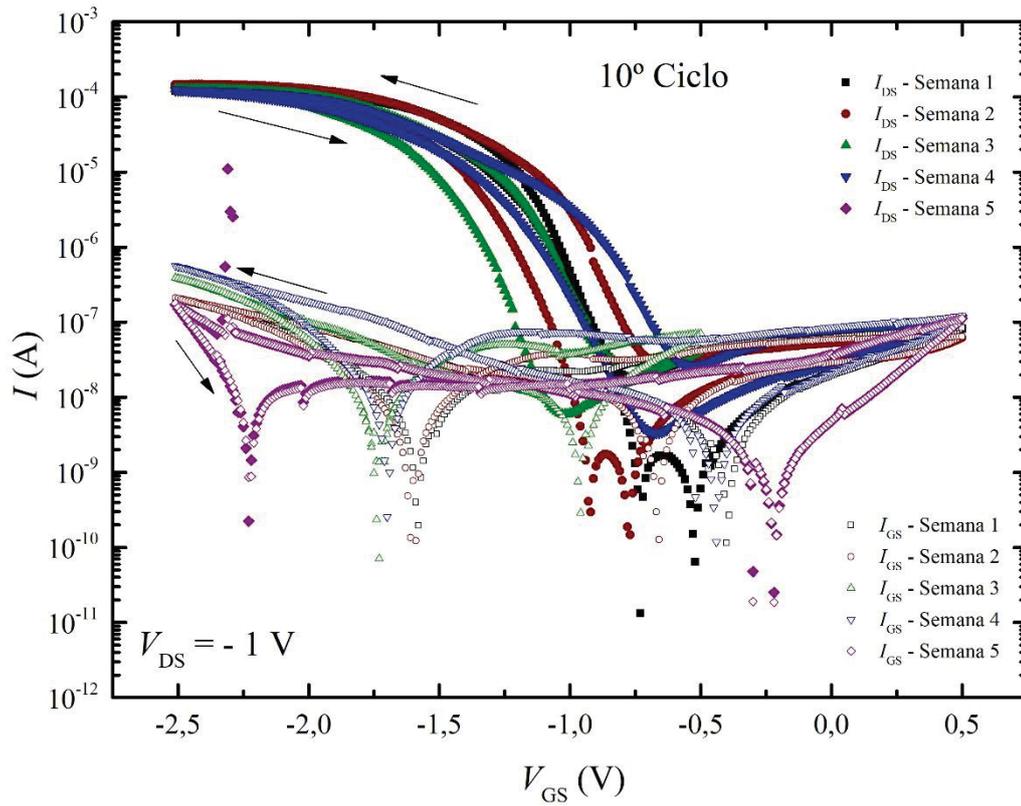
Na Figura 4.9 estão os resultados para os 1°, 5°, 10° e 15° ciclos das medidas de transferência realizadas nas cinco semanas, com os interiores apresentando os gráficos das correntes de fuga associadas a cada uma das medidas.



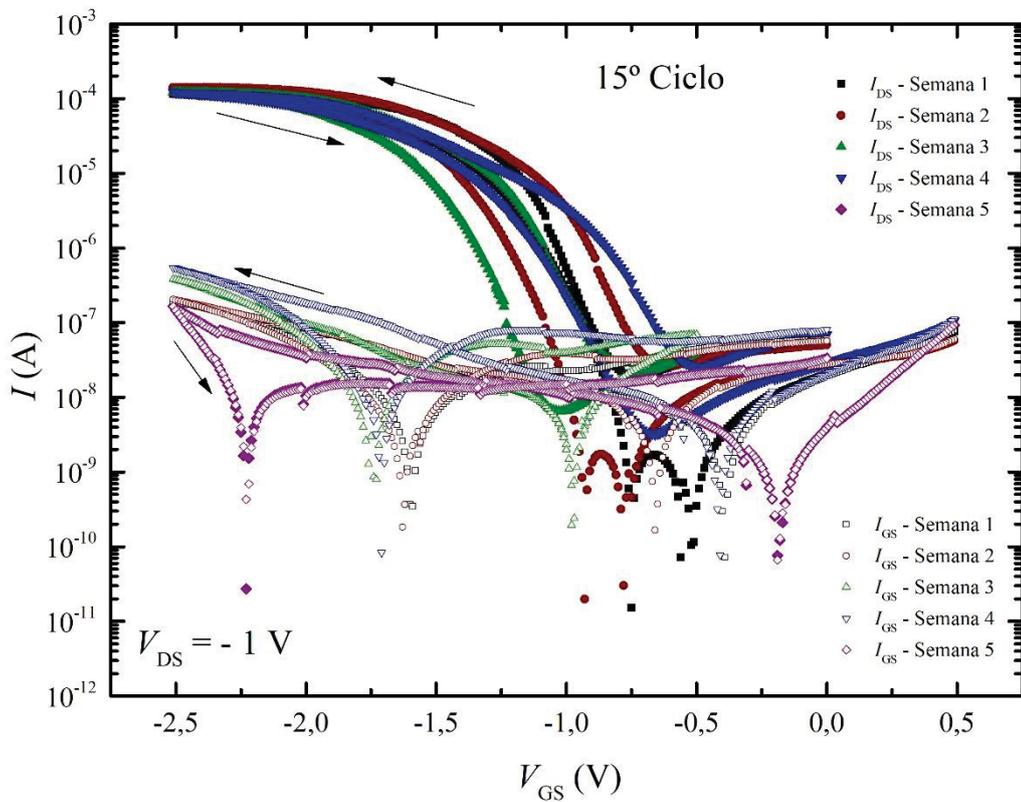
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.9: Medidas de transferência ($I_{DS} \times V_{GS}$) (pontos fechados) e da corrente de fuga ($I_{GS} \times V_{GS}$) (pontos abertos) para (a) 1º ciclo, (b) 5º ciclo, (c) 10º ciclo e (d) 15º ciclo para as cinco semanas de caracterização elétrica do transistor.

Destes gráficos percebe-se que as curvas obtidas mantiveram o mesmo padrão, com as correntes I_{DS} máximas sendo próximas entre si e na mesma ordem de grandeza, assim como ocorreu para a corrente de fuga, e não houve expressivas variações ao longo dos ciclos, logo o transistor apresentou estabilidade ao longo das medidas. Os parâmetros associados a cada curva estão presentes nas tabelas do Anexo A, e elas foram sintetizados nas figuras a seguir.

Nos gráficos onde os parâmetros estão plotados em função do número de ciclos de medida, os pontos em preto se referem aos parâmetros obtidos para a primeira medida (Semana 1), os pontos em vermelho se referem aos parâmetros obtidos para a segunda medida (Semana 2), os pontos em verde se referem aos parâmetros obtidos para a terceira medida (Semana 3) e os pontos em azul se referem aos parâmetros obtidos para a quarta medida (Semana 4).

O primeiro parâmetro a ser analisado é a razão On/Off do transistor, cujos gráficos estão nas Figuras 4.10 a 4.13.

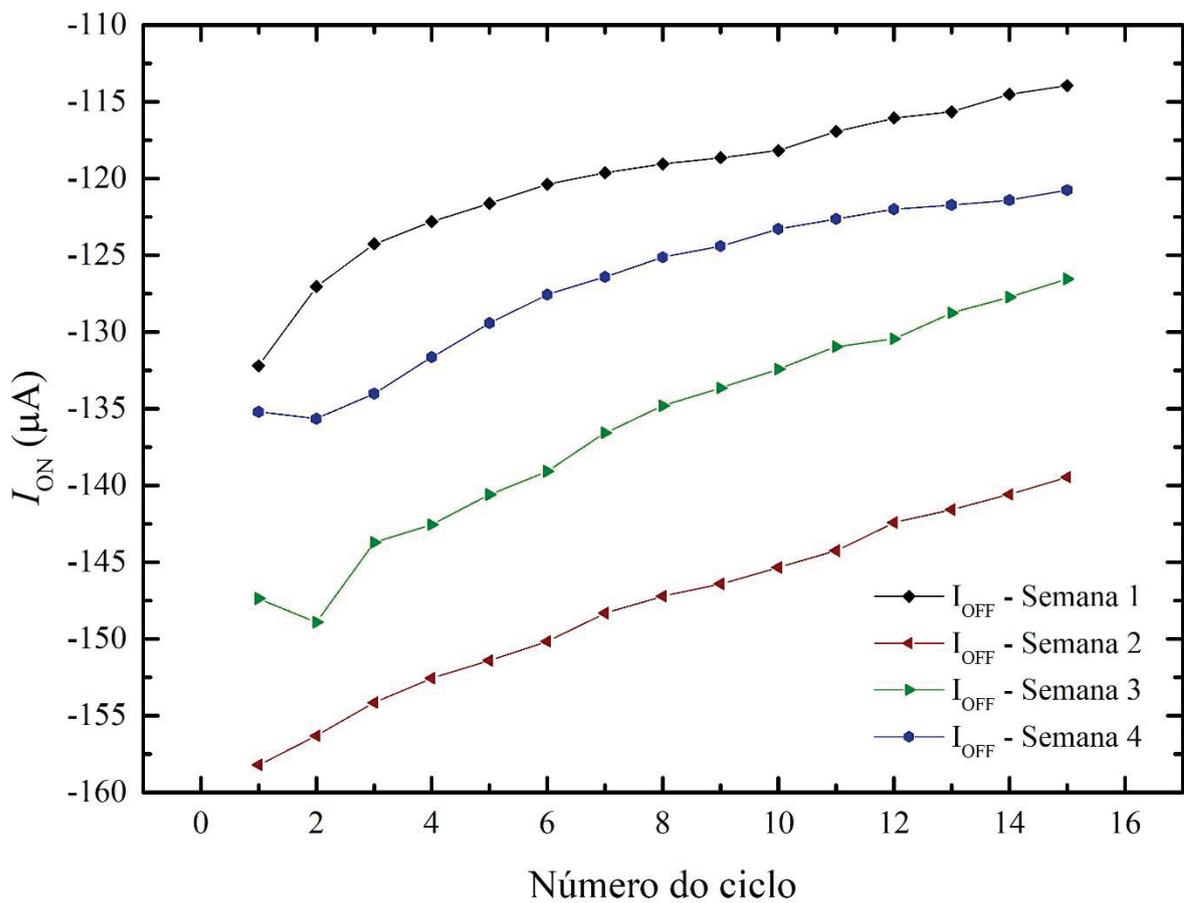


Figura 4.10: Gráfico de I_{ON} , plotados em função do número de ciclos.

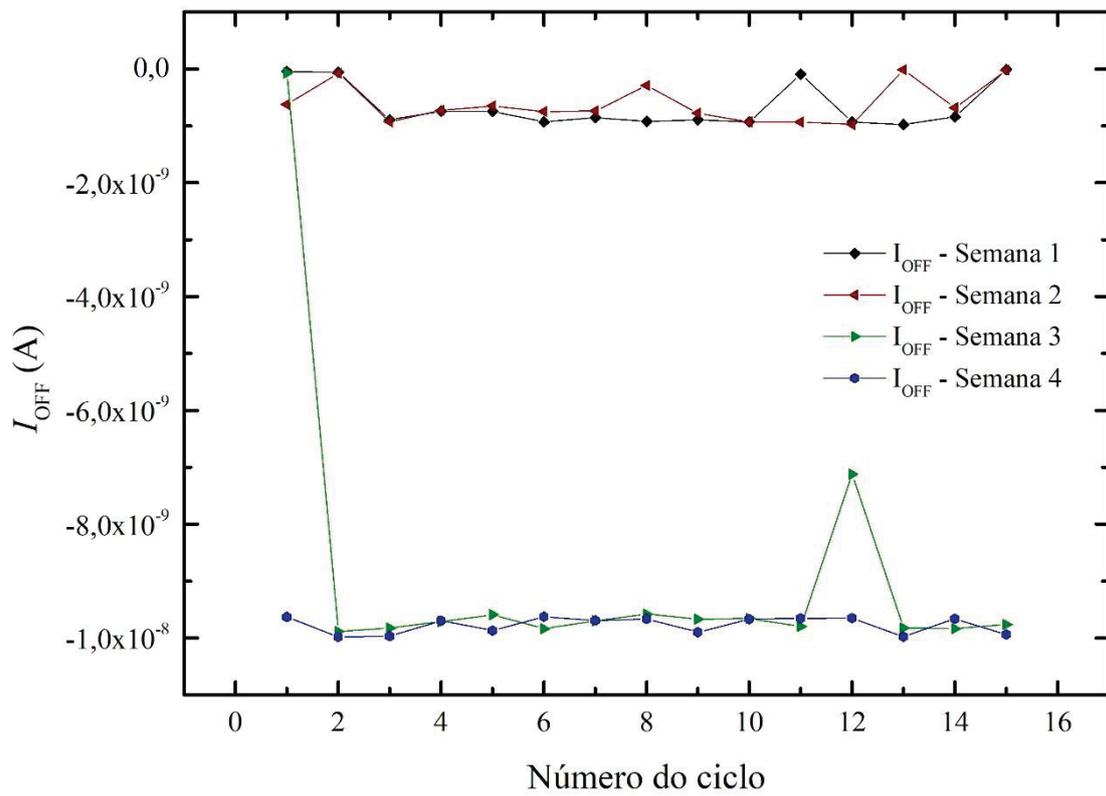


Figura 4.11: Gráfico de I_{OFF} , plotados em função do número de ciclos.

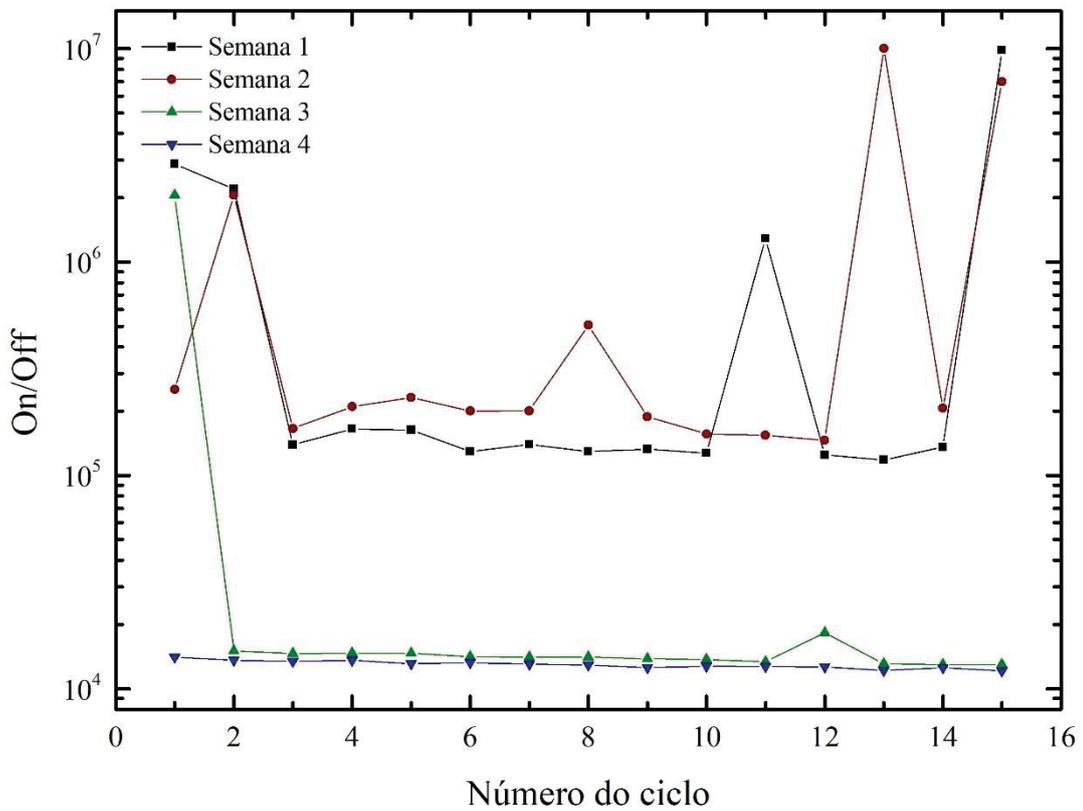


Figura 4.12: Gráficos de I_{ON}/I_{OFF} para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos.

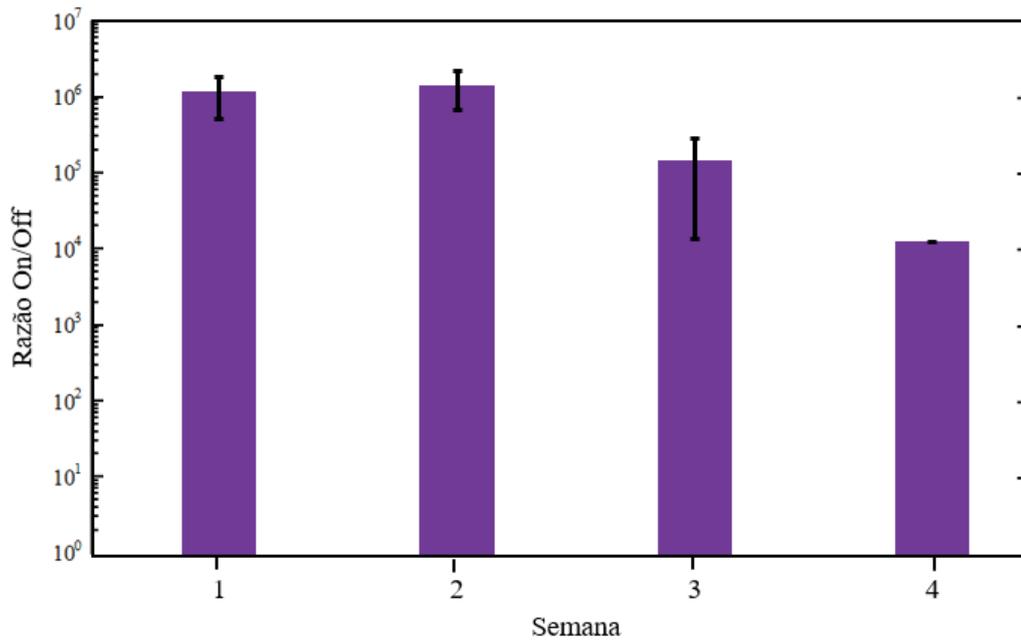


Figura 4.13: Gráficos dos valores médios de I_{ON}/I_{OFF} para cada semana de medida.

Das Figura 4.10 e 4.11, vemos que houve uma diminuição de I_{ON} , que é um indicativo do estresse do dispositivo, e uma estabilidade de I_{OFF} ao longo dos ciclos das medidas, mas a ordem de grandeza de I_{OFF} aumentou da Semana 2 para a Semana 3, fazendo com que a razão On/Off diminuísse, como visto nas Figuras 4.12 e 4.13, mostrando que o transistor perdeu estabilidade ao longo do tempo.

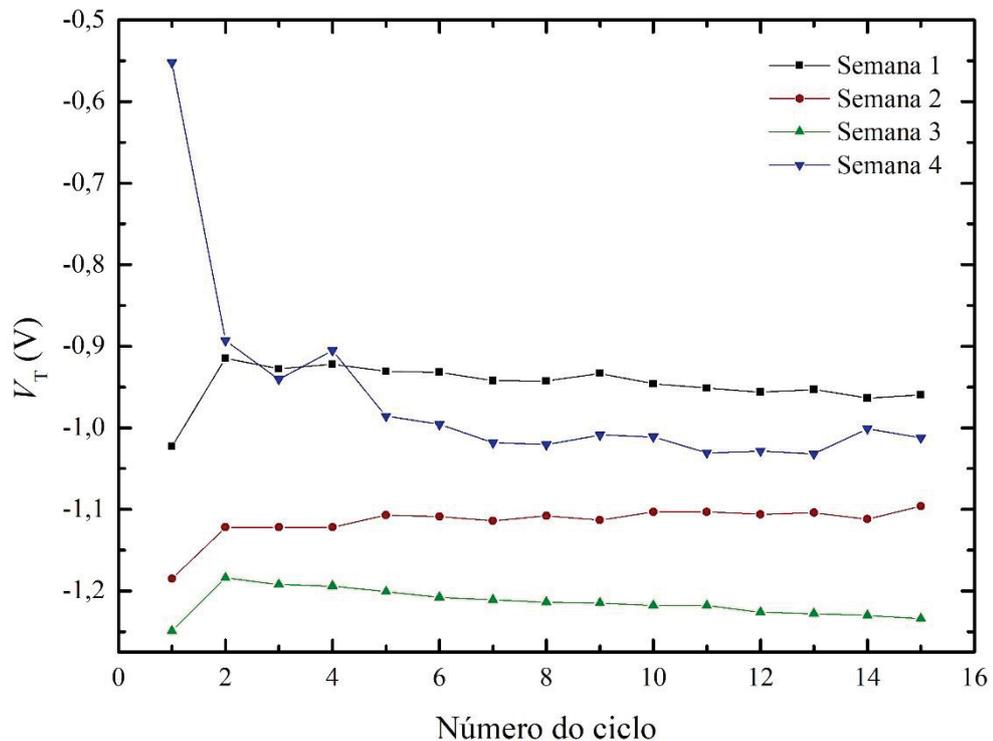


Figura 4.14: Gráfico da tensão do limiar de operação (V_T) para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos.

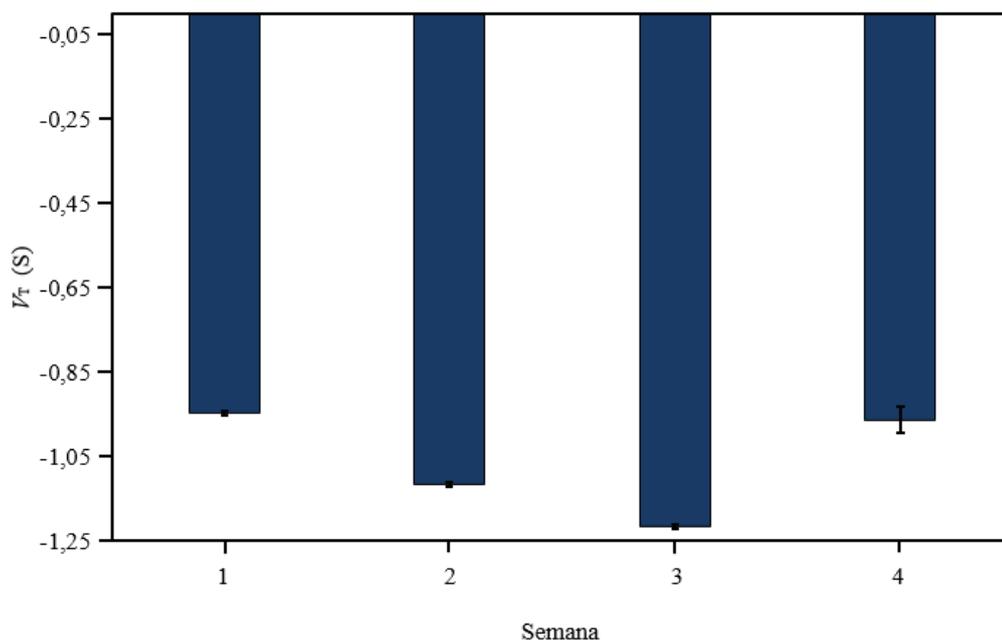


Figura 4.15: Gráfico dos valores médios da tensão do limiar de operação (V_T) para cada semana de medida.

Nas Figuras 4.14 e 4.15, estão os valores obtidos para V_T plotados ao longo dos ciclos e os valores médios para cada semana, respectivamente. Do mesmo modo que a razão On/Off, V_T é estável ciclo a ciclo, mas não entre as semanas. Da Semana 1 até a Semana 3, V_T aumentou e isso pode estar associado a um maior número de armadilhas, ou ainda um aprofundamento dos seus níveis de energia, justificando o aumento apresentado por I_{OFF} na Figura 4.11.

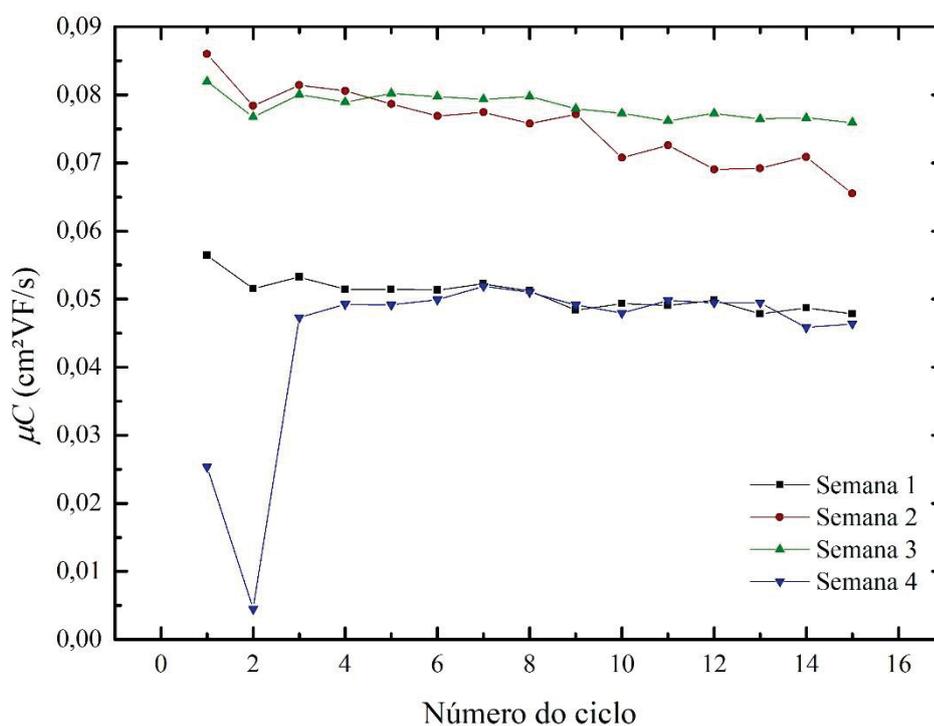


Figura 4.16: Gráfico de μ_C para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos.

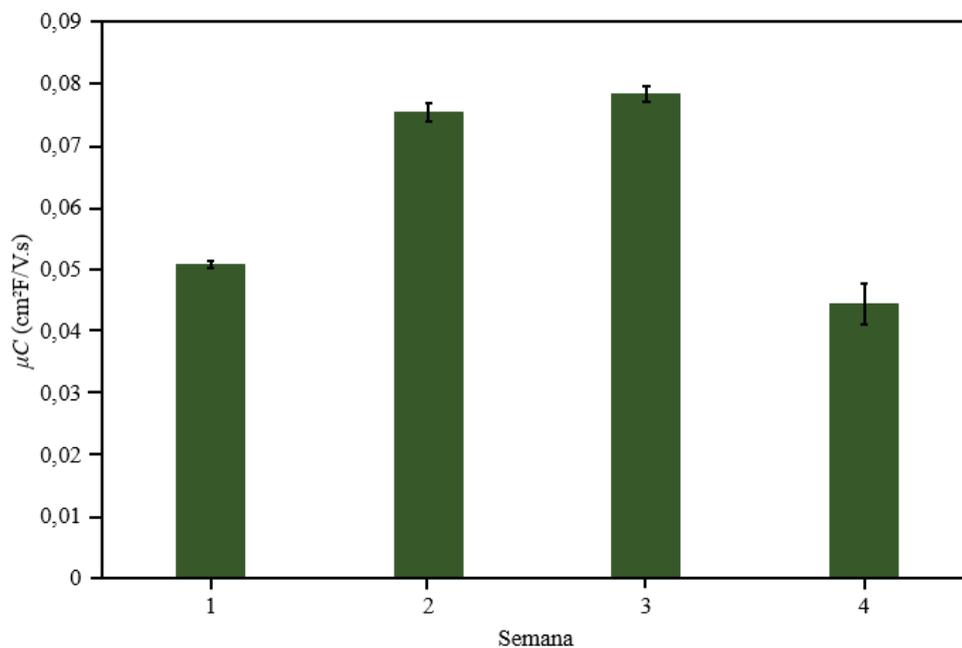


Figura 4.17: Gráfico dos valores médios de μC para cada semana de medida.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 estão os valores de μC obtidos, e ele não sofreu uma variação expressiva ao longo das semanas, mantendo sempre a mesma ordem de grandeza. Outro parâmetro que isso aconteceu foi a transcondutância, conforme os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19.

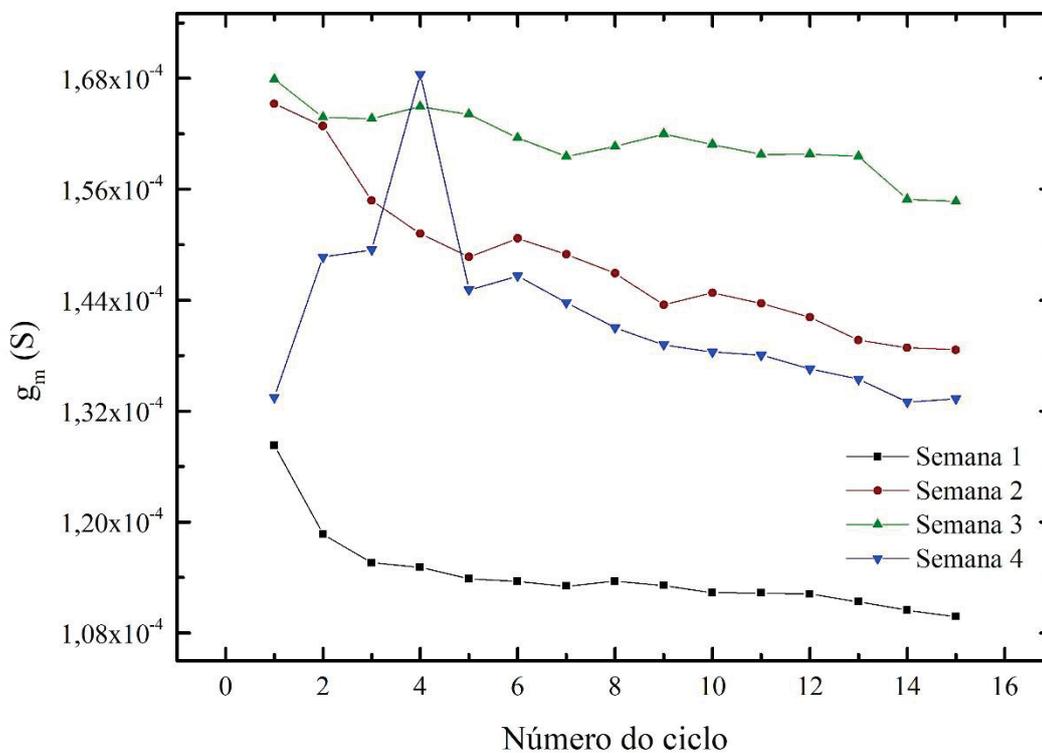


Figura 4.18: Gráfico da transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos.

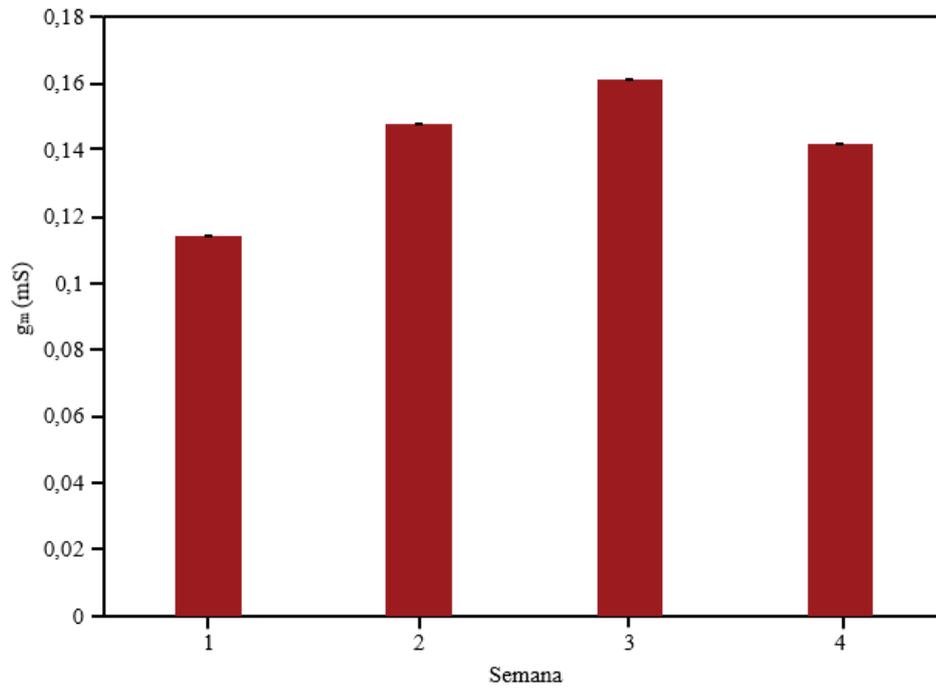


Figura 4.19: Gráfico dos valores médios da transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4.

Mas por mais que a transcondutância não tenha apresentado uma mudança expressiva, ainda manteve o mesmo comportamento dos outros parâmetros, tendo um aumento sucessivo nas Semanas 1, 2 e 3, assim como a tensão (entre os eletrodos de porta e fonte) associada a ela, como mostrado nas Figuras 4.20 e 4.21.

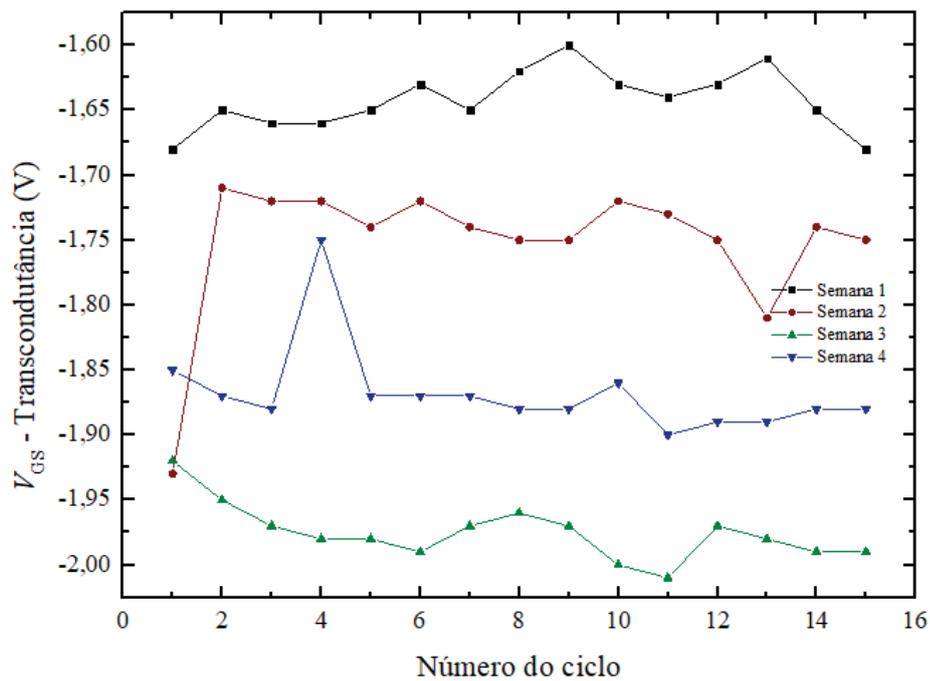


Figura 4.20: Gráfico da tensão associada à transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4, plotados em função do número de ciclos medidos.

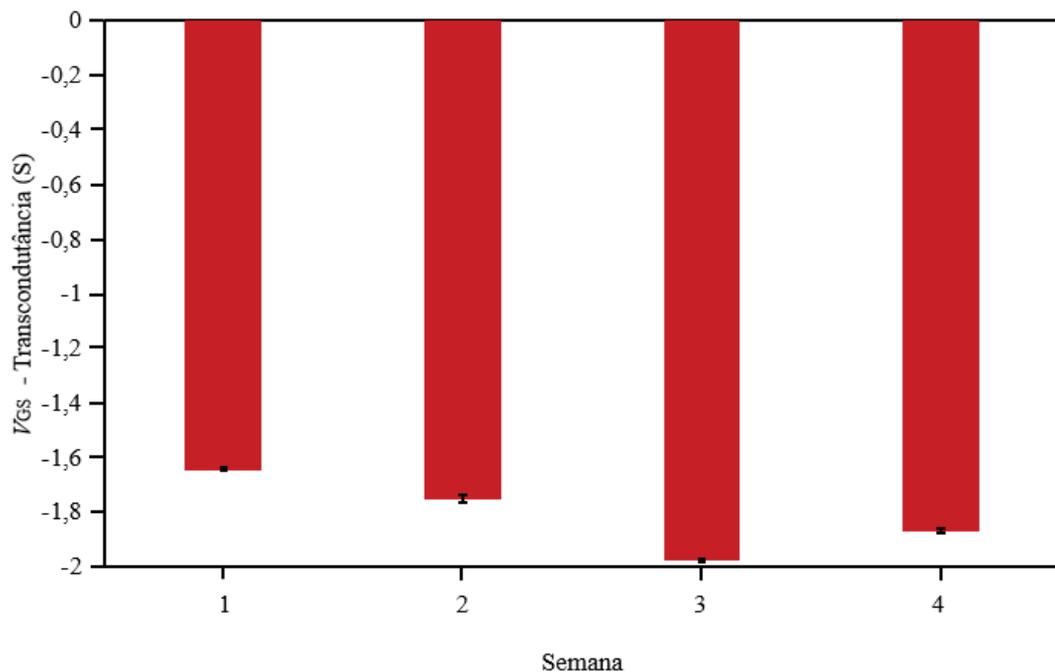


Figura 4.21: Gráfico dos valores médios da tensão associada à transcondutância para as Semanas 1, 2, 3 e 4.

Já na Semana 4, houve uma diminuição nos valores obtidos de cada parâmetro, e como o transistor deixou de operar na Semana 5, acredita-se que isso tenha ocorrido devido à combinação da perda de conjugação do DNNT - pois como visto na Figura 4.5, ainda havia corrente no transistor, mas este já não apresentava modulação – e a influência das armadilhas. Além disso, alguns fatores que podem influenciar no envelhecimento do dispositivo são:

1. Defeitos estruturais: As não-homogeneidades estruturais dos semicondutores orgânicos podem conter armadilhas intrínsecas, as quais podem interagir com os portadores de carga dentro do SOs, fazendo com que haja uma alteração no transporte da corrente em seu interior. [40,41]

2. Dopantes/reação eletroquímica: os componentes do transistor podem conter impurezas que podem causar reações químicas no transistor, causando assim a degradação através da quebra de conjugação. [40,42,45]

3. Interfaces: as armadilhas dos portadores de carga podem ocorrer nas interfaces entre cada componente do transistor, como metal/semicondutor e semicondutor/eletrólito, afetando assim a injeção e o transporte de portadores de carga. Nos OFETs, a proximidade do canal com a porta dielétrica e a presença de armadilhas de portadores de carga na interface entre o semicondutor e o dielétrico pode impactar a performance destes dispositivos. [42,45,46]

4. Efeitos do ambiente: a exposição ao ambiente durante a fabricação, manuseio ou a caracterização pode afetar os semicondutores orgânicos e levar à formação de armadilhas, sendo alguns destes efeitos a temperatura, a umidade e o oxigênio. [40,46]

Como não houve dopagem do canal, então a princípio também não houve degradação por dopagem ou reação eletroquímica. Em menor escala, ainda é possível que haja influência dos defeitos estruturais e do ambiente. Pelo mel ser composto principalmente por água, glucose, frutose e 5-hydroxymethyl furfural (HMF – que é um composto orgânico formado a partir da desidratação dos açúcares) [47], ele pode não isolar completamente o DNTT do contato com o ar, fazendo com que haja a interação dele com o oxigênio e a água presentes no ar e contribuindo para a degradação do transistor. Esse efeito do envelhecimento já foi relatado em transistores baseados em outros polímeros, como o poly 3-hexylthiophene (P3HT) [48] e o pentaceno [45], pois para o uso efetivo dos transistores orgânicos na eletrônica comercial, é essencial estudar como a degradação os afeta. [50-54]

CAPÍTULO 5

Conclusão

Neste trabalho foi montado e caracterizado eletricamente o transistor Au/DNTT/Mel/Au ao longo das semanas. O DNTT foi depositado sobre os eletrodos de ouro (sendo fonte e dreno o mesmo metal) através de evaporação térmica a vácuo, na espessura de 100 nm, e sobre ele foi depositado uma gota de 5 μL de mel comercial, através da técnica de gotejamento, e o eletrodo de porta utilizado foi um fio de platina que perfurava a gota de mel. Nas Semanas 1, 2, 3 e 4, o transistor estava operante, pois a corrente entre os eletrodos de fonte e dreno era expressivamente maior do que a corrente entre fonte e porta, e deixou de operar na Semana 5, pois as ordens de grandeza das duas correntes foram as mesmas. Das medidas de $I \times V$ e das curvas de transferência, conclui-se que ele é um EGOFET, ou seja, que opera através do efeito de campo, pois não houve dopagem no canal. Os parâmetros calculados mostraram a degradação do transistor ao longo das semanas, sendo estáveis ciclo a ciclo, mas apresentando variações ao longo da semana, sendo que os parâmetros que não apresentaram uma variação expressiva foi a transcondutância, a tensão do limiar de operação e μC . Destes resultados, concluiu-se que a degradação do transistor foi causada principalmente pela degradação do DNTT e possivelmente pelo aumento das armadilhas na interface, e em menor escala pela interação do ar com o transistor e pelas armadilhas profundas presentes no DNTT.

CAPÍTULO 6

Trabalhos Futuros

Para os trabalhos futuros, sugere-se algumas linhas de pesquisa, listadas a seguir:

- Analisar as armadilhas presentes na interface entre o mel e o DNNT, através de medidas de espectroscopia de impedância e de condutividade termicamente estimulada (TSC, do inglês *thermally stimulated conductivity*).
- Investigar se há reação entre o mel e o DNNT, através das medidas de espectroscopia de infravermelho e Raman.
- Realizar medidas semanais repetindo o processo de limpeza com uma nova gota de mel sendo depositada a cada medida.
- Testar com outros tipos de méis.
- Testar o transistor com outros eletrólitos, como a água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. A. Fleming. **Instrument for converting alternating currents into continuous currents**; Depósito: 15/04/1905; Concessão: 20/03/1906.
- [2] L. De Forest. **Space telegraphy**; Depósito: 29/01/1907; Concessão: 18/02/1908.
- [3] L. De Forest. **Wireless telegraphy**; Depósito: 27/08/1906; Concessão: 15/01/1907.
- [4] J. E. Lilienfeld. **Method and apparatus for controlling currents**; Depósito: 10/08/1926; Concessão: 28/01/1930.
- [5] J. Bardeen; W. H. Brattain. **Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials**; Depósito: 17/06/1948; Concessão: 03/10/1950.
- [6] W. Shockley. **Semiconductor translating device**; Depósito: 27/04/1949; Concessão: 19/01/1954.
- [7] W. Shockley. **Circuit element utilizing semiconductive material**; Depósito: 26/06/1948; Concessão: 25/09/1951.
- [8] I. F. L Dias; M. A. T. da Silva. **Polímeros semicondutores**, 1ª edição, Ed. Livraria da Física, 2012.
- [9] White H. S., Kittlesen G. P., Wrighton M. S. **Chemical derivatization of an array of three gold microelectrodes with polypyrrole: fabrication of a molecule-based transistor**. J. Am. Chem. Soc, v. 106, p. 5375–5377, (1984).
- [10] Tsumura A.; Koezuka H.; Ando T. **Macromolecular electronic device: field-effect transistor with a polythiophene thin film**, Appl. Phys. Lett. 49, 1210, 1986. DOI: 10.1063/1.97417
- [11] E. A. de Moura; Ana C. de Paula; Adriano R. V. Benvenho; José P. M. Serbena; Keli F. Seidel. **Effects of a flexible ion gel as an active outer-layer when in contact with a metallic electrode**, Appl. Phys. A, 2022. DOI: 10.1007/s00339-022-05765-w
- [12] T. Meyers; F. A. Vidor; K. Brassat; J. K. N. Lindner; U. Hilleringmann. **Low-voltage DNTT-based thin-film transistors and inverters for flexible electronics**, Microelectronic Engineering, 2016. DOI: 10.1016/j.mee.2016.12.018

- [13] B. Wang; K. Y. Cheong; C.F. Huang; Feng Zhao. **Investigation of honey as the electrolyte gate dielectric of field effect transistors**, *Microsystem Technologies*, 2019. DOI: 10.1007/s00542-019-04717-4
- [14] A. S. Sharova; M. Caironi. **Sweet electronics: honey-gated complementary organic transistors and circuits operating in air**, *Advance Materials*, 2021. DOI: 10.1002/adma.202103183
- [15] K. F. Seidel. **Fabrication and electrical characterization of vertical electrolyte transistor**, *Current Applied Physics*, 2020. DOI: 10.1016/j.cap.2020.07.012
- [16] S. Cipolloni; L. Mariucci; A. Valletta; D. Simeone; F. De Angelis; G. Fortunato. **Aging effects and electrical stability in pentacene thin film transistors**, *Thin Solid Films*, 2007. DOI: 10.1016/j.tsf.2006.11.064
- [17] U. Bielecka; P. Lutsyk; K. Janus; J. Sworakowski; W. Bartkowiak. **Effect of solution aging on morphology and electrical characteristics of regioregular P3HT FETs fabricated by spin coating and spray coating**, *Organic Electronics*, 2011. DOI: 10.1016/j.orgel.2011.06.027
- [18] C.H. Kim. **Improved device ideality in aged organic transistors**, *Electronic Materials Letters*, 2019. DOI: 10.1007/s13391-018-00112-9
- [19] E. A. Moura. **Transistores Orgânicos Eletrolíticos em Arquitetura Planar e Vertical**. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- [20] M. H. Penteadó, **Transistores orgânicos de P3HT utilizando nanocelulose e líquido iônico ([EMIM][TFSI])**. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- [21] J. N. Patrzyk, **Análise dos efeitos do sal perclorato de lítio sobre o desempenho de transistores com porta eletrolítica à base de mel**. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.
- [22] Kao K.C.; Hwang W. **Electrical Transport in Solids**. Pergamon Press, Oxford (1981).
- [23] G. Horowitz. **Interfaces in organic field-effect transistors**, *Organic Electronics*, Berlin, Heidelberg: Springer, p. 113-153, 2009.
- [24] D. A. Bernardes; G. G. Malliaras. **Steady-state and transient behavior of organic electrochemical transistors**, *Advanced Functional Materials*, 2007. DOI: 10.1002/adfm.20061239

- [25] Q. H. Liang; B. P. Cao; Q. Xiao; D. Wei. **The application of graphene field-effect transistor biosensors in COVID-19 detection Technology: a review.** *Sensors*, 2023. DOI: 10.3390/s23248764
- [26] C. Scandurra; K. Björkström; M. Caputo; L. Sarcina; E. Genco; F. Modena; F. A. Viola; C. Brunetti; Z. M. Kovács-Vajna; C. Di Franco; L. Haeberle; P. Larizza; M. T. Mancini; R. Österbacka; W. Reeves; G. Scamarcio; M. Wheeler; M. Caironi; E. Cantatore; F. Torricelli; I. Esposito; E. Macchia; L. Torsi. **Analysis of clinical samples of pancreatic cyst's lesions with a multi-analyte bioelectronic Simot array benchmarked against ultrasensitive chemiluminescent immunoassay.** *Advanced Science*, 2024. DOI: 10.1002/advs.202308141
- [27] S. Casalini; F. Leonardi; T. Cramer; F. Biscarini. **Organic field-effect transistor for label-free dopamine sensing.** *Organic Electronics*, 2012. DOI: 10.1016/j.orgel.2012.10.027
- [28] Y. Wang; S. Cheng; C. Sun; T. Wang. **Organic thin film transistor for effective biomarker detection in early disease diagnosis.** *Chemosensors*, 2023. DOI: 10.3390/chemosensors11030202
- [29] I. Krauhausen; C. T. Coen; S. Spolaor; P. Gkoupidenis, Y. van de Burgt. **Brain-inspired organic electronics: merging neuromorphic computing and bioelectronic using conductive polymers.** *Advanced Functional Materials*, 2023. DOI: 10.1002/adfn.202307729
- [30] K. Chennit; N. Delavari; S. Mekhmoukhen; R. Boukraa; L. Fillaud; S. Zrig; N. Battaglini; B. Piro; V. Noël; I. Zozoulenko; G. Mattana. **Inkjet-printed, coplanar electrolyte-gated organic field-effect transistors on flexible substrates: fabrication, modeling, and applications in biodetection.** *Advanced Materials*, 2023. DOI: 10.1002/admt.202200300
- [31] Y. Park; L. Luo; M. Rolandi. **Integrating ion channels with bioelectronics for biotic-abiotic systems.** *Advanced Intelligent Systems*, 2023. DOI: 10.1002/aisy.202200312
- [32] J. Song; H. Liu; Z. Zhao; P. Lin; F. Yan. **Flexible organic transistors for biosensing: devices and applications.** *Advanced Materials*, 2023. DOI: 10.1002/adma.202300034
- [33] A. Savva; J. Saez; A. Withers; C. Barberio; V. Stoeger; S. Elias-Kirma; Z. Lu; C. M. Moysidou; K. Kallitsis; C. Pitsalidis; R. M. Owens. **3D organic bioelectronic for electrical monitoring of human adult stem cells.** *Material Horizons*, 2023. DOI: 10.1038/d3mh00785e
- [34] M. Stephen, A. Nawaz; S. Y. Lee, P. Sonar; W. L. Leong. **Biodegradable materials for transient organic transistors.** *Advanced Functional Materials*, 2023. DOI: 10.1002/adfm.202208521

- [35] M. H. L. O. Fung. **Transistor com porta eletrolítica utilizando méis de abelhas nativas do Brasil como eletrólito**. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.
- [36] D. H. Vieira; G. L. Nogueira; M. S. Ozório; J. D. Fernandes; K. F. Seidel. **A performance comparison between honey and water as electrolytic dielectrics for ZnO liquid-gated transistors**. Applied Physics A, 2023. DOI: 10.1007/s00339-023-06565-6
- [37] E. Y. Poimanova; E. G. Zavyalova; E. A. Kretova; A. A. Abramov; A. A. Trul; O. V. Borschev; A. K. Keshek; S. A. Ponomarenko; E. V. Agina. **Quantitative detection of the influenza a virus by an EGOFET-based portable device**. Chemosensors, 2023. DOI: 10.3390/chemosensors11080464
- [38] R. A. Picca; K. Manoli; E. Macchia; A. Tricase; C. Di Franco; G. Scamarcio; N. Cioffi; L. Torsi. **A study on the stability of water-gated organic field-effect transistors based on a comercial p-type polymers**. Frontiers in Chemistry, 2019. DOI: 10.3389/fchem.2019.00667
- [39] D. Li; E. J. Borkent; R. Nortrup; H. Moon; H. Katz; Z. Bao. **Humidity effect on electrical performance of organic thin-film transistors**. Applied Physics Letters, 2005. DOI: 10.1063/1.1852708
- [40] H. F. Haneef; A. M. Zeidell; O. D. Jurchescu. **Charge carrier traps in organic semiconductor: a review on the underlying physics and impact on electronic devices**. Journal of Materials Chemistry C, 2019. DOI: 10.1039/c9tc05695e
- [41] T. He; Y. Wu; G. D’Avino; E. Schimidt; M. Stolte; J. Cornil; D. Beljonne; P. P. Ruden; F. Würthner; D. Frisbie. **Crystal step edges can trap electrons on the surfaces of n-type organic semiconductors**. Nature Communications, 2018. DOI: 10.1038/s41467-018-04479-z
- [42] M. Parmeggiani; A. Verna; A. Ballesio; M. Cocuzza; E. Piatti; V. Fra; C. F. Pirri; S. L. Marasso. **P3HT processing study for in-liquid EGOFET biosensors: effects of the solvent and the surface**. Sensors, 2019. DOI: 10.3390/s19204497
- [43] E. A. Schafer; R. Wu; D. Meli; J. Tropp; M. Moser; I. McCulloch; B. D. Paulsen; J. Rivnay. **Sources and mechanism of degradation n p-type thiophene-based organic electrochemical transistors**. Applied Electronics Materials, 2022. DOI: 10.1021/acsaelm.1c01171
- [44] Ch. Pannemann; T. Diekmann; U. Hilleringmann. **Degradation of organic field-effect transistors made of pentacene**. Journals of Materials Research, 2004. DOI: 10.1557/JMR.2004.0267
- [45] Y. Tanaka; K. Yamamoto; Y. Noguchi; H. Ishii. **Degradation process in pentacene-based organic field-effect transistors evaluated by three-terminal capacitance-voltage measurements**. MRS Advances, 2017. DOI: 10.1557/adv.2017.225

- [46] M. R. Cavallari; V. R. Zanchin; M. A. Valle; J. E. E. Izquierdo; E. M Rodríguez; E. F. G. Rodríguez; M. A. Pereira-da-Silva; F. J. Fonseca. **On the performance degradation of poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors.** IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2015. DOI: 10.1109/TDMR.2015.2442239
- [47] K. Pentos; D. Łuczycka. **Dielectric properties of honey: the potential usability for quality assessment.** European Food Research and Technology, 2018. DOI: 10.1007/s00217-017-3011-2
- [48] G. V. Leite; E. A. Van Etten; M. M. C. Forte; H. Boudinov. **Degradation of current due to charge transport in top gated P3HT-PVA organic field effect transistors.** Synthetic Metals, 2017. DOI: 10.1016/j.synthmet.2017.05.002
- [49] N. K. Za'aba; D. M. Taylor. **Bias and related stress effects in organic thin film transistors based on dinaphtho [2,3-b:2',3'-f] thieno [3,2-b] thiophene (DNTT).** Organic Electronics, 2018. DOI: 10.1016/j.orgel.2018.08.031
- [50] M. R. Shijeesh; L. S. Vikas; M. K. Jayaraj; J. Puigdollers. **Degradation study and calculation of density-of-states in PTCDI-C8 channel layer from the Electrical characteristics thin-film transistors.** Journal of Applied Physics, 2014. DOI: 10.1063/1.4890023
- [51] D. B. A. Rep; A. F. Morpugo; W. G. Sloof; T. M. Klapwijk. **Mobile ionic impurities in organic semiconductor.** Journal of Applied Physics, 2003. DOI: 10.1063/1.1538338
- [52] P. A. Bobbert; A. Sharma; S. G. J. Mathijssen; M. Kemerink; D. M; de Leeuw. **Operational stability of organic field-effect transistors.** Advanced Materials, 2012. DOI: 10.1002/adma.201104580
- [53] H. Sirringhaus. **Reliability of organic field-effect transistors.** Advance Materials, 2009. DOI: 10.1002/adma.200901136
- [54] E. A. Schafer; R. Wu; D. Meli; J. Tropp; M. Moser; I. McCulloch; B. D. Paulsen; J. Rivnay. **Sources and mechanism of degradation in p-type thiophene based organic electrochemical transistors.** Applied Electronic Materials, 2022. DOI: 10.1021/acsaelm.1c01171

Anexo

1. Medida 1 – Dia 13.12.2023 – Semana 1

| Número do ciclo | I_{ON} (A) | I_{OFF} (A) | I_{ON}/I_{OFF} | V_T (V) | μC (F.cm ² /Vs) | g_M (S) |
|-----------------|------------------------|-------------------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| 1 | $-1,322 \cdot 10^{-4}$ | $-4,597 \cdot 10^{-11}$ | $2,876 \cdot 10^6$ | -1,023 | $5,645 \cdot 10^{-2}$ | $1,283 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | $-1,270 \cdot 10^{-4}$ | $-5,764 \cdot 10^{-11}$ | $2,204 \cdot 10^6$ | -0,915 | $5,156 \cdot 10^{-2}$ | $1,187 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | $-1,243 \cdot 10^{-4}$ | $-8,932 \cdot 10^{-10}$ | $1,391 \cdot 10^5$ | -0,927 | $5,324 \cdot 10^{-2}$ | $1,156 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | $-1,228 \cdot 10^{-4}$ | $-7,443 \cdot 10^{-10}$ | $1,650 \cdot 10^5$ | -0,922 | $5,145 \cdot 10^{-2}$ | $1,151 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | $-1,216 \cdot 10^{-4}$ | $-7,452 \cdot 10^{-10}$ | $1,632 \cdot 10^5$ | -0,931 | $5,145 \cdot 10^{-2}$ | $1,138 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | $-1,204 \cdot 10^{-4}$ | $-9,298 \cdot 10^{-10}$ | $1,294 \cdot 10^5$ | -0,932 | $5,134 \cdot 10^{-2}$ | $1,136 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | $-1,196 \cdot 10^{-4}$ | $-8,580 \cdot 10^{-10}$ | $1,394 \cdot 10^5$ | -0,942 | $5,223 \cdot 10^{-2}$ | $1,131 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | $-1,190 \cdot 10^{-4}$ | $-9,204 \cdot 10^{-10}$ | $1,293 \cdot 10^5$ | -0,943 | $5,123 \cdot 10^{-2}$ | $1,136 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | $-1,186 \cdot 10^{-4}$ | $-8,951 \cdot 10^{-10}$ | $1,326 \cdot 10^5$ | -0,933 | $4,838 \cdot 10^{-2}$ | $1,131 \cdot 10^{-4}$ |
| 10 | $-1,182 \cdot 10^{-4}$ | $-9,290 \cdot 10^{-10}$ | $1,272 \cdot 10^5$ | -0,946 | $4,936 \cdot 10^{-2}$ | $1,124 \cdot 10^{-4}$ |
| 11 | $-1,169 \cdot 10^{-4}$ | $-9,067 \cdot 10^{-11}$ | $1,290 \cdot 10^6$ | -0,951 | $4,903 \cdot 10^{-2}$ | $1,123 \cdot 10^{-4}$ |
| 12 | $-1,161 \cdot 10^{-4}$ | $-9,324 \cdot 10^{-10}$ | $1,245 \cdot 10^5$ | -0,956 | $4,980 \cdot 10^{-2}$ | $1,122 \cdot 10^{-4}$ |
| 13 | $-1,157 \cdot 10^{-4}$ | $-9,778 \cdot 10^{-10}$ | $1,183 \cdot 10^5$ | -0,953 | $4,785 \cdot 10^{-2}$ | $1,114 \cdot 10^{-4}$ |
| 14 | $-1,145 \cdot 10^{-4}$ | $-8,440 \cdot 10^{-10}$ | $1,357 \cdot 10^5$ | -0,963 | $4,871 \cdot 10^{-2}$ | $1,105 \cdot 10^{-4}$ |
| 15 | $-1,139 \cdot 10^{-4}$ | $-1,159 \cdot 10^{-11}$ | $9,833 \cdot 10^6$ | -0,960 | $4,785 \cdot 10^{-2}$ | $1,098 \cdot 10^{-4}$ |

2. Medida 2 – Dia 20.12.2023 – Semana 2

| Número do ciclo | I_{ON} (A) | I_{OFF} (A) | I_{ON}/I_{OFF} | V_T (V) | μC (F.cm ² /Vs) | g_M (S) |
|-----------------|------------------------|-------------------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| 1 | $-1,582 \cdot 10^{-4}$ | $-6,263 \cdot 10^{-10}$ | $2,526 \cdot 10^5$ | -1,185 | $8,597 \cdot 10^{-2}$ | $1,653 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | $-1,563 \cdot 10^{-4}$ | $-7,609 \cdot 10^{-11}$ | $2,054 \cdot 10^6$ | -1,122 | $7,839 \cdot 10^{-2}$ | $1,628 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | $-1,542 \cdot 10^{-4}$ | $-9,286 \cdot 10^{-10}$ | $1,660 \cdot 10^5$ | -1,122 | $8,143 \cdot 10^{-2}$ | $1,548 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | $-1,526 \cdot 10^{-4}$ | $-7,279 \cdot 10^{-10}$ | $2,096 \cdot 10^5$ | -1,122 | $8,060 \cdot 10^{-2}$ | $1,512 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | $-1,514 \cdot 10^{-4}$ | $-6,531 \cdot 10^{-10}$ | $2,318 \cdot 10^5$ | -1,107 | $7,866 \cdot 10^{-2}$ | $1,487 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | $-1,502 \cdot 10^{-4}$ | $-7,506 \cdot 10^{-10}$ | $2,001 \cdot 10^5$ | -1,109 | $7,689 \cdot 10^{-2}$ | $1,506 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | $-1,483 \cdot 10^{-4}$ | $-7,400 \cdot 10^{-10}$ | $2,004 \cdot 10^5$ | -1,114 | $7,743 \cdot 10^{-2}$ | $1,490 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | $-1,472 \cdot 10^{-4}$ | $-2,909 \cdot 10^{-10}$ | $5,061 \cdot 10^5$ | -1,108 | $7,580 \cdot 10^{-2}$ | $1,469 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | $-1,464 \cdot 10^{-4}$ | $-7,773 \cdot 10^{-10}$ | $1,884 \cdot 10^5$ | -1,113 | $7,716 \cdot 10^{-2}$ | $1,435 \cdot 10^{-4}$ |
| 10 | $-1,453 \cdot 10^{-4}$ | $-9,301 \cdot 10^{-10}$ | $1,563 \cdot 10^5$ | -1,103 | $7,076 \cdot 10^{-2}$ | $1,448 \cdot 10^{-4}$ |
| 11 | $-1,442 \cdot 10^{-4}$ | $-9,347 \cdot 10^{-10}$ | $1,543 \cdot 10^5$ | -1,103 | $7,260 \cdot 10^{-2}$ | $1,437 \cdot 10^{-4}$ |
| 12 | $-1,424 \cdot 10^{-4}$ | $-9,746 \cdot 10^{-10}$ | $1,461 \cdot 10^5$ | -1,106 | $6,908 \cdot 10^{-2}$ | $1,422 \cdot 10^{-4}$ |
| 13 | $-1,416 \cdot 10^{-4}$ | $-1,411 \cdot 10^{-11}$ | $1,003 \cdot 10^7$ | -1,104 | $6,921 \cdot 10^{-2}$ | $1,397 \cdot 10^{-4}$ |
| 14 | $-1,406 \cdot 10^{-4}$ | $-6,813 \cdot 10^{-10}$ | $2,063 \cdot 10^5$ | -1,112 | $7,089 \cdot 10^{-2}$ | $1,387 \cdot 10^{-4}$ |
| 15 | $-1,395 \cdot 10^{-4}$ | $-1,992 \cdot 10^{-11}$ | $7,000 \cdot 10^6$ | -1,096 | $6,552 \cdot 10^{-2}$ | $1,386 \cdot 10^{-4}$ |

3. Medida 3 – Dia 27.12.2023 – Semana 3

| Número do ciclo | I_{ON} (A) | I_{OFF} (A) | I_{ON}/I_{OFF} | V_T (V) | μC (F.cm ² /Vs) | g_M (S) |
|-----------------|------------------------|-------------------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| 1 | $-1,474 \cdot 10^{-4}$ | $-7,181 \cdot 10^{-11}$ | $2,052 \cdot 10^6$ | -1,249 | $8,199 \cdot 10^{-2}$ | $1,679 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | $-1,489 \cdot 10^{-4}$ | $-9,884 \cdot 10^{-9}$ | $1,507 \cdot 10^4$ | -1,184 | $7,675 \cdot 10^{-2}$ | $1,638 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | $-1,437 \cdot 10^{-4}$ | $-9,828 \cdot 10^{-9}$ | $1,462 \cdot 10^4$ | -1,192 | $8,004 \cdot 10^{-2}$ | $1,636 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | $-1,425 \cdot 10^{-4}$ | $-9,713 \cdot 10^{-9}$ | $1,468 \cdot 10^4$ | -1,194 | $7,894 \cdot 10^{-2}$ | $1,649 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | $-1,406 \cdot 10^{-4}$ | $-9,590 \cdot 10^{-9}$ | $1,466 \cdot 10^4$ | -1,201 | $8,018 \cdot 10^{-2}$ | $1,641 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | $-1,391 \cdot 10^{-4}$ | $-9,837 \cdot 10^{-9}$ | $1,414 \cdot 10^4$ | -1,208 | $7,976 \cdot 10^{-2}$ | $1,616 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | $-1,366 \cdot 10^{-4}$ | $-9,700 \cdot 10^{-9}$ | $1,408 \cdot 10^4$ | -1,211 | $7,935 \cdot 10^{-2}$ | $1,596 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | $-1,348 \cdot 10^{-4}$ | $-9,579 \cdot 10^{-9}$ | $1,407 \cdot 10^4$ | -1,214 | $7,976 \cdot 10^{-2}$ | $1,606 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | $-1,336 \cdot 10^{-4}$ | $-9,668 \cdot 10^{-9}$ | $1,382 \cdot 10^4$ | -1,215 | $7,798 \cdot 10^{-2}$ | $1,620 \cdot 10^{-4}$ |
| 10 | $-1,324 \cdot 10^{-4}$ | $-9,658 \cdot 10^{-9}$ | $1,371 \cdot 10^4$ | -1,218 | $7,729 \cdot 10^{-2}$ | $1,608 \cdot 10^{-4}$ |
| 11 | $-1,310 \cdot 10^{-4}$ | $-9,796 \cdot 10^{-9}$ | $1,341 \cdot 10^4$ | -1,218 | $7,621 \cdot 10^{-2}$ | $1,598 \cdot 10^{-4}$ |
| 12 | $-1,304 \cdot 10^{-4}$ | $-7,125 \cdot 10^{-9}$ | $1,831 \cdot 10^4$ | -1,226 | $7,729 \cdot 10^{-2}$ | $1,598 \cdot 10^{-4}$ |
| 13 | $-1,288 \cdot 10^{-4}$ | $-9,822 \cdot 10^{-9}$ | $1,311 \cdot 10^4$ | -1,228 | $7,648 \cdot 10^{-2}$ | $1,596 \cdot 10^{-4}$ |
| 14 | $-1,277 \cdot 10^{-4}$ | $-9,839 \cdot 10^{-9}$ | $1,298 \cdot 10^4$ | -1,230 | $7,661 \cdot 10^{-2}$ | $1,549 \cdot 10^{-4}$ |
| 15 | $-1,266 \cdot 10^{-4}$ | $-9,762 \cdot 10^{-9}$ | $1,296 \cdot 10^4$ | -1,234 | $7,594 \cdot 10^{-2}$ | $1,547 \cdot 10^{-4}$ |

4. Medida 4 – Dia 03.01.2024 – Semana 4

| Número do ciclo | I_{ON} (A) | I_{OFF} (A) | I_{ON}/I_{OFF} | V_T (V) | μC (F.cm ² /Vs) | g_M (S) |
|-----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-----------|---------------------------------|-----------------------|
| 1 | $-1,352 \cdot 10^{-4}$ | $-9,631 \cdot 10^{-9}$ | $1,404 \cdot 10^4$ | -0,552 | $2,535 \cdot 10^{-2}$ | $1,335 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | $-1,357 \cdot 10^{-4}$ | $-9,982 \cdot 10^{-9}$ | $1,359 \cdot 10^4$ | -0,893 | $4,480 \cdot 10^{-2}$ | $1,487 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | $-1,340 \cdot 10^{-4}$ | $-9,967 \cdot 10^{-9}$ | $1,344 \cdot 10^4$ | -0,940 | $4,731 \cdot 10^{-2}$ | $1,494 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | $-1,316 \cdot 10^{-4}$ | $-9,695 \cdot 10^{-9}$ | $1,358 \cdot 10^4$ | -0,905 | $4,925 \cdot 10^{-2}$ | $1,685 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | $-1,294 \cdot 10^{-4}$ | $-9,870 \cdot 10^{-9}$ | $1,311 \cdot 10^4$ | -0,986 | $4,914 \cdot 10^{-2}$ | $1,451 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | $-1,276 \cdot 10^{-4}$ | $-9,626 \cdot 10^{-9}$ | $1,325 \cdot 10^4$ | -0,996 | $4,990 \cdot 10^{-2}$ | $1,466 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | $-1,264 \cdot 10^{-4}$ | $-9,693 \cdot 10^{-9}$ | $1,304 \cdot 10^4$ | -1,018 | $5,189 \cdot 10^{-2}$ | $1,437 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | $-1,251 \cdot 10^{-4}$ | $-9,665 \cdot 10^{-9}$ | $1,295 \cdot 10^4$ | -1,021 | $5,101 \cdot 10^{-2}$ | $1,410 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | $-1,244 \cdot 10^{-4}$ | $-9,899 \cdot 10^{-9}$ | $1,257 \cdot 10^4$ | -1,009 | $4,914 \cdot 10^{-2}$ | $1,392 \cdot 10^{-4}$ |
| 10 | $-1,233 \cdot 10^{-4}$ | $-9,668 \cdot 10^{-9}$ | $1,275 \cdot 10^4$ | -1,011 | $4,795 \cdot 10^{-2}$ | $1,384 \cdot 10^{-4}$ |
| 11 | $-1,226 \cdot 10^{-4}$ | $-9,654 \cdot 10^{-9}$ | $1,270 \cdot 10^4$ | -1,031 | $4,980 \cdot 10^{-2}$ | $1,381 \cdot 10^{-4}$ |
| 12 | $-1,221 \cdot 10^{-4}$ | $-9,647 \cdot 10^{-9}$ | $1,266 \cdot 10^4$ | -1,029 | $4,947 \cdot 10^{-2}$ | $1,366 \cdot 10^{-4}$ |
| 13 | $-1,217 \cdot 10^{-4}$ | $-9,979 \cdot 10^{-9}$ | $1,220 \cdot 10^4$ | -1,032 | $4,947 \cdot 10^{-2}$ | $1,355 \cdot 10^{-4}$ |
| 14 | $-1,214 \cdot 10^{-4}$ | $-9,663 \cdot 10^{-9}$ | $1,256 \cdot 10^4$ | -1,001 | $4,583 \cdot 10^{-2}$ | $1,330 \cdot 10^{-4}$ |
| 15 | $-1,207 \cdot 10^{-4}$ | $-9,940 \cdot 10^{-9}$ | $1,215 \cdot 10^4$ | -1,013 | $4,636 \cdot 10^{-2}$ | $1,333 \cdot 10^{-4}$ |

5. Medida 5 – Dia 10.01.2024 – Semana 5

Na 5ª medida, o transistor parou de funcionar, por isso os parâmetros não foram calculados.

Apêndice

Originalmente, o plano de trabalho de título **Desenvolvimento de Transistor Orgânico Vertical de Porta Eletrolítica de Efeito de Campo Baseado no Polímero Polibitiofeno**, teria como objetivo desenvolver um transistor vertical de efeito de campo baseado no polímero polibitiofeno (PBT), que foi sintetizado eletroquimicamente, atuando como semicondutor do canal, e em um filme fino de nanofios de prata (AgNW, do inglês *silver nanowire*), atuando como eletrodo permeável de dreno.

No plano de trabalho inicial a arquitetura desenvolvida está esquematizada na figura abaixo (fora de escala), onde o óxido de estanho dopado com índio (ITO, do inglês *indium tin oxide*) é configurado como eletrodo fonte, os AgNW como eletrodo dreno, o ouro (Au) como eletrodo porta, o PBT como o canal semicondutor e gel iônico como o dielétrico da porta.

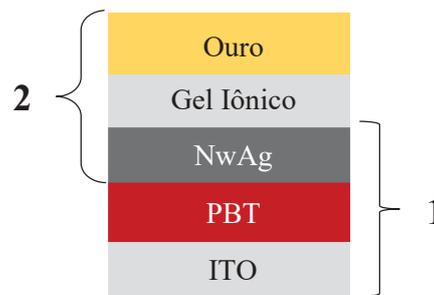


Figura 1: Esquema do transistor em arquitetura vertical com PBT.

A hipótese inicial do funcionamento deste transistor é que as variações ocorridas no campo elétrico produzido na região 2 seriam capazes de influenciar o campo elétrico da região 1, ou seja, a corrente que passa pelo canal semicondutor seria controlada pela diferença de potencial entre porta e dreno, fazendo com que fosse observado experimentalmente uma modulação da corrente nas curvas de transferência e de saída do dispositivo.

Porém, a principal dificuldade encontrada na montagem do dispositivo foi a deposição do eletrodo permeável, que necessita cumprir dois requisitos: ser permeável à passagem do campo elétrico e permitir a passagem da corrente entre as regiões 1 e 2 do transistor. Para que um transistor esteja operante, ele precisa ser capaz de modular a corrente e a diferença entre a corrente entre a fonte e dreno (I_{DS}) precisa ser maior do que a corrente que escapa pela porta (I_{GS}).

A primeira técnica testada foi a deposição por aerografia, que consiste em depositar a solução dos nanofios sobre o filme de PBT através de um aerógrafo, como mostrado na Figura 2.

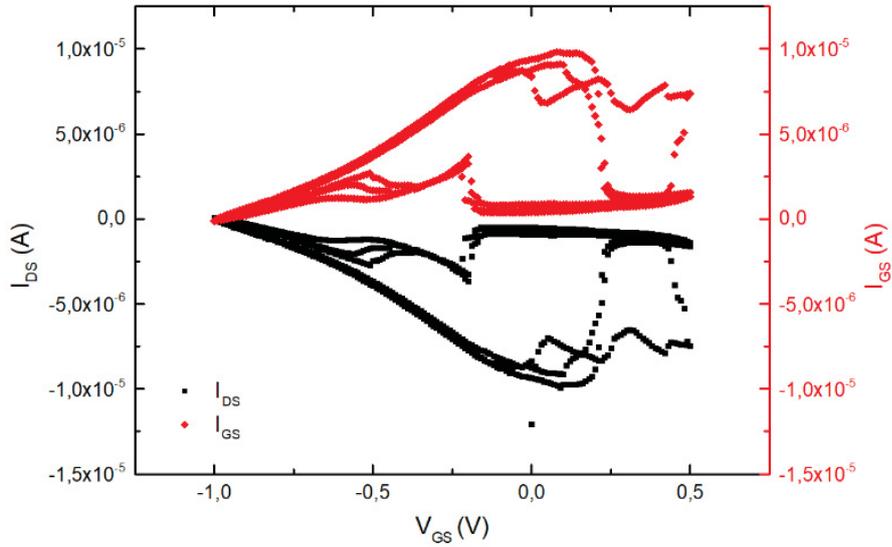


Figura 2: Curvas de transferência do transistor em arquitetura vertical com PBT.

Como pode ser visto na figura 2, as curvas são simétricas e isso indica que não houve modulação na corrente do transistor, além das ordens de grandeza entre I_{DS} e I_{GS} serem as mesmas, logo ele não funcionou. Vários testes com esse tipo de deposição foram feitos, com todos os resultados obtidos sendo similares a este.

Vendo que essa técnica não era adequada, ela foi substituída pela técnica de gotejamento (que consiste em pingar a solução dos AgNW na área desejada) em duas configurações: (i) deposição da dispersão dos nanofios sobre o filme de PBT; (ii) deposição da dispersão dos nanofios diretamente sobre o gel. Com isso, os resultados obtidos estão apresentados na figura abaixo.

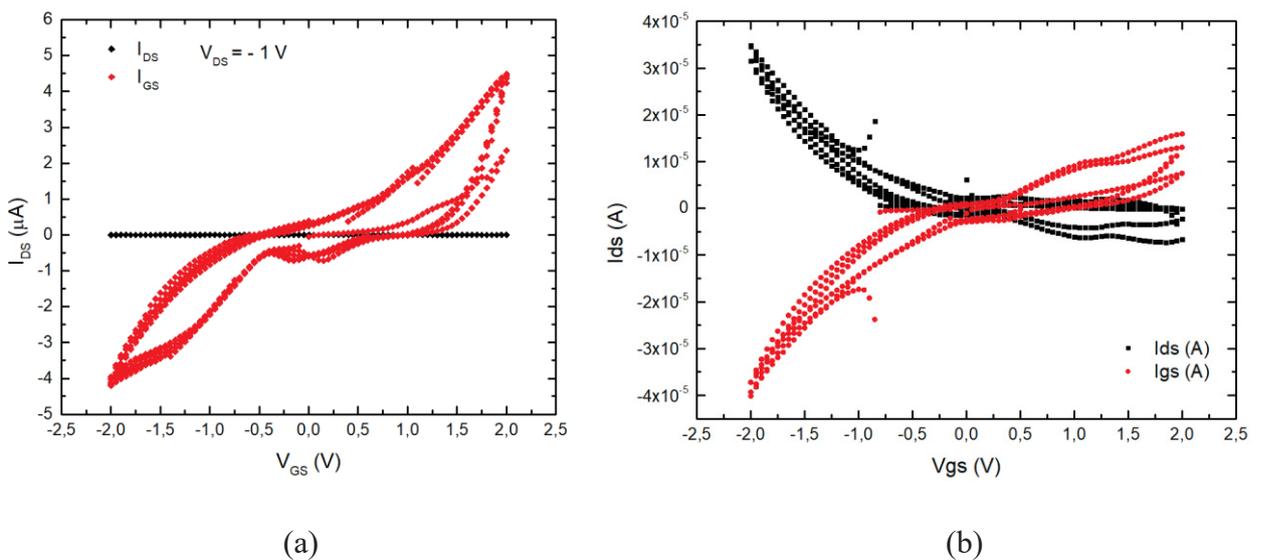


Figura 3: Curvas de transferência do transistor em arquitetura vertical com PBT: (a) deposição do AgNW sobre o filme de PBT; (b) deposição do AgNW diretamente sobre o gel.

Neste caso, I_{GS} prevalece sobre I_{DS} , e novamente o transistor também não está operante. Esse comportamento se repetiu de maneira similar em todas as outras tentativas feitas, que também resultaram em curvas simétricas, não funcionando. Sendo assim, como nenhum resultado positivo foi obtido e o prazo de conclusão do mestrado estava chegando ao fim, foi feita a opção pela mudança do projeto de pesquisa.