

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E ASTRONOMIA**

**HÉLIO JOSÉ LUCAS JUNIOR**

**DEPENDÊNCIA DA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE  
TRANSISTORES COM PORTA ELETROLÍTICA COM O TEMPO DE  
VARREDURA DAS MEDIDAS ELÉTRICAS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2023**

**HÉLIO JOSÉ LUCAS JUNIOR**

**DEPENDÊNCIA DA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE  
TRANSISTORES COM PORTA ELETROLÍTICA COM O TEMPO  
DE VARREDURA DAS MEDIDAS ELÉTRICAS**

**Parameter extraction from electrolyte-gated transistors dependent on  
the electrical characterization sweep time**

Dissertação apresentado(a) como requisito para obtenção do título(grau) de Mestre em Física, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Profa. Dra. Keli Fabiana Seidel

Coorientador(a): Prof. Dr. José Pedro Mansueto Serbena

**CURITIBA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



HELIO JOSE LUCAS JUNIOR

**DEPENDÊNCIA DA EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSISTORES COM PORTA ELETROLÍTICA COM O TEMPO DE VARREDURA DAS MEDIDAS ELÉTRICAS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Física .

Data de aprovação: 28 de Fevereiro de 2023

Dra. Keli Fabiana Seidel, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Celso De Araujo Duarte, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Douglas Jose Coutinho, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 24/03/2023.

Dedico esse trabalho ao meu fiel parceiro de aulas *online*, Zeca, que nos deixou a um mês da minha defesa. Sentirei pra sempre sua falta.

Você foi muito mais que um Pet.

## AGRADECIMENTOS

O sonho de realizar um mestrado não teria deixado de ser um sonho sem a ajuda de diversas pessoas e instituições às quais presto minha homenagem. Certamente não atenderei a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já, peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Primeiramente aos meus pais, Sueli Lucas e Hélio Lucas, pelo carinho, incentivo, e total apoio e todos os momentos da minha vida.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. José Serbena, ao Grupo de Dispositivos Optoeletrônicos Orgânicos (GOOD) da Universidade Federal do Paraná e seus demais membros, os quais me disponibilizaram espaço, materiais e suporte técnico ao longo da minha pesquisa.

Os membros da banca examinadora, Dr. Celso de Araújo Duarte, Dr. Douglas Jose Coutinho e Dr. Jeferson Ferreira de Deus, pelo tempo e dedicação disponibilizados à correção deste trabalho.

A minha colega do grupo de pesquisa, Raquel Bettega, pela paciência em me ajudar com o  $\text{\LaTeX}$  durante a escrita dessa dissertação.

Aos meus colegas de pós-graduação, Marcos Luginieski e Maria de Oliveira, pelo apoio, principalmente enquanto era novo no laboratório. E ainda ao Marcos pelas simulações realizadas que foram analisadas neste trabalho.

A minha colega, Jessika Patrzyk, que esteve presente ao longo de toda a trajetória, dividindo laboratório, cursando disciplinas e ficando horas e mais horas em reuniões discutindo resultados.

A minha orientadora, Profa. Dra. Keli Seidel, que me guiou ao longo dessa jornada, mostrando caminhos, falhas, acertos, depositando confiança e fazendo todo o possível para que a pesquisa fosse concluída.

Um agradecimento especial eu devo a minha esposa, Nathalia de Oliveira, que nunca me deixou desistir, acreditou no meu sonho e na minha capacidade mais do que eu mesmo. Sem ela essa jornada não teria sido possível.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

"O mundo não é um grande arco-íris, é um lugar sujo, é um lugar cruel que não quer saber o quanto você é durão, vai botar você de joelhos e você vai ficar de joelhos para sempre se você deixar. Você, eu, ninguém vai bater tão duro como a vida, mas não se trata de bater duro. Se trata de quanto você aguenta apanhar e seguir em frente, o quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando, é assim que se consegue vencer."

Rocky Balboa, 2006.

## RESUMO

LUCAS JR, Hélio José. **Dependência da extração de parâmetros de transistores com porta eletrolítica com o tempo de varredura das medidas elétricas.** 2023. 77 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2023.

Os transistores com porta eletrolítica (EGTs, do inglês *Electrolyte-Gated Transistors*) compõem uma classe de dispositivos que opera com alta densidade de corrente elétrica sob aplicação de uma baixa tensão, resultando em uma alta transcondutância. Dependendo da faixa de tensão aplicada na porta, sua modulação ocorre devido ao efeito de campo, sendo nomeado como EGOFET (do inglês *Electrolyte-Gated Organic Field-Effect Transistors*), ou devido à corrente iônica de íons difundidos para o canal, como ocorre nos chamados OECT (sigla do inglês, *Organic Electrochemical Transistors*). Independentemente do seu modo de operação, é importante certificar-se de que os dados coletados sejam realizados no estado estacionário para haver estabilidade durante as medidas, boa reprodutibilidade e informação sobre regime de operação do EGT. A literatura científica atual tem apresentado inúmeras publicações sobre EGTs, assim como sua aplicação como sensores. Porém, muitas destas referências carecem de informações sobre reprodutibilidade e estabilidade dos dados coletados durante as medidas, sendo este o foco de exploração deste trabalho até o presente momento. No presente estudo, foi utilizada uma estrutura de EGT, a qual foi exposta a uma grande variedade de medidas elétricas para testar: transição entre os modos de operação (de EGOFET para OECT); estabilidade ao longo dos ciclos de operação para a curva de transferência; coleta de dados com diferentes intervalos de tempo de varredura na curva de transferência; e ajuste com modelo Luginieski-Seidel. O EGT desenvolvido possui a seguinte estrutura: eletrodos interdigitados de óxido de índio-estanho (ITO) os quais formam os eletrodos fonte e dreno; poli(3-hexiltiofeno-2,5diil) (P3HT) como semicondutor do canal; um gel iônico poli(fluoreto de vinilideno-co-hexafluoropropileno) (P(VDF-HFP)) e 1-etil-3-metilimidazólio bis(trifluoro-metilsulfonil) imida ([EMIM][TFSI]) como o filme dielétrico eletrolítico e uma folha de ouro (Au) para compor o eletrodo porta.

**Palavras-chave:** Transistores. EGOFET. OECT. Tempo de varredura.

## ABSTRACT

LUCAS JR, Hélio José. **Electrolyte-Gated Transistors: parameters extraction dependent on the sweep time of electrical measurements**. 2023. 77 p. Dissertation (Master's Degree in Physics) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2023.

Electrolyte-gated transistors (EGTs) compose a class of devices that operate with a high density of electric current under the application of a low voltage, resulting in a high transconductance. Depending on the voltage range applied to the gate, its modulation occurs due to the field effect, being named as EGOFET (Electrolyte-Gated Organic Field-Effect Transistors), or due to the ionic current of ions diffused into the channel, as occurs in the so-called OECT (Organic Electrochemical Transistors). Regardless of its operation mode, it is important to make sure that the collected data were performed in the steady state in order to have stability during the measurements, good reproducibility of the collected data and information about the EGT operating regime. The current scientific literature has presented numerous publications on EGTs, as well as their application as sensors. However, many of these references lack information on the reproducibility and stability of the data collected during the measurements, which is the exploration focus of this work so far. In the present study, an EGT structure was used, which was exposed to a vast electrical characterization to test: transition between operating modes (from EGOFET to OECT); stability over operating cycles for the transfer curve; data collection with different scan time intervals on the transfer curve; and experimental fit with model Luginieski-Seidel. The studied EGT has the following structure: interdigitated indium tin oxide (ITO) electrodes which form the source and drain electrodes; poly(3-hexylthiophene-2,5diyl) (P3HT) as channel semiconductor; an ionic gel poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (P(VDF-HFP)) and 1-ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoro-methylsulfonyl) imide ([EMIM][TFSI]) as the electrolytic dielectric film and a gold foil (Au) to compose the gate electrode.

**Keywords:** Transistor. EGOFET. OECT. Scan time.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Representação da arquitetura de um EGT com eletrodo porta no topo, bem como a ilustração de seus modos de operação como: (a) EGOFET e (b) OECT.	16
Figura 2 –	Comparação entre intensidades de corrente elétrica na curva de transferência e saída, respectivamente. Destacados com um círculo vermelho, pontos em comum para ambos os gráficos com mesmo valor de tensão $V_{DS}$ e $V_G$ .	18
Figura 3 –	Simulações de curvas de transferência e saída utilizando o modelo dos FETs	18
Figura 4 –	Esquema mostrando os parâmetros $W$ e $L$ .	21
Figura 5 –	Esquema de aplicação das tensões $V_G$ e $V_{DS}$ no transistor, na configuração com eletrodo fonte aterrado	22
Figura 6 –	Ilustração do passo a passo de montagem do dispositivo.	26
Figura 7 –	Dispositivo após serem feitas todas as deposições e preparado para caracterização elétrica.	27
Figura 8 –	Estrutura molecular do polímero poli(3-hexiltiofeno-2,5diil) P3HT.	28
Figura 9 –	Estrutura química do polímero poli(fluoreto de vinilideno-co-hexafluoropropileno) (P(VDF-HFP)) utilizado para compor o gel iônico.	29
Figura 10 –	Estrutura química do líquido iônico usado no preparo do gel iônico: 1-etil-3-metilimidazólio bis(trifluoro-metilsulfonil) imida ([EMI][TfSA]).	29
Figura 11 –	Gel iônico: (a) após ser depositado sobre lâmina de vidro; (b) curvado com pinças para demonstrar sua consistência.	29
Figura 12 –	(a) Análise da condução elétrica ao longo do gel iônico para a estrutura não usual de dispositivo: ITO/Gel iônico/ITO. Sequência de curvas $I - V$ simples, para EGOFETs (b) e OECTs (c) sob as seguintes estruturas: ITO/P3HT/ITO (símbolos pretos); ITO/P3HT+gel iônico/ITO antes de aplicar tensão no eletrodo porta (símbolos vermelhos); ITO/P3HT+gel iônico/ITO após aplicar tensão no eletrodo porta de até $-0,5$ V (símbolos azuis) e apenas para (c) ITO/P3HT+gel iônico/ITO após aplicar tensão no eletrodo porta de até $-1,0$ V (símbolos em magenta).	34
Figura 13 –	Dispositivo-A operando em regime de EGOFET, curvas de transferência (a), (c), (e) e (g) e curvas de saída (b), (d), (f) e (h) para tempos de varredura de 150, 250, 350 e 450 ms.	36
Figura 14 –	Dispositivo-A operando em regime de EGOFET. (a) curva $I - V$ simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 150 ms; (c) 250 ms; (d) 350 ms; (e) 450 ms.	38
Figura 15 –	Dispositivo-B operando em regime de EGOFET, curvas de transferência (a), (c), (e) e (g) e curvas de saída (b), (d), (f) e (h) para tempos de varredura de 450, 350, 250 e 150 ms.	40
Figura 16 –	Dispositivo-B operando em regime de EGOFET. (a) curva $I - V$ simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 450 ms; (c) 350 ms; (d) 250 ms; (e) 150 ms.	42

Figura 17 – Dispositivo-C operando em regime de OECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 150, 450 e 1000 ms. . . . .	44
Figura 18 – Dispositivo-C operando em regime de OECT. (a) curva $I - V$ simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 150 ms; (c) 450 ms; (d) 1000 ms. . . . .	45
Figura 19 – Dispositivo-D operando em regime de OECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 1000, 450 e 150 ms. . . . .	46
Figura 20 – Dispositivo-D operando em regime de OECT. (a) curva $I - V$ simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 1000 ms; (c) 450 ms; (d) 150 ms. . . . .	47
Figura 21 – Dispositivo-E operando em regime de OECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 1000, 450 e 150 ms. . . . .	50
Figura 22 – Dispositivo-E operando em regime de OECT. (a) curva $I - V$ simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 1000 ms; (c) 450 ms; (d) 150 ms. . . . .	51
Figura 23 – Dispositivo-F operando em regime de OECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 150, 450 e 1000 ms. . . . .	52
Figura 24 – Dispositivo-F operando em regime de OECT. (a) curva $I - V$ simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 150 ms; (c) 450 ms; (d) 1000 ms. . . . .	53
Figura 25 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-A, operando como EGOFET, com tempo de varredura de 150 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva de transferência. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de $ V_{DS} $ ; (e) espessura da camada de acumulação em função de $ V_{DS} $ ; (f) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de $ V_{DS} $ . . . . .	55
Figura 26 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-A, operando como EGOFET, com tempo de varredura de 150 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva saída. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de $ V_{DS} $ ; (e) espessura da camada de acumulação em função de $ V_{DS} $ ; (f) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de $ V_{DS} $ . . . . .	58

<p>Figura 27 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-C, operando como OECT, com tempo de varredura de 150 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva de saída. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de <math> V_{DS} </math>; (e) espessura da camada de acumulação em função de <math> V_{DS} </math>; (f) e (g) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de <math> V_{DS} </math>. . . . .</p>	60
<p>Figura 28 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-C, operando como OECT, com tempo de varredura de 1000 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva saída. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de <math> V_{DS} </math>; (e) espessura da camada de acumulação em função de <math> V_{DS} </math>; (f), (g) e (h) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de <math> V_{DS} </math>. . . . .</p>	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET referentes ao primeiro ciclo de varredura da curva de transferência. . . . .	39
Tabela 2 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-B operando em regime de EGOFET referentes ao primeiro ciclo de varredura. . . . .	41
Tabela 3 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-C operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura. . . . .	45
Tabela 4 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-D operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura. . . . .	48
Tabela 5 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-E operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura. . . . .	49
Tabela 6 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-F operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura. . . . .	51
Tabela 7 – Valores de $\alpha$ e $\mu_{sat}$ extraídos da curva de transferência (CT) e da curva de saída (CS) para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET. . . . .	59
Tabela 8 – Valores de $\alpha$ e $\mu_{sat}$ extraídos da curva de transferência (CT) através do modelo de OFET e da curva de saída (CS) através do modelo LS, para o Dispositivo-C operando em regime de OECT. . . . .	61
Tabela 9 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET para todos os ciclos de operação. . . . .	69
Tabela 10 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-B operando em regime de EGOFET para todos os ciclos de operação. . . . .	69
Tabela 11 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-C operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação. . . . .	70
Tabela 12 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-D operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação. . . . .	70
Tabela 13 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-E operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação. . . . .	70
Tabela 14 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-F operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação. . . . .	71
Tabela 15 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões. . . . .	72
Tabela 16 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-B operando em regime de EGOFET para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões. . . . .	73
Tabela 17 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-C operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões. . . . .	74
Tabela 18 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-D operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões. . . . .	75
Tabela 19 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-E operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões. . . . .	76
Tabela 20 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-F operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões. . . . .	77

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### SIGLAS

EGOFET	<i>Electrolyte-gated organic field-effect transistor</i>
EGT	<i>Electrolyte-gated transistor</i>
EMIM:TFSI	1-etil-3-metilimidazólio bis(trifluoro-metilsulfonil) imida
FET	<i>Field-effect transistor</i>
ITO	Óxido de índio-estanho
LS	Lugineski-Seidel
OECT	<i>Organic eletrochemical transistor</i>
OFET	<i>Organic field-effect transistor</i>
OTFT	<i>Organic thin-film transistors</i>
P3HT	poli(3-hexiltiofeno-2,5diil)
P(VDF-HFP)	poli(floureto de vinilideno-co-hexafluoropropileno)
UV	Ultravioleta
VIS	Visível

## LISTA DE SÍMBOLOS

### LETRAS LATINAS

$C_i$	Capacitância por unidade de área	[F/cm <sup>2</sup> ]
$D$	Espessura do semiconductor	[nm]
$D_c$	Espessura mínima do filme para ocorrer percolação	[nm]
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico	[V/m]
$g_{m,lin}$	Transcondutância no regime linear	[S]
$g_{m,sat}$	Transcondutância no regime de saturação	[S]
$I_{DS,lin}$	Corrente entre fonte e dreno no regime linear	[A]
$I_{DS,sat}$	Corrente entre fonte e dreno no regime de saturação	[A]
$I_{GS}$	Corrente de fuga	[A]
$I_{ON}$	Corrente no estado ligado	[A]
$I_{OFF}$	Corrente no estado desligado	[A]
$l$	Espessura da camada de acumulação	[nm]
$L$	Comprimento do canal	[m]
$q$	Carga elétrica	[C]
$S$	<i>Subthreshold swing</i>	[mV/dec]
$SS$	<i>Subthreshold slope</i>	[dec/mV]
$T$	Temperatura	[K]
$T_c$	Temperatura característica da distribuição de armadilhas rasas	[K]
$V_{DS}$	Tensão entre fonte e dreno	[V]
$V_G$	Tensão na porta	[V]
$V_T$	Tensão de <i>threshold</i>	[V]
$W$	Largura do canal	[m]

### LETRAS GREGAS

$\alpha$	Parâmetro referente à percolação	[adimensional]
$\gamma$	Parâmetro referente à profundidade das armadilhas rasas	[adimensional]
$\delta$	Desvio padrão	[adimensional]
$\kappa$	Constante dielétrica do semiconductor (múltiplo de $\epsilon_0$ )	[C <sup>2</sup> /Nm <sup>2</sup> ]
$\mu_{eff}$	Mobilidade efetiva	[cm <sup>2</sup> /Vs]
$\mu_{lin}$	Mobilidade linear	[cm <sup>2</sup> /Vs]
$\mu_{sat}$	Mobilidade de saturação	[cm <sup>2</sup> /Vs]
$\tau$	Tempo de varredura	[ms]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO . . . . .	17
1.2	OBJETIVOS . . . . .	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>20</b>
2.1	MODELO PARA TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO . . . . .	20
2.2	TEORIA LUGINIESKI-SEIDEL - MODELO DE TRANSPORTE DE PORTADORES DE CARGA EM TRANSISTORES COM PORTA ELETROLÍTICA . . . . .	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>26</b>
3.1	PARÂMETROS DO DISPOSITIVO . . . . .	27
3.2	PREPARAÇÃO E DEPOSIÇÃO DO P3HT . . . . .	28
3.3	PREPARAÇÃO E DEPOSIÇÃO DO GEL IÔNICO . . . . .	28
3.4	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA . . . . .	29
3.5	EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS . . . . .	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	<b>33</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA OPERANDO COMO EGOFET . . . . .	35
4.2	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA OPERANDO COMO OECT . . . . .	43
4.3	AJUSTES COM MODELO LS . . . . .	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE A – TABELAS COM PARÂMETROS EXTRAÍDOS PARA TODOS OS DISPOSITIVOS</b> . . . . .	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a invenção do transistor em 1947 por W. B. Shockley, J. Bardeen e W. H. Brattain e a devida apresentação do seu princípio de funcionamento [1] essa categoria de dispositivo eletrônico sofreu diversas alterações em sua estrutura e arquitetura ao longo dos anos para seu aprimoramento. Dentre estas variações, existe a classe de transistores com porta eletrolítica (do inglês, *Electrolyte-Gated Transistors* (EGT)), desenvolvida em 1984 por M. S. Wrighton e seus colegas usando um semicondutor permeável a íons orgânicos [2]. Esta é a classe de transistores utilizada neste trabalho, sendo nosso objeto de estudo.

Os EGTs são uma categoria de dispositivos que operam com baixa tensão e possuem uma alta densidade de corrente, resultando assim em uma alta transcondutância. Isso se torna possível devido à alta capacitância proveniente dos eletrólitos utilizados como dielétrico que podem chegar a uma ordem de dezenas de  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ , no caso de dielétricos eletrolíticos tais como géis iônicos [3]. Tais dispositivos trazem o benefício de compatibilidade com a eletrônica impressa [4] podendo ser aplicados na indústria têxtil [5]. Estes, ainda são compatíveis com eletrólitos a base de celulose, o biopolímero mais abundante na natureza, tornando-os ecologicamente corretos e de baixo custo [6].

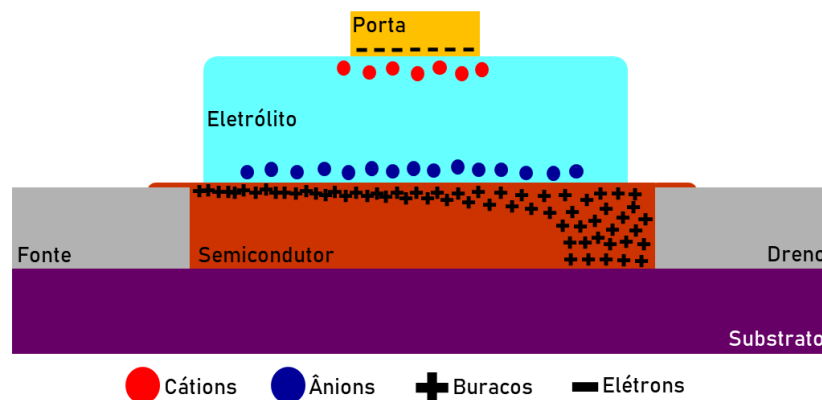
De modo geral, os EGTs são amplamente utilizados como sensores e biossensores por três motivos principais: (i) a vasta quantidade de polímeros orgânicos que podem ser utilizados como semicondutor; (ii) por possuírem uma porta eletrolítica, esse tipo de dispositivo pode ser inserido em meio aquoso [7]; (iii) possuem uma grande quantidade de parâmetros extraídos a partir de sua caracterização elétrica, sendo alguns deles: mobilidade, limiar de tensão de operação (tensão de *threshold*), razão *ON/OFF* e tensão de sub-limiar (*subthreshold slope*) [8].

É possível separar os EGTs em duas categorias de transistores, devido aos seus diferentes modos de operação: os transistores de efeito de campo orgânicos com porta eletrolítica, EGOFETs (do inglês, *Electrolyte-Gated Organic Field-Effect Transistors*), quando a transcondutância ocorre devido ao efeito de campo gerado pelo eletrodo porta e transistores eletroquímicos orgânicos, OECTs (do inglês, *Organic Electrochemical Transistors*), quando a transcondutância é decorrente da dopagem iônica do semicondutor, devido aos íons que difundiram para o canal semicondutor. Portanto, essa distinção é feita pela diferença no processo de modulação na corrente elétrica que, em um caso ocorre por efeito de campo e no outro por dopagem iônica que resulta em um processo eletroquímico.

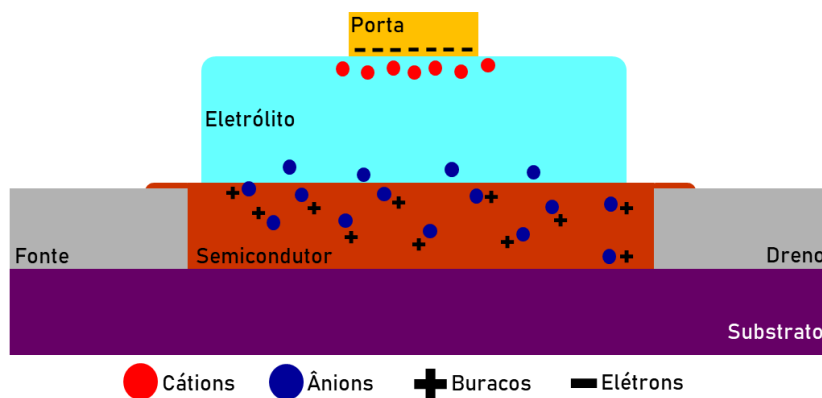


Na Figura 1, temos uma representação da arquitetura, do modo de operação e modulação em cada tipo de EGT. Enquanto operando como EGOFET, os íons no eletrólito são parcialmente polarizados devido à aplicação da tensão na porta, podendo se movimentar dentro do eletrólito. No caso da Figura 1(a), cátions se acumulam próximo à interface com a porta devido à aplicação de uma tensão negativa. Sob esta configura elétrica, ânions se acumulam na interface dielétrico/semicondutor fazendo então com que lacunas (portadores de carga positiva) sejam induzidas nesta interface do semicondutor, formando uma região chamada de camada de acumulação [9]. A polarização dos íons no eletrólito faz com que um campo elétrico apareça na interface entre porta e dielétrico e outro na interface dielétrico semicondutor, a intensidade do campo elétrico varia com a tensão aplicada na porta e com isso ocorre a modulação da intensidade da corrente elétrica que flui entre fonte e dreno.

**Figura 1 – Representação da arquitetura de um EGT com eletrodo porta no topo, bem como a ilustração de seus modos de operação como: (a) EGOFET e (b) OECT.**



**(a) Dispositivo operando em regime de EGOFET ilustrado com densidade de carga não homogenia no canal.**



**(b) Dispositivo operando em regime de OECT ilustrando íons que difundiram para o canal.**

Fonte: O autor.

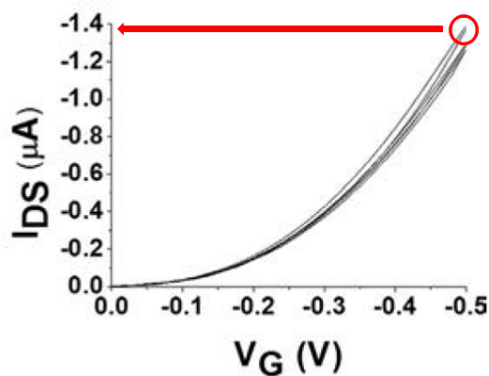
Dependendo da intensidade do campo elétrico gerado pelo eletrodo porta no eletrólito, íons podem atravessar a barreira eletrólito/semicondutor, sendo que a intensidade do campo elétrico necessária para haver difusão depende de propriedades morfológicas desta interface. Quando íons difundem para dentro do semicondutor, como representado na Figura 1(b), o transistor possui modulação da corrente elétrica devido a dopagem ou desdopagem iônica no semicondutor e não mais por efeito de campo. Dizemos então que o dispositivo está operando no regime de OECT. Tanto os EGOFETs quanto os OECTs possuem vasta aplicação na área de sensores [10, 11], com finalidades de sensoriamento em aplicações biológicas [12, 13] e também clínicas [14].

## 1.1 MOTIVAÇÃO

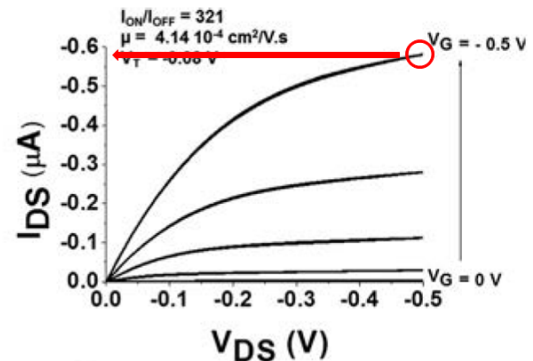
A literatura científica atual tem apresentado inúmeras publicações sobre EGTs, assim como sua aplicação como sensores. Porém, muitas destas referências carecem de informações sobre reprodutibilidade e estabilidade dos dados coletados durante as medidas, antes mesmo de serem aplicados como sensores, trazendo pouca confiabilidade na quantização como sensor, sendo este um dos focos de exploração. Ao se analisar curvas de transferência e de saída para um mesmo dispositivo, seja EGOFET ou OECT, muitas vezes não é possível observar uma correspondência entre os valores de corrente elétrica em ambas as curvas, sob a mesma faixa de tensão. Na Figura 2(a) e Figura 2(b), tomando o círculo vermelho como objeto de análise, vemos que na curva de transferência a corrente é de aproximadamente  $-1,4 \mu\text{A}$  e na curva de saída a intensidade é de aproximadamente  $-0,6 \mu\text{A}$ . Neste caso, as tensões aplicadas no dreno e na porta são de  $|0,5| \text{ V}$  nos pontos circulados em vermelho, e mesmo assim as correntes não possuem valores iguais. Um questionamento prudente a ser feito é, por que isso acontece? Este tipo de comparação de curvas será enfatizado nos estudos.

Na Figura 3(a) e 3(b), são apresentadas simulações para a curva de transferência e para a curva de saída geradas a partir do modelo dos OFETs, este é o modelo frequentemente utilizado para extração dos parâmetros do dispositivo. Tal modelo está descrito em detalhes no capítulo 2. Para a simulação foram utilizados os mesmos parâmetros para gerar ambas as curvas, cujos valores são similares ao do dispositivo produzido nesta dissertação. Por se tratar de uma simulação, uma situação idealizada, verificamos nos gráficos que as intensidades da corrente elétrica coincidem em ambas as curvas para  $V_{DS} = 1,0 \text{ V}$  e  $V_G = 0,5 \text{ V}$ , chegando a aproximadamente  $5,0 \mu\text{A}$ .

Figura 2 – Comparação entre intensidades de corrente elétrica na curva de transferência e saída, respectivamente. Destacados com um círculo vermelho, pontos em comum para ambos os gráficos com mesmo valor de tensão  $V_{DS}$  e  $V_G$ .



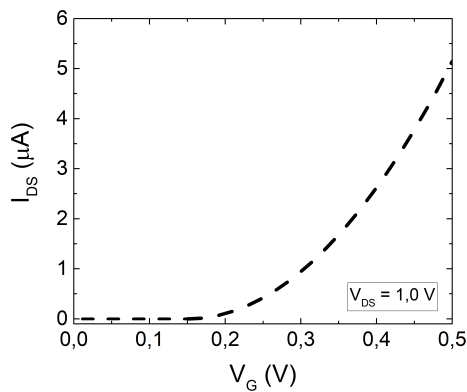
(a) Curva de transferência para  $V_{DS} = -0,5$  V.



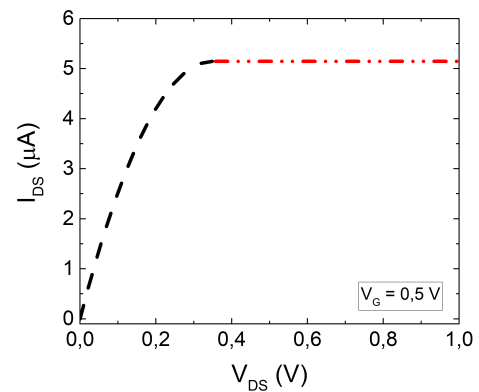
(b) Curva de saída.

Fonte: Adaptada de [15].

Figura 3 – Simulações de curvas de transferência e saída utilizando o modelo dos FETs



(a) Curva de transferência



(b) Curva de saída

Fonte: O autor.

Assim, a principal motivação de estudo é compreender a incoerência entre intensidades ilustradas na Figura 2, e esta investigação será baseada na exploração de diferentes tempos de varredura nas medidas elétricas do transistor. Com isso, espera-se ser possível compreender se a medida está sendo coletada no estado estacionário, ou ainda, se o tempo de varredura não é mais curto do que o tempo de transiente da corrente iônica. Tais dependências serão analisadas para os transistores operando em regime de EGOFET e OECT. Para uma análise quantitativa, são extraídos parâmetros macroscópicos como razão  $ON/OFF$ , tensão de *threshold*, mobilidade de saturação, *subthreshold swing* e transcondutância máxima de saturação a partir do modelo utilizado para os FETs. Também faz parte da motivação utilizar o modelo Luginieski-Seidel (LS)

para os EGTs [16] que nos fornece parâmetros microscópicos como: a espessura mínima do filme semiconductor para formação de caminhos de percolação; se o transporte percolativo se dá de forma 2D ou 3D; informação referente à profundidade das armadilhas e o comportamento do campo elétrico na interface dielétrico/semiconductor.

## 1.2 OBJETIVOS

Compreender a discrepância entre a curva de transferência e saída exemplificada na Figura 2, para auxiliar nessa compreensão foram criadas algumas estratégias de estudo e dentre as quais estão os objetivos específicos listados a seguir:

- Analisar a estabilidade de dispositivos operando em regime EGOFET e OECT ao longo de ciclos de operação durante a curva de transferência.
- Realizar a caracterização elétrica com diferentes tempos de varredura na curva de transferência, afim de verificar se há dependência dos parâmetros extraídos com o tempo de varredura.
- Extrair os parâmetros razão *ON/OFF*, tensão de *threshold*, mobilidade de saturação, transcondutância máxima e *subthreshold swing* a partir do modelo tradicional para os FETs para uma análise quantitativa referente no item anterior.
- Realizar ajustes com base no modelo LS e comparar parâmetros extraídos a partir do modelo tradicional para FETs.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MODELO PARA TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO

A literatura científica da área de EGTs já propôs alguns modelos específicos para esta classe de transistores, principalmente modelos que analisam o transiente entre modos de operação [17, 18, 19, 20]. Quando os EGTs operam por efeito de campo, é comum utilizar modelos propostos para descrever o transporte de carga em outros tipos de transistores que são modulados por efeito de campo. Um exemplo, é o caso do tradicional modelo para os OFETs [21], proposto inicialmente para MOSFETs e adaptado para FETs e OFETs principalmente em trabalhos desenvolvidos por G. Horowitz [21]. Deste modelo é possível extrair parâmetros macroscópicos de transistores que operam por efeito de campo. Neste, o modo de operação do transistor é dividido em dois regimes: linear (ou acumulação) e saturação. O regime linear é definido dentro da validade dada pela equação (1) e o regime de saturação pela equação (2). Ambos os regimes podem ser observados na curva de saída da Figura 3(b), onde a curva com símbolos tracejados pretos descreve o regime linear e a curva vermelha com símbolo tracejado com ponto mostra o regime de saturação.

$$V_{DS} < V_G - V_T \quad (1)$$

$$V_{DS} \geq V_G - V_T \quad (2)$$

onde  $V_{DS}$  é a tensão aplicada entre fonte e dreno,  $V_G$  é a tensão aplicada entre fonte e porta e  $V_T$  é a tensão de *threshold* que é a tensão mínima necessária para o transistor começar a operar no regime de acumulação.

Para obtenção das equações da corrente elétrica entre fonte e dreno em função da tensão, precisamos levar em consideração a carga induzida pela aplicação da tensão na porta [21],

$$dq = -C_i [V_G - V_T - V(x)] W dx \quad (3)$$

onde  $C_i$  é a capacitância por unidade de área e  $W$  corresponde à largura do canal. Fazendo então a derivada temporal de  $q$  e aplicando a regra da cadeia obtemos a corrente entre fonte e dreno  $I_{DS}$

$$I_{DS} = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

por fim, inserindo a equação (3) na equação (4) e reorganizando como em [22] temos:

$$I_{DS} dx = WC_i \mu [V_G - V_T - V(x)] dV \quad (5)$$

onde  $\mu$  é a mobilidade dos portadores de carga.

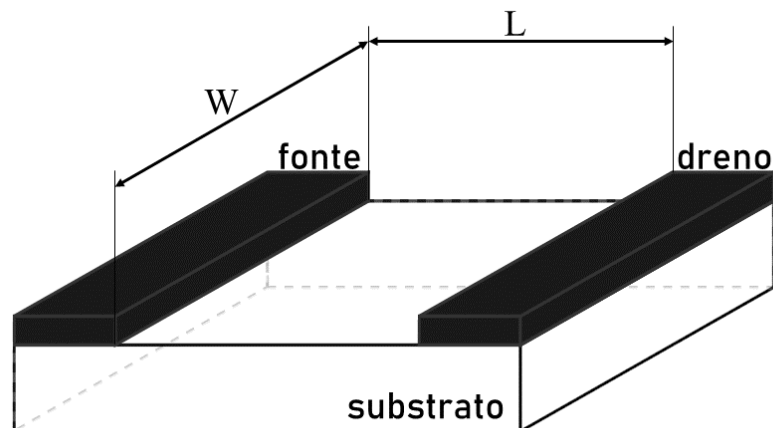
Integrando a equação (5) e aplicando os limites válidos para a região linear (1) e região de saturação (2), obtemos as equações (6) e (7)

$$I_{DS,lin} = \frac{W}{L} C_i \mu_{lin} \left( V_G - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \quad (6)$$

$$I_{DS,sat} = \frac{W}{2L} C_i \mu_{sat} (V_G - V_T)^2 \quad (7)$$

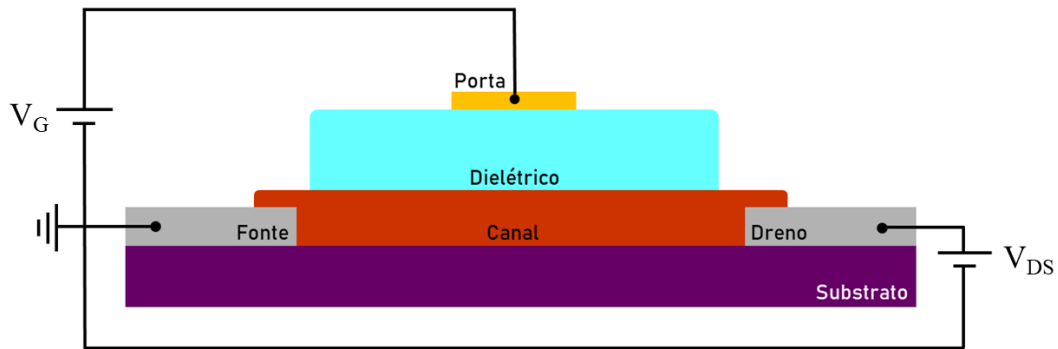
onde  $L$  corresponde ao comprimento do canal (Figura 4). A mobilidade linear dos portadores de carga  $\mu_{lin}$  e, a mobilidade no regime de saturação  $\mu_{sat}$  são definidas como a razão entre velocidade média dos portadores de carga e o campo elétrico responsável pelo movimento dos portadores. Ambas as mobilidades são consideradas parâmetros constantes na sua forma apresentada no momento. A Figura 5 mostra um esquema da configuração para efetuar a caracterização elétrica. Nesta figura as tensões aplicadas referem-se a um transistor do tipo-n operando em regime de acumulação (ou transistor tipo-p operando em regime de depleção).

**Figura 4 – Esquema mostrando os parâmetros  $W$  e  $L$ .**



**Fonte: Adaptada de [21].**

**Figura 5 – Esquema de aplicação das tensões  $V_G$  e  $V_{DS}$  no transistor, na configuração com eletrodo fonte aterrado**



**Fonte: O autor.**

Temos ainda uma dependência com  $V_T$  (tensão de *threshold*), enquanto  $V_G < V_T$ , o dispositivo está operando apenas para preencher essas armadilhas, quando  $V_G = V_T$  todas as armadilhas foram preenchidas e quando  $V_G > V_T$  temos então o acúmulo de portadores de carga no canal do dispositivo [23]. Como existem duas tensões independentes sendo aplicadas no dispositivo, é possível obter-se duas curvas típicas de corrente-tensão para a caracterização elétrica do transistor. Uma delas, nomeada como curva de saída (ou curva característica), mantemos  $V_G$  constante e geramos um gráfico de  $I_{DS} \times V_{DS}$  para vários valores diferentes de  $V_G$ . Já na segunda, a curva de transferência,  $V_{DS}$  é mantido constante e a o gráfico plotado é de  $I_{DS} \times V_G$ .

As equações (6) e (7) são as premissas para extração dos valores de mobilidade. O método mais utilizado para extração deste parâmetro faz uso da curva de transferência no regime de saturação, equação (7). Com o objetivo de linearizar a parte quadrática que envolve as tensões  $V_G$  e  $V_T$  é gerada uma nova curva, agora da raiz quadrada de  $I_{DS,sat}$  por  $V_G$

$$\sqrt{|I_{DS,sat}|} = \sqrt{\frac{W}{2L} C_i \mu_{sat} (V_G - V_T)} \quad (8)$$

e isolando o termo  $\mu_{sat}$  na equação (8), obtemos uma equação para a mobilidade de saturação [24]:

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{WC_i} \left( \frac{\partial \sqrt{|I_{DS,sat}|}}{\partial V_G} \right)^2 \quad (9)$$

A utilização desse método considera que a mobilidade de saturação é um parâmetro constante. Porém, vale ressaltar que no regime de saturação a densidade de portadores de carga varia ao longo do canal, fazendo então com que o valor extraído se trate de um valor médio para a

mobilidade entre fonte e dreno. Outro parâmetro possível de se extrair é a transcondutância, que é definida como a taxa de variação da corrente entre fonte e dreno em relação à tensão aplicada na porta, sendo as transcondutâncias dos regimes de saturação e linear dadas por [25]

$$g_{m,sat} = \frac{\partial I_{DS,sat}}{\partial V_G} \quad (10)$$

$$g_{m,lin} = \frac{\partial I_{DS,lin}}{\partial V_G} \quad (11)$$

aplicando a derivada parcial e reescrevendo a equação (11) obtemos a equação para a mobilidade linear [24] que pode ser vantagem em algumas situações, pois ela é mais uniforme ao longo do comprimento do canal.

$$\mu_{lin} = \frac{L}{WC_i V_{DS}} \left( \frac{\partial I_{DS,lin}}{\partial V_G} \right) \quad (12)$$

Os parâmetros macroscópicos referentes ao modelo descrito acima podem ser extraídos para quantificar os dispositivos. O método para extração dos parâmetros que serão extraídos dos EGTs no presente trabalho, será descrito na seção 3.5.

## 2.2 TEORIA LUGINIESKI-SEIDEL - MODELO DE TRANSPORTE DE PORTADORES DE CARGA EM TRANSISTORES COM PORTA ELETROLÍTICA

Como já mencionado na seção 2.1, a literatura científica da área apresenta alguns modelos desenvolvidos especificamente para analisar o transporte de portadores de carga em EGTs. De modo geral, os modelos são específicos para serem aplicados em EGOFETs [21] ou OECTs [17, 18, 19]. Para a extração de parâmetros macroscópicos, capazes de trazer uma análise quantitativa e qualitativa, ainda há uma falta de um modelo geral para EGTs.

Em 2022, uma proposta de modelo de transporte de portadores de carga que pode ser aplicado para ambos modos de operação, como EGOFETs e OECTs [16, 26], foi tema de dissertação de mestrado no Programa de pós-graduação em Física e Astronomia (PPGFA-UTFPR) pelo discente Marcos Luginieski [16]. Deste modelo, aqui nomeado como modelo LS (Luginieski-Seidel), é possível extrair grandezas macroscópicas bem como fazer algumas análises microscópicas como será descrito logo a seguir.

No tradicional modelo descrito na seção 2.1, a geometria do transistor é levada em consideração na equação do transporte de carga e, dentre os parâmetros utilizados estão a largura,



comprimento e espessura do filme semiconductor que forma o canal. Um dos pontos chave para o modelo LS é, quantificar no modelo o fato de que a espessura da camada de acumulação ( $l$ ) não se estende necessariamente ao longo de toda a espessura do semiconductor ( $D$ ). A camada de acumulação é formada pelas cargas induzidas no canal devido à tensão aplicada no eletrodo porta formando uma espessura  $l$  onde, efetivamente, ocorre o transporte de carga. Estas se concentram próximas a interface semiconductor/eletrolito podendo, ou não, se estender ao longo de toda a espessura do canal ( $D$ ). Assim, segundo o modelo LS [26], a espessura da camada de acumulação é dada por:

$$l(x) = \begin{cases} \left( \frac{V_{tr}}{V_G - V_T - V(x)} \right) D, & V(x) < V_{sat} - V_{tr}, \\ D, & V(x) \geq V_{sat} - V_{tr}, \end{cases} \quad (13)$$

onde ( $l(x)$ ) é uma função de  $V(x)$  e a coordenada  $x$  se estende ao longo do canal entre fonte e dreno;  $V_{sat} \equiv V_G - V_T$ ;  $V_{tr} \equiv 4\epsilon kT_c / eC_i D$ ;  $\epsilon$  é a constante dielétrica do semiconductor;  $C_i$  é a capacitância por unidade de área do dielétrico/eletrolito e  $T_c$  é a temperatura característica da distribuição da armadilha.  $T_c$  pode ser descrito como a profundidade energética de armadilhas rasas, referente a uma distribuição exponencial de armadilhas [16, 26].

Outra análise proposta no modelo LS foi a dependência da mobilidade efetiva com a espessura  $l$ , junto ainda a parâmetros microscópicos tais como: parâmetro de percolação ( $\alpha$ ), fornece a relação com a dimensão do caminho de percolação que o transporte da carga ocorre;  $D_c$  é a espessura mínima da camada de acumulação necessária para estabelecer um caminho de percolação entre a fonte e o dreno;  $\gamma$  é a profundidade energética da distribuição exponencial de armadilhas. Usualmente este parâmetro é escrito como  $\gamma = T_c/T$ , onde  $T$  é a temperatura.

Da análise proposta no modelo para a mobilidade efetiva ( $\mu_{eff}$ ) no EGT, o qual é um dos parâmetros típicos a serem extraídos transistores, conclui-se que  $\mu_{eff}$  não é necessariamente um parâmetro constante como descrito no modelo da seção 2.1. Dependendo da espessura da camada de acumulação, a mobilidade pode apresentar os seguintes comportamentos [16, 26]:

$$\mu_{eff}(l_x) = \mu_{sat} \left[ \frac{(l - D_c)}{D} \right]^\alpha \left( \frac{l}{D} \right)^{-(\gamma-1)}, \quad D_c < l \leq D. \quad (14)$$

onde  $\alpha$  é o parâmetro referente ao tipo de caminho de percolação em que o transporte de carga ocorre no canal, sendo: (i)  $1,00 \leq \alpha \leq 1,49$  considerado transporte de percolação do tipo 2D e, (ii)  $1,50 \leq \alpha \leq 2,00$  considerado transporte de percolação do tipo 3D [16, 26]. O parâmetro  $\mu_{sat}$  é a mobilidade de efeito de campo no regime de saturação, aqui definida como uma constante

$\mu_{\text{eff}} = \mu_{\text{sat}}$  quando  $l = D \gg D_c$ . Assim, quando  $V(x) > V_{\text{sat}} - V_{\text{tr}}$ , a mobilidade efetiva possui um valor constante dado por:

$$\mu_{\text{eff}}(l = D) = \mu_{\text{sat}} \left( \frac{D - D_c}{D} \right)^\alpha. \quad (15)$$

Sob estas condições descritas acima, é possível analisar o comportamento da corrente fluindo no canal dada pela mesma expressão apresentada na seção 2.1. No presente caso, não se considera necessariamente a mobilidade efetiva como um parâmetro constante, mas sim de acordo com as equações (14) e (15) com limites descritos acima:

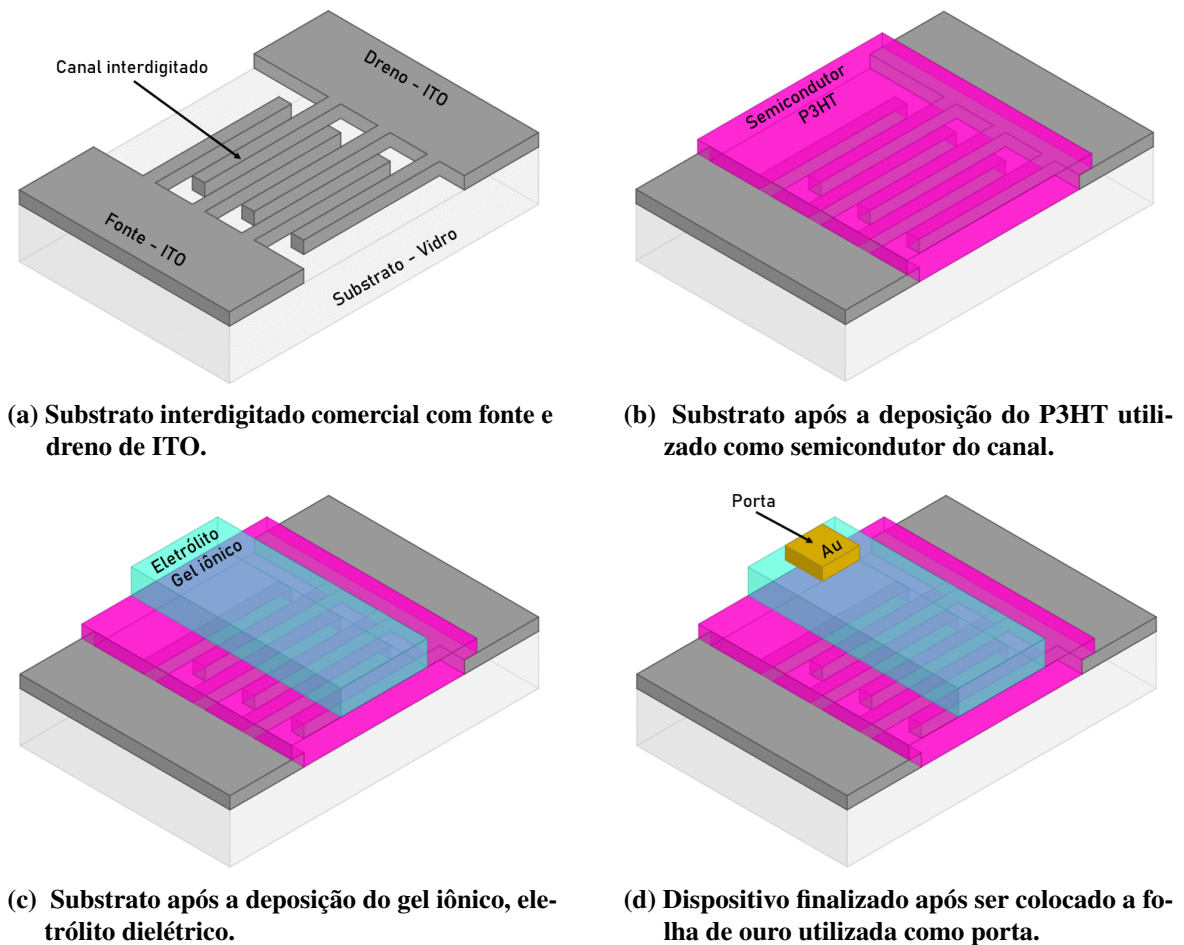
$$I_{DS} = \frac{WC_i}{L} \int_0^{V_{DS}} \mu_{\text{eff}}(l) [V_G - V_T - V(x)] dV. \quad (16)$$

A equação (16) pode ser calculada em função de  $V_{DS}$  ou  $V_G$  a fim de compor a curva de saída ou de transferência, respectivamente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, foi utilizada uma estrutura de EGT já conhecida [27], a qual foi exposta a uma vasta caracterização elétrica para testar: a transição entre os modos de operação (de EGOFET para OECT); estabilidade ao longo dos ciclos de operação para a curva de transferência; coleta de dados com diferentes intervalos de tempo de varredura na curva de transferência. O EGT desenvolvido possui a seguinte estrutura: eletrodos interdigitados de óxido de índio-estanho (ITO) os quais formam os eletrodos fonte e dreno; poli(3-hexiltiofeno-2,5diil) (P3HT) como semicondutor do canal, tal substância já está bem estabelecida como camada ativa em transistores orgânicos de filme fino (OTFTs, do inglês *organic thin-film transistors*) para aplicação como biossensor [20]; um gel iônico composto por poli(fluoreto de vinilideno-co-hexafluoropropileno) (P(VDF-HFP)) e 1-etil-3-metilimidazólio bis(trifluoro-metilsulfonil) imida ([EMIM][TFSI]) como o filme dielétrico eletrolítico; uma folha de ouro (Au) para compor o eletrodo porta.

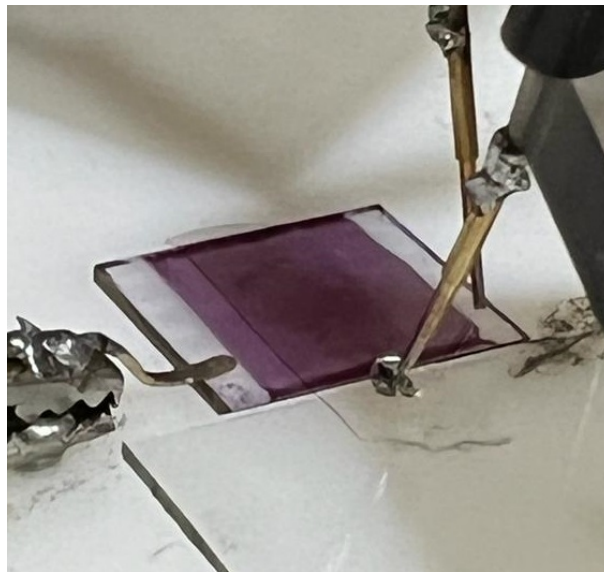
**Figura 6 – Ilustração do passo a passo de montagem do dispositivo.**



Fonte: O autor.

A Figura 6 mostra o passo a passo do processo de deposição e montagem do dispositivo. Primeiramente é feita a deposição do P3HT sobre o substrato interdigitado representado na Figura 6(a), para que os eletrodos fonte e dreno fiquem expostos possibilitando a ligação no equipamento de medida é feita uma limpeza removendo o filme de P3HT cuidadosamente com tolueno sobre a região dos eletrodos sem deixar o solvente atingir a região do canal, o resultado é parecido com o ilustrado na Figura 6(b). O próximo passo é realizar a deposição do gel iônico, o qual não pode ficar em contato com os eletrodos fonte e dreno, Figura 6(c). Por fim é colocada a folha de ouro sobre o dielétrico que será o contato da porta, Figura 6(d). Cada substrato possui 5 dispositivos independentes, estes dispositivos independentes foram nomeados nesse trabalho de contato e foram numerados de 1 a 5, sendo sempre o 1 o mais próximo da porta e o 5 o mais distante. A deposição do P3HT é feita sobre todos eles e o gel sobre todos os canais. É utilizada apenas uma folha de ouro como porta posicionada de modo que não fique sobre nenhum eletrodo afim de evitar que o contato elétrico não crie curto-circuito entre a porta e o ITO. Na Figura 7 temos uma foto do dispositivo pronto para caracterização elétrica.

**Figura 7 – Dispositivo após serem feitas todas as deposições e preparado para caracterização elétrica.**



**Fonte: O autor.**

### 3.1 PARÂMETROS DO DISPOSITIVO

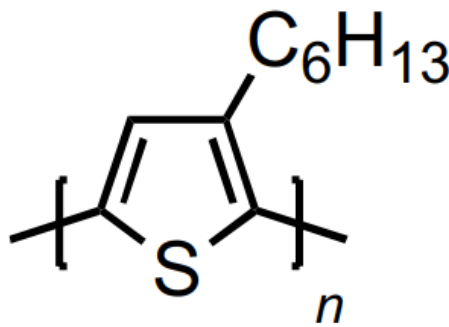
O dispositivo produzido utiliza um substrato comercial interdigitado de ITO fornecido pela *Kintec Company* que possui largura total e comprimento de canal de 30 mm e 50  $\mu\text{m}$ , respectivamente. No caso do substrato interdigitado a largura é determinada somando as larguras

individuais entre os interdigitados, basicamente é como se fossem 5 canais, cada um com largura de 6 mm. O gel iônico possui uma capacitância por unidade de área de  $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ , esta capacitância não foi determinada neste trabalho pois seu valor já é conhecido na literatura [28].

### 3.2 PREPARAÇÃO E DEPOSIÇÃO DO P3HT

O P3HT é preparado com concentração de 7,0 mg/mL em tolueno e colocado para agitação por 40 min a  $60^\circ\text{C}$ . Utilizamos uma deposição dinâmica de  $100 \mu\text{L}$  diretamente sobre o substrato, com auxílio de *spin-coating*, inicialmente em rotação a 600 rpm por 10 s e na sequência por mais 50 s a 1500 rpm, assim obtemos um filme sobre o substrato. Após a deposição a amostra é levada ao forno com vácuo para um processo de *annealing* a  $100^\circ\text{C}$  por 30 min.

**Figura 8 – Estrutura molecular do polímero poli(3-hexiltiofeno-2,5diil) P3HT.**

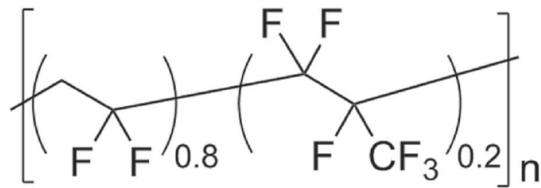


Fonte: [7]

### 3.3 PREPARAÇÃO E DEPOSIÇÃO DO GEL IÔNICO

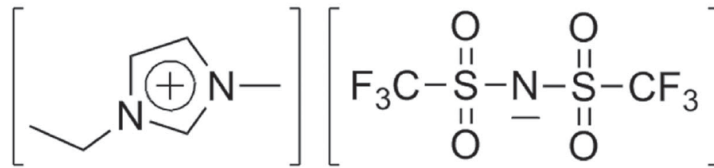
O gel iônico é composto de três substâncias, polímero (Figura 9), líquido iônico (Figura 10) e acetona, em proporção de massa 1:4:7, respectivamente. Após misturadas as substâncias é levado para agitação por 40 min com aquecimento à temperatura de  $40^\circ\text{C}$  para que o polímero se dissolva por completo. A deposição do gel é feita por *drop casting* em uma lâmina de vidro utilizando um volume de  $130 \mu\text{L}$  de solução e ocupando uma área de  $1,0 \times 1,5 \text{ cm}^2$ . Após depositado é deixado por 30 min em temperatura ambiente para que o excesso de acetona evapore deixando a solução com aspecto gelatinoso. Na Figura 11(a) podemos ver o aspecto do gel após ser depositado e na Figura 11(b) a sua consistência no momento da deposição sobre o dispositivo. O gel é transferido para o dispositivo apenas no momento de realização das medidas.

**Figura 9 – Estrutura química do polímero poli(fluoreto de vinilideno-co-hexafluoropropileno) (P(VDF-HFP)) utilizado para compor o gel iônico.**



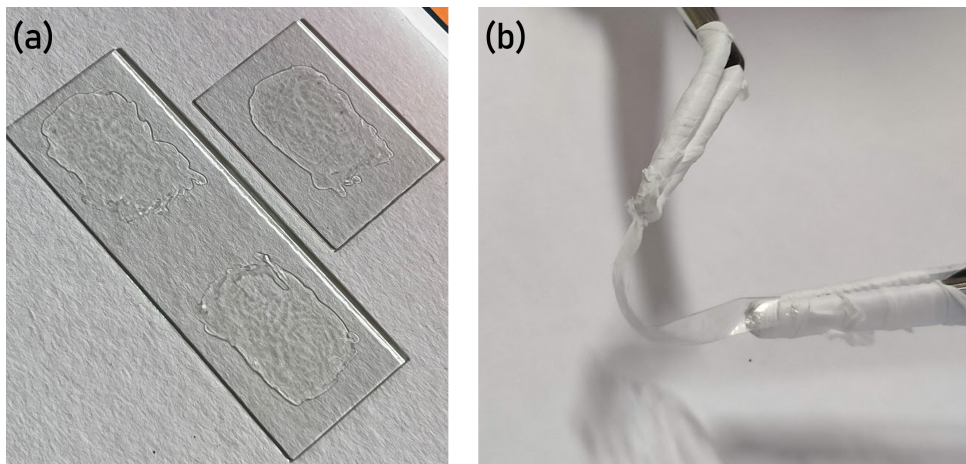
Fonte: Adaptada de [28].

**Figura 10 – Estrutura química do líquido iônico usado no preparo do gel iônico: 1-etil-3-metilimidazólio bis(trifluoro-metilsulfonil) imida ([EMI][TFSA]).**



Fonte: Adaptada de [28].

**Figura 11 – Gel iônico: (a) após ser depositado sobre lâmina de vidro; (b) curvado com pinças para demonstrar sua consistência.**



Fonte: O autor.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

Para investigar a estabilidade e reprodutibilidade dos parâmetros do dispositivo afim de estabelecer as melhores condições de operação foi feita a caracterização elétrica do dispositivo ao longo de ciclos de operação durante a curva de transferência, três ciclos para os EGOFETs e dois ciclos para os OECTs. O foco de estudo desse trabalho se deu em alterar o tempo de varredura da curva de transferência com o objetivo de verificar qual tempo produz um resultado mais estável, os tempos analisados foram de 150, 250, 350 e 450 ms para dispositivos operando como EGOFET e 150, 450 e 1000 ms para dispositivos operando como OECT.

Com relação aos tempos de varredura, os valores informados são referentes ao intervalo de tempo entre aplicação da tensão na porta e o registro do valor da corrente elétrica, esse tempo foi representado nos gráficos e tabelas pela letra grega tau ( $\tau$ ). Essa variação de tempo pode ser interpretada como uma variação na taxa de varredura, porém não foi utilizado essa nomenclatura para não gerar uma possível confusão com variar o passo (*step*) da medida que será mantido constante. Existe ainda um segundo intervalo de tempo, entre a aferição da corrente e a aplicação do novo valor de tensão, esse tempo foi mantido constante em 100 ms.

Os dispositivos operando em regime de EGOFET foram caracterizados seguindo a sequência:

- medida de corrente elétrica aplicando-se tensão entre fonte e dreno sem aplicação de tensão na porta (essa medida foi chamada de  $I - V$  simples) entre ITO/P3HT/ITO;
- I-V simples após a deposição do dielétrico (ITO/P3HT+gel/ITO);
- curva de transferência no regime de EGOFET com um determinado intervalo de tempo de varredura;
- curva de saída no regime de EGOFET;
- curva de transferência para um novo tempo de varredura;
- curva de saída;
- I-V simples após caracterização como EGOFET.

E a caracterização elétrica dos dispositivos operando em regime de OECT foi feita na seguinte sequência:

- I-V simples entre ITO/P3HT/ITO;
- I-V simples após a deposição do dielétrico (ITO/P3HT+gel/ITO);
- curva de transferência no regime de EGOFET com um determinado intervalo de tempo de varredura;
- curva de saída no regime de EGOFET;
- I-V simples após caracterização como EGOFET;

- curva de transferência no regime de OECT para o mesmo intervalo de tempo da transferência anterior;
- curva de saída no regime de OECT;
- curva de transferência para um novo tempo de varredura;
- curva de saída;
- I-V simples após caracterização como OECT.

Os regimes de operação como EGOFET e OECT são diferenciados pela faixa de aplicação de tensão na porta, para o dispositivo caracterizado neste trabalho a faixa de operação como EGOFET é para  $V_G$  até  $-0,5$  V e a faixa de operação para OECT é para  $V_G$  até  $-1,0$  V, as tensões aplicadas são negativas pois o P3HT é um semiconductor com dopagem tipo-p. Tal distinção é feita pois para uma tensão na porta acima de  $|0,5|$  V já pode ocorrer difusão de íons para dentro do canal, alterando a categoria do dispositivo.

### 3.5 EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS

Como mencionado anteriormente, a extração dos parâmetros se dá, de modo geral, da curva de transferência no regime de saturação. Para a extração da mobilidade realizamos a regressão linear da seção reta do gráfico gerado a partir da equação (8) afim de obter o coeficiente angular da reta [29]. Tal método resulta também na obtenção da tensão de *threshold*. Relacionando a equação (8) com a equação da reta  $y = ax + b$  temos que os coeficientes  $a$  e  $b$  são:

$$a = \sqrt{\frac{W}{2L} C_i \mu_{sat}}$$

$$b = -aV_T.$$

E reescrevendo as equações acima para  $V_T$  e  $\mu_{sat}$  em função dos coeficientes, temos:

$$V_T = -\frac{b}{a} \quad (17)$$

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{WC_i} a^2. \quad (18)$$



A razão *ON/OFF* é obtida através da razão entre a intensidade da corrente elétrica no estado *ON*, também chamado de estado ligado, e a intensidade da corrente no estado *OFF*, estado desligado. É atribuído ao  $I_{ON}$  a maior intensidade da corrente elétrica obtida da curva de transferência e ao  $I_{OFF}$  o valor quando  $V_G = 0$  V. Para a transcondutância é registrado o valor máximo fornecido pela equação (10), pois o dispositivo opera na curva de transferência apenas no regime de saturação. Um último parâmetro a ser considerado é o *subthreshold slope* (*SS*), definido como a tensão na porta necessária para fazer com que a corrente entre fonte e dreno mude um fator 10. O parâmetro *SS* é extraído tomando o coeficiente angular da reta na curva gerada por  $\log|I_{DS,sat}| \times V_G$  na região onde  $V_G < V_T$ , porém é mais comum apresentar como parâmetro o inverso desse valor, chamado de *subthreshold swing* (*S*) e geralmente apresentado em mV/dec [8].

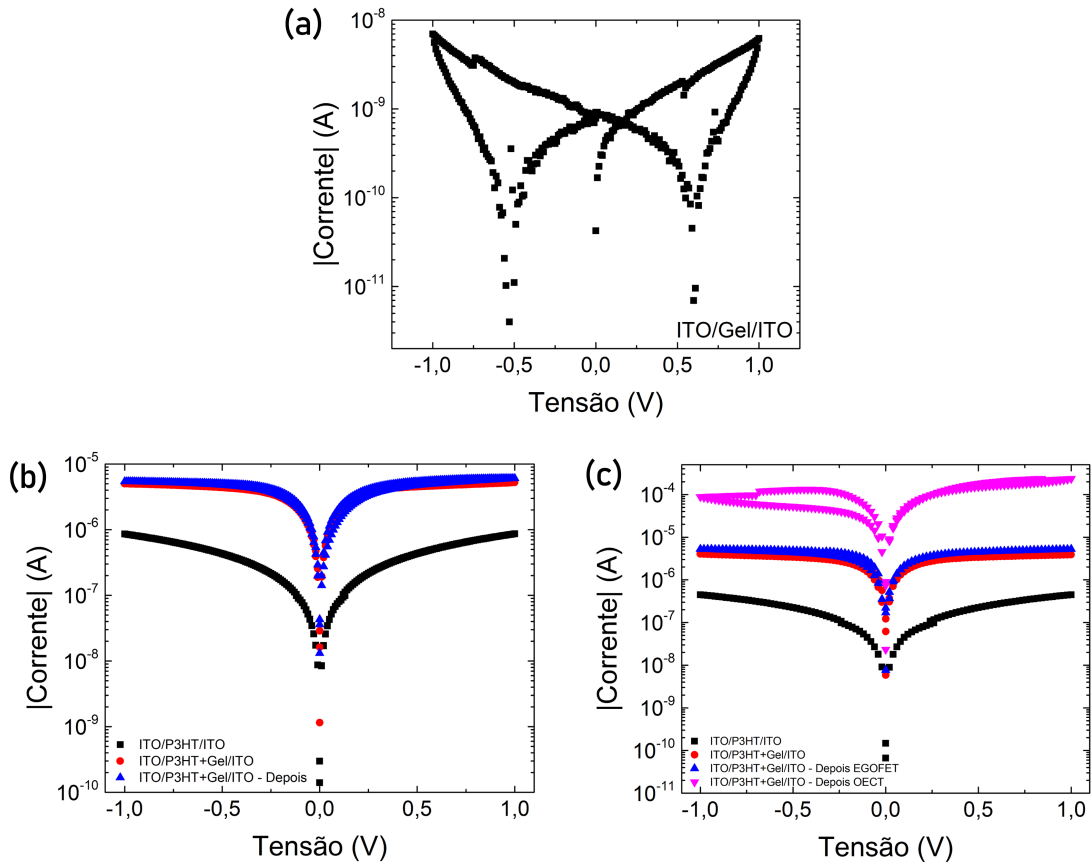
$$S = \left( \frac{\partial \log|I_{DS,sat}|}{\partial V_G} \right)^{-1} \quad (19)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor análise e comparação dos resultados os mesmos estão apresentados separando os dispositivos de acordo com o seu regime de operação. Para qualificar o EGT em um destes regimes de operação, se faz necessária uma análise prévia de um tipo de caracterização elétrica, chamada aqui de  $I - V$  simples. Tal medida foi proposta pela primeira vez dentro do nosso grupo de pesquisa no trabalho de Moura *et al.*[27] e, nessa caracterização é aplicada tensão entre fonte e dreno sem aplicação de tensão na porta. Com esse gráfico temos o objetivo de analisar a condução dos portadores de carga ao longo do canal de uma maneira simples e rápida, bem como a possível migração de íons para dentro do canal sem, por exemplo, a necessidade de utilização de técnicas de caracterização como espectroscopias UV-VIS, infravermelho próximo e Raman. Quando íons difundem para o canal, estes promovem uma dopagem iônica no semicondutor alterando o perfil e/ou intensidade da curva  $I - V$  fornecendo informações se o transistor está operando como EGOFET ou OECT. Esse tipo de caracterização é realizada no mesmo ambiente e com o mesmo arranjo que a caracterização elétrica do transistor. Na Figura 12 temos dois gráficos obtidos com esse tipo de caracterização acrescido de uma medida similar para auxiliar na interpretação de dados.

A Figura 12(a) traz a caracterização apenas da estrutura ITO, gel iônico e ITO, e nela observamos que a corrente elétrica máxima conduzida através do gel iônico é da ordem de  $10^{-8}$  A. Esta medida não é usual, pois é a análise da corrente ao longo do eletrólito, porém se faz necessária uma vez que é comum se observar uma corrente não desprezível ao longo do gel iônico, que é um isolante com espécies iônicas. Na Figura 12(b) a caracterização  $I - V$  simples é realizada em três momentos distintos: a curva com símbolos em preto representa a varredura para a estrutura ITO, P3HT e ITO antes de depositar o gel iônico para construção do transistor. Nesta, a corrente elétrica máxima obtida ao longo do filme de P3HT é da ordem de  $10^{-6}$  A, ou seja, duas ordens de grandeza maior do que observado através do gel iônico na Figura 12(a). Esta diferença nas intensidades da corrente nos traz a informação de que a condução está ocorrendo ao longo do semicondutor e não ao longo do gel iônico, como é de fato esperado, mostrando que o dispositivo está operando devidamente. A curva com símbolos em vermelho foi obtida após a deposição do gel iônico sobre o filme de P3HT, do mesmo dispositivo da curva da Figura 12(b). Nesta curva temos um aumento de uma ordem de grandeza na intensidade da corrente. Tal ganho está atribuído ao fato do gel iônico sofrer uma polarização inicial na

**Figura 12 – (a) Análise da condução elétrica ao longo do gel iônico para a estrutura não usual de dispositivo: ITO/Gel iônico/ITO. Sequência de curvas  $I - V$  simples, para EGOFETs (b) e OECTs (c) sob as seguintes estruturas: ITO/P3HT/ITO (símbolos pretos); ITO/P3HT+gel iônico/ITO antes de aplicar tensão no eletrodo porta (símbolos vermelhos); ITO/P3HT+gel iônico/ITO após aplicar tensão no eletrodo porta de até  $-0,5$  V (símbolos azuis) e apenas para (c) ITO/P3HT+gel iônico/ITO após aplicar tensão no eletrodo porta de até  $-1,0$  V (símbolos em magenta).**



Fonte: O autor.

interface dielétrico/semicondutor, ao passar uma corrente ao longo do canal, fazendo com que a condução no P3HT seja alterada apenas com a deposição do gel sobre o dispositivo. Na curva com símbolos em azul a caracterização foi realizada após o dispositivo ter operado no regime de EGOFET (ou seja, aplicando  $V_G$  até  $-0,50$  V). Vemos que o perfil da curva de condução elétrica ao longo do P3HT é o mesmo e tem a mesma ordem de grandeza da curva com símbolos em vermelho, antes da operação do dispositivo como transistor aplicando tensão no eletrodo porta. Isso é um dos fatores que demonstra que íons não migraram para o canal do dispositivo durante sua caracterização como transistor, já que a condução no filme de P3HT não foi alterada. Assim, conclui-se que o dispositivo operou como EGOFET, não havendo difusão de íons do eletrólito para o canal, sendo esta uma das confirmações de que o modo de operação era exclusivamente por efeito de campo.

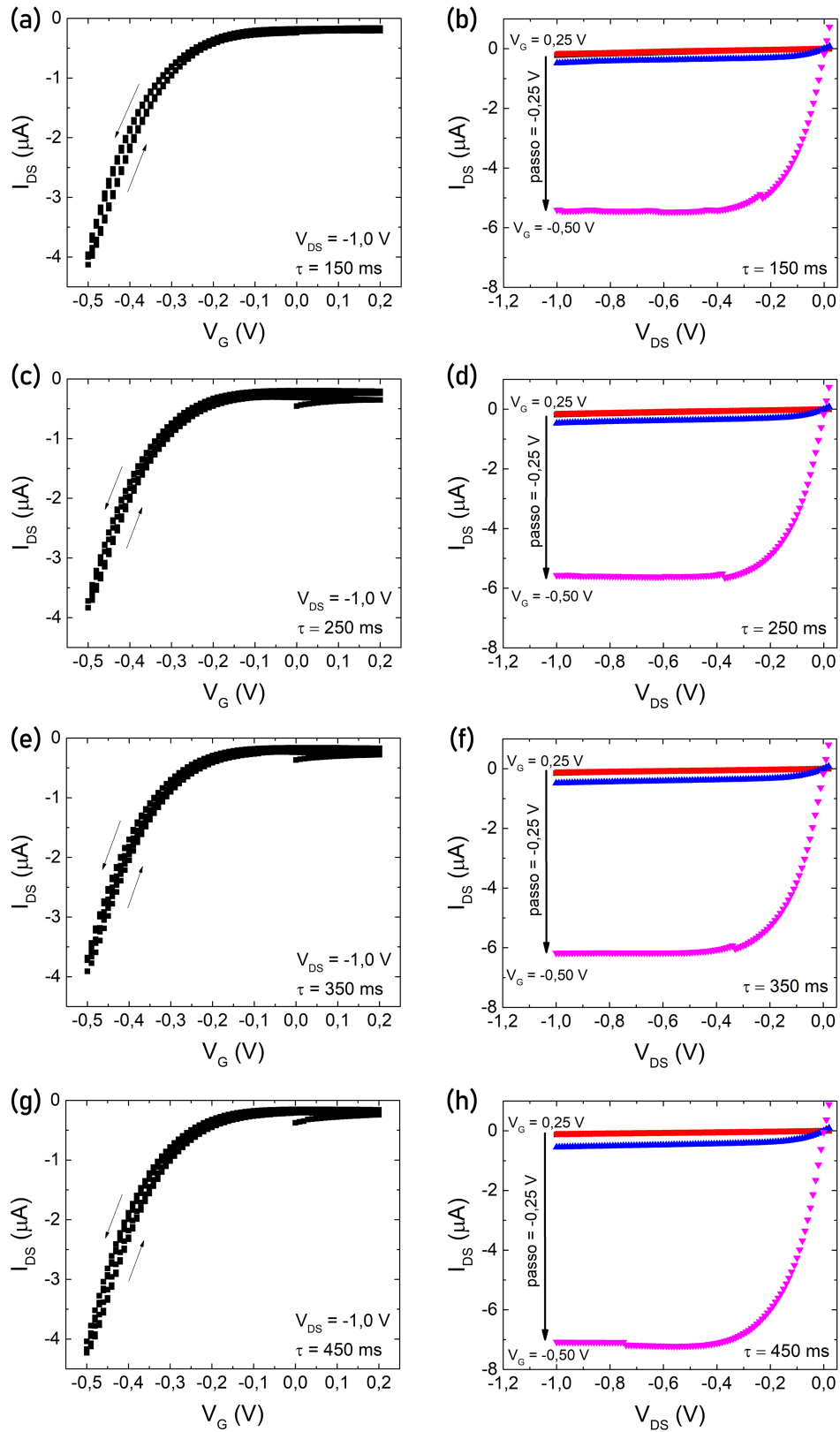
Na Figura 12(c) temos as mesmas três curvas citadas acima, porém para um outro dispositivo independente, e uma quarta curva (símbolos em magenta). As curvas preta, vermelha e azul mantêm o mesmo perfil de intensidade do dispositivo da figura B), porém a quarta medida foi realizada após caracterizar o transistor aplicando uma tensão na porta de até  $-1,0$  V, fazendo o mesmo operar no regime de OECT. É de fácil percepção que houve um aumento de intensidade na corrente elétrica que chega agora a uma ordem de  $10^{-4}$  A, esse aumento é atribuído ao processo de dopagem iônica ocorrido durante a operação do dispositivo como OECT, devido aos íons que difundem para dentro do canal. A migração de íons para o canal faz com que haja uma nova configuração elétrica dentro do semicondutor, uma vez que portadores de carga se reorganizam nesta região de modo a equilibrar as cargas iônicas. Sob a polarização utilizada no OECT, a qual será discutida em detalhes mais a frente, ânions difundem para o canal resultando em mais portadores de cargas positivos induzidos dentro do canal. Para o caso do P3HT, isso significa mais portadores majoritários dentro do canal. Com a existência de mais portadores de carga majoritários no semicondutor, temos uma corrente elétrica de maior intensidade quando a medida  $I - V$  simples é realizada.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA OPERANDO COMO EGOFET

Para o regime de EGOFET foram desenvolvidos 13 dispositivos onde foi obtida boa reprodutibilidade dos dados analisados entre diferentes lotes. Porém, os dados apresentados a seguir são referentes a dois dispositivos produzidos e caracterizados em dias diferentes, os quais chamaremos aqui de Dispositivo-A e Dispositivo-B. Como já mencionado na seção 1.1, nosso principal intuito de análise foi realizar a caracterização típica de transistores com a curva de transferência e curva de saída, porém, utilizando diferentes tempos de varredura na curva de transferência apenas. Na curva de saída não foi variado o tempo de varredura. Assim, os diferentes tempos de varredura  $\tau$  são referente às medidas nas curvas de transferência apenas.

Na Figura 13, temos as curvas de transferência à esquerda e saída à direita para os quatro tempos de varreduras ( $\tau$ ) estudados. Todos os gráficos referentes às curvas de transferência encontram-se na mesma escala entre si, o mesmo ocorre com os gráficos referentes às curvas de saída. Desse modo é possível uma comparação visual imediata das intensidades das correntes entre eles. Analisando a curva de transferência na Figura 13(a), sendo que estas são sempre realizadas sob três ciclos, é possível perceber que existe uma boa estabilidade entre ciclos e quase

Figura 13 – Dispositivo-A operando em regime de EGOFET, curvas de transferência (a), (c), (e) e (g) e curvas de saída (b), (d), (f) e (h) para tempos de varredura de 150, 250, 350 e 450 ms.

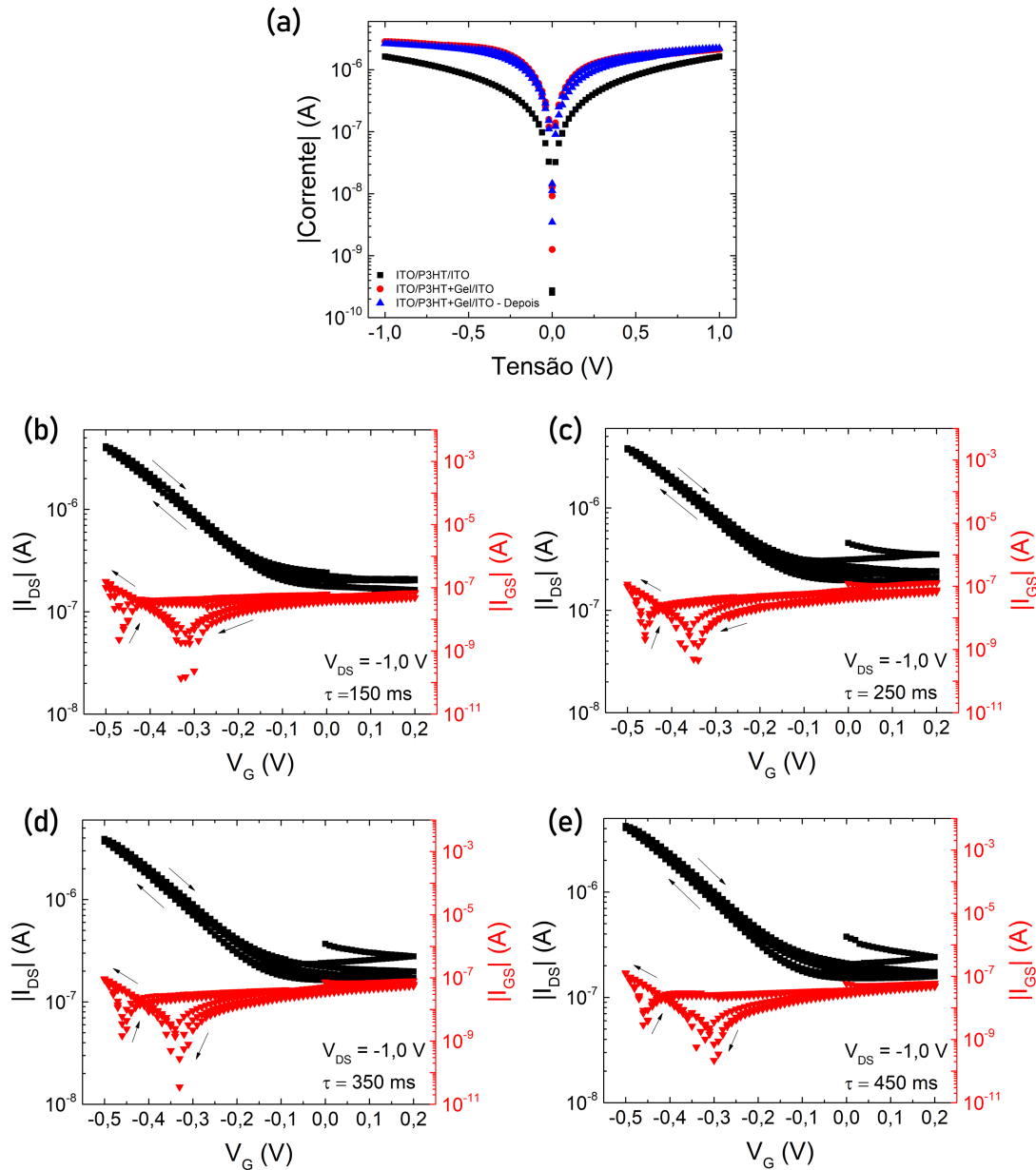


Fonte: O autor.

nenhuma histerese entre a varredura de ida e de volta em cada uma delas, bem como a intensidade máxima da corrente é mantida. Ao comparar as curvas de transferência da Figura 13(a), (c), (e) e (g), as quais possuem tempo de varredura  $\tau$  de 150, 250, 350 e 450 ms, respectivamente, observa-se que o perfil das curvas e intensidade da corrente elétrica apresentam ótima reprodutibilidade entre si. Isso indica que, no caso de dispositivos operando como EGOFET, os intervalos de tempo de varredura analisados não interferem na intensidade da corrente elétrica que flui entre fonte e dreno. No caso da curva de saída, a intensidade de  $I_{DS}$  para  $V_G = -0,50$  V passa de aproximadamente  $-5 \mu\text{A}$  no gráfico (b) para aproximadamente  $-7 \mu\text{A}$  no gráfico (h). Tal alteração não apresenta uma variação relevante para que possa estar relacionada com o tempo de varredura, mas sim ao fato do dispositivo ter sido exposto à caracterização elétrica diversas vezes.

Na Figura 14 é exposta uma sequência de gráficos de modo a concluir que este transistor está operando no modo EGOFET, indiferente do tempo de varredura da curva de transferência. Na Figura 14(a) temos a curva  $I - V$  simples para o mesmo Dispositivo-A. A discussão com conceitos físicos referente à estas curvas já foram comentados para a Figura 12, sendo repetida aqui apenas para melhor visualização do conjunto de medidas. Desta curva  $I - V$  simples, o principal resultado é que o perfil e intensidade da curva  $I - V$  não mudam quando comparamos a medida antes (símbolo vermelho) e após aplicar tensão no eletrodo porta de até  $-0,5$  V (símbolo azul). Com isso, conclui-se que o dispositivo está operando em regime de EGOFET. Nos gráficos (b), (c), (d) e (e) temos a curva de transferência em escala logarítmica em preto e em vermelho temos a intensidade da corrente elétrica entre porta e fonte medida em função de  $V_G$ , tal curva é chamada de corrente de fuga ( $I_{GS}$ ) e indica qual porção da corrente elétrica que está passando através do eletrólito. A razão entre a intensidade máxima de  $I_{DS}$  e  $I_{GS}$  é da ordem de  $10^1$  para todos os tempos de varredura, o que indica que a porção relevante de corrente elétrica está, de fato, fluindo entre fonte e dreno. Ainda analisando a corrente de fuga, vemos que existem dois pontos de mínimo que se repetem ao longo dos ciclos, esses mínimos estão relacionados com a blindagem elétrica causada pelo equilíbrio entre os campos elétrico no interior do semicondutor e no dielétrico. A existência de dois mínimos se dá pois esse equilíbrio entre campos elétrico ocorre para diferentes sentidos de varredura de tensão: quando a varredura está sendo feita de 0,20 para  $-0,50$  V o mínimo é localizado em aproximadamente  $V_G = -0,30$  V e quando a varredura é feita no sentido contrário o mínimo é localizado em aproximadamente  $V_G = -0,45$  V.

Figura 14 – Dispositivo-A operando em regime de EGOFET. (a) curva  $I-V$  simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 150 ms; (c) 250 ms; (d) 350 ms; (e) 450 ms.



Fonte: O autor.

Os parâmetros razão  $ON/OFF$ , tensão de *threshold*, mobilidade de saturação, *subthreshold swing* e transcondutância máxima com seu valor de tensão associado, extraídos para o Dispositivo-A, encontram-se na Tabela 1. Os valores são referentes ao primeiro dos três ciclos de varredura para os quatro intervalos de tempo de varredura ( $\tau$ ) estudados. Os parâmetros foram determinados de acordo com as equações (17), (18), (10) e (19) descritas nas seções 3.5 e 2.1. Ao comparar os resultados obtidos para a razão  $ON/OFF$  entre os diferentes tempos de varredura ( $\tau$ ), pode ser observado que todos se encontram na ordem de  $10^1$  indicando que tal parâmetro

não é influenciado pelo tempo de varredura. No caso da tensão de *threshold* existe uma variação na segunda casa após a virgula, sendo 0,02 V a diferença entre o maior valor de  $V_T$ , atribuído ao tempo de 350 ms, e o menor atribuído ao tempo de 250 ms. Tal variação é suficientemente pequena de modo que a maioria das literaturas da área mostram tal parâmetro com apenas uma casa decimal. Com isso pode se verificar que a tensão de *threshold* não sofre influência com o tempo de varredura.

**Tabela 1 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET referentes ao primeiro ciclo de varredura da curva de transferência.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
150	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,3 \times 10^{-2}$	-511	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
250	$1 \times 10^1$	-0,17	$1,1 \times 10^{-2}$	-893	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
350	$2 \times 10^1$	-0,19	$1,3 \times 10^{-2}$	-673	$3 \times 10^{-5}$	[-0,47]
450	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,4 \times 10^{-2}$	-522	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]

**Fonte: O autor.**

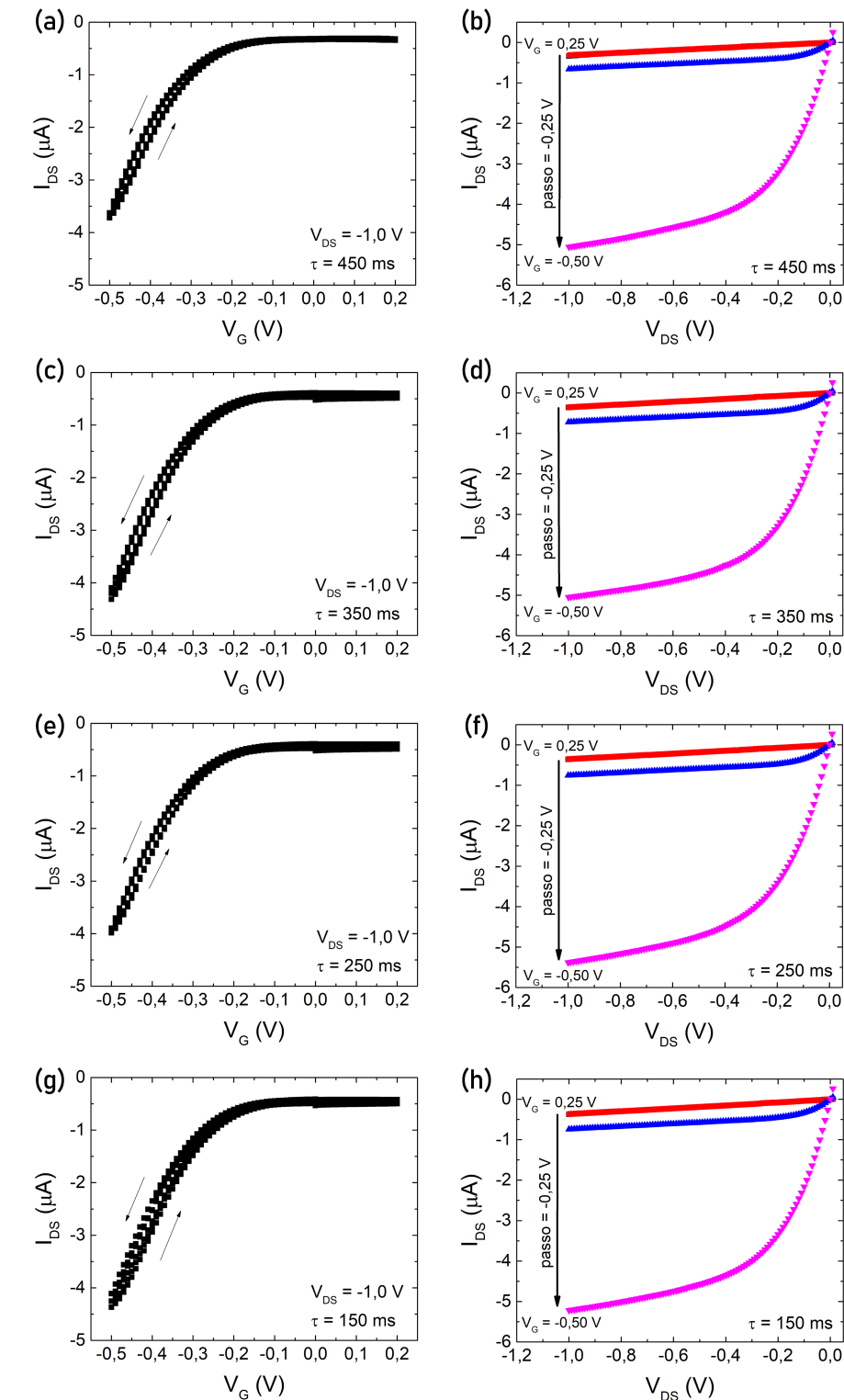
O mesmo ocorre para os parâmetros de mobilidade de saturação e transcondutância máxima. No caso de  $\mu_{sat}$  a diferença entre o maior e o menor valor calculado é de  $0,3 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/Vs para os tempos de 450 e 250 ms. Já para  $g_{m,sat}$  o valor é o mesmo, independente do tempo de varredura, quando arredondado para um número significativo, tendo diferença em apenas um caso (350 ms) o valor de  $V_G$  no qual a transcondutância máxima ocorreu. Com esse resultado continuamos tendo parâmetros que não variam com uma varredura mais lenta ou mais rápida.

Quando analisado o *subthreshold swing* vemos que existe uma diferença considerável entre os valores calculados para os diversos tempos de varredura, porém não é uma variação que apresenta alguma relação clara com o tempo, os valores não variam na mesma proporção ou até mesmo não apresentam um padrão de crescimento com o tempo. No apêndice A está presente a Tabela 9 com os parâmetros extraídos para todos os ciclos de operação do Dispositivo-A e na Tabela 15 os valores médios entre os ciclos com os desvios padrões.

O segundo dispositivo operando em regime de EGOFET, chamado de Dispositivo-B, foi caracterizado com os tempos de varredura sendo variado de 450 ms para 150 ms, ou seja, da medida mais lenta para a mais rápida que foi o contrário do realizado no Dispositivo-A. Com isso, foi possível verificar se os padrões de comportamento do dispositivo se mantiveram independentes da ordem dos intervalos de tempo, cujas curvas de transferência e saída para o Dispositivo-B estão na Figura 15. Novamente pode ser observado que, independentemente do



Figura 15 – Dispositivo-B operando em regime de EGOFET, curvas de transferência (a), (c), (e) e (g) e curvas de saída (b), (d), (f) e (h) para tempos de varredura de 450, 350, 250 e 150 ms.



Fonte: O autor.

tempo de varredura, a intensidade máxima de  $I_{DS}$  se mantém em torno de  $-4 \mu\text{A}$  e todas as curvas apresentam estabilidade ao longo dos ciclos e pouca histerese, assim como o Dispositivo-

A. Para as curvas de saída, o  $I_{DS}$  máximo é de aproximadamente  $-5 \mu\text{A}$  para todos os tempos, apresentando maior estabilidade do que no dispositivo anterior. Em ambos os casos não ocorre uma coincidência perfeita das intensidades de  $I_{DS}$  entre as curvas de transferência e saída para o mesmo tempo de varredura. Esse aspecto voltará a ser discutido após a análise dos demais dispositivos.

As curvas  $I - V$  simples e de transferência com corrente de fuga para o Dispositivo-B encontram-se na Figura 16. No caso da curva I-V simples, a sobreposição das curvas vermelha e azul se repete assim como o ganho de intensidade em relação à curva preta. Para as curvas de corrente de fuga, os dois pontos de mínimo se mantêm nas mesmas posições ao longo dos ciclos, e sempre com  $I_{GS}$  tendo intensidade de uma ordem de grandeza menor que  $I_{DS}$ . A Tabela 2 contém os parâmetros extraídos para o Dispositivo-B referentes ao primeiro ciclo de operação. Para a razão  $ON/OFF$  temos a mesma ordem de grandeza,  $10^1$ , para todos os tempos de varredura, assim como para o Dispositivo-A. No caso de  $V_T$ , o tempo de 450 ms apresentou um valor  $-0,04 \text{ V}$  maior do que para 150 ms, e novamente, quando arredondado para apenas um número significativo todos os valores para a tensão de *threshold* se tornam iguais a  $-0,1 \text{ V}$ .

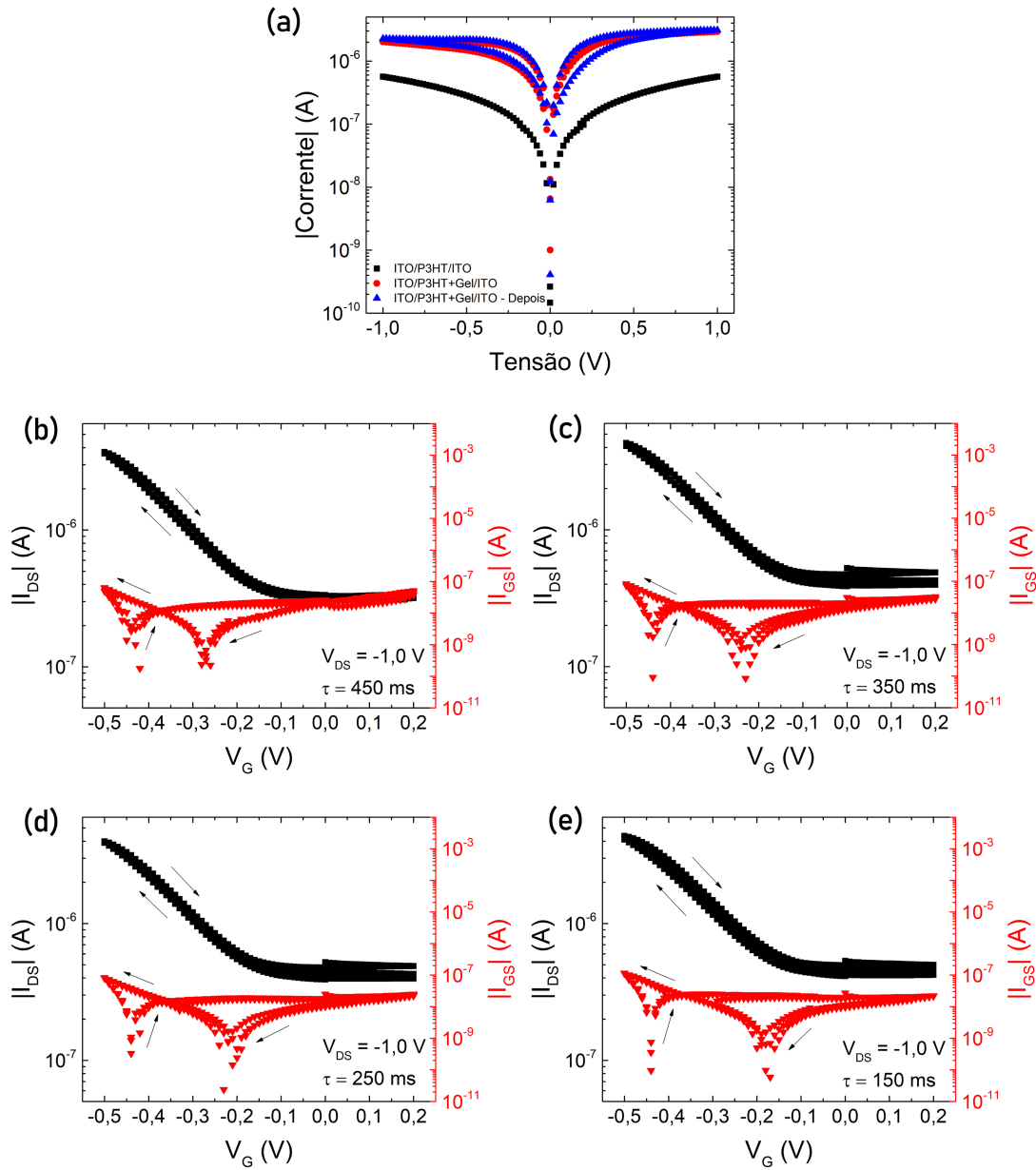
**Tabela 2 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-B operando em regime de EGOFET referentes ao primeiro ciclo de varredura.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
450	$1 \times 10^1$	-0,12	$0,8 \times 10^{-2}$	-2064	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
350	$1 \times 10^1$	-0,10	$0,9 \times 10^{-2}$	-2752	$3 \times 10^{-5}$	[-0,48]
250	$1 \times 10^1$	-0,10	$0,8 \times 10^{-2}$	-2668	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
150	$1 \times 10^1$	-0,08	$0,8 \times 10^{-2}$	-3818	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]

**Fonte: O autor.**

Ao comparar os valores de  $V_T$  entre o Dispositivos-A e o Dispositivo-B fica evidente que existe uma diferença significativa de  $0,1 \text{ V}$  entre eles, porém se tratam de dispositivos diferentes, fabricados com peças de substratos diferentes e em dias diferentes. A mobilidade de saturação e a transcondutância máxima se mantêm praticamente constantes ao longo dos diversos tempos de varredura sendo  $\mu_{sat} = 0,8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  e  $g_{m,sat} = 3 \times 10^{-5} \text{ S}$  os valores médios entre os tempos para cada um dos parâmetros. Tais valores para a mobilidade são próximos aos encontrados para o Dispositivo-A e iguais para a transcondutância, indicando que tais parâmetros, juntamente com a razão  $ON/OFF$ , se mantêm para dispositivos com mesma estrutura operando em regime de EGOFET.

Figura 16 – Dispositivo-B operando em regime de EGOFET. (a) curva  $I - V$  simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 450 ms; (c) 350 ms; (d) 250 ms; (e) 150 ms.



Fonte: O autor.

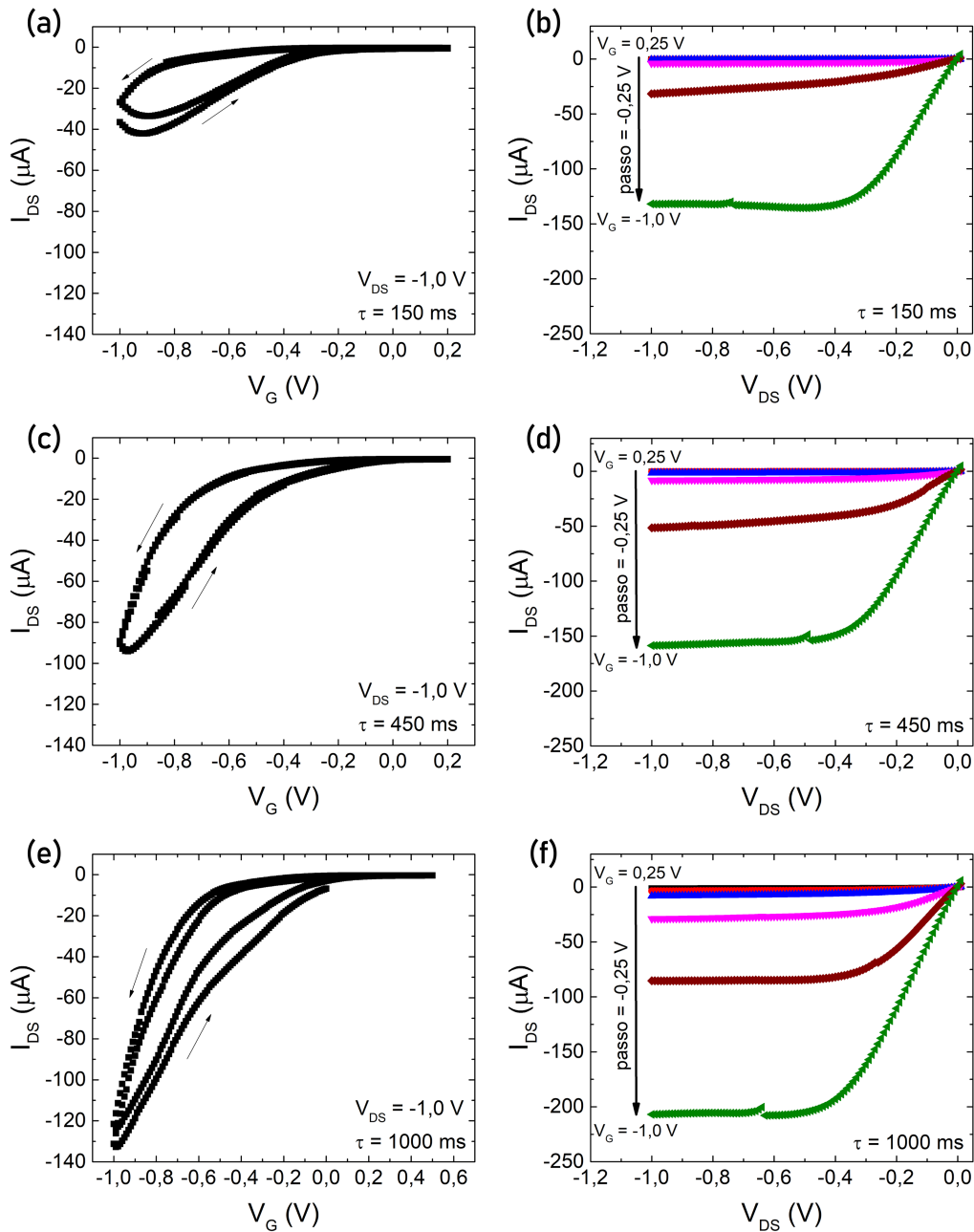
Por fim, para o *subthreshold swing* os valores variam de  $-2064$  mV/dec para varredura a 450 ms para  $-3818$  mV/dec para varredura a 150 ms sem nenhum padrão identificável. Tais valores são também, em média, três vezes maiores que os encontrados para o Dispositivo-A. Comparando mais atentamente  $V_T$  e  $S$  entre os dois dispositivos vemos que quando  $V_T$  diminui de A para B,  $S$  aumenta. Na Tabela 10 podem ser verificados os parâmetros para todos os ciclos e na Tabela 16 os valores para médias e desvios padrões, ambas no apêndice A.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA OPERANDO COMO OECT

Para o regime de OECT foram caracterizados 10 dispositivos com boa reprodutibilidade, dentre todos foram escolhidos quatro para serem analisados: dois onde o tempo de varredura ( $\tau$ ) está aumentando durante o processo de caracterização e dois onde o  $\tau$  está diminuindo. Na Figura 17 estão presentes os gráficos das curvas de transferência e saída para o Dispositivo-C para os tempos de 150, 450 e 1000 ms. Comparando os gráficos (a), (c) e (e) é claramente perceptível que a intensidade máxima da corrente entre fonte e dreno vai aumentando conforme aumentamos o tempo de varredura, passa de  $-40 \mu\text{A}$  para  $-130 \mu\text{A}$ , o mesmo acontece nos gráficos (b), (d) e (f) com  $I_{DS}$  variando de  $-130 \mu\text{A}$  para  $-200 \mu\text{A}$ . Como dito anteriormente, durante operação como OECT existem íons migrando do gel para o semicondutor e esses íons aumentam a quantidade de portadores de carga no canal, devido ao rearranjo eletrostático que ocorre. Porém esses íons são lentos, em comparação ao movimento dos portadores de carga, e quanto mais tempo é mantida a tensão aplicada antes de registrar o valor correspondente da corrente elétrica maior intensidade é alcançada, não se mantendo constante para diferentes tempos de varredura. Já é de conhecimento na literatura científica que OECTs apresentam uma corrente de transiente devido ao movimento dos íons que migram para o canal [18]. Tal peculiaridade é com frequência estudada em gráficos da corrente em função da tensão pulsada na porta. Aqui, o intuito é verificar quais cuidados devem ser tomados para garantir que a corrente coletada na curva de transferência não apresente dependência com a corrente de transiente. Analisando ainda o par de transferência e saída para um mesmo tempo de varredura, é observado que a diferença nas intensidades da corrente é maior do que nos casos anteriores para dispositivo operando como EGOFET.

Na Figura 18(a), tem-se a curva  $I - V$  e nela pode ser verificado o ganho de intensidade característica de dispositivos operando em regime de OECT (símbolos rosa). Os gráficos (b), (c) e (d) trazem as transferências e as correntes de fuga em escala logarítmica. No caso da corrente de fuga, a posição dos mínimos sofre um variação, principalmente o mais próximo de 0 V. Os parâmetros extraídos para o Dispositivo-C encontram-se na Tabela 3 e foram extraídos utilizando o modelo dos OFETs já usado para ajustar os EGOFETs. Os parâmetros  $V_T$  e  $\mu_{sat}$  aqui extraídos são necessários também para, posteriormente, gerar o ajuste através do modelo LS. Apesar destes parâmetros terem sido extraídos fazendo uso de um modelo destinado a transistores por efeito de campo, e sabendo que não é o modelo mais adequado para usar no caso dos OECTs, vale a pena

Figura 17 – Dispositivo-C operando em regime de OEECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 150, 450 e 1000 ms.

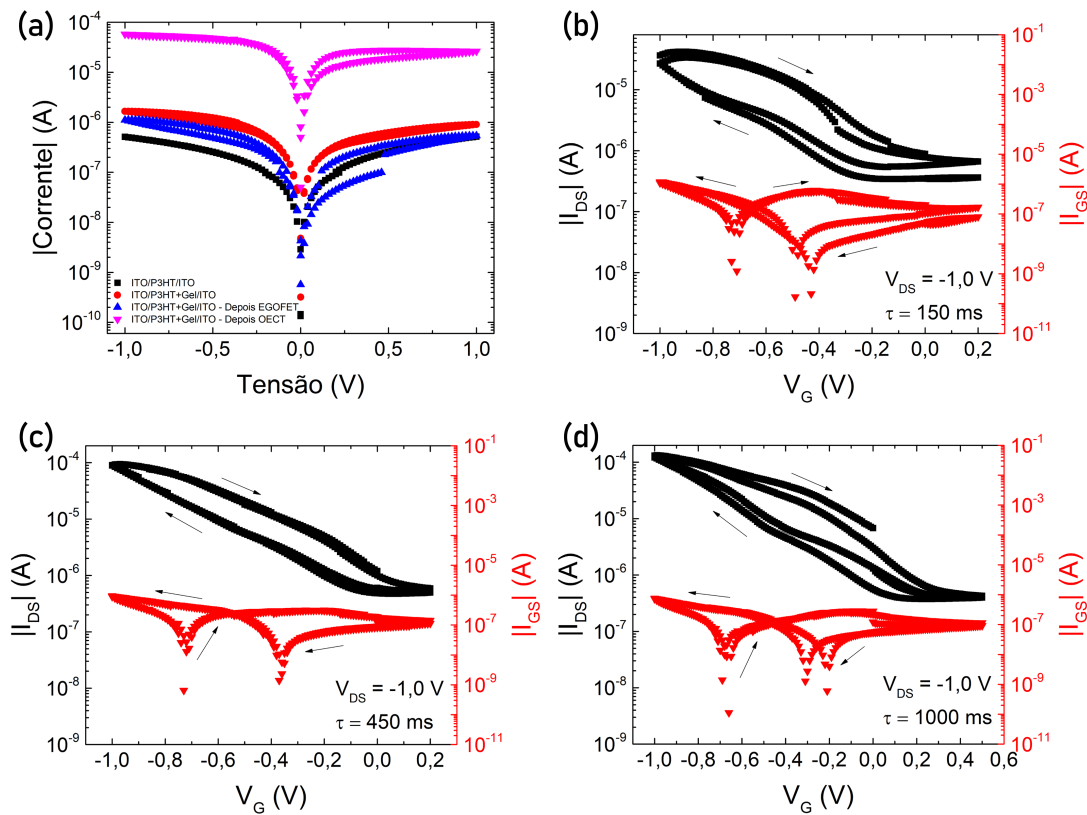


Fonte: O autor.

a discussão para quantificar e comparar com os dispositivos operando como EGOFET.

No caso da razão *ON/OFF* foi verificado que para todos os tempos de varredura foram obtidos valores da ordem de  $10^2$ , uma ordem de grandeza maior do que no regime de EGOFET. O *subthreshold swing* também se manteve praticamente constante, variando apenas 47 mV/dec entre o menor e o maior tempo. E a transcondutância máxima com todos os valores na ordem de  $10^{-4}$  S para uma tensão de  $-0,99$  V, novamente uma ordem de grandeza maior do que nos

**Figura 18 – Dispositivo-C operando em regime de OECT. (a) curva  $I - V$  simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 150 ms; (c) 450 ms; (d) 1000 ms.**



Fonte: O autor.

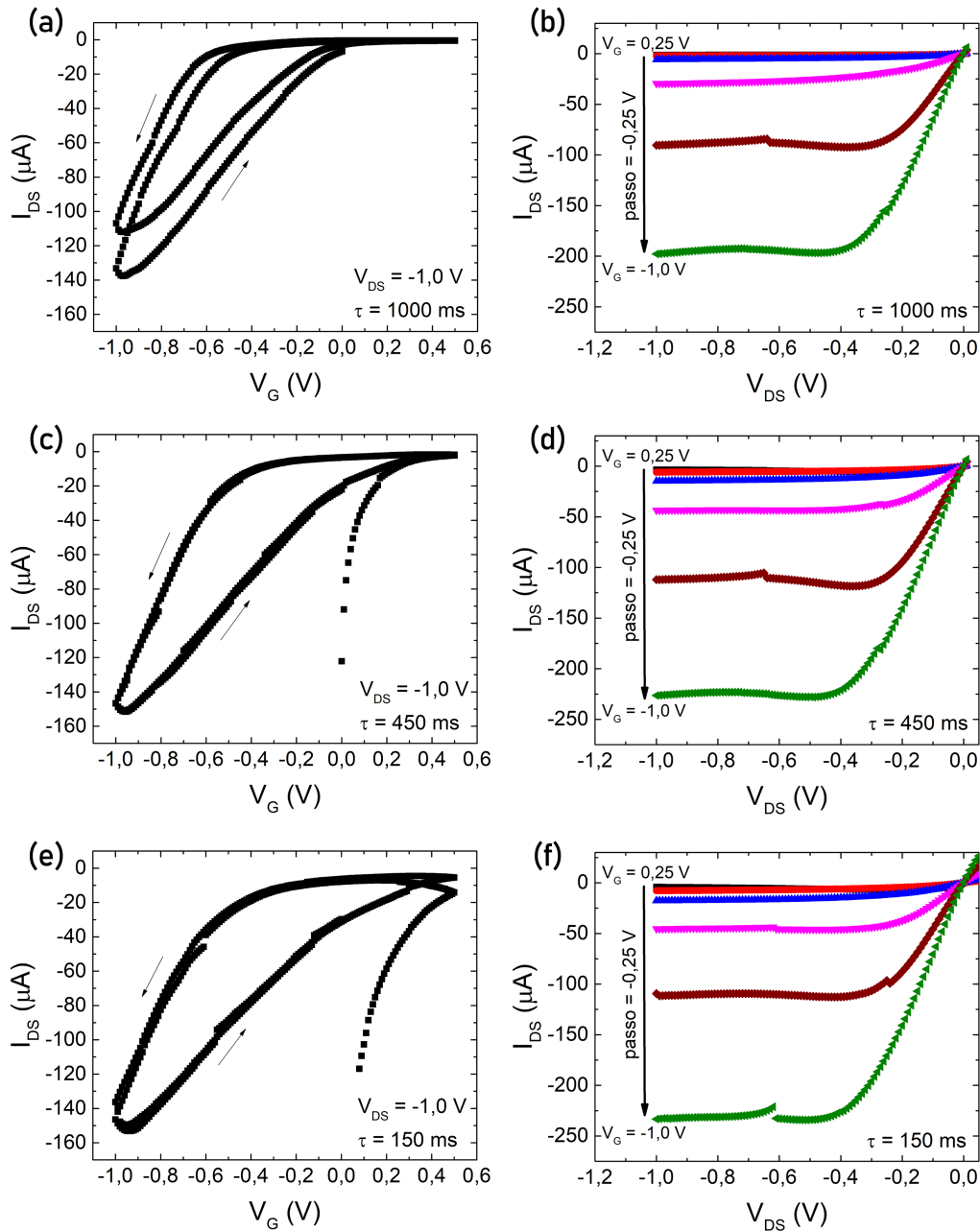
**Tabela 3 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-C operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
150	$1 \times 10^2$	-0,67	$0,8 \times 10^{-1}$	-344	$2 \times 10^{-4}$	[-0,98]
450	$2 \times 10^2$	-0,57	$1,6 \times 10^{-1}$	-361	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]
1000	$2 \times 10^2$	-0,46	$1,4 \times 10^{-1}$	-391	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]

Fonte: O autor.

dispositivos A e B. A tensão de *threshold*, para este dispositivo, diminui em módulo cerca de 0,10 V conforme  $\tau$  aumenta indicando que esta sim tem influência do tempo de varredura. Já para a mobilidade de saturação vemos uma variação de  $0,8 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  entre os diferentes tempos. Como vemos na equação (9) a mobilidade depende inversamente da capacitância do dielétrico, neste trabalho utilizamos um valor de capacitância por unidade de área, porém é comum utilizar para os OECTs uma capacitância por unidade de volume fazendo com que a comparação direta desse parâmetro não seja a mais precisa. No apêndice A pode ser verificada a Tabela 11 com os parâmetros extraídos para todos os ciclos e na Tabela 17 os valores médios com desvios padrões.

Figura 19 – Dispositivo-D operando em regime de OECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 1000, 450 e 150 ms.

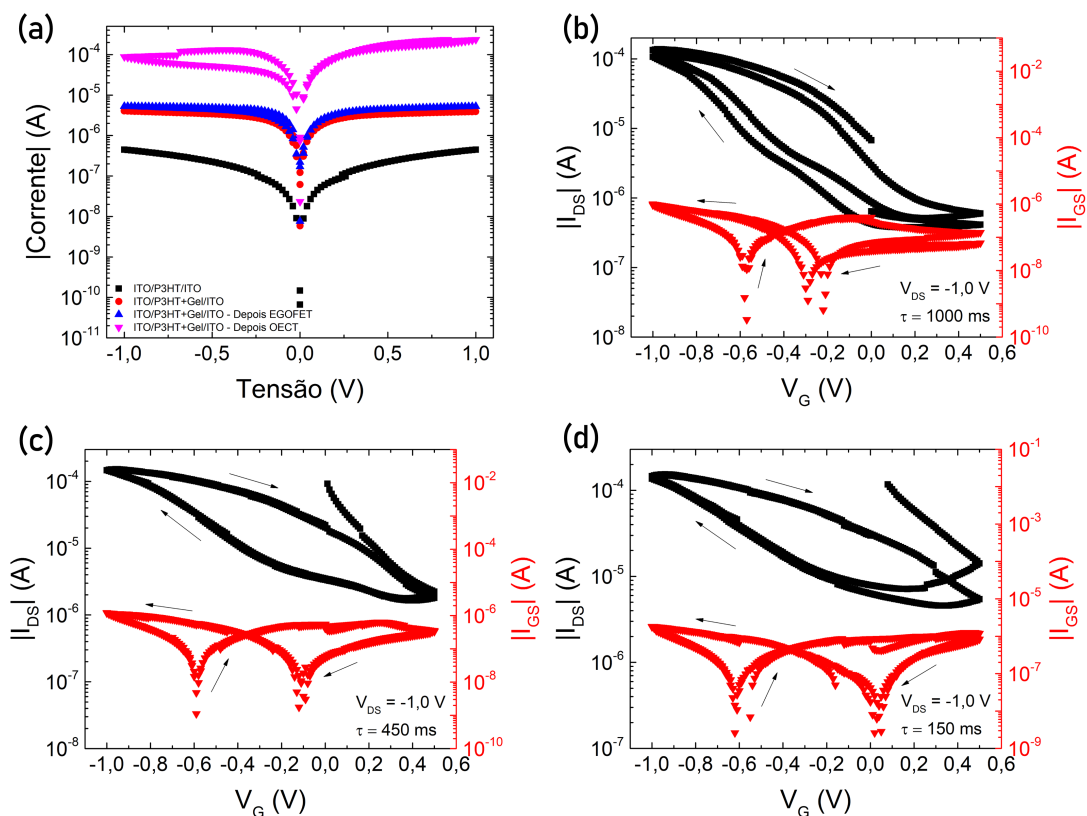


Fonte: O autor.

A Figura 19 e Figura 20 trazem a mesma seqüência apresentada na Figura 17 e Figura 18 agora para o Dispositivo-D, que foi caracterizado no mesmo dia que o Dispositivo-C, porém com os diferentes tempos de varredura sendo medidos no sentido contrário, de 1000 para 150 ms. Ao compararmos os gráficos (a), (c) e (e) da Figura 19 referentes à transferência percebemos que para o tempo de 1000 ms os ciclos não estão sobrepostos e as intensidades máximas de  $I_{DS}$  apresentam uma diferença de  $-30 \mu A$ . Quando uma nova caracterização é feita com um tempo

de varredura menor (450 ms) a corrente elétrica se torna maior, chegando a aproximadamente  $-150 \mu\text{A}$ , e se mantém para o tempo de 150 ms. Diferente do Dispositivo-C onde a intensidade da corrente aumentava (em módulo) com o tempo de varredura, neste caso o aumento da corrente nos gráficos (a) e (c) não está relacionado com a redução do tempo de varredura e sim com o fato de que uma vez que uma grande quantidade de íons migrou para o canal. Isto ocorre devido ao longo tempo de exposição durante a caracterização esses íons não são mais removidos do semiconductor com a aplicação de uma tensão contrária. O resultado disso é uma varredura posterior com tempo menor gerando uma transferência com intensidade levemente maior. O mesmo ocorre na curva de saída dos gráficos (b), (d) e (f), para  $\tau = 1000 \text{ ms}$  a intensidade de  $I_{DS}$ , quando  $V_G = -1,0 \text{ V}$ , é de aproximadamente  $-200 \mu\text{A}$  e para  $\tau = 150 \text{ ms}$  temos  $I_{DS} = -230 \mu\text{A}$ , aproximadamente.

**Figura 20 – Dispositivo-D operando em regime de OECT. (a) curva  $I - V$  simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 1000 ms; (c) 450 ms; (d) 150 ms.**



Fonte: O autor.

A Figura 20 mostra a sequência de gráficos de caracterização de um dispositivo operando em regime de OECT. Na Figura 20(a) a curva  $I - V$  mantém o mesmo padrão apresentado na Figura 12. Nos gráficos (b), (c) e (d) da Figura 20 a corrente de fuga é visível que um dos pontos



de mínimo se mantém praticamente fixo em torno de  $V_G = -0,7 \text{ V}$  e o outro sofre variação de posição conforme o tempo de varredura muda, tal comportamento também é observado nos gráficos da Figura 18. Os parâmetros extraídos para o Dispositivo-D encontram-se na Tabela 4. Para este dispositivo o único parâmetro que se mantém contante é  $g_{m,sat}$  com ordem de grandeza igual à do Dispositivo-C de  $10^{-4} \text{ S}$  para um valor de tensão de  $-0,99 \text{ V}$  na maioria dos casos. Novamente para a mobilidade é mantida uma diferença de  $0,7 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$  com uma variação que não varia diretamente com o tempo de varredura, porém se mantém com mesma ordem de grandeza do Dispositivo-C.

**Tabela 4 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-D operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
1000	$3 \times 10^2$	-0,46	$1,4 \times 10^{-1}$	-392	$4 \times 10^{-4}$	[-0,99]
450	$4 \times 10^1$	-0,25	$0,9 \times 10^{-1}$	-1274	$5 \times 10^{-4}$	[-0,94]
150	$2 \times 10^1$	-0,19	$0,7 \times 10^{-1}$	-1502	$4 \times 10^{-4}$	[-0,99]

**Fonte: O autor.**

Já para os demais parâmetros existem algumas variações diferentes, no caso da razão  $ON/OFF$  para 1000 ms a ordem de grandeza obtida foi  $10^2$  e para os demais tempos,  $10^1$ . Tal mudança não é vista claramente na curva de transferência pois o valor que estava sendo modificado ao longo das varreduras não era de  $I_{ON}$ , mas sim de  $I_{OFF}$ . Quando o tempo de varredura foi de 1000 ms a corrente  $OFF$  foi de  $-4 \times 10^{-7} \text{ A}$ , para 450 ms a corrente  $OFF$  foi de  $-3 \times 10^{-6} \text{ A}$  enquanto os valores para corrente  $ON$  sofrem uma pequena variação (como visível na Figura 19) gerando essa diferença de uma ordem de grandeza. Esse aumento da corrente  $OFF$  também está relacionado ao fato dos íons que migraram para o semicondutor quando a caracterização foi realizada com tempo de varredura maior não serem mais removidos com a aplicação da tensão contrária. Analisando  $V_T$  fica evidente que para o maior tempo o valor da tensão condiz com o Dispositivo-C,  $-0,46 \text{ V}$ , para o tempo seguinte (450 ms) a variação é de aproximadamente  $|0,20| \text{ V}$  a qual varia pouco para o terceiro tempo de varredura. No apêndice A pode ser consultada a Tabela 12 com os parâmetros para cada ciclo e a Tabela 18 com as médias e desvios padrões.

Os próximos dispositivos (Dispositivo-E e Dispositivo-F) possuem a mesma estrutura dos dispositivos já apresentados, porém caracterizados em um dia diferente e na sequência de tempos de varredura inversa, o primeiro com o tempo diminuindo e o segundo com o tempo

umentando. O objetivo de analisar novamente os mesmos dispositivos porém com a diferença na ordem das varreduras é para verificar se as características do dispositivo se mantêm as mesmas. Na Figura 21 é apresentada a mesma seqüência de gráficos apresentados na Figura 19 com as três curvas de transferência e saída com os diferentes tempos de varredura para o Dispositivo-E. A diferença entre os valores máximos de  $I_{DS}$  nos gráficos (a) e (e) é de aproximadamente  $-40 \mu A$ , essa diferença é maior do que no Dispositivo-D, porém significativamente menor do que no Dispositivo-C o que corrobora com a ideia de que quando o tempo maior é varrido primeiro o íons não são mais retirados do canal. O motivo para existir uma variação entre os dispositivos E e D é o fato de no caso do Dispositivo-E ser o primeiro contato do substrato utilizado, e para o Dispositivo-D ser o segundo podendo haver alguma influência pela caracterização realizada anteriormente em outro contato do mesmo substrato. Algo parecido ocorre também na curva de saída, a diferença entre  $I_{DS}$  máximo nos gráficos (b) e (f) é de aproximadamente  $-70 \mu A$ , novamente menor do que no Dispositivo-D e maior do que no Dispositivo-C.

**Tabela 5 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-E operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura.**

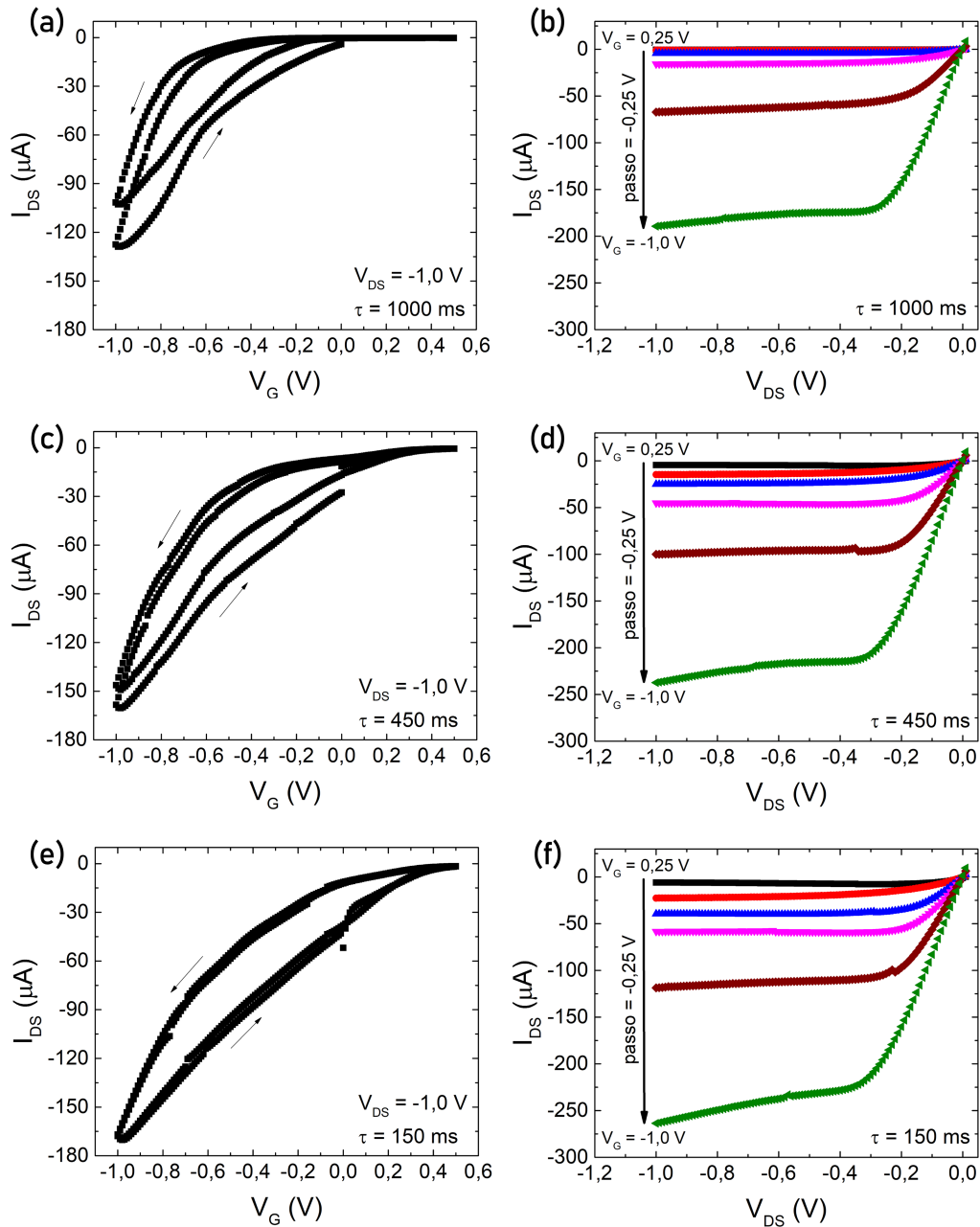
$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
1000	$3 \times 10^2$	-0,56	$1,7 \times 10^{-1}$	-265	$5 \times 10^{-4}$	[-0,97]
450	$2 \times 10^1$	-0,32	$1,1 \times 10^{-1}$	-953	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]
150	$1 \times 10^1$	-0,03	$0,6 \times 10^{-1}$	-778	$3 \times 10^{-4}$	[-0,99]

**Fonte: O autor.**

A Figura 22 traz a mesma seqüência de gráficos que a Figura 20 para o Dispositivo-E. No gráfico a) temos a curva  $I - V$  com o mesmo perfil da Figura 18(a) o que pode ser atribuído ao fato de serem dispositivos ambos no mesmo contato do mesmo substrato. E nos gráficos (b), (c) e (d) é possível ver um perfil de comportamento quem vem se repetindo para os dispositivos operando em regime de OECT. Os parâmetros extraídos para o Dispositivo-E encontram-se na Tabela 5 e diferente da análise já realizada para o Dispositivo-D, neste caso a tensão de *threshold* apresenta uma variação maior do que no caso anterior, principalmente entre os tempos de 450 e 150 ms. A Tabela 13 e a Tabela 19, ambas no apêndice A, contém os parâmetros extraídos para todos os ciclos e os valores médios e seus desvios padrões, respectivamente.

Por fim, na Figura 23 é apresentada a mesma seqüência de gráficos da Figura 17, agora para o Dispositivo-F. Novamente olhando para a diferença entre a intensidade máxima da corrente elétrica nas curvas de transferência nos gráficos (a) e (e) pode ser verificada uma

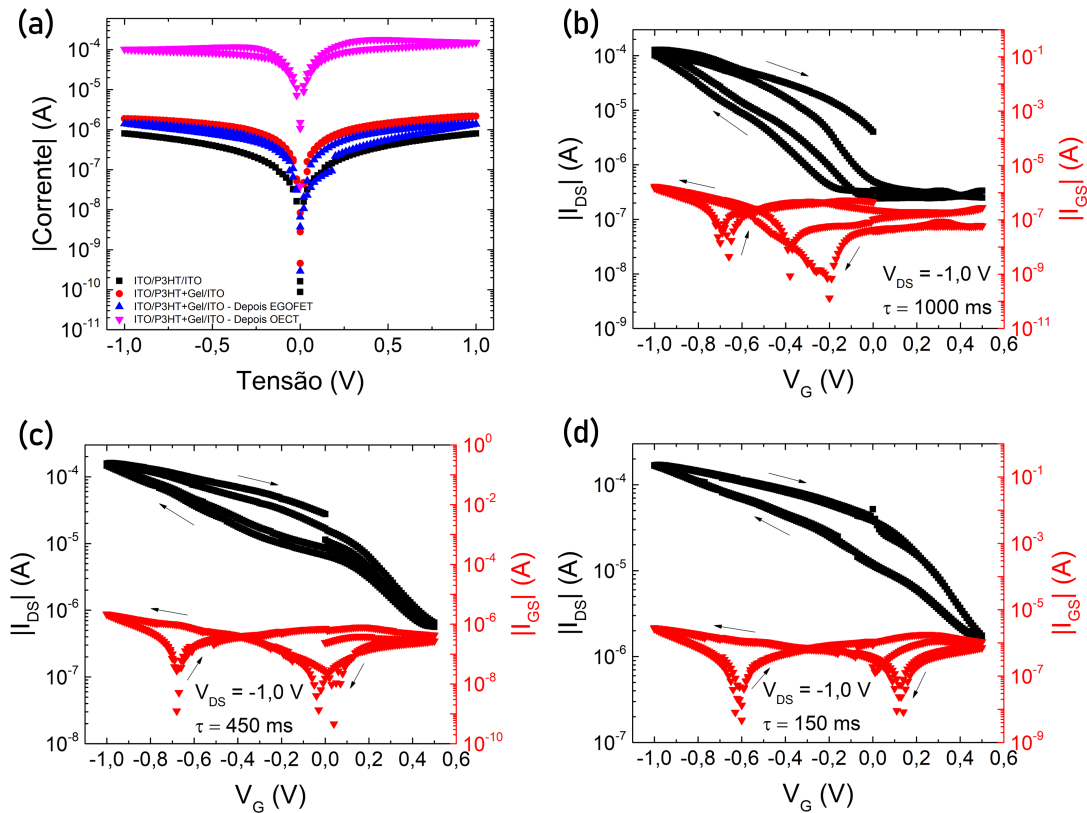
Figura 21 – Dispositivo-E operando em regime de OECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 1000, 450 e 150 ms.



Fonte: O autor.

variação de aproximadamente  $-65 \mu A$  e na curva de saída dos gráficos (b) e (f) essa variação é de aproximadamente  $-35 \mu A$ . Nesse caso a diferença entre os tempos de varredura não é tão evidente quanto no Dispositivo-C (que tem os tempos varridos na mesma ordem) devido ao fato de ser o segundo contado do substrato caracterizado enquanto no Dispositivo-C era o primeiro e ainda ser um dispositivo diferente, mesmo assim as curvas de transferência apresentam um perfil semelhante ao encontrado para o Dispositivo-C indo de encontro com a ideia de que o

**Figura 22 – Dispositivo-E operando em regime de OECT. (a) curva  $I - V$  simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 1000 ms; (c) 450 ms; (d) 150 ms.**



Fonte: O autor.

tempo de varredura tem influência para os OECTs. Na Figura 24, é apresentada uma sequência de gráficos mostrando claramente os padrões encontrados em OECTs com perfis similares aos demais dispositivos já analisados.

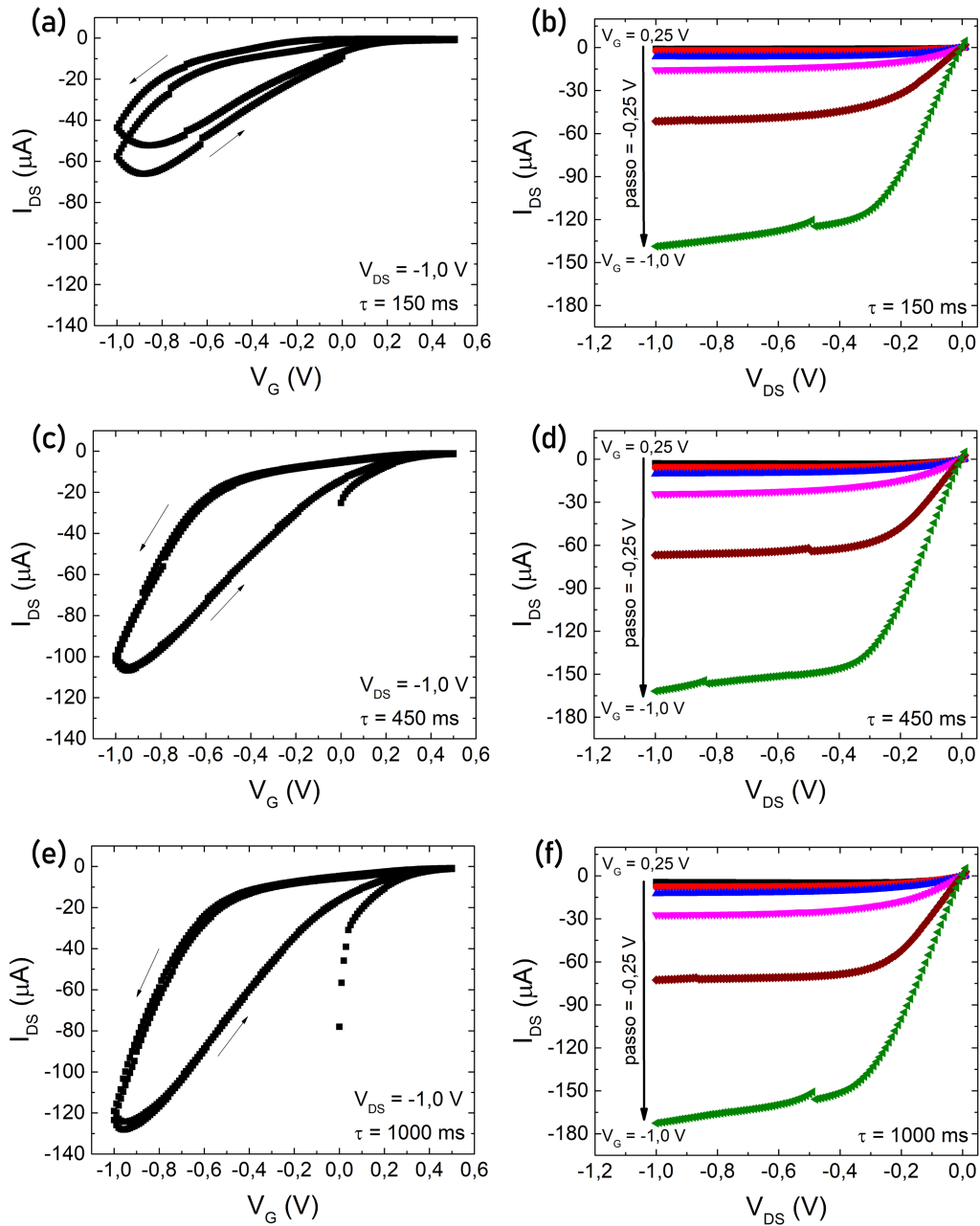
**Tabela 6 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-F operando em regime de OECT referentes ao primeiro ciclo de varredura.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
150	$1 \times 10^2$	-0,45	$0,5 \times 10^{-1}$	-318	$2 \times 10^{-4}$	[-0,99]
450	$2 \times 10^1$	-0,19	$0,5 \times 10^{-1}$	-1128	$3 \times 10^{-4}$	[-0,77]
1000	$2 \times 10^1$	-0,28	$0,8 \times 10^{-1}$	-1240	$3 \times 10^{-4}$	[-0,90]

Fonte: O autor.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros para o Dispositivo-F. Parâmetros como razão  $ON/OFF$ , mobilidade de saturação, *subthreshold swing* e transcondutância têm um comportamento análogo ao dos dispositivos anteriores operando em regime de OECT. O perfil para a tensão de *threshold* para este dispositivo apresentou um comportamento atípico, e por ser o único

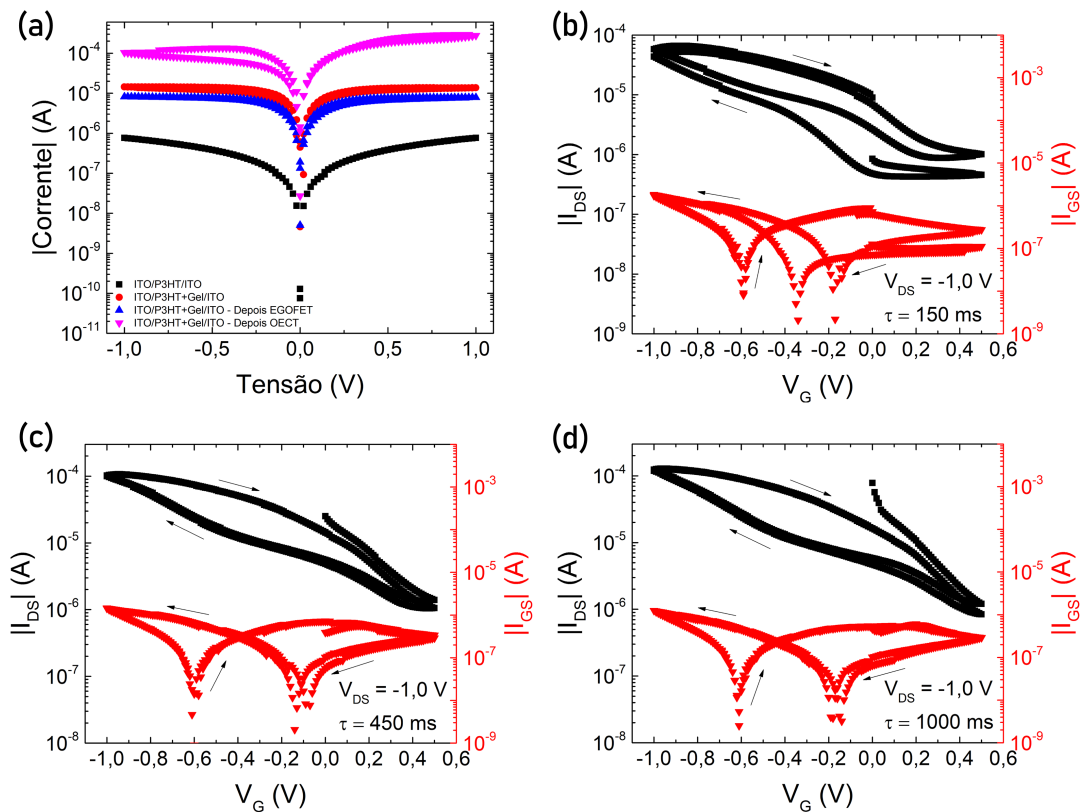
Figura 23 – Dispositivo-F operando em regime de OECT, curvas de transferência (a), (c) e (e) e curvas de saída (b), (d) e (f) para tempos de varredura de 150, 450 e 1000 ms.



Fonte: O autor.

não foi possível obter uma estatística fazendo com que esse perfil observado não seja conclusivo. No apêndice A está presente a Tabela 14 e Tabela 20 com os parâmetros para todos os ciclos e valores médios com desvios padrões, como para os demais dispositivos.

Figura 24 – Dispositivo-F operando em regime de OECT. (a) curva  $I - V$  simples. Curvas de transferência com símbolos em preto com corrente de fuga com símbolos em vermelho em escala logarítmica para tempos de varredura de: (b) 150 ms; (c) 450 ms; (d) 1000 ms.



Fonte: O autor.

### 4.3 AJUSTES COM MODELO LS

Como mencionado nas seções 1.1 e 1.2, um dos objetivos deste trabalho é utilizar o modelo LS [16] para realizar ajustes com base nos dados experimentais dos dispositivos operando em ambos os regimes, como EGOFET e OECT. Portanto, nesta seção o trabalho foi desenvolvido em cooperação com um dos desenvolvedores do modelo LS, o doutorando Marcos Luginieski, o qual gerou as simulações com base nos dados experimentais e alguns parâmetros apresentados na seção 4.1. A partir destes ajustes, foi possível realizar a análise e a discussão a seguir.

Da análise da seção 4.1, concluiu-se que o tempo de varredura em EGOFETs, durante a coleta de dados da curva de transferência, não apresenta dependência sobre a intensidade da corrente  $I_{DS}$ . Por não apresentar tal dependência, a principal informação daquele conjunto de dados é de que a varredura mais rápida é a melhor já que foi poupado tempo para gerar os dados e, que no caso foi a com intervalos de 150 ms. Este conjunto de dados é, portanto, o objeto de estudo nesta parte da análise sobre EGOFETs. Num primeiro momento, os ajustes realizados a

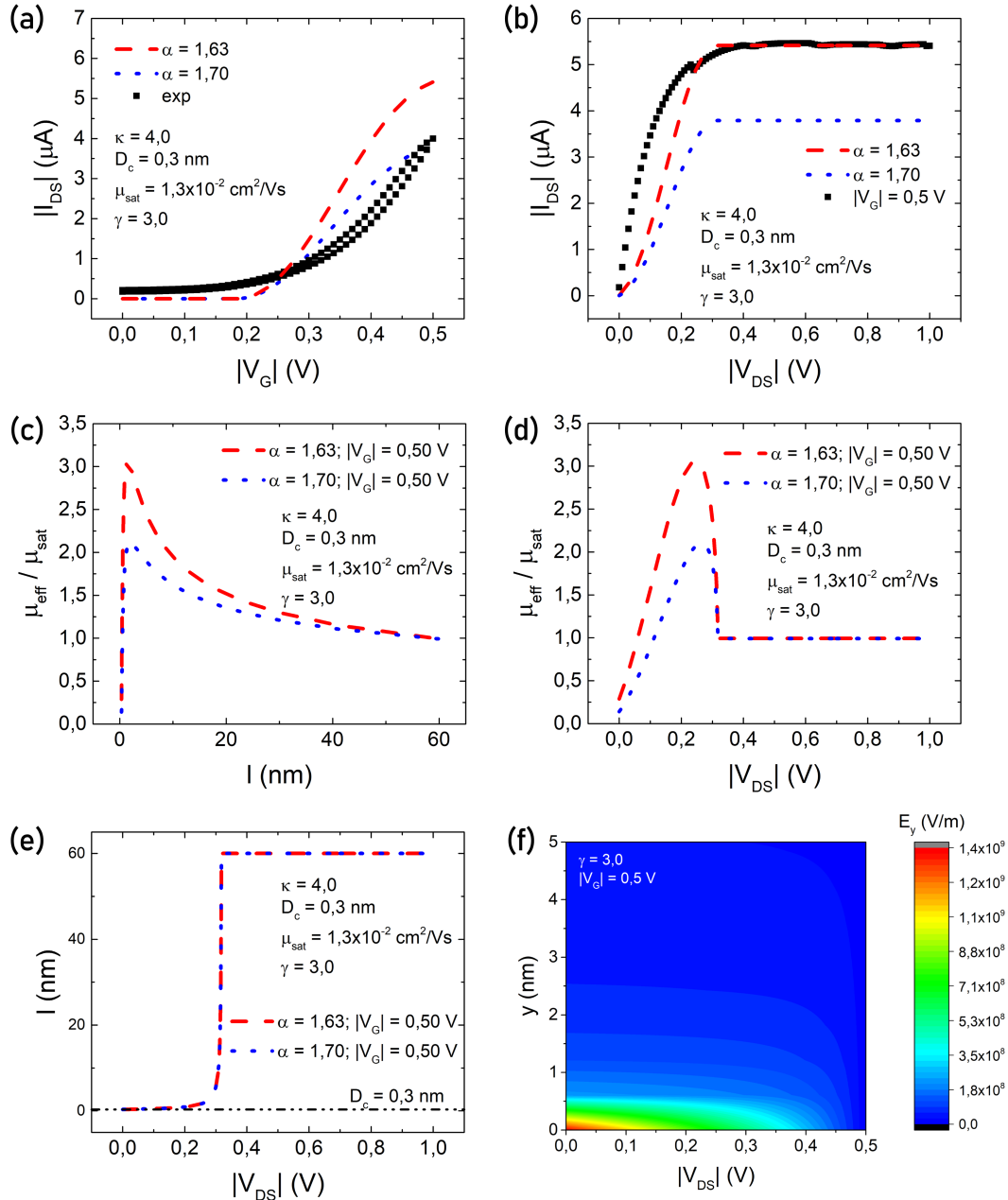
partir do modelo LS terão como foco: comparar valores de parâmetros macroscópicos extraídos do tradicional modelo de OFET com o modelo LS; trazer análises microscópicas propostas a partir do modelo LS, as quais não são possíveis de serem feitas pelo modelo tradicional de OFETs.

Na Figura 25 é apresentada uma sequência de gráficos para ajustes realizados a partir dos dados experimentais do Dispositivo-A operando com tempo de varredura de 150 ms e com mobilidade de saturação extraída a partir da curva de transferência, como demonstrado na seção 3.5, equação (18). A extração da mobilidade a partir da curva de transferência é o método mais tradicional usado na área, por isso, a primeira análise é baseada no parâmetro extraído dessa forma. Para simplificação os valores de corrente elétrica e tensões são considerados em módulo em todos os casos com ajustes com o modelo LS e os parâmetros  $\alpha$ ,  $\kappa$ ,  $D_c$  e  $\gamma$  presentes em cada gráfico já foram devidamente apresentados e discutidos na seção 2.2. Os gráficos (a) e (b) da Figura 25 são referentes às curvas de transferência e saída, respectivamente. A curva com símbolos em preto representa os dados experimentais enquanto as curvas com linhas são os ajustes com o modelo LS. Os parâmetros utilizados encontram-se nos gráficos, havendo a distinção de um único parâmetro para os ajustes com linhas em azul pontilhado e vermelho tracejado, que é o parâmetro  $\alpha$  referente ao tipo de percolação.

Ao ser analisada a relação entre a curva experimental e as curvas ajustadas a partir do modelo, na Figura 25(a) é possível verificar que o valor estabelecido para  $\alpha$  que se aproxima melhor da curva experimental é 1,7 indicando que o caminho percolativo dos portadores de carga no semicondutor é preferencialmente 3D [16, 26]. Porém, na curva de saída do gráfico (b), o mesmo valor para o parâmetro  $\alpha$  não coincide com os dados experimentais mas, atribuindo um novo valor de  $\alpha = 1,63$  é obtido um ajuste muito coerente com o regime de saturação na curva de saída. Numa rápida análise, nota-se que para gerar um bom ajuste das curvas experimentais (curva de transferência e curva de saída), há a necessidade de alterar parâmetros para gerar cada curva, o que não é esperado e nem desejado. Logo a seguir será feita uma discussão mais aprofundada sobre tal incoerência.

A Figura 25(c) mostra a razão entre mobilidade efetiva ( $\mu_{eff}$ ) e mobilidade de saturação ( $\mu_{sat}$ ) em função da espessura da camada de acumulação ( $l$ ) para cada  $\alpha$  atribuído anteriormente e, no gráfico (d) foi obtida a mesma razão entre mobilidade mas agora em função da tensão entre fonte e dreno ( $V_{DS}$ ). Vale a pena lembrar que a mobilidade de saturação é considerada um parâmetro constante no modelo LS. Com o gráfico (c) pode-se verificar que a mobilidade efetiva

Figura 25 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-A, operando como EGOFET, com tempo de varredura de 150 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva de transferência. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de  $|V_{DS}|$ ; (e) espessura da camada de acumulação em função de  $|V_{DS}|$ ; (f) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de  $|V_{DS}|$ .



Fonte: O autor.

normalizada pela mobilidade de saturação ao longo da espessura da camada de acumulação apresenta um perfil de crescimento da mobilidade seguida de um decréscimo para, por fim, atingir um valor constante que é o valor de mobilidade de saturação em ambos os casos. O valor de mobilidade efetiva máxima é, em comparação à  $\mu_{sat}$ , três vezes maior na região próxima a



2 nm de espessura para a curva tracejada vermelha e duas vezes maior para a curva pontilhada azul e vai decaindo conforme a camada de acumulação vai aumentando, até atingir o próprio valor de  $\mu_{sat}$  em  $l = 60$  nm. O fato do valor da razão entre as mobilidades ser maior do que 1, em determinadas regiões, indica que a mobilidade linear é maior do que a mobilidade de saturação ( $\mu_{lin} > \mu_{sat}$ ), o que ocorre em EGOFETs quando a espessura da camada de acumulação é muito menor que a espessura do semiconductor. O mesmo pode ser observado no gráfico (d) para  $|V_{DS}| = 0,3$  V e após essa tensão passa a ser igual a  $\mu_{sat}$ . Este resultado mostra uma visão microscópica que o modelo LS é capaz de fornecer, não proposto por nenhum outro modelo de transistor. Modelos como o de OFET consideram a mobilidade de efeito de campo no regime linear como um valor constante e, através do modelo LS é possível observar que há uma grande variação deste valor em função de  $l$  ou  $V_{DS}$ , não sendo apropriado usar o modelo de OFETs em EGTs, mesmo quando operando por efeito de campo como num EGOFET.

Na Figura 25(e), é mostrada a espessura da camada de acumulação em função de  $V_{DS}$  e esse gráfico confirma o exposto acima mostrando que para  $|V_{DS}| = 0,3$  V a espessura da camada de acumulação passa a ser igual a espessura do semiconductor. No gráfico (f) é exposto o perfil do campo elétrico na interface dielétrico/semiconductor, também em função de  $V_{DS}$ , que mostra que a intensidade do campo elétrico na interface dielétrico/semiconductor é uma ordem de grandeza maior na região até 0,1 V em relação a intensidade do campo elétrico para  $|V_{DS}| = 0,5$  V indicando que a densidade de portadores de carga nessa região é maior do que ao longo do resto da interface e *bulk* do canal do dispositivo.

Tomando como referência o conjunto de parâmetros extraídos das curvas de transferência e curva de saída da Figura 25(a) e (b), nota-se a incoerência já exposta nesta dissertação na Figura 2. Uma rápida mensagem obtida, até o presente momento, é que tal incoerência entre os valores extraídos/ajustados: (i) não dependem do tempo de varredura da medida em EGOFETs e, principalmente, (ii) mostram um forte indicativo de que determinado(s) parâmetro(s) de EGTs podem ser dependentes de qual tensão está sendo varrida ( $V_G$  ou  $V_{DS}$ ). Assim, alguns parâmetros extraídos podem apresentar diferentes valores se confrontados com medidas elétricas com varredura em  $V_G$  (curva de transferência) ou  $V_{DS}$  (curva de saída) e tal incoerência é um alerta de que alguma das formas escolhidas para a extração de parâmetros pode não ser apropriada.

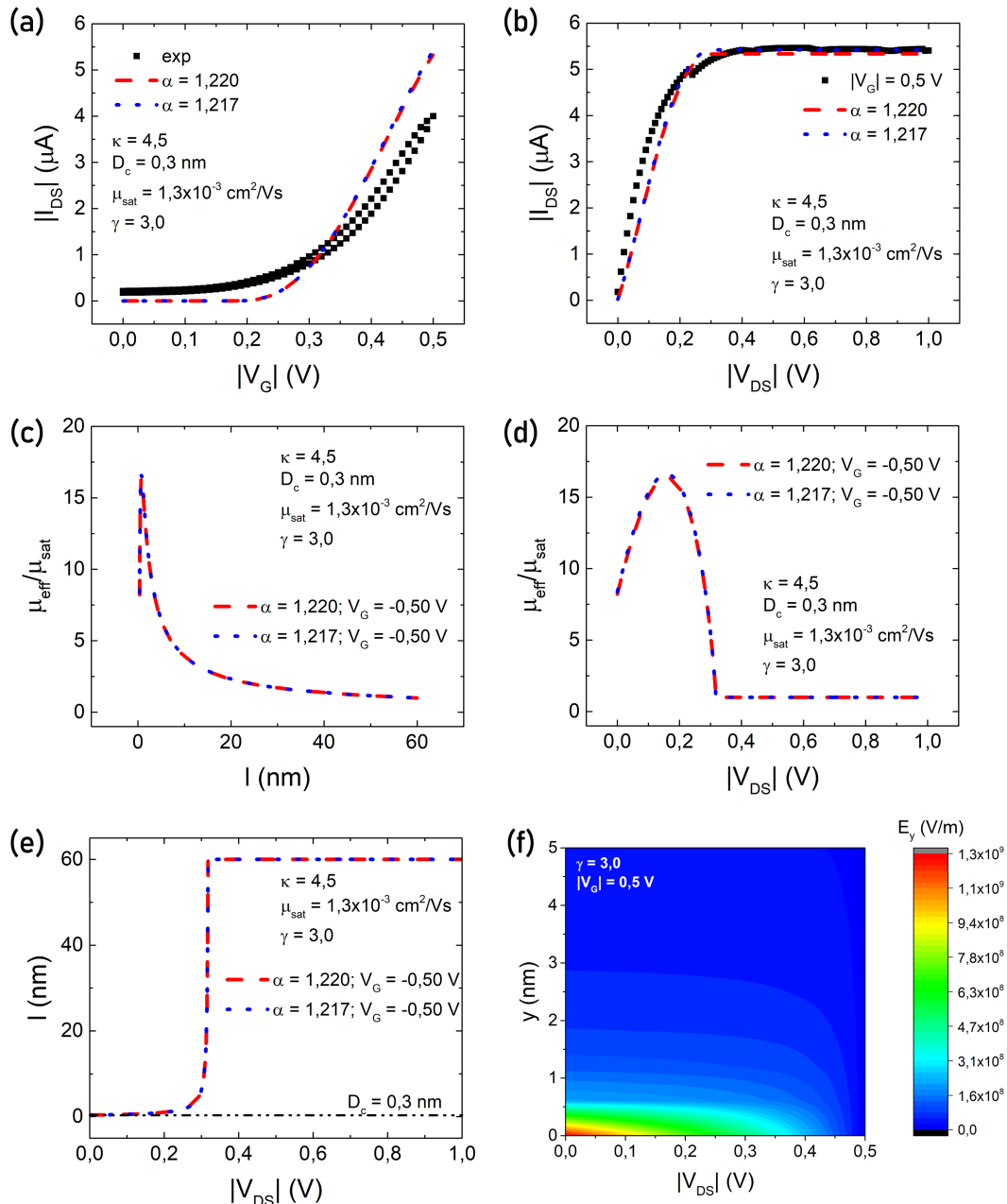
Algumas literaturas científicas [30] já têm mostrado que a mobilidade efetiva (mobilidade de efeito de campo, no regime linear e/ou saturação) pode apresentar dependência com  $V_G$ , uma vez que o eletrodo porta é responsável por popular o canal com portadores de carga

majoritários para operar no modo de acumulação (ou minoritários, para o modo de depleção). Baseando-se nesta informação, e lembrando que o modelo LS determina que a mobilidade de saturação é uma constante, optou-se por extrair o valor da mobilidade de saturação a partir da curva de saída, mantendo constante  $V_G$ . Com base em outros trabalhos, foi considerado que a mobilidade de saturação é de fato, e somente, um valor constante para ser usado no modelo LS quando  $V_G = \text{cte}$ . Com esta decisão, nos dados a seguir poderá ser verificado se este é um fato relevante a ser considerado na análise.

A Figura 26 contém a mesma sequência de gráficos e mesmos dados experimentais analisados anteriormente na Figura 25, porém agora com a mobilidade de saturação extraída da curva de saída. A extração desse parâmetro é feita pelo próprio modelo LS, onde deve ser enfatizado que a primeira curva simulada é para a curva de saída, seguida da simulação da curva de transferência. No gráfico da Figura 26(a), é apresentada a nova simulação realizada para a curva de transferência com o novo valor de mobilidade de saturação ( $\mu_{sat} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) para dois valores de  $\alpha$ , 1,220 e 1,217. Ainda neste caso, não existe um ajuste bem coerente entre a curva de transferência experimental e curvas simuladas. Porém, para a curva de saída no gráfico (b) pode ser observado que para  $\alpha = 1,217$  (pontilhado azul) a sobreposição com os dados experimentais se dá de maneira precisa no regime de saturação, e para esse novo valor de  $\alpha$  o caminho percolativo é 2D, de acordo com o a literatura proposta por Luginieski *et al.*[26]. Até o presente momento, os ajustes propostos mostram que a mobilidade de saturação  $\mu_{sat}$  pode apresentar valores bem diferenciados quando extraída da curva de transferência e da curva de saída. Baseado nas informações já mencionadas anteriormente, de que a mobilidade efetiva é dependente da geometria do transistor bem como da densidade de portadores de carga no canal, acreditamos que para afirmar que a  $\mu_{sat} = \text{cte}$ , esta deve ser extraída da curva de saída. Como o eletrodo porta é o responsável por induzir portadores de carga no canal, é fácil concluir que durante a medida da curva de transferência o valor da mobilidade de saturação não é constante. O valor de  $\mu_{sat}$  extraído da curva de transferência é, na verdade, um valor médio da mobilidade no regime de saturação. Porém, ao realizar a curva de saída,  $\mu_{sat}$  não apresenta variação, uma vez que  $V_G = \text{cte}$  e, este é o valor a ser considerado no modelo LS.

Nos gráficos (c) e (d) da Figura 26, foi obtida uma mobilidade efetiva atingindo um valor aproximadamente 17 vezes maior do que a mobilidade de saturação quando  $l = 2 \text{ nm}$  e  $|V_{DS}| = 0,2 \text{ V}$ , um valor bem maior do que na simulação anterior (Figura 25) e com  $\mu_{eff} = \mu_{sat}$  para  $l = 60 \text{ nm}$  e  $|V_{DS}| = 0,3 \text{ V}$ . Nos gráficos (e) e (f) da Figura 26, foram obtidos os mesmos

Figura 26 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-A, operando como EGFET, com tempo de varredura de 150 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva saída. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de  $|V_{DS}|$ ; (e) espessura da camada de acumulação em função de  $|V_{DS}|$ ; (f) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de  $|V_{DS}|$ .



Fonte: O autor.

resultados obtidos anteriormente, com a espessura da camada de acumulação se tornando igual a espessura do semicondutor para  $|V_{DS}| = 0,3 \text{ V}$  e o perfil do campo elétrico na interface sem nenhuma variação significativa. Na Tabela 7 é apresentado de uma forma mais resumida os parâmetros  $\alpha$  e  $\mu_{\text{sat}}$  para o Dispositivo-A caracterizado com tempo de varredura de 150 ms, para

as situações onde  $\mu_{sat}$  foi extraído a partir da curva de transferência e curva de saída.

**Tabela 7 – Valores de  $\alpha$  e  $\mu_{sat}$  extraídos da curva de transferência (CT) e da curva de saída (CS) para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET.**

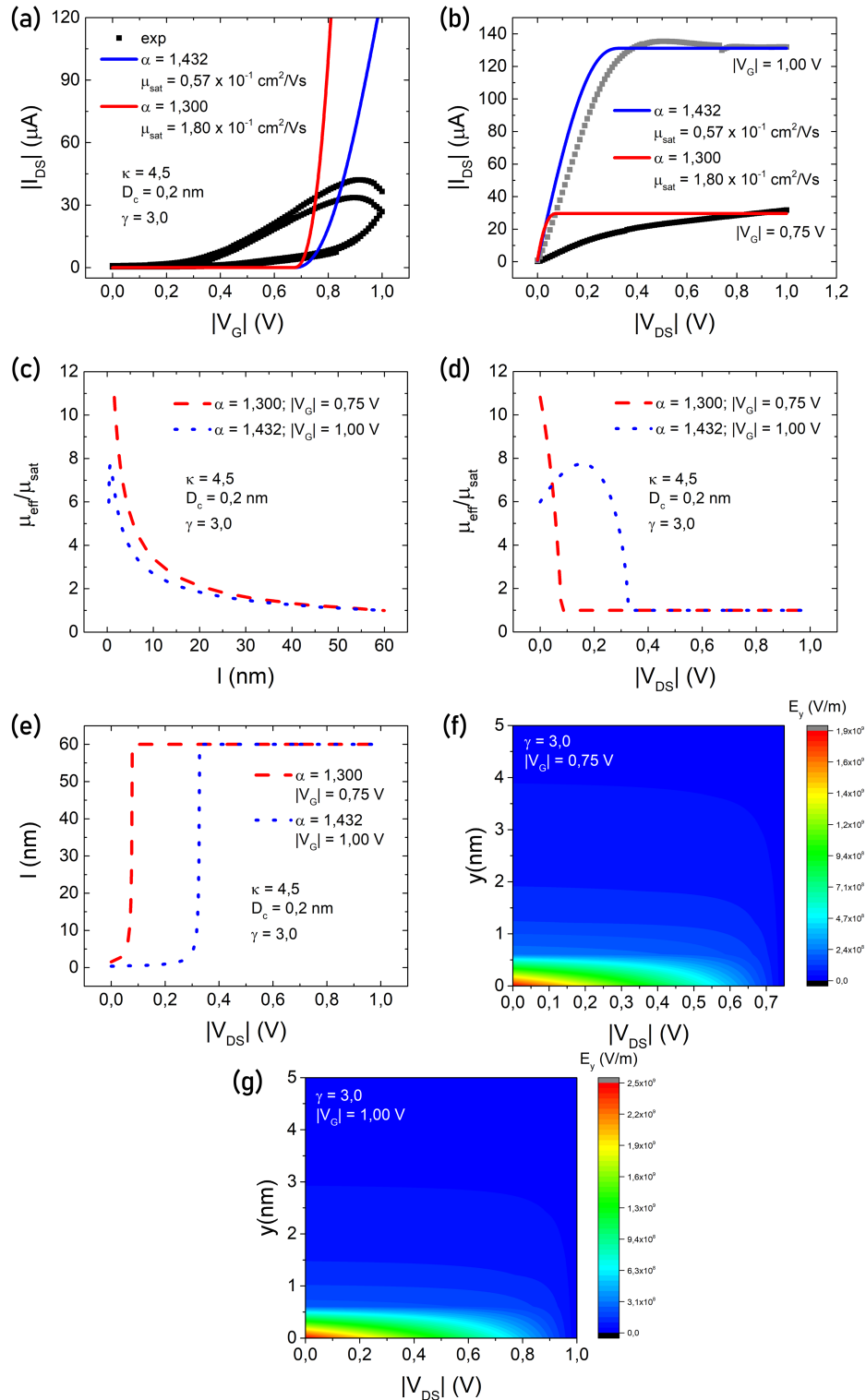
Origem de $\mu_{sat}$	$\tau$ para $(I_{DS} \times V_G)$	$ V_G $ - cte.	$\alpha$	$\mu_{sat}$ para EGOFET
CT	150 ms	–	1,630	$1,3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
			1,700	$1,3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
CS	150 ms	0,5 V	1,220	$1,3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
			1,217	$1,3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

**Fonte: O autor.**

Após a análise realizada para o dispositivo operando em regime de EGOFET, foi concluído que a mobilidade de saturação é constante quando extraída da curva de saída. Como no caso dos OECTs existem diferenças bastante relevantes nas intensidade da corrente quando variado os tempos de varredura caracterizados, foi decidido realizar o ajuste apenas com a mobilidade extraída da curva de saída para os tempos de varredura de 150 e 1000 ms. Na Figura 27 é apresentada uma sequência de gráficos referentes ao ajuste do Dispositivo-C para tempo de varredura de 150 ms. Nesta sequência foram obtidos dois valores para o parâmetro  $\alpha$  e seus respectivos valores para  $\mu_{sat}$ , um para  $|V_G| = 0,75 \text{ V}$  e outro para  $|V_G| = 1,00 \text{ V}$ .

O gráfico da Figura 27(a) é referente ao ajuste da curva de transferência, onde pode ser vista uma grande discrepância entre os valores experimentais (símbolos pretos) e os ajustes (linhas contínuas vermelha e azul). Vale a pena lembrar que, no OECT a variação entre a intensidade da corrente na curva de transferência e na curva de saída são devido a dois fatores: (i) o tempo de varredura da medida na curva de transferência, que é mais rápido do que o tempo de transiente da corrente iônica (tempo necessário para íons entrar em equilíbrio) e; (ii) de acordo com a conclusão obtida da Figura 25 e Figura 26, porque a mobilidade de saturação é dependente de  $V_G$ . Portanto, o intuito foi mostrar a discrepância de modo proposital para ressaltar que o ajuste adequado é obtido a partir da curva de saída, como pode ser observado no gráfico (b). Com a afirmação de que  $\mu_{sat}$  é dependente de  $V_G$ , foi realizado ajuste para dois valores de tensão na porta mostrando que de fato a mobilidade apresenta tal dependência. Existem ainda diferenças entre os ajustes realizados para cada valor de  $V_G$ , nos gráficos (c) e (d) pode se verificar que para  $\alpha = 1,432$  (curva tracejada vermelha) a razão entre  $\mu_{eff}$  e  $\mu_{sat}$  tem inicialmente uma região crescente até  $l = 2 \text{ nm}$  e  $|V_{DS}| = 0,2 \text{ V}$ , respectivamente, já para  $\alpha = 1,300$  (curva pontilhada azul) existe somente a região decrescente. Outra diferença visível no gráfico (d) é a tensão entre fonte e dreno na qual a mobilidade efetiva se torna igual a de saturação, em aproximadamente

Figura 27 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-C, operando como OECT, com tempo de varredura de 150 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva de saída. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de  $|V_{DS}|$ ; (e) espessura da camada de acumulação em função de  $|V_{DS}|$ ; (f) e (g) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de  $|V_{DS}|$ .



Fonte: O autor.

0,1 V para a curva tracejada vermelha e aproximadamente 0,3 V para a curva pontilhada azul. No gráfico (e) pode ser visualizada a relação entre a espessura da camada de acumulação e a tensão entre fonte e dreno, ficando evidente que a mobilidade é dependente da distribuição de portadores de carga ao longo do canal e da tensão aplicada na porta. Nos gráficos (f) e (g) é apresentado o perfil do campo elétrico, nestes pode ser observado que o campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor é mais intenso na região até 0,2 V quando a tensão aplicada na porta é maior.

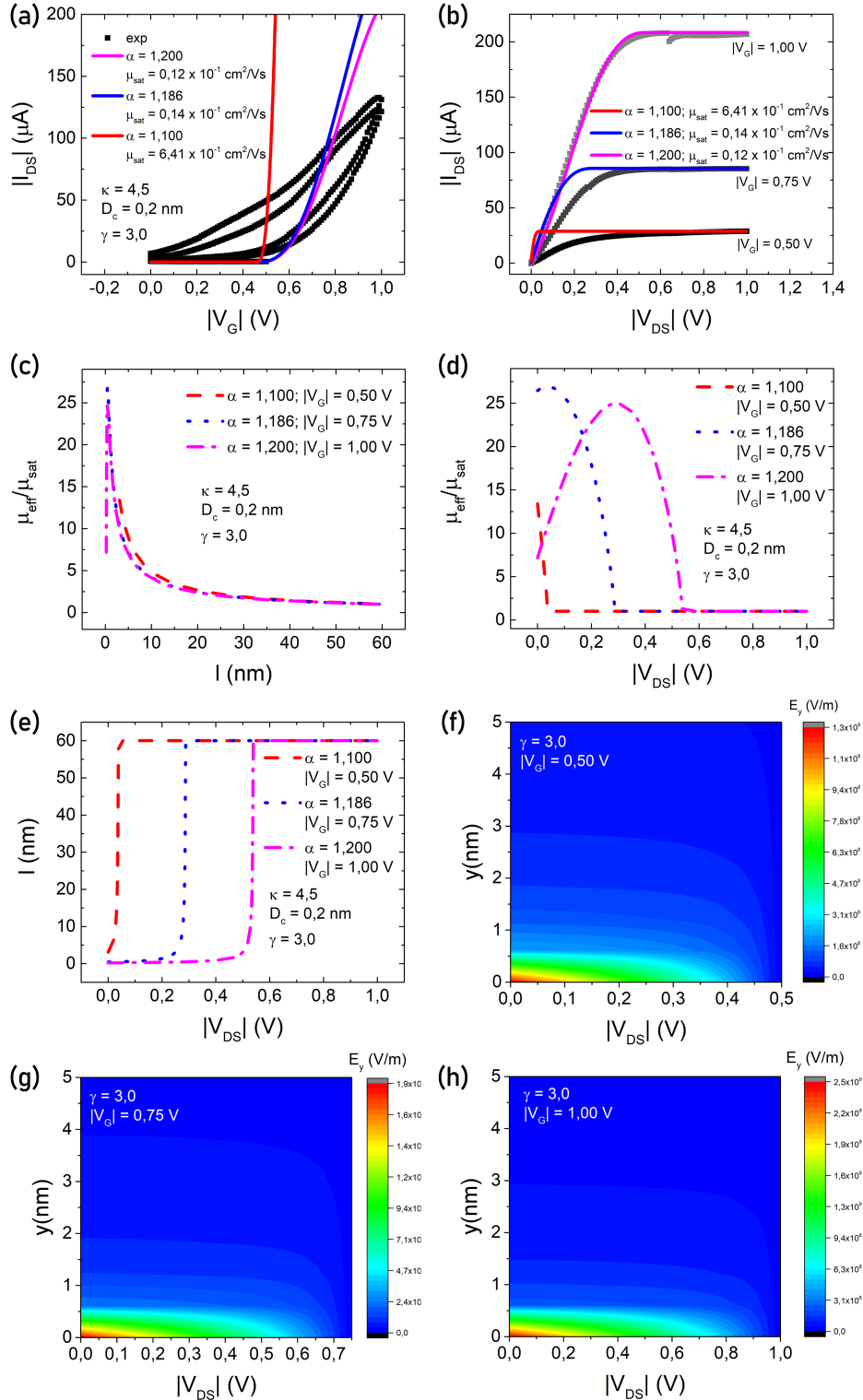
Na Figura 28, é apresentada a mesma sequência de gráficos para o Dispositivo-C, agora caracterizado com tempo de varredura de 1000 ms. Para esse tempo de varredura foi realizado o ajuste com três valores para  $\alpha$  e  $\mu_{sat}$ , referentes as tensões na porta de 0,50, 0,75 e 1,00 V. No gráfico (a) pode ser observado novamente a discrepância entre dados experimentais e ajustes, e no gráfico (b) a boa relação, principalmente na região de saturação, pelos mesmos motivos já explicados na discussão da Figura 27. No gráfico (c) está presente a relação entre mobilidade com região crescente e decrescente apenas para  $\alpha = 1,200$ . Já no gráfico (d) é visível o mesmo padrão encontrado no caso anterior, para uma maior tensão na porta é necessária uma maior tensão entre fonte e dreno para fazer a espessura da camada de acumulação se tornar igual a espessura do semicondutor. E para os gráficos (f), (g) e (h) se mantém a relação entre intensidade do campo elétrico e  $V_G$ . Na Tabela 8 pode se verificar os parâmetros  $\alpha$  e seus respectivos  $\mu_{sat}$ , como para o OECT não foi feito ajuste com base nos parâmetros extraídos da curva de transferência os valores de  $\alpha$  representam apenas os parâmetros extraídos da curva de saída. Analisando os dados condensados na tabela pode ser verificado que a relação entre  $\alpha$  e  $\mu_{sat}$  são inversamente proporcionais para o mesmo tempo de varredura e possuem valores menores para tempo de varredura maior.

**Tabela 8 – Valores de  $\alpha$  e  $\mu_{sat}$  extraídos da curva de transferência (CT) através do modelo de OFET e da curva de saída (CS) através do modelo LS, para o Dispositivo-C operando em regime de OECT.**

Origem de $\mu_{sat}$	$\tau$ para ( $I_{DS} \times V_G$ )	$ V_G $ - cte.	$\alpha$	$\mu_{sat}$ para OECT
CT	150 ms	–	–	$0,81 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
CS	150 ms	0,75 V	1,300	$1,80 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
		1,00 V	1,432	$0,57 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
CT	1000 ms	–	–	$1,39 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
CS	1000 ms	0,50 V	1,100	$6,41 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
		0,75 V	1,186	$0,14 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
		1,00 V	1,200	$0,12 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

**Fonte: O autor.**

Figura 28 – Ajustes com modelo LS para o Dispositivo-C, operando como OECT, com tempo de varredura de 1000 ms realizado com valor de mobilidade de saturação extraída da curva saída. (a) curva de transferência; (b) curva de saída; (c) mobilidade normalizada em função da espessura da camada de acumulação; (d) mobilidade normalizada em função de  $|V_{DS}|$ ; (e) espessura da camada de acumulação em função de  $|V_{DS}|$ ; (f), (g) e (h) campo elétrico na interface dielétrico/semicondutor em função de  $|V_{DS}|$ .



Fonte: O autor.

## 5 CONCLUSÕES

Após o estudo de EGTs operando em regime de EGOFET e OECT, foi verificado a partir dos resultados experimentais que, dentre os tempos de varredura ( $\tau$ ) testados nesse trabalho durante a realização da curva de transferência, a intensidade da corrente não apresenta dependência com  $\tau$  para dispositivos operando como EGOFET, ou seja, para transistores modulados por efeito de campo. O menor tempo de varredura testado foi o de 150 ms, o que mostra ser um tempo de varredura adequado para realizar medidas elétricas em EGOFETs. Dos ajustes com o modelo de OFET foram extraídos os parâmetros típicos macroscópicos de transistores, sendo que alguns destes foram comparados aos parâmetros extraídos do modelo LS. Do modelo LS, foram também extraídas informações sobre parâmetros microscópicos, sendo esta a primeira ampla análise proposta na literatura, com base em tal modelo. Dos ajustes com o modelo LS, foi observado que não é uma boa opção usar o modelo de OFET para extrair todos os parâmetros, uma vez que este mostra diferença dos extraídos pelo modelo LS, tais como: (i) a espessura da camada de acumulação ( $l$ , considerada no modelo LS) é na maioria das vezes bem diferente da espessura do semicondutor ( $D$ , considerada no modelo de OFETs) e, como consequência disso; (ii) a mobilidade linear ( $\mu_{lin}$ ) não é um valor constante; (iii) a mobilidade de saturação ( $\mu_{sat}$ ) possui dependência com a tensão na porta ( $V_G$ ), que nos traz a informação de que  $\mu_{sat} = \text{cte}$  somente quando extraído da curva de saída. Assim, a típica extração do valor de  $\mu_{sat}$  a partir da curva de transferência, como proposto no modelo de OFET, fornece apenas um valor médio do mesmo. Isso significa que  $\mu_{sat}$  extraído da curva de transferência pode variar muito com a escolha do limite de dados usado para o ajuste, e o valor deste parâmetro pode não ser confiável e tão pouco comparável entre diferentes trabalhos. Além disso, se o valor médio for usado para gerar uma simulação de curva de saída, este sempre irá gerar incoerência no ajuste de dados experimentais.

Já para os EGTs operando em regime de OECT, o tempo de varredura na curva de transferência proporciona diferenças bem relevantes, dentre os valores usados nesse estudo. Dos dados experimentais é possível observar que, ao realizar o mesmo tipo de curva e com o mesmo intervalo de tensão, que a intensidade final da corrente *ON* pode variar em até 350 %, quando o valor de  $\tau$  usado foi de 150 ms e 1000 ms. Tal informação é extremamente relevante, pois se o tempo de varredura  $\tau$  for mais rápido que o tempo de transiente da corrente iônica, os parâmetros extraídos apresentarão dependência temporal. Em outras palavras, os parâmetros podem não



ser tão confiáveis para quantificar a eficiência de um transistor, ou então, para ser usado como um parâmetro de sensor. A literatura da área já mostrou em vários trabalhos o fato de que o tempo de transiente na corrente, devido ao movimento dos íons para dentro do canal, é algo relevante em OECTs. Porém, tal análise se faz relevante nestas literaturas em medidas com a tensão pulsada na porta, não ressaltando a importância de levar esta informação para análise das curvas de transferência e saída. A análise mostra: (i) o quão importante é relatar dados de OECTs (aplicados como sensores, dispositivos neuromórficos, etc), junto ao tempo de varredura para que de fato possa haver reprodutibilidade de dados; (ii) se o tempo de varredura ( $\tau$ ) da medida for mais rápido do que o tempo de transiente da corrente devido o movimento de íons, o OECT não estará operando no seu máximo de eficiência.

Por fim, este trabalho traz importantes informações sobre a dependência que parâmetros macroscópicos e microscópicos podem apresentar com o tempo de varredura da medida. Acredita-se que estas informações são muito úteis para EGTs aplicados como sensores. A quantificação do sinal de um sensor como este (com sensibilidade e seletividade), é muitas vezes baseada nos valores dos parâmetros macroscópicos extraídos e, este não pode apresentar variação com o tempo.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Medidas com tensão de porta pulsada são medidas típicas para analisar o transiente entre regimes de operação. Tais medidas farão parte de um trabalho futuro juntamente com um estudo para determinar o limiar inferior do tempo de varredura para os EGOFETs (estabelecer qual seria o tempo mínimo onde se obtém os mesmo resultados) e superior para os OECTs (tentando identificar qual seria o tempo de varredura que possibilitaria o melhor desempenho do dispositivo). Uma outra abordagem seria a mudança do eletrólito de porta para verificar qual é a dependência com o tipo de íon. E ainda realizar uma melhor análise e compreensão dos dados obtidos a partir do modelo LS.

## REFERÊNCIAS

- 1 BARDEEN, J.; BRATTAIN, W. H. Physical principles involved in transistor action. **Physical Review Journals**, American Physical Society, v. 75, p. 1208–1225, Apr 1949.
- 2 WHITE, Henry S.; KITTLESEN, Gregg P.; WRIGHTON, Mark S. Chemical derivatization of an array of three gold microelectrodes with polypyrrole: fabrication of a molecule-based transistor. **Journal of the American Chemical Society**, American Chemical Society, v. 106, p. 5375–5377, 1984.
- 3 VIEIRA, Douglas Henrique; NOGUEIRA, Gabriel Leonardo; MORAIS, Rogério Miranda; FUGIKAWA-SANTOS, Lucas; SEIDEL, Keli Fabiana; ALVES, Neri. Zno-based electrolyte-gated transistor (egt) applied as multiparametric uv-sensing device. **Sensors and Actuators A: Physical**, p. 113989, 2022. ISSN 0924-4247.
- 4 KIM, Se; HONG, Kihyon; XIE, Wei; LEE, Keun; ZHANG, Sipei; LODGE, Timothy; FRISBIE, C. Electrolyte-gated transistors for organic and printed electronics. **Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)**, v. 25, 04 2013.
- 5 HAMEDI, Mahiar; HERLOGSSON, Lars; CRISPIN, Xavier; MARCILLA, Rebeca; BERGGREN, Magnus; INGANAS, Olle. Fiber-embedded electrolyte-gated field-effect transistors for e-textiles. **Advanced Materials**, v. 21, p. 573 – 577, 12 2008.
- 6 CUNHA, Inês; BARRAS, Raquel; GREY, Paul; GASPAR, Diana; FORTUNATO, Elvira; MARTINS, R.; PEREIRA, Luis. Reusable cellulose-based hydrogel sticker film applied as gate dielectric in paper electrolyte-gated transistors. **Advanced Functional Materials**, v. 27, p. 1606755, 03 2017.
- 7 TORRICELLI, F.; ADRAHTAS, Demetra; BAO, Zhenan; BERGGREN, Magnus; BISCARINI, Fabio; BONFIGLIO, Annalisa; BORTOLOTTI, Carlo; FRISBIE, C.; MACCHIA, Eleonora; MALLIARAS, George; MCCULLOCH, Iain; MOSER, Maximilian; NGUYEN, Thuc-Quyen; OWENS, Roisin; SALLEO, Alberto; SPANU, Andrea; TORSI, Luisa. Electrolyte-gated transistors for enhanced performance bioelectronics. **Nature Reviews Methods Primers**, v. 1, p. 66, 10 2021.
- 8 BAO, Zhenan; LOCKLIN, Jason. **Organic Field-Effect Transistors**. [S.l.]: CRC Press, 2007. 616 p. (Optical Science and Engineering).
- 9 KYMISSIS, I. **Organic Field Effect Transistors: Theory, Fabrication and Characterization**. 1. ed. [S.l.]: Springer US, 2009. 168 p. (Integrated Circuits and Systems).

- 10 BUTH, F.; KUMAR, D.; STUTZMANN, Martin; GARRIDO, J. Electrolyte-gated organic field-effect transistors for sensing applications. **Applied Physics Letters**, v. 98, p. 153302–153302, 04 2011.
- 11 WANG, Denjung; VINCENT, Noel; PIRO, Benoit. Electrolytic gated organic field-effect transistors for application in biosensors—a review. **Electronics**, v. 5, p. 9, 02 2016.
- 12 STRAKOSAS, Xenofon; BONGO, Manuelle; OWENS, Roisin. The organic electrochemical transistor for biological applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, 04 2015.
- 13 WHITE, Scott; DORFMAN, Kevin; FRISBIE, C. Label-free dna sensing platform with low-voltage electrolyte-gated transistors. **Analytical chemistry**, v. 87, 01 2015.
- 14 LELEUX, Pierre; RIVNAY, Jonathan; LONJARET, Thomas; BADIER, Jean-Michel; BÉNAR, Christian; HERVÉ, Thierry; CHAUVEL, Patrick; MALLIARAS, George. Organic electrochemical transistors for clinical applications. **Advanced healthcare materials**, v. 4, 01 2015.
- 15 MULLA, Mohammad Y.; TORSI, Luisa; MANOLI, Kyriaki. Chapter seventeen - electronic biosensors based on egofets. *In*: PELOSI, Paolo; KNOLL, Wolfgang (Ed.). **Odorant Binding and Chemosensory Proteins**. [S.l.]: Academic Press, 2020, (Methods in Enzymology, v. 642). p. 403–433.
- 16 LUGINIESKI, Marcos. **Dependência da espessura efetiva no transporte de portadores de carga em transistores orgânicos de efeito de campo com porta eletrolítica**. jan. 2022. 109 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, jan. 2022.
- 17 BERNARDS, Daniel; MALLIARAS, George. Steady-state and transient behavior of organic electrochemical transistors. **Advanced Functional Materials**, v. 17, p. 3538 – 3544, 10 2007.
- 18 FARIA, Gregório C.; DUONG, Duc T.; SALLES, Alberto. On the transient response of organic electrochemical transistors. **Organic Electronics**, v. 45, p. 215–221, 2017. ISSN 1566-1199.
- 19 KAPHLE, V.; PAUDEL, Pushpa; DAHAL, Drona; KRISHNAN, Raj; LÜSSEM, Björn. Finding the equilibrium of organic electrochemical transistors. **Nature Communications**, v. 11, 05 2020.
- 20 MELZER, Katharina; BRAENDLEIN, Marcel; POPESCU, Bogdan; POPESCU, Dan; LUGLI, Paolo; SCARPA, Giuseppe. Characterization and simulation of electrolyte-gated organic field-effect transistors. **Faraday discussions**, v. 174, 10 2014.

- 21 HOROWITZ, Gilles. Interfaces in organic field-effect transistors. **Organic Electronics**, v. 223, 01 2010.
- 22 SHUR, M. **Physics of semiconductor devices**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990.
- 23 SEIDEL, Keli F. **Análise do Transporte de Portadores de Carga em Transistores de Efeito de Campo em Arquitetura Planar e Desenvolvimento de Transistores em Arquitetura Vertical**. nov. 2011. 97 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, nov. 2011.
- 24 CHOI, Hyun Ho; CHO, Kilwon; FRISBIE, C.; SIRRINGHAUS, Henning; PODZOROV, Vitaly. Critical assessment of charge mobility extraction in fets. **Nature Materials**, v. 17, p. 2–7, 12 2017.
- 25 SZE, S. M.; NG, Kwok K. **Physics of Semiconductor Devices**. 3. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2007. 815 p.
- 26 LUGINIESKI, Marcos; KOEHLER, Marlus; SERBENA, Jose P. M.; SEIDEL, Keli F. **General model for charge carriers transport in electrolyte-gated transistors**. arXiv, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2211.09266>.
- 27 MOURA, Elton A. de; LUGINIESKI, Marcos; SERBENA, José P. M.; SEIDEL, Keli F. On–off ratio improvement in organic electrochemical transistors from addition of a pmma layer at the electrolyte dielectric/semiconductor interface. **Journal of Applied Physics**, v. 129, n. 15, p. 154502, 2021.
- 28 LEE, Keun; KANG, Moon Sung; ZHANG, Sipei; GU, Yuanyan; LODGE, Timothy; FRISBIE, C. "cut and stick"rubbery ion gels as high capacitance gate dielectrics. **Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)**, v. 24, p. 4457–62, 08 2012.
- 29 LAIHO, Ari; HERLOGSSON, Lars; FORCHHEIMER, Robert; CRISPIN, Xavier; BERGGREN, Magnus. Controlling the dimensionality of charge transport in organic thin-film transistors. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, p. 15069–73, 08 2011.
- 30 LEE, Sungsik; NATHAN, Arokia; YE, Yan; GUO, Yuzheng; ROBERTSON, John. Localized tail states and electron mobility in amorphous znon thin film transistors. **Scientific reports**, v. 5, p. 13467, 08 2015.

## APÊNDICE A – TABELAS COM PARÂMETROS EXTRAÍDOS PARA TODOS OS DISPOSITIVOS

**Tabela 9 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET para todos os ciclos de operação.**

$\tau$ (ms)	Ciclo	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
150	1	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,3 \times 10^{-2}$	-511	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	2	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,3 \times 10^{-2}$	-568	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	3	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,2 \times 10^{-2}$	-612	$4 \times 10^{-5}$	[-0,49]
250	1	$1 \times 10^1$	-0,17	$1,1 \times 10^{-2}$	-893	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	2	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,2 \times 10^{-2}$	-705	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	3	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,2 \times 10^{-2}$	-630	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
350	1	$2 \times 10^1$	-0,19	$1,3 \times 10^{-2}$	-673	$3 \times 10^{-5}$	[-0,47]
	2	$2 \times 10^1$	-0,19	$1,2 \times 10^{-2}$	-621	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	3	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,2 \times 10^{-2}$	-564	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
450	1	$2 \times 10^1$	-0,18	$1,4 \times 10^{-2}$	-522	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	2	$3 \times 10^1$	-0,18	$1,3 \times 10^{-2}$	-455	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	3	$3 \times 10^1$	-0,17	$1,2 \times 10^{-2}$	-442	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]

**Fonte: O autor.**

**Tabela 10 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-B operando em regime de EGOFET para todos os ciclos de operação.**

$\tau$ (ms)	Ciclo	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
450	1	$1 \times 10^1$	-0,12	$0,8 \times 10^{-2}$	-2064	$3 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	2	$1 \times 10^1$	-0,13	$0,9 \times 10^{-2}$	-2002	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	3	$1 \times 10^1$	-0,12	$0,9 \times 10^{-2}$	-1991	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
350	1	$1 \times 10^1$	-0,10	$0,9 \times 10^{-2}$	-2752	$3 \times 10^{-5}$	[-0,48]
	2	$1 \times 10^1$	-0,11	$0,9 \times 10^{-2}$	-2382	$2 \times 10^{-5}$	[-0,43]
	3	$1 \times 10^1$	-0,10	$0,9 \times 10^{-2}$	-2144	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
250	1	$1 \times 10^1$	-0,10	$0,8 \times 10^{-2}$	-2668	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	2	$1 \times 10^1$	-0,10	$0,8 \times 10^{-2}$	-2496	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	3	$1 \times 10^1$	-0,18	$0,9 \times 10^{-2}$	-2631	$2 \times 10^{-5}$	[-0,48]
150	1	$1 \times 10^1$	-0,08	$0,8 \times 10^{-2}$	-3818	$2 \times 10^{-5}$	[-0,49]
	2	$1 \times 10^1$	-0,09	$0,8 \times 10^{-2}$	-2702	$2 \times 10^{-5}$	[-0,39]
	3	$1 \times 10^1$	-0,09	$0,8 \times 10^{-2}$	-2561	$2 \times 10^{-5}$	[-0,47]

**Fonte: O autor.**

**Tabela 11 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-C operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação.**

$\tau$ (ms)	Ciclo	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
150	1	$1 \times 10^2$	-0,67	$0,8 \times 10^{-1}$	-344	$2 \times 10^{-4}$	[-0,98]
	2	$1 \times 10^2$	-0,65	$0,7 \times 10^{-1}$	-371	$7 \times 10^{-4}$	[-0,99]
450	1	$2 \times 10^2$	-0,57	$1,6 \times 10^{-1}$	-361	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]
	2	$2 \times 10^2$	-0,55	$1,5 \times 10^{-1}$	-408	$5 \times 10^{-4}$	[-0,90]
1000	1	$2 \times 10^2$	-0,46	$1,4 \times 10^{-1}$	-391	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]
	2	$1 \times 10^2$	-0,42	$1,3 \times 10^{-1}$	-505	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]

**Fonte: O autor.****Tabela 12 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-D operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação.**

$\tau$ (ms)	Ciclo	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
1000	1	$3 \times 10^2$	-0,46	$1,4 \times 10^{-1}$	-329	$4 \times 10^{-4}$	[-0,99]
	2	$2 \times 10^2$	-0,34	$1,1 \times 10^{-1}$	-462	$4 \times 10^{-4}$	[-0,99]
450	1	$4 \times 10^1$	-0,25	$0,9 \times 10^{-1}$	-1274	$5 \times 10^{-4}$	[-0,94]
	2	$4 \times 10^1$	-0,26	$1,0 \times 10^{-1}$	-1124	$5 \times 10^{-4}$	[-0,80]
150	1	$2 \times 10^1$	-0,19	$0,7 \times 10^{-1}$	-1504	$4 \times 10^{-4}$	[-0,99]
	2	$2 \times 10^1$	-0,21	$0,7 \times 10^{-1}$	-1654	$4 \times 10^{-4}$	[-0,88]

**Fonte: O autor.****Tabela 13 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-E operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação.**

$\tau$ (ms)	Ciclo	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
1000	1	$3 \times 10^2$	-0,56	$1,7 \times 10^{-1}$	-265	$5 \times 10^{-4}$	[-0,97]
	2	$5 \times 10^2$	-0,47	$1,5 \times 10^{-1}$	-239	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]
450	1	$2 \times 10^1$	-0,32	$1,1 \times 10^{-1}$	-953	$5 \times 10^{-4}$	[-0,99]
	2	$2 \times 10^1$	-0,25	$0,9 \times 10^{-1}$	-930	$5 \times 10^{-4}$	[-0,86]
150	1	$1 \times 10^1$	-0,03	$0,6 \times 10^{-1}$	-778	$3 \times 10^{-4}$	[-0,99]
	2	$1 \times 10^1$	0,05	$0,5 \times 10^{-1}$	-738	$5 \times 10^{-4}$	[-0,75]

**Fonte: O autor.**

**Tabela 14 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-F operando em regime de OECT para todos os ciclos de operação.**

$\tau$ (ms)	Ciclo	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}}$	$V_T$ (V)	$\mu_{sat}$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$S$ (mV/dec)	$g_{m,sat}$ (S)	$[V_G$ (V)]
150	1	$1 \times 10^2$	-0,45	$0,5 \times 10^{-1}$	-318	$2 \times 10^{-4}$	[-0,99]
	2	$2 \times 10^1$	-0,35	$0,4 \times 10^{-1}$	-418	$2 \times 10^{-4}$	[-0,99]
450	1	$2 \times 10^1$	-0,19	$0,5 \times 10^{-1}$	-1128	$3 \times 10^{-4}$	[-0,77]
	2	$2 \times 10^1$	-0,26	$0,6 \times 10^{-1}$	-1085	$4 \times 10^{-4}$	[-0,87]
1000	1	$2 \times 10^1$	-0,28	$0,8 \times 10^{-1}$	-1240	$3 \times 10^{-4}$	[-0,90]
	2	$3 \times 10^1$	-0,33	$0,9 \times 10^{-1}$	-1032	$4 \times 10^{-4}$	[-0,96]

**Fonte: O autor.**



Tabela 15 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-A operando em regime de EGOFET para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões.

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}} \pm \delta$	$\bar{V}_T \pm \delta$ (V)	$\bar{\mu}_{sat} \pm \delta$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\bar{S} \pm \delta$ (mV/dec)	$\bar{g}_{m,sat} \pm \delta$ (S)	$\bar{V}_G \pm \delta$ (V)
150	$(2,1 \pm 0,2) \times 10^1$	$-0,177 \pm 0,003$	$(1,254 \pm 0,033) \times 10^{-2}$	$-564 \pm 51$	$(2,92 \pm 0,60) \times 10^{-5}$	$[-0,49 \pm 0,00]$
250	$(1,6 \pm 0,3) \times 10^1$	$-0,177 \pm 0,007$	$(1,180 \pm 0,038) \times 10^{-2}$	$-743 \pm 135$	$(2,51 \pm 0,08) \times 10^{-5}$	$[-0,49 \pm 0,00]$
350	$(2,0 \pm 0,3) \times 10^1$	$-0,185 \pm 0,004$	$(1,246 \pm 0,062) \times 10^{-2}$	$-619 \pm 54$	$(2,51 \pm 0,06) \times 10^{-5}$	$[-0,48 \pm 0,01]$
450	$(2,4 \pm 0,3) \times 10^1$	$-0,178 \pm 0,004$	$(1,315 \pm 0,062) \times 10^{-2}$	$-473 \pm 43$	$(2,66 \pm 0,07) \times 10^{-5}$	$[-0,49 \pm 0,00]$

Fonte: O autor.

Tabela 16 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-B operando em regime de EGOFET para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões.

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}} \pm \delta$	$\bar{V}_T \pm \delta$ (V)	$\bar{\mu}_{sat} \pm \delta$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\bar{S} \pm \delta$ (mV/dec)	$\bar{g}_{m,sat} \pm \delta$ (S)	$\bar{V}_G \pm \delta$ (V)
450	$(1,1 \pm 0,0) \times 10^1$	$-0,123 \pm 0,002$	$(0,846 \pm 0,014) \times 10^{-2}$	$-2019 \pm 40$	$(2,14 \pm 0,35) \times 10^{-5}$	$[-0,49 \pm 0,00]$
350	$(1,0 \pm 0,0) \times 10^1$	$-0,102 \pm 0,007$	$(0,880 \pm 0,043) \times 10^{-2}$	$-2426 \pm 307$	$(2,18 \pm 0,38) \times 10^{-5}$	$[-0,47 \pm 0,03]$
250	$(0,9 \pm 0,1) \times 10^1$	$-0,106 \pm 0,003$	$(0,841 \pm 0,014) \times 10^{-2}$	$-2598 \pm 90$	$(1,91 \pm 0,01) \times 10^{-5}$	$[-0,49 \pm 0,01]$
150	$(0,7 \pm 0,5) \times 10^1$	$-0,087 \pm 0,004$	$(0,834 \pm 0,010) \times 10^{-2}$	$-3027 \pm 689$	$(1,94 \pm 0,10) \times 10^{-5}$	$[-0,44 \pm 0,05]$

Fonte: O autor.

**Tabela 17 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-C operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}} \pm \delta$	$\bar{V}_T \pm \delta$ (V)	$\bar{\mu}_{sat} \pm \delta$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\bar{S} \pm \delta$ (mV/dec)	$\bar{g}_{m,sat} \pm \delta$ (S)	$\bar{V}_G \pm \delta$ (V)
150	$(0,9 \pm 0,2) \times 10^2$	$-0,658 \pm 0,018$	$(0,75 \pm 0,84) \times 10^{-1}$	$-358 \pm 19$	$(4,18 \pm 3,32) \times 10^{-4}$	$[-0,99 \pm 0,01]$
450	$(1,8 \pm 0,2) \times 10^2$	$-0,560 \pm 0,013$	$(1,53 \pm 0,55) \times 10^{-1}$	$-384 \pm 33$	$(4,96 \pm 0,45) \times 10^{-4}$	$[-0,95 \pm 0,06]$
1000	$(1,6 \pm 0,9) \times 10^2$	$-0,444 \pm 0,030$	$(1,34 \pm 0,66) \times 10^{-1}$	$-448 \pm 81$	$(5,06 \pm 0,03) \times 10^{-4}$	$[-0,99 \pm 0,00]$

**Fonte: O autor.**

**Tabela 18 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-D operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}} \pm \delta$	$\bar{V}_T \pm \delta$ (V)	$\bar{\mu}_{sat} \pm \delta$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\bar{S} \pm \delta$ (mV/dec)	$\bar{g}_{m,sat} \pm \delta$ (S)	$\bar{V}_G \pm \delta$ (V)
1000	$(2,1 \pm 0,8) \times 10^2$	$-0,403 \pm 0,083$	$(1,241 \pm 0,174) \times 10^{-1}$	$-427 \pm 49$	$(4,01 \pm 0,32) \times 10^{-4}$	$[-0,99 \pm 0,00]$
450	$(4,4 \pm 0,1) \times 10^1$	$-0,257 \pm 0,003$	$(0,957 \pm 0,031) \times 10^{-1}$	$-1199 \pm 106$	$(5,09 \pm 0,08) \times 10^{-4}$	$[-0,87 \pm 0,10]$
150	$(2,2 \pm 0,3) \times 10^1$	$-0,198 \pm 0,011$	$(0,740 \pm 0,004) \times 10^{-1}$	$-1578 \pm 107$	$(3,73 \pm 0,18) \times 10^{-4}$	$[-0,94 \pm 0,08]$

**Fonte: O autor.**

**Tabela 19 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-E operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}} \pm \delta$	$\bar{V}_T \pm \delta$ (V)	$\bar{\mu}_{sat} \pm \delta$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\bar{S} \pm \delta$ (mV/dec)	$\bar{g}_{m,sat} \pm \delta$ (S)	$\bar{V}_G \pm \delta$ (V)
1000	$(4,2 \pm 1,4) \times 10^2$	$-0,513 \pm 0,066$	$(1,597 \pm 0,158) \times 10^{-1}$	$-252 \pm 18$	$(5,03 \pm 0,46) \times 10^{-4}$	$[-0,98 \pm 0,01]$
450	$(2,1 \pm 0,3) \times 10^1$	$-0,285 \pm 0,055$	$(0,991 \pm 0,097) \times 10^{-1}$	$-942 \pm 16$	$(4,59 \pm 0,00) \times 10^{-4}$	$[-0,93 \pm 0,09]$
150	$(1,4 \pm 0,1) \times 10^1$	$0,012 \pm 0,055$	$(0,546 \pm 0,059) \times 10^{-1}$	$-758 \pm 28$	$(3,98 \pm 0,79) \times 10^{-4}$	$[-0,87 \pm 0,17]$

**Fonte: O autor.**

**Tabela 20 – Parâmetros extraídos para o Dispositivo-F operando em regime de OECT para valores médios entre ciclos e seus desvios padrões.**

$\tau$ (ms)	$\frac{I_{ON}}{I_{OFF}} \pm \delta$	$\bar{V}_T \pm \delta$ (V)	$\bar{\mu}_{sat} \pm \delta$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\bar{S} \pm \delta$ (mV/dec)	$\bar{g}_{m,sat} \pm \delta$ (S)	$\bar{V}_G \pm \delta$ (V)
150	$(6,7 \pm 5,9) \times 10^1$	$-0,399 \pm 0,074$	$(0,458 \pm 0,216) \times 10^{-1}$	$-368 \pm 71$	$(1,92 \pm 0,12) \times 10^{-4}$	$[-0,99 \pm 0,00]$
450	$(2,0 \pm 0,2) \times 10^1$	$-0,223 \pm 0,048$	$(0,551 \pm 0,515) \times 10^{-1}$	$-1107 \pm 31$	$(3,46 \pm 0,39) \times 10^{-4}$	$[-0,82 \pm 0,07]$
1000	$(2,4 \pm 0,3) \times 10^1$	$-0,305 \pm 0,037$	$(0,831 \pm 0,625) \times 10^{-1}$	$-1136 \pm 147$	$(3,85 \pm 0,68) \times 10^{-4}$	$[-0,93 \pm 0,04]$

**Fonte: O autor.**