

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIA HELENA LACERDA DE OLIVEIRA FUNG

**TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA UTILIZANDO MÉIS DE
ABELHAS NATIVAS DO BRASIL COMO ELETRÓLITO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2022

MARIA HELENA LACERDA DE OLIVEIRA FUNG

**TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA UTILIZANDO
MÉIS DE ABELHAS NATIVAS DO BRASIL COMO
ELETRÓLITO**

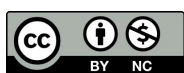
***HONEY-GATED TRANSISTORS BASED ON BRAZILIAN
STINGLESS BEES HONEY AS ELECTROLYTE***

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

Orientadora: Prof^a. Dra. Keli Fabiana Seidel
Coorientador: Prof. Dr. Jose Pedro Mansueto Serbena

CURITIBA

2022



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não 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**



MARIA HELENA LACERDA DE OLIVEIRA

**TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA UTILIZANDO MÉIS DE ABELHAS NATIVAS DO BRASIL
COMO ELETRÓLITO**

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

Data de aprovação: 02 de Fevereiro de 2022

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

Prof.a Jaqueline Kappke, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Neri Alves, Doutorado - Universidade Estadual Paulista - Unesp

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 02/02/2022.

Dedico este trabalho a todos que acreditaram nele, aos meus amigos e familiares pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às professora Keli F. Seidel por acreditar e me orientar e dedicação além de todo o conhecimento, obrigada pela confiança no meu trabalho, pelo respeito.

Dedico este trabalho ao meu marido, Andrew Way M. Fung que sempre apoiou as minhas escolhas e incentivou os meus estudos.

Agradeço ao Prof. José Pedro Mansueto Serbena pelo apoio durante e todo aprendizado no grupo de pesquisa.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Prof.a Jaqueline Kappke e Prof Neri Alves pela disponibilidade e contribuições dadas ao trabalho.

A todos os colegas do departamento, Angelo, Hélio, Ana, Danielle, Marcos que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

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

Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.

Marie Curie.

RESUMO

LACERDA DE OLIVEIRA FUNG, Maria Helena . **TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA UTILIZANDO MÉIS DE ABELHAS NATIVAS DO BRASIL COMO ELETRÓLITO**. 2022. 62 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Física) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

Neste trabalho, foram desenvolvidos transistores com porta eletrolítica utilizando o mel como eletrólito. Os méis selecionados para serem aplicados são de abelhas nativas sem ferrão colhidos no estado do Paraná. A utilização de mel em transistores vem sendo investigada na literatura da área, onde demonstra-se ser: (i) um método de manipulação rápida por ser usado *in-natura* mantendo suas características químicas como viscosidade, (ii) barato quando comparado a outros eletrólitos comerciais, (iii) não-tóxico e biodegradável, sendo ainda, (iv) biocompatível o que lhe permite ser aplicado em bio-sensoriamento. Os transistores desenvolvidos possuem eletrodos interdigitados fonte e dreno de óxido de estanho e índio (ITO) e canal composto de poli(3-hexiltiofeno-2,5-dil) (P3HT) depositados a partir de processo de *spin-coating*. O eletrodo porta (*gate*) é constituído por uma ponta de platina (Pt), a qual fica parcialmente imersa dentro da gota de mel que compõem a camada dielétrica do transistor. Três diferentes méis de abelhas foram testados e estudados neste trabalho, sendo o mel de abelhas: Jataí (*Tetragonisca angustula*), Iraí (*Nannotrigona testaceicornis*) and Tubuna (*Scaptotrigona bipunctata*). Os parâmetros de eficiência extraídos, a partir da caracterização elétrica dos transistores, foram: produto da mobilidade de efeito de campo com a capacitância ($\mu_{eff} \cdot C_i$), tensão de *threshold* (V_t), transcondutância (g_m) e razão *on-off*. Tais parâmetros foram comparados a outros trabalhos referentes a transistores com porta eletrolítica utilizando mel de abelhas *Apis Mellifera* como eletrólito e publicados recentemente. Os três méis testados demonstraram potencial para serem utilizados nesta classe de transistores e, os um determinado conjunto de parâmetros extraídos a partir das medidas elétricas possuem similaridades entre si. Por fim, foram obtidos transistores com porta eletrolítica nomeados em inglês como, *Honey-Gated Transistor*, os quais operam com faixa de tensão de até $|2|V$, razão *on-off* na ordem de $\sim 10^1$ e, corrente elétrica na ordem de μA . Vislumbra-se que estes transistores poderão ser aplicados como uma plataforma versátil e de baixo custo em sensoriamento e bio-sensoriamento.

Palavras-chave: Transistor com porta eletrolítica. Utilização de material *eco-friendly*. Mel de abelha como eletrólito. Mel de abelhas sem ferrão. *Honey-gated transistor*.

ABSTRACT

LACERDA DE OLIVEIRA FUNG, Maria Helena . **HONEY-GATED TRANSISTORS BASED ON BRAZILIAN STINGLESS BEES HONEY AS ELECTROLYTE**. 2022. 62 p. Dissertation (Mestre in Physics) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

In this work, it was developed electrolyte-gated transistors using honey as electrolyte. The different honeys chosen to be applied are from native Brazilian stingless bees collected in the state of Paraná (south of Brazil). The use of honey as an electrolyte-layer in transistors has already been investigated in the literature, where it shows properties like: (i) a quick manipulation method for being used in-natura, maintaining its chemical characteristics such as viscosity, (ii) cheap, when compared to other commercial electrolytes, (iii) non-toxic and biodegradable, and also (iv) biocompatible, allowing it to be applied in biosensing, e.g. The developed transistors have interdigitated source and drain electrodes of tin indium oxide (ITO) and a channel composed of poly(3-hexylthiophene-2,5-dil) (P3HT), deposited by spin-coating process. The gate electrode is constituted by a platinum tip (Pt), which is partially immersed inside the honey drop that composes the transistor's dielectric layer. Three different bees honeys were tested and studied in this work, being the honey from: Jataí (*Tetragonisca angustula*), Iraí (*Nannotrigona testaceicornis*) and Tubuna (*Scaptotrigona bipunctata*). The efficiency parameters extracted from the electrical characterization of the transistors were: the product of the field effect mobility with capacitance ($\mu_{eff} \cdot C_i$), threshold voltage (V_t), transconductance (g_m) and the on-off ratio. Such parameters were compared to other recently published works related to electrolyte-gated transistors using honey from *Apis Mellifera* bees as electrolyte. The three tested honeys showed potential to be used in this class of transistors, and a certain set of parameters extracted from the electrical measurements have similarities among them. Finally, Honey-Gated Transistor were successfully obtained, operating in a voltage range of up to $|2| V$, on-off ratio in the order of $\sim 10^1$, and output current in the order of μA . We aim that that these transistors could be applied as a versatile and low cost platform in sensing and biosensing.

Keywords: Electrolyte-gated transistor. Use of eco-friendly material. Bee honey as electrolyte. Stingless bees honey. Honey-gated transistor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração de um transistor de efeito de campo com a arquitetura de eletrodos inferiores e <i>gate</i> de topo.	13
Figura 2 – Ilustrações de regimes de operação de transistores de efeito de campo e suas respectivas curvas de saída ($I_d - V_d$), para o: (a) Regime linear; (b) início do regime de saturação, na condição onde ocorre o <i>pinch-off</i> e (c) Regime de Saturação.	17
Figura 3 – Exemplo de curva característica ($I_d - V_d$), onde V_d (V) é a tensão aplicada no dreno e I_d (μA) a corrente medida entre fonte e dreno para um transistor de efeito de campo. Este gráfico é também conhecido como Curva de Saída, demonstrando os regimes linear e de saturação, para três diferentes valores de V_g	18
Figura 4 – A linha sólida preta demonstra um exemplo de curva de Transferência ($I_d - V_g$) para um transistor do tipo OECT baseado em BBL onde V_g (V) é a tensão aplicada no <i>gate</i> e I_d (mA) a corrente medida entre fonte e dreno. A linha tracejada vermelha, referente ao eixo da direita, representa a transcondutância (g_m).	18
Figura 5 – Fotos e imagem das dimensões do substrato pré-padronizados utilizado na construção do transistor. Este consiste em eletrodos de ITO interdigitados, os quais atuam como eletrodos fonte e dreno e têm dimensões gerais do canal de $30mm \times 50 \mu m$	27
Figura 6 – Estrutura molecular do Poly(3-hexylthiophene-2-5 diyl) (P3HT).	28
Figura 7 – Imagens de filmes finos de P3HT após a deposição sobre os eletrodos interdigitados de ITO.	29
Figura 8 – Imagem das abelhas: Jataí, Tubuna e Iraí, respectivamente.	30
Figura 9 – Imagem das amostras de méis utilizadas neste trabalho, da esquerda para a direita, mel de abelhas: Jataí, Tubuna e Iraí, respectivamente.	31
Figura 10 – Configuração dos equipamentos e suporte de fixação para a realização de medidas elétricas nos transistores com porta eletrolítica.	32
Figura 11 – Estrutura/arquitetura do transistor com porta eletrolítica: ITO (fonte) / P3HT (canal) / ITO (dreno); Mel como dielétrico de porta e, Au como eletrodo <i>gate</i> (depositado sobre uma folha de papel alumínio para dar sustentação mecânica).	33
Figura 12 – Medidas de caracterização $I - V$ de dispositivos baseado em eletrodos interdigitados de ITO e canal de P3HT com comprimento de canal de $50 \mu m$ e $W = 30mm$ largura do canal. Curva $I - V$ simples (a) e (b) são referente à duas diferentes amostras com mesma estrutura: ITO-P3HT-ITO (curva vermelha) e ITO-P3HT com mel-ITO (curva preta).	34
Figura 13 – Foto do dispositivo durante sua construção. Estrutura: ITO (fonte) / P3HT (canal) / ITO (dreno) com a gota de mel presente sobre um único dispositivo (figura da esquerda) e, sobre todos os cinco dispositivos da amostra, junto ao eletrodo <i>gate</i> (imagem da direita).	34
Figura 14 – Curva de transferência (3 ciclos) (a) e curva característica (b) para o transistor com <i>gate</i> de ouro eletrólito de mel abelhas Jataí.	36

Figura 15 – Gráficos da: a) Curva de Transferência e b) curva característica para o transistor com a estrutura: ITO/P3HT/Au com eletrólito de mel de abelhas Jataí.	36
Figura 16 – Estrutura do transistor com porta eletrolítica: ITO (fonte) / P3HT (canal) / ITO (dreno); Mel como eletrólito e, uma ponta de platina (Pt) como eletrodo <i>gate</i>	37
Figura 17 – Caracterização elétrica do transistor - 1, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Jataí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra (símbolo preto), (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT (símbolo vermelho) e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor (símbolo azul), respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).	39
Figura 18 – Caracterização elétrica do transistor - 2, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelha Jataí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).	41
Figura 19 – Caracterização elétrica do transistor - 3 com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Iraí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas)	42
Figura 20 – Caracterização elétrica do transistor - 4, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Iraí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).	44

Figura 21 – Caracterização elétrica do transistor - 5, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Tubuna como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).	45
Figura 22 – Caracterização elétrica do transistor - 6, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Tubuna como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).	46
Figura 23 – Comparação entre transistores com porta eletrolítica para as estruturas: ITO / P3HT / MEL como mel de abelhas Jataí e Iraí.	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.0.1	OBJETIVOS	12
1.0.1.1	Objetivo Geral	12
1.0.1.2	Objetivo Específico	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO	13
2.2	TRANSISTORES COM PORTA ELETROLÍTICA	20
2.2.1	TRANSISTORES UTILIZANDO MEL COMO PORTA ELETROLÍTICA	22
2.3	ALGUMAS PROPRIEDADES GERAIS DE MÉIS DE ABELHA	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	SUBSTRATO E ETAPAS DE LIMPEZA	27
3.2	PREPARO DO FILME SEMICONDUTOR	28
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS COMO ELETRODO <i>GATE</i>	29
3.4	MÉIS DE ABELHAS SEM FERRÃO E NATIVAS DO BRASIL	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	MEDIDAS ELÉTRICAS	32
4.2	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA E <i>GATE</i> DE OURO	33
4.3	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA E <i>GATE</i> DE PLATINA	36
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO	58
	ANEXO A – NAS TABELAS A SEGUIR, É POSSÍVEL ENCONTRAR TODOS OS PARÂMETROS EXTRAÍDOS NA CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSISTORES PARA OS TRÊS DIFERENTES MÉIS DE ABELHAS SEM FERRÃO	59

1 INTRODUÇÃO

Eletrônica orgânica é considerada uma área muito promissora dentro das pesquisas em nanotecnologia, a qual teve grande avanço nos últimos anos e ainda está em rápida ascensão científica e comercial. Desde os anos 2000, houve uma crescente leva de pesquisas voltadas ao aprimoramento de interfaces em eletrônica orgânica, uma vez que interfaces tem papel fundamental sobre a eficiência final de dispositivos optoeletrônicos que envolve o melhoramento de interface entre semicondutores e: dielétricos, eletrólitos, ferroelétricos e até organismos biológicos [1]. Explorar a combinação de semicondutores inorgânicos e orgânicos em uma heterojunção como camada intermediária entre as interfaces é uma técnica comum para melhorar a carga injeção de portadores [2] e, uma estratégia de avanços para esta área de pesquisa.

Dentre os dispositivos optoeletrônicos explorados nesta área, um exemplo é o transistor com porta eletrolítica (do inglês, *electrolyte-gated transistor* - EGT) o qual compõem uma classe de dispositivos de alta transcondutância. Isso ocorre devido à alta capacitância do eletrólito, que lhe permite operar com baixa faixa de tensão junto a alta densidade de corrente. Este comportamento é citado como uma das principais vantagens que EGTs apresentam perante aos transistores de efeito de campo que utilizam dielétricos simples, sem espécies iônicas. Outra propriedade atrativa é o fato do eletrólito poder apresentar biocompatibilidade [3] e, como consequência disso, EGTs são amplamente utilizados como biossensores, dispositivos *drug-delivery*, diagnósticos biomédicos, etc. EGTs também são aplicados como sensores de interface entre os setores de saúde e alimentos [4, 5].

Há uma grande gama de eletrólitos utilizados em EGTs que vão de líquidos iônicos à géis iônicos [6, 7]. Trabalhos mais recentes têm desenvolvido diferentes transistores com porta eletrolítica utilizando o mel de abelha como dielétrico viscoso de porta eletrolítica. Uma destas literaturas traz a proposta onde o mel possui apenas a funcionalidade de uma deposição rápida como eletrólito num transistor baseado em canal de grafeno, com o único intuito de quantificar a qualidade do grafeno [8]. Este trabalho não faz uma exploração aprofundada dos parâmetros do transistor, mas usando-o como uma ferramenta rápida para análise de extração de parâmetros elétricos do grafeno (canal do transistor). Mais recente, um estudo mais amplo onde os transistores do tipo-p e tipo-n foram caracterizados, usando mel de abelha *Apis Mellifera* como dielétrico de porta eletrolítica [4]. Este trabalho enfatiza as possibilidades de aplicações de eletrônicos comestíveis que vão desde a biomedicina até a indústria alimentícia. Seus resultados

descrevem um transistor bastante interessante com baixa tensão de operação ($< |1| V$) e estável em atmosfera ambiente, tanto para o transistor tipo-p e tipo-n. Ideias semelhantes também foram exploradas em outras literaturas, deixando claro que o mel de abelha pode ser uma ótima alternativa para ser aplicado em transistores usados como sensores, com propriedades como: não toxicidade, biodegradável, biocompatível, comestível e dispositivos de operação em baixa tensão [9, 10, 11, 12].

A biocompatibilidade ou baixa toxicidade de materiais aplicados em dispositivos, área de pesquisa também chamada de "*Green*" *electronics*, tomaram impulso em meados de 2014. Estes materiais ou processos "*green*" de deposição são, em geral, bastante econômicos e eficientes. Como consequência, estes são capazes de gerar dispositivos "*Eco-friendly*" que são biodegradáveis e biocompatíveis [13]. Uma união única de funcionalidade eletrônica, baixo custo e diminuição de riscos ambientais e à saúde são resultados bastante explorados na literatura da área atualmente, denominados como eletrônica *eco-friendly*. Em 2021, surgiu a ideia de desenvolver uma eletrônica comestível, na qual transistores e circuitos são componentes fundamentais explorados a partir de materiais comestíveis que podem ser digeridos após desempenharem sua função [4].

Na literatura recente relacionada aos já mencionados transistores de porta eletrolítica utilizando mel de abelha como eletrólito, vem de encontro à estas aplicações de dispositivos comestíveis ou que apresentem biocompatibilidade [4, 14, 5]. Em comum, estes transistores utilizando mel trazem pouca informações sobre o mel utilizado, carecendo de descrições como: advindo de qual tipo de abelha, local de produção/coleta do mel, época de coleta do mel, se houve pasteurização, etc. A falta dessas informações e de comparação da eficiência dos transistores utilizando diferentes méis, limita a reprodutibilidade destes resultados em diferentes laboratórios ao redor do mundo, por exemplo. Neste presente trabalho, será explorado a utilização de três diferentes méis de abelhas sem ferrão e nativas do Brasil para serem aplicados como a camada dielétrica eletrolítica em transistores. É de conhecimento popular que méis advindos de diferentes localidades e colhido em diferentes épocas do ano (diferentes estações) resultam em méis com coloração, gosto e viscosidade diferentes. Quando compara-se méis de abelhas com ferrão (cuja produtividade é alta em volume), com abelhas sem ferrão (com produtividade melífera baixa), as diferenciações entre eles são ainda mais perceptíveis. O principal foco neste trabalho é desenvolver um estudo de forma a prover informações sobre a possibilidade de utilizar e comparar resultados de diferentes méis de abelhas como camada dielétrica eletrolítica em transistores. Uma

vez caracterizado e estabelecido padrões de reprodutibilidade desses transistores, já denominado em inglês como *Honey-gated transistors*, este poderá ser utilizado como uma plataforma para sensoriamento e bio-sensoriamento futuro, o que demonstra o potencial do presente estudo.

1.0.1 OBJETIVOS

1.0.1.1 Objetivo Geral

Construir transistores com porta eletrolítica, utilizando a seguinte estrutura: eletrodos interdigitados de óxido de estanho índio (ITO); canal semiconductor formado por um filme fino de Poly(3-hexylthiophene-2-5 diyl (P3HT); testar diferentes metais e geometrias para compor o eletrodo *gate*. A camada eletrolítica será formada por uma gota de mel. Nesta etapa serão testados diferentes méis de abelhas sem ferrão.

1.0.1.2 Objetivo Específico

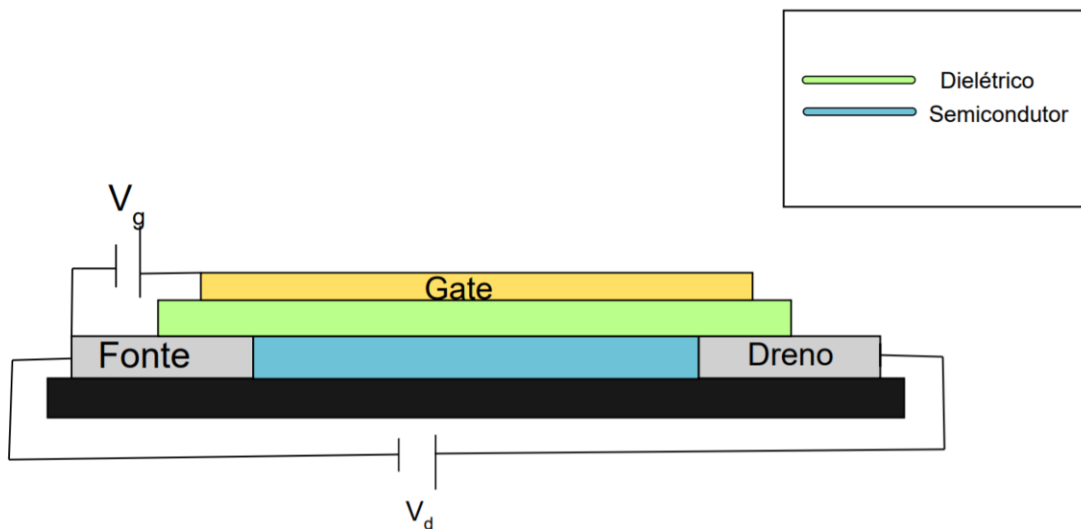
- Desenvolver os transistores, fazer sua caracterização elétrica baseada em: curvas de saída, curvas de transferência, medidas $I - V$ simples entre eletrodos fonte e dreno (antes da deposição do mel, logo após a deposição do mel, após caracterização elétrica do transistor);
- Extrair parâmetros típicos à esta classe de transistores a partir da caracterização elétrica, entre eles: mobilidade de efeito de campo, tensão de *threshold*, transcondutância, etc.
- Realizar caracterização de diferentes tipos de mel de abelhas sem ferrão, como por exemplo, medidas de: capacitância, pH, etc.
- Comparar os valores de parâmetros extraídos para os transistores baseados em diferentes méis, a fim de mensurar similaridades e diferenças entre si. Tais valores serão comparados ao já existentes na literatura da área também;
- Fornecer um conjunto de dados, a partir da caracterização elétrica, que possam trazer informações sobre eficiência dos transistores e possibilidade de aplicações como uma plataforma de sensoriamento ou biossensoriamento

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO

Os transistores de efeito de campo (do inglês, *Field-Effect Transistors* - FETs) são compostos por uma camada semicondutora (o canal), uma camada dielétrica (dielétrico da porta) e três terminais, sendo estes a fonte, o dreno e o *gate*. O arranjo de distribuição entre estes componentes podem variar, ou seja, FETs possuem diferentes arquitetura [15]. Dentre as possíveis arquiteturas, a figura 1 ilustra a arquitetura chamada de eletrodos inferiores e *gate* de topo (do inglês, *bottom contact and top gate*). Esta será a arquitetura a ser explorada nos trabalhos experimentais a serem desenvolvidos na presente dissertação.

Figura 1 – Ilustração de um transistor de efeito de campo com a arquitetura de eletrodos inferiores e *gate* de topo.



Fonte: Autoria Própria.

Ao aplicar uma tensão entre os eletrodos fonte e dreno de um FET, observa-se uma corrente fluindo, a qual é normalmente de baixa intensidade. Para modular este fluxo de portadores de carga que flui no canal, aplica-se uma tensão no eletrodo *gate* fazendo com que cargas

sejam induzidas na interface semiconductor/dielétrico o que, conseqüentemente, altera o fluxo da densidade de corrente. Supondo que o FET seja formado por um semiconductor do tipo-p, uma tensão negativa deve ser aplicada no *gate* ($V_g < 0$) (ou então $V_g > 0$ se for semiconductor tipo-n). Sob esta configuração elétrica o FET opera no modo de acumulação, ou seja, sob a condição em que portadores majoritários são acumulados na interface semiconductor/dielétrico formando o canal efetivo (camada de acumulação) de transporte. É ainda possível aplicar uma tensão reversa no *gate*, positiva para o transistor tipo-p, de modo a induzir portadores de carga minoritários no canal formando uma camada de depleção. Neste caso, os elétrons induzidos formam uma camada de depleção diminuindo o fluxo de portadores de carga ao longo dos eletrodos fonte e dreno.

A interface semiconductor/dielétrico é uma interface muito importante para a eficiência de FETs. Isso ocorre porque se houver muitos defeitos na interface, estes defeitos tendem a atuar como armadilhas de cargas fazendo com que parte da carga que formaria a camada de acumulação seja aprisionada nas armadilhas, não contribuindo no transporte. Proporcional à contribuição desta quantidade de portadores de carga, necessária para neutralizar a presença de armadilhas/defeitos, é preciso se aplicar uma tensão ao *gate*. À esta tensão dá-se o nome de tensão de *threshold* (V_t). Por fim, compreende-se que V_t é o limiar de tensão necessária pra ser aplicada no eletrodo V_g do FET, para que a camada de acumulação comece a ser formada.

Para quantificar a corrente (I_d) fluindo entre fonte e dreno, junto à contribuição das cargas induzidas no canal devido à tensão aplicada no *gate*, cuja teoria foi desenvolvida para FETs com arquitetura de *gate* inferior e eletrodos inferiores, é possível partir da relação a seguir [16, 15, 17]:

$$I_d = \frac{|Q_g|}{t}WL, \quad (1)$$

onde Q_g é a quantidade de portadores de carga total induzida no canal condutor por unidade de área devido à tensão aplicada no *gate*, W e L são a largura e comprimento do canal, respectivamente, e t o tempo de trânsito do portador.

Para correlacionar a corrente elétrica com a tensão aplicada no FET, faz-se uma análise a partir da relação:

$$t = L/v, \quad (2)$$

$$v = \mu E(x) = \mu \frac{V_d}{L}, \quad (3)$$

onde v a velocidade e μ é a mobilidade efetiva de portadores de carga, $E(x)$ é o campo elétrico na direção x , V_d é a tensão aplicada entre a fonte e o dreno e L é a distância entre a fonte e o dreno (equivalente ao comprimento do canal).

É importante ressaltar que a densidade de portadores de cargas no canal varia ao longo da distância entre fonte e dreno. Sendo assim, a cada ponto ao longo da distância x do canal há uma tensão local $V(x)$ [16]. Esta irá gerar uma determinada quantidade de carga total induzida no canal, por unidade de área. Assim, para a condição na qual começa a se formar a camada de acumulação, temos ($V_g > V_t$), sendo V_g a tensão aplica no *gate* e V_t é a tensão de *threshold* é escrita como

$$|Q_g|(x) = C_i(V_g - V_t - V(x)), \quad (4)$$

na qual $V(x)$ é tensão para um determinado ponto x dentro do canal e C_i a capacitância por unidade de área do isolante do *gate*, dada por:

$$C_i = \frac{\epsilon_i}{d_i}, \quad (5)$$

sendo ϵ_i a constante dielétrica do isolante do *gate* e, d_i a espessura do isolante do *gate*.

Substituindo a eq.(4) na eq.(1), tem-se:

$$I_d = C_i(V_g - V_t - V(x))\mu E(x)W, \quad (6)$$

onde:

$$E(x) = \frac{dV}{dx}. \quad (7)$$

Por fim, para obter uma equação para a corrente (I_d) em função da tensão aplicada entre fonte e dreno (V_d), aplica-se os limites na integração a seguir:

$$I_d = \int_0^L dx = \mu C_i W \int_0^{V_d} (V_g - V_t - V(x))dx, \quad (8)$$

Realizando a integração da equação (8), a fim de obter a corrente no regime de acumulação no canal entre a fonte e o dreno de um FET, tem-se:

$$I_d = \mu C_i \frac{W}{L} \left((V_g - V_t)V_d - \frac{(V_d)^2}{2} \right), \quad (9)$$

a qual possui validade dentro da condição onde $V_d \leq 2(V_g - V_t)$.

A partir da eq. 9 é possível definir os dois diferentes regimes observados em FETs, sendo estes:

Regime Linear, o qual ocorre quando $V_d < (V_g - V_t)$. Ao aplicar uma variação V_d no FET, a corrente apresentará uma variação linear proporcional a esta tensão aplicada, como ilustrado na figura 2(a). Este regime é descrito pela equação a seguir:

$$I_{d,linear} = \mu C_i \frac{W}{L} [(V_g - V_t) V_d] \quad (10)$$

Regime de Saturação, o qual ocorre quando $V_d \geq (V_g - V_t)$ (veja figura 2(b) e (c)). Neste caso, mesmo ao aplicar uma variação V_d , este não conseguirá drenar mais portadores de cargas do que a quantidade líquida de portadores que estão sendo induzidos pelo *gate* gerando, portando, há uma saturação na corrente. Este regime é descrito pela equação a seguir:

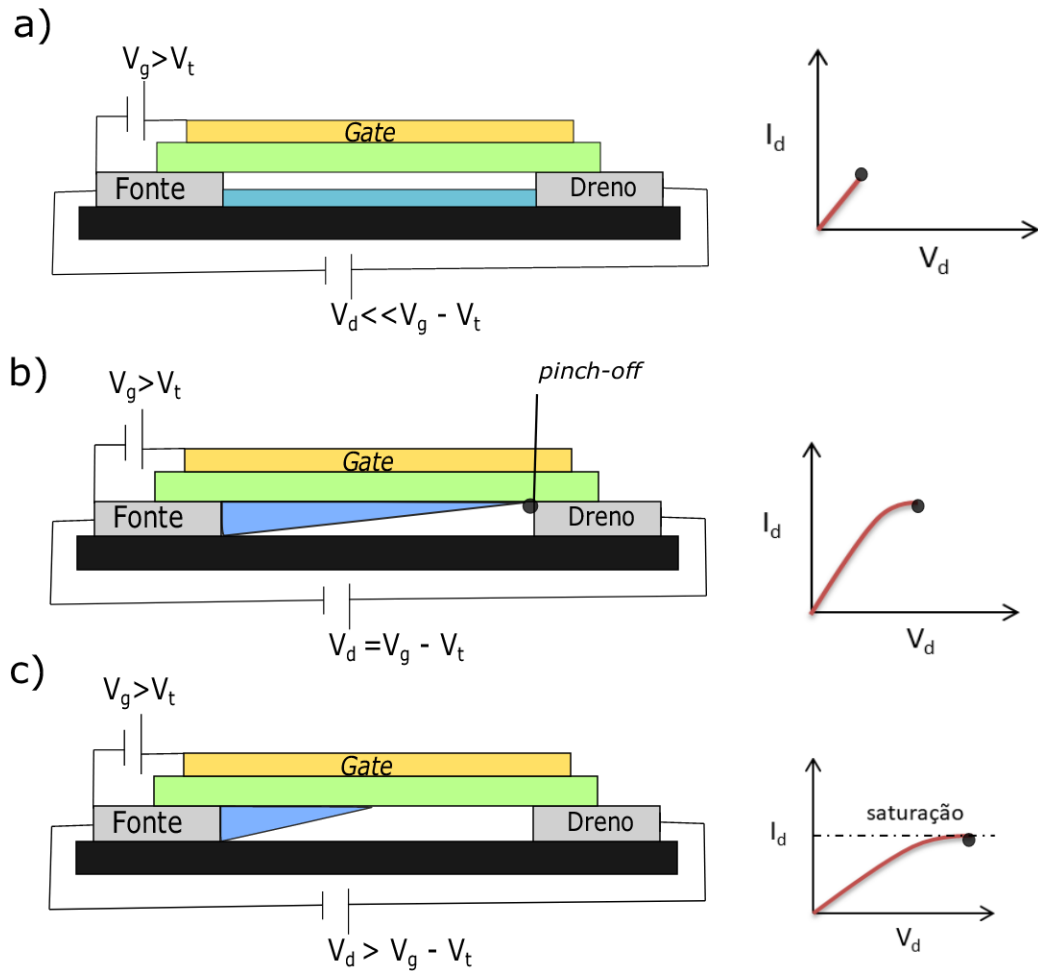
$$I_{d,sat} = \mu C_i \frac{W}{2L} [(V_g - V_t)^2] \quad (11)$$

Exatamente para a condição quando $V_d = (V_g - V_t)$, ocorre o fenômeno definido como *pinch-off*, ou seja, para esta condição o campo elétrico gerado pelo *gate* é nulo no eletrodo dreno e, uma região de depleção sem cargas livres induzidas ocorre (veja figura 2(b)). Para tensões de *gate* maiores ($V_d > V_g - V_t$), a posição do *pinch-off* muda para uma posição dentro do canal. Neste caso, uma região de depleção é formada próximo ao eletrodo dreno de forma que a quantidade de portadores criados na região de depleção seja a mesma da quantidade de portadores aumentado na região de acumulação. Como resultado, ocorre uma variação líquida nula de portadores de carga, mantendo a corrente de saída saturada.

A figura 2 ilustra os regimes bem como suas respectivas curvas de saída ($I_d - V_d$), para as seguintes condições: Fig.2 a) demonstra a camada ativa no FET (ilustrada em azul) para a condição onde $V_d \ll V_g - V_t$, que por sua vez resulta numa distribuição quase homogênea (em densidade e espessura da camada efetiva) ao longo do comprimento L do canal. O gráfico da curva de saída ao lado é referente ao regime linear. Fig.2 b) representa a condição quando ($V_d = V_g - V_t$) que resulta no início do regime de saturação e, principalmente, a formação do *pinch-off*. Neste momento a curva de saída apresenta um regime não linear de transição entre regime linear e de saturação. Por fim, na Fig.2 c) é demonstrado o regime de saturação ($V_d \geq V_g - V_t$), regime no qual, onde o fluxo de corrente se mantém constante mesmo havendo variação na tensão V_d aplicada.

Para ilustrar o comportamento de FETs, duas curvas típicas, extraídas de duas diferentes referências, são usadas na sua caracterização elétrica [18, 17]. Uma delas é a chamada curva característica ($I_d - V_d$) ou, simplesmente, curva de saída como apresentada na Fig.3. Tipicamente são mostradas várias curvas num mesmo gráfico, onde cada curva é medida para um diferente

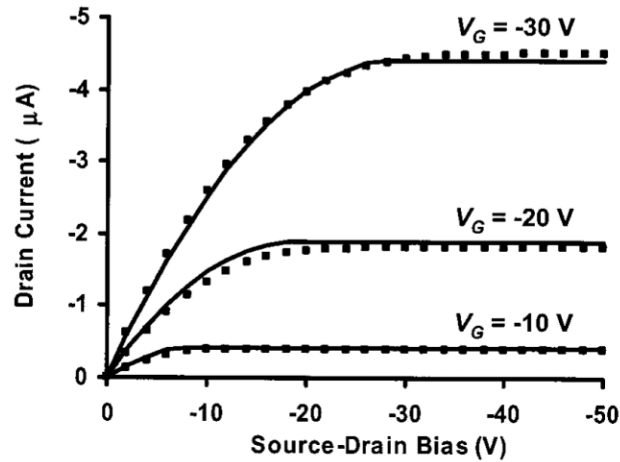
Figura 2 – Ilustrações de regimes de operação de transistores de efeito de campo e suas respectivas curvas de saída ($I_d - V_d$), para o: (a) Regime linear; (b) início do regime de saturação, na condição onde ocorre o *pinch-off* e (c) Regime de Saturação.



Fonte: Autoria Própria

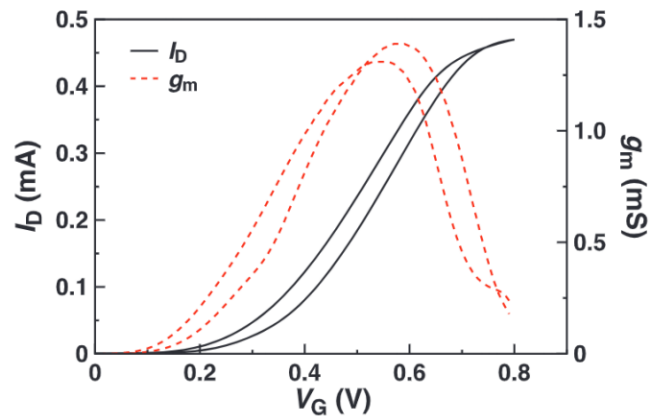
valor de tensão no *gate* (V_g). Quando $V_d < V_g - V_t$, o FET encontra-se em regime linear e, quando $V_d \geq V_g - V_t$ o transistor passar a operar no regime de saturação.

Figura 3 – Exemplo de curva característica ($I_d - V_d$), onde V_d (V) é a tensão aplicada no dreno e I_d (μA) a corrente medida entre fonte e dreno para um transistor de efeito de campo. Este gráfico é também conhecido como Curva de Saída, demonstrando os regimes linear e de saturação, para três diferentes valores de V_g .



Fonte:[19]

Figura 4 – A linha sólida preta demonstra um exemplo de curva de Transferência ($I_d - V_g$) para um transistor do tipo OECT baseado em BBL onde V_g (V) é a tensão aplicada no gate e I_d (mA) a corrente medida entre fonte e dreno. A linha tracejada vermelha, referente ao eixo da direita, representa a transcondutância (g_m).



Fonte:[20]

A segunda curva típica na caracterização elétrica de transistores de efeito de campo é a curva de transferência ($I_d - V_g$) com $V_d = \text{cte}$, como mostra a figura 4. Nesta, é possível quantificar a modulação criada pelo efeito de campo gerado pelo gate [21, 17].

FETs são conhecidos como uma classe de dispositivos multiparamétricos, assim como as outras estruturas/arquiteturas de transistores. Existe um conjunto de parâmetros que determinam a eficiência dos FETs. Dentre estes parâmetros que podem ser extraídos da caracterização elétrica de FETs, alguns são mencionados a seguir:

Transcondutância (g_m) → esta é definida como a derivada da curva de transferência para um valor constante de V_d , dada pela equação 12.

$$g_m = \left[\frac{\partial I_d}{\partial V_g} \right]_{V_d=const} \quad (12)$$

Mobilidade de Efeito de Campo (μ_{eff}) → A mobilidade de efeito de campo é uma grandeza que depende das propriedades morfológicas do semiconductor bem como da geometria do transistor e propriedades do dielétrico. Existem duas diferentes mobilidades de efeito de campo que podem ser extraídas a partir da curva de transferência de FETs, sendo a mobilidade no regime linear e a no regime de saturação. Estas são determinadas a partir das equações a seguir, respectivamente: Mobilidade de efeito de campo para o regime linear (μ_{linear}):

$$\mu_{linear} = \frac{L}{WC_i V_d} \left[\frac{\partial I_d}{\partial V_g} \right]_{V_d=cte} \quad (13)$$

Mobilidade de efeito de campo para o regime de saturação (μ_{sat}):

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{WC_i} \left[\frac{\partial \sqrt{|I_d|}}{\partial V_g} \right]_{V_d=cte}^2 \quad (14)$$

Tensão de Threshold (V_t) → Este parâmetro já foi definido anteriormente, sendo apenas repetido aqui para ressaltar que é mais um dos parâmetros extraídos dos FETs com importância para definir sua eficiência. V_t é o valor limiar de tensão necessária aplicada no eletrodo *gate* do FET, para que a camada de acumulação comece a ser formada.

A partir desta, é possível calcular o parâmetro *Sub-threshold slope* (SS), definido como o inverso do coeficiente angular da curva I_d x V_g no regime de *Sub-threshold slope* com a corrente de dreno em escala logarítmica [22]. Sua unidade de medida é em [V/dec], que nos fornece a informação de quantos Volts devem ser aplicados para que a corrente varie em uma década. A relação matemática para determinar o SS é:

$$SS = \frac{\partial V_g}{\partial(\log I_d)}, \quad (15)$$

Razão On/Off (I_{on}/I_{off}) → É a razão entre a corrente no estado ligado, valor máximo de I_d , e a corrente no estado desligado atingindo seu valor mínimo. Frequentemente o estado-*off* é

definido para a tensão $V_g = \text{zero}$. Esta razão indica o chaveamento de performance do dispositivo transistor. Quanto maior a razão, mais eficaz é o chaveamento, que deve ser analisado ainda em comparação a faixa de tensão de operação do FET.

2.2 TRANSISTORES COM PORTA ELETROLÍTICA

Transistores com porta eletrolítica possuem arquitetura semelhante aos FETs, os quais apresentam os eletrodos fonte e dreno separados por um canal semiconductor e, o eletrodo *gate* separado do semiconductor por uma camada dielétrica[21]. No entanto, nos transistores com porta eletrolítica, a camada dielétrica é substituída por uma camada dielétrica com espécies iônicas, chamado eletrólito, que pode ser líquido ou sólido [23]. A principal vantagem do uso de eletrólitos está na possibilidade de se obter alta capacitância por unidade de área (C_i), usualmente reportada em três ordens de magnitude maior do que em dielétricos sem espécies iônicas. Essa alta capacitância (C_i) fornece aos transistores com porta eletrolítica vantagens de baixa tensão de operação junto a alta densidade de corrente, além de benefícios como: boa transcondutância (g_m), baixa tensão de threshold (V_t), alta razão *on-off*, entre outros [24].

Os transistores com porta eletrolítica apresentam dois típicos modos de operação: modulação devido ao efeito de campo ou devido à corrente iônica de íons que difundem para o canal. Para cada um destes modos de operação dá-se, respectivamente, um diferente nome, sendo: EGOFET (do inglês, *Electrolyte-gated Organic Field Effect Transistor*) e OECT (do inglês, *Organic Electrochemical Transistor*). Para ambos os modos de operação, uma vantagem apresentada é o fato de estes operarem sob baixa tensão (tipicamente $< 1 \text{ V}$) [24, 23]. Para EGOFETs, é comum explorar as equações de transporte de portadores de carga de FETs em sua caracterização elétrica (equações já mostradas na sessão 2.1). Isso ocorre pelo fato de que ambos transistores modulam devido ao efeito de campo gerado pelo *gate*. Desta forma, a partir das equações (10) e (11), que definem o perfil da corrente no regime linear e de saturação, respectivamente, fica fácil de compreender que a intensidade da corrente I_d é linearmente dependente da capacitância por unidade de área (C_i) o que justifica a classe de transistores operar com baixa faixa de tensão. Os parâmetros já definidos na seção 2.1 são também frequentemente utilizados para caracterizar EGOFETs, sendo estes: g_m , V_t , razão *on/off*, mobilidade de efeito de campo (μ_{eff}) e *sub-threshold slope* (SS).

Por outro lado, os OECTs são modulados devido aos íons que difundem para o canal semiconductor resultando em processos de dopagem (ou desdopagem) eletroquímica. Como

sua modulação não depende do efeito de campo apenas, nem todos os parâmetros e equações definidos para FETs podem ser utilizados nesta classe de transistores. Mesmo assim, é possível caracterizar OECTs baseando-se em parâmetros como: V_t , g_m , razão *on-off* e SS. É interessante ressaltar que, dentro de uma mesma faixa de tensão, EGOFETs costumam apresentar densidade de corrente no estado-*on* na ordem de $[\mu A/cm^2]$, enquanto OECTs apresentam na faixa de $[mA/cm^2]$ devido ao processo eletroquímico ocorrido no semiconductor.

EGOFETs e OECTs são frequentemente usados como uma plataforma de sensoriamento, devido a fácil possibilidade de dispersar alguns tipos de analito(s) junto ao eletrólito, principalmente em eletrólitos líquidos. Quando um transistor é utilizado como uma plataforma de sensoriamento, este transforma-se num sensor multiparamétrico. Em outras palavras, o fato de possuir vários parâmetros para calibrar a resposta à exposição a um analito fornece maior confiabilidade no sensoriamento. Nos anos mais recentes, com o aprofundamento no desenvolvimento de transistores com porta eletrolítica, este começou a ser mais comumente aplicado em bio-sensoriamento. Isso ocorre devido à possibilidade de utilizar como eletrólito da porta materiais como, por exemplo, uma gota de água deionizada [6, 25, 26, 23]. Junto a esta gota de água é possível dispersar um analito, possivelmente um material biológico, e as mudanças nas propriedades elétricas na gota d'água ou na interface da água com o semiconductor fazem com que os (multi-)parâmetros do sensor/transistor se alterem, o que permite a sua calibração. A calibração de um sensor deve fornecer: (i) sensibilidade, que trata-se de apresentar uma mudança no sinal/parâmetro do dispositivo quando exposto a um analito, e (ii) seletividade, que trata-se de apresentar diferenças típicas e com reprodutibilidade de valores dos parâmetros quando exposto a diferentes analitos.

Dentre as possibilidades de explorar eletrólitos líquidos, há literaturas científicas que usufruíram do mel como uma alternativa para compor o eletrólito da porta do transistor [27, 4]. Os resultados apresentados até o presente momento mostram-se muito promissores e com vantagens perante uma gota de água tais como: o mel não evapora tão rápido quanto a água quando em ambiente aberto (o que alteraria a concentração do analito, dificultando a calibração de um sensor, por exemplo) e a tensão superficial do mel mostrou-se mais apropriada e de maior facilidade de manipulação, uma vez que este é utilizado num volume formado por uma gota [28].

2.2.1 TRANSISTORES UTILIZANDO MEL COMO PORTA ELETROLÍTICA

Ao longo dos anos, diferentes eletrólitos vêm sendo explorados para compor a camada dielétrica eletrolítica em transistores. Como já mencionado, estes eletrólitos podem ser líquidos ou sólidos e cada um deles acaba por gerar uma possibilidade diferenciada de aplicação à estes dispositivos [29]. São exemplos de eletrólitos sólidos, os denominados géis iônicos que, apesar da consistência de gel/mole, é considerado como sólido pela fácil manipulação podendo ser pego com uma pinça e facilmente transferido sobre o transistor como um objeto sólido. Estes são frequentemente formados de uma composição de polímeros junto a espécies iônicas resultando num filme espesso (na ordem de μm) e flexível. Estes transistores ainda não são comercializados, porém, estudos mostram um grande potencial de aplicação futura em determinadas situações que exija alta densidade de corrente junto a baixa faixa de tensão, por exemplo. Estes não apresentam rápido tempo de resposta, porém, isso não descarta sua aplicação em muitas frentes tecnológicas. Um exemplo bastante explorado na literatura é o gel iônico que possui cátions e ânions formado pelo polímero *poly(vinylidene fluoride-co -hexafluoropropylene)* - P(VDF-HFP), o solvente acetona e o líquido iônico *1-ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl) amide*, [EMI][TFSA] [30, 7, 29]. Apesar da versatilidade e fácil manipulação promovida pelas propriedades deste gel iônico, este é pouco apropriado para situação de sensoriamento e, ainda menos indicado, para bio-sensoriamento devido a sua toxicidade.

Já os transistores utilizando líquidos iônicos também são amplamente explorados como, por exemplo, líquidos iônicos à base de imidazol [29]. Ao pensar em aplicações em biossensoriamento, há uma ampla gama de trabalhos na literatura científica que utilizam água deionizada como eletrólito [6]. Isso se deve, principalmente ao fato da sua biocompatibilidade, fácil acesso e manipulação, bem como, baixo custo. Por fim, trabalhos mais recentes têm apresentado uma alternativa compatível com as especificações da água que é a utilização do mel de abelha [27, 28, 4].

O mel é polissacarídeo essencialmente formado por sacarose, frutose e glicose que possui interessantes propriedades elétricas [31]. Sua utilização como dielétrico minimiza custos, tempo de manipulação e fabricação do dispositivo por ser utilizado *in-natura*, com vantagens ainda de ser um material *eco-friendly*, não-tóxico e biodegradável [32, 4, 28, 31].

Apesar de a utilização de mel como eletrólito em transistores já ter sido apresentada na literatura científica, não são muitos os trabalhos que exploraram nesta situação. Ordonez *et*

al.[27], em 2017, desenvolveu um transistor baseado em grafeno de rápida fabricação, devido a simples aplicação de mel como dielétrico. Este transistor foi capaz de operar numa faixa de tensão de até 2 V não demonstrando boa obtenção do regime de saturação e razão *on/off* menor do que uma ordem de grandeza. Sharova and Caironi[4] desenvolveram um transistor, em 2021, denominado em inglês como *Honey-gated Transistor*, cujo trabalho apresentou duas estruturas de transistor sendo: (i) um baseado em um semiconductor tipo-p, poly(3-hexylthiophene) - (P3HT) e outro, (ii) com o semiconductor tipo-n Poly([N,N' - bis(2-octyldodecyl)-naphthalene-1,4,5, 8-bis(dicarboximide)-2,6- diyl]-alt-5,5'-(2,2'-bisthiophene) - (P(NDI2OD-T2)). Neste, os eletrodos fonte e dreno eram formados por ouro e o *gate* por uma ponta de tungstênio [4]. Ambos operaram numa faixa de tensão de até $|1|$ V, apresentando os típicos regimes linear e de saturação na curva de saída. A capacitância foi medida por espectroscopia de impedância elétrica apresentando valor, para o transistor tipo-p e tipo-n, respectivamente de, $2 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ e $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. Alzaid *et al.*[14], também em 2021, desenvolveu um transistor de efeito de campo do tipo *dual-gate* usando mel como camada dielétrica, o qual preferiu nomeá-lo como um dielétrico orgânico polar mesmo descrevendo a polarização de cátions e ânions no mel.

Por fim, o presente trabalho tem como foco explorar a utilização de diferentes méis de abelhas sem ferrão nativas do Brasil, para compor a camada dielétrica eletrolítica do transistor. Os diferentes méis serão analisados a fim de testar se possuem propriedades elétricas similares entre si e também em comparação aos trabalhos já publicados. É de conhecimento, científico e popular, que diferentes méis possuem diferentes composições físico-químicas, viscosidade, etc. Portanto, nosso estudo será direcionado à análise de propriedades elétricas, uma vez que ainda há pouca informações sobre este ponto de vista. Isso trará informações para saber se as propriedades dielétricas de um mel de abelha no Brasil é similar a de outros países, por exemplo. A importância destes estudos pode trazer informações sobre a reprodutibilidade dos parâmetros extraídos destes transistores explorando diferentes méis em diferentes locais. Visamos que esta estrutura de transistor tem potencial de aplicação futura em sensoriamento e bio-sensoriamento.

2.3 ALGUMAS PROPRIEDADES GERAIS DE MÉIS DE ABELHA

O estado do Paraná-Brasil se destaca como o segundo maior produtor e exportador de mel *in natura*, e as exportações deste produto pelo Porto de Paranaguá cresceram 31,6% em 2021 [15], demonstrando o potencial de crescimento atual desse setor, ainda pouco explorado [18]. De maneira geral, o Brasil possui uma das maiores capacidades de produção de mel orgânico do

mundo, cujo diferencial está na baixa contaminação por pesticidas e resíduos antibióticos uma vez que a produção é predominantemente de vegetação nativa [13], já tendo conquistado o título de melhor mel do mundo em determinadas edições do Congresso da Apimondia (Associação Internacional das Federações de Apicultores) [13]. A norma brasileira vigente [33] elaborada a partir de méis de *Apis mellifera* estabelece um valor mínimo de 65% para açúcares redutores e máximo de 6% para sacarose aparente, enquanto os valores sugeridos para mel de abelhas sem ferrão no Brasil [34] são de mínimo de 50% para açúcares redutores e máximo de 6% para sacarose.

Quando propriedades físico-químicas do mel são analisadas, é possível falar sobre a glicose-oxidase, que em soluções diluídas é mais ativa [35] reage com a glicose formando ácido glucônico (principal composto ácido do mel) e peróxido de hidrogênio, sendo esse último capaz de proteger o mel contra a decomposição bacteriana, a sua tensão osmótica negativa do mel que não permite a formação de bactéria até que seu conteúdo de açúcares esteja alto o suficiente para fazê-lo [36]. Este fator também é citado por White *et al.*[35] (1963), relatando que a principal substância antibacteriana do mel é o peróxido de hidrogênio, sendo sua quantidade presente no mel dependente tanto dos níveis de glicose-oxidase, quanto de catalase, uma vez que a catalase destrói o peróxido de hidrogênio [37]. Segundo Crane[38] em (1980), a adição de enzimas levadas pelas abelhas no néctar causa mudanças químicas em toda produção da colmeia, que por sua vez irão aumentar a quantidade de açúcar na colheita final, o que não seria possível sem essa ação enzimática.

Para análise de qualidade do mel, alguns dos seus componentes podem indicar tais informações. O hidroximetilfurfural (HMF) é classificado como composto químico formado unicamente pela reação de açúcares com ácidos, e comercialmente serve de indicador da qualidade do mel [37]. Quando mais elevado for o teor HMF, menor será o valor nutricional do mel em razão da destruição, por meio de aquecimento de determinadas vitaminas e enzimas [39]. Após um determinado tempo uma das características que atribuídas ao mel das abelhas nativas essa característica é sua elevada taxa de umidade, que costuma variar de 25% a 35% da composição, [40] além do seu natural conteúdo de leveduras, agentes de fermentação natural.

O mel é um material que possui viscosidade, a qual depende de cada tipo de ambiente de colheita do mel. Alguns méis possuem propriedade de fluxo anormais não newtonianos. Estudos de méis provenientes de floradas na Nova Zelândia e *Carvia callosa* na Índia são bem conhecidos, por sua consistência parecida com gel. Normalmente eles fluem de forma suficiente

em um extrator centrífugo [39]. Ao observar a coloração do mel, alguns componentes também são determinantes para o escurecimento deste produto como: proporção de frutose e glicose, o conteúdo de nitrogênio e aminoácidos livres, as substâncias polifenólicas como sais de ferro, o conteúdo de minerais e a instabilidade da frutose em solução ácida [41].

Quanto as propriedades elétricas do mel, estes estudos são menos aprofundados, tais informações não costumam tão relevantes para o mercado consumidor de alimentos. Esta menor importância se deve ao fato de técnicas de caracterização de qualidade e adulteração de méis serem mais comumente baseadas em análises físico-químicas (com caracterização ótica). Porém, para sua aplicação em transistores, conhecer as propriedades elétricas são fundamentais. O mel possui propriedades dielétricas [42], pode ser ainda, mais uma possibilidade de análise rápida e barata sobre qualidade de méis.

Em relação à meliponicultura, alguns trabalhos descrevem que a condutividade elétrica do mel de abelha Jataí presente na literatura é da ordem de $\mu S \cdot cm^{-1}$ fundamentada no fato de que soluções de sais conduzem corrente elétrica entre dois eletrodos foi medida em solução de 20% de matéria seca de mel, segundo o método oficial de análise de méis [43] (1986). Não há padrões definidos para condutividade elétrica de méis na legislação atual [33], afim de compor os padrões internacionais para mel, com relação a condutividade seu limite máximo é de $800 \mu S \cdot cm^{-1}$, visto que a condutividade elétrica é um bom critério para definir a origem botânica do mel [44]. Serrano et al. (2004), analisando diversos parâmetros por meio da análise discriminante em méis da região de Andaluzia, Espanha, verificaram que a condutividade elétrica e a atividade de água alcançaram os maiores resultados com poder de classificação nos méis, podendo classificar até 96,6% dos casos, ainda esse estudo detalhado.

Ordóñez *et al.* [27] realizou medidas da capacitância por unidade de área do mel obtendo um valor $2,3 [\mu F/cm^2]$, a partir de medidas de um LCR, cujo valor similar já foi relatado também na literatura [45]. O mel mostra-se correlações lineares entre a constante dielétrica e o teor de sólidos solúveis totais e a constante dielétrica e o teor de água, e as profundidades de penetração suficientes indicam que as permissividades em estudos da área [45]. Sharova and Caironi [4] também relatou um valor de $C_i = 2,3 [\mu F/cm^2]$ para transistores utilizando P3HT como canal e $C_i = 1 [\mu F/cm^2]$ quando o P(NDI2OD-T2) é utilizado no canal, medido por técnica de espectroscopia de impedância elétrica.

É importante ressaltar que nas literaturas científicas que já reportaram a utilização de mel de abelha em transistores [42, 28, 27, 4, 14], poucas informações sobre qual tipo de mel,

procedente de qual tipo de abelha foram citadas/relatadas. Desta forma, um dos focos do presente trabalho será a utilização de diferentes méis de abelhas sem ferrão e nativas do Brasil a fim de efetuar um estudo comparativo de suas propriedades dielétricas quando aplicados em transistores com porta eletrolítica.

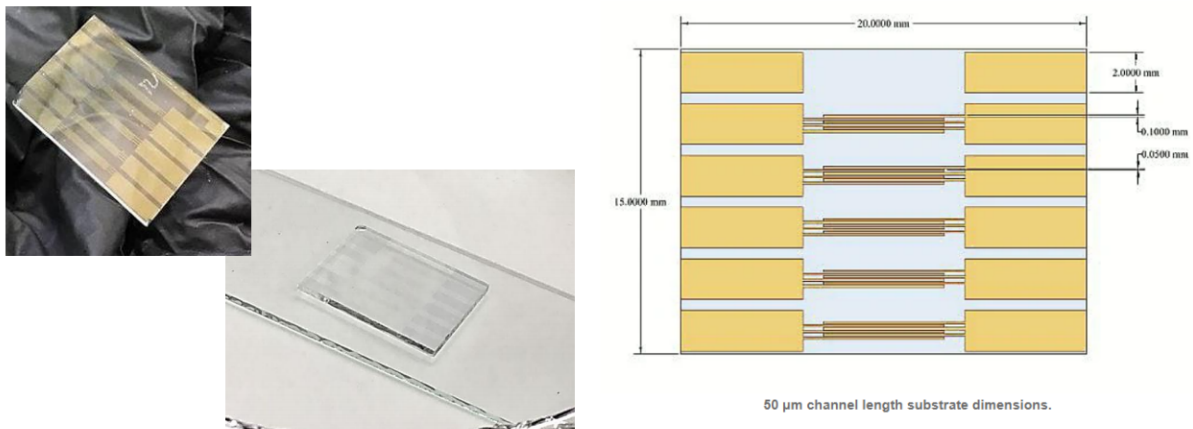
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho serão desenvolvidos transistores com porta eletrolítica em arquitetura planar. Em comum, todos os transistores serão compostos por eletrodos interdigitados de ITO (óxido de índio e estanho); canal formado pelo polímero P3HT (Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)). A camada dielétrica eletrolítica será composta por diferentes méis de abelhas nativas e sem ferrão. Para compor o eletrodo *gate*, dois testes foram realizados: (i) uma folha de papel alumínio recoberto por uma fina camada de ouro, onde apenas o filme de ouro faz o papel de *gate* e, (ii) uma ponta de platina (Pt).

3.1 SUBSTRATO E ETAPAS DE LIMPEZA

O substrato de vidro com eletrodos interdigitados de ITO (óxido de estanho-índio) sobre lâmina de vidro, foram adquiridos comercialmente da empresa Ossila. O ITO interdigitado, que irá compor os eletrodos fonte e dreno, contam com as seguintes dimensões: comprimento de canal de $50\ \mu\text{m}$ e $W = 30\text{mm}$ largura do canal.

Figura 5 – Fotos e imagem das dimensões do substrato pré-padronizados utilizado na construção do transistor. Este consiste em eletrodos de ITO interdigitados, os quais atuam como eletrodos fonte e dreno e têm dimensões gerais do canal de $30\text{mm} \times 50\ \mu\text{m}$.



Fonte: Imagem retirada de [46] e fotos de autoria própria.

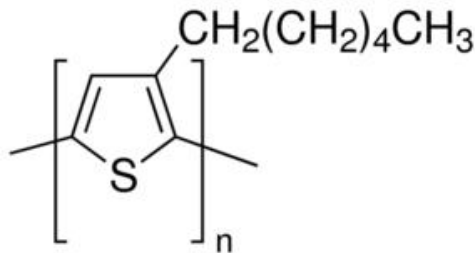
A importância do uso de procedimentos apropriados para a limpeza de vidrarias é fundamental para a obtenção de reprodutibilidade de resultados em análises de laboratório, para isso foram conduzidas em algumas etapas. Primeiro, o substrato passa por um banho de ultrassom por 20 minutos submerso em acetona (99%) dentro um béquer, anteriormente esterilizada. A limpeza ainda conta com mais duas etapas de exposição do substrato com ITO em 20 minutos

em banho ultrassônico, com álcool isopropílico e após, água ultrapura deionizada. A última etapa é referente à secagem, utilizando um jato de nitrogênio. Ao final do processo, o substrato passa pela limpeza em UV-Ozônio, modelo *UVI601* (Shimadzu), por 15 minutos. Logo após, as amostras estão prontas para a etapa seguinte, de deposição do semicondutor.

3.2 PREPARO DO FILME SEMICONDUTOR

O polímero utilizado para formar o canal semicondutor é o P3HT, adquirido comercialmente da empresa Sigma-Aldrich, com 99,995% de pureza (veja estrutura molecular na Fig:6). Este é diluído em tolueno numa concentração 7 mg/mL. A solução é colocada num *vial* com agitador magnético e com aquecimento de $\sim 60^\circ\text{C}$, por uma hora. A solução é preparada protegendo-a da exposição à luz, colocando um papel alumínio em volta do *vial*.

Figura 6 – Estrutura molecular do Poly(3-hexylthiophene-2-5 diyl) (P3HT).

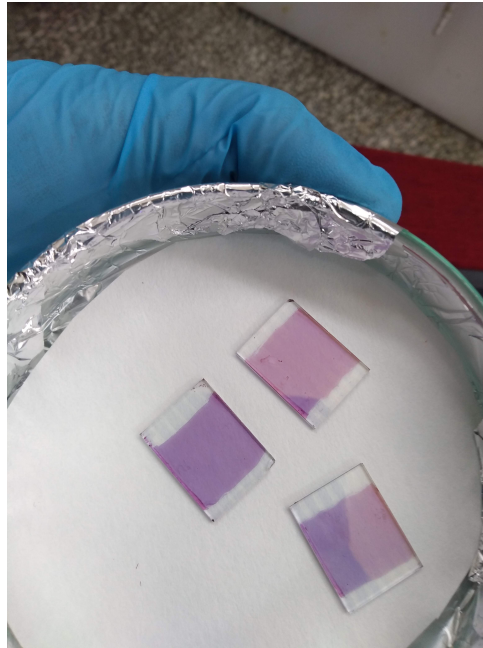


Fonte: [47]

A deposição dinâmica da solução de P3HT é feita por *spin-coating* a partir de $80\ \mu\text{L}$ sobre os eletrodos de ITO em rotação inicial de $600\ \text{rpm}$ por $5\ \text{s}$ seguida de mais $1200\ \text{rpm}$ por $50\ \text{s}$. Como resultado, obtém-se um filme fino de aproximadamente $56\ \text{nm}$ de espessura, medido por um perfilômetro de contato Dektak XT - Bruker. Na figura 7, é possível visualizar o filme de P3HT obtido através deste processo.

Após a deposição do filme de P3HT sobre o ITO, a amostra é levada sobre uma placa de Petri de vidro para secagem em uma estufa de vácuo por 60 minutos, a temperatura de 100°C . A estufa a vácuo modelo TE-395 da Tecnal com certificação ISO 9001:2015. Após o tratamento térmico, pelo fato do filme de P3HT ser termo-sensíveis e foto-sensíveis, este precisa ser envoltos em papel alumínio e, as amostras são levadas na sequência para uma sala escura onde serão realizadas as medidas de caracterização elétrica

Figura 7 – Imagens de filmes finos de P3HT após a deposição sobre os eletrodos interdigitados de ITO.



Fonte: Autorial Própria

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS COMO ELETRODO *GATE*

Para compor o eletrodo *gate*, dois diferentes materiais foram testados: ouro (Au) e platina (Pt). Para compor o *gate* de ouro, uma folha de papel alumínio foi usada como substrato/suporte e uma fina camada de Au ($\sim 10nm$) foi depositada por evaporação. Assim, a face com o filme de Au é utilizada em contato com o eletrólito e a folha de papel alumínio apenas serve para dar a sustentação mecânica para manipular o *gate*. Já o eletrodo de Pt testado foi uma ponta (um fio) de platina (Pt). Esta geometria de ponta é mais apropriada para ser utilizada em situações de eletrólitos líquidos, como o mel, sendo que a maior parte dos resultados que serão apresentados a seguir, são referentes à esta segunda opção de *gate*.

3.4 MÉIS DE ABELHAS SEM FERRÃO E NATIVAS DO BRASIL

Os méis de abelhas nativas utilizados foram fornecido por uma cooperativa de melicultura localizada no estado do Paraná. Estes méis são colhidos em um recipiente esterilizado previamente em água fervente. A técnica melífera é tradicional desta região, seguindo todos os cuidados necessários na colheita para não haver contaminação do mel usando máscaras, luvas e formão do apicultor/meliponicultor, entre outros. Dentre as amostras fornecidas, foram utilizadas no presente trabalho os méis de abelhas descritos a seguir (veja imagem com méis na figura 9 e

as respectivas abelhas produtoras na figura 8):

- JATAÍ, conhecida também como alemanzinho (nome científico *Tetragonisca angustula*), catalogada pela primeira vez por Latreille, 1811.
- TUBUNA (nome científico *Scaptotrigona bipunctata*), catalogada pela primeira vez por Lepeletier, 1836.
- IRAÍ (nome científico *Nannotrigona testaceicornis*), catalogada pela primeira vez por Lepeletier, 1836.

Figura 8 – Imagem das abelhas: Jataí, Tubuna e Iraí, respectivamente.



Tubuna



Fonte: [48, 49, 50]

Figura 9 – Imagem das amostras de méis utilizadas neste trabalho, da esquerda para a direita, mel de abelhas: Jataí, Tubuna e Iraí, respectivamente.



Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MEDIDAS ELÉTRICAS

Para a caracterização elétrica dos transistores eletrolíticos utilizou-se uma fonte dual (modelo: *Keithley 2602 dual source meter*), conectado ao computador através de uma conexão GPIB, controlado pelo *software LabVIEW*. Além disso, utilizou-se um suporte de medidas para facilitar a conexão entre equipamento e dispositivo (veja Figura:10).

Figura 10 – Configuração dos equipamentos e suporte de fixação para a realização de medidas elétricas nos transistores com porta eletrolítica.



Fonte: Autoria Própria

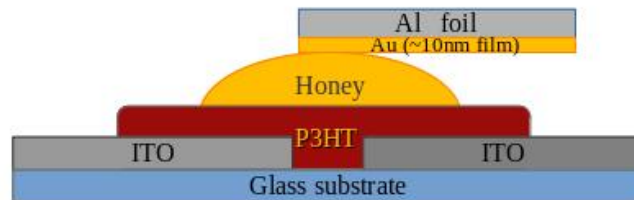
Todas as medidas foram realizadas em uma sala escura com umidade relativa do ar maior que 50%, localizada no laboratório do Grupo de Dispositivos Optoeletrônicos Orgânicos - UFPR.

4.2 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA E GATE DE OURO

Como mencionado anteriormente na sessão 2.3, já existem alguns trabalhos na literatura científica utilizando mel como eletrólito do *gate* [42, 28, 27, 4, 14]. Estes não fazem uma grande descrição sobre qual tipo de mel de abelha foi utilizado bem como a procedência, etc. Alguns trabalhos, não relatam nada além do fato de utilizar um mel adquirido comercialmente, sem citar sua marca, ano de colheita, etc. Assim, um de nossos focos de estudo será testar diferentes méis de abelhas sem ferrão e nativas do Brasil a fim de observar similaridades (ou a falta desta) entre diferentes méis. Os primeiros resultados que serão mostrados são referentes a utilização do mel de abelhas Jataí. A escolha do mel de Jataí, como primeiro teste, foi aleatória dentre as amostras disponíveis.

O primeiro transistor com porta eletrolítica construído para ser nossa plataforma de testes, possui a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Au e eletrólito de mel de abelhas Jataí. A figura 11 ilustra a estrutura e arquitetura utilizada.

Figura 11 – Estrutura/arquitetura do transistor com porta eletrolítica: ITO (fonte) / P3HT (canal) / ITO (dreno); Mel como dielétrico de porta e, Au como eletrodo *gate* (depositado sobre uma folha de papel alumínio para dar sustentação mecânica).

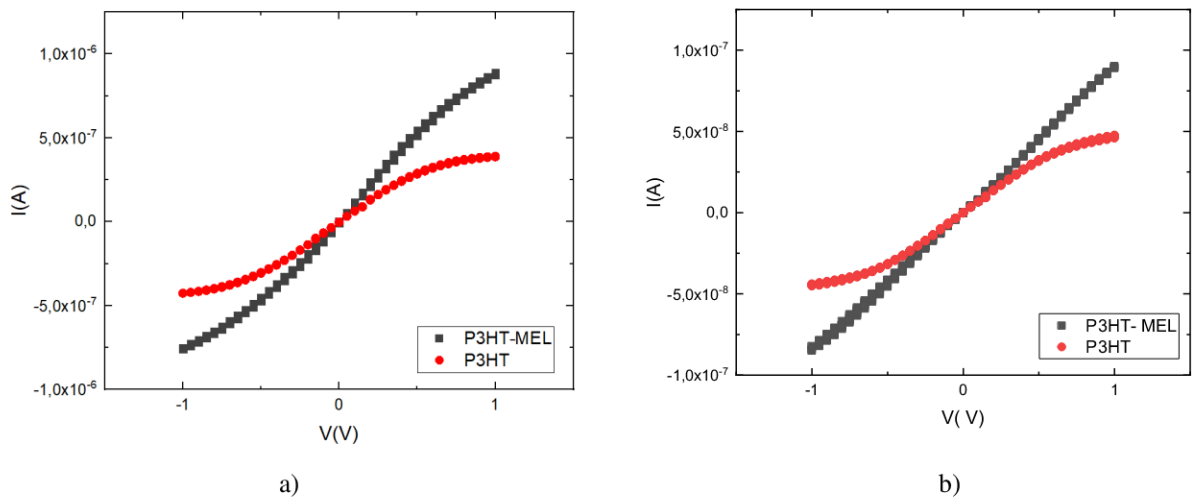


Fonte: A autoria Própria

Já é de conhecimento na literatura da área que, apenas o fato de depositar o eletrólito sobre o semicondutor, este pode alterar o perfil da curva de corrente em função da tensão entre fonte e dreno. Isso ocorre devido aos íons que começam a polarizar na interface semicondutor/eletrólito a medida que uma corrente flui no canal alterando o perfil do transporte de portadores de carga ao longo do canal [51]. Assim, a primeira medida realizada é denominada neste trabalho como $I - V$ simples (veja figura 12), onde é feita uma varredura cíclica na faixa de $-1 V$ a $1 V$ com passo de $50 mV$ e intervalos de tempo de $250 ms$, entre os eletrodos fonte e dreno. Com isso é possível fazer uma análise do transporte de portadores de carga ao longo do comprimento do canal, no filme de P3HT. Mais de uma medida foi realizada e, estas foram feitas nas seguintes etapas: (I) a primeira varredura ocorreu na arquitetura planar ITO/P3HT/ITO antes da fabricação completa do

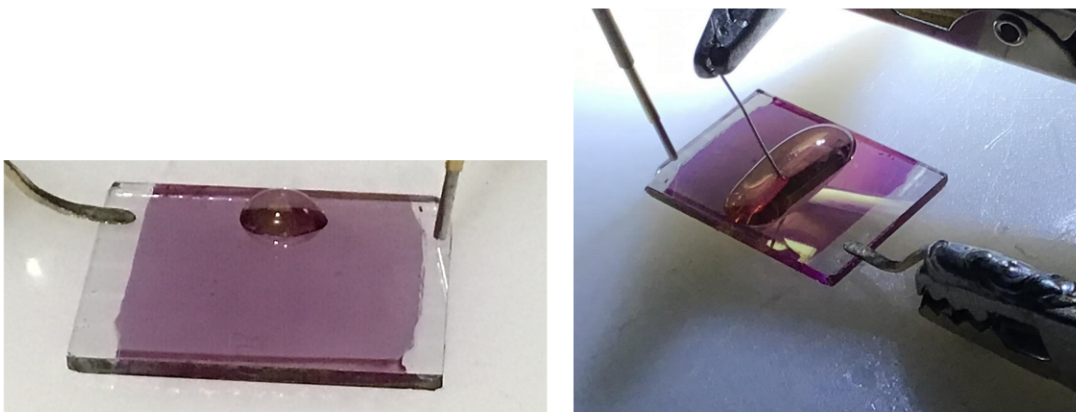
transistor, ou seja, antes de depositar o mel (curva vermelha no gráfico da Fig:12). Em seguida repetiu-se as mesmas medidas mas, (II) logo após a deposição da gota com $5\mu L$ de mel de abelha Jataí, feita com o auxílio de uma micropipeta, sobre o dispositivo ITO/P3HT+MEL/ITO (curva preta no gráfico da Fig:12). Como o substrato com ITO interdigitado é composto por cinco dispositivos, uma gota em cada um dos dispositivos resulta num total de $25\mu L$ de mel de abelha Jataí, cujas gotas se unem todas até o final da caracterização elétrica. Os dispositivos foram caracterizados numa sala escura, em temperatura ambiente de aproximadamente $20^{\circ}C$.

Figura 12 – Medidas de caracterização $I - V$ de dispositivos baseado em eletrodos interdigitados de ITO e canal de P3HT com comprimento de canal de $50\mu m$ e $W = 30mm$ largura do canal. Curva $I - V$ simples (a) e (b) são referente à duas diferentes amostras com mesma estrutura: ITO-P3HT-ITO (curva vermelha) e ITO-P3HT com mel-ITO (curva preta).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 13 – Foto do dispositivo durante sua construção. Estrutura: ITO (fonte) / P3HT (canal) / ITO (dreno) com a gota de mel presente sobre um único dispositivo (figura da esquerda) e, sobre todos os cinco dispositivos da amostra, junto ao eletrodo *gate* (imagem da direita).



Fonte: Autoria Própria

Na figura 12, cada um dos gráficos é referente a um diferente dispositivo, mas ambos

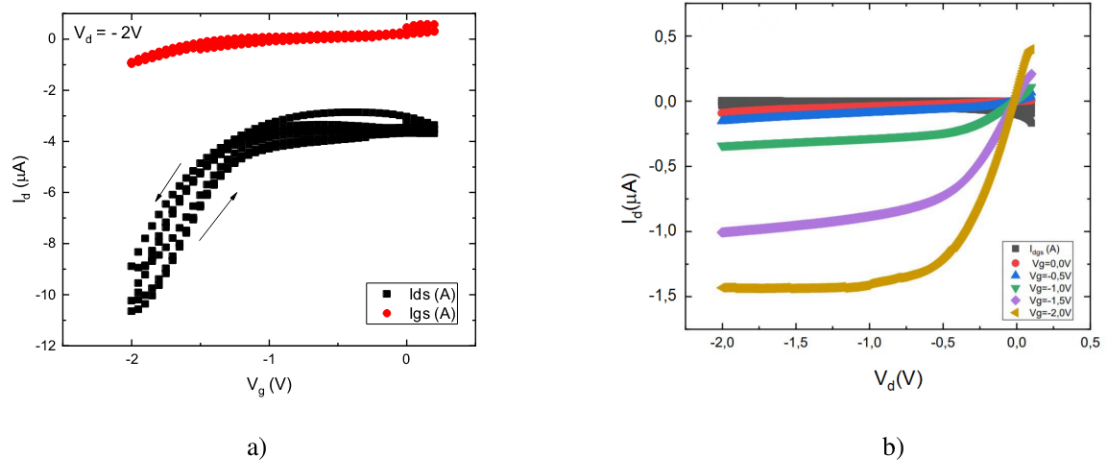
com a mesma estrutura. Ao comparar as curvas ($I - V$) simples para cada dispositivo com P3HT sem a gota de mel (curva vermelha) e com a gota de mel (curva preta), observa-se uma diferença entre as intensidade de corrente medidas, cujo perfil foi também observado em outros dispositivos (com mesma estrutura, gráficos não mostrados neste texto). Este fenômeno de alteração no perfil da curva $I - V$ já é esperado. Ao depositar o mel sobre o P3HT e aplicar uma diferença de potencial entre os eletrodos fonte e dreno de ITO, a corrente que flui ao longo do canal de P3HT começa a gerar uma polarização nos íons do eletrólito, ou seja, há uma polarização dos íons presentes no mel que ocorre na interface mel/P3HT. Desta polarização, por sua vez, geram cargas induzidas dentro do canal que aumentam a condução ao longo do P3HT, gerando uma alteração na intensidade da corrente elétrica.

Na figura 14, é apresentada as curvas de transferência e curva de saída, respectivamente, para o transistor com estrutura de: ITO/P3HT/Au com eletrólito de mel de abelhas Jataí. No gráfico da curva de transferência é apresentada também a corrente de fuga (I_g , curva vermelha na figura 14 a)) a qual possui claramente uma intensidade menor do que a corrente de saída. A corrente de fuga é a corrente medida entre o eletrodo fonte e *gate*. Esta apresentação das duas correntes (I_d e I_g) no mesmo gráfico se faz necessária, uma vez que é comum a corrente de fuga ser alta em transistores com porta eletrolítica. Uma alta corrente de fuga poderia demonstrar uma falsa modulação por efeito de campo no dispositivo, por isso a necessidade de mostrá-la. A corrente de saída (I_d , representada em pontos em preto) apresenta uma modulação a partir de aproximadamente $-1 V$. As curvas de transferência foram realizada numa sequência de três ciclos para testar também sua estabilidade. Os ciclos demonstram uma pequena histerese anti-horária. Esta histerese é atribuída ao lento movimento dos íons no eletrólito. Para a faixa de operação de tensão de $|2 V|$ o transistor apresentou uma razão *on/off* de quase uma ordem de grandeza e $V_t \sim -1V$. Já a curva de saída (Fig. 14 b)) demonstra os típicos regimes linear e de saturação, típicos desta classe de transistores.

A figura 15 apresenta as curvas de transferência e de saída para um segundo transistor, igual ao apresentado na figura 14. Vários transistores foram medidos, e em comum entre eles foi observado os valores de razão *on/off* $\sim 10^1$ e $V_t \sim -1V$. Porém, neste segundo transistor, assim como em vários outros testes, há uma diferença no valor da corrente de saída de quase uma ordem de grandeza menor e, conseqüentemente, sua performance não é tão boa. Isso se reflete numa curva de saída que não consegue atingir a saturação.

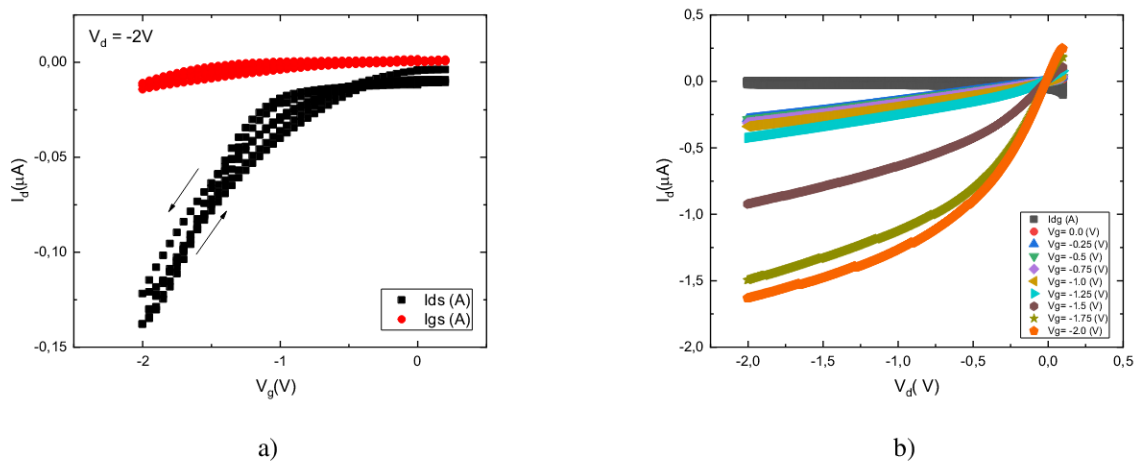
Desta parte inicial do estudo, foi possível observar que havia uma grande dificuldade

Figura 14 – Curva de transferência (3 ciclos) (a) e curva característica (b) para o transistor com *gate* de ouro eletrólito de mel abelhas Jataí.



Fonte: Autoria Própria

Figura 15 – Gráficos da: a) Curva de Transferência e b) curva característica para o transistor com a estrutura: ITO/P3HT/Au com eletrólito de mel de abelhas Jataí.



Fonte: Autoria Própria

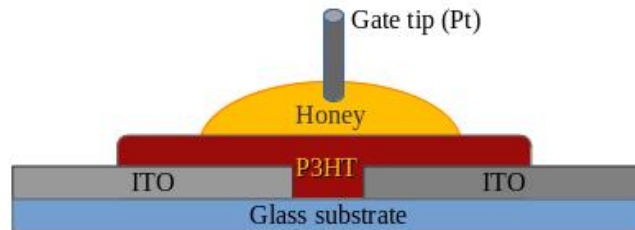
envolvida na utilização da folha de ouro como *gate*, devido a complexidade em reproduzir a posição e manipulação da mesma sobre a gota de mel. Após vários testes, com pouca reprodutibilidade entre resultados, passamos a utilizar como *gate* do transistor uma ponta de platina, como será apresentado na sessão seguinte.

4.3 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO TRANSISTOR COM PORTA ELETROLÍTICA E GATE DE PLATINA

O segundo teste de estrutura de transistor demonstrado neste trabalho, foi a utilização de uma ponta (fio) de platina (Pt), como ilustrado na figura 16, para compor o eletrodo *gate*. É

comum a utilização de fio/pontas metálicas em transistores com porta eletrolítica cujo eletrólito é líquido, como o caso do mel. Isso ocorre devido a fácil manipulação desta ponta dentro da gota de mel, cuja ponta de Pt é fixada/sustentada por um suporte de modo é ficar posicionada como na figura 16.

Figura 16 – Estrutura do transistor com porta eletrolítica: ITO (fonte) / P3HT (canal) / ITO (dreno); Mel como eletrólito e, uma ponta de platina (Pt) como eletrodo *gate*



Fonte: Autoria Própria

A caracterização elétrica dos transistores a ser apresentada na sequência, é baseada em seis gráficos para cada transistor/dispositivo. Todos os transistores possuem em comum eletrodos interdigitados de ITO, o canal composto por um filme de P3HT e *gate* formado por uma ponta de platina. Como diferencial, três diferentes méis foram testados separadamente, para compor a camada do eletrólito. Para cada diferente mel testado, pelo menos 10 dispositivos foram desenvolvidos e caracterizados.

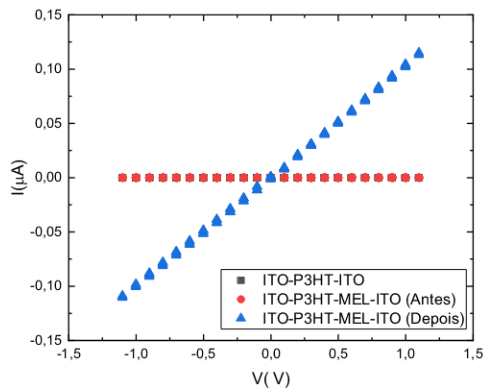
Na sequência, serão apresentados resultados de apenas dois transistores para cada mel testado. Mais testes foram realizados, e ao final do trabalho há uma tabela com valores extraídos desta outra gama de análise (tabela encontra-se no anexo). Aqui, a primeira sequência de medidas apresentada na figura 17, é referente ao transistor com estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Jataí. A figura 17 a) mostra o gráfico $I - V$ simples, onde é realizada uma varredura cíclica na faixa de $-1V$ a $1V$, com passos de $50 mV$ e intervalos de $250 ms$ entre os eletrodos fonte e dreno. As medidas foram feitas para as seguintes estruturas/situações: (i) ITO-P3HT-ITO, antes da finalização da construção do transistor (curva vermelha); (ii) ITO-P3HT e MEL-ITO, logo após a deposição da gota de mel sobre o P3HT (curva preta, sob a curva vermelha) e; (iii) ITO-P3HT e MEL-ITO, medida feita logo após as medidas de caracterização elétrica do transistor (curva azul). Desta sequência de medidas $I - V$ simples, é possível observar se há alguma relevante alteração no transporte de carga no P3HT após a caracterização elétrica do transistor o que, num primeiro momento, nos fornece um indício de uma possível difusão de íons para dentro do canal. Somente após análise das curvas típicas dos transistores, tal informação

pode ser concluída.

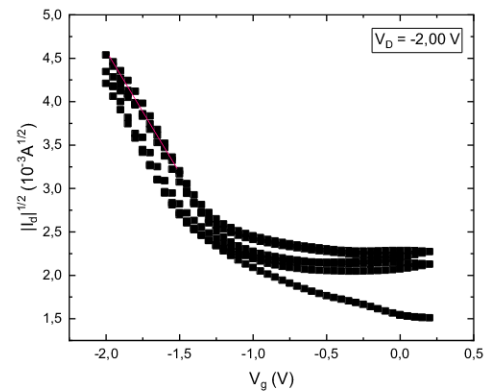
Da curva de transferência da figura 17 d), é possível observar que os três ciclos de medidas são bem estáveis e uma histerese muito pequena nesta medida, havendo apenas uma pequena diferença no início do primeiro ciclo, atribuído a acomodação de cargas até entrar no estado estacionário. A corrente de fuga I_g (curva vermelha, figura 17 d)) possui intensidade menor perante a intensidade da curva de saída. Do gráfico da figura 17 b) onde a curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente, é possível extrair o produto da mobilidade de efeito de campo com a capacitância por unidade de área (μC_i), baseada na equação 14. A opção de colocar o valor deste produto, e não apenas de μ_{eff} se deve ao fato de não termos ainda medido o valor de C_i de nossos méis. Os valores dos parâmetros extraídos dos transistores são apresentados na tabela 2. A figura 17 e) fornece a transcondutância, obtida da derivada do gráfico da curva de transferência com seu valor máximo alcançado em $\sim 1.4 V$. A curva característica (veja figura 17c)) contém a variação de $V_g = 0,2V$ até $V_g = -2,0V$ com passos de $0,25 V$ resultando em nove curvas. O perfil do regime linear é observado em todas as curvas, porém, o regime de saturação não é atingido. A Figura 17 f) mostra a curva de transferência em escala log-linear para melhor visualização da variação da escala desde a corrente no estado-*off* até o estado-*on*. Observa-se que a corrente de saída I_d (curva preta) atingiu a estabilidade logo após o primeiro ciclo, pois a corrente no estado desligado I_{off} , aumentou do primeiro para o segundo ciclo, mantendo-se estável após esta. Esta mudança é atribuída ao dispositivo atingir o estado estacionário. Para a corrente de fuga I_g apresentada em escala log-linear é possível observar que os mínimos para o primeiro ciclo diferem da posição dos mínimos do segundo e terceiro ciclos. Isso nos traz a informação de que pode ter havido difusão de íons para dentro do canal após o primeiro ciclo, estabilizando a quantidade de difusão após o segundo ciclo de medida da curva de transferência.

Quando trabalha-se com transistores com porta eletrolítica, uma importante investigação é observar e comprovar se houve (ou não) a difusão de íons para dentro do canal. Se não houver, conclui-se que este opera por efeito de campo e comporta-se como um EGOFET. Caso haja difusão de íons para dentro do canal, a modulação se deve também por dopagem iônica e, este transistor opera como um OECT. Nossa análise para concluir sobre qual modo de operação encontra-se este transistor é baseada em dois gráficos (com olhar para diferentes três curvas): (i) Figura 17 a) com curvas $I - V$ simples, a qual mostra que após caracterização elétrica do transistor houve uma grande mudança na intensidade de corrente alterando suas propriedades

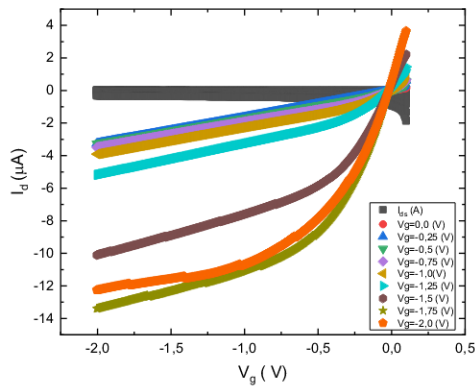
Figura 17 – Caracterização elétrica do transistor - 1, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Jataí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra (símbolo preto), (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT (símbolo vermelho) e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor (símbolo azul), respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).



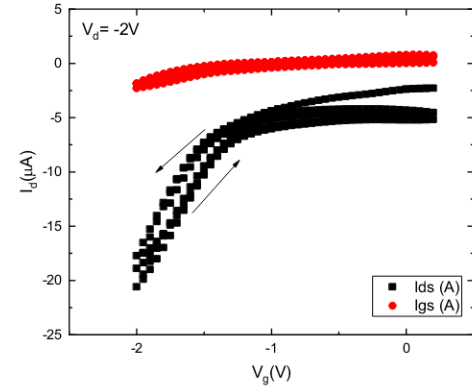
a)



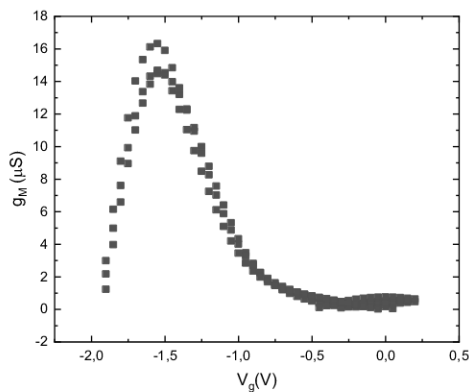
b)



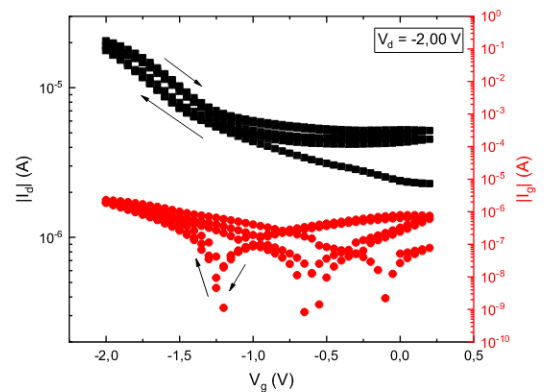
c)



d)



e)



f)

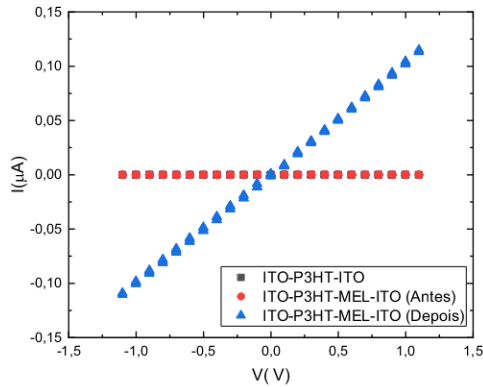
Fonte: Autoria Própria.

elétrica da condição inicial; (ii) Curva de transferência da figura 17 d), observando se há histerese na curva de saída e que, no nosso caso, apresenta um histerese muito pequena mas não desprezível e, por fim; (iii) figura 17 f) onde observamos a corrente de fuga em escala log-linear procurando observar se a posição dos mínimos se alteram ao longo dos ciclos. A posição destes mínimos está correlacionada à acomodação de portadores de carga dentro do canal, e a mudança em sua posição é frequentemente atribuída à difusão de íons para dentro do semicondutor alterando este estado de equilíbrio. Desta análise há uma mudança no primeiro ciclo em relação aos ciclos seguintes e, ainda, apenas em relação ao primeiro mínimo próximo ao valor de $\sim -0,1 V$ sofrendo uma alteração para $\sim -0.6 V$. Como não houve alteração na posição dos dois mínimos desta curva e a curva de transferência apresentou uma histerese muito pequena, nossa interpretação é de que não houve difusão de íons para o canal ou pode ter havido uma quantidade muito pequena fazendo este transistor operar como um EGOFET.

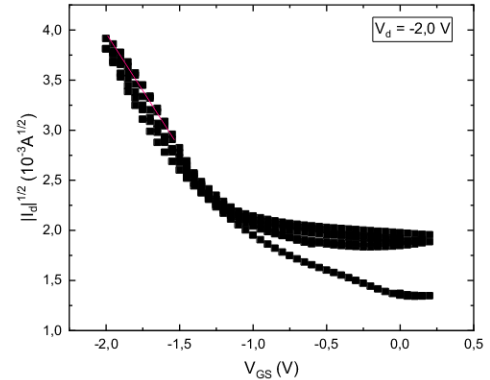
Vários transistores foram testados durante nosso trabalho a fim de analisar a reprodutibilidade dos resultados obtidos, porém, apenas alguns dados serão mostrados aqui. Assim, foi escolhido mais um conjunto de dados para ser apresentado neste texto e, como visto na figura 18 há uma mesma sequência de gráficos e análise da apresentada na figura 17. O perfil e interpretação das curvas é o mesmo apresentado para o transistor da figura 17, com poucas alterações entre os resultados dos transistores nomeados como transistor-1 e transistor-2. A intensidade de corrente de saída é um pouco menor um pouco menor para o transistor-2, porém, com uma variação dentro do esperado dentro da caracterização elétrica. Algo importante para ser ressaltado é que os parâmetros extraídos e apresentados na tabela 2 apresentam grande similaridade entre si. Isso mostra que as grandezas mensuráveis desse transistor possui reprodutibilidade entre si.

As figuras 19 e 20 mostram as medidas de caracterização elétrica para os transistores nomeados como transistor-3 e transistor-4, com estrutura: ITO/P3HT/Pt e eletrólito formado por mel de abelhas Iraí. Na figura 19 a) é apresentado as curvas $I - V$ simples com uma varredura cíclica, para as seguintes estruturas/situações: (i) ITO-P3HT-ITO, antes da finalização da construção do transistor (curva vermelha); (ii) ITO-P3HT e MEL-ITO, logo após a deposição da gota de mel sobre o P3HT (curva preta) e; (iii) ITO-P3HT e MEL-ITO, medida feita logo após as medidas de caracterização elétrica do transistor (curva azul). Novamente é perceptível uma relevante alteração no transporte de carga no P3HT após a caracterização elétrica do transistor, porém com alteração menor do que observado para o transistor com porta eletrolítica de mel de abelhas Jataí. A curva de transferência na figura 19 d) possui similaridade em seu perfil

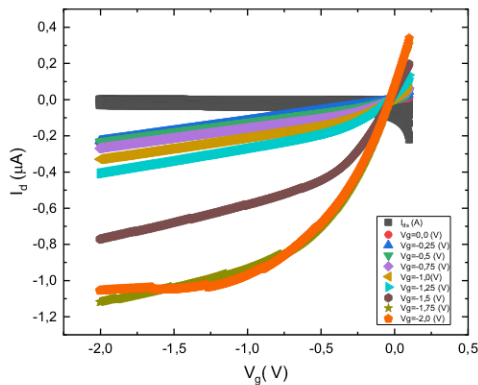
Figura 18 – Caracterização elétrica do transistor - 2, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelha Jataí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).



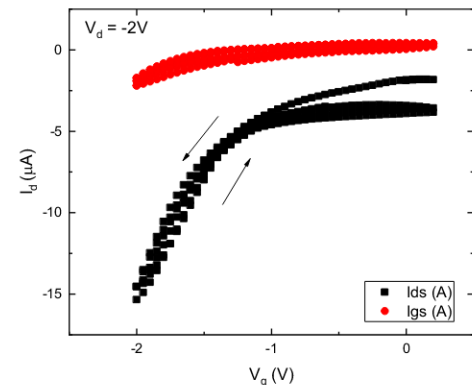
a)



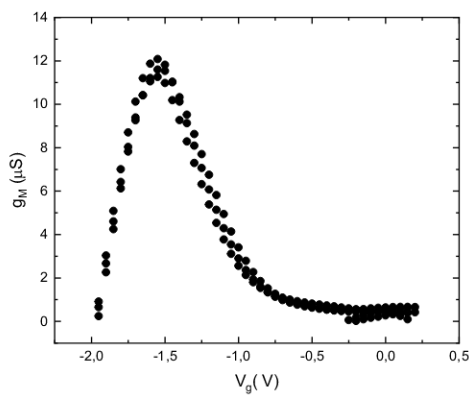
b)



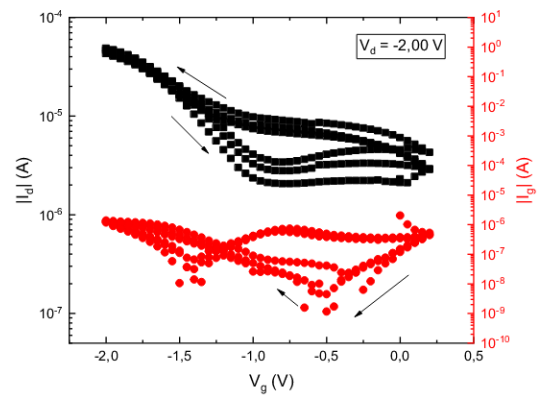
c)



d)



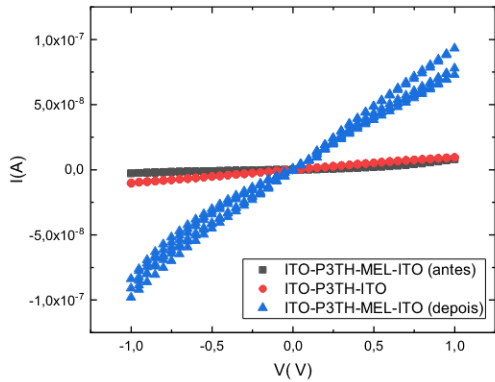
e)



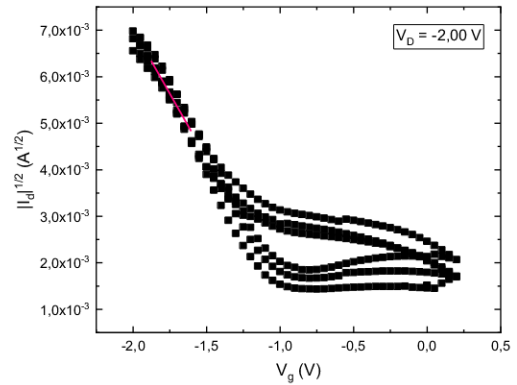
f)

Fonte: Autoria Própria.

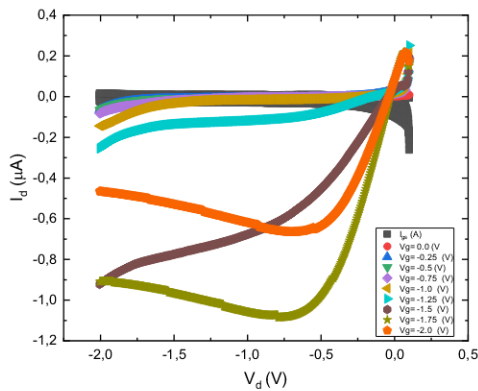
Figura 19 – Caracterização elétrica do transistor - 3 com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Iraí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d ; c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas)



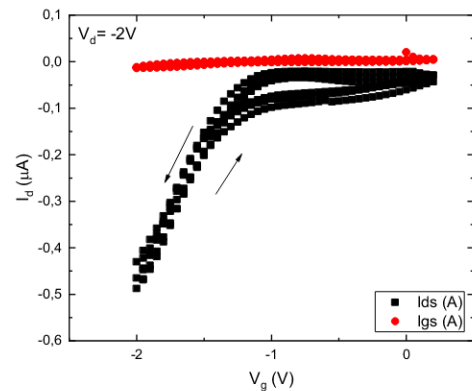
a)



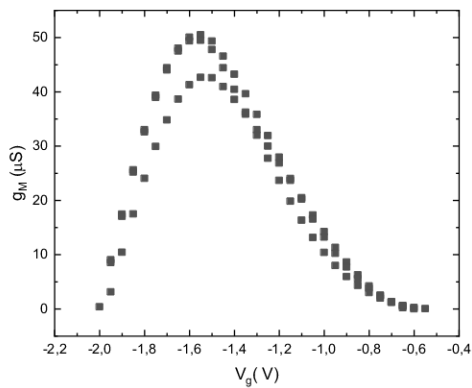
b)



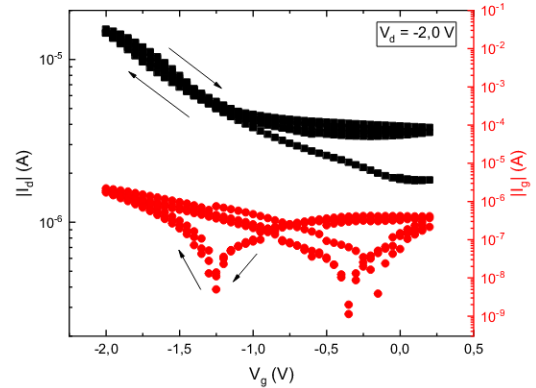
c)



d)



e)



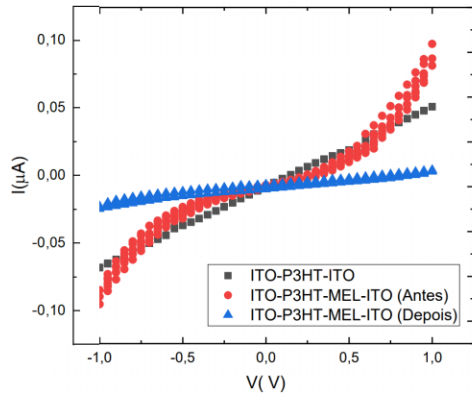
f)

Fonte: Autoria Própria.

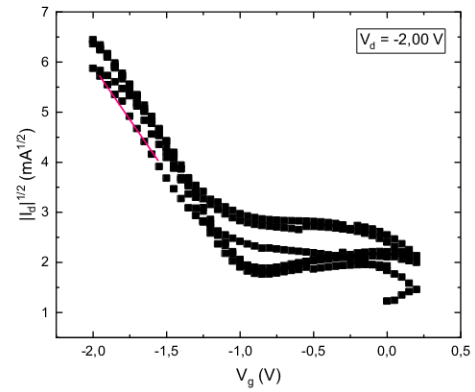
em relação ao transistor com porta eletrolítica de mel de abelhas Jataí. Analisando a curva característica obtidas para o dispositivo com mel de abelhas Iraí, na figura 20 c), este apresenta um comportamento diferenciado onde, o regime linear é observado mas seguido de diferentes regimes: (i) Para baixas tensões de V_g , o regime de saturação é observado porém seguido de um aumento de corrente novamente para valores de $V_d > -1,5 V$; (ii) Para as mais altas tensões testadas de V_g há um decréscimo da corrente e uma tendência de atingir o regime de saturação. Este perfil é atribuído na literatura a uma possível transição entre transporte 2D para transporte 3D. Na figura 20 e), o ponto máximo da transcondutância ocorre em $\sim 1.6 V$. Do conjunto de gráficos analisados para compreender se houve, ou não, difusão de íons para o canal observa-se que: (i) das curvas $I - V$ simples, houve uma alteração pequena na intensidade da corrente antes e após a caracterização elétrica do transistor que nos fornece indícios de que não houve (ou houve muito pouco) difusão de íons pro canal; (ii) não há histerese na na curva de transferência para a região onde este opera sob acumulação; (iii) e por fim, uma pequena mudança na posição dos mínimos da corrente de fuga é observado. Desta forma, conclui-se que este transistor opera no modo de efeito de campo e comporta-se como um EGOFET. Toda esta mesma interpretação dos gráficos é estendida à figura 20 (ao dispositivo nomeado como transistor - 4).

As Figuras 21 e 22 mostram a caracterização elétrica dos transistores com estrutura: ITO/P3HT/Pt utilizando mel de abelhas Tubuna. Das curvas $I - V$ simples analisadas até o presente momento, os transistores utilizando mel de abelhas Tubuna foram o que apresentaram menor variação na intensidade de corrente. Das curvas de transferência plotadas nas figuras 21 e 22 b), d) e f) nota-se uma histerese na região de *sub-threshold* e uma estabilidade menor dentre os três ciclos quando a intensidade da corrente de saída é baixa. Essa instabilidade dentre ciclos é observada também na curva de transcondutância. A intensidade da corrente I_d na figura 21 é menor do que na figura 22, porém, dos parâmetros extraídos dos diferentes transistores nota-se que a variação da intensidade não promove muita alteração mantendo boa reprodutibilidade dentre este parâmetros. Novamente, pela mesmo discussão já realizada para o transistores anteriores, nota-se que o conjunto de dados nos fornece informações de que este transistor opera sob efeito de campo e comporta-se como um EGOFET.

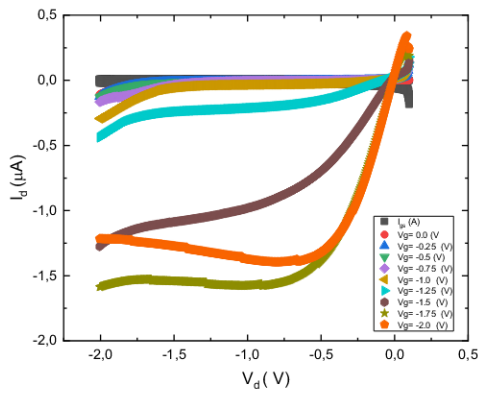
Figura 20 – Caracterização elétrica do transistor - 4, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Iraí como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3HT-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d ; c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).



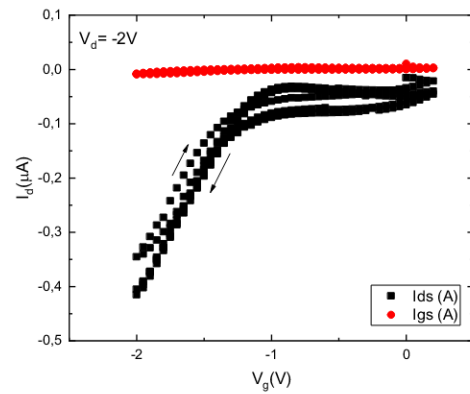
a)



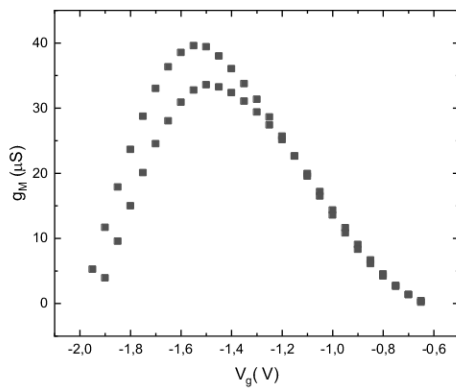
b)



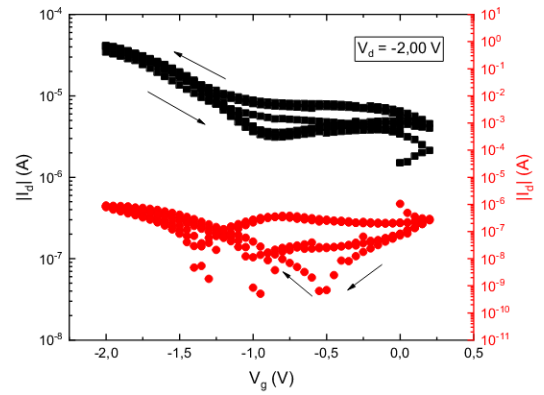
c)



d)



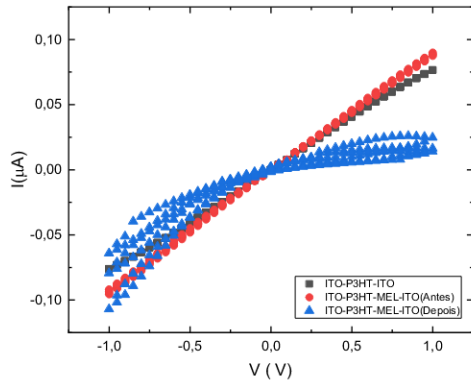
e)



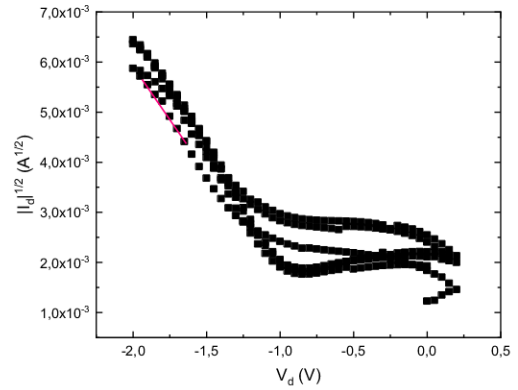
f)

Fonte: Autoria Própria.

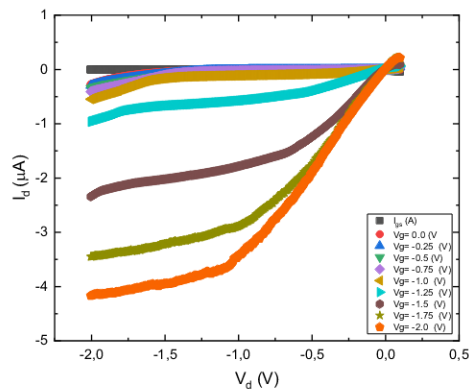
Figura 21 – Caracterização elétrica do transistor - 5, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Tubuna como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3HT-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).



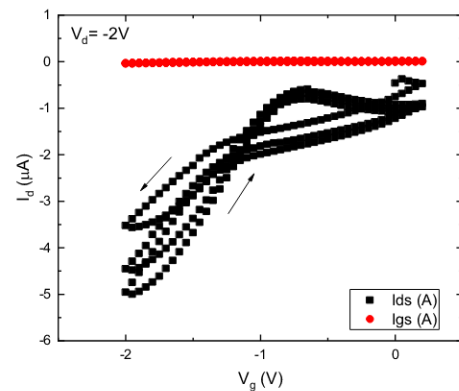
a)



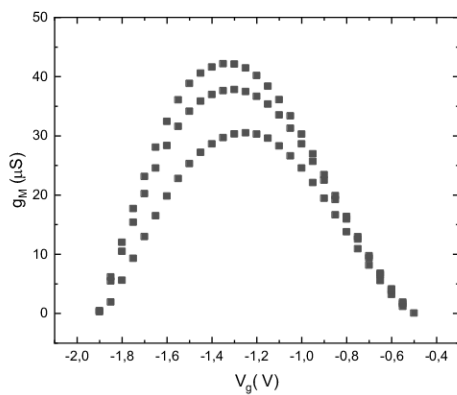
b)



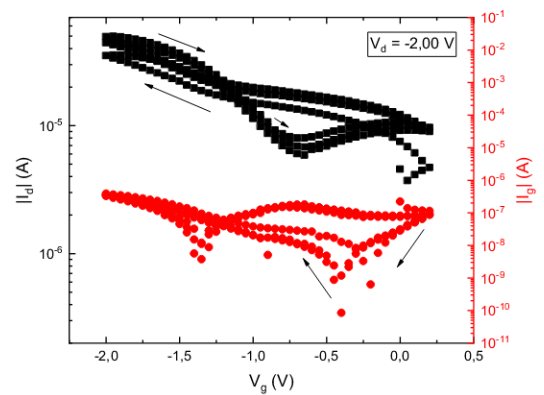
c)



d)



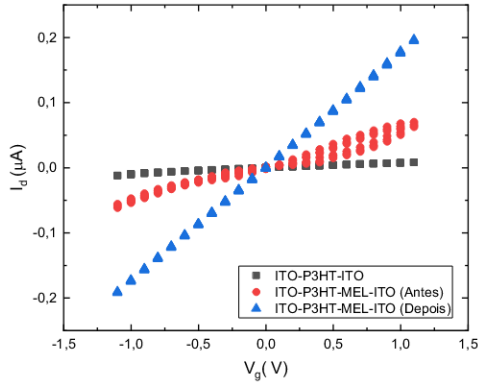
e)



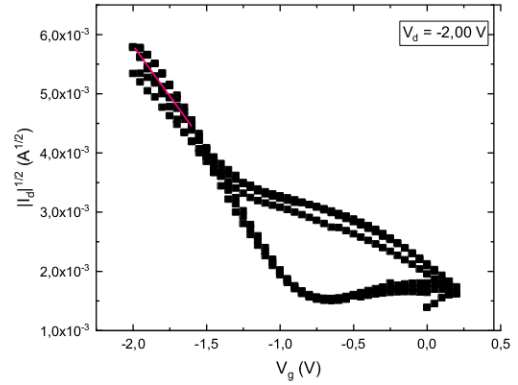
f)

Fonte: Autoria Própria.

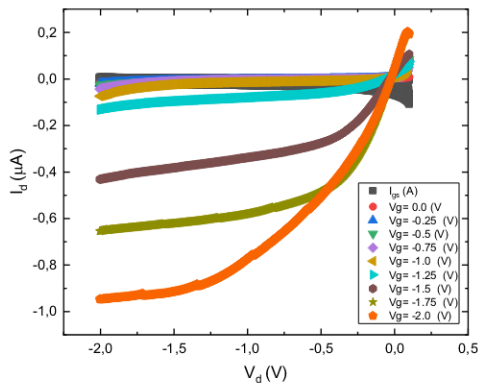
Figura 22 – Caracterização elétrica do transistor - 6, com a seguinte estrutura: ITO/P3HT/Pt e mel de abelhas Tubuna como eletrólito. a) $I - V$ simples realizado na estrutura ITO-P3TH-ITO: (i) logo após preparo da amostra, (ii) logo após deposição da gota de mel sobre o P3HT e (iii) logo após realizar as medidas de caracterização do transistor, respectivamente; b) Curva de Transferência plotada com a raiz quadrada da corrente I_d c) Curva de Saída; d) Curva de Transferência junto à corrente de fuga (I_g); e) Curva da Transcondutância; f) Curvas de transferência em escala log-linear (as setas pretas apontam o sentido da varredura em cada trecho das curvas).



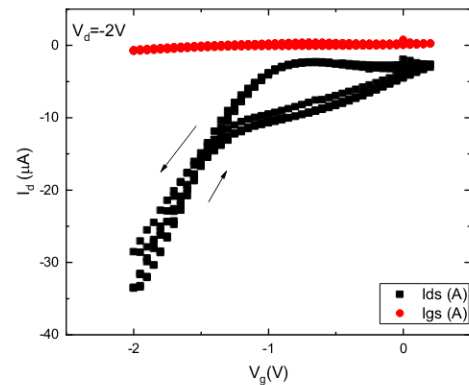
a)



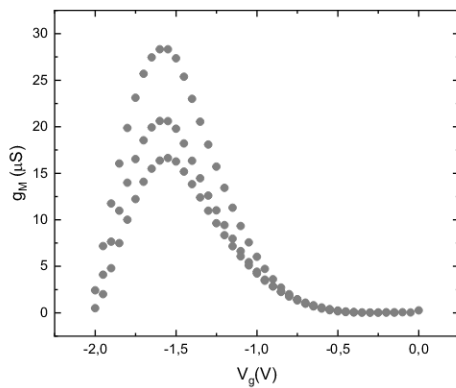
b)



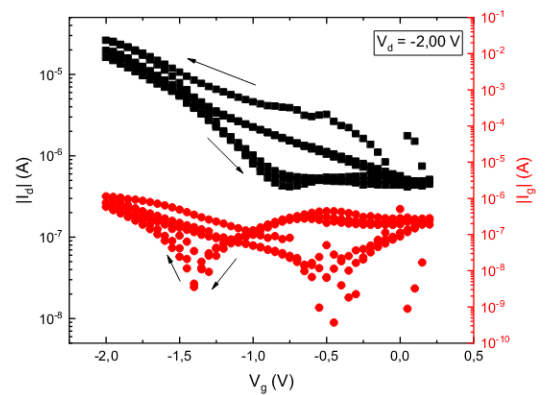
c)



d)



e)



f)

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 1 mostra a estatística por meio de média e desvio padrão dos parâmetros extraídos dos transistores com os três diferentes méis estudados. Destes, foi analisado o valor de tensão de *threshold* e razão *on/off*. Na primeira coluna há o valor de transistores utilizados para gerar esta estatística. Desta grande gama de transistores, notou-se que alguns não apresentaram perfil comum à grande maioria das curvas mas, mesmo assim, inserimos tais análises dentro da estatística para gerar a tabela 1. Destes resultados é possível concluir que tanto a razão *on/off* quando a tensão de *threshold* (V_t) possuem valores similares considerando o valor médio junto ao desvio padrão.

Tabela 1 – Estatística dos parâmetros extraídos dos transistores com os três diferentes méis estudados referentes ao primeiro ciclo da curva de transferência (dados encontram-se no anexo): méis de abelhas Jataí, Iraí e Tubuna como eletrólito. A estrutura comum à todos os transistores é: ITO/P3HT/Pt.

Tabela 1: Estatísticas dos parâmetros extraídos dos transistores.					
Tipos de Méis de Abelhas	n° de transistores	Média (V_t)	Desvio Padrão (V_t)	Média (I_{on}/I_{off})	Desvio Padrão (I_{on}/I_{off})
Jataí	10	-0,52	$\pm 0,21$	$1,8 \cdot 10^1$	$\pm 0,6 \cdot 10^1$
Iraí	6	-0,69	$\pm 0,22$	$3,8 \cdot 10^1$	$\pm 3,3 \cdot 10^1$
Tubuna	5	-0,82	$\pm 0,30$	$1,6 \cdot 10^1$	$\pm 2,1 \cdot 10^1$

Fonte: Autoria Própria.

A estatística dos parâmetros extraídos dos transistores obtidas na tabela 1 são referentes à média para o primeiro ciclo da curva de transferência apenas. A tabela completa com os dados utilizados encontram-se no anexo. Àqueles transistores que apresentaram parâmetros muito atípicos foram retirados da média, devido a não estarem funcionando. Neste anexo A ainda é possível encontrar outros parâmetros determinados, cujos métodos de extração destes parâmetros foram descritos da seção 2.1, sendo estes: tensão de *threshold* (V_t); razão *on/off* (I_{on}/I_{off}), $\mu \cdot C_i$ (F/Vs) dado por este produto uma vez que não possuímos ainda o valor da capacitância por unidade de área dos méis e, SS (mV/dec). As médias foram calculadas através do somatório dos dados de determinado parâmetro, equação (16), considerando o mesmo tipo de mel de abelha e por fim dividido pelo número de dados contidos nesse ensaios. Temos:

$$M = \frac{\sum x}{n}. \quad (16)$$

onde M é a média calculada para cada parâmetro, $\sum x$ é somatório de todos os dados de determinado parâmetro respectivamente n o número de ensaios. Então, a investigação de estatísticas do experimento é necessária, a fim de facilitar a classificação de experimentos em relação a qualquer variável, e são estatísticas adequadas para a classificação de experimentos com média semelhante para diferentes tipos de amostras de mel.

A Tabela 2 mostra sucintamente os parâmetros extraídos dos seis transistores cujos gráficos foram apresentados neste trabalho, lembrando que foram dois transistores para cada tipo de mel, sendo eles: Jataí, Iraí, Tubuna. Cabe lembrar que além da diferente coloração visível que cada mel apresenta (veja figura 22), e de que vários trabalhos científicos relatam as peculiaridades que cada caracterização química pode apresentar, apresentamos aqui uma gama de parâmetros referente à propriedades elétricas dos transistores baseados em porta eletrolítica de mel. A comparação das características elétricas (capacitância por unidade de área C_i , produto de

Tabela 2 – Parâmetros extraídos dos transistores com porta eletrolítica utilizando méis de abelhas Jataí, Iraí e Tubuna como eletrólito e comparação com literatura científica da área. Os parâmetros aqui indicados são referentes aos gráficos dos seis transistores mostrados nesta dissertação. A estrutura comum à todos os transistores é: ITO/P3HT/Pt. Comparação com transistores utilizando mel de abelha como eletrólito já publicados na literatura [27, 4] .

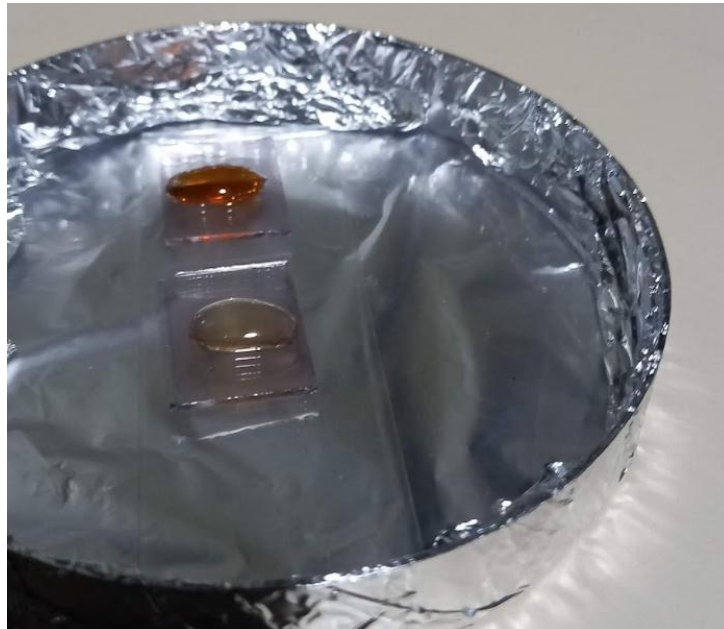
Estrutura do transistor	$\mu \cdot C_i$ (F/Vs)	V_t (V)	SS (mV/dec)	I_{on}/I_{off}	g_m (S)	Ref
ITO/P3HT/Pt e mel Jataí	$3,39 \cdot 10^{-8}$	-0,67	-4113,87	$0,74 \cdot 10^1$	$-1,46 \cdot 10^{-5}$	aqui
ITO/P3HT/Pt e mel Jataí	$2,65 \cdot 10^{-8}$	-0,65	-13535,46	$0,41 \cdot 10^1$	$-1,09 \cdot 10^{-5}$	aqui
ITO/P3HT/Pt e mel Iraí	$11,4 \cdot 10^{-8}$	-0,74	-5234,78	$0,80 \cdot 10^1$	$-4,33 \cdot 10^{-5}$	aqui
ITO/P3HT/Pt e mel Iraí	$9,22 \cdot 10^{-8}$	-0,73	-8046,35	$0,72 \cdot 10^1$	$-3,72 \cdot 10^{-5}$	aqui
ITO/P3HT/Pt e mel Tubuna	$5,63 \cdot 10^{-8}$	-0,59	-2650,90	$0,88 \cdot 10^1$	$-2,67 \cdot 10^{-5}$	aqui
ITO/P3HT/Pt e mel Tubuna	$4,47 \cdot 10^{-8}$	-0,90	-1536,48	$2,90 \cdot 10^1$	$-1,47 \cdot 10^{-5}$	aqui
Graphene HGFET	$3,5 \cdot 10^{-9}$	+0,1	-	$1,7 \cdot 10^0$	$-3,8 \cdot 10^{-5}$	[27]
P3HT-based HGOFET	-	-0,35	-	10^4	-	[4]
P(NDI2OD-T2)-based HGOFET	-	+0,25	-	10^4	-	[4]

*HGFET=Honey-Gated Field Effect Transistors.

Fonte: Autoria Própria.

capacitância com a mobilidade $\mu \cdot C_i$) transistores com controle de mel equivalendo a faixa de pesquisa da área [4], a diferença está na variedade de mel pesquisada o que mostra a versatilidade da técnica variando o tipo de mel. Uma das características de transporte são apresentadas como uma razão de I_{on}/I_{off} que para nossos transistores ficaram todas em aproximadamente uma ordem de grandeza. Na Tabela 1 para os três tipos de mel o valor foi estatisticamente calculado para I_{on}/I_{off} é da ordem de 10^1 . Quando comparamos o valor obtido para V_t do presente trabalho aos valores apresentados na literatura [4] vemos que nosso trabalho apresenta valores maiores o que atribuímos à preparação de nossos filmes de P3HT em ambiente aberto (exposição ao ar e temperatura ambiente, frente ao ambiente controlado do artigo mencionado). A transcondutância foi um parâmetro com alto grau de reprodutibilidade em nossos transistores e comparável ao apresentado na literatura [4].

Figura 23 – Comparação entre transistores com porta eletrolítica para as estruturas: ITO / P3HT / MEL como mel de abelhas Jataí e Iraí.



Fonte: A autoria Própria

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, investigou-se o uso de mel de abelhas sem ferrão e nativas do Brasil como camada dielétrica eletrolítica do *gate*. A estrutura bem sucedida e comum à todos os transistores foi: ITO (fonte e dreno) - P3HT (canal) - Mel (dielétrico eletrolítico do *gate*) e Pt (*gate*). Os testes realizados em transistores utilizando uma folha de ouro como eletrodo *gate* não se mostrou viável devido a baixa reprodutibilidade de dados e dificuldade de manipular uma folha sobre uma gota de mel. A utilização desta classe de méis de abelhas sem ferrão mostrou-se viável como dielétrico eletrolítico viscoso uma vez que nas curvas de transferência ($I_d - V_g$) há uma modulação e a corrente de fuga medida é de, pelo menos, uma ordem de grandeza menor que a corrente I_d . Nas curvas de saída ($I_d - V_d$), o perfil de regime linear é observado, porém o regime de saturação nem sempre é perfeitamente atingido, mas há sempre uma tendência de saturação. Todos os transistores analisados foram testados para uma faixa de tensão de até $-2,0 V$ tanto no dreno quanto no *gate*.

A caracterização elétrica dos transistores foi baseada não apenas nas curvas típicas da curva de transferência e curva de saída, mas ainda foi proposta uma medida nomeada como $I - V$ simples, a qual auxilia na compreensão dos resultados sobre o modo de operação dos transistores. Essa sequência de medidas, já proposta dentro de nosso grupo de pesquisa, baseia-se na análise de perfis das curvas: (i) $I - V$ simples, analisando se houve alteração na intensidade da corrente antes e após caracterização elétrica do transistor. O aumento da intensidade de corrente é um indício de que houve difusão de íons pro canal; (ii) perfil da corrente I_d na curva de transferência cíclica, observando se há histerese. Havendo histerese, este também pode ser um indício de ter havido difusão de íons pro canal e; (iii) perfil da corrente de fuga I_g na curva de transferência cíclica analisada em escala log-linear. Se houver um deslocamento dos pontos de mínimo desta curva ao longo dos ciclos de medidas, isso é mais um indício de difusão de íons pra dentro do canal. A posição destes mínimos em função da tensão V_g está relacionada a condição de distribuição de cargas dentro do canal e, se houver difusão de íons para o canal, haverá um novo valor de equilíbrio alterando sua posição em função de V_g . Baseado na análise conjunta destas três curvas, foi possível concluir que os transistores com porta eletrolítica utilizando os méis de abelhas Iraí e Tubuna apresentaram muito baixa (ou nenhuma) difusão de íons para o canal e estes operam sob efeito de campo. Portanto, os transistores que utilizaram mel de abelhas Iraí e Tubuna comportam-se como EGOFETs. Já para o transistor utilizando mel de abelhas

Jataí, a variação na intensidade da corrente na medida $I - V$, antes e após a caracterização elétrica do transistor, é um pouco mais pronunciada que pode ser indício de ter havido processo eletroquímico no canal. Além disso, a corrente I_d na curva de transferência apresenta uma leve histerese. Destes resultados, acredita-se que haja uma pequena quantidade de íons difundindo pra dentro do canal. Porém, a posição dos mínimos na curva da corrente de fuga sofre muito pouca alteração, mostrando que ainda há uma quantidade de íons quase desprezível nesta modulação e este transistor ainda se aproxima do modo de operação como EGOFET.

Após os indícios mensurados de que o transistor utilizando mel de abelhas Jataí apresente uma pequena difusão de íons pro canal, enquanto para os transistores com méis de abelhas Iraí e Tubuna não apresentarem tal indício, o foco do estudo foi analisar os parâmetros extraídos destes transistores a fim de encontrar similaridades (ou não) entre os valores determinados. Assim foi obtido que o parâmetro de transcondutância é o mais constante entre todos os transistores, cujo valor foi determinado em relação ao primeiro ciclo da curva de transferência. Os valores determinados são na ordem de $10^{-5} [S]$, coincidindo também com um valor fornecido na literatura de transistor baseado em mel comercial [4]. Os transistores operam na faixa de até $-2V$ e, referente à esta faixa de tensão foi determinada a razão *on/off* na ordem de grandeza de 10^1 para todos os transistores, o que demonstra reprodutibilidade na modulação. Como até o presente momento não foi realizada as medidas da capacitância por unidade de área dos méis, fornecemos o produto de capacitância com a mobilidade de efeito de campo $C_i \cdot \mu_{\text{eff}}$ calculada na ordem de $10^{-8} [F/V \cdot s]$ indicando que transistores desenvolvidos com três diferentes méis também possuem similaridades entre estes parâmetros. A tensão de *threshold* (V_i) teve maior variação dentre valores determinados, o que demonstra que a interface P3HT/mel (semicondutor/eletrolito) é alterada para cada diferente mel aplicado.

Por fim, a utilização de mel de abelhas Jataí, Tubuna e Iraí como dielétrico eletrolítico do *gate* em transistores mostra-se um material viável, sendo ainda barato, de fácil e rápida deposição e, se necessário, fácil remoção. A utilização de mel de abelha como eletrólito pode ser uma alternativa a substituir àqueles transistores de porta eletrolítica que utilizam água deionizada como eletrólito, pelo menos nas aplicações que exploram sua biocompatibilidade. Acredita-se que tais transistores podem vir a se tornar uma boa plataforma para teste como sensor e biossensor. Além disso, a característica rápida da fabricação do dispositivo, facilidade na limpeza, não toxicidade e baixo custo demonstram este dispositivo como uma tecnologia "*Eco friendly*".

REFERÊNCIAS

- 1 FAHLMAN, Mats; FABIANO, Simone; GUESKINE, Viktor; SIMON, Daniel; BERGGREN, Magnus; CRISPIN, Xavier. Interfaces in organic electronics. **Nature Reviews Materials**, v. 4, n. 10, p. 627–650, Oct 2019. ISSN 2058-8437. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0127-y>.
- 2 SCHULTZ, Thorsten; LUNGWITZ, Dominique; LONGHI, Elena; BARLOW, Stephen; MARDER, Seth R.; KOCH, Norbert. The interlayer method: A universal tool for energy level alignment tuning at inorganic/organic semiconductor heterojunctions. **Advanced Functional Materials**, v. 31, n. 10, p. 2010174, 2021. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202010174>.
- 3 TORRICELLI, Fabrizio; ADRAHTAS, Demetra Z.; BAO, Zhenan; BERGGREN, Magnus; BISCARINI, Fabio; BONFIGLIO, Annalisa; BORTOLOTTI, Carlo A.; FRISBIE, C. Daniel; MACCHIA, Eleonora; MALLIARAS, George G.; MCCULLOCH, Iain; MOSER, Maximilian; NGUYEN, Thuc-Quyen; OWENS, Róisín M.; SALLEO, Alberto; SPANU, Andrea; TORSI, Luisa. Electrolyte-gated transistors for enhanced performance bioelectronics. **Nature Reviews Methods Primers**, v. 1, n. 1, p. 66, Oct 2021. ISSN 2662-8449. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00065-8>.
- 4 SHAROVA, Alina S.; CAIRONI, Mario. Sweet electronics: Honey-gated complementary organic transistors and circuits operating in air. **Advanced Materials**, v. 33, n. 40, p. 2103183, 2021. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.202103183>.
- 5 ELLI, Giulia; CIOCCA, Manuela; LUGLI, Paolo; PETTI, Luisa. Field-effect-transistor based biosensors: a review of their use in environmental monitoring applications. In: **2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 102–107.
- 6 KERGOAT, Loig; HERLOGSSON, Lars; BRAGA, Daniele; PIRO, Benoit; PHAM, Minh-Chau; CRISPIN, Xavier; BERGGREN, Magnus; HOROWITZ, Gilles. A water-gate organic field-effect transistor. **Advanced Materials**, v. 22, n. 23, p. 2565–2569, 2010. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.200904163>.
- 7 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. Available at: <https://doi.org/10.1063/5.0041376>.
- 8 ORDONEZ, Richard C.; HAYASHI, Cody K.; TORRES, Carlos M.; MELCHER, Jordan L.; KAMIN, Nackieb; SEVERA, Godwin; GARMIRE, David. Rapid fabrication of graphene

field-effect transistors with liquid-metal interconnects and electrolytic gate dielectric made of honey. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10171, Aug 2017. ISSN 2045-2322. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10043-4>.

9 PENTOS¹, Katarzyna; ŁUCZYCKA, Deta. Dielectric properties of honey: the potential usability for quality assessment. **European Food Research and Technology**, v. 244, n. 5, p. 873–880, May 2018. ISSN 1438-2385. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3011-2>.

10 DANIEL, Thomas; UNO, Uno; ISAH, Kasim; AHMADU, Umaru. Electric double layer field effect transistor using sns thin film as semiconductor channel layer and honey gate dielectric. **East European Journal of Physics**, n. 3, p. 71–80, Oct. 2019. Available at: <https://periodicals.karazin.ua/eejp/article/view/14363>.

11 WANG, Binghao; CHEONG, Kuan Yew; HUANG, Chih-Fang; ZHAO, Feng. Investigation of honey as the electrolyte gate dielectrics of field effect transistors. **Microsystem Technologies**, v. 26, n. 5, p. 1717–1720, May 2020. ISSN 1432-1858. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04717-4>.

12 ALZAID, Meshal; IQBAL, Muhammad Zahir; HAIDER, Syed Shabhi; ZAKAR, Sana; KHAN, Sana; BILEL, C.; MOHAMED, W. S.; HADIA, N. M. A.; ALSALH, Fai. Charge carrier modulation in dual-gated graphene field effect transistor using honey as polar organic gate dielectric. **Applied Physics A**, v. 127, n. 6, p. 438, May 2021. ISSN 1432-0630. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04581-y>.

13 IRIMIA-VLADU, Mihai. “green” electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future. **Chem. Soc. Rev.**, The Royal Society of Chemistry, v. 43, p. 588–610, 2014. Available at: <http://dx.doi.org/10.1039/C3CS60235D>.

14 ALZAID, Meshal; IQBAL, Muhammad Zahir; HAIDER, Syed Shabhi; ZAKAR, Sana; KHAN, Sana; BILEL, C.; MOHAMED, W. S.; HADIA, N. M. A.; ALSALH, Fai. Charge carrier modulation in dual-gated graphene field effect transistor using honey as polar organic gate dielectric. **Applied Physics A**, v. 127, n. 6, p. 438, May 2021. ISSN 1432-0630. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04581-y>.

15 HOROWITZ, Gilles. Organic field-effect transistors. **Advanced Materials**, v. 10, n. 5, p. 365–377, 1998. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291521-4095%28199803%2910%3A5%3C365%3A%3AAID-ADMA365%3E3.0.CO%3B2-U>.

16 SEIDEL, K. F. **Efeitos do Preenchimento de Armadilhas de Portadores de Cargas em Transistores Orgânicos de Efeito de Campo**. 2008. Master’s Thesis (Master’s Thesis) — Universidade Federal do Paraná, 2008. Available at: <http://hdl.handle.net/1884/18516>.

- 17 HOROWITZ, G. Interfaces in organic field-effect transistors. *In*: GRASSER, T.; MELLER, G.; LI, L. (Ed.). **Organic Electronics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 113–153. ISBN 978-3-642-04538-7.
- 18 STALLINGA P.: Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices. John Wiley and Sons, Ltd, 2009. ISBN 9780470750162. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470750162.ch6>.
- 19 CHABINYC, Michael L.; LU, Jeng-Ping; STREET, Robert A.; WU, Yiliang; LIU, Ping; ONG, Beng S. Short channel effects in regioregular poly(thiophene) thin film transistors. **Journal of Applied Physics**, v. 96, n. 4, p. 2063–2070, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.1766411>.
- 20 SUN, Hengda; VAGIN, Mikhail; WANG, Suhao; CRISPIN, Xavier; FORCHHEIMER, Robert; BERGGREN, Magnus; FABIANO, Simone. Complementary logic circuits based on high-performance n-type organic electrochemical transistors. **Advanced Materials**, v. 30, n. 9, p. 1704916, 2018. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201704916>.
- 21 SUN, Hengda; VAGIN, Mikhail; WANG, Suhao; CRISPIN, Xavier; FORCHHEIMER, Robert; BERGGREN, Magnus; FABIANO, Simone. Complementary logic circuits based on high-performance n-type organic electrochemical transistors. **Advanced Materials**, v. 30, n. 9, p. 1704916, 2018. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201704916>.
- 22 ROMERO, Murilo A.; RAGI; MANZOLI, Regiane e; EDUARDO, José. Transistores de alta mobilidade eletrônica (hemts): Princípios de operação e características eletrônicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física [online]**, v. 37, n. 4, p. pp. 4306–1–4306–15, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1590/S1806-11173741967>.ISSN1806-9126.
- 23 WANG, Denjung; NOËL, Vincent; PIRO, Benoît. Electrolytic gated organic field-effect transistors for application in biosensors—a review. **Electronics**, v. 5, n. 1, 2016. ISSN 2079-9292. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9292/5/1/9>.
- 24 RIVNAY, Jonathan; INAL, Sahika; SALLES, Alberto; OWENS, Róisín M.; BERGGREN, Magnus; MALLIARAS, George G. Organic electrochemical transistors. **Nature Reviews Materials**, v. 3, n. 2, p. 17086, Jan 2018. ISSN 2058-8437. Available at: <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.86>.
- 25 NGUY, Tin Phan; HAYAKAWA, Ryoma; KILINC, Volkan; PETIT, Matthieu; RAIMUNDO, Jean-Manuel; CHARRIER, Anne; WAKAYAMA, Yutaka. Stable operation of water-gated organic field-effect transistor depending on channel flatness, electrode metals and surface treatment. **Japanese Journal of Applied Physics**, IOP Publishing, v. 58, n. SD, p. SDDH02, may 2019. Available at: <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab09d2>.

26 OLIVEIRA, Rafael Furlan de; MERCES, Leandro; VELLO, Tatiana Parra; BUFON, Carlos César Bof. Water-gated phthalocyanine transistors: Operation and transduction of the peptide–enzyme interaction. **Organic Electronics**, v. 31, p. 217–226, 2016. ISSN 1566-1199. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566119916300416>.

27 ORDONEZ, Richard C.; HAYASHI, Cody K.; TORRES, Carlos M.; MELCHER, Jordan L.; KAMIN, Nackieb; SEVERA, Godwin; GARMIRE, David. Rapid fabrication of graphene field-effect transistors with liquid-metal interconnects and electrolytic gate dielectric made of honey. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10171, Aug 2017. ISSN 2045-2322. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10043-4>.

28 WANG, Binghao; CHEONG, Kuan Yew; HUANG, Chih-Fang; ZHAO, Feng. Investigation of honey as the electrolyte gate dielectrics of field effect transistors. **Microsystem Technologies**, v. 26, n. 5, p. 1717–1720, May 2020. ISSN 1432-1858. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04717-4>.

29 WANG, Depeng; ZHAO, Shufang; YIN, Ruiyang; LI, Linlin; LOU, Zheng; SHEN, Guozhen. Recent advanced applications of ion-gel in ionic-gated transistor. **npj Flexible Electronics**, v. 5, n. 1, p. 13, Jun 2021. ISSN 2397-4621. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00110-2>.

30 LEE, Keun Hyung; KANG, Moon Sung; ZHANG, Sipei; GU, Yuanyan; LODGE, Timothy P.; FRISBIE, C. Daniel. “cut and stick” rubbery ion gels as high capacitance gate dielectrics. **Advanced Materials**, v. 24, n. 32, p. 4457–4462, 2012. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201200950>.

31 PENTOS, Katarzyna; ŁUCZYCKA, Deta. Dielectric properties of honey: the potential usability for quality assessment. **European Food Research and Technology**, v. 244, n. 5, p. 873–880, May 2018. ISSN 1438-2385. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3011-2>.

32 BOBANY, Denise de Mello; PIMENTEL, Mariana de Alcantara Pereira; MARTINS, Roberta Rollemberg Cabral; NETTO, Bernardino Alves de Souza; TOLLA, Marcelo Silva de. Atividade antimicrobiana do mel de abelhas jataí (*tetragonisca angustula*) em cultivo de microrganismos do conduto auditivo de caninos domésticos (*canis familiaris*). **Ciência Animal Brasileira**, v. 11, n. 2, p. 441–446, jun. 2010. Available at: <https://www.revistas.ufg.br/vet/article/view/4585>.

33 11, Normativa *n*^o. **BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Instrução Normativa n^o11 - Regulamento técnico de identidade e qualidade do mel.** 2021. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/suasa/regulamentos-tecnicos-de-identidade-e-qualidade-de-produtos-de-origem-animal-1/rtiq-mel-e-produtos-apicolas>.

34 MALASPINA, Jerônimo Kahn Villas-Bôas e Osmar. **PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PROPOSTOS PARA O CONTROLE DE QUALIDADE DO MEL DE ABELHAS INDÍGENAS SEM FERRÃO NO BRASIL**. 2005. Available at: <https://www.apacame.org.br/mensagemdoce/82/artigo2.htm>.

35 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**, v. 106, n. 18, p. 5375–5377, 1984. Available at: <https://doi.org/10.1021/ja00330a070>.

36 SCHEPARTZ, Abner I.; SUBERS, Mary H. Catalase in honey. **Journal of Apicultural Research**, Taylor and Francis, v. 5, n. 1, p. 37–43, 1966. Available at: <https://doi.org/10.1080/00218839.1966.11100130>.

37 WESTON, Roderick J. The contribution of catalase and other natural products to the antibacterial activity of honey: a review. **Food Chemistry**, v. 71, n. 2, p. 235–239, 2000. ISSN 0308-8146. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030881460000162X>.

38 CRANE, Eva. **O livro do mel**. São Paulo: 2. ed, 2008. 226 p p.

39 LOPES, Carlos; BRUNO, Carvalho; SOUZA, Bruno; SODRÉ, Geni; SODRÉ, Silva; CARLOS, Luis; ROGÉRIO, Marchini; OLIVEIRA, Marcos; CARLOS, Alves; CARVALHO, Carlos; DE, Marcos; ALVES, Rogério. Mel de abelhas sem ferrão: contribuição para a caracterização físico-química. p. 15–20, 01 2005.

40 VILLAS-BÔAS, Jerônimo. **Manual Tecnológico Mel de Abelhas sem Ferrão**. Brasília, DF: 1a edição, 2012. 63 p p.

41 MORETI, Augusta Carolina; SODRÉ, Geni; MARCHINI, Luís Carlos; CARVALHO, Carlos Alfredo. Cor de amostras de mel de *Apis mellifera* L. de diferentes estados brasileiros. **Boletim de Indústria Animal**, v. 63, n. 3, p. 159–164, nov. 2013. Available at: <http://www.iz.sp.gov.br/bia/index.php/bia/article/view/1267>.

42 PENTOS, Katarzyna; ŁUCZYCKA, Deta. Dielectric properties of honey: the potential usability for quality assessment. **European Food Research and Technology**, v. 244, n. 5, p. 873–880, May 2018. ISSN 1438-2385. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3011-2>.

43 GOBIERNO, Presidencia del. **Orden de 12 de junio de 1986 por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis para la miel**. 1986. Available at: [https://www.boe.es/eli/es/o/1986/06/12/\(3\)](https://www.boe.es/eli/es/o/1986/06/12/(3)).

44 ANACLETO, Daniela de Almeida et al. **Composição de amostras de mel de abelha Jataí**. [S.l.]: <<https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000300013>>. Epub 04 Nov 2009. ISSN 1678-457X. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000300013>, 2021. v. 29.

45 GUO, Wenchuan; ZHU, Xinhua; LIU, Yi; ZHUANG, Hong. Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 2, p. 275–281, 2010. ISSN 0260-8774. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877409005317>.

46 OSSILA Ltd, Solpro Business Park. <https://www.ossila.com/products/interdigitated-ito-ofet-substrates>. Accessed: 2021-12-07.

47 MERCK, Pesquisa. Desenvolvimento. Produção. **Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)**. 2021. Available at: https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/search/156074-98-5?focus=products&page=1&perPage=30&sort=relevance&term=156074-98-5&type=cas_number.

48 F.ARAUJO, Angelica. **Abelhas sem ferrão: Iraí (Nannotrigona testaceicornes)**. 2021. Available at: <https://br.pinterest.com/pin/326229566741810842/>.

49 BENOSKI, Gabriel. **Abelhando Mundo Afora Desvende o Universo das Abelhas Nativas**. 2021. Available at: <https://www.abelhandomundoafora.com.br/tubuna>.

50 GONZAGA, Vinícius. **A Associação de Meliponicultores de Minas Gerais denominada “AME-Minas”**. 2021. Available at: <https://www.ameminas.com.br/2015/02/28/irai-nannotrigona-testaceicornes/>.

51 KHAN, Muhammad Atif; RATHI, Servin; PARK, Jinwoo; LIM, Dongsuk; LEE, Yoontae; YUN, Sun Jin; YOUN, Doo-Hyeob; KIM, Gil-Ho. Junctionless diode enabled by self-bias effect of ion gel in single-layer mos2 device. **ACS Applied Materials & Interfaces**, American Chemical Society, v. 9, n. 32, p. 26983–26989, Aug 2017. ISSN 1944-8244. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b06071>.

ANEXO

ANEXO A – NAS TABELAS A SEGUIR, É POSSÍVEL ENCONTRAR TODOS OS PARÂMETROS EXTRAÍDOS NA CARATERIZAÇÃO DOS TRANSISTORES PARA OS TRÊS DIFERENTES MÉIS DE ABELHAS SEM FERRÃO

Tabela 3 – Dados referente à caracterização elétrica e parâmetros extraídos da caracterização elétrica do transistor com porta eletrolítica utilizando mel de abelhas Jataí.

Formações da medida			Parâmetros extraídos dos dados																
Data da medida	Abelha	Trans. nº	Ciclo	Colunas1	Ion	Ioff	Ion/Ioff	a (V)	b (V)	Vt (V)	m*Ci (F/Vs)	a (SS)	SS (mV/dec)	delta Vt (V)	delta m*Ci (F/Vs)	delta SS (mV/dec)	Vt médio (V)	m*Ci médio (F/Vs)	
01/11/2021	Jataí	1	1		-1,03E-05	-8,58E-07	1,2E+01	-0,00211	-0,00103	-0,49	1,48E-08	-0,45769	-2184,88	0,02	1,73E-09	1256,68	-0,49	1,67E-08	
			2		-1,16E-05	-1,18E-06	9,9E+00	-0,00226	-0,00109	-0,48	1,70E-08	-0,35062	-2852,09						
			3		-1,20E-05	-1,33E-06	9,0E+00	-0,00234	-0,0012	-0,51	1,83E-08	-0,21659	-4617,02						
		2	1		-1,79E-05	-7,79E-07	2,3E+01	-0,00299	-0,00195	-0,65	2,98E-08	-0,55544	-1800,37	0,03	4,61E-09	372,80	-0,65	3,46E-08	
			2		-1,96E-05	-1,35E-06	1,5E+01	-0,00324	-0,00201	-0,62	3,50E-08	-0,42739	-2339,78						
			3		-2,01E-05	-1,51E-06	1,3E+01	-0,00342	-0,0023	-0,67	3,90E-08	-0,39748	-2515,85						
		3	1		-1,99E-05	-1,11E-06	1,8E+01	-0,00254	-0,00063619	-0,25	2,15E-08	-0,31659	-3158,66	0,05	1,90E-09	5427,53	-0,26	2,28E-08	
			2		-2,29E-05	-1,33E-06	1,7E+01	-0,00257	-0,000553814	-0,22	2,20E-08	-0,08476	-11798,02						
			3		-2,12E-05	-1,33E-06	1,6E+01	-0,00274	-0,000854203	-0,31	2,50E-08	-0,07593	-13170,03						
		4	1		-1,46E-05	-6,60E-07	2,2E+01	-0,00235	-0,000881703	-0,38	1,84E-08	-0,9381	-1065,98	0,08	2,48E-09	4388,67	-0,32	1,98E-08	
			2		-1,74E-05	-1,28E-06	1,4E+01	-0,00235	-0,000536914	-0,23	1,84E-08	-0,21165	-4724,78						
			3		-1,84E-05	-1,56E-06	1,2E+01	-0,00261	-0,000931074	-0,36	2,27E-08	-0,10199	-9804,88						
		5	1		-1,22E-05	-4,38E-07	2,8E+01	-0,00187	-0,000280492	-0,15	1,17E-08	-0,96083	-1040,77	0,13	9,70E-10	172645,30	-0,02	1,11E-08	
			2		-1,38E-05	-9,21E-07	1,5E+01	-0,00173	0,000200563	0,12	9,98E-09	-0,01544	-64766,84						
			3		-1,38E-05	-1,06E-06	1,3E+01	-0,00187	-6,04735E-05	-0,03	1,17E-08	-0,00306	-326797,39						
10/11/2021	Jataí	3	1		-3,23E-05	-2,24E-06	1,4E+01	-0,00449	-0,00331	-0,74	6,72E-08	-0,16601	-6023,73	0,19	1,36E-08	2296,57	-0,55	5,24E-08	
			2		-4,02E-05	-2,54E-06	1,6E+01	-0,00386	-0,00142	-0,37	4,97E-08	-0,64957	-1539,48						
			3		-2,65E-05	-2,25E-06	1,2E+01	-0,00348	-0,00185	-0,53	4,04E-08	-0,34239	-2920,65						
		4	1		-8,89E-06	-3,04E-06	2,9E+00	-0,00158	-0,000219763	-0,14	8,32E-09	0,14593	6852,60	0,14	2,86E-09	17588,93	-0,30	1,15E-08	
			2		-1,02E-05	-3,54E-06	2,9E+00	-0,00192	-0,000673291	-0,35	1,23E-08	0,05139	19459,04						
			3		-1,06E-05	-3,67E-06	2,9E+00	-0,00204	-0,000836658	-0,41	1,39E-08	0,02404	41597,34						
		5	1		-2,13E-05	-2,96E-06	7,2E+00	-0,00394	-0,00329	-0,84	5,17E-08	-0,16426	-6087,91	0,09	3,67E-09	1096,84	-0,81	4,81E-08	
			2		-2,51E-05	-3,10E-06	8,1E+00	-0,00365	-0,00259	-0,71	4,44E-08	-0,13827	-7232,23						
			3		-1,81E-05	-2,94E-06	6,2E+00	-0,0038	-0,00336	-0,88	4,81E-08	-0,12076	-8280,89						
18/11/2021	Jataí	1	1		-1,77E-05	-2,39E-06	7,4E+00	-0,00319	-0,00215	-0,67	3,39E-08	-0,24308	-4113,87	0,07	4,55E-09	16170,92	-0,69	3,68E-08	
			2		-2,06E-05	-4,30E-06	4,8E+00	-0,00321	-0,00204	-0,64	3,43E-08	-0,03402	-29394,47						
			3		-1,89E-05	-4,87E-06	3,9E+00	-0,00355	-0,00275	-0,77	4,20E-08	-0,02922	-34223,13						
		2	1		-1,45E-05	-1,83E-06	7,9E+00	-0,00242	-0,00103	-0,43	1,95E-08	-0,32137	-3111,68	0,11	3,49E-09	6303,15	-0,53	2,30E-08	
			2		-1,53E-05	-3,42E-06	4,5E+00	-0,00262	-0,00133	-0,51	2,29E-08	-0,06914	-14463,41						
			3		-1,45E-05	-3,54E-06	4,1E+00	-0,00282	-0,00184	-0,65	2,65E-08	-0,07388	-13535,46						
		3	1		-2,07E-05	-2,68E-06	7,7E+00	-0,00267	-0,000819872	-0,31	2,38E-08	-0,18883	-5295,77	0,13	5,49E-09	6403,94	-0,45	3,00E-08	
			2		-2,17E-05	-4,24E-06	5,1E+00	-0,00312	-0,00159	-0,51	3,24E-08	-0,07324	-13653,74						
			3		-2,17E-05	-4,45E-06	4,9E+00	-0,00319	-0,00172	-0,54	3,39E-08	-0,05593	-17879,49						
		4	1		5,23E-06	-1,71E-06	3,1E+00	-0,000642617	0,000924362	1,44	1,38E-09	-	-	0,43	8,60E-10	#DIV/0!	1,01	2,30E-09	
			2		-6,14E-06	-2,40E-06	2,6E+00	-0,00096676	0,000550302	0,57	3,08E-09	-	-						
			3		-6,88E-06	-2,76E-06	2,5E+00	-0,000858733	0,0008667	1,01	2,46E-09	-	-						
		5	1		-1,22E-05	-3,50E-06	4,9E+00	-0,00213	-0,00077935	-0,37	1,51E-08	-0,06543	-15283,51	0,02	1,40E-09	79737,68	-0,37	1,67E-08	
			2		-1,39E-05	-3,83E-06	3,6E+00	-0,00227	-0,000822039	-0,36	1,72E-08	0,02176	45955,88						
			3		-1,38E-05	-3,89E-06	3,6E+00	-0,00231	-0,000914463	-0,40	1,78E-08	0,007	142857,14						
					Medias	1,3E+01	-0,00257	-0,00103	-0,41	2,20E-08									
					Desvio Padrão	6,42E+00	0,000859	0,00106	0,46	1,49E-08									

Fonte: Autoria Própria

Tabela 4 – Dados referente à caracterização elétrica e parâmetros extraídos da caracterização elétrico do transistor com porta eletrolítica utilizando mel de abelhas Tubuna.

		Parâmetros extraídos dos dados																
	Colunas1	Colunas2	Ion	Ioff	Ion/Ioff	a (Vt)	b (Vt)	Vt (V)	m ² CI (F/Vs)	a (SS)	SS (mV/dec)	delta Vt (V)	delta m ² CI (F/Vs)	delta SS (mV/dec)	Vt médio (V)	m ² CI médio (F/Vs)	SS médio (mV/dec)	
23/11/2021	Tubuna	1	-2,48E-06	-7,99E-08	3,1E+01	-0,00276	-0,00397	-1,44	2,54E-08	-0,70437	-1419,71	0,20	5,35E-09	356,58	-1,20	2,96E-08	-1781,73	
		2	-6,82E-06	-3,78E-07	1,8E+01	-0,00289	-0,00319	-1,10	2,78E-08	-0,55776	-1792,89							
		3	-9,36E-06	-6,83E-07	1,4E+01	-0,00327	-0,0035	-1,07	3,56E-08	-0,46891	-2132,61							
	2	1	-3,52E-05	-7,51E-06	4,7E+00	-0,00248	0,000974	0,39	2,05E-08	-			0,17	9,39E-09	#DIV/0!	0,21	3,03E-08	#DIV/0!
		2	-4,45E-05	-1,14E-05	3,9E+00	-0,00306	0,00058569	0,19	3,12E-08									
		3	-4,96E-05	-1,22E-05	4,1E+00	-0,00343	0,000197168	0,06	3,92E-08									
	3	1	-2,85E-05	-4,40E-06	6,5E+00	-0,0028	-0,000266877	-0,10	2,61E-08	-0,80381	-1244,08	0,25	1,51E-08	728,20	-0,35	4,13E-08	-2056,25	
		2	-3,34E-05	-4,53E-06	7,4E+00	-0,00353	-0,001125	-0,35	4,15E-08	-0,4398	-2273,76							
		3	-3,36E-05	-3,82E-06	8,8E+00	-0,00411	-0,00241	-0,59	5,63E-08	-0,37223	-2650,90							
	4	1	-2,62E-05	-4,87E-07	5,4E+01	-0,0039	-0,00258	-0,66	5,07E-08	-0,31285	-3196,42	0,13	4,92E-09	958,66	-0,81	4,99E-08	-2089,45	
		2	-1,97E-05	-4,95E-07	4,0E+01	-0,00404	-0,00353	-0,87	5,44E-08	-0,65127	-1535,46							
		3	-1,61E-05	-5,48E-07	2,9E+01	-0,00366	-0,00329	-0,90	4,47E-08	-0,65084	-1536,48							
18/11/2021	Tubuna	1	-3,30E-06	-5,80E-07	5,7E+00	-0,00166	-0,00151	-0,91	9,19E-09	-0,3741	-2673,08	0,05	1,07E-09	94761,85	-0,87	1,01E-08	-37302,79	
		2	-4,21E-06	-1,66E-06	2,5E+00	-0,00184	-0,00164	-0,89	1,13E-08	-0,00692	-144508,67							
		3	-4,33E-06	-1,70E-06	2,5E+00	-0,00172	-0,00139	-0,81	9,86E-09	0,02835	35273,37							
	2	1	-3,31E-06	-6,39E-07	5,2E+00	-0,00192	-0,00207	-1,08	1,23E-08	-0,13232	-757,44	0,08	1,07E-09	3148,74	-0,99	1,33E-08	-11142,65	
		2	-4,76E-06	-1,27E-06	3,7E+00	-0,00199	-0,00184	-0,92	1,32E-08	-0,08057	-12411,57							
		3	-4,63E-06	-1,43E-06	3,2E+00	-0,00208	-0,00202	-0,97	1,44E-08	-0,0743	-13458,95							
	3	1	-4,16E-06	-3,26E-06	1,3E+00	-0,00054164	0,000946147	1,75	9,78E-10	-		0,68	6,30E-10	#DIV/0!	1,09	1,50E-09	#DIV/0!	
		2	-3,91E-06	-2,84E-06	1,4E+00	-0,000636975	0,000711694	1,14	1,31E-09									
		3	-3,77E-06	-2,58E-06	1,5E+00	-0,000811854	0,000316608	0,39	2,20E-09									
	4	1	-1,83E-06	-1,94E-07	9,5E+00	-0,0014	-0,00147	-1,05	6,53E-09	-0,36088	-2771,00	0,23	1,83E-09	31505,75	-0,80	8,08E-09	-25830,49	
		2	-4,49E-06	-9,28E-07	4,8E+00	-0,00151	-0,000911879	-0,60	7,60E-09	-0,07697	-12992,07							
		3	-4,77E-06	-1,55E-06	3,1E+00	-0,00174	-0,00131	-0,75	1,01E-08	-0,0162	-61728,40							
Media			5,0E+00	-0,00228	-0,00149	-0,78	1,75E-08											
Desvio Padrão			1,37E+01	0,00108	0,001510	0,77	1,75E-08											

Fonte: Autoria Própria

Tabela 5 – Dados referente à caracterização elétrica e parâmetros extraídos da caracterização elétrica do transistor com porta eletrolítica utilizando mel de abelhas Iraí.

Formações da medida				Parâmetros extraídos dos dados																
Data da medida	Abelha	Trans. n°	Ciclo	Columna1	Ion	Ioff	Ion/Ioff	a (V)	b (V)	Vt (V)	m°Ci (f/Vs)	a (SS)	SS (mV/dec)	delta Vt (V)	delta m°Ci (f/Vs)	delta SS (mV/dec)	Vt médio (V)	m°Ci médio (f/Vs)		
01/11/2021	Jatai	1	1		-1,03E-05	-8,58E-07	1,2E-01	-0,00211	-0,00103	-0,49	1,49E-08	-0,45769	-2194,88	0,02	1,73E-09	1256,68	-0,49	1,67E-08		
			2		-1,16E-05	-1,18E-06	9,9E-00	-0,00226	-0,00109	0,48	1,70E-08	-0,35062	-2652,09							
			3		-1,20E-05	-1,33E-06	9,0E-00	-0,00234	-0,0012	-0,51	1,83E-08	-0,21659	-4617,02							
		2	1		-1,79E-05	-7,79E-07	2,3E-01	-0,00299	-0,00195	-0,65	2,98E-08	-0,55544	-1800,37	0,03	4,61E-09	372,80	-0,65	3,46E-08		
			2		-1,96E-05	-1,35E-06	1,5E-01	-0,00324	-0,00201	-0,62	3,50E-08	-0,42739	-2339,78							
			3		-2,01E-05	-1,51E-06	1,3E-01	-0,00342	-0,0023	-0,67	3,90E-08	-0,39748	-2515,85							
		3	1		-1,89E-05	-1,11E-06	1,8E-01	-0,00254	-0,0063619	-0,25	2,15E-08	-0,31659	-3158,66	0,05	1,90E-09	5427,53	-0,26	2,28E-08		
			2		-2,29E-05	-1,33E-06	1,7E-01	-0,00257	-0,00553814	-0,22	2,20E-08	-0,08476	-11798,02							
			3		-2,12E-05	-1,33E-06	1,6E-01	-0,00274	-0,00854203	-0,31	2,50E-08	-0,07393	-13170,03							
		4	1		-1,46E-05	-6,60E-07	2,2E-01	-0,00235	-0,00881703	-0,38	1,84E-08	-0,9381	-1065,98	0,08	2,48E-09	4388,67	-0,32	1,98E-08		
			2		-1,74E-05	-1,28E-06	1,4E-01	-0,00235	-0,00536914	-0,23	1,84E-08	-0,21165	-4724,78							
			3		-1,84E-05	-1,56E-06	1,2E-01	-0,00261	-0,00891074	-0,36	2,27E-08	-0,10199	-9804,88							
		5	1		-1,22E-05	-4,38E-07	2,8E-01	-0,00187	-0,00280492	-0,15	1,17E-08	-0,96083	-1040,77	0,13	9,70E-10	172645,30	-0,02	1,11E-08		
			2		-1,38E-05	-9,21E-07	1,5E-01	-0,00173	0,002020563	0,12	9,98E-09	-0,01544	-64766,84							
			3		-1,38E-05	-1,06E-06	1,3E-01	-0,00187	-6,04735E-05	-0,03	1,17E-08	-0,00306	-336797,39							
10/11/2021	Jatai	3	1		-3,23E-05	-2,24E-06	1,4E-01	-0,00449	-0,00331	-0,74	6,72E-08	-0,16601	-6023,73	0,19	1,36E-08	2296,57	-0,55	5,24E-08		
			2		-4,02E-05	-2,54E-06	1,6E-01	-0,00386	-0,00142	-0,37	4,97E-08	-0,64957	-1539,48							
			3		-2,65E-05	-2,25E-06	1,2E-01	-0,00348	-0,00185	-0,53	4,04E-08	-0,34239	-2920,65							
		4	1		-8,89E-06	-3,04E-06	2,9E-00	-0,00158	-0,000219763	-0,14	8,32E-09	0,14593	6852,60	0,14	2,86E-09	17588,93	-0,30	1,15E-08		
			2		-1,07E-05	-3,54E-06	2,9E-00	-0,00192	-0,000673291	-0,35	1,23E-08	0,05139	19459,04							
			3		-1,06E-05	-3,67E-06	2,9E-00	-0,00204	-0,000836858	-0,41	1,39E-08	0,02404	41597,34							
		5	1		-2,13E-05	-2,96E-06	7,2E-01	-0,00394	-0,00329	-0,84	5,17E-08	-0,16426	-6007,91	0,09	3,67E-09	1096,84	-0,81	4,81E-08		
			2		-2,51E-05	-3,10E-06	8,1E-00	-0,00365	-0,00259	-0,71	4,44E-08	-0,13827	-7232,23							
			3		-1,81E-05	-2,94E-06	6,2E-00	-0,0038	-0,00336	-0,88	4,81E-08	-0,12076	-8200,89							
18/11/2021	Jatai	1	1		-1,77E-05	-2,39E-06	7,4E-00	-0,00319	-0,00215	-0,67	3,39E-08	-0,24308	-4113,87	0,07	4,55E-09	16170,92	-0,69	3,68E-08		
			2		-2,06E-05	-4,30E-06	4,8E-00	-0,00321	-0,00204	-0,64	3,43E-08	-0,03402	-29394,47							
			3		-1,80E-05	-4,87E-06	3,9E-00	-0,00355	-0,00275	-0,77	4,20E-08	-0,02922	-34223,13							
		2	1		-1,45E-05	-1,83E-06	7,9E-00	-0,00242	-0,00103	-0,43	1,95E-08	-0,32137	-3111,68	0,11	3,49E-09	6303,15	-0,53	2,30E-08		
			2		-1,53E-05	-3,42E-06	4,5E-00	-0,00262	-0,00133	-0,51	2,29E-08	-0,06914	-14463,41							
			3		-1,45E-05	-3,54E-06	4,1E-00	-0,00282	-0,00184	-0,65	2,65E-08	-0,07388	-13535,46							
		3	1		-2,07E-05	-2,68E-06	7,7E-00	-0,00267	-0,000819872	-0,31	2,38E-08	-0,13883	-5295,77	0,13	5,49E-09	6403,94	-0,45	3,00E-08		
			2		-2,17E-05	-4,24E-06	5,1E-00	-0,00312	-0,00159	-0,51	3,24E-08	-0,07324	-13653,74							
			3		-2,17E-05	-4,45E-06	4,9E-00	-0,00319	-0,00172	-0,54	3,39E-08	-0,05593	-17879,49							
		4	1		-5,23E-06	-1,71E-06	3,1E-00	-0,000643617	0,000924362	1,44	1,38E-09	-	-	0,43	8,60E-10	#DIV/0!	1,01	2,30E-09		
			2		-6,14E-06	-2,40E-06	2,6E-00	-0,000960676	0,000550302	0,57	3,08E-09	-	-							
			3		-6,88E-06	-2,78E-06	2,5E-00	-0,000858733	0,0008667	1,01	2,46E-09	-	-							
		5	1		-1,22E-05	-2,50E-06	4,9E-00	-0,00213	-0,00073935	-0,37	1,51E-08	-0,06543	-15283,51	0,02	1,40E-09	79737,68	-0,37	1,67E-08		
			2		-1,39E-05	-3,83E-06	3,6E-00	-0,00227	-0,000822039	-0,36	1,72E-08	0,02176	45655,88							
			3		-1,38E-05	-3,89E-06	3,6E-00	-0,00231	-0,000914463	-0,40	1,78E-08	0,007	142857,14							
Médias					1,3E-01	-0,00257	-0,00109	-0,41	2,20E-08											
Desvio Padrão					6,42E-00	0,000859	0,00106	0,46	1,49E-08											

Fonte: Autoria Própria