



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Instituto de Ciência e Tecnologia  
Câmpus de Sorocaba

**GABRIEL VIEIRA SANCHEZ**

Análise da Resistência Série Fonte-Dreno de Transistores HEMTs ("High  
Electron Mobility Transistor")

Sorocaba

2021

# **GABRIEL VIEIRA SANCHEZ**

Análise da Resistência Série Fonte-Dreno de Transistores HEMTs (“High Electron Mobility Transistor”)

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como parte dos pré-requisitos para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação, à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr. Maria Glória Caño de Andrade

Sorocaba

2021

S211a Sanchez, Gabriel Vieira  
Análise da Resistência Série Fonte-Dreno de Transistores HEMTs ("High Electron Mobility Transistor") / Gabriel Vieira Sanchez. -- Sorocaba, 2021  
105 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba  
Orientadora: Maria Glória Caño de Andrade

1. Microeletrônica. I. Título.  
Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.  
Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados  
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

# GABRIEL VIEIRA SANCHEZ

Análise da Resistência Série Fonte-Dreno de Transistores HEMTs (“High Electron Mobility Transistor”)

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como parte dos pré-requisitos para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação, à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,

Sorocaba, 3 de Dezembro de 2021

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Glória Caño de Andrade

---

Prof. Dr. Everson Martins

---

Prof<sup>a</sup> Ma Scheila Guedes Garcez

Sorocaba

2021

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos que foram tão importantes nessa trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Emilio e Angela, por sempre acreditarem e investirem em mim, comprando cada ideia minha, por mais diferente que fosse, além de serem o exemplo máximo de boa conduta e índole.

À minha tia Sandra, pelo incentivo e alegria de sempre. Aos demais familiares, por todo apoio durante o período em que estive distante para finalizar a minha graduação.

À República Operação, local onde morei por todo o meu período de graduação e que, além de me dar uma família, me ensinou conceitos que disciplina alguma da faculdade conseguiria.

Aos meus colegas de turma por todo apoio nas mais diversas questões acerca do curso de Engenharia de Controle e Automação.

À minha namorada, Amanda, por me apoiar e motivar nos mais diversos momentos, fazendo com que eu tivesse ainda mais força para acreditar que tudo é possível.

À UNESP Sorocaba, por prover uma excelente estrutura para o desenvolvimento acadêmico, além de nos preparar de forma diferenciada para o que enfrentamos no mercado de trabalho.

À professora e orientadora Glória por todos os ensinamentos durante a graduação e auxílio na elaboração deste trabalho.

A tantas outras pessoas que fizeram, e fazem, parte da minha trajetória, com as quais pude aprender e ensinar.

“Nós somos o que repetidamente fazemos.  
A excelência, então, não é um ato, mas um  
hábito” (Will Durant)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) de transistores de alta mobilidade de elétrons (HEMTs – “High Electron Mobility Transistors”) com doze configurações diferentes de Comprimento de Canal e Largura de Canal para quatro lâminas dopadas de maneira diferentes nas regiões de operação Linear e Saturação.

Para tal, realizou-se uma análise de dispositivos iguais a fim de notar se havia alguma irregularidade com eles que pudesse impactar nos resultados (como um dispositivo queimado). Feito isso, obteve-se as curvas de Corrente de Dreno ( $I_D$ ) por Tensão de Porta ( $V_G$ ) e a Transcondutância ( $g_m$ ) para que, através do método proposto por ORTIZ-CONDE, fossem determinadas as Tensões de Limiar ( $V_T$ ).

Tendo tais valores, utilizou-se das Leis de Ohm para determinar os valores para a Resistência Total dos dispositivos que é composta, basicamente, pela Resistência do Canal e pela Resistência Série Fonte-Dreno. Tendendo o valor do Comprimento do Canal a zero (utilizando Regressão Linear) é possível realizar a aproximação de que a Resistência Total é igual à Resistência Série Fonte-Dreno do HEMT.

Diante disso, o foco foi voltado para analisar quais eram os impactos das alterações de parâmetros dos HEMTs (Largura e Comprimento de Canal) das diferentes lâminas nos valores de Resistência Série Fonte-Dreno.

Por fim, foram propostas melhorias para serem executadas em eventuais trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** HEMT, Transistores, Microeletrônica, 5G, alta frequência, Resistência Série Fonte-Dreno.

## ABSTRACT

This work has as objective the study of High Electron Mobility Transistors' Source-Drain Series Resistance ( $R_{SD}$ ) with twelve different configurations of Channel Length and Channel Width for four Dies (blades) operating at Linear and Saturation regions.

To do so, a previous analysis was made on equal devices in order to check if there was any irregularity with them that could impact on the results (such as burned device). Then, the Drain Current ( $I_D$ ) versus Gate Voltage ( $V_G$ ) graphs were plotted and the Transconductance ( $g_m$ ) was obtained. With ORTIZ-CONDE's method, the Threshold Voltages ( $V_T$ ) were determined.

With these values and using Ohm's Laws, the Total Resistance of these devices were obtained, being composed, basically, by the Channel's Resistance and Source-Drain Series Resistance. Tending Channel's Length to zero (using Linear Fit) is possible to propose an approximation that the Total Resistance is equal to Source-Drain Series Resistance of HEMT.

That said, the focus was on analyzing the impacts of parameters' changes of HEMTs (Channel's Length and Width) of different blades on Source-Drain Series Resistance.

Finally, some improvements were proposed to be executed in further studies.

**Keywords:** HEMT, Transistors, Microelectronic, 5G, high frequency, Source-Drain Series Resistance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Quantidade de transistores contidos em circuitos integrados de mesma área com o passar dos anos, definição prevista pela Lei de Moore.....	21
Figura 2.....	21
Figura 3 Chip M1 de arquitetura ARM da Apple.....	22
Figura 4 Topologia de Transistores PNP e NPN.....	24
Figura 5 Esquema <i>elétrico</i> de um transistor MOSFET.....	25
Figura 6 Topologia dos transistores MOS.....	25
Figura 7 Regiões de Operação dos transistores MOSFET.....	27
Figura 8 Topologia de um transistor HEMT de Arsenieto de Gálio (GaAs) e Arsenieto de Gálio e Alumínio (AlGaAs).....	30
Figura 9 Ilustração do posicionamento de uma 2DEG em um material semiconductor.....	32
Figura 10 Diagrama de banda elétrica de um HEMT mostrando a região de 2DEG.....	32
Figura 11 Modelo de circuito equivalente para HEMTs de baixo sinal, modelo intrínseco é representado pela linha pontilhada.....	35
Figura 12 Resistência total e Regressão Linear em função do Comprimento do Canal.....	37
Figura 13 Chapa de Silício mostrando as dies.....	39
Figura 14 Topologia de uma Die.....	40
Figura 15 Topologia de um dispositivo RL de 1 a 16 com oito transistores, onde G é a Porta, S a Fonte e D o Dreno. Fonte: Dados do fabricante.....	40
Figura 16 Comportamento da Corrente de Dreno ( $I_D$ ) em função da Tensão de Porta ( $V_G$ ) para diferentes valores de Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ).....	44
Figura 17 Análise de possíveis valores para Tensão de Limiar ( $V_t$ ) para um transistor HEMT.....	44
Figura 18 Cabeçalho dos arquivos de medição.....	45
Figura 19 Dados contidos nos arquivos de texto obtidos pelas medições.....	46
Figura 20 Topologia dos dados salvos para a lâmina D13.....	48
Figura 21 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	50

Figura 22 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	50
Figura 23 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL4 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	51
Figura 24 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL4 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	51
Figura 25 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	52
Figura 26 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	52
Figura 27 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	53
Figura 28 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	53
Figura 29 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	55
Figura 30 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	55
Figura 31 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL4 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	56
Figura 32 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	56
Figura 33 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	57
Figura 34 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	57
Figura 35 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	58
Figura 36 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	58
Figura 37 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	60
Figura 38 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	60

Figura 39 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	61
Figura 40 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	61
Figura 41 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	62
Figura 42 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	62
Figura 43 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	63
Figura 44 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0.5$ V do dispositivo RL11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	63
Figura 45 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	64
Figura 46 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	65
Figura 47 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	65
Figura 48 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	66
Figura 49 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL8 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	66
Figura 50 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL8 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	67
Figura 51 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo R11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	67
Figura 52 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo R11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	68
Figura 53 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	69
Figura 54 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	69
Figura 55 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	70

Figura 56 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	70
Figura 57 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	71
Figura 58 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	71
Figura 59 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	72
Figura 60 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	72
Figura 61 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	73
Figura 62 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	74
Figura 63 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	74
Figura 64 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	75
Figura 65 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 4$ V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	75
Figura 66 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	76
Figura 67 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.....	76
Figura 68 $I_D$ por $V_G$ com $V_{DS} = 0,5$ V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.....	77
Figura 69 Curva da Transcondutância ( $g_m$ ) e Corrente de Dreno ( $I_D$ ) pela Tensão de Porta ( $V_G$ ).....	79
Figura 70 Resistência Total ( $R_{total}$ em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 1$ micrometro e $V_{DS} = 0,5$ Volt para todas as lâminas em escala linear.....	84
Figura 71 Resistência Total ( $R_{total}$ em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 1$ micrometro e $V_{DS} = 0,5$ Volt para todas as lâminas em escala logarítmica.....	84

Figura 72 Resistência Total ( $R_{total}$ em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 10$ micrometro e $V_{DS} = 0,5$ Volt para todas as lâminas em escala linear .....	85
Figura 73 Resistência Total ( $R_{total}$ em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 10$ micrometro e $V_{DS} = 0,5$ Volt para todas as lâminas em escala logarítmica .....	86
Figura 74 Resistência Total ( $R_{total}$ em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 100$ micrometro e $V_{DS} = 0,5$ Volt para todas as lâminas em escala linear .....	87
Figura 75 Resistência Total ( $R_{total}$ em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 100$ micrometro e $V_{DS} = 0,5$ Volt para todas as lâminas em escala logarítmica. ....	87
Figura 76 Resistência Total ( $R_{total}$ em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 1$ micrometro e $V_{DS} = 4$ Volts para todas as lâminas em escala linear. ....	89
Figura 77 Resistência Total ( $R_{total}$ em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 1$ micrometro e $V_{DS} = 4$ Volts para todas as lâminas em escala logarítmica. ....	89
Figura 78 Resistência Total ( $R_{total}$ em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 10$ micrometro e $V_{DS} = 4$ Volts para todas as lâminas em escala linear. ....	90
Figura 79 Resistência Total ( $R_{total}$ em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 10$ micrometro e $V_{DS} = 4$ Volts para todas as lâminas em escala logarítmica. ....	91
Figura 80 Resistência Total ( $R_{total}$ em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 100$ micrometro e $V_{DS} = 4$ Volts para todas as lâminas em escala linear. ....	92
Figura 81 Resistência Total ( $R_{total}$ em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para $W = 100$ micrometro e $V_{DS} = 4$ Volts para todas as lâminas em escala logarítmica. ....	92
Figura 82 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$ em micrômetros) com $V_{DS} = 0.5$ Volt para as quatro lâminas estudadas em escala linear. ....	95

Figura 83 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$ em micrômetros) com $V_{DS} = 0.5$ Volt para as quatro lâminas estudadas em escala logarítmica. ....	96
Figura 84 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$ em micrômetros) com $V_{DS} = 4$ Volts para as quatro lâminas estudadas em escala linear. ....	97
Figura 85 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$ em micrômetros) com $V_{DS} = 4$ Volts para as quatro lâminas estudadas em escala logarítmica. ....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados das lâminas utilizadas para análise.....	38
Tabela 2	Dies utilizados em cada uma das lâminas.....	39
Tabela 3	Dados dos dispositivos RL utilizados. ....	41
Tabela 4	Explicação da nomenclatura dos dados obtidos no IMEC.....	43
Tabela 5	Significado de cada coluna de dado dentro de um arquivo de extração junto às suas respectivas unidades .....	46
Tabela 6	Valores da Tensão de Limiar ( $V_T$ ), Resistência Total e Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para os doze dispositivos RL das quatro lâminas na Região Linear com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 0,5 V agrupados pela Largura do Canal ( $W$ ). ....	80
Tabela 7	Valores da Tensão de Limiar ( $V_T$ ), Resistência Total e Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para os doze dispositivos RL das quatro lâminas na Região de Saturação com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 4 V agrupados pela Largura do Canal ( $W$ ). ....	82
Tabela 8	Valores Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para diferentes Larguras do Canal ( $W$ ) das quatro lâminas estudadas na Região Linear com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 0,5 V.....	93
Tabela 9	Valores Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para diferentes Larguras do Canal ( $W$ ) das quatro lâminas estudadas na Região de Saturação com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 4 V.....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

	Transistor de Alta mobilidade de Elétrons (High Electron Mobility
HEMT	Transistor)
CPU	Unidade Central de Processamento (Central Process Unit)
GPU	Unidade de Processamento Gráfico (Graphics Processing Unit)
RAM	Memória de Acesso Aleatório (Random Access Memory)
TBJ	Transistor de Junção Bipolar
	Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico
MOSFET	(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
SOI	Silício no Isolante (Silicon on Insulator)
CPP	Poli-Pitch Contatado (Contacted Poly Pitch)
MIS	Semicondutor Metal Isolante (Metal-Insulator-Semiconductor)
SBH	Altura da Barreira de Schottky (Schottky Barrier Height)
ESD	Descarga de Eletricidade Estática (Electrostatic Discharge)

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Lei de Moore .....	20
1.2	Objetivo do Trabalho .....	22
2.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....	24
2.1	Transistores de Junção Bipolar (TBJ) .....	24
2.2	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET): .....	25
3.	A TECNOLOGIA do HEMT.....	29
3.1	Descoberta .....	29
3.2	Funcionamento.....	29
3.3	Modelagem de um transistor HEMT .....	30
3.4	Aplicações para transistores HEMT .....	31
3.5	2DEG e Mobilidade em Heterojunções de Nitreto de Alumínio e Gálio (AlGaN) e Nitreto de Gálio (GaN) .....	31
4.	ESTUDO DA RESISTÊNCIA SÉRIE FONTE-DRENO .....	33
4.1	Definição da Resistência Série de Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) .....	33
4.2	Contextualização sobre Resistência Série de Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ).....	33
4.3	Métodos de extração da Resistência Série de Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ).....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1	Característica dos Dispositivos Analisados .....	38
5.2	Obtenção dos Dados Experimentais .....	42
5.3	Curvas Corrente de Dreno ( $I_D$ ) pela Tensão de Porta ( $V_G$ ).....	48
5.4	Obtenção da Tensão de Limiar ( $V_T$ ) e Transcondutância ( $g_m$ ) .....	78
5.5	Obtenção da Resistência Total ( $R_{total}$ ) e Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ).....	79
6.	CONCLUSÕES.....	99

7.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
8.	REFERÊNCIAS.....	102
	ANEXO I.....	105

# 1. INTRODUÇÃO

Os transistores (formados por dispositivos semicondutores) foram uma das invenções mais relevantes do milênio. Graças a eles, hoje a humanidade pode ter dispositivos com altíssimo poder de processamento em um espaço compacto como ocorre nos computadores portáteis e celulares.

Vale lembrar que diodos semicondutores de estado sólido, como os retificadores e óxido, eram conhecidos antes mesmo de 1920. Desde lá, pesquisadores tentaram utilizar válvulas tríodo a partir de válvulas diodo para que fossem possíveis atividades como a amplificação de corrente, por exemplo. Porém, não obtiveram sucesso, visto que os materiais usados naquela época não eram os mais adequados para tornar possível a operação.

Foi apenas após a Segunda Guerra Mundial que passou-se a utilizar materiais como o Silício e Germânio na elaboração de diodos detectores de micro-ondas para radares, junto ao desenvolvimento das teorias quânticas que permitiria estudar o estados quânticos dos portadores dos materiais semicondutores.

Desde então, os materiais semicondutores evoluíram desde suas topologias até os materiais utilizados para a elaboração dos mesmos, rendendo um Prêmio Nobel de Física ao americano William Bradford Shockley em 1956[1].

## 1.1 Lei de Moore

Em 1965, o então presidente da Intel, Gordon Earle Moore, disse que a quantidade de transistores que poderiam ser alocados na mesma área de um circuito integrado dobraria a cada um ano e meio (dezoito meses) sem que o custo de fabricação fosse alterado.

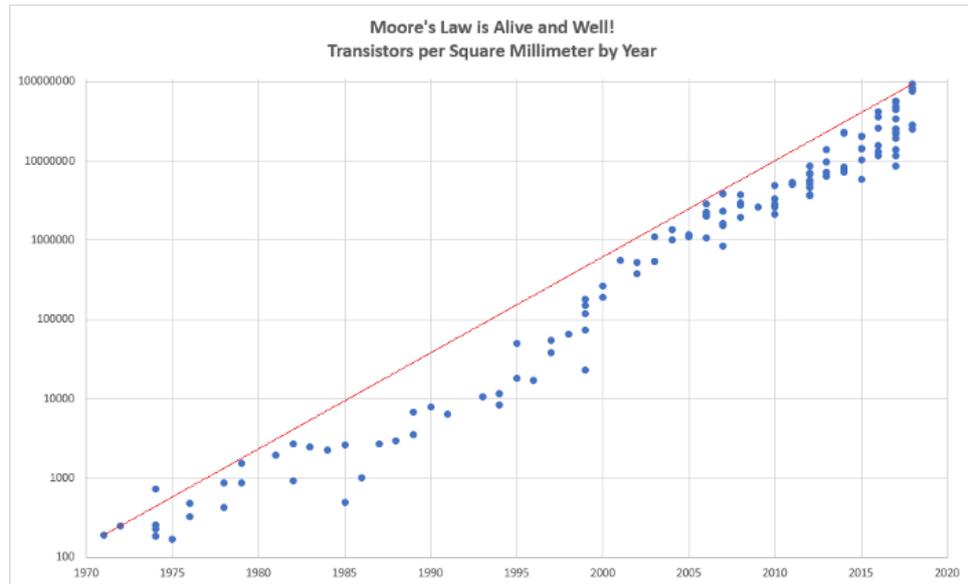
Como pode-se observar na Figura 1 [1], tal relação mostra-se fiel ainda nos dias de hoje, quando observa-se dispositivos como processadores (CPU), memórias RAM e placas de vídeos (GPU).

Todos os anos companhias que trabalham com a fabricação de dispositivos dessa categoria (chips e semicondutores), tais como a própria Intel e a AMD, dizem

em seus discursos que o princípio da Lei de Moore continuam sendo mantidos, trazendo ainda mais performance aos seus dispositivos.

Figura 1 Quantidade de transistores contidos em circuitos integrados de mesma área com o passar dos anos, definição prevista pela Lei de Moore.

Figura 2



Fonte: Ichi-Pro.

Como exemplo de mercado, no ano de 2020, a Apple introduziu o seu chip M1, de arquitetura ARM, aos seus Macs, prometendo ainda mais performance em um chip menor e com maior economia de energia. Por tal motivo, o Macbook Air, notebook de entrada e com menor poder de processamento, não conta com cooler para refrigeração, mostrando grande avanço para a indústria dos computadores portáteis.

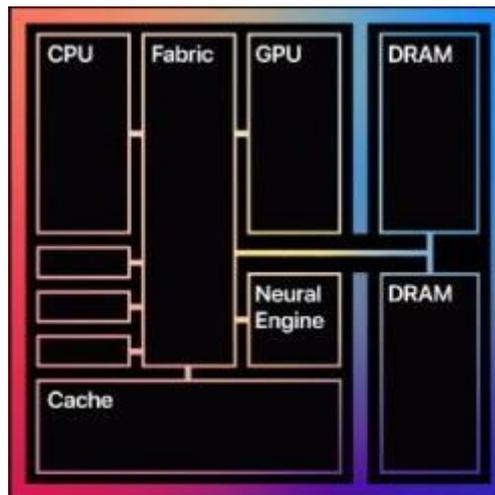
Tal arquitetura já é presente nos smartphones e faz com que a CPU, GPU, RAM e outros componentes estejam presentes no mesmo chip, conforme a Figura 2 [2].

A arquitetura ARM é uma ótima prova da Lei de Moore, tendo em mente que, com ela, é possível agrupar diversos componentes feitos de transistores e outros dispositivos semicondutores dentro de um mesmo dispositivo, melhorando desde a

velocidade e poder de processamento como também a dissipação de calor e autonomia da bateria que acompanha o dispositivo.

É possível que, dentro de poucos anos, a arquitetura ARM (mostrada na Figura 3) esteja presente dentro de todos os computadores de uso pessoal e profissional, baseado nos ganhos descritos anteriormente.

Figura 3 Chip M1 de arquitetura ARM da Apple.



Fonte: Apple.

## 1.2 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é realizar o estudo acerca da Resistência Série Fonte e Dreno de Transistores HEMT (HEMT - “High-electron-mobility Transistor”) através resultados experimentais obtidos no Centro Interuniversitário de microeletrônica (IMEC - Interuniversity microelectronics center) ), fundado em 1984 na Universidade Católica de Leuven (Lovaina) na Bélgica.

Para isso, todo o contexto histórico para o uso de transistores, em especial dos HEMTs será dado, bem como os conceitos fundamentais para que seja possível a interpretação dos resultados.

Além disso, serão trazidos exemplos de como a tecnologia se aplica no dia a dia, bem como exemplos de mercado onde está inserida.

### 1.1.1 Apresentação do Trabalho

Este trabalho será apresentado em nove capítulos, visando a melhor organização para compartilhamento das ideias de acordo com o conteúdo principal. São eles:

Capítulo 1: Breve introdução ao contexto histórico dos transistores bem como os objetivos para esse estudo.

Capítulo 2: Conceitos fundamentais acerca dos temas de microeletrônica, para que o estudo possa ser entendido corretamente e auxiliando o uso de tal material por pessoas sem contato aprofundado sobre o tema.

Capítulo 3: Contextualização sobre os Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons, ou HEMTs.

Capítulo 4: Apresentação dos conceitos de Resistência Série Fonte e Dreno em dispositivos HEMT, bem como métodos de extração dos dados.

Capítulo 5: Apresenta os resultados e discussões das análises de dados de transistores HEMT constituídos de junções heterogêneas de Nitreto de Gálio (GaN) e Nitreto de Gálio e Alumínio (AlGaN) que foram cultivados com deposição de vapor químico de metal orgânico (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) em alta resistividade de 200 milímetros de substrato de Silício (Si). Todos os dispositivos analisados neste trabalho foram fabricados e caracterizados no Interuniversity Microelectronics Center (IMEC), que é um centro de pesquisa na área de microeletrônica localizado na cidade de Leuven, na Bélgica.

Capítulo 6: Conclusões feitas com base nas análises realizadas.

Capítulo 7: Recomendações para trabalhos futuros acerca da Resistência Série Fonte e Dreno de transistores HEMT ou de outro assunto que possa ter esse material utilizado como referência.

## 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

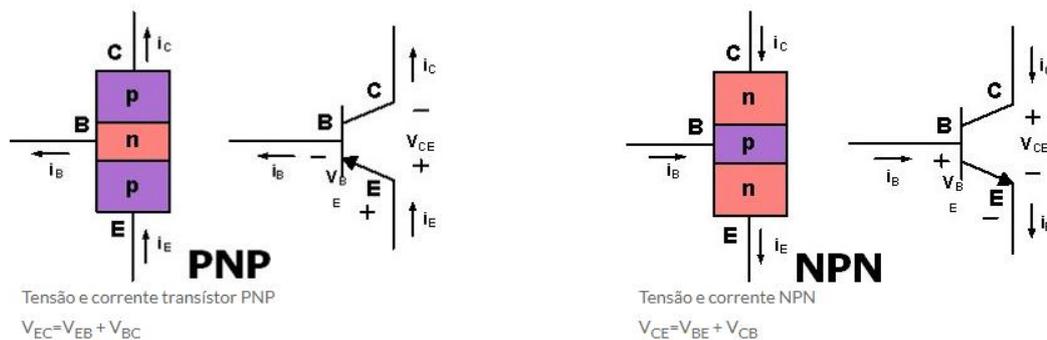
Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos fundamentais, baseados nas referências bibliográficas, para que o estudo de Transistores HEMT, com ênfase na Resistência Série Fonte e Dreno, possa ser compreendido.

### 2.1 Transistores de Junção Bipolar (TBJ)

Conforme comentado na Introdução, transistores são dispositivos compostos por materiais semicondutores, normalmente da família do Silício (S) que podem ou não conduzir corrente de acordo com a forma como são utilizados. Algumas aplicações para esses materiais são:

1. Funcionamento como chave unidirecional: funcionando como uma chave padrão (*switch*), possibilitando a passagem de corrente do Coletor (C) para o Emissor (E), caso a tensão aplicada na base ( $I_B$ ) seja maior que a Tensão de Limiar ( $V_T$ ). Vale lembrar que tal relação é verdade para Transistores de Junção Bipolar (TBJ) do tipo NPN. Para TBJs PNPs, o fluxo de corrente é ao contrário, conforme Figura 4 [3].

Figura 4 Topologia de Transistores PNP e NPN.



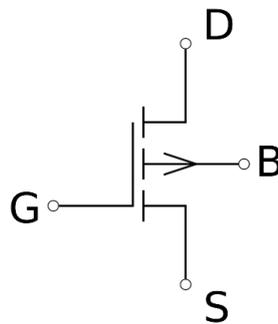
Fonte: Eletrônica PT.

2. Funcionamento como regulador de corrente: de acordo com o valor da Corrente de Base ( $I_B$ ), a corrente que flui do Coletor para o Emissor ( $I_{CE}$ ) tem seu valor amplificado até um certo valor de referência, dependendo do ganho do transistor ( $\beta$  ou  $h_{FE}$ ).

## 2.2 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET):

São transistores de efeito de campo compostos por Metal – Óxido – Semicondutor, concebidos em 1925 pelo Físico Julius Edgar Lilienfeld [5]. Esses transistores receberam o “Metal” no nome devido às Portas (“Gate” – G) terem metal em sua composição. Porém, hoje em dia, eles são compostos por materiais de Polissilício. A Figura 5 [5] mostra o esquema de um MOSFET, onde pode-se observar que o Coletor recebe nome de Dreno (“Drain” – D) e o Emissor recebe o nome de Fonte (“Source” – S).

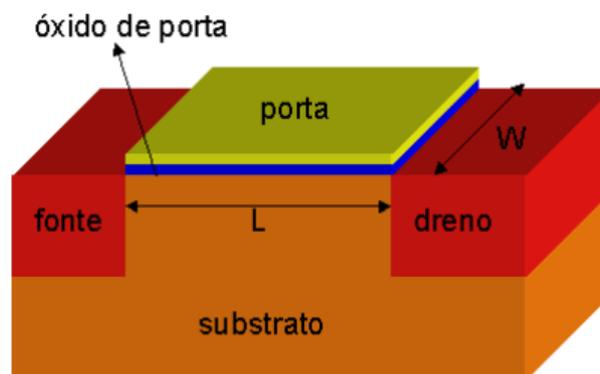
Figura 5 Esquema *elétrico* de um transistor MOSFET.



Fonte: Oki, N.

A Figura 6 [6] mostra a topologia desse tipo de transistor.

Figura 6 Topologia dos transistores MOS.



Fonte: Sasaki, K.

A Porta é onde a tensão é aplicada a fim de fazer com que o dispositivo semicondutor passe a conduzir. Além disso, é esse valor de tensão que é amplificado pela característica do parâmetro de amplificação ( $G$ ) presente nos

datasheets dos transistores. A corrente flui do Dreno, que costuma ser onde a carga está inserida, em direção à Fonte.

Os transistores HEMT que serão explorados na próxima seção possui a mesma topologia de terminais com fins parecidos.

Assim como os TBJ, os MOSFET também possuem dispositivos do tipo P e do tipo N que determinam qual dos tipos de portadores majoritários está presente no dispositivo, alterando algumas características elétricas no funcionamento dos semicondutores

Os MOSFETs comercializados possuem dois principais tipos:

- Depleção: normalmente têm um canal formado entre Dreno e Fonte. Portanto, para abrir o canal entre Dreno e Fonte é necessário que uma tensão específica seja aplicada na Porta.
- Intensificação: normalmente são mais utilizados e não possuem canal entre Dreno e Fonte formado. Portanto, para formar o canal entre Dreno e Fonte é necessário que uma tensão seja imposta na Porta.

As principais aplicações de um MOSFET são:

- Chaveamento: utilizado como chave eletrônica por meio de uma tensão de Porta aplicada.
- Amplificadores: amplificando o a tensão de Dreno de acordo com a tensão de Porta.
- Resistência controlada: já que a Resistência Série Fonte-Dreno varia de acordo com as variações da tensão de Gate aplicada no transistor. Esse conceito será explorado em maiores detalhes nos capítulos adiante.

O MOSFET possui três regiões de operação. Porém, para explorá-las, é necessário o conhecimento de alguns parâmetros elétricos dos dispositivos, como:

- Tensão de Limiar ( $V_T$ ): valor necessário para que o transistor crie um canal de condução e passe a permitir passagem de corrente do Dreno para a Fonte de acordo com a tensão de Porta aplicada.

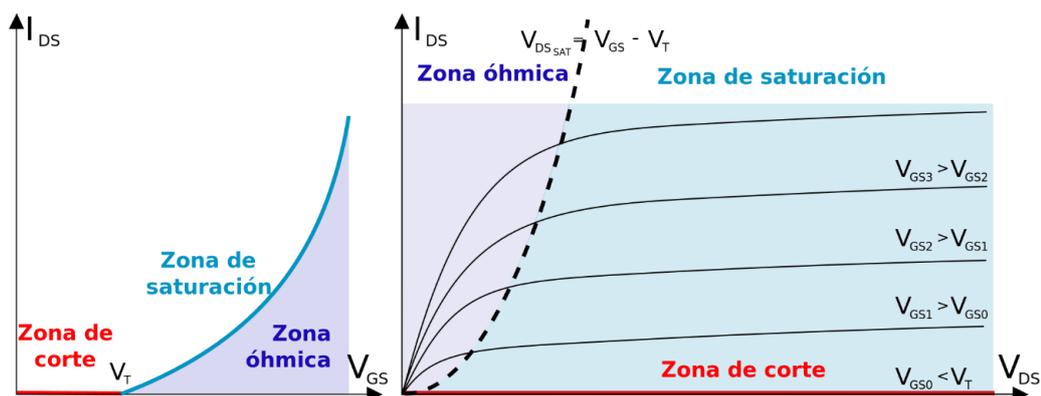
- Tensão Gate-Fonte ( $V_{GS}$ ): tensão entre o Gate e a Fonte.
- Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ): tensão entre Dreno e Fonte.

As regiões de operação são:

- Região de Corte: onde  $V_{GS}$  é menor que  $V_T$ .
- Região Linear, de Triodo ou Ôhmica: onde  $V_{GS}$  é maior que  $V_T$  e  $V_{DS}$  é menor que  $V_{GS}$ . Vale lembrar que o transistor não opera de maneira linear durante toda essa região.
- Região de Saturação: onde  $V_{GS}$  é maior que  $V_T$  e  $V_{DS}$  é maior que ( $V_{GS} - V_T$ ). Aqui, tem-se a corrente máxima suportada pelo dispositivo.

Esse tipo de transistor possui curvas características conforme a Figura 7 [7], onde podemos ver, na esquerda, que a Corrente Dreno-Fonte ( $I_{DS}$ ) começa a fluir apenas quando o valor da Tensão Porta-Fonte ( $V_{GS}$ ) ultrapassa o valor de Tensão de Limiar ( $V_T$ ) que, normalmente, gira em torno de 0,7 V. Já na direita da Figura 7 [7], pode-se notar que, com o aumento da Tensão Porta-Fonte, a corrente Dreno-Fonte, que é o que de fato alimenta a carga do circuito, também tende a aumentar.

Figura 7 Regiões de Operação dos transistores MOSFET.



Fonte: Zeghbrock, B.

Como o Porta é isolado da Fonte e Dreno, quando o transistor não está conduzindo, tendo corrente de Porta nula, mas com tensão aplicada, cria-se uma

impedância altíssima, o que oferece um cenário interessante para algumas aplicações como inclusão em uma entrada de instrumentação ou frequencímetros.

Um ponto de atenção é que, como tal impedância alta, o dispositivo é muito sensível a Descarga de Eletricidade Estática (*Electrostatic Discharge – ESD*), fazendo com que o seu manuseio seja preferivelmente feito com dispositivos eletrostáticos. Devido a isso, os MOSFETs mais recentes possuem um dispositivo Zener para evitar uma possível queima devido à tensão reversa imposta nos dispositivos.

Os motivos pelos quais faz-se importante estudar tanto o TBJ quanto o MOSFET é porque, no TBJ foram onde as aplicações básicas de dispositivos como o HEMT surgiram da maneira como são lecionadas e utilizadas em problemas e projetos do dia a dia. Já no MOSFET, foi por conta da similaridade de ambos os dispositivos, podendo utilizar algumas metodologias para obtenção de parâmetros da caracterização elétrica em ambos os dispositivos de forma similar.

### 3. A TECNOLOGIA do HEMT

Neste capítulo será dada uma contextualização sobre a tecnologia de Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons (“High Electron Mobility Transistor” - HEMT), como será tratado daqui para frente.

#### 3.1 Descoberta

Os Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons foram desenvolvidos em 1979 por Takashi Mimura e seu time de pesquisadores que trabalhavam na empresa Fujitsu no Japão. Vale lembrar que, em 1966, houve um artigo publicado que já propunha um transistor FET com heterojunção[27].

Durante o desenvolvimento da tecnologia, passaram por uma série de problemas, ainda que a tecnologia HEMT seja mais um transistor do tipo FET.

Foi apenas em 1987 que os primeiros HEMTs começaram a ser comercializados visando o uso em receptores de transmissão via satélite, isso ocorreu por conta do alto custo envolvido em sua fabricação que ainda hoje é uma realidade. Por volta de 1990, os HEMTs já estavam sendo comercializados com maior abrangência, devido aos estímulos à produção do mesmo para uso, principalmente, nas áreas abordadas à frente[19].

#### 3.2 Funcionamento

Os transistores HEMT são um tipo de Transistor de Efeito de Campo (*Field Effect Transistor* – *FET*). Como o nome sugere, sua operação depende da mobilidade de elétrons presentes em suas camadas dopadas.

Alguns dos motivos pelos quais os transistores HEMTs se difundiram e são utilizados são:

1. Baixo ruído;
2. Baixa variação de corrente quando comparado com outros transistores;
3. Altos níveis de performance em frequências de microondas, TeraHertz, por exemplo, para serem aplicadas em circuitos integrados;

4. Alta Velocidade e Frequência; e
5. Alto ganho.

Os materiais mais comuns para a composição dos transistores HEMT são o Arsenieto de Gálio e Alumínio (AlGaAs), Nitreto de Gálio (GaN) e o Arsenieto de Gálio (GaAs). Ambos os tipos de materiais são parecidos, porém, o primeiro possui uma maior largura de banda (*bandgap*) maior. Porém, o Arsenieto de Gálio costuma ser usado por prover um alto nível de mobilidade básica de elétrons que tem maior mobilidade e velocidades de deriva que o Silício (Si).

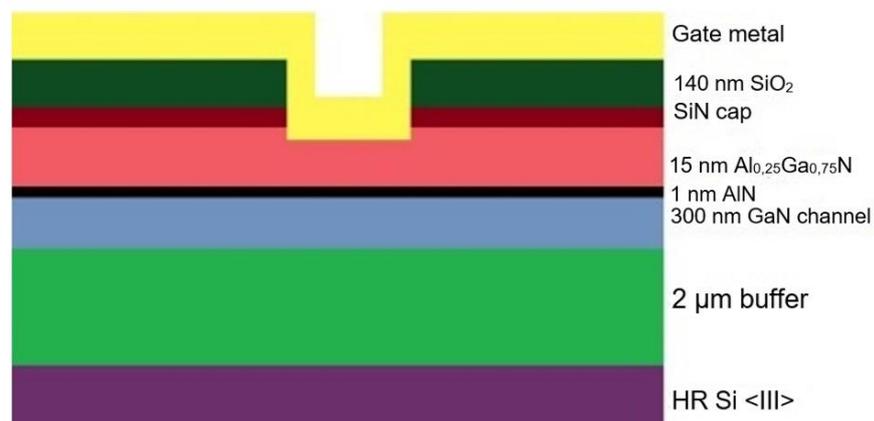
Vale lembrar que tanto o AlGaAs quanto o GaAs costumam estar presentes na topologia de um transistor HEMT moderno, conforme mostrado na Figura 8 [13].

Uma diferença dos HEMT quando comparado com outros tipos de transistores é que, ao invés de possuir apenas um material semiconductor (como o Silício na grande maioria dos transistores), os HEMT possuem diversas camadas de semicondutores compostos.

### 3.3 Modelagem de um transistor HEMT

Os HEMTs utilizados neste trabalho eram compostos por materiais mostrados conforme a Figura 8.

Figura 8 Topologia de um transistor HEMT de Arsenieto de Gálio (GaAs) e Arsenieto de Gálio e Alumínio (AlGaAs).



Fonte: Dados do fabricante.

### **3.4 Aplicações para transistores HEMT**

Existem diversas áreas que se beneficiam das qualidades apresentadas pelos transistores modernos, como o HEMT, fazendo com que seu uso possa estar presente em diferentes segmentos. A operação dos HEMTs é um pouco diferente dos transistores TBJ, MOS e FET e, como resultado, tem-se um ganho de performance principalmente nos tópicos de[19]:

- 3.1.1 Aplicações de ondas sub milimétricas
- 3.1.2 Aplicações em Terahertz (THz)
- 3.1.3 Aplicações para comunicação nos protocolos 4G e 5G
- 3.1.4 Aplicações espaciais
- 3.1.5 Aplicações Médicas e Militares
- 3.1.6 Aplicações de Amplificadores (devido ao alto ganho).

### **3.5 2DEG e Mobilidade em Heterojunções de Nitreto de Alumínio e Gálio (AlGaN) e Nitreto de Gálio (GaN)**

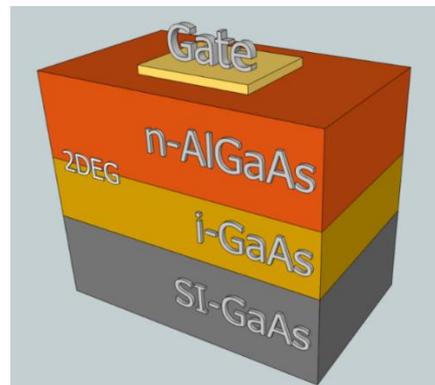
Os HEMTs são transistores compostos por uma héterojunção, que acaba criando uma zona quântica que faz com que a zona de 2-DEG seja formada. O Gás de Elétron Bidirecional (“Two-dimensional elétron gas” – 2DEG) funciona como um gás composto por elétrons que ficam livre para se mover em regiões bidimensionais, porém, contido no plano tridimensional.

O funcionamento como um plano bidimensional é interessante, pois os elétrons trabalham de forma similar a uma folha de sulfite, sendo basicamente bidirecionais, porém, dentro do mundo tridimensional. [12].

A Figura 9 ilustra o posicionamento de uma 2DEG em um semiconductor.

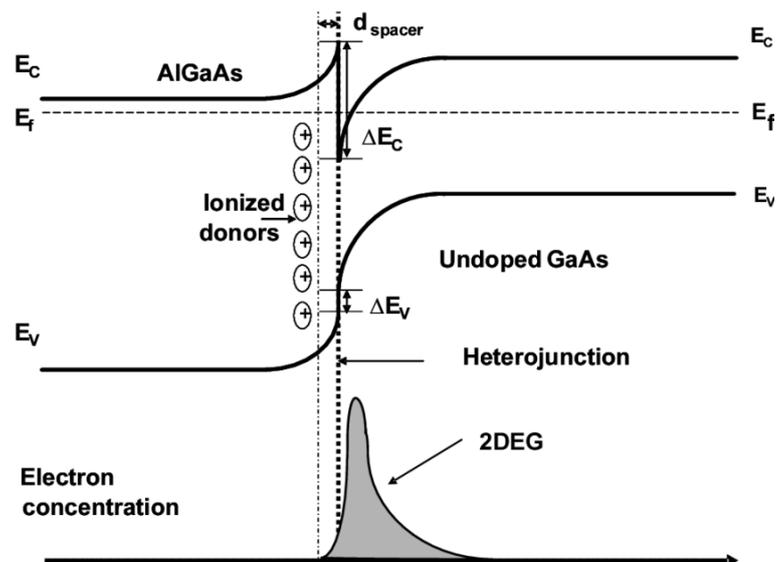
Outro ponto importante no estudo dos HEMTs é o diagrama de Banda Elétrica, que é mostrado na Figura 10 [13]. Nele, podem ser observados os níveis de banda elétrica bem como a região de 2DEG.

Figura 9 Ilustração do posicionamento de uma 2DEG em um material semiconductor.



Fonte: Vieira, G.

Figura 10 Diagrama de banda elétrica de um HEMT mostrando a região de 2DEG.



Fonte: Elprocus.

## 4. ESTUDO DA RESISTÊNCIA SÉRIE FONTE-DRENO

### 4.1 Definição da Resistência Série de Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ )

A Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) pode ser entendida como um problema intrínseco aos transistores de um modo geral e, com os HEMT, não é diferente. Como qualquer outro tipo de Resistência, a Série Fonte-Dreno pode ser entendida como sendo a oposição à passagem elétrica que os condutores oferecem. Os elétrons livres que querem circular pelo condutor que impõe uma resistência à passagem. Além disso, durante a passagem dos elétrons pelo material acabam ocorrendo colisões entre eles mesmos e entre eles e os átomos do material condutor, o aquecimento é conhecido Efeito Joule.

Alguns fatores que influenciam na resistência elétrica são, conforme descritos pela Segunda Lei de Ohm são:

- Comprimento do cabo ( $L$ ): comprimento que os elétrons vão ter que percorrer quando estiverem sob efeito de um potencial elétrico.
- Área da seção transversal ( $A$ ): podendo ser entendida como a área transversal do cabo.
- Resistividade elétrica do material ( $\rho$ ): que pode ser entendida como uma característica do material usado. Vale lembrar que a resistividade é alterada conforme a temperatura também é alterada.

### 4.2 Contextualização sobre Resistência Série de Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ )

Com o avanço tecnológico dos dispositivos semicondutores no geral e, tendo foco maior os transistores, fazer o estudo de características como o Comprimento de Canal Efetivo ( $L_{eff}$ ) e da Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) tornam-se cada vez mais relevantes[18], visando a melhoria da qualidade, mesmo com o aumento de dispositivos dentro de um mesmo chip.

Conforme as dimensões dos transistores foram diminuindo, seguindo a Lei de Moore, e com o campo elétrico lateral adjacente ao dreno tendo valor alto, problemas de confiabilidade na tecnologia podem surgir. Visando reduzir essa

ocorrência, conceitos como região de dreno menos dopada (LDD - “Lightly Doped Drain”) passaram a ser introduzidos [9].

Com o aumento da densidade de corrente junto à necessidade por resistências menores e com dimensões menores mostraram-se um grande desafio. Estima-se que o impacto da resistência série fonte-dreno nas tecnologias atuais gera um impacto de 40% ou mais na corrente de saturação[9].

Visando uso máximo dos benefícios oferecidos pelos canais de alta mobilidade na corrente de dreno, que alimenta a carga ligada a ela, a redução da resistência de contato mostra-se um ponto de suma importância para que a performance dos dispositivos e da tecnologia como um todo seja otimizada[9].

Para isso, os contatos de siliceto estão cada vez menos presentes, para manter a redução da resistência de contato para a escala de poliponto (“Poly Pitch”), junto à diminuição da resistência do canal com acionamento aprimorado[15].

Uma solução que mostra-se promissora é a apresentada pelos contatos de Semicondutores de Metal Isolado (MIS – “Metal-Insulator-Semiconductor”), que utilizam de dielétricos ultrafinos entre o metal e o a interface do material semicondutor. Essa ação faz com que haja a redução da fixação do nível de Fermi, reduzindo também a Altura da Barreira de Schottky (SBH – “Schottky Barrier Height”) [16][17].

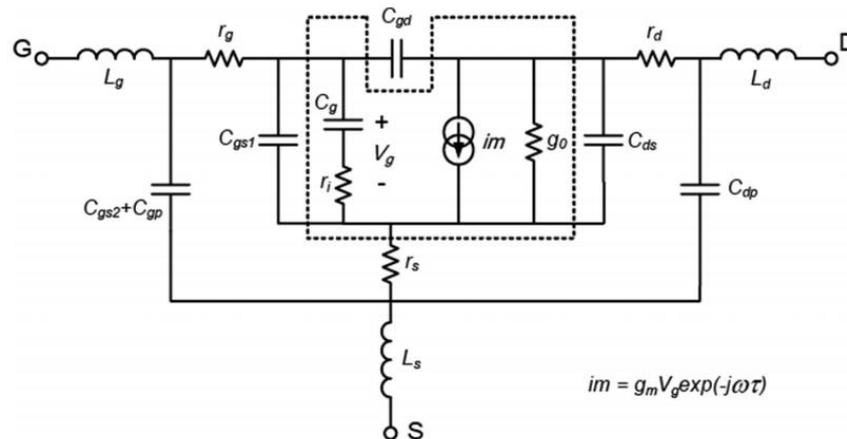
A redução do SBH ocorre devido ao decaimento exponencial dos Estados de Gap Induzidos por Metal (MIGS – “Metal Induced Gap States”), induzindo o acúmulo de cargas elétricas na lacuna da banda (“bandgap”) do material dielétrico.

#### **4.3 Métodos de extração da Resistência Série de Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ )**

Para obter uma melhor aproximação da Resistência Série Fonte e Dreno, primeiro precisou-se obter os valores para a Tensão de Limiar dos transistores HEMT estudados.

Conforme modelagem contemporânea do modelo de transistores HEMT, a Figura 11 [19] mostra as Resistências e Capacitâncias parasitas no dispositivo.

Figura 11 Modelo de circuito equivalente para HEMTs de baixo sinal, modelo intrínseco é representado pela linha pontilhada.



Fonte: Ahayan, J.

Considerando-se que pode-se utilizar das mesmas aproximações feitas para transistores MOSFET propostas em estudo anterior[20] a Resistência Total ( $R_{total}$ ) do dispositivo HEMT pode ser aproximada pela soma da Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) com a Resistência do Canal ( $R_{ch}$ ), com tais informações, é possível elaborar-se a Equação 4.1.

$$R_{total} = R_{SD} + R_{ch} \quad (4.1)$$

A Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) pode ser definida como sendo a soma das Resistência de Dreno ( $R_D$ ), Resistência da Fonte ( $R_S$ ) e pela Resistência dos Contatos de Fonte e de Dreno ( $R_{cont}$ ). Vale ressaltar que a Resistência de Dreno ( $R_D$ ) costuma ser igual à Resistência da Fonte ( $R_S$ ).

Logo, pode-se elaborar as Equações 4.2, 4.3 e 4.4.

$$R_{SD} = R_S + R_D + R_{cont} \quad (4.2)$$

$$R_D = R_S \quad (4.3)$$

$$R_{SD} = 2R_D + R_{cont} \quad (4.4)$$

Retomando os conceitos básicos de eletricidade, a Primeira Lei de Ohm propõe que a tensão aplicada em um ramo pode ser entendida como o produto da

intensidade de corrente que passa por tal ramo e sua resistência. Isolando a resistência, temos a Equação 4.5.

$$V = R.I$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.5)$$

Além disso, a Segunda Lei de Ohm propõe que a resistência é igual ao produto da resistividade do material ( $\rho$ ) pelo comprimento ( $L$ ) dividida pela área ( $A$ ), conforma a Equação 4.6.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4.6)$$

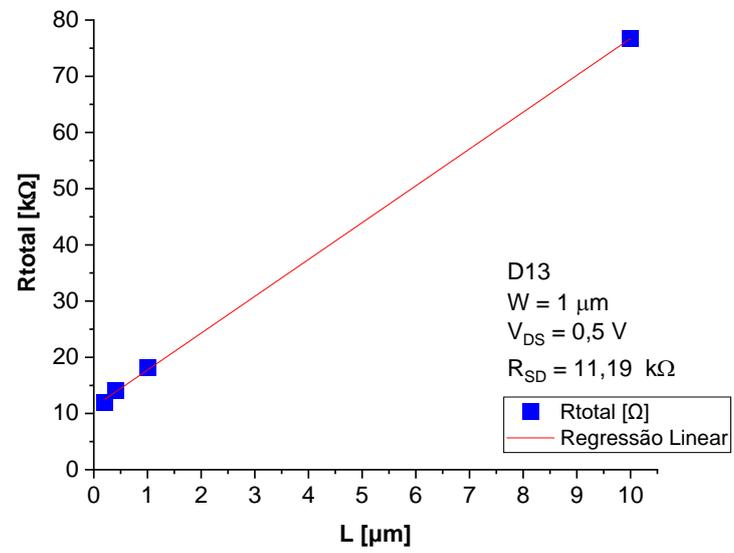
Aplicando-se os conceitos das Equações 4.5 e 4.6 à equação 4.1 e considerando o Comprimento de Canal tendendo a zero, podemos aproximar que a resistência total equivale à Resistência Fonte-Dreno, conforme Equação 4.7.

$$R_{total} = R_{ch} + R_{SD} = \frac{\rho L}{A} + R_{SD} = R_{SD} \quad (4.7)$$

Utilizando-se dos conceitos descritos nas seções 4.1 e 4.2, obtiveram-se as curvas de  $R_{total}$  para todas as lâminas estudadas. Vale lembrar que o valor de  $V_G$  aplicado era maior que a tensão de limiar ( $V_T$ ), para que o HEMT pudesse entrar em condução. Foi utilizado 0,5 Volt a mais de  $V_G$  em relação a  $V_T$  para o transistor HEMT nas regiões linear e de saturação.

Feito isso, tendeu-se o valor do Comprimento ( $L$ ) a zero, a fim de utilizar-se da Expressão 4.7 e determinar o valor da Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ). A Figura 12 mostra um exemplo de Regressão Linear realizada a fim de determinar  $R_{SD}$  (que teve valor de 11,19 k $\Omega$ ).

Figura 12 Resistência total e Regressão Linear em função do Comprimento do Canal.



Fonte: Autoria Própria.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão explorados os resultados obtidos por meio de dados experimentais bem como feitas discussões sobre eles a fim de identificar padrões dos dispositivos HEMT analisados.

### 5.1 Característica dos Dispositivos Analisados

Foram analisadas quatro lâminas com características específicas, mostradas na Tabela 1, todas com temperatura de 25 °C.

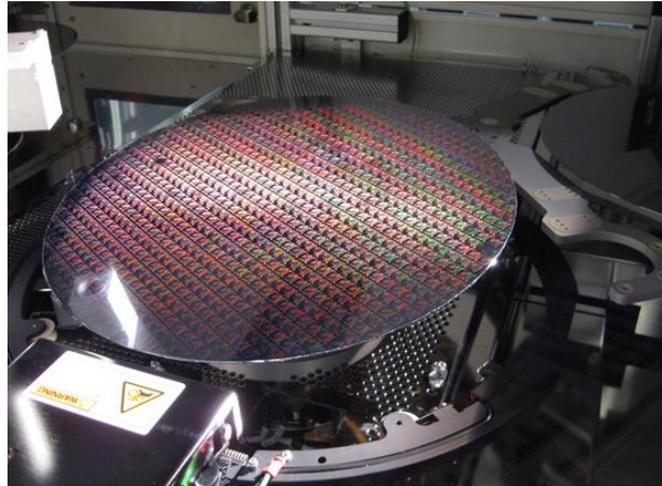
Tabela 1 Dados das lâminas utilizadas para análise.

Lâmina	Split	Ohmic Anneal / Active Anneal	Comentário
D13	2 Implant Active	NA	POR Gate metal
D15	Post active anneal	700C 90s 550C 90s ohm anneal	Mimic poly-Si res. Dep Impact on Rg
D18	40 IMP TiN / 250AlCu / 60 ARC TiN	525 C 90s	Impact Lower T ohm anneal
D19	40 IMP TiN / 250AlCu / 60 ARC TiN	565 C 90s (Std)	Impact Lower T ohm anneal

Fonte: Dados do fabricante.

A Figura 13 mostra uma lâmina de Silício onde cada uma das partes iguais é um Die (ou Chip). Já a Figura 14 mostra a topologia de uma Die, facilitando a distinção de onde cada um dos componentes se localiza.

Figura 13 Chapa de Silício mostrando as dies.



Fonte: Dados do fabricante.

A topologia de uma Die é mostrada na Figura 14, onde podem ser observadas as divisões específicas para cada dispositivo. Dentro de uma Die, existem diversos dispositivos RLs e cada um deles, para o presente trabalho que tem como base os dispositivos do IMEC Leuven, possuía oito transistores, cada um com três terminais (Porta – G, Dreno – D e Fonte – S ), conforme a Figura 15. Nela também é possível observar o número de cada terminal no dispositivo.

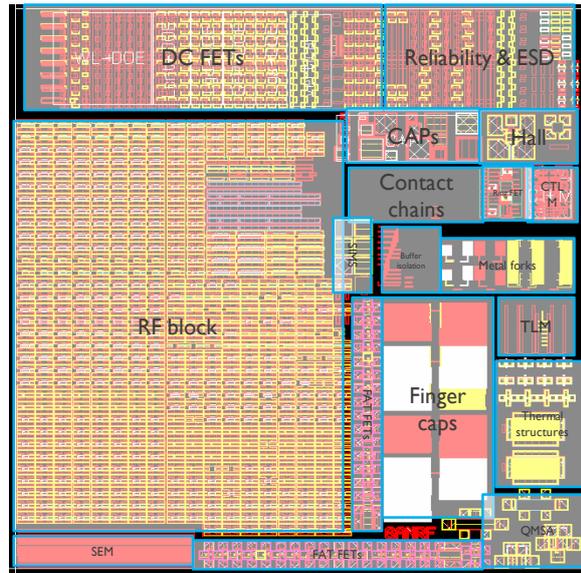
Na Tabela 2 constam os dados dos Dies de cada uma das lâminas utilizadas, onde constavam os dispositivos RL.

Tabela 2 Dies utilizados em cada uma das lâminas

Lâmina	Die	Observação
D13	56	Sem medição de RL5
D15	56	N/A
D18	9	N/A
D19	9	N/A

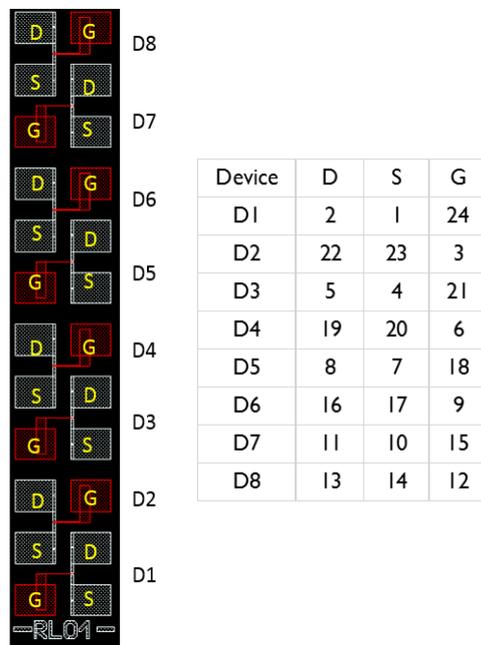
Fonte: Autoria Própria.

Figura 14 Topologia de uma Die.



Fonte: Dados do fabricante.

Figura 15 Topologia de um dispositivo RL de 1 a 16 com oito transistores, onde G é a Porta, S a Fonte e D o Dreno. Fonte: Dados do fabricante.



Fonte: Dados do fabricante.

A Tabela 3 mostra os parâmetros dos dispositivos RL utilizados para a análise, sendo:

- Lg: Comprimento do Canal (em micrômetros)
- W: Largura do Canal ou Largura de Banda (em micrômetros)
- Lc: Comprimento de Contato (em micrômetros)

Tabela 3 Dados dos dispositivos RL utilizados.

RL	Lg [um]	W [um]	Lc [um]
1	0,2	1	50
2	0,2	10	50
3	0,2	100	50
4	0,4	1	50
5	0,4	10	50
6	0,4	100	50
7	1	1	50
8	1	10	50
9	1	100	50
10	10	1	50
11	10	10	50
12	10	100	50

Fonte: Dados do fabricante.

Como pode-se observar, o valor de Lc foi mantido constante em todos os dispositivos RL utilizados.

Por serem dispositivos de tamanho micrométrico, todas as medições precisam ser feitas com ponteiras de agulha, de forma computadorizada.

Quanto às análises feitas, primeiro realizou-se a elaboração dos gráficos de Corrente de Dreno ( $I_D$ ) em relação à Tensão de Gate ( $V_G$ ) para um mesmo valor de Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em duas regiões de operação: Linear e Saturação, comparando os diferentes transistores (D1, D2 e D3) de um mesmo dispositivo RL para identificar se algum deles não estava com problema durante a medição. Como

tais dispositivos são submetidos a usos frequentes e medições constantes, dados com interferência podem surgir. Depois disso, comparou-se o melhor transistor HEMT de mesmo RL (aqueles que não estava com avarias) entre lâminas diferentes (D13, D15, D18 e D19) para, novamente, entender o impacto das alterações que existem entre cada uma delas, que foram ilustradas na Tabela 2, decorrentes dos processos de dopagem.

## 5.2 Obtenção dos Dados Experimentais

Neste capítulo serão feitas as análises de dados a fim de obter-se uma melhor compreensão sobre o comportamento dos transistores HEMT, bem como da sua Resistência Fonte-Dreno. Esse trabalho compara transistores HEMT entre si, porém, com características que os diferenciam, como Largura e Comprimento de Canal e a dopagem da lâmina da qual ele fazia parte, a fim de inferir possíveis alterações dos comportamentos e características dos mesmos por conta de alterações nos parâmetros dos quais são constituídos.

Para as análises, utilizou-se dos dados obtidos no IMEC de Leuven. Os dispositivos utilizados eram transistores HEMT constituídos de heterojunções de Nitreto de Gálio (GaN) e Nitreto de Gálio e Alumínio (AlGaN) que foram cultivados com deposição de vapor químico de metal orgânico (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) em alta resistividade de 200 milímetros de substrato de Silício (Si). Foram utilizadas lâminas de silício fabricadas pelo processo de Czochralski. Essas lâminas são divididas em várias partes iguais (chip) que contém um conjunto de diferentes tipos dispositivos, onde estão incluídos os transistores HEMT.

As características de tensão e corrente foram medidas em diferentes temperaturas entre 25°C e 200°C com a saturação de operação ( $V_D$ ) em 4 Volts usando um Analizador Keithley 2602. Este trabalho não analisará o impacto das alterações de performance dos transistores HEMT devido ao aumento da temperatura, pois todas as medições utilizadas forma feitas à temperatura de 25°C.

Os dispositivos analisados apresentam leves diferenças entre o Comprimento de Canal ( $L_g$ ) que varia de 0.2, 0.4, 1 e 10 micrômetros e também na largura do canal ( $W$ ), que varia de 1, 10 e 100 micrômetros.

Os dados mantêm um padrão de nomenclatura. Cada parte da nomenclatura representa um parâmetro que pode ser descrito pela Tabela 4.

Tabela 4 Explicação da nomenclatura dos dados obtidos no IMEC.

Nomenclatura	Significado
<b>P193330_D13_T25C_20_RL1_D1_IdVg_Vds_0.05_IV0</b>	Lote das lâminas utilizadas
P193330_ <b>D13</b> _T25C_20_RL1_D1_IdVg_Vds_0.05_IV0	Lâmina utilizada
P193330_D13_ <b>T25C</b> _20_RL1_D1_IdVg_Vds_0.05_IV0	Temperatura do experimento
P193330_D13_T25C_ <b>20</b> _RL1_D1_IdVg_Vds_0.05_IV0	Número do Die (Chip)
P193330_D13_T25C_20_ <b>RL1</b> _D1_IdVg_Vds_0.05_IV0	Dispositivo RL
P193330_D13_T25C_20_RL1_ <b>D1</b> _IdVg_Vds_0.05_IV0	Transistor utilizado na medição
P193330_D13_T25C_20_RL1_D1_ <b>IdVg</b> _Vds_0.05_IV0	Tipo de dado obtido
P193330_D13_T25C_20_RL1_D1_IdVg_ <b>Vds</b> _0.05_IV0	Variável alterada
P193330_D13_T25C_20_RL1_D1_IdVg_Vds_ <b>0.05</b> _IV0	Valor utilizado
P193330_D13_T25C_20_RL1_D1_IdVg_Vds_0.05_ <b>IV0</b>	Variável secundária

Fonte: Autoria Própria.

Antes da extração dos dados em si, foi realizada uma medição inicial, a fim de verificar se os dispositivos possuíam curvas com silhuetas habituais, evitando que fossem pegos dados em dispositivos queimados ou avariados de alguma forma, o que poderia acabar comprometendo o trabalho.

Com essa extração inicial feita, foram plotadas as curvas com o auxílio do software Origin®, que foi escolhido por conta da sua disseminação no meio acadêmico como um todo e por possuir ferramentas que auxiliam na análise, como autoajuste de eixos, plotagens em logaritmo dentre outras.

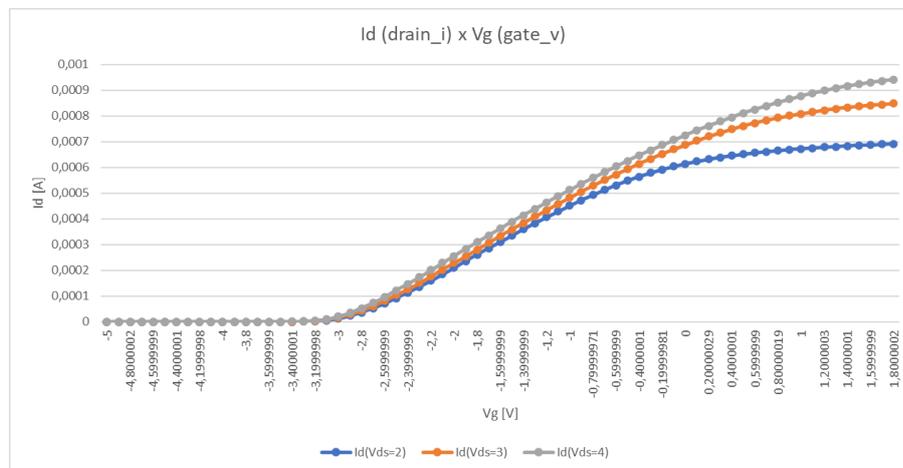
Em casos onde as curvas mostravam-se parecidas com o que costuma ser visto na literatura como um todo, os dados eram salvos em arquivos de formato de texto (.txt) junto às respectivas curvas, que eram salvas em formato de imagem (.gif).

No total, foram obtidos cerca de vinte mil arquivos de medições no IMEC Leuven, constando os dados e seus respectivos gráficos inicialmente plotados.

Com a finalidade de exemplificar o porquê o Origin® ser escolhido para este tipo de trabalho frente a outras ferramentas de mercado que normalmente são

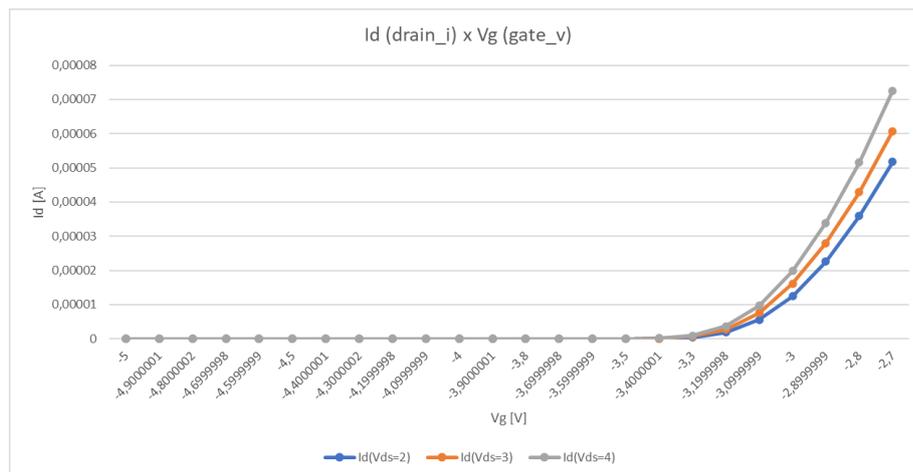
amplamente disseminadas no mercado de negócios e financeiro, como o Excel®, plotou-se os gráficos contidos nas Figuras 16 e 17 para analisar a alteração do comportamento da Corrente de Dreno ( $I_D$ ) em função da Tensão de Porta ( $V_G$ ) para diferentes valores de Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) bem como possíveis valores para a Tensão de Limiar ( $V_T$  – “Threshold Voltage”) respectivamente.

Figura 16 Comportamento da Corrente de Dreno ( $I_D$ ) em função da Tensão de Porta ( $V_G$ ) para diferentes valores de Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 Análise de possíveis valores para Tensão de Limiar ( $V_t$ ) para um transistor HEMT.



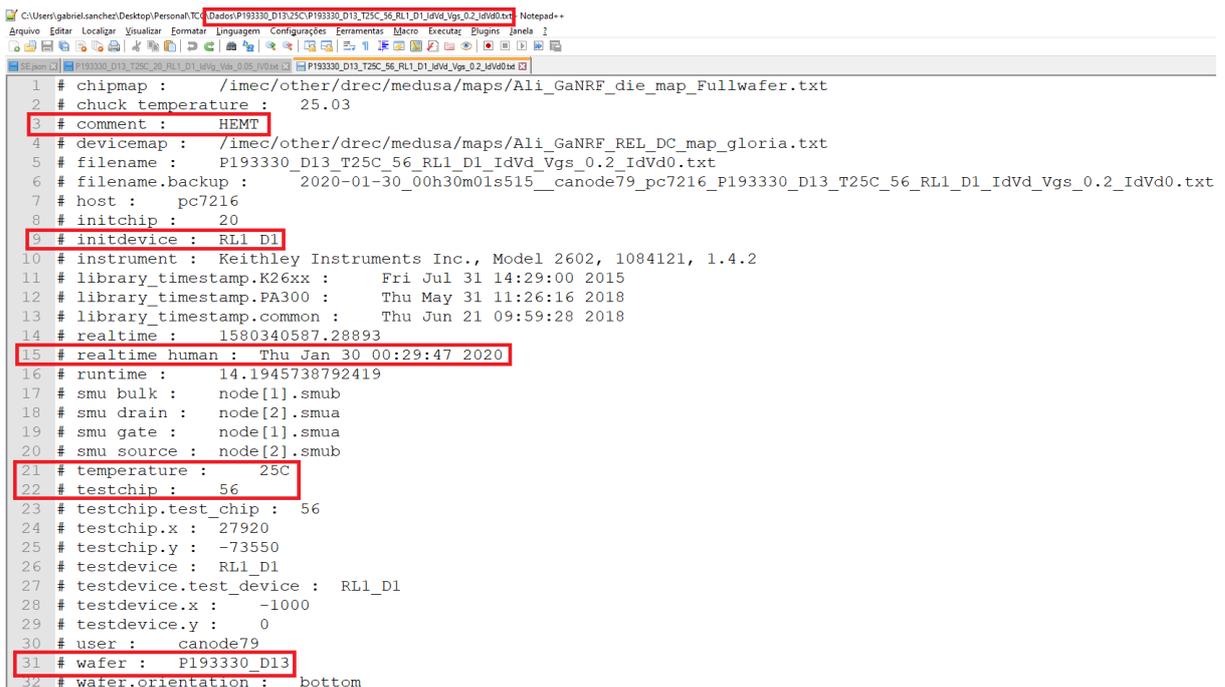
Fonte: Autoria Própria.

Como fica claro com as Figuras 16 e 17, ainda que o Excel® mostre-se uma ferramenta excelente e quase indispensável para o mundo dos negócios, no âmbito

de trabalhos voltados para áreas acadêmicas como a Microeletrônica, o mesmo não mostra tanta eficiência como o Origin®.

Dentro de cada um dos arquivos, antes dos dados, existe um cabeçalho com informações das medições, que foram destacadas na Figura 18, onde utilizou-se do software Notepad++® para manipulação e visualização dos arquivos de texto. Dentre elas, tem-se, respectivamente: nomenclatura do arquivo, comentário sobre a medição, que neste exemplo foi utilizado para falar que tratavam-se da medições de transistores HEMT, dispositivo inicial, data e hora da medição, no formato carimbo de tempo ou “timestamp”, temperatura da medição em graus Celsius, chip de teste utilizado e a identificação do chip que continha os dados.

Figura 18 Cabeçalho dos arquivos de medição.



```

1 # chipmap : /imec/other/drec/medusa/maps/Ali_GaNRF_die_map_Fullwafer.txt
2 # chuck temperature : 25.03
3 # comment : HEMT
4 # devicemap : /imec/other/drec/medusa/maps/Ali_GaNRF_REL_DC_map_gloria.txt
5 # filename : P193330_D13_T25C_56_RL1_D1_IdVd_Vgs_0.2_IdVd0.txt
6 # filename.backup : 2020-01-30_00h30m01s515__canode79_pc7216_P193330_D13_T25C_56_RL1_D1_IdVd_Vgs_0.2_IdVd0.txt
7 # host : pc7216
8 # initchip : 20
9 # initdevice : RL1 D1
10 # instrument : Keithley Instruments Inc., Model 2602, 1084121, 1.4.2
11 # library_timestamp.K26xx : Fri Jul 31 14:29:00 2015
12 # library_timestamp.PA300 : Thu May 31 11:26:16 2018
13 # library_timestamp.common : Thu Jun 21 09:59:28 2018
14 # realtime : 1580340587.28893
15 # realtime human : Thu Jan 30 00:29:47 2020
16 # runtime : 14.1945738792419
17 # smu bulk : node[1].smub
18 # smu drain : node[2].smua
19 # smu gate : node[1].smua
20 # smu source : node[2].smub
21 # temperature : 25C
22 # testchip : 56
23 # testchip.test_chip : 56
24 # testchip.x : 27920
25 # testchip.y : -73550
26 # testdevice : RL1 D1
27 # testdevice.test_device : RL1 D1
28 # testdevice.x : -1000
29 # testdevice.y : 0
30 # user : canode79
31 # wafer : P193330_D13
32 # wafer.orientation : bottom

```

Fonte: Autoria própria.

Para facilitar a importação dos dados, criou-se o script em Python contido no Anexo I para realizar essa exclusão de forma automática, além de salvar na coluna da Corrente de Dreno (“drain\_i”) a variável e valor de Tensão de Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) para os arquivos destinados aos gráficos de Corrente de Dreno ( $I_D$ ) por Tensão de

Gate ( $V_G$ ) e Tensão Gate-Fonte ( $V_{GS}$ ) para os arquivos destinados aos gráficos de Corrente de Dreno ( $I_D$ ) por Tensão de Dreno ( $V_D$ ).

Após o cabeçalho do arquivo, os dados estavam contidos como mostra a Figura 19. Pode-se notar que as colunas de dados estavam separadas por tabulação, algo que auxilia na hora de fazer a leitura dos arquivos de texto em algum software para a plotagem dos gráficos. Com o uso do Notepad++®, essa visualização da tabulação fica mais simples, ilustrada pelas setas para a direita na cor amarela quando a opção de exibir caracteres ocultos é selecionada. Os símbolos “LF” indicam o final da linha de dados.

Figura 19 Dados contidos nos arquivos de texto obtidos pelas medições

```

34 ## bulk t bulk v bulk i drain t drain v drain i gate t gate v gate i source t source v source i ##
35 1 -0.572317 0 2.8610231e-13 0.55082101 0 -6.69556e-08 0.52987701 0.2 -5.125995e-13 0.50846601 0 6.7624882e-08 LF
36 2 -0.79971701 0 3.6954879e-13 0.71715099 0.1 4.3320964e-05 0.69622499 0.2 -3.5762788e-14 0.61373103 0 4.3323646e-05 LF
37 3 -0.90556699 0 -7.6293946e-13 0.88422298 0.2 8.6252629e-05 0.86328101 0.2 8.940697e-13 0.841986 0 8.6255772e-05 LF
38 4 -1.0510271 0 -1.0371208e-12 1.009523 0.30000001 0.00012847914 0.98861003 0.2 -5.7339667e-12 0.94701397 0 0.00012849248 LF
39 5 -1.1561124 0 -2.5033952e-13 1.1348161 0.40000001 0.00016978444 1.113884 0.2 -2.5272369e-12 1.0925649 0 0.0001697836 LF
40 6 -1.261119 0 1.66893e-13 1.239804 0.5 0.00020996344 1.218896 0.2 -7.6413155e-12 1.197626 0 0.00021002103 LF
41 7 -1.366075 0 1.9073487e-13 1.344726 0.60000002 0.00024889887 1.3237931 0.2 -5.1856041e-12 1.302528 0 0.00024885382 LF
42 8 -1.471034 0 4.7683716e-14 1.44978 0.69999999 0.00028625442 1.428861 0.2 5.3524971e-12 1.407498 0 0.00028629959 LF
43 9 -1.575979 0 -1.1444092e-12 1.554703 0.80000001 0.00032218674 1.533761 0.2 -6.079674e-13 1.51245 0 0.00032213164 LF
44 10 -1.680999 0 -5.9604645e-14 1.659706 0.90000004 0.00035633458 1.638786 0.2 -4.5537948e-12 1.617494 0 0.00035641136 LF
45 11 -1.785972 0 -2.0265579e-13 1.764636 1 0.00038894953 1.7437021 0.2 -6.1273577e-12 1.722436 0 0.00038893867 LF
46 12 -1.8919801 0 1.1920929e-13 1.870721 1.1 0.00041983486 1.849792 0.2 -6.6161156e-12 1.8284889 0 0.00041971827 LF
47 13 -1.997193 0 -3.2186509e-13 1.97593 1.2 0.00044897283 1.955018 0.2 -5.3763391e-12 1.933689 0 0.00044898773 LF
48 14 -2.1025679 0 1.66893e-13 2.0812199 1.30000001 0.00047649158 2.0602679 0.2 3.1709672e-12 2.0389571 0 0.00047652758 LF
49 15 -2.2078531 0 3.8655438e-12 2.186507 1.4 0.00050242484 2.1655641 0.2 7.033348e-13 2.1443069 0 0.00050244777 LF
50 16 -2.313014 0 5.9604645e-14 2.29175 1.5 0.00052658597 2.2708271 0.2 -2.0265579e-13 2.249536 0 0.0005266235 LF
51 17 -2.4182401 0 8.8214874e-13 2.3969419 1.6 0.00054927781 2.3760109 0.2 -7.5697903e-12 2.3546851 0 0.00054924143 LF
52 18 -2.523514 0 -6.1988831e-13 2.502228 1.7 0.00057019584 2.481271 0.2 -8.1181529e-12 2.4599891 0 0.00057026773 LF
53 19 -2.6288271 0 -1.0728836e-13 2.607446 1.80000001 0.00058977416 2.5865159 0.2 -5.4717064e-12 2.5652111 0 0.00058971433 LF
54 20 -2.7340281 0 -3.2186509e-13 2.7127669 1.9 0.0006076367 2.691833 0.2 -7.1525576e-14 2.6705551 0 0.00060769741 LF
55 21 -2.8392229 0 -3.0994415e-13 2.817934 2 0.00062399771 2.7970231 0.2 1.4305115e-12 2.7757299 0 0.0006240161 LF
56 22 -2.944515 0 -1.4305115e-13 2.923188 2.10000001 0.0006389448 2.902283 0.2 2.1815301e-12 2.8809831 0 0.00063894392 LF
57 23 -3.1704299 0 3.5762788e-13 3.108849 2.2 0.00065237703 3.047719 0.2 1.9073486e-12 2.9862249 0 0.00065246085 LF
58 24 -3.2756929 0 5.125995e-13 3.2543881 2.3 0.00066437677 3.233443 0.2 3.4928323e-12 3.212177 0 0.00066444458 LF
59 25 -3.4210739 0 0 3.399833 2.40000001 0.00067520887 3.3789041 0.2 1.3947487e-12 3.357585 0 0.00067519146 LF
60 26 -3.526319 0 -3.0994415e-13 3.5049591 2.5 0.00068473368 3.484036 0.2 6.9141389e-13 3.4627869 0 0.00068480731 LF
61 27 -3.6315529 0 -2.1457673e-13 3.610199 2.60000001 0.00069329026 3.5892689 0.2 -5.0067903e-13 3.5679891 0 0.00069326616 LF
    
```

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 mostra o significado de cada coluna contida dentro do arquivo, bem como a unidade específica do dado em questão.

Tabela 5 Significado de cada coluna de dado dentro de um arquivo de extração junto às suas respectivas unidades

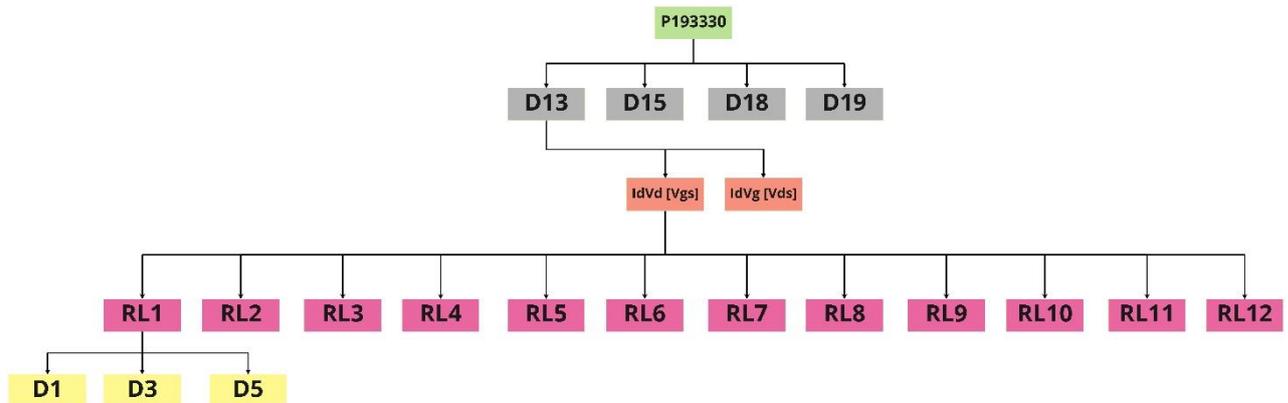
Rótulo do	Significado	Unidade
-----------	-------------	---------

dado		
##	Número do Registro	N/A
bult_t	Tempo do Bulk	Segundo
bult_v	Tensão do Bulk	Volts
bulk_i	Corrente do Bulk	Ampéres
drain_t	Tempo do Dreno	Segundo
drain_v	Tensão de Dreno	Volts
drain_i	Corrente de Dreno	Ampéres
gate_t	Tempo da Porta	Segundo
gate_v	Tensão de Porta	Volts
gate_i	Corrente de Porta	Ampéres
source_t	Tempo da Fonte	Segundo
source_v	Tensão de Fonte	Volts
source_i	Corrente de Fonte	Ampéres

Fonte: Autoria Própria.

Optou-se por fazer um estudo das variações das medições realizadas entre as lâminas D13, D15, D18 e D19, que eram todas as que tiveram os dados medidos no IMEC, alterando-se os dispositivos RL de 1 a 12 dentro de cada uma delas, medindo sempre os dados de pelo menos três transistores. A Figura 20 mostra a topologia dos dados para a lâmina D13, os quais foram salvos em pastas para facilitar a elaboração dos gráficos e obtenção dos parâmetros. As demais lâminas seguem o mesmo padrão.

Figura 20 Topologia dos dados salvos para a lâmina D13.



Fonte: Autoria Própria.

Os tipos de dados eram, basicamente, Corrente de Dreno por Tensão de Dreno com variações de Tensão de Porta-Fonte e Corrente de Dreno por Tensão de Porta com variações de Tensão Dreno-fonte.

### 5.3 Curvas Corrente de Dreno ( $I_D$ ) pela Tensão de Porta ( $V_G$ )

Elaborou-se as curvas da Corrente de Dreno ( $I_D$ ) pela Tensão de Porta ( $V_G$ ) dos doze dispositivos RL analisados de todas as quatro lâminas (totalizando 48 dispositivos RL), para dois valores de  $V_{DS}$  a fim de analisar os efeitos nas regiões Linear e de Saturação.

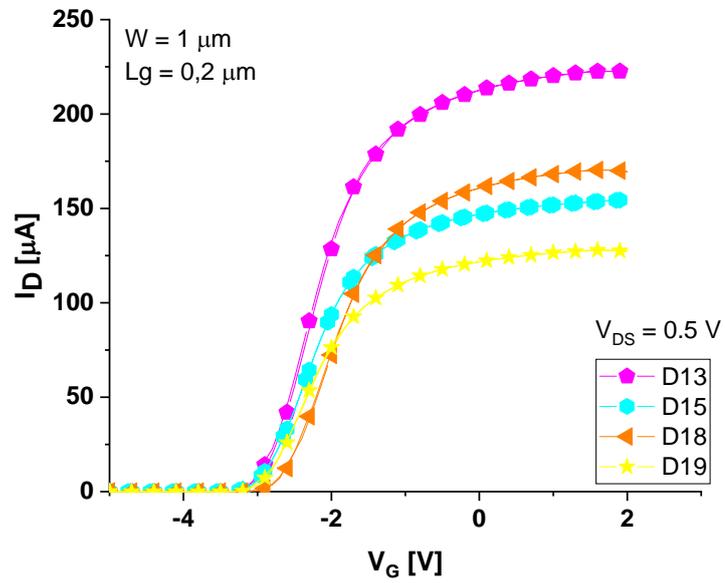
Esse procedimento costuma ser adotado para a obtenção dos valores de Tensão de Limiar ( $V_T$ ) de maneira gráfica. Entretanto, neste trabalho utilizou-se do método proposto por ORTIZ-CONDE, por poder ser feito de forma automatizada devido à quantidade de dados analisados.

Vale lembrar que antes dessa etapa, comparou, pelo menos, os três transistores que compunham cada dispositivo RL (mostrados na Figura 15) a fim de encontrar se algum deles não estava em seu funcionamento correto e evitar o uso do mesmo para que os resultados não sofressem alterações de fatores externos. Tal procedimento foi feito para dois valores de Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) a fim de obter resultados com o HEMT nas regiões de operação Linear e de Saturação que foram, respectivamente, 0,5 V e 4 V.

Para melhor visualização e agrupamento, os dispositivos HEMT serão mostrados com valores constantes da Largura do Canal ( $W$ ), mas com alterações do Comprimento do Canal ( $L$ ), primeiro para a região Linear e depois para a região de Saturação. Tal abordagem foi adotada pois, conforme mostrado no capítulo 4, utilizou-se de valores constantes de  $W$  e tendeu-se  $L$  a zero para que a Resistência Série Fonte-Dreno fosse obtida a partir da Resistência total.

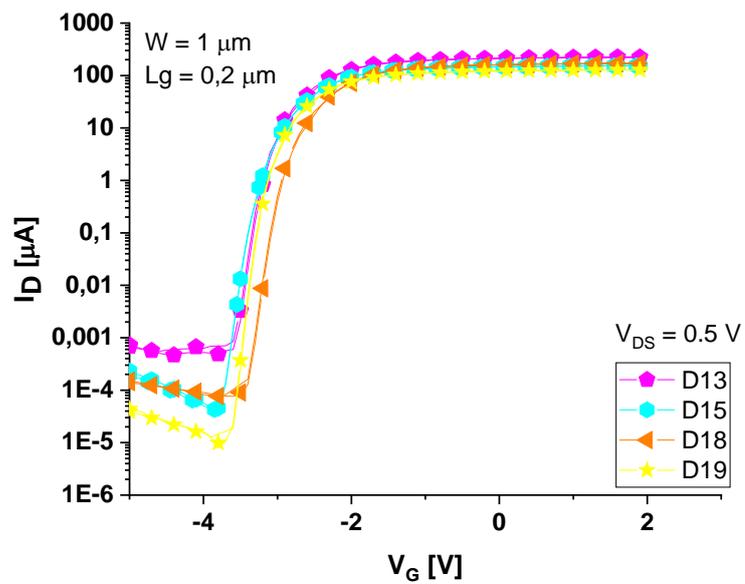
Iniciando pela Largura do Canal ( $W$ ) em 1 micrômetro, as Figuras de 5.21 a 5.28 mostram os valores da Corrente de Dreno em função da Tensão de Porta dos HEMTs com Comprimento de Canal ( $L$ ) com valores de 0,2 a 10 micrômetros (com variações conforme mostrado na Tabela 3) para o HEMT operando na região Linear.

Figura 21  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



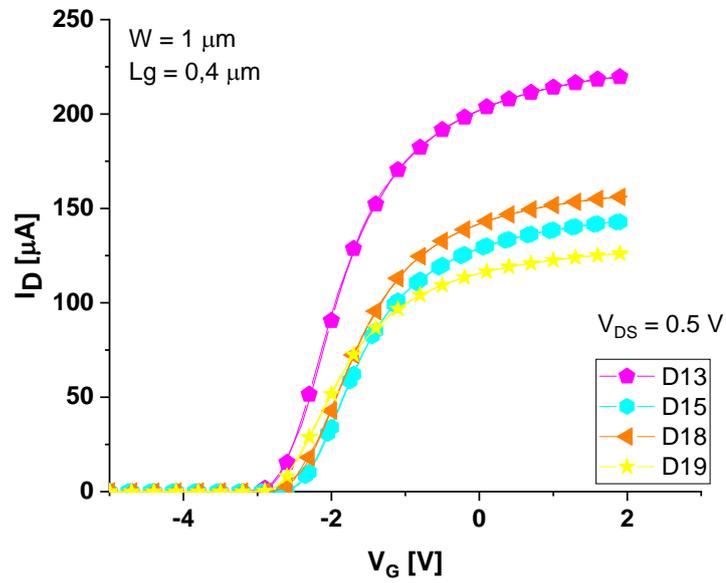
Fonte: Autoria Própria.

Figura 22  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



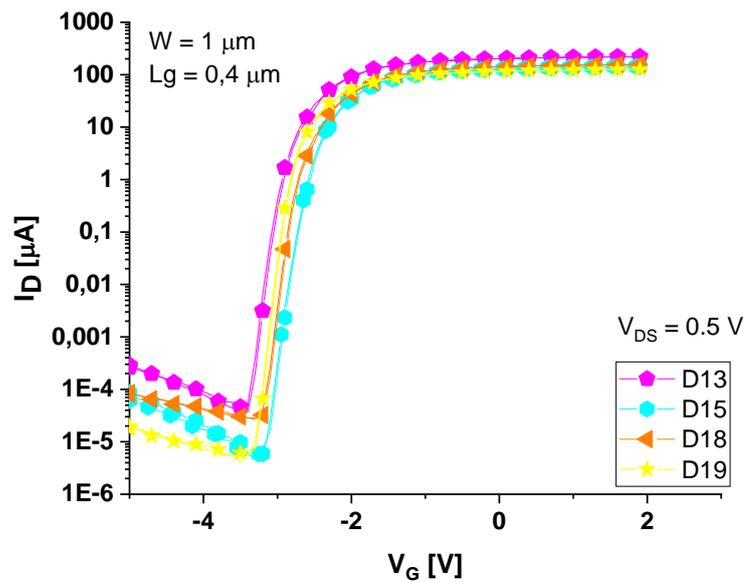
Fonte: Autoria própria.

Figura 23  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL4 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



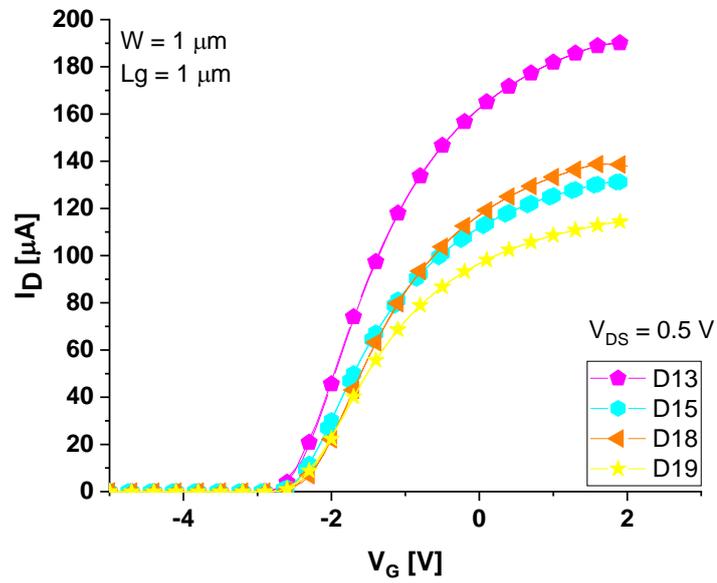
Fonte: Autoria própria.

Figura 24  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL4 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



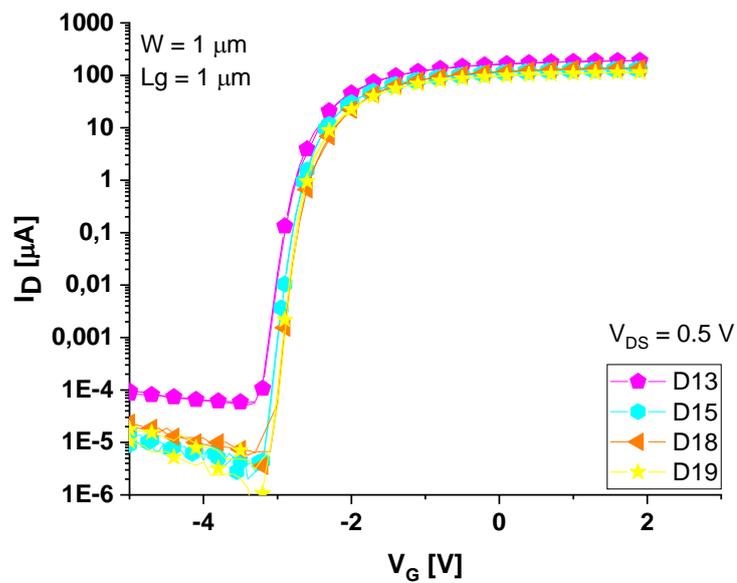
Fonte: Autoria própria.

Figura 25  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



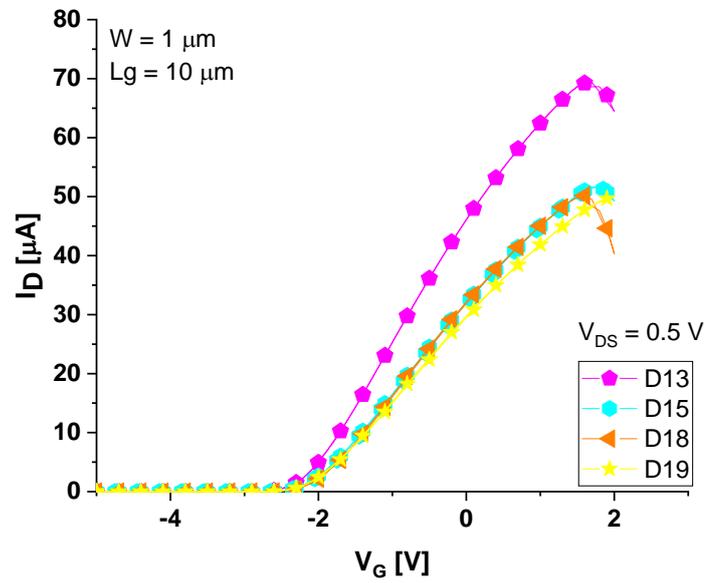
Fonte: Autoria própria.

Figura 26  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



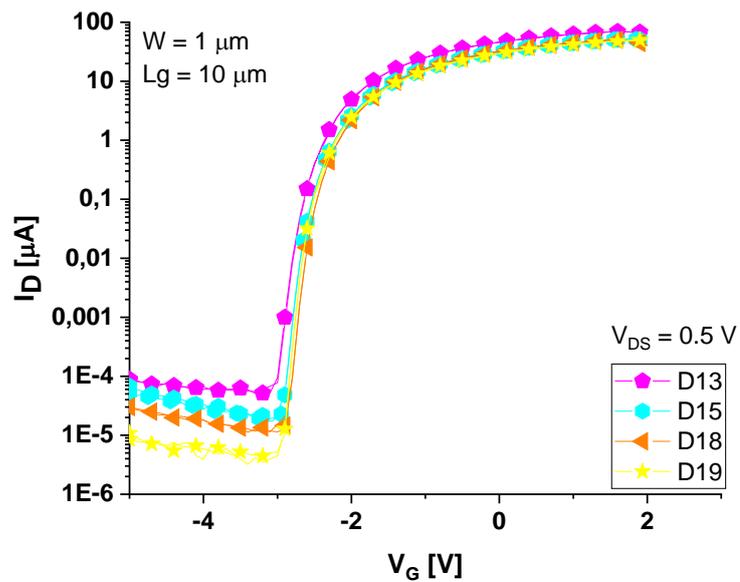
Fonte: Autoria própria.

Figura 27  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



Fonte: Autoria própria.

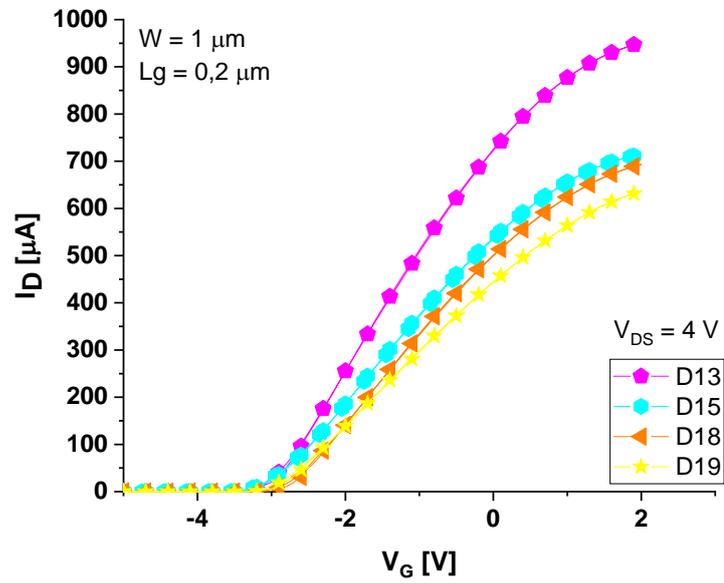
Em todas as variações de Comprimento de Canal é possível notar que a lâmina D13 era a que oferecia maiores valores de Corrente de Dreno a serem atingidos conforme variações das Tensões de Porta. Tal comportamento pode ser interessante para o uso do HEMT em projetos onde a carga necessita de uma alta corrente. Também é possível notar que D19 foi a lâmina que ofereceu os menores valores para Corrente de Dreno.

Além disso, para valores de Comprimento de Canal menores que 1 micrômetro (em 0,2 e 0,4  $\mu\text{m}$ ), o HEMT mostra uma Corrente de Dreno com baixas variações quando está submetido a uma Tensão de Porta de -1 a 2 Volts. Tal comportamento não mostra-se verdadeiro para valores maiores de Comprimento de Canal (1 e 10 micrômetros).

As variações de  $I_D$  não mostraram-se consideráveis entre dispositivos com diferentes Comprimentos de Canais. Em geral, os valores máximos obtidos foram da casa dos 100 a 220 micro Ampères. Entretanto, para aqueles com  $L = 10$  micrômetros tais valores foram de 50 a 70 micro Ampères.

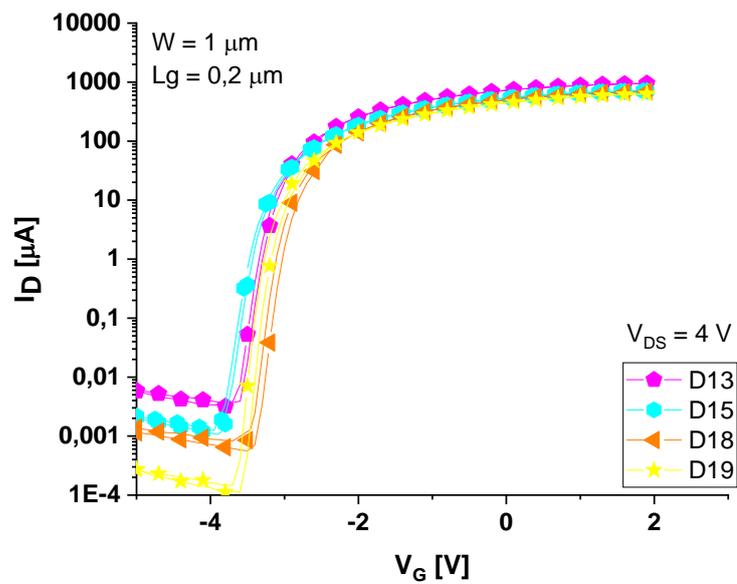
As Figuras 29 a 36 trazem os valores da Corrente de Dreno em função da Tensão de Porta dos HEMTs operando com  $W = 1$  micrômetro na região de Saturação.

Figura 29  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



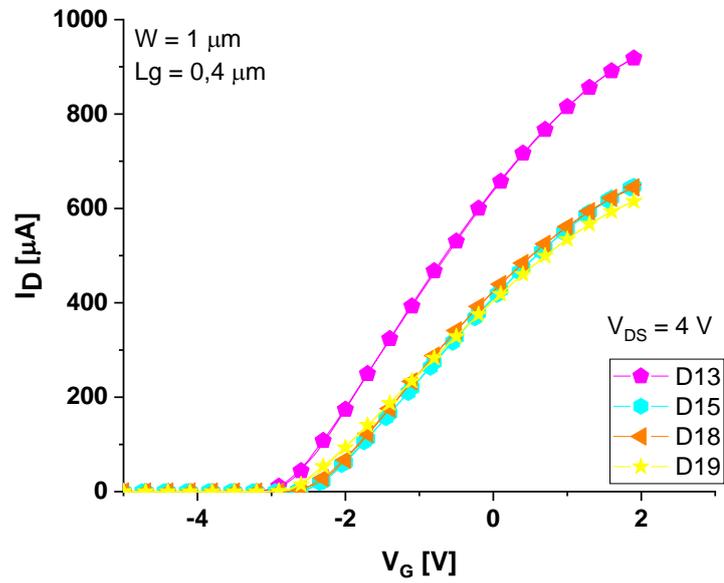
Fonte: Autoria Própria.

Figura 30  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



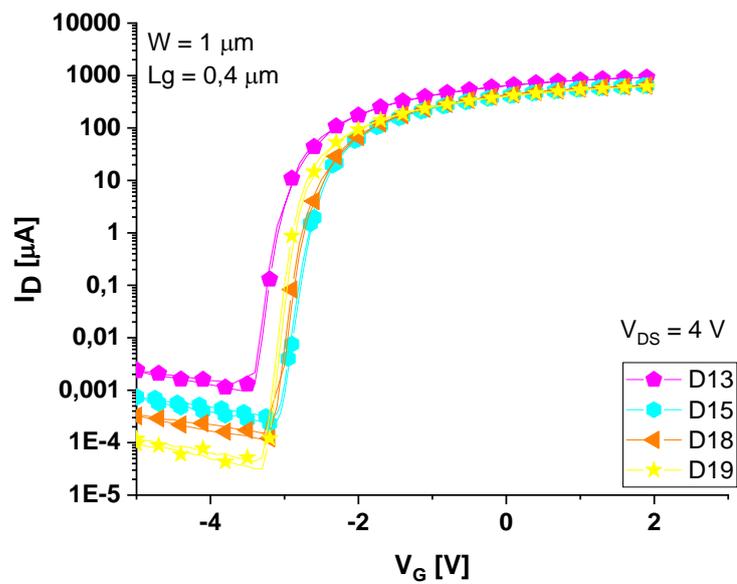
Fonte: Autoria Própria.

Figura 31  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL4 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



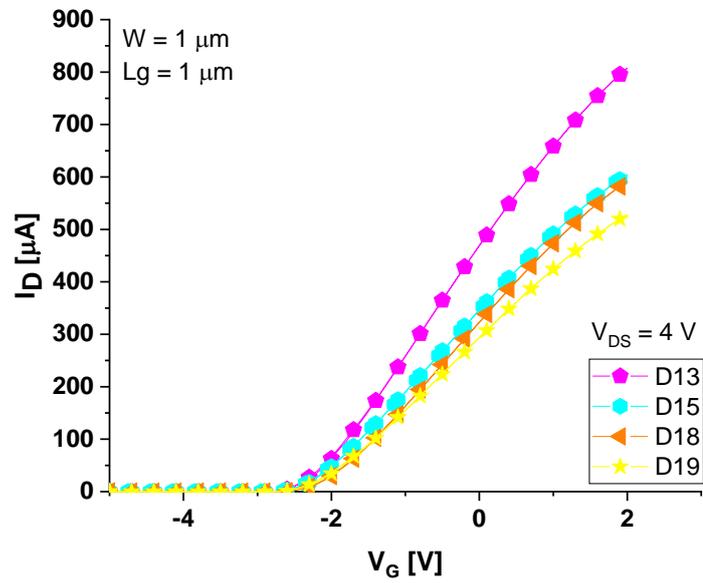
Fonte: Autoria Própria.

Figura 32  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL1 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



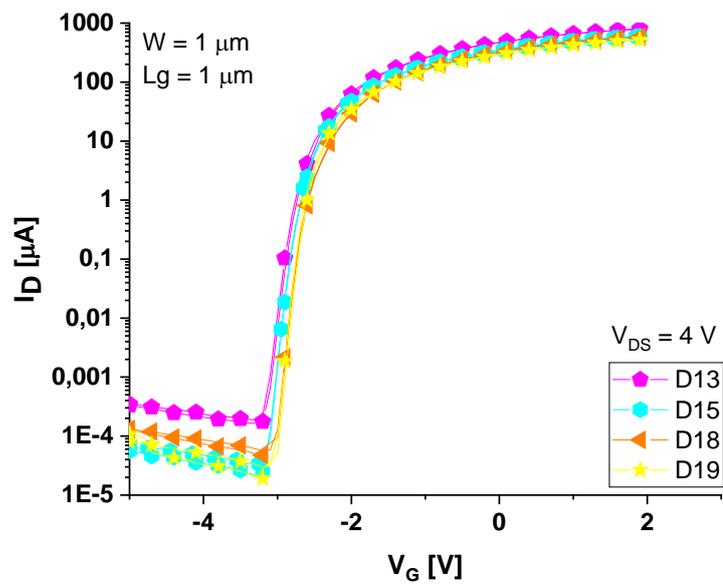
Fonte: Autoria Própria.

Figura 33  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



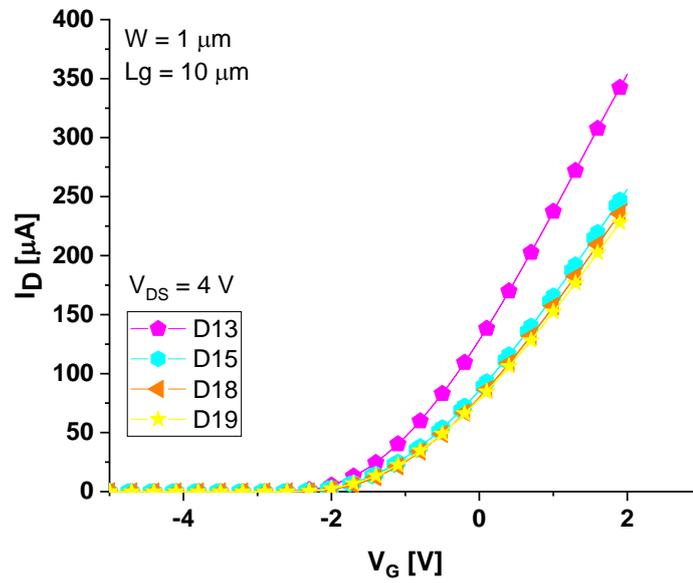
Fonte: Autoria Própria.

Figura 34  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL7 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



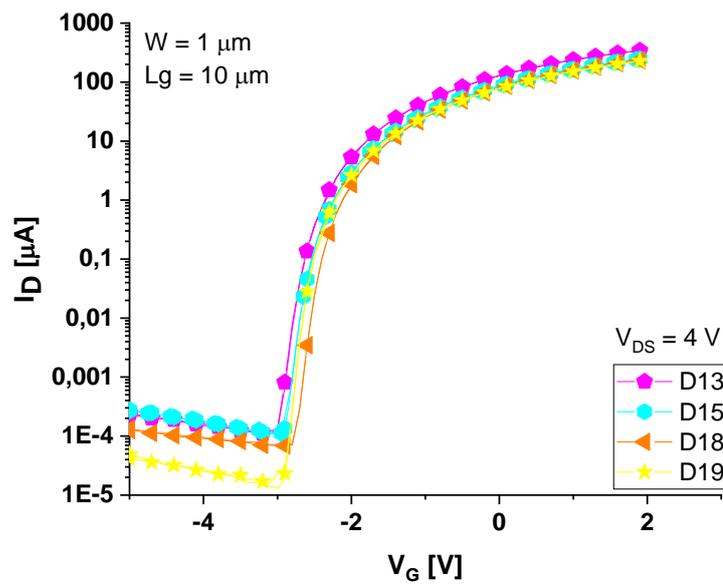
Fonte: Autoria Própria.

Figura 35  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 36  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL10 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

Observando-se as curvas do HEMT na Saturação, pode-se perceber uma curvatura similar à que foi observada para o transistor na região Linear com valores de  $L$  maiores ou iguais a 1 micrômetro, onde perde-se a característica de linearidade. Tal efeito faz sentido, dado que os HEMTs estão operando na Saturação.

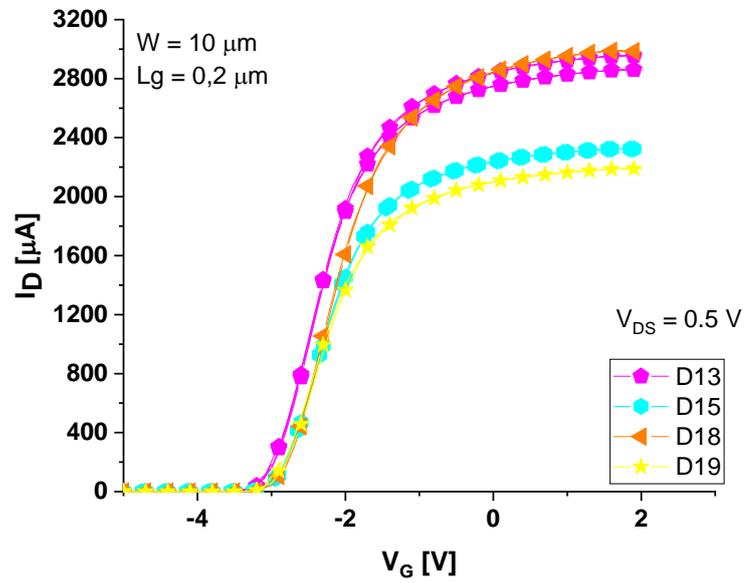
Novamente, D13 foi a lâmina que mostrou as maiores variações de  $I_D$  obtidas conforme variações de  $V_G$ . As demais lâminas (D15, D18 e D19) tiveram valores similares em todos os dados analisados para esta configuração.

Outro ponto característico do transistor operando na Saturação é que, conforme Figura 24, os valores obtidos para  $I_D$  costumam ser muito mais elevados do que os obtidos na região Linear. Neste caso, os valores máximos foram da casa de 500 a 100 micro Ampères.

Novamente, o HEMT a Corrente de Dreno fica menor com os mesmos valores de Tensão de Porta aplicados com  $L$  igual a 10 micrômetros.

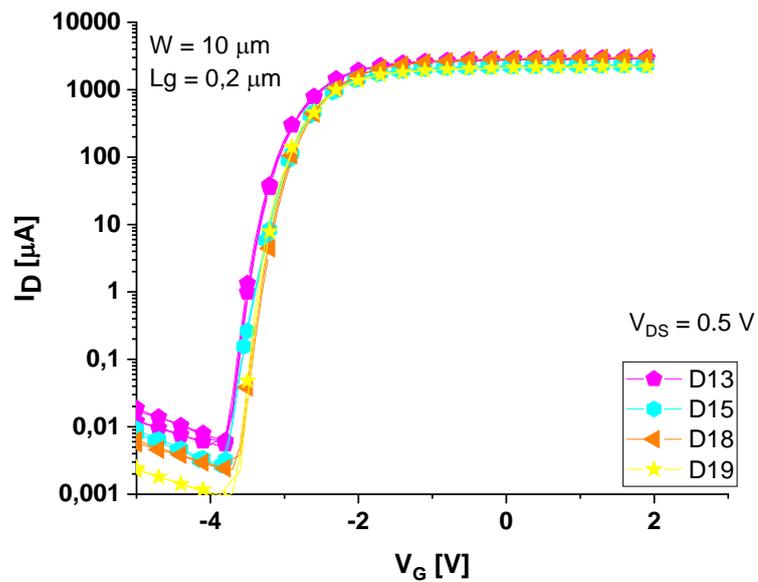
Para valores intermediários de Largura do Canal ( $W$ ), em 10 micrômetro, as Figuras de 37 a 44 mostram os valores da Corrente de Dreno em função da Tensão de Porta dos HEMTs com Comprimento de Canal ( $L$ ) com valores de 0,2 a 10 micrômetros (com variações conforme mostrado na Tabela 3) para o HEMT operando na região Linear.

Figura 37  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



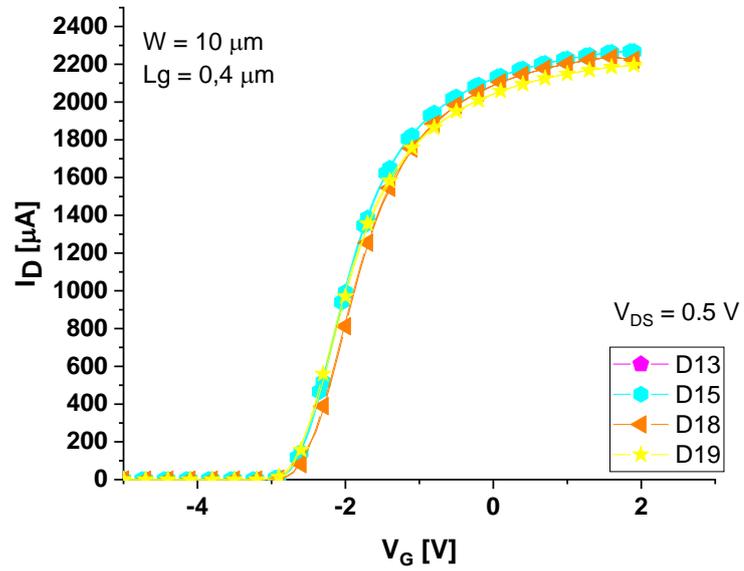
Fonte: Autoria Própria.

Figura 38  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



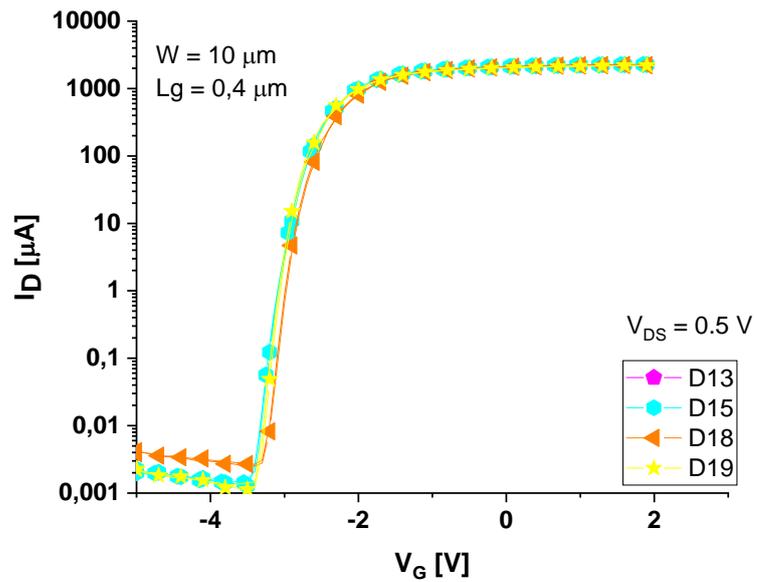
Fonte: Autoria Própria.

Figura 39  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



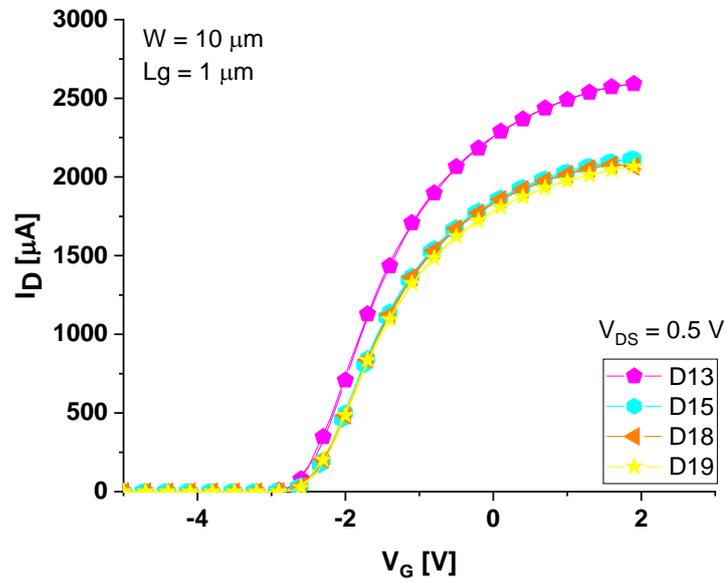
Fonte: Autoria Própria.

Figura 40  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



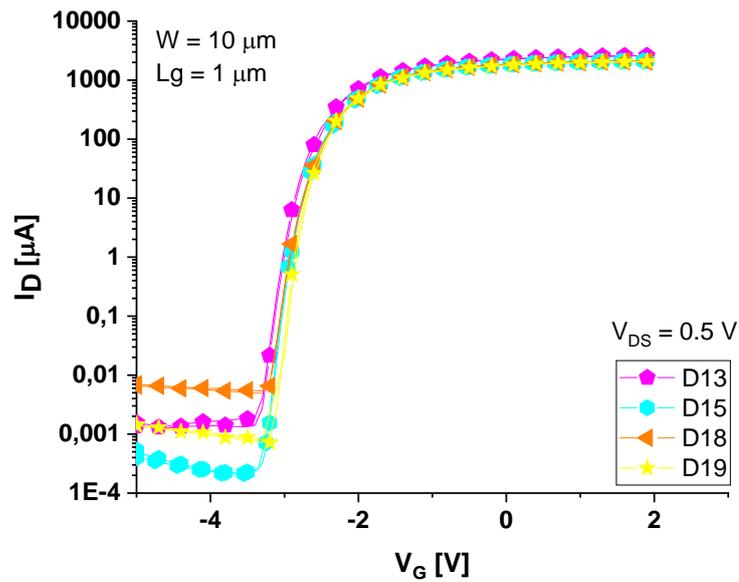
Fonte: Autoria Própria.

Figura 41  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



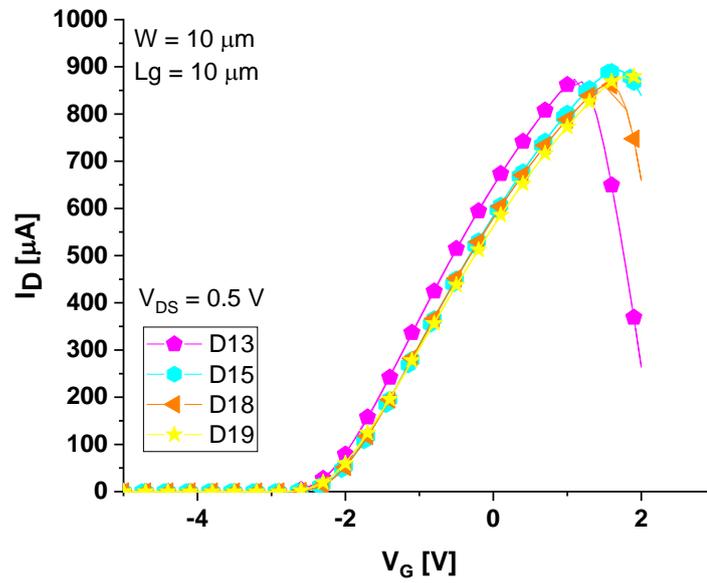
Fonte: Autoria Própria.

Figura 42  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



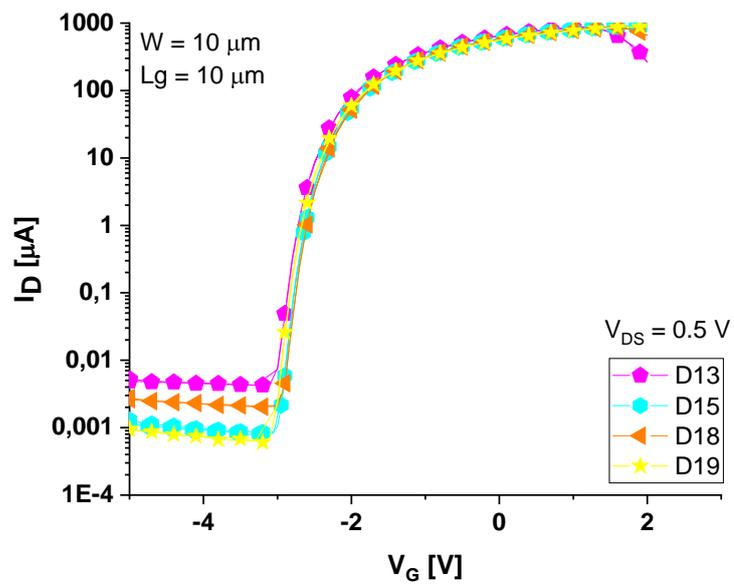
Fonte: Autoria Própria.

Figura 43  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 44  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0.5$  V do dispositivo RL11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

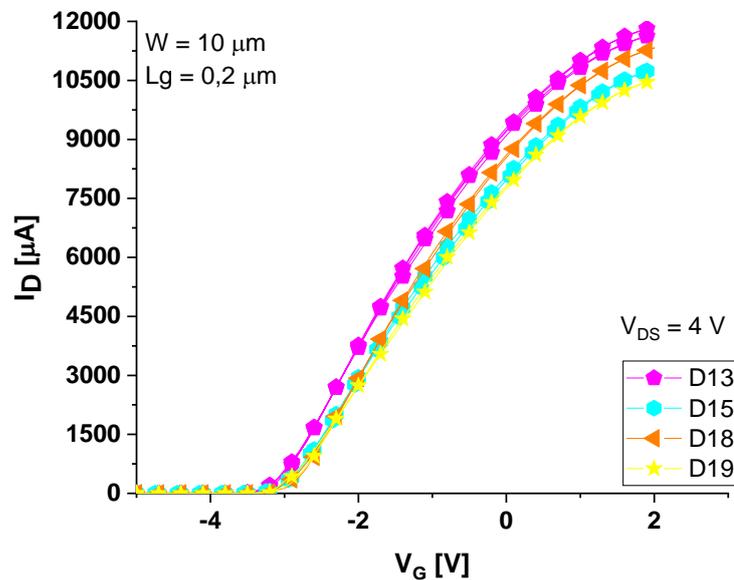
Para essa configuração de parâmetros para os HEMTs, apenas com  $L$  igual a 0,2 micrômetros foi possível notar uma região de valores praticamente constantes de  $I_D$  de acordo com variações de  $V_G$  que também era de -2 a 1 V.

D13 mostrou-se a lâmina com maiores valores de  $I_D$  atingidos em algumas das medições, diferente do que ocorre com  $W$  igual a 1 micrômetro.

É possível notar também que, com o aumento de  $L$ , os valores máximos de  $I_D$  atingidos foram menores, mostrando a possibilidade de uma correlação entre ambas as variáveis. Os valores máximos obtidos foram de cerca de 900 a 3000 micro Ampères.

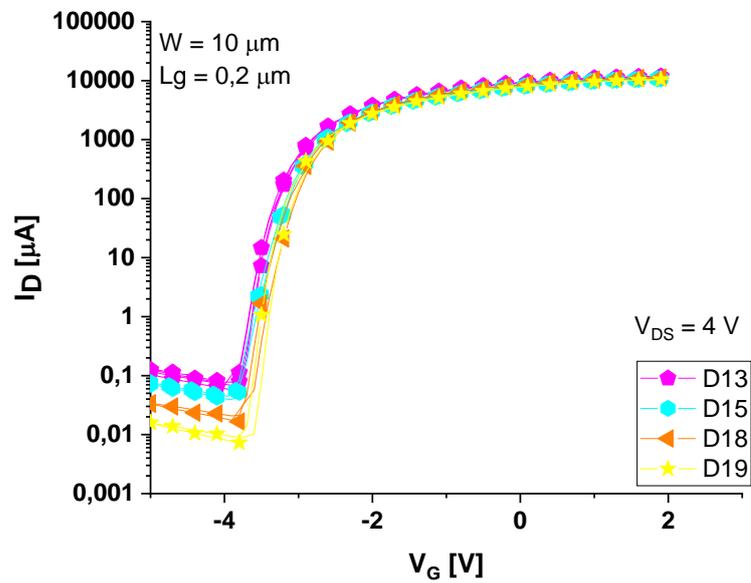
Já as Figuras 45 a 52 mostram os valores da Corrente de Dreno em função da Tensão de Porta dos HEMTs operando na região de Saturação para  $W = 10$  micrômetros.

Figura 45  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



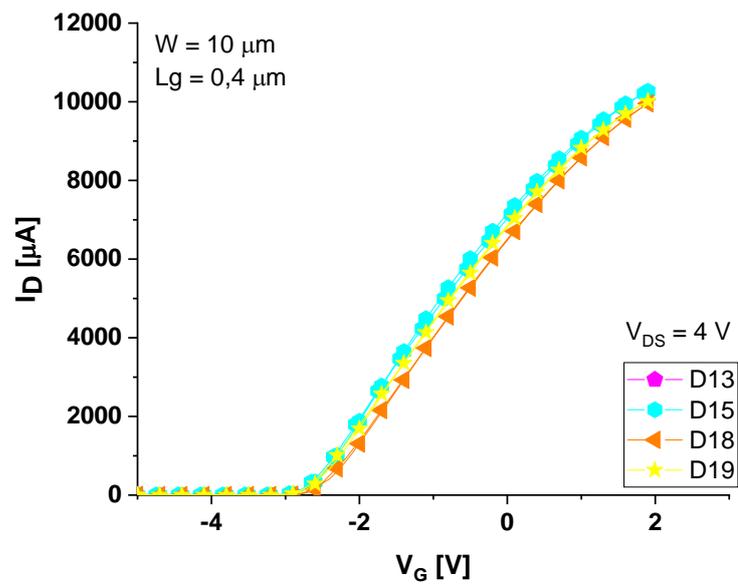
Fonte: Autoria Própria.

Figura 46  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL2 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



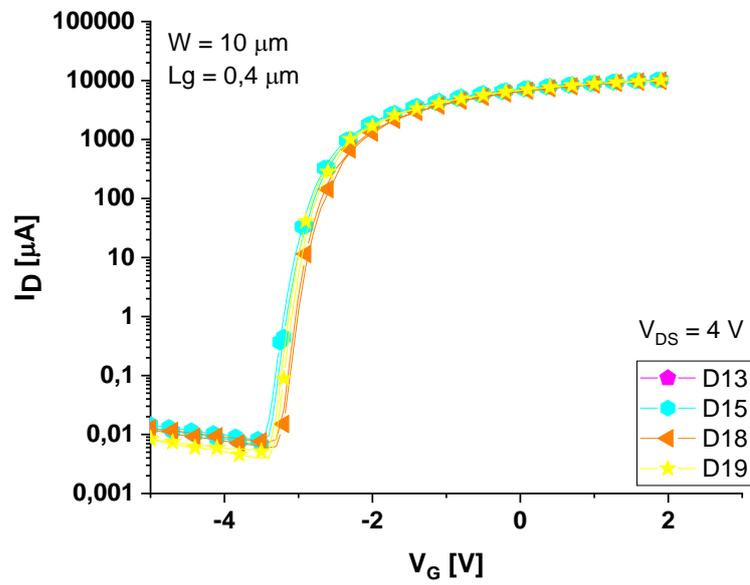
Fonte: Autoria Própria.

Figura 47  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



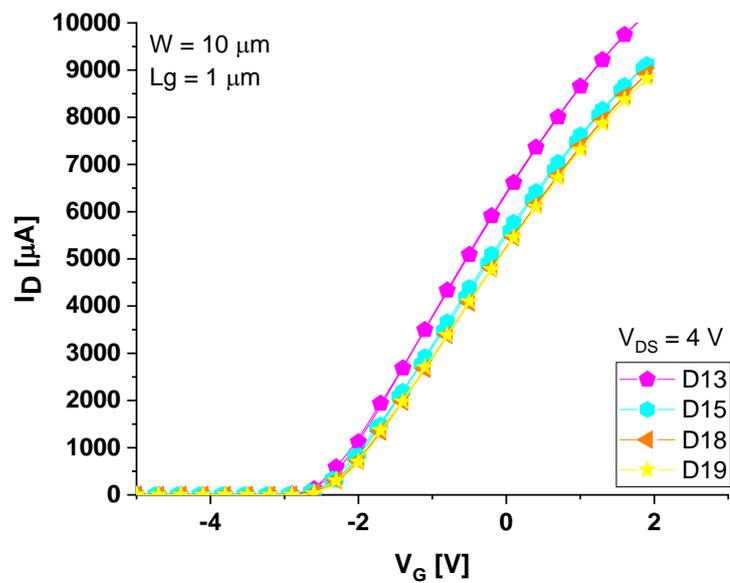
Fonte: Autoria Própria.

Figura 48  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL5 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



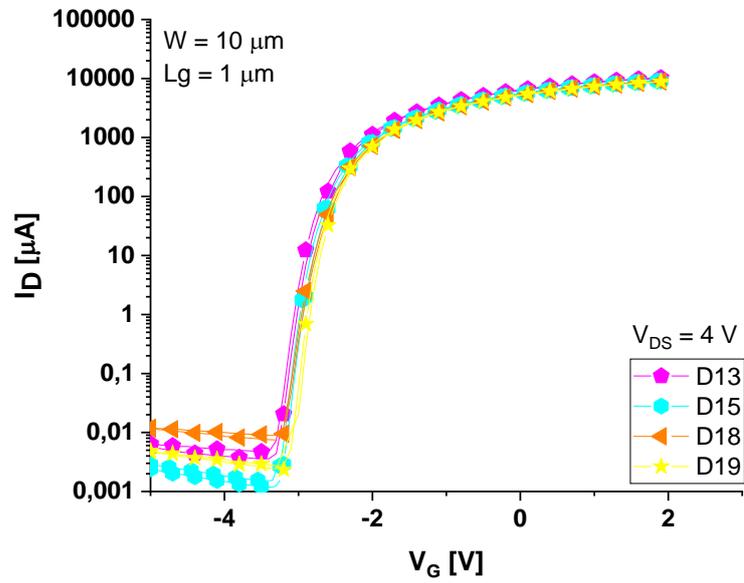
Fonte: Autoria Própria.

Figura 49  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL8 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



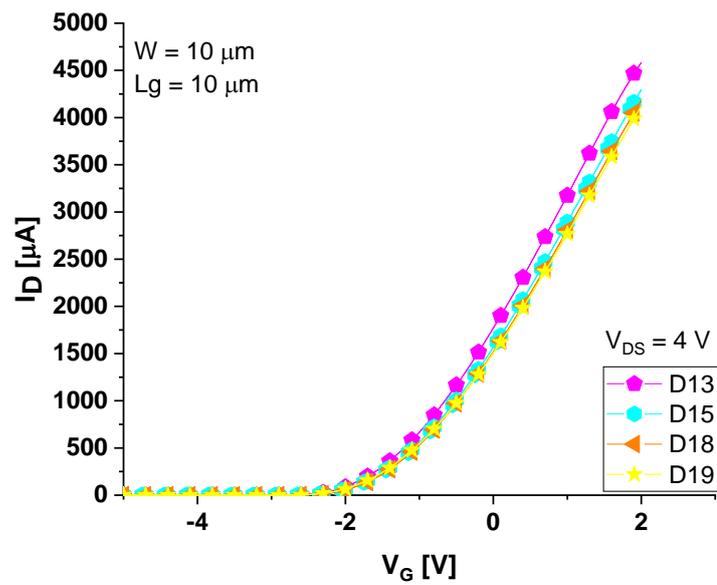
Fonte: Autoria Própria.

Figura 50  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL8 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



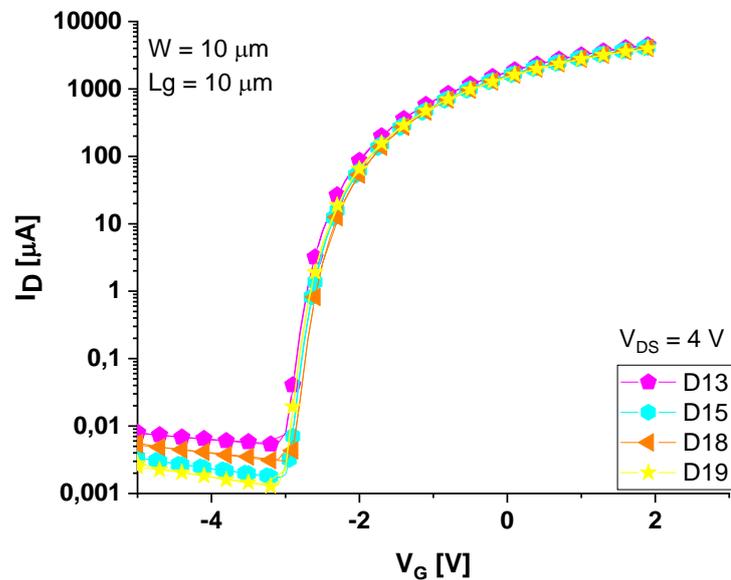
Fonte: Autoria Própria.

Figura 51  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo R11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 52  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo R11 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

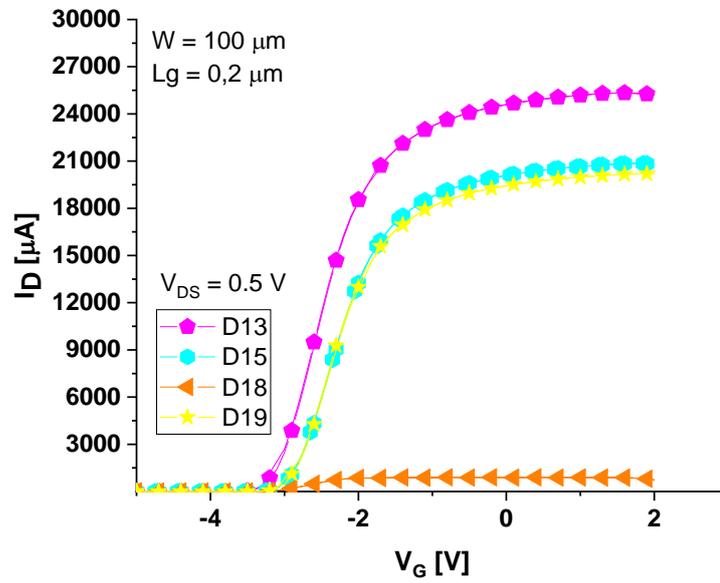
Assim como o observado para  $W = 1$  micrômetro, operando na Saturação, os HEMT mostram curvaturas de  $I_D$  por  $V_G$  exponenciais e não mais lineares. Os valores máximos obtidos para  $I_D$  foram da casa de 10.000 micro Ampères.

Operando na Saturação, não foram observadas grandes alterações de valores obtidos entre as diferentes lâminas, fazendo com que seja possível escolher qualquer uma delas para aplicação em um projeto que necessite desses parâmetros.

Não foi possível analisar a variação de  $I_D$  de acordo com  $V_G$  para RL5 ( $W = 10$  micrômetros e  $L = 0,4$  micrômetros) para a lâmina D13, sendo este um ponto de melhora para trabalhos futuros.

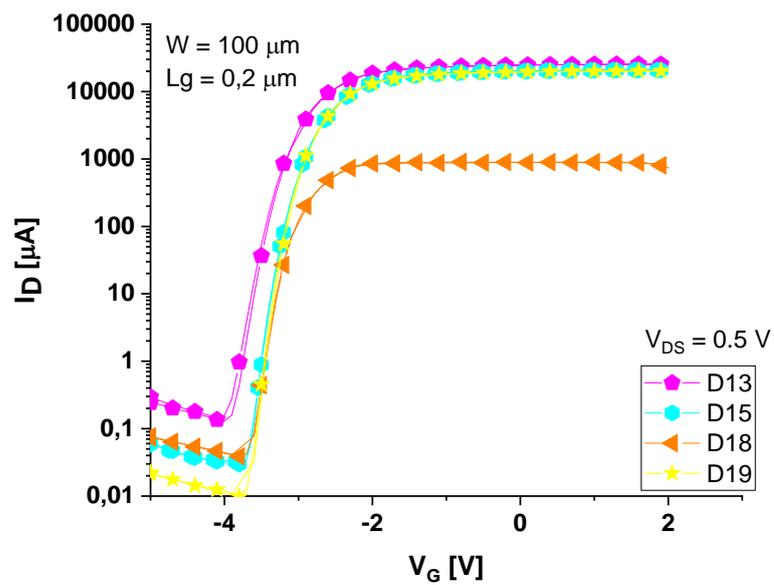
As Figuras 53 a 60 mostram os valores da Corrente de Dreno em Função da Tensão de Porta com o valor máximo de  $W$  utilizado, em 100 micrômetros, com o HEMT operando na região Linear.

Figura 53  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



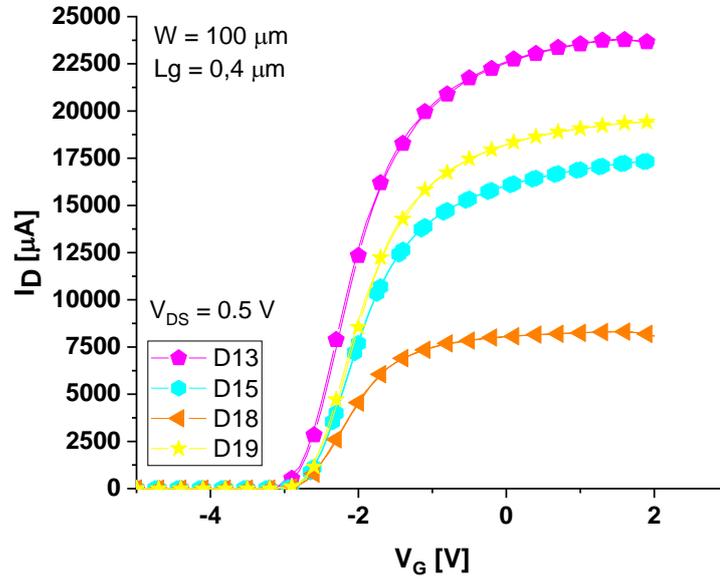
Fonte: Autoria Própria.

Figura 54  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



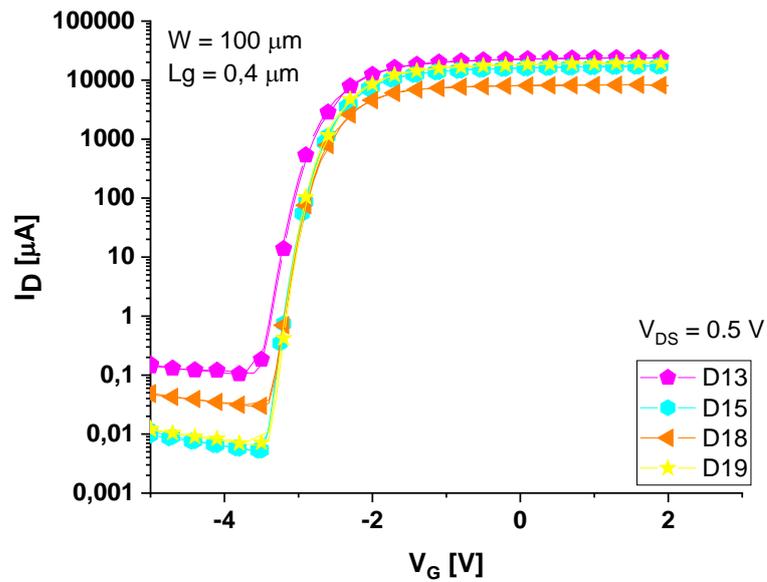
Fonte: Autoria Própria.

Figura 55  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



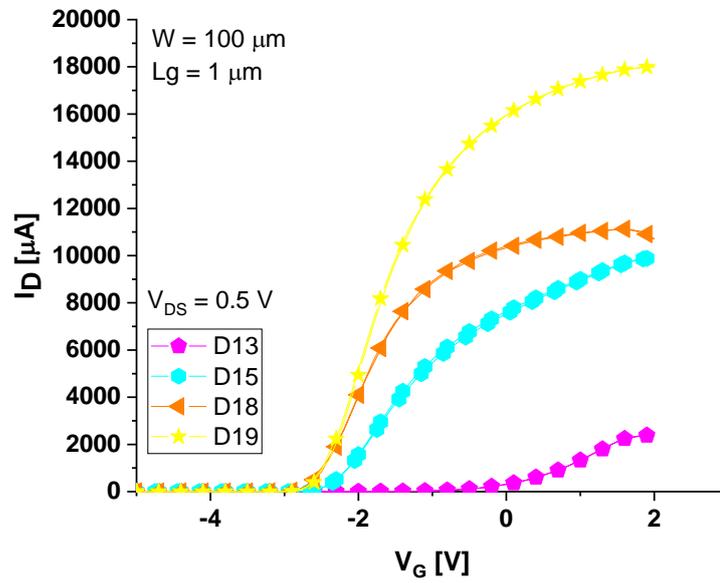
Fonte: Autoria Própria.

Figura 56  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



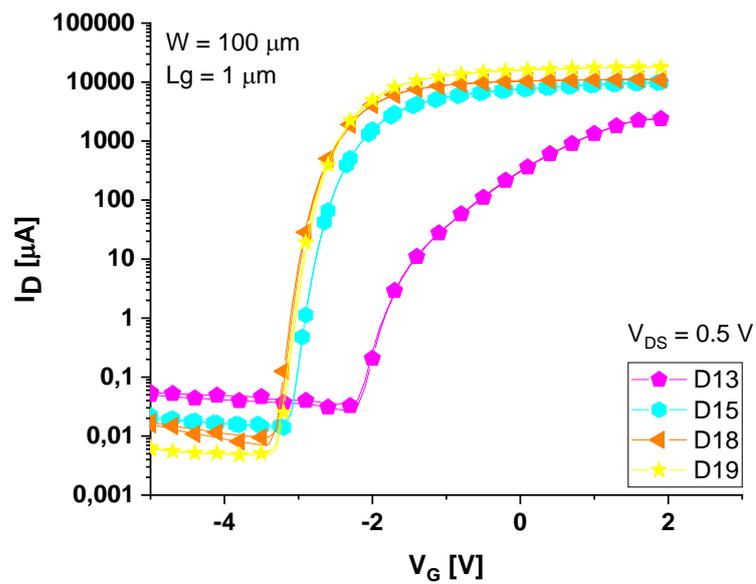
Fonte: Autoria Própria.

Figura 57  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



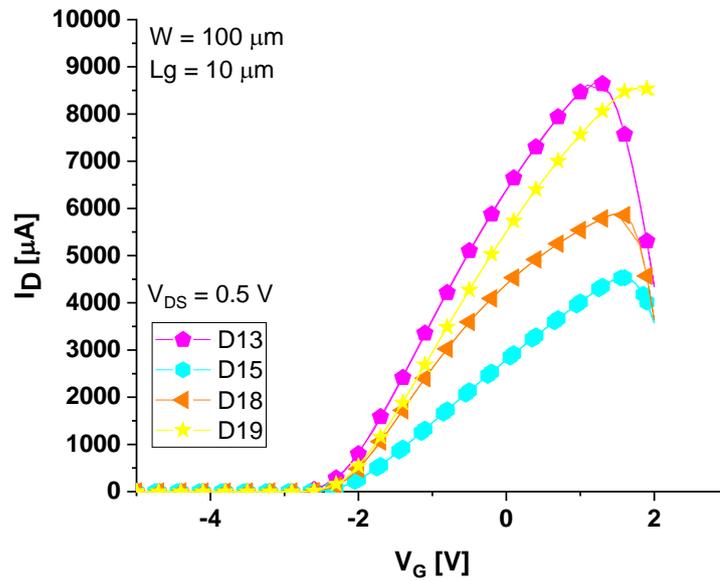
Fonte: Autoria Própria.

Figura 58  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



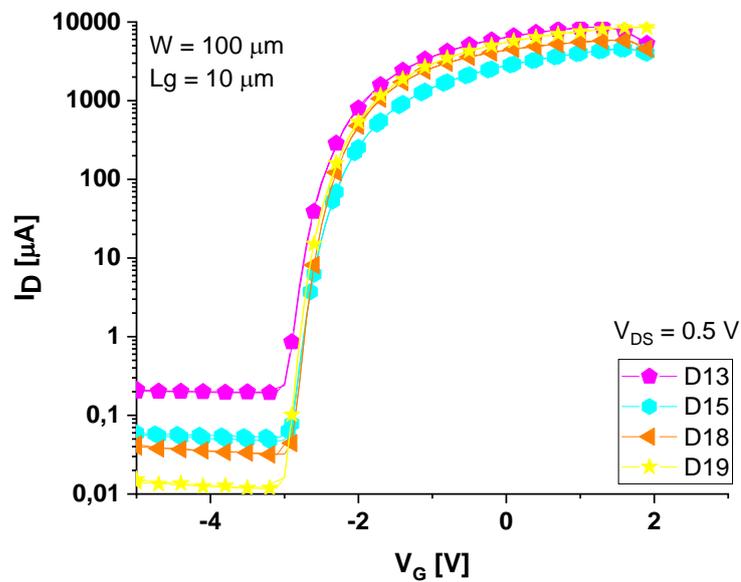
Fonte: Autoria Própria.

Figura 59  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 60  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

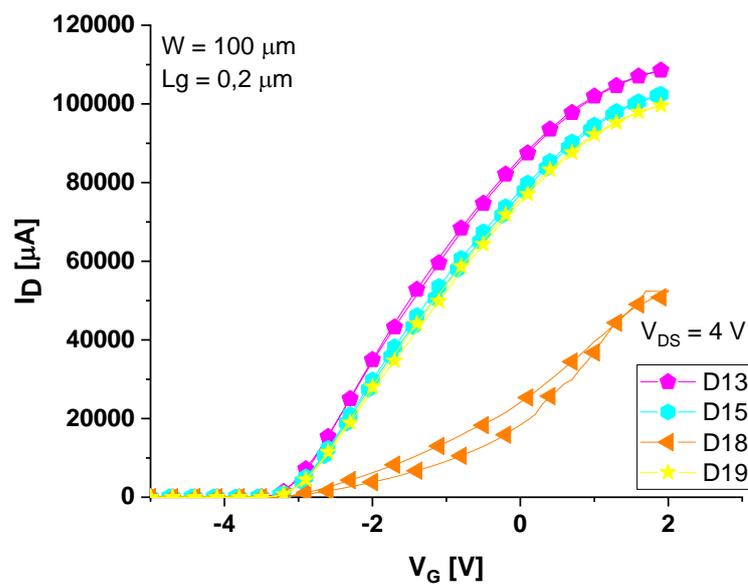
Com a Largura do Canal em seu maior valor estudado (100 micrômetros) é possível notar um impacto nas curvas de  $I_D$  por  $V_G$  dos HEMTs, independentemente

do Comprimento de Canal analisado. D18 foi a lâmina que mais teve impacto em  $I_D$  para este valor de  $W$  utilizado.

Os valores com essa configuração são os mais altos observados nos HEMT, chegando à casa dos 25.000 micro Ampères, porém, com grandes variações entre as lâminas. A lâmina D13 apresentou os maiores valores, mas não foi a melhor para todas as configurações, com  $L$  igual a 1 micrômetro, D19 obteve melhor performance.

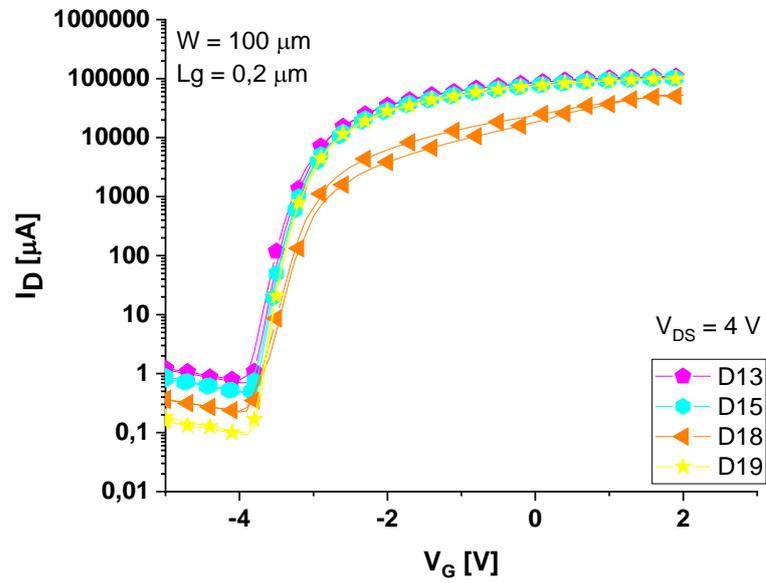
Por fim, as Figuras 61 a 68 mostram os valores da Corrente de Dreno em Função da Tensão de Porta do HEMT operando na região de Saturação.

Figura 61  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



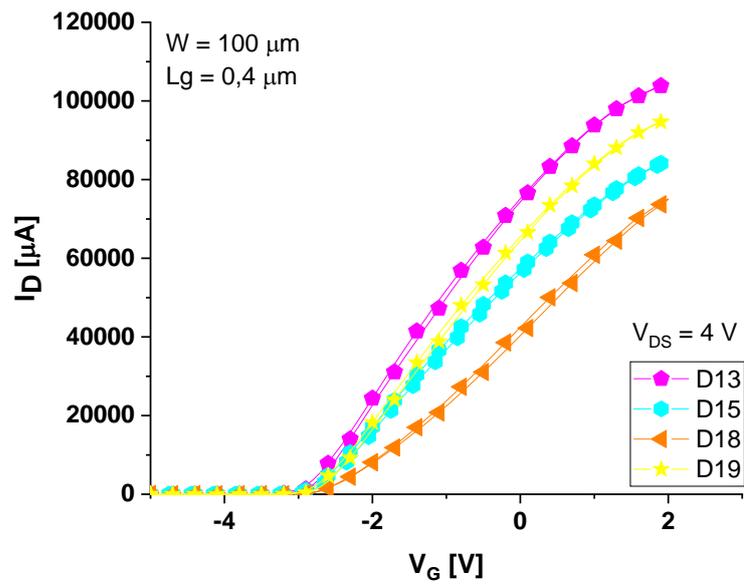
Fonte: Autoria Própria.

Figura 62  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL3 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



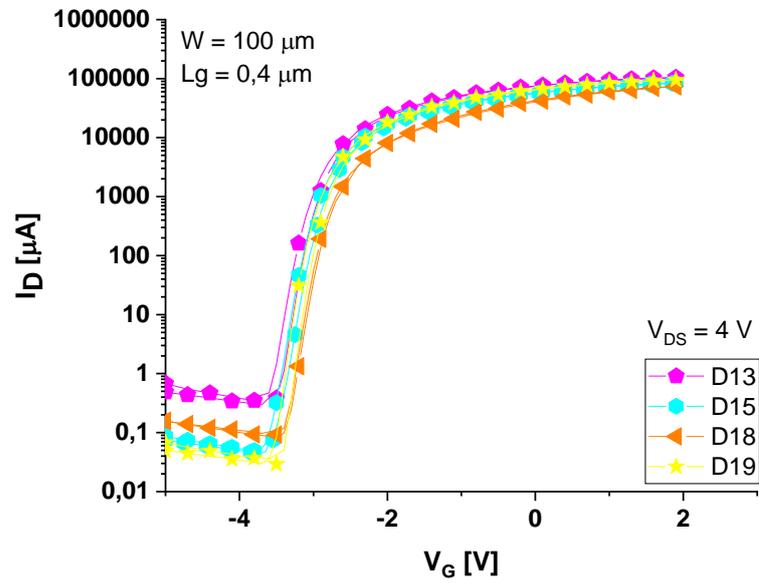
Fonte: Autoria Própria.

Figura 63  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



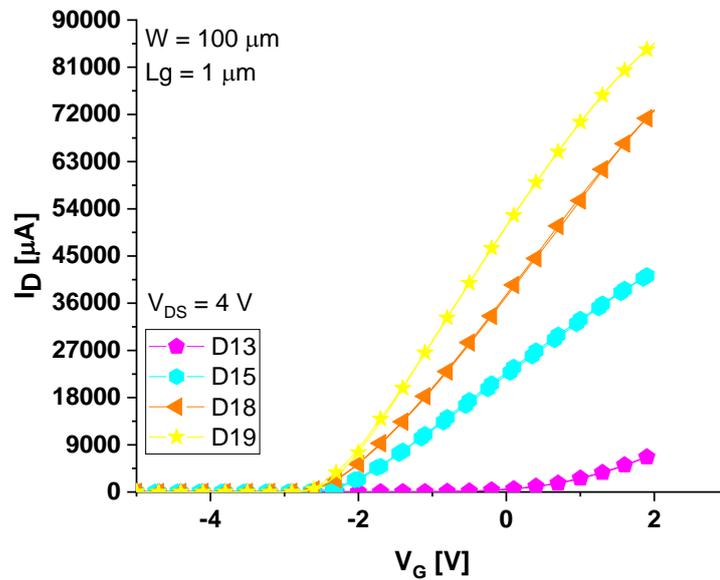
Fonte: Autoria Própria.

Figura 64  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL6 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



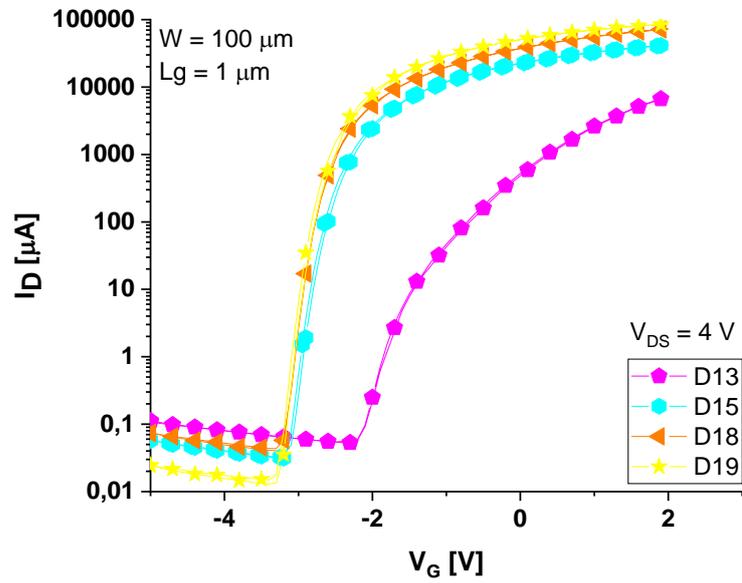
Fonte: Autoria Própria.

Figura 65  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 4$  V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



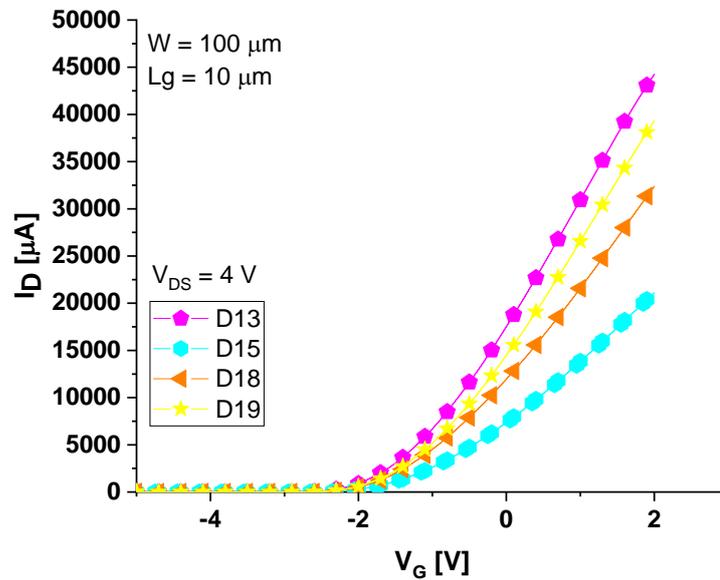
Fonte: Autoria Própria.

Figura 66  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL9 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



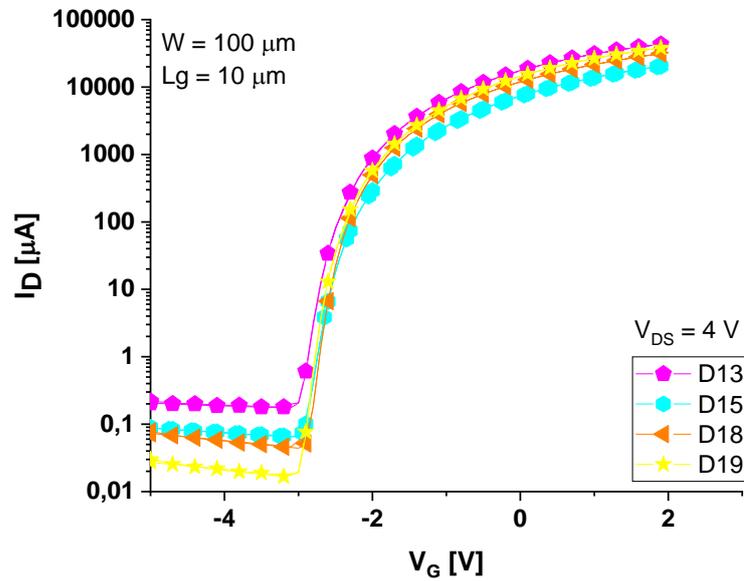
Fonte: Autoria Própria.

Figura 67  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 68  $I_D$  por  $V_G$  com  $V_{DS} = 0,5$  V do dispositivo RL12 para diferentes lâminas D13, D15, D18 e D19 em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

Aqui são observados os maiores valores de Corrente de Dreno obtidos para os HEMT comparando com as demais configurações analisadas, chegando à casa dos 110.000 micro Ampères. Porém, as variações entre as curvaturas de  $I_D$  por  $V_G$  das lâminas são grandes.

A variável que apresentou maior diferença na alteração dos valores de Corrente de Dreno obtidos foi a Largura do Canal.

Os HEMTs com  $W$  igual a 10 micrômetros operando na região Linear possuíam valores de  $I_D$  cerca de 3 vezes maiores do que os HEMTs com  $W = 1$  micrômetro operando na região de Saturação. Isso indica que, caso o desejo seja por suportar maiores valores de Corrente de Dreno, uma opção pode ser aumentar a Largura do Canal  $W$ , ao invés de alterar a região de Operação do Transistor.

Os HEMT também mostram uma perda de eficiência em amplificar os valores de  $I_D$  de acordo com alterações de  $V_G$  para  $L$  igual 10 micrômetros com  $W$  igual a 1 ou 10 micrômetros. Com  $W$  igual a 100 micrômetros, tal efeito já pôde ser observado também com  $L$  igual a 1 micrômetro.

#### 5.4 Obtenção da Tensão de Limiar ( $V_T$ ) e Transcondutância ( $g_m$ )

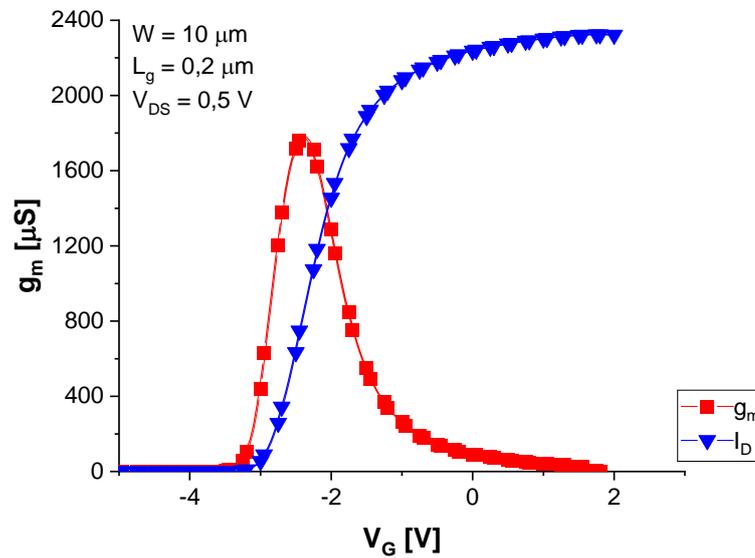
Os dispositivos HEMT possuem Tensão de Limiar negativa. Neste trabalho, o método utilizado para a obtenção de tais valores foi o proposto por ORTIZ-CONDE[22]. Tal método se baseia em encontrar a interceptação do eixo da Tensão de Porta ( $V_G$ ) pela extrapolação linear da curva  $I_D \times V_G$  no ponto de máxima derivada que impacta na máxima transcondutância ( $g_{m\_max}$ ). Pode-se então definir a Tensão de Limiar como o definido pela Equação 4.1.

$$V_T = V_{G(gm\_max)} - \frac{I_{D(gm\_max)}}{g_{m\_max}} - \frac{V_D}{2} \quad (4.1)$$

Onde  $V_{G(gm\_max)}$  é a Tensão de Porta para o ponto de máxima transcondutância,  $I_{D(gm\_max)}$  é a Corrente de Dreno para o ponto de máxima transcondutância e  $V_D$  é a Tensão de Dreno aplicada.

Para aplicá-lo, primeiro derivou-se a curva  $I_D$  por  $V_G$  em função de  $V_G$  para obter-se a curva da Transcondutância ( $g_m$ ) pela Tensão de Porta ( $V_G$ ), conforme a Figura 69. Em seguida, obtiveram-se os valores para Tensão de Porta e Corrente de Dreno correspondentes no ponto de máxima transcondutância. Por fim, calculou-se a Tensão de Limiar para os valores de  $V_{DS}$  estudados neste trabalho que foram 0,5 V e 4 V.

Figura 69 Curva da Transcondutância ( $g_m$ ) e Corrente de Dreno ( $I_D$ ) pela Tensão de Porta ( $V_G$ ).



Fonte: Autoria Própria.

### 5.5 Obtenção da Resistência Total ( $R_{total}$ ) e Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ )

Com os valores de Tensão de Limiar obtidos, pôde-se utilizar dos métodos propostos no capítulo 4 para determinar os valores da Resistência Total e, posteriormente utilizando-se da Regressão Linear, os valores da Resistência Série Fonte-Dreno.

Seus valores são mostrados nas Tabelas 6 e 7 onde temos os valores para o HEMT nas Regiões Linear e Saturação considerando as Tensões Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) igual a 0,5 V e 4 V respectivamente.

Tabela 6 Valores da Tensão de Limiar ( $V_T$ ), Resistência Total e Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para os doze dispositivos RL das quatro lâminas na Região Linear com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 0,5 V agrupados pela Largura do Canal ( $W$ ).

Lâmina	W [ $\mu\text{m}$ ]	RL	L [ $\mu\text{m}$ ]	$V_T$ [V]	Rtotal [ $\Omega$ ]	RSD [ $\Omega$ ]
D13	1	1	0,2	-3,11	1,19E+04	1,12E+04
		4	0,4	-2,89	1,41E+04	
		7	1	-2,74	1,81E+04	
		10	10	-2,38	7,67E+04	
	10	2	0,2	-3,24	8,57E+02	9,55E+02
		5	0,4	-	-	
		8	1	-2,77	1,54E+03	
		11	10	-2,44	4,89E+03	
	100	3	0,2	-3,33	8,69E+01	3,05E+02
		6	0,4	-3,01	1,19E+02	
		9	1	-0,81	7,76E+02	
		12	10	-2,45	4,85E+02	
D15	1	1	0,2	-3,14	1,51E+04	1,65E+04
		4	0,4	-2,61	1,99E+04	
		7	1	-2,70	2,90E+04	
		10	10	-2,27	1,05E+05	
	10	2	0,2	-3,10	1,07E+03	1,16E+03
		5	0,4	-2,87	1,35E+03	
		8	1	-2,68	1,74E+03	
		11	10	-2,32	5,31E+03	
	100	3	0,2	-3,07	1,30E+02	1,11E+02
		6	0,4	-2,87	1,74E+02	
		9	1	-2,68	2,74E+02	
		12	10	-0,24	1,64E+03	
D18	1	1	0,2	-2,87	1,78E+04	1,91E+04
		4	0,4	-2,69	2,02E+04	
		7	1	-2,55	3,12E+04	
		10	10	-2,23	9,13E+04	

D19	10	2	0,2	-3,05	8,09E+02	1,08E+03
		5	0,4	-2,78	1,35E+03	
		8	1	-2,67	1,80E+03	
		11	10	-2,32	5,42E+03	
	100	3	0,2	-3,32	1,76E+03	7,79E+02
		6	0,4	-2,92	2,67E+02	
		9	1	-2,80	2,57E+02	
		12	10	-2,41	7,94E+02	
	1	1	0,2	-3,13	1,93E+04	1,93E+04
		4	0,4	-2,90	2,44E+04	
		7	1	-2,63	2,94E+04	
		10	10	-2,27	1,13E+05	
10	2	0,2	-3,12	1,09E+03	1,13E+03	
	5	0,4	-2,90	1,30E+03		
	8	1	-2,68	1,84E+03		
	11	10	-2,37	6,37E+03		
100	3	0,2	-3,11	1,17E+02	1,28E+02	
	6	0,4	-2,86	1,62E+02		
	9	1	-2,72	1,72E+02		
	12	10	-2,34	5,41E+02		

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7 Valores da Tensão de Limiar ( $V_T$ ), Resistência Total e Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para os doze dispositivos RL das quatro lâminas na Região de Saturação com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 4 V agrupados pela Largura do Canal ( $W$ ).

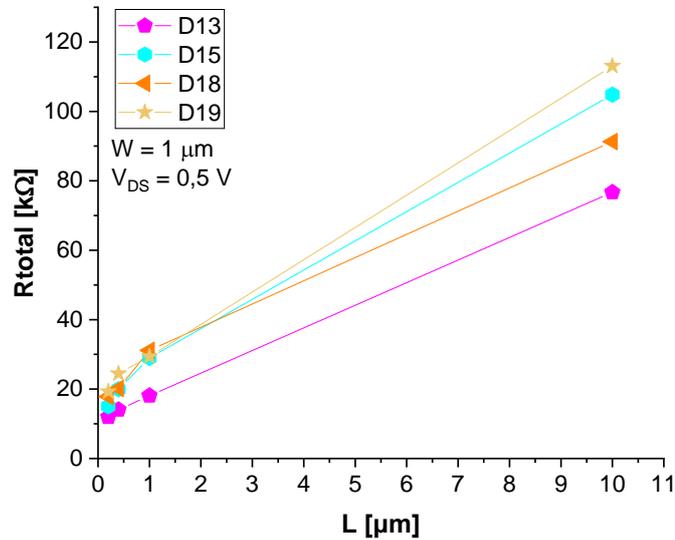
Lâmina	W [ $\mu\text{m}$ ]	RL	L [ $\mu\text{m}$ ]	$V_T$ [V]	Rtotal [ $\Omega$ ]	RSD [ $\Omega$ ]
D13	1	1	0,2	-4,93	9,54E+08	8,44E+09
		4	0,4	-4,69	2,78E+09	
		7	1	-4,20	2,14E+10	
		10	10	-2,99	1,12E+07	
	10	2	0,2	-5,06	4,02E+07	5,45E+08
		5	0,4	-	-	
		8	1	-4,37	1,03E+09	
		11	10	-3,13	1,25E+06	
	100	3	0,2	-5,06	4,21E+06	4,79E+06
		6	0,4	-4,84	9,05E+06	
		9	1	-1,29	4,95E+04	
		12	10	-1,94	4,14E+04	
D15	1	1	0,2	-4,94	2,81E+09	5,15E+10
		4	0,4	-4,30	1,19E+10	
		7	1	-4,19	1,39E+11	
		10	10	-2,78	5,71E+06	
	10	2	0,2	-4,94	7,73E+07	1,18E+09
		5	0,4	-4,62	4,63E+08	
		8	1	-4,28	2,98E+09	
		11	10	-3,02	1,06E+06	
	100	3	0,2	-4,99	4,92E+06	4,80E+07
		6	0,4	-4,68	2,24E+07	
		9	1	-4,11	1,15E+08	
		12	10	-2,83	5,41E+04	
D18	1	1	0,2	-4,71	5,11E+09	3,42E+10
		4	0,4	-4,32	2,47E+10	
		7	1	-4,00	7,08E+10	
		10	10	-2,99	6,68E+07	
	10	2	0,2	-4,86	1,58E+08	6,15E+08

		5	0,4	-4,47	5,18E+08	
		8	1	-4,20	1,12E+09	
		11	10	-2,97	2,12E+06	
	100	3	0,2	-2,39	9,32E+02	4,88E+07
		6	0,4	-4,19	4,47E+07	
		9	1	-3,77	9,90E+07	
		12	10	-2,84	6,71E+05	
D19	1	1	0,2	-4,86	2,34E+10	8,32E+10
		4	0,4	-4,56	7,04E+10	
		7	1	-4,10	1,49E+11	
		10	10	-2,75	3,73E+06	
	10	2	0,2	-4,92	3,80E+08	8,80E+08
		5	0,4	-4,60	7,50E+08	
		8	1	-4,24	1,43E+09	
		11	10	-3,01	8,36E+05	
	100	3	0,2	-5,00	2,98E+07	1,33E+08
		6	0,4	-4,71	8,93E+07	
		9	1	-4,28	2,72E+08	
		12	10	-3,04	1,13E+05	

Fonte: Autoria Própria.

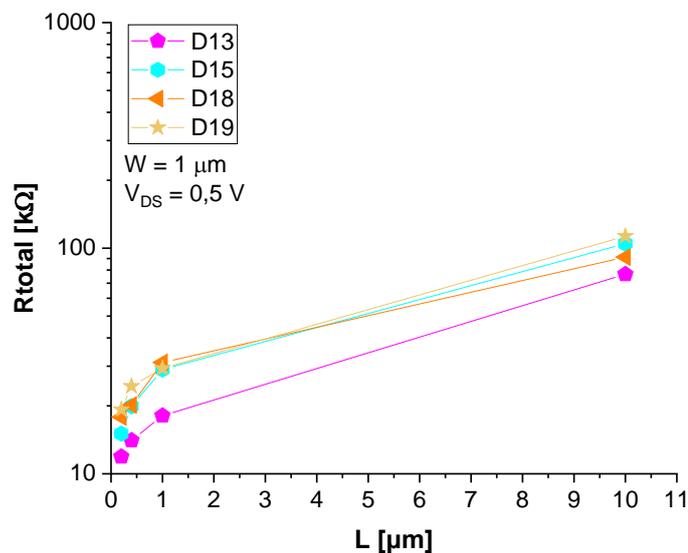
As Figuras 70 a 75 mostram a Resistência Total ( $k\Omega$ ) em função do Comprimento do canal (em micrômetros) nas escalas Linear e Logarítmica para o transistor HEMT na região de operação Linear, com  $V_{DS}$  igual a 0,5 V.

Figura 70 Resistência Total ( $R_{total}$  em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 1$  micrometro e  $V_{DS} = 0,5$  Volt para todas as lâminas em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 71 Resistência Total ( $R_{total}$  em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 1$  micrometro e  $V_{DS} = 0,5$  Volt para todas as lâminas em escala logarítmica.

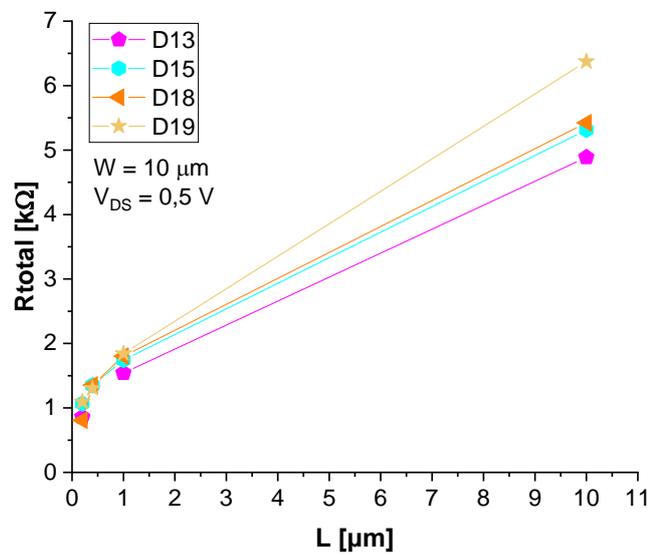


Fonte: Autoria Própria.

Analisando primeiro os transistores HEMT com Largura de Canal ( $W$ ) igual a 1 micrômetro pode-se observar que as quatro lâminas possuíam curvaturas que

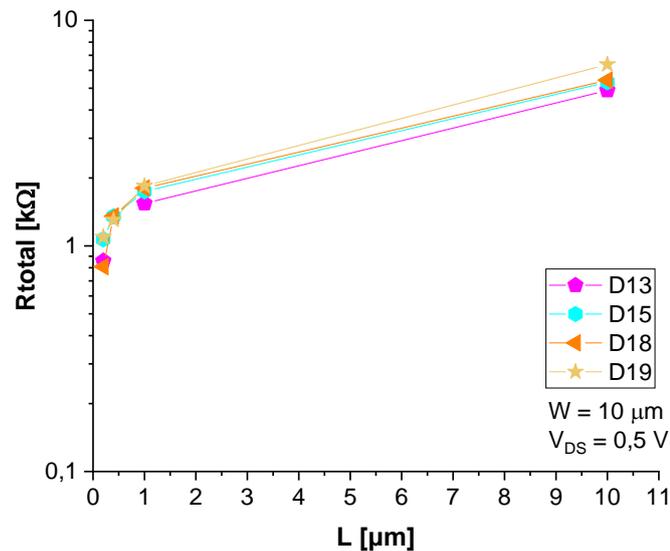
mostraram variações consideráveis entre si. Esse efeito pode ser justificado pelas diferentes dopagens que existiam em cada uma das lâminas, conforme Tabela 1. Os valores obtidos para a Resistência Total tiveram sua máxima em D19 e sua mínima em D13, variando de 11,9 k $\Omega$  a 19,3 k $\Omega$ , respectivamente, considerando o valor mais próximo do Comprimento (L) igual a zero, que era de 0,2 micrômetros.

Figura 72 Resistência Total ( $R_{total}$  em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 10$  micrometro e  $V_{DS} = 0,5$  Volt para todas as lâminas em escala linear



Fonte: Autoria Própria.

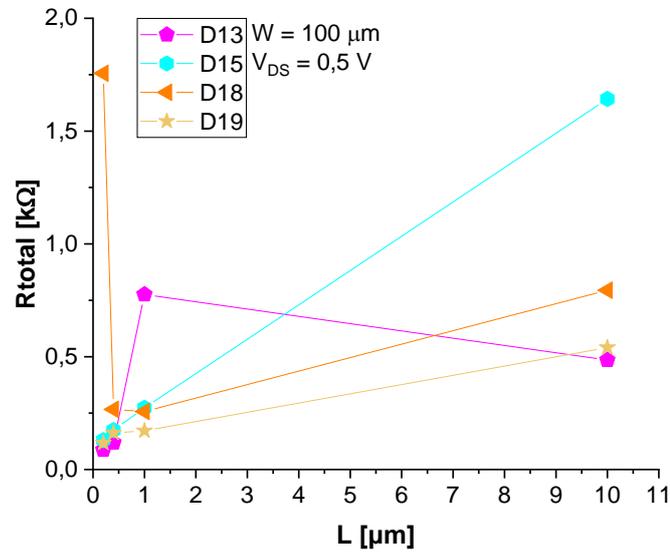
Figura 73 Resistência Total ( $R_{total}$  em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 10$  micrometro e  $V_{DS} = 0,5$  Volt para todas as lâminas em escala logarítmica



Fonte: Autoria Própria.

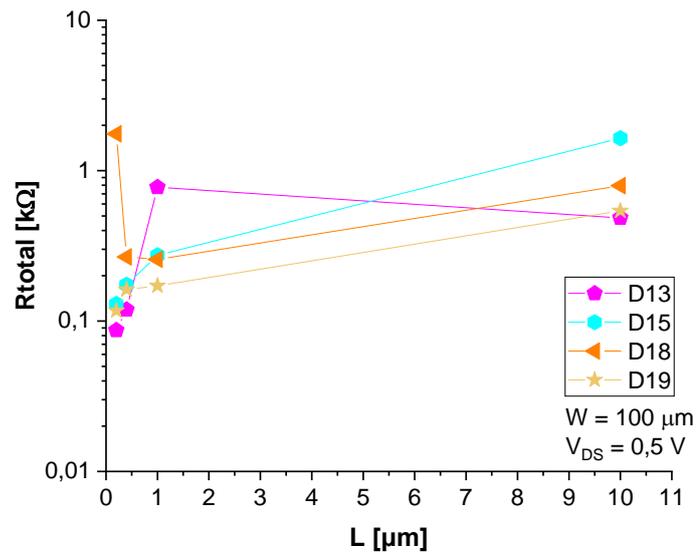
Para  $W$  igual 10 micrômetros, pode-se observar que a diferença das curvaturas dos resultados obtidos é menor do que quando comparada a  $W$  igual a 1 micrômetro. Com essa configuração, observou-se que as lâminas D15 e D18 possuíam uma diferença pequena nos valores obtidos. Além disso, a aproximação para D13 possuía um valor a menos (o de RL5) o que pode ter influenciado também no resultado obtido. Os valores obtidos para a Resistência Total também mostraram-se menores do que os valores utilizando um  $W$  menor. Novamente, D19 foi a lâmina onde obteve-se o maior valor para a Resistência Total com o Comprimento de Canal ( $L$ ) igual a 0,2 micrômetros e D13 foi a lâmina com menor valor sendo, respectivamente, 1,09 kΩ e 0,857 kΩ.

Figura 74 Resistência Total ( $R_{total}$  em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 100$  micrometro e  $V_{DS} = 0,5$  Volt para todas as lâminas em escala linear



Fonte: Autoria Própria.

Figura 75 Resistência Total ( $R_{total}$  em quilo Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 100$  micrometro e  $V_{DS} = 0,5$  Volt para todas as lâminas em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, para a Largura do Canal ( $W$ ) em 100 micrômetros notou-se um comportamento diferente em D13 D18, já que os valores da Resistência Total não ficaram menores conforme o Comprimento do Canal ( $L$ ) diminuía-se (que vai contra o que foi proposto pela Equação 4.7). Além disso, como pode-se observar nas Figuras 74 e 75, as curvas tiveram valores que destoavam consideravelmente entre si. Não foi encontrada uma possível razão para que isso acontecesse, porém, como é sabido, os transistores HEMT podem possuir comportamentos diferentes quando utiliza-se de uma Largura de Canal grande (como 100 micrômetros).

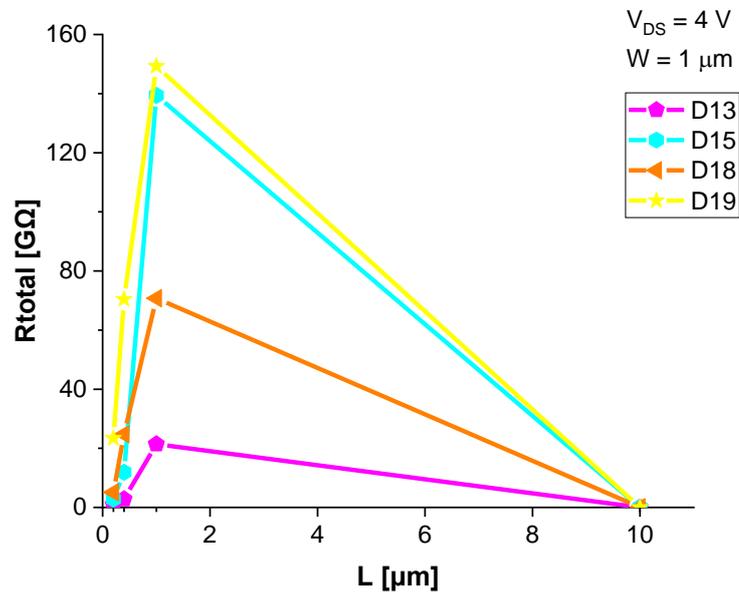
Considerando o HEMT na Região de Saturação o comportamento diverge, de certa maneira, do que é observado para o HEMT na região Linear, pois, independentemente da Largura do Canal ( $W$ ), não é possível observar a relação de que, quanto menor o Comprimento do Canal ( $L$ ), menor a Resistência Total e, conseqüentemente, menor a Resistência Série ( $R_{SD}$ ).

Tal comportamento só pode ser observado a partir de  $L = 1$  micrômetro e não em todas as medidas (a partir de  $L = 10$  micrômetros) como acontecia com o HEMT na região Linear.

Não foi possível identificar algo que pudesse fazer com que este comportamento fosse observado sendo este um ponto de possível melhora descrito na seção “Recomendações para trabalhos futuros”.

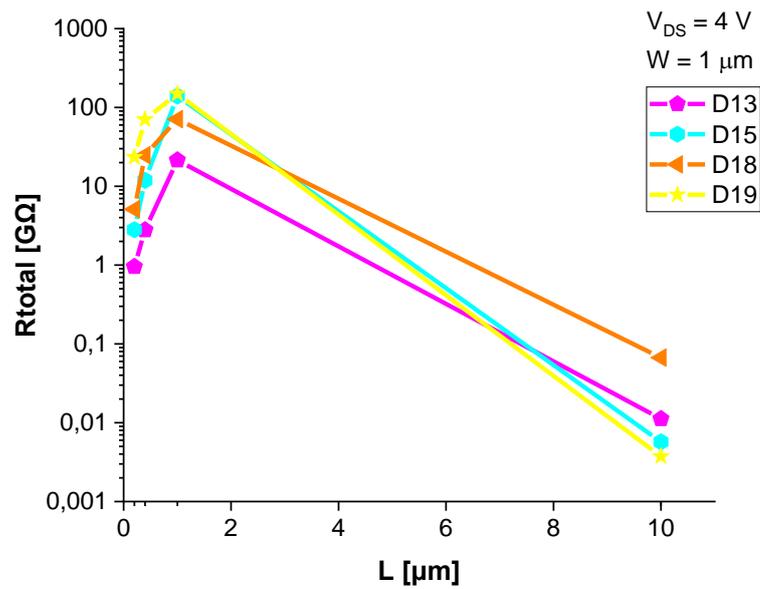
As Figuras 76 a 79 trazem a Resistência Total do HEMT na região de Saturação em função do Comprimento de Canal para as quatro lâminas estudadas com a Largura do Canal ( $W$ ) igual a um micrômetro, nas escalas linear e logarítmica, respectivamente.

Figura 76 Resistência Total ( $R_{total}$  em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 1$  micrometro e  $V_{DS} = 4$  Volts para todas as lâminas em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 77 Resistência Total ( $R_{total}$  em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 1$  micrometro e  $V_{DS} = 4$  Volts para todas as lâminas em escala logarítmica.

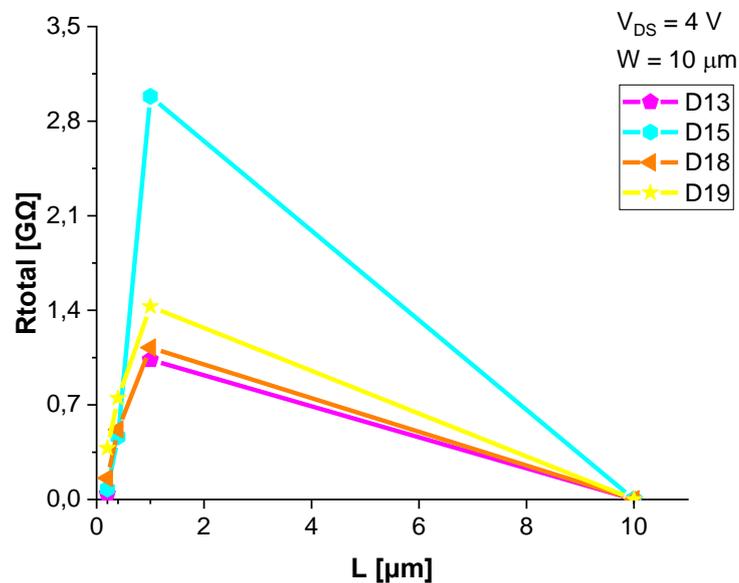


Fonte: Autoria Própria.

Para o HEMT na Saturação com  $W$  igual a 1 micrômetro, observou-se que os D19 e D15 possuíam valores próximos para as medições, sendo eles os maiores valores de Resistência Total, enquanto D13 possuía os menores valores.

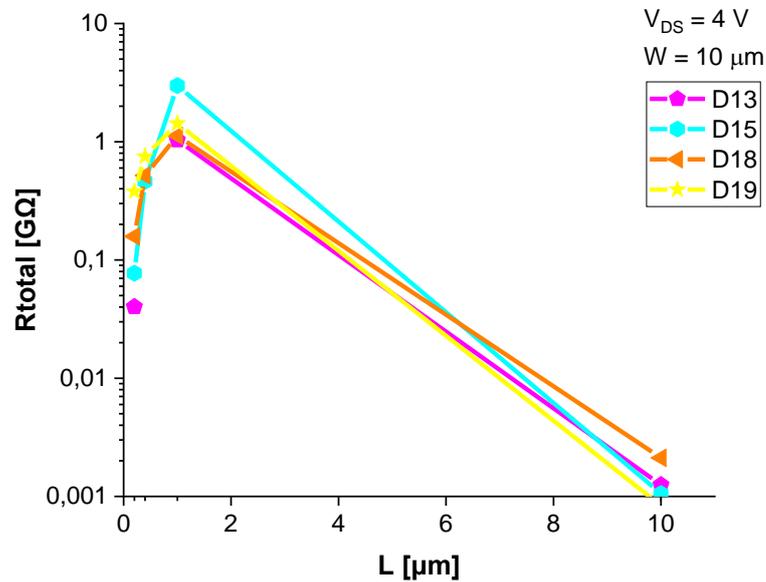
Considerando o HEMT na região de Saturação com a Largura de Canal ( $W$ ) em 10 micrômetros, as Figuras 78 e 79 trazem os valores para Resistência Total em função do Comprimento de Canal para o HEMT na região de Saturação (com  $V_{DS}$  igual a 4 Volts) para as quatro lâminas estudadas.

Figura 78 Resistência Total ( $R_{total}$  em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 10$  micrometro e  $V_{DS} = 4$  Volts para todas as lâminas em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 79 Resistência Total ( $R_{total}$  em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 10$  micrometro e  $V_{DS} = 4$  Volts para todas as lâminas em escala logarítmica.



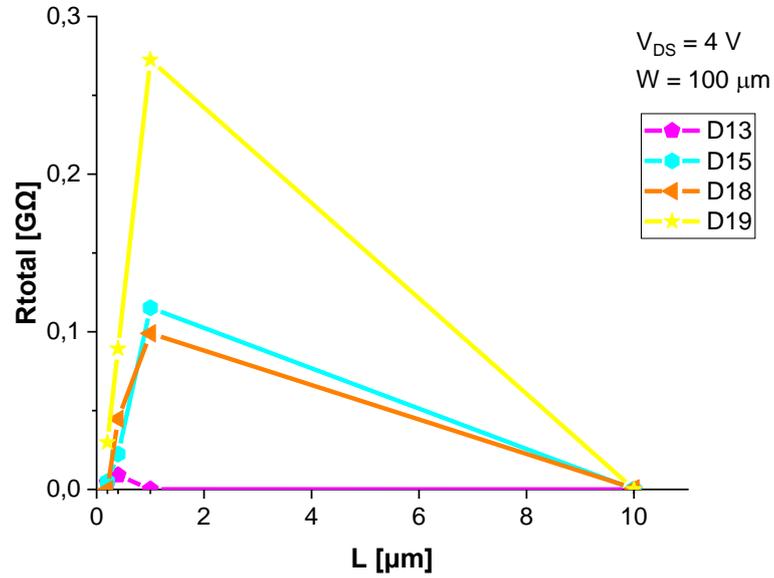
Fonte: Autoria Própria.

Em escala logarítmica, as curvas mostram-se praticamente iguais, tendo um leve desvio para  $L = 1$  micrômetro de D15.

Com esta configuração, D15 foi a única lâmina que apresentou diferença considerável em relação as demais, tendo os maiores valores de medição. Novamente, assim como ocorreu com  $W = 1$  micrômetro, D13 mostra-se a lâmina com menores valores de Resistência Total, sendo a mais recomendada a fim de evitar perdas internas com o HEMT operando desta forma.

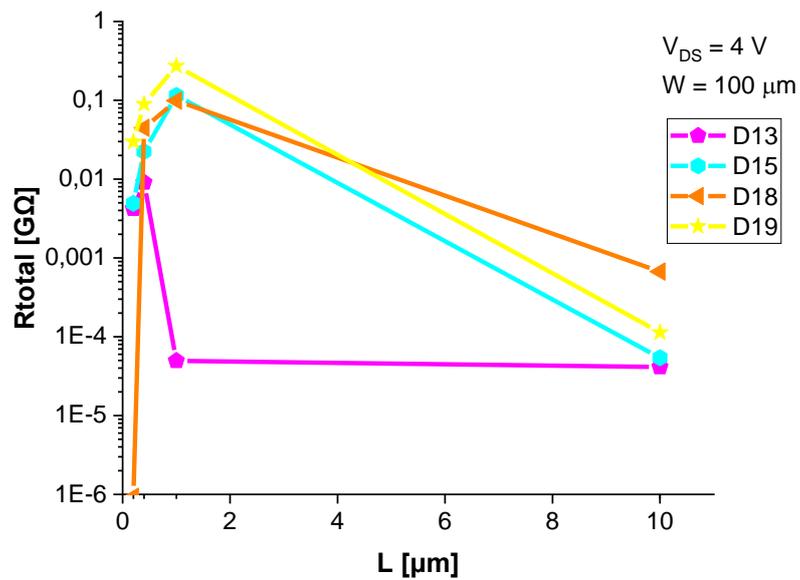
Por fim, as Figuras 80 e 81 trazem a Resistência Total em função do Comprimento de Canal para o HEMT na região de Saturação com o maior valor de Largura de Canal estudados (100 micrômetros), nas escalas Linear e Logarítmica, respectivamente.

Figura 80 Resistência Total ( $R_{total}$  em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 100$  micrometro e  $V_{DS} = 4$  Volts para todas as lâminas em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 81 Resistência Total ( $R_{total}$  em giga Ohms) pelo Comprimento do Canal (em micrômetros) para  $W = 100$  micrometro e  $V_{DS} = 4$  Volts para todas as lâminas em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

Com o HEMT operando com essa configuração de  $W$ ,  $L$  e  $V_{DS}$ , D19 foi a lâmina com os maiores valores de  $R_{total}$  medidos enquanto D13 segue sendo a lâmina com os menores valores e, conseqüentemente, menores perdas internas. Além disso, D13 é praticamente constante entre  $L = 1$  e  $L = 10$  micrômetros.

Como pode-se observar, os valores da Resistência Total com o HEMT na região de Saturação foram da casa de giga Ohms, enquanto na região Linear eram da casa de quilo Ohms.

Além disso, pode-se observar também que, quanto menor o valor de pico da Resistência Total, que mostrava-se presente na região de  $L = 1$  micrômetro, maior era a diferença com os demais valores medidos, mostrando um possível efeito que acontece com o Comprimento de Canal tendo valores nesta região. Ainda que tais valores fossem removidos, a curvatura não mostrava a mesma configuração do que para o HEMT na região Linear.

Utilizando a Regressão Linear descrita na seção 4.3, os valores da Resistência Série foram encontrados e alocados nas Tabelas 8 e 9, onde tem-se os valores considerando o HEMT na Região Linear (com  $V_{DS}$  igual a 0,5 V) e Região de Saturação (com  $V_{DS}$  igual a 4V), respectivamente.

*Tabela 8 Valores Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para diferentes Larguras do Canal ( $W$ ) das quatro lâminas estudadas na Região Linear com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 0,5 V.*

<b>W [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Lâmina</b>	<b>RSD [<math>\Omega</math>]</b>
1	D13	1,12E+04
1	D15	1,65E+04
1	D18	1,91E+04
1	D19	1,93E+04
10	D13	9,55E+02
10	D15	1,16E+03
10	D18	1,08E+03
10	D19	1,13E+03
100	D13	3,05E+02
100	D15	1,11E+02

100	D18	7,79E+02
100	D19	1,28E+02

Fonte: Autoria Própria.

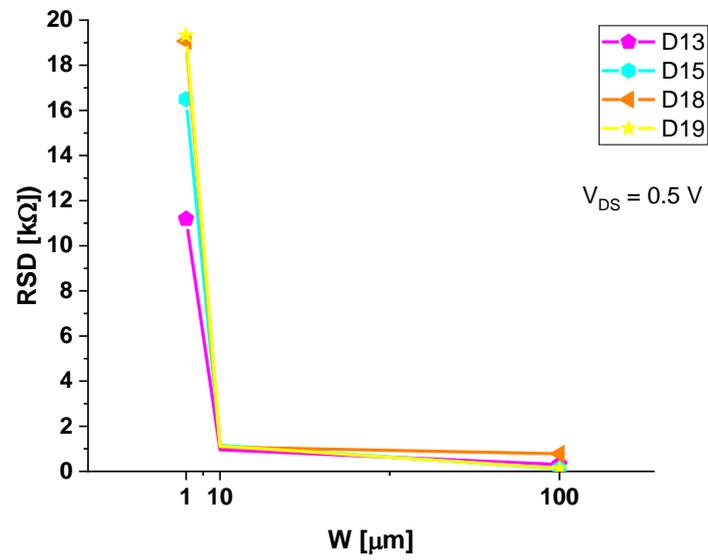
*Tabela 9 Valores Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) dos HEMT para diferentes Larguras do Canal ( $W$ ) das quatro lâminas estudadas na Região de Saturação com Tensão Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) em 4 V.*

<b>W [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Lâmina</b>	<b>RSD [<math>\Omega</math>]</b>
1	D13	8,44E+09
1	D15	5,15E+10
1	D18	3,42E+10
1	D19	8,32E+10
10	D13	5,45E+08
10	D15	1,18E+09
10	D18	6,15E+08
10	D19	8,80E+08
100	D13	4,79E+06
100	D15	4,80E+07
100	D18	4,88E+07
100	D19	1,33E+08

Fonte: Autoria Própria.

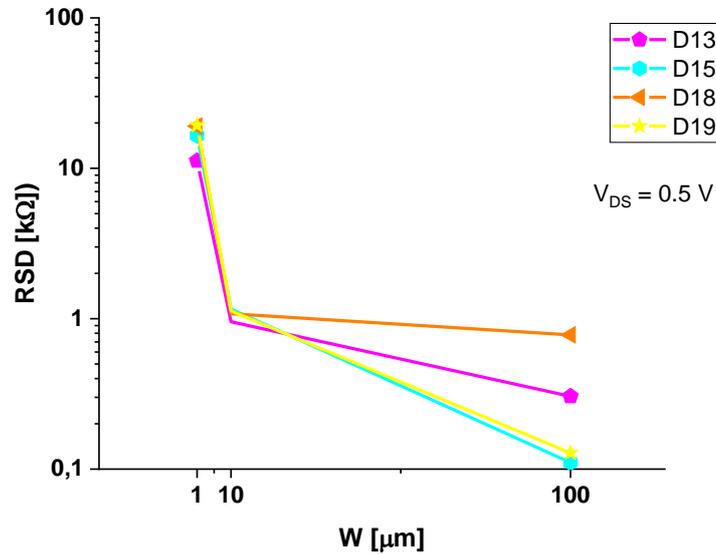
As Figuras 82 e 83 mostram os valores da Resistência Série em quilo Ohms para diferentes Larguras do Canal ( $W$ ) em micrômetros das quatro lâminas estudadas em escalas Linear e Logarítmica respectivamente para o HEMT na Região Linear (com  $V_{DS} = 0.5$  V).

Figura 82 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$  em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$  em micrômetros) com  $V_{DS} = 0.5$  Volt para as quatro lâminas estudadas em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 83 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$  em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$  em micrômetros) com  $V_{DS} = 0.5$  Volt para as quatro lâminas estudadas em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

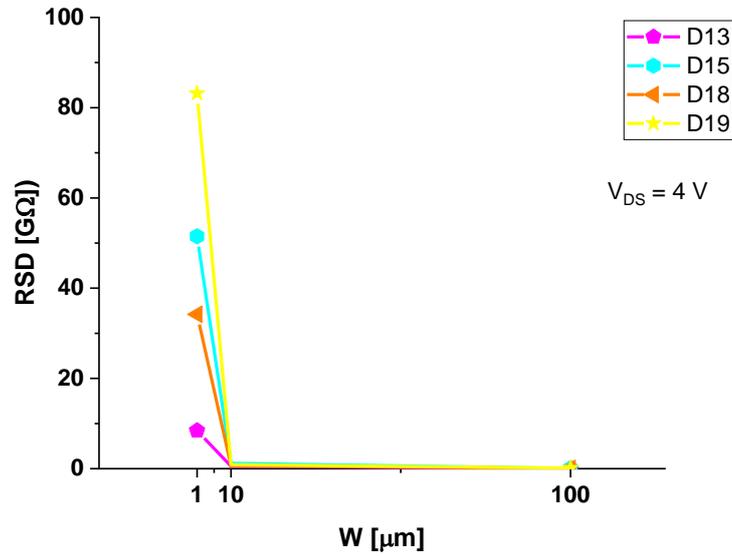
Como pode-se observar, as lâminas D18 e D19 tiveram valores máximos bem próximos (com  $W = 1 \mu\text{m}$ ), enquanto D13 apresentou valores menores. Sendo assim, para operação do transistor HEMT visando a menor perda energética possível, já que esta depende, dentro outras coisas, da Resistência Série Fonte-Dreno, com o Comprimento de Canal em 1 micrômetro, o ideal seria usar a lâmina D13, pois esta obteve os menores valores para  $R_{SD}$ . Porém, se a intenção e necessidade do projeto for usar um HEMT com Largura do canal igual a 10 ou 100 micrômetros, a lâmina D15 foi a que ofereceu a menor Resistência Série Fonte-Dreno.

Além disso, a lâmina D18 mostra-se a mais constante no que tange a Resistência Série Fonte-Dreno para valores da Largura de Canal ( $W$ ) entre 10 e 100 micrômetros, enquanto a lâmina D15 apresenta as maiores oscilações entre os valores medidos.

As Figuras 84 e 85 mostram os valores da Resistência Série em giga Ohms para diferentes Larguras do Canal ( $W$ ) em micrômetros das quatro lâminas

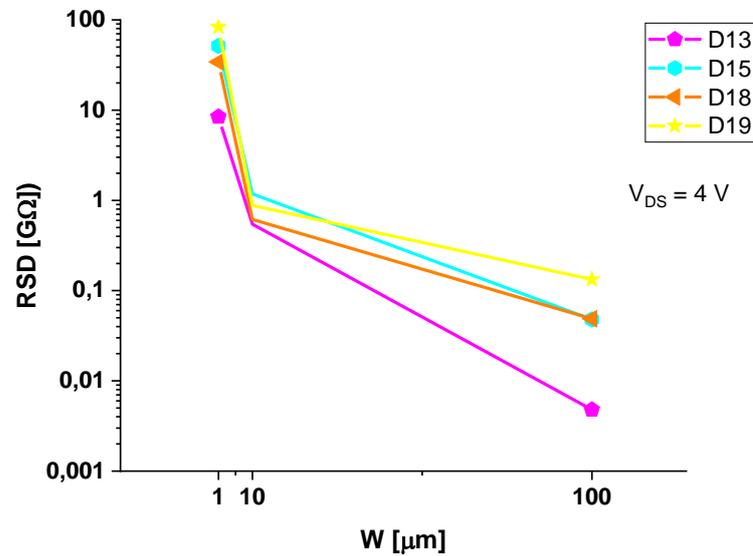
estudadas em escalas Linear e Logarítmica respectivamente para o HEMT na Região de Saturação (com  $V_{DS} = 4$  V).

Figura 84 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$  em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$  em micrômetros) com  $V_{DS} = 4$  Volts para as quatro lâminas estudadas em escala linear.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 85 Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$  em quilo Ohms) para diferentes Larguras do Canal ( $W$  em micrômetros) com  $V_{DS} = 4$  Volts para as quatro lâminas estudadas em escala logarítmica.



Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente, fica claro que quando o HEMT está operando na Saturação, os valores da Resistência Série Fonte-Dreno saem da casa dos quilo Ohms para os giga Ohms. Além disso, as variações entre as lâminas mostram-se menores.

Novamente, D19 foi a lâmina com maiores valores para o transistor com  $W$  igual a 1 micrômetro enquanto D13 foi a lâmina com menores valores. Considerando o transistor HEMT com  $W$  igual a 10 ou 100 micrômetros, D13 também mostrou-se a lâmina com menores valores. Sendo assim, se o intuito da aplicação do HEMT for o uso na Saturação, D13 é a lâmina mais recomendada para a minimização da Resistência Série Fonte-Dreno e, conseqüentemente, aumento da eficiência energética do dispositivo, já que reduzirá as perdas de potência.

Como observou-se, em ambas as regiões de operação, quanto menor o valor de  $W$ , maior a Resistência Total e, conseqüentemente, maior o valor da Resistência Série Fonte-Dreno. Sendo assim, pode-se inferir que existe uma relação inversamente proporcional entre as duas grandezas.

## 6. CONCLUSÕES

Após a análise de quarenta e sete transistores HEMT com diferentes combinações de Largura de Canal e Comprimento de canal presentes em quatro lâminas com estratégias de dopagens distintas, algumas conclusões puderam ser tiradas.

Com relação às curvas de Corrente de Dreno ( $I_D$ ) em função de Tensão de Porta ( $V_G$ ), considerando o HEMT na região Linear, com  $V_{DS}$  em 0,5 V, pode-se notar uma curvatura com formato mais linear do que quando comparado ao HEMT operando na região de Saturação (com  $V_{DS}$  igual a quatro Volts), nota-se um comportamento mais exponencial, conforme Figuras da seção 5.3.

Na região Linear, D13 foi a lâmina que atingiu maiores valores de  $I_D$  de acordo com as mesmas variações de  $V_G$ . As demais lâminas (D15, D18 e D19) mostraram valores, e curvaturas, similares. Considerando a região de Saturação, D13 também mostrou-se a lâmina com os maiores valores de  $I_D$  por  $V_G$  na maioria dos casos, entretanto, as demais lâminas não mostravam comportamentos similares entre si, fazendo com que possa ser atribuída à dopagem essa mudança, que foi observada apenas com o HEMT na Saturação.

Em praticamente todas as combinações de parâmetros, os HEMTs da lâmina D13 mostram-se com menores valores de Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ), sendo os mais recomendados de modo geral para o uso em projetos que visam minimizar os efeitos de altos valores de Resistência Série.

Considerando primeiro a relação entre o Comprimento do Canal ( $L$ ) e a Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ) para o HEMT operando na região Linear e com valores de Largura de Canal ( $W$ ) entre um e dez micrômetros, o comportamento das curvas foi como o esperado, e proposto pela Equação 4.7, onde observa-se que com a diminuição do Comprimento do Canal a Resistência Total também diminui e, conseqüentemente, a Resistência Série Fonte-Dreno também. Entretanto, quando o HEMT está operando com  $W$  igual a 100  $\mu\text{m}$ , o comportamento da Resistência Total não segue o mesmo padrão dos valores de  $W$  anteriores para todas as lâminas, ficando semelhante apenas com D15 e D19, conforme seção 5.5.

Já quando tal relação é observada para o HEMT operando na região de Saturação, o comportamento não mostra-se igual ao HEMT operando na região Linear. Aqui, a Equação 4.7 não mostra-se totalmente verdadeira, dado que os HEMT possuíam o menor valor de Resistência Total com  $L$  igual a dez micrômetros e um pico logo no valor imediatamente anterior, com  $L$  igual a  $1 \mu\text{m}$ , tendo tais valores decaindo conforme o decaimento de  $L$ . Não foi encontrado nenhum motivo para que tal comportamento fosse observado, sendo este um dos fatores apontados na seção “Recomendações para Trabalhos Futuros”.

Já quanto à relação entre a Largura do Canal e a Resistência Série Fonte-Dreno ( $R_{SD}$ ), observou-se que, tanto para a região Linear quanto na Saturação, o HEMT apresentava valores de  $W$  inversamente proporcionais a valores de  $R_{SD}$ . Entretanto, quando operando na Saturação, é possível notar que há uma maior diferença de  $R_{SD}$  para os HEMT operando com  $W$  entre um e dez micrômetros.

Um ponto geral e importante é a diferença dos valores de Resistência Total medidos e, conseqüentemente, os valores de Resistência Série Fonte-Dreno para quando o HEMT está operando na região Linear e de Saturação. Na primeira, são valores na casa dos quilo-Ohms, enquanto na segunda, valores da casa dos giga-Ohms. Como tal resistência pode ser entendida como parasita, dado que não é inserida propositalmente por quem está realizando o projeto, deve-se atentar para a aplicação dos HEMT com operação na Saturação, para que a eficiência energética do circuito não se comprometa.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho utilizou dos conceitos de Regressão Linear para que, através dos valores da Resistência Total pudesse ser determinada a Resistência Série Fonte-Dreno. Porém, como é sabido, quanto mais pontos são utilizados para realizar a Regressão Linear, mais fiel à realidade ela se torna. Conforme foi apresentado, utilizou-se quatro valores de Comprimento de Canal para poder aproximar a Resistência Série. Sendo assim, seria interessante no futuro a obtenção da mesma com uma quantidade maior de pontos.

Não foi possível descrever o porquê da Resistência Total do HEMT na região de Saturação não seguir o mesmo padrão de curvatura observado para o HEMT na região Linear. Enquanto na região Linear os valores de  $R_{total}$  ficavam menores conforme o Comprimento do Canal ( $L$ ) diminuía, na região de Saturação isso só era verdade a partir de  $L$  igual a um micrômetro. Sendo assim, este efeito pode ser estudado em um momento posterior, a fim de determinar as melhores configurações do transistor para operação nesta região, talvez utilizando-se de outro método para obtenção da Resistência Série Fonte-Dreno para o HEMT na Saturação.

Não foi possível analisar a variação de  $I_D$  de acordo com  $V_G$  para RL5 ( $W$  igual a dez micrômetros e  $L$  igual a 0,4 micrômetros) para a lâmina D15. Consequentemente, também não pôde ser realizado o estudo dos efeitos na Resistência Total e, consequentemente, Resistência Série Fonte-Dreno. Para novos trabalhos, caso seja interessante a aplicação de um dispositivo com essas características em algum projeto, é interessante que os valores sejam obtidos e os dados analisados.

Além disso, caso fosse utilizado de simulações, poderiam ser observados mais variações de  $W$ ,  $L$ ,  $V_{DS}$  ou, até mesmo da temperatura, que neste trabalho foi mantida constante em 25 °C.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] ICHI PRO, **A Lei de Moore está viva e bem**. Disponível em: <https://ichi.pro/pt/a-lei-de-moore-esta-viva-e-bem-257992683749768>. Acesso em: 11 de Out. de 2020.
- [2] APPLE INC, **Apple M1**. Disponível em: <https://www.apple.com/br/mac/m1>. Acesso em 11 de Out. de 2020.
- [3] ELETRONICA PT, **Eletrônica PT – Transistor**. Disponível em: <https://www.electronica-pt.com/componentes-eletronicos/transistor-tipos>. Acesso em 20 de Out. de 2020.
- [4] OKI, N., **Física Básica do Dispositivo MOS**. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/aula\\_04-2013-1.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/aula_04-2013-1.pdf). Acesso em: 10 de Nov. de 2020.
- [5] OKI, N., **Física Básica do Dispositivo MOS**. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/aula\\_04-2013-1.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/aula_04-2013-1.pdf). Acesso em: 10 de Nov. de 2020.
- [6] SASAKI, K. R. A., **Estudo da resistência série de fonte e dreno em transistores SOI-MOSFET**, 3/79 f., relatório final de Iniciação Científica – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PSI) Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Universidade de São Paulo (USP), 2015.
- [7] ZEGHBROECK, B. V., **Mos Field-Effect-Transistors**. Disponível em: [http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter7/ch7\\_7.htm](http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter7/ch7_7.htm). Acesso em 10 de Nov. de 2020.
- [8] SASAKI, K. R. A., **Estudo da resistência série de fonte e dreno em transistores SOI-MOSFET**, 8/79 f., relatório final de Iniciação Científica – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PSI) Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Universidade de São Paulo (USP), 2015.
- [9] NICOLETTI, T., **Estudo da Resistência Série Fonte e Dreno de transistores SOI FinFETs de porta tripla e com canal tensionado**, 50/135f, dissertação para obtenção de título de Mestre – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PSI) da Universidade de São Paulo (USP), 2009.

- [10] AHAYAN, J., NIRMAL, D., **Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies**, 112/443 f. Nova Iorque: CRC Press, 2019
- [11] AHAYAN, J., NIRMAL, D., **Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies**, 82/443 f. Nova Iorque: CRC Press, 2019
- [12] VIEIRA, G., **Análise de componentes esparsos locais com aplicações em ressonância magnética funciona**. Disponível em:  
<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/95/95131/tde-10122015-094936/pt-br.php>.  
Acesso em: 8 de Dez. de 2020.
- [13] ELPROCUS, **Tutorial On High Electron Mobility Transistor (HEMT)**.  
Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/MOSFET>. Acesso em: 8 de Dez. de 2020.
- [14] ZHU, H., ZHENG, X., M., YANG, Y., FENG, S., ZHANG, Y., GUO, C., **Effect of substrate thinning on the electronic transport characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs**, 6f.
- [15] IEE et al, **International Roadmap for Devices and Systems – More Moore: Reducing parasitic device resistance.**, 2017
- [16] GLUSCHENKOV, O., **FinFET performance with Si:P and Ge:group-III-metal metastable contact trench alloys**, 2016.
- [17] SONG, S., C., et al., **Holistic technology optimization and key enablers for 7nm mobile SoC**, 199f., 2015.
- [18] NIEHENKE, E., **GaN Power Amplifier Design**, 52/73f., 2014.
- [19] AHAYAN, J., NIRMAL, D., **Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies**, 265/443 f. Nova Iorque: CRC Press, 2019
- [20] SASAKI, K. R. A., **Estudo da resistência série de fonte e dreno em transistores SOI-MOSFET**, 44/79 f., relatório final de Iniciação Científica – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PSI) Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Universidade de São Paulo (USP), 2015.
- [21] HU, G. J., CHANG, C, CHIA, Y., **Gate-Voltage-Dependent Effective Channel Length and Series Resistance of LDD MOSFET's**, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. Ed. 34, no. 12, 1987.

- [22] ORTIZ-CONDE, A.,. **Método para obtenção da Tensão de Limiar a partir da Trancondutância**, 2015.
- [23] AHAYAN, J., NIRMAL, D., **Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies**, 92/443 f. Nova Iorque: CRC Press, 2019
- [24] DE OLIVEIRA BERGAMIM, LUIS FELIPE ; PARVAIS, BERTRAND ; SIMOEN, Eddy ; **de Andrade, Maria Glória Caño** . Analog Performance of GaN/AlGaN High-Electron-Mobility Transistors. SOLID-STATE ELECTRONICS, v. 183, p. 108048, 2021.
- [25] GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE, MARIA; FELIPE DE OLIVEIRA BERGAMIM, LUIS ; BAPTISTA JÚNIOR, BRAZ ; ROBERTO NOGUEIRA, CARLOS ; ALEX DA SILVA, FÁBIO ; TAKAKURA, KENICHIRO ; PARVAIS, BERTRAND ; SIMOEN, Eddy . **Low-Frequency Noise Investigation of AlGaN/GaN High-Electron-Mobility Transistors**. SOLID-STATE ELECTRONICS **JCR**, v. 183, p. 108050, 2021.
- [26] TRAN, H. V., FUNG, P. K., SCOTT, D. B., HAVERMANN, R. H., EKLUND, R. E., **A novel BiCMOS TTL input buffer; a merging of analog and digital circuit design techniques**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1037425>. Acesso em: 8 de Mai. de 2021.
- [27] ZEIDENBERGS et al., **A Proposed Heterojunction Field Effect Transistor**, IEEE, vol. 54, No. 12, p. 1960, Dec., 1966.

## ANEXO I

Código em Python para excluir os headers dos arquivos e facilitar a importação no Origin, deletando os cabeçalhos (headers) além de salvar na coluna da Corrente de Dreno ("drain\_i") a variável e valor de Tensão de Dreno-Fonte ( $V_{DS}$ ) para os arquivos destinados aos gráficos de Corrente de Dreno ( $I_D$ ) por Tensão de Gate ( $V_G$ ) e Tensão Gate-Fonte ( $V_{GS}$ ) para os arquivos destinados aos gráficos de Corrente de Dreno ( $I_D$ ) por Tensão de Dreno ( $V_D$ ). Para usar, basta executá-lo tendo os arquivos dentro da mesma pasta.

```
import pathlib

import os

fileNames = []

outPut = {"Params":[], "Content":[]}

for root, dirs, files in os.walk(".", topdown=False):

    for file in files:

        fileNames.append({"name": file, "path": os.path.join(root, file)})

for file in fileNames:

    nameList = file["name"].split("_")

    try:

        if "P193330" in file["name"] and len(nameList) != 1:

            with open(file["path"]) as f:

                lines = f.readlines()

                vds, vdsValue = nameList[-3], nameList[-2]
```

```
for line in lines:
    if line.find("##") == 0:
        index = lines.index(line)
        if "drain_i" in line:
            lines[index] = lines[index].replace("drain_i",
f"drain_i({vds}={vdsValue}V)")
            lines = lines[index:]
            break
with open(file["path"], "w") as f:
    for line in lines:
        print(line)
        f.write(line)
except Exception as e:
    print(e)
```