

Este exemplar corresponde a redação final da tese  
defendida por Hugo Ricardo  
Jiménez Grados e aprovada pela Comissão  
Julgada em 15/06/99.  
Orientador

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO  
DEPTO. DE SEMICONDUTORES, INSTRUMENTOS E FOTÔNICA**

**TESE DE MESTRADO**

**CONTRIBUIÇÃO NO ESTUDO DO TRANSISTOR MOS  
SPLIT DRAIN COMO SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO.**

**Autor : Hugo Ricardo Jiménez Grados**

**Orientador : Prof. Dr. Carlos A. dos Reis Filho**

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho - presidente da banca - DSIF/FEE/UNICAMP

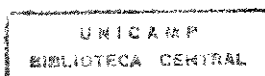
Prof. Dr. Ioshiaki Doi -membro interno - DMCSI / FEE / UNICAMP

Prof. Dr Marcelo Jara - membro externo

Prof. Furio Damiani - membro suplente - DSIF/FEE/UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP , como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Campinas, Junho / 1999**



|          |                                     |
|----------|-------------------------------------|
| UNIDADE  | BC                                  |
| CHAMADA: | UNICAMP                             |
| Ex.      |                                     |
| NUMERO   | 001.39.168                          |
| DOC.     | 22.9.199                            |
| C        | <input type="checkbox"/>            |
| D        | <input checked="" type="checkbox"/> |
| RECO.    | 001.11.00                           |
| DATA     | 22.10.199                           |
| CPD      |                                     |

CM-00136462-4

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

J564c

Jiménez Grados, Hugo Ricardo

Contribuição no estudo do transistor MOS split drain  
como sensor de campo magnético. / Hugo Ricardo  
Jiménez Grados.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Carlos A. dos Reis Filho

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Hall, Efeito. 2. Detectores. 3. Transistores. 4.  
Microeletrônica. 5. Circuitos integrados. I. Reis Filho,  
Carlos A. dos. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.  
Título.

## RESUMO

**Jiménez-Grados, H. R. , CONTRIBUIÇÃO NO ESTUDO DO TRANSISTOR MOS *SPLIT DRAIN* COMO SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO, Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 1999.**

Este trabalho visa a familiarização com o dispositivo MOS- *Split Drain* através da construção de diferentes configurações geométricas, seguindo as regras da tecnologia CMOS - 0,8  $\mu\text{m}$  da AMS (Austria Mikrosysteme International), e de suas respectivas caracterizações elétricas e magnéticas. Medidas realizadas com os diversos protótipos fabricados permitiram a constatação de diversas características divulgadas na literatura e de suas limitações.

O aprendizado que resulta deste trabalho é fundamental para o projeto que os pesquisadores do LPM2 - FEEC - UNICAMP ora realizam visando o desenvolvimento de um microsistema para a medição de consumo de energia elétrica.

**Palavras Chave :** sensor magnético, sensor Hall , tensão Hall, corrente Hall, *Split drain*, magneto-transistor

## ABSTRACT

**Jiménez-Grados, H. R. , CONTRIBUTION TO THE STUDY OF MOS - *SPLIT DRAIN* TRANSISTOR AS MAGNETIC FIELD SENSOR, MS Thesis - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 1999.**

This work aims at the familiarization with MOS- *Split Drain* transistors by constructing and measuring several units of different geometrical configurations, following the AMS (Austria Mikrosysteme International) design rules for CMOS 0.8  $\mu\text{m}$  technology, and by characterizing the electrical and magnetic aspects of this device. Different prototypes were fabricated and measured, which allowed verifying either the validity or discrepancy of some of its properties published in the literature.

The learning from this work is fundamental for the project, which is being carried on by researchers from LPM2 - FEEC - UNICAMP that are involved with the development of a novel microsystem for the measurement of electrical energy consumption.

**Key Words :** magnetic sensor, Hall sensor, Hall voltage, Hall current, *Split Drain*, magnetic transistor.

## **Dedicatória**

**À**

**meus netos**

**Joaquim Rafael**

**Diego Alberto**

**Maria Fernanda**

**Jorge Alonso**

**Fabiana**

**e à meu filho**

**Ricardo**

## **Agradecimentos**

Ao professor Carlos A. Reis Filho pela oportunidade e orientação.

Aos pesquisadores do LACAM- CTI pelos trabalhos de fotografia e encapsulamento.

Ao professor Marcelo Knobel e ao doutorando Fábio S. Silva do Laboratório de altas e baixas temperaturas do Instituto de Física -IFGW- Unicamp pela utilização de equipamentos para as medições com campo magnético.

Aos orientandos do doutor Reis, pela amizade, solidariedade e pelo trabalho em conjunto, especialmente aos colegas Fabiano Fruet, Ricardo Maltione, Edison Moraes e Edson Acco com os quais mantive intercâmbio de idéias.

Ao apoio financeiro da CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

# CONTEÚDO

|                                                                      |               |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>                                              | <b>iii</b>    |
| <b>LISTA DE FOTOGRAFIAS</b>                                          | <b>vi</b>     |
| <b>GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS</b>                                  | <b>vii</b>    |
| <b>INTRODUÇÃO</b>                                                    | <b>viii</b>   |
| <br><b>CAPÍTULO 1 - SENSORES MAGNÉTICOS</b>                          | <br><b>1</b>  |
| 1.1 INTRODUÇÃO                                                       | 1             |
| 1.2 SENSORES MAGNÉTICOS                                              | 2             |
| 1.3 EFEITOS FÍSICOS                                                  | 2             |
| 1.4 FAIXA DE OPERAÇÃO DOS SENSORES MAGNÉTICOS                        | 3             |
| 1.5 ANÁLISE DOS EFEITOS GALVANO MAGNÉTICOS                           | 4             |
| 1.6 ANÁLISE DO EFEITO HALL                                           | 4             |
| <br><b>CAPÍTULO 2 - SENSORES MAGNÉTICOS SEMICONDUTORES</b>           | <br><b>7</b>  |
| 2.1 INTRODUÇÃO                                                       | 7             |
| 2.2 A PLACA HALL                                                     | 8             |
| 2.2.1 OPERAÇÃO DA PLACA HALL: MODO CORRENTE                          | 10            |
| 2.2.2 O DISPOSITIVO HALL DUAL                                        | 10            |
| 2.2.3 A CORRENTE HALL                                                | 11            |
| 2.3 DISPOSITIVOS MOS DE EFEITO HALL                                  | 14            |
| 2.3.1 PLACA HALL MOS                                                 | 14            |
| 2.3.2 PROPRIEDADES DO TRANSISTOR MOS                                 | 14            |
| 2.3.3 OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO HALL MOS: MODO TENSÃO HALL             | 15            |
| 2.3.4 OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO HALL MOS: MODO CORRENTE HALL           | 16            |
| 2.3.5 DISPOSITIVO MOS <i>SPLIT DRAIN</i>                             | 16            |
| <br><b>CAPÍTULO 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>                     | <br><b>20</b> |
| 3.1 INTRODUÇÃO                                                       | 20            |
| 3.2 MEDIÇÕES DE SENSIBILIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO                     | 21            |
| 3.3 MEDIÇÕES DOS DISPOSITIVOS N MOS : MODO TENSÃO HALL               | 21            |
| 3.4 MEDIÇÕES DOS DISPOSITIVOS P MOS: MODO CORRENTE HALL              |               |
| - <i>SPLIT DRAIN</i>                                                 | 23            |
| 3.4.1 GEOMETRIA DO DISPOSITIVO P MOS                                 | 24            |
| 3.4.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA                                     | 25            |
| 3.4.3 TENSÃO DE SAÍDA E A VARIAÇÃO DA TENSÃO DE PORTA VGS            | 26            |
| 3.4.4 TENSÃO DE SAÍDA E A VARIAÇÃO DA TENSÃO DE <i>OFFSET</i>        | 28            |
| 3.4.5 CORRENTE HALL E A VARIAÇÃO DA TENSÃO DE PORTA.                 | 30            |
| 3.4.6 LINEARIDADE : RETAS PARA REFERÊNCIA E CÁLCULO DE SUAS EQUAÇÕES | 32            |
| 3.4.7 LINEARIDADE : ERRO DE CORRENTE HALL                            | 34            |
| 3.4.8 SENSIBILIDADE ABSOLUTA                                         | 38            |

|                                                                   |                                                                          |     |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.9                                                             | CAMPO MÍNIMO DETETÁVEL                                                   | 38  |
| 3.4.10                                                            | SENSIBILIDADE RELATIVA                                                   | 38  |
| 3.4.11                                                            | CORRENTE HALL E A VARIAÇÃO DA TENSÃO VDS                                 | 43  |
| 3.4.12                                                            | CORRENTE HALL E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA: RAZÃO W/L                       | 57  |
| 3.4.13                                                            | SENSIBILIDADE ABSOLUTA E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA:<br>RAZÃO W/L           | 60  |
| 3.4.14                                                            | CORRENTE HALL RELATIVA E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA:<br>RAZÃO W/L           | 62  |
| 3.4.15                                                            | SENSIBILIDADE RELATIVA E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA:<br>RAZÃO W/L           | 65  |
| <b>CAPÍTULO 4 - CÁLCULOS, COMPARAÇÕES E SIMULAÇÕES</b>            |                                                                          | 69  |
| 4.1                                                               | INTRODUÇÃO .                                                             | 69  |
| 4.2                                                               | COMPARAÇÃO DO MODELO TEÓRICO COM OS RESULTADOS<br>EXPERIMENTAIS .        | 70  |
| 4.3                                                               | EXTRAÇÃO DO VALOR DO PRODUTO ( $\frac{L}{W} G$ )                         | 70  |
| 4.4                                                               | CÁLCULO DA CORRENTE HALL RELATIVA                                        | 71  |
| 4.5                                                               | CÁLCULO DA SENSIBILIDADE                                                 | 73  |
| 4.6                                                               | CÁLCULO DA CORRENTE HALL                                                 | 76  |
| 4.7                                                               | COMPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO COM OS RESULTADOS<br>EXPERIMENTAIS               | 78  |
| 4.7.1                                                             | MEDIÇÕES DE CARACTERIZAÇÃO                                               | 78  |
| 4.7.2                                                             | SIMULAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO                                              | 80  |
| <b>CAPÍTULO 5 - LAYOUT DO CI, MÉTODOS DE MEDIÇÃO E APLICAÇÕES</b> |                                                                          | 83  |
| 5.1                                                               | INTRODUÇÃO                                                               | 83  |
| 5.2                                                               | DESCRIÇÃO DO CI                                                          | 84  |
| 5.3                                                               | LAYOUT DO CI                                                             | 84  |
| 5.4                                                               | MÉTODOS PARA AS MEDIÇÕES DE CARACTERIZAÇÃO                               | 88  |
| 5.5                                                               | MÉTODO PARA AS MEDIÇÕES DA SENSIBILIDADE AO CAMPO<br>MAGNÉTICO           | 90  |
| 5.6                                                               | CIRCUITOS PARA A MEDIÇÃO DA CORRENTE HALL                                | 90  |
| 5.7                                                               | A PLACA DE TESTE                                                         | 94  |
| 5.8                                                               | EQUIPAMENTO PARA GERAR, MEDIR E REGISTRAR OS DADOS DO<br>CAMPO MAGNÉTICO | 98  |
| 5.9                                                               | ANÁLISE DA MEDIÇÃO MAGNÉTICA COM NÚCLEO E ENTREFERRO<br>DE AR .          | 102 |
| 5.10                                                              | APLICAÇÃO DO SENSOR HALL NA MEDIÇÃO DE CORRENTE<br>ELÉTRICA              | 103 |
| 5.11                                                              | APLICAÇÃO DO SENSOR HALL NA MEDIÇÃO DA POTÊNCIA<br>ELÉTRICA              | 105 |
| <b>CONCLUSÕES</b>                                                 |                                                                          | 110 |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                 |                                                                          | 111 |

## LISTA DE FIGURAS

|      |                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Conceito de (a) sensor magnético (b) transdutor magnético                                                                                                                                                                          | 2  |
| 1.2  | Lista de sensores com suas correspondentes faixas de campo magnético                                                                                                                                                               | 3  |
| 1.3  | O efeito Hall segundo o caso especial de uma fita muito comprida                                                                                                                                                                   | 4  |
| 2.1  | A placa Hall retangular fina de material semiconductor                                                                                                                                                                             | 8  |
| 2.2  | (a) Dispositivo Hall contato de Ponto $\lambda \rightarrow 0$<br>(b) Dispositivo Hall com isolamento de Ponto $\lambda \rightarrow \infty$                                                                                         | 10 |
| 2.3  | Dispositivo de contato de ponto (a) com campo B e (b) sem campo B.                                                                                                                                                                 | 11 |
| 2.4  | Análise do dispositivo de contato de ponto                                                                                                                                                                                         | 11 |
| 2.5  | Dispositivo de contato grande (a) com campo B e (b) sem campo B                                                                                                                                                                    | 12 |
| 2.6  | Análise do dispositivo de contato grande                                                                                                                                                                                           | 12 |
| 2.7  | Fonte de corrente transversal equivalente IH                                                                                                                                                                                       | 12 |
| 2.8  | Placa Hall MOS                                                                                                                                                                                                                     | 14 |
| 2.9  | Dispositivo <i>split drain</i> MOS                                                                                                                                                                                                 | 16 |
| 2.10 | (a) Dispositivo Hall MOS: modo tensão<br>(b) Dispositivo Hall MOS: modo corrente ( <i>Split drain</i> )                                                                                                                            | 17 |
| 3.1  | Esquema do <i>layout</i> do dispositivo NMOS Hall, modo tensão                                                                                                                                                                     | 21 |
| 3.2  | Tensão de saída da placa Hall NMOS $W=240\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$ , região saturação                                                                                                                                         | 22 |
| 3.3  | Tensão de saída da placa Hall NMOS $W=240\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$ , região linear                                                                                                                                            | 22 |
| 3.4  | (a) Esquema do circuito de teste 1 incluindo um <i>layout</i> simplificado do dispositivo PMOS Hall, modo corrente: <i>Split Drain</i><br>(b) Esquema do <i>layout</i> do dispositivo PMOS Hall, modo corrente: <i>Split drain</i> | 23 |
| 3.5  | Tensão de saída com campo forte do <i>Split drain</i> $V_{GS} = -4,0\text{v}$ e $V_{DD}=5,0\text{v}$                                                                                                                               | 25 |
| 3.6  | Tensão de saída com campo forte do <i>Split drain</i> $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$ , $V_{DD}=5,0\text{v}$                                                                                                                   | 26 |
| 3.7  | Tensão de saída com campo fraco do <i>Split drain</i> $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$ , $V_{DD}=5,0\text{v}$                                                                                                                   | 27 |
| 3.8  | Conversor I-V na saída do circuito de teste.                                                                                                                                                                                       | 28 |
| 3.9  | Duas medições de corrente de saída, uma sem <i>offset</i> e outra com <i>offset</i>                                                                                                                                                | 29 |
| 3.10 | Resultados dos cálculos do fator angular, na curva sem <i>offset</i> e com <i>offset</i>                                                                                                                                           | 29 |
| 3.11 | Corrente Hall com campo forte do <i>Split drain</i> $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$ , $V_{DD}=5,0\text{v}$                                                                                                                     | 30 |
| 3.12 | Corrente Hall com campo fraco do <i>Split drain</i> $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$ , $V_{DD}=5,0\text{v}$                                                                                                                     | 31 |
| 3.13 | Resultados dos cálculos das equações das retas de referência, com campo forte                                                                                                                                                      | 32 |
| 3.14 | Resultados dos cálculos das equações das retas de referência, com campo fraco                                                                                                                                                      | 33 |
| 3.15 | Erro de linearidade com campo forte e com $V_{GS} = -5,0\text{v}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                              | 34 |
| 3.16 | Erro de linearidade com campo forte e com $V_{GS} = -4,0\text{v}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                              | 35 |
| 3.17 | Erro de linearidade com campo forte e com $V_{GS} = -3,0\text{v}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                              | 35 |
| 3.18 | Erro de linearidade com campo fraco e com $V_{GS} = -5,0\text{v}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                              | 36 |
| 3.19 | Erro de linearidade com campo fraco e com $V_{GS} = -4,0\text{v}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                              | 36 |
| 3.20 | Erro de linearidade com campo fraco e com $V_{GS} = -3,0\text{v}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                              | 37 |
| 3.21 | Sensibilidade com campo forte do <i>Split drain</i> $V_{GS} = -5\text{V}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                      | 39 |
| 3.22 | Sensibilidade com campo forte do <i>Split drain</i> $V_{GS} = -4\text{V}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                      | 39 |
| 3.23 | Sensibilidade com campo forte do <i>Split drain</i> $V_{GS} = -3\text{V}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                      | 40 |
| 3.24 | Sensibilidade com campo fraco do <i>Split drain</i> $V_{GS} = -5\text{V}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                      | 41 |
| 3.25 | Sensibilidade com campo fraco do <i>Split drain</i> $V_{GS} = -4\text{V}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                      | 41 |
| 3.26 | Sensibilidade com campo fraco do <i>Split drain</i> $V_{GS} = -3\text{V}$ $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$                                                                                                                      | 42 |
| 3.27 | Corrente Hall com campo forte do <i>Split drain</i> $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$ , $V_{DD}=5,7\text{v}$                                                                                                                     | 43 |



|      |                                                                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.28 | Equações das retas de referência, campo forte W/L=20um /48um VDD=5,7v                                                              | 44 |
| 3.29 | Sensibilidade com campo forte VGS -5,5v VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                    | 44 |
| 3.30 | Sensibilidade com campo forte VGS -5,0v VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                    | 45 |
| 3.31 | Sensibilidade com campo forte VGS -4,0v VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                    | 45 |
| 3.32 | Sensibilidade relativa vs tensão VGS, VDS=4,3v e geometria W/L=20um/48um                                                           | 46 |
| 3.33 | Sensibilidade relativa vs tensão VGS, VDS=5,0v e geometria W/L=20um/48um                                                           | 46 |
| 3.34 | Corrente Hall com campo fraco do <i>Split drain</i> W/L=20um /48um, VDD=5,7v                                                       | 47 |
| 3.35 | Sensibilidade com campo fraco VGS -5,5v VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                    | 48 |
| 3.36 | Sensibilidade com campo fraco VGS -5,0v VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                    | 48 |
| 3.37 | Sensibilidade com campo fraco VGS -4,0v VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                    | 49 |
| 3.38 | Esquema do circuito de teste 2 incluindo um <i>layout</i> simplificado do dispositivo PMOS Hall, modo corrente: <i>Split Drain</i> | 50 |
| 3.39 | Corrente Hall com campo forte do <i>Split Drain</i> W/L=20um /200um, VDS=1,17v                                                     | 51 |
| 3.40 | Resultados dos cálculos das equações das retas de referência, com campo forte e VDS=1,17v e W/L=20um/200um                         | 51 |
| 3.41 | Erro de linearidade com campo forte e com VDS=1,17v VGS -5,0v e W/L=20um / 200um                                                   | 52 |
| 3.42 | Erro de linearidade com campo forte e com VDS=1,17v VGS -4,0v e W/L=20um / 200um                                                   | 52 |
| 3.43 | Erro de linearidade com campo forte e com VDS=1,17v VGS -3,0v e W/L=20um / 200um                                                   | 53 |
| 3.44 | Erro de linearidade com campo forte e com VDS=1,17v VGS -2,0v e W/L=20um / 200um                                                   | 53 |
| 3.45 | Sensibilidade com campo forte do <i>Split Drain</i> VDS=1,17v para VGS -5v e -4v W/L=20um /200um                                   | 54 |
| 3.46 | Sensibilidade com campo forte do <i>Split Drain</i> VDS=1,17v para VGS -3v e -2v W/L=20um /200um                                   | 54 |
| 3.47 | Sensibilidade relativa vs tensão VGS, VDS=1,17v e geometria W/L=20um/200um                                                         | 55 |
| 3.48 | Sensibilidade relativa vs tensão VDS: região linear e região de saturação.                                                         | 56 |
| 3.49 | Esquema do <i>layout</i> do <i>Split drain</i> : ligando terminais 18 e 15                                                         | 57 |
| 3.50 | Corrente Hall com campo forte VGS=-5,5v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                                  | 58 |
| 3.51 | Corrente Hall com campo forte VGS=-5,0v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                                  | 58 |
| 3.52 | Corrente Hall com campo fraco VGS=-5,5v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                                  | 59 |
| 3.53 | Corrente Hall com campo fraco VGS=-5,0v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                                  | 59 |
| 3.54 | Sensibilidade absoluta, campo forte VGS=-5,5v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                            | 60 |
| 3.55 | Sensibilidade absoluta, campo forte VGS=-5,0v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                            | 60 |
| 3.56 | Sensibilidade absoluta, campo fraco VGS=-5,5v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                            | 61 |
| 3.57 | Sensibilidade absoluta, campo fraco VGS=-5,0v VDD=5,7v L=48um e L=200um                                                            | 61 |
| 3.58 | Corrente Hall relativa, campo forte VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                        | 62 |
| 3.59 | Corrente Hall relativa, campo forte VDD=5,7v W/L=20um /200um                                                                       | 63 |
| 3.60 | Corrente Hall relativa, campo fraco VDD=5,7v W/L=20um /48um                                                                        | 63 |
| 3.61 | Corrente Hall relativa, campo fraco VDD=5,7v W/L=20um /200um                                                                       | 64 |
| 3.62 | Sensibilidade relativa vs tensão VGS, geometria W/L=20um/48um                                                                      | 66 |
| 3.63 | Sensibilidade relativa vs tensão VGS, geometria W/L=20um/200um                                                                     | 66 |
| 3.64 | Corrente Hall vs Tensão VGS na região linear, VDS=1, VDS=1,17v W/L=20um/200um                                                      | 68 |

|      |                                                                                                          |     |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1  | Corrente Hall relativa: resultados teóricos e experimentais $W=20\mu\text{m}$ e $L=48\mu\text{m}$        | 72  |
| 4.2  | Corrente Hall relativa: resultados teóricos e experimentais $W=20\mu\text{m}$ e $L=200\mu\text{m}$       | 72  |
| 4.3  | Sensibilidade absoluta: resultados teóricos e experimentais $W=20\mu\text{m}$ e $L=48\mu\text{m}$        | 74  |
| 4.4  | Sensibilidade absoluta: resultados teóricos e experimentais $W=20\mu\text{m}$ e $L=200\mu\text{m}$       |     |
|      | (a) Região de saturação, $V_{DS}=5,0\text{V}$                                                            | 75  |
|      | (b) Região linear, $V_{DS}=1,17\text{V}$                                                                 | 75  |
| 4.5  | Corrente Hall : resultados teóricos e experimentais $W=20\mu\text{m}$ e $L=48\mu\text{m}$                | 76  |
| 4.6  | Corrente Hall : resultados teóricos e experimentais $W=20\mu\text{m}$ e $L=200\mu\text{m}$               | 77  |
| 4.7  | Características ID vs VDS do transistor NMOS $W=240\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$                        | 78  |
| 4.8  | Características ID vs VDS do transistor NMOS $W=120\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$                        | 78  |
| 4.9  | Características ID vs VDS do transistor PMOS $W=20\mu\text{m}$ $L=200\mu\text{m}$                        | 79  |
| 4.10 | Características ID vs VGS na região de saturação do transistor PMOS $W=20\mu\text{m}$ $L=200\mu\text{m}$ | 79  |
| 4.11 | Características ID vs VGS na região linear do transistor PMOS $W=20\mu\text{m}$ $L=200\mu\text{m}$       | 80  |
| 4.12 | Simulação das características ID vs VDS do transistor NMOS $W/L=240\mu\text{m}/20\mu\text{m}$            | 81  |
| 4.13 | Simulação das características ID vs VDS do transistor NMOS $W=120\mu\text{m}/20\mu\text{m}$              | 81  |
| 4.14 | Simulação das características ID vs VDS do transistor PMOS $W=20\mu\text{m}/20\mu\text{m}$               | 82  |
| 5.1  | Esquema de medição da caracterização para N MOS                                                          | 88  |
| 5.2  | Esquema de medição da caracterização para <i>Split drain</i> N MOS                                       | 88  |
| 5.3  | Esquema de medição da caracterização para o P MOS                                                        | 88  |
| 5.4  | Esquema de medição da caracterização para o <i>Split drain</i> P MOS                                     | 88  |
| 5.5  | Circuito de teste para caracterização                                                                    | 89  |
| 5.6  | Circuito para a medição da corrente Hall no dispositivo PMOS <i>Split drain</i>                          | 90  |
| 5.7  | Comparador de correntes para obter a corrente Hall do:                                                   |     |
|      | (a) <i>Split drain</i> PMOS (b) <i>Split drain</i> NMOS                                                  | 91  |
| 5.8  | Conversor corrente - tensão                                                                              | 91  |
| 5.9  | Os circuitos buffer para as polarizações do CI                                                           | 92  |
| 5.10 | O circuito de tensão regulada +5V                                                                        | 92  |
| 5.11 | O circuito de tensão regulada -10v                                                                       | 92  |
| 5.12 | O circuito de tensão regulada +10V                                                                       | 93  |
| 5.13 | O circuito completo para a medição da corrente Hall do <i>Split drain</i> NMOS                           | 94  |
| 5.14 | O circuito completo para a medição da corrente Hall do <i>Split drain</i> NMOS                           | 94  |
| 5.15 | Placa impressa para teste : componentes                                                                  | 95  |
| 5.16 | Placa impressa para teste: lado da solda                                                                 | 96  |
| 5.17 | Placa impressa para teste: lado dos componentes                                                          | 97  |
| 5.18 | Esquema do equipamento usado para gerar e medir campo magnético                                          | 99  |
| 5.19 | Condutor, campo tangencial e sensor Hall                                                                 | 103 |
| 5.20 | Concentrador magnético, condutor com varias voltas e sensor Hall                                         | 104 |
| 5.21 | Concentrador magnético, condutor com uma volta e o sensor Hall                                           | 104 |
| 5.22 | Concentrador magnético circular , condutor com uma volta e o sensor Hall                                 | 104 |
| 5.23 | Esquema do medidor de energia elétrica com placa Hall                                                    | 105 |
| 5.24 | Esquema do medidor de energia elétrica com placa Hall e transformador                                    | 106 |
| 5.25 | Medidor de energia elétrica usando dispositivo PMOS Hall modo tensão                                     | 107 |
| 5.26 | Medidor de energia elétrica usando dispositivo PMOS <i>Split drain</i>                                   | 108 |

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

|     |                                                                                        |     |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1 | Área Total do CI FAPESP 42 - com DIL 28pinos                                           | 85  |
| 5.2 | Área do dispositivo Hall NMOS $W=120\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$                     | 85  |
| 5.3 | Área do dispositivo Hall NMOS $W=240\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$                     | 86  |
| 5.4 | Área do <i>Split drain</i> PMOS $W=20\mu\text{m}$ $L=200\mu\text{m}$                   | 86  |
| 5.5 | Área do circuito conversor I-V                                                         | 87  |
| 5.6 | Instalações do sistema de medição de campo magnético<br>Instituto de Física da Unicamp | 100 |
| 5.7 | Sistema de medição de campo magnético e a placa de teste                               | 100 |
| 5.8 | Placa de teste na posição do entreferro do eletroímã                                   | 101 |

## GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

| <b>Símbolos romanos</b>   | <b>Significado</b>                                             |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>A<sub>v</sub></b>      | Ganho do amplificador                                          |
| <b>B</b>                  | Indução magnética                                              |
| <b>C<sub>ox</sub></b>     | Capacitância do óxido porta /área unitária                     |
| <b>D</b>                  | Coefficiente de difusão                                        |
| <b>E</b>                  | Campo elétrico                                                 |
| <b>F</b>                  | Força                                                          |
| <b>J</b>                  | Densidade de corrente                                          |
| <b>G</b>                  | Fator de correção geométrica                                   |
| <b>L</b>                  | Comprimento do canal do transistor                             |
| <b>I<sub>H</sub></b>      | Corrente Hall                                                  |
| <b>I</b>                  | Corrente                                                       |
| <b>I<sub>d</sub></b>      | Corrente de dreno                                              |
| <b>I<sub>hr</sub></b>     | Corrente Hall relativa                                         |
| <b>I<sub>dsat</sub></b>   | Corrente de dreno saturada                                     |
| <b>I<sub>OFFSET</sub></b> | Corrente de <i>offset</i> .                                    |
| <b>n</b>                  | Concentração de portadores de carga negativa                   |
| <b>Q<sub>ch</sub></b>     | Carga do canal                                                 |
| <b>q</b>                  | Carga do elétron                                               |
| <b>R<sub>H</sub></b>      | Coefficiente Hall                                              |
| <b>r<sub>n</sub></b>      | Fator Hall <i>scattering</i>                                   |
| <b>S<sub>abs</sub></b>    | Sensibilidade absoluta                                         |
| <b>S<sub>r</sub></b>      | Sensibilidade relativa                                         |
| <b>p</b>                  | Concentração de portadores de carga positiva                   |
| <b>v</b>                  | Velocidade dos portadores                                      |
| <b>V<sub>H</sub></b>      | Tensão Hall                                                    |
| <b>V<sub>DS</sub></b>     | Tensão entre o terminal dreno e o terminal fonte do transistor |
| <b>V<sub>G</sub></b>      | Tensão de porta                                                |
| <b>V<sub>GS</sub></b>     | Tensão entre o terminal porta e o terminal fonte               |
| <b>V<sub>DD</sub></b>     | Tensão de alimentação positiva                                 |
| <b>W</b>                  | Largura do canal do transistor                                 |

| <b>Símbolos gregos</b> | <b>Significado</b>                         |
|------------------------|--------------------------------------------|
| <b>ΔI<sub>D</sub></b>  | Variação em cada corrente de dreno         |
| <b>μ</b>               | Mobilidade das portadoras                  |
| <b>μ<sub>H</sub></b>   | Mobilidade Hall                            |
| <b>μ<sub>Hn</sub></b>  | Mobilidade de canal - portadoras: elétrons |
| <b>μ<sub>ch</sub></b>  | Mobilidade das portadoras no canal         |
| <b>μ<sub>r</sub></b>   | Permeabilidade magnética relativa          |
| <b>μ<sub>o</sub></b>   | Permeabilidade magnética do vácuo.         |
| <b>θ<sub>H</sub></b>   | Ângulo Hall                                |
| <b>ρ</b>               | Resistividade do material da placa         |
| <b>λ</b>               | Fator lambda.                              |
| <b>σ</b>               | Condutividade                              |
| <b>n</b>               | Concentração de portadoras (elétrons).     |

# INTRODUÇÃO

## OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a familiarização com as características e limitações do dispositivo MOS *split drain* fabricado na tecnologia CMOS 0,8 $\mu$ m da AMS (Austria Mikrosysteme International).

## MOTIVAÇÃO

A motivação para a pesquisa deste particular dispositivo surgiu do crescente interesse industrial no desenvolvimento de mecanismos para a monitoração, análise e medição das características da energia elétrica distribuída.

Tendo em vista que se trata de um mercado de grande escala, buscam-se alternativas de implementação de baixo custo. A solução monolítica, onde co-existam sensoriamento e processamento de sinais é potencialmente satisfatória a este propósito.

## CONTEÚDO

O texto está organizado em cinco capítulos, cujos conteúdos são os seguintes:

Capítulo 1: São apresentados conceitos e princípios de funcionamento dos diversos sensores magnéticos.

Capítulo 2: Descreve o chamado efeito Hall e os dispositivos que se baseiam neste princípio.

Capítulo 3: Apresenta um circuito integrado, que contém diferentes dispositivos MOS *split drain*, implementado em tecnologia CMOS 0,8 $\mu$ m da AMS e descreve os procedimentos adotados na realização no processo de caracterização destes dispositivos.

Capítulo 4: São apresentadas justificativas para os resultados obtidos através de experimentos, incluindo-se comparações das características destes dispositivos com o modelo do transistor MOS da AMS.

Capítulo 5: Contém fotos, diagramas de circuitos de teste e suas respectivas descrições.

## **CAPÍTULO 1 - SENSORES MAGNÉTICOS**

### **1.1 Introdução**

**O capítulo 1** apresenta os **conceitos gerais**, efeitos físicos e faixa de operação dos sensores magnéticos, e uma descrição e análise do efeito Hall .  
Este capítulo vai cobrir os seguintes itens:

- 1.2 Sensores Magnéticos.
- 1.3 Efeitos Físicos.
- 1.4 Faixa de Operação dos Sensores Magnéticos.
- 1.5 Análise dos Efeitos Galvano-magnéticos.
- 1.6 Análise do Efeito Hall.

## 1.2 SENSORES MAGNÉTICOS

O conceito básico de um sensor é que ele gera um sinal devido à variação numa propriedade física de um processo.

Para o caso de um **sensor magnético**, a propriedade física é um campo magnético que devido a sua variação gera um sinal elétrico na saída do sensor, conforme esta mostrado no esquema da figura 1.1 (a)

A variação do campo magnético pode ser produzida por outra propriedade física diferente (pressão, corrente elétrica...) logo, o campo magnético aparece como um sinal auxiliar que sai de outro sensor primário. Neste caso, o sensor tem a função de **transdutor magnético** e esta ilustrado na figura 1.1 (b)

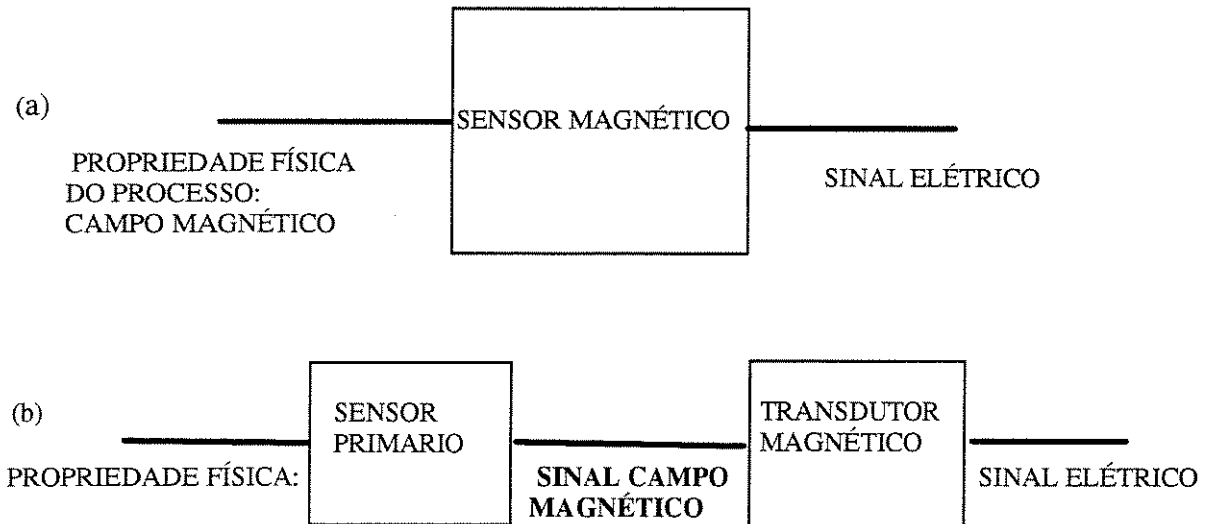


Figura 1.1 conceito de (a) sensor magnético (b) transdutor magnético

## 1.3 EFEITOS FÍSICOS:

Os efeitos físicos usados para os sensores magnéticos foram desenvolvidos durante 157 anos. Desde o efeito Joule em 1842 até o último descobrimento do efeito Hall quântico em 1980 quando o alemão Klaus Von Klitzing e seus colaboradores investigavam o efeito Hall em temperaturas muito baixas usando MOSFET [1] e [2].

Uma relação cronológica é apresentada:

- 1842 Efeito Joule
- 1846 Efeito  $\Delta E$
- 1847 Efeito Matteucci
- 1857 Efeito Magneto Resistivo (Thomson-E)
- 1858 Efeito Wiedemann
- 1865 Efeito Villari
- 1879 Efeito Hall
- 1903 Efeito Skin
- 1931 Efeito Sixtus-Tonks
- 1962 Efeito Josephson
- 1980 Efeito Hall Quântico

Estos efeitos físicos podem ser agrupados em cinco categorias:

|                               |                                     |                                                      |                        |                    |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|
| SISTEMAS ELETRO<br>MAGNÉTICOS | MATERIAIS SOB<br>CAMPO<br>MAGNÉTICO | ESFORÇO E<br>PROPRIEDADE<br>MAGNÉTICA DO<br>MATERIAL | SUPER<br>CONDUTIVIDADE | EFEITO<br>QUÂNTICO |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|

INDUTANCIA

GALVANICO:  
HALL  
RESISTÊNCIA

MAGNÉTICO ELASTICO

JOSEPHSON  
MAGNETOTRIÇÃO

HALL QUANTICO

#### 1.4 FAIXA DE OPERAÇÃO DOS SENSORES MAGNÉTICOS

A seguinte figura 1.2 mostra uma lista de dispositivos com as correspondentes faixas de campo magnético que podem detetar. [6], [34] e [22].

Os dispositivos são completamente diferentes em construção e custo, e para fazer comparações é necessário considerar o tipo de aplicação, sua faixa, precisão e o tamanho físico.

Em particular, nosso interesse focaliza os sensores de efeito Hall, pelo tamanho pequeno, baixo custo e linearidade. Estas características são apropriadas à medição de potência elétrica.

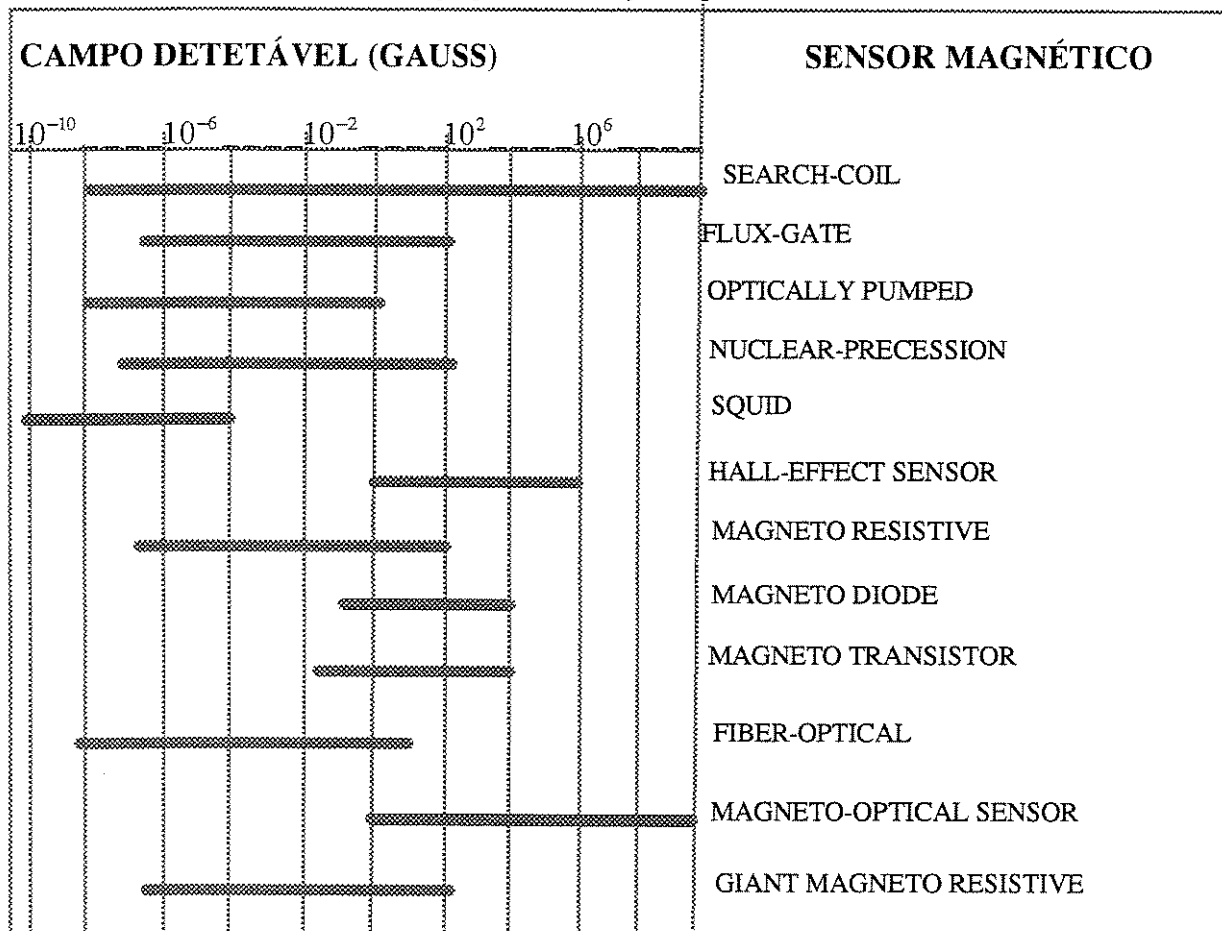


Figura 1.2 lista de sensores com suas correspondentes faixas de campo magnético



### 1.5 ANÁLISE DOS EFEITOS GALVANO-MAGNÉTICOS

Temos dois efeitos galvano-magnéticos[5]: o efeito magneto-resistivo [3] e o efeito Hall [4] existindo também os dois efeitos combinados num mesmo dispositivo.

Os efeitos Galvano magnéticos são manifestações do fenômeno de transporte dos portadores de carga na matéria, quando os portadores ficam sob ação das forças de Lorents  $F$ :

$$\vec{F} = e\vec{E} + e[\vec{v} \times \vec{B}] \quad \begin{array}{l} v = \text{velocidade dos portadores} \\ \text{para elétrons } e = -q \\ \text{para lacunas } e = q \\ q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \end{array} \quad (1.1)$$

A equação do transporte de portadores é:

$$\vec{J} = \vec{J}_0 + \mu_H [\vec{J}_0 \times \vec{B}] \quad J = \text{Densidade de corrente (total)} \quad (1.2)$$

Onde a densidade de corrente ( $J_0$ ) devido ao campo  $E$  e à gradiente da concentração de portadores  $\nabla n$ , é:  
 $\sigma$  = condutividade

$$\vec{J}_0 = \sigma \vec{E} - eD \nabla n \quad \begin{array}{l} n = \text{concentração de portadoras} \\ D = \text{coeficiente de difusão} \end{array} \quad (1.3)$$

A mobilidade Hall ( $\mu_H$ ) é:

$$\mu_H = r\mu \quad \begin{array}{l} r = \text{fator de scattering} \\ \mu = \text{mobilidade das portadoras} \end{array} \quad (1.4)$$

### 1.6 ANÁLISE DO EFEITO HALL

O efeito Hall pode ser ilustrado na figura 1.3 para o caso especial de uma fita muito comprida de um material semiconductor homogêneo ( $\nabla n = 0$ ) e fortemente extrínseco.[5],[7]e[8]

Assumimos: o eixo da fita segue o eixo  $x$  e o plano da fita é o plano  $xz$ .

$$\vec{B} = (0, B_y, 0)$$

$$\vec{E}_{\text{ext}} = (E_x, 0, 0)$$

$$\vec{J} = (J_x, 0, 0)$$

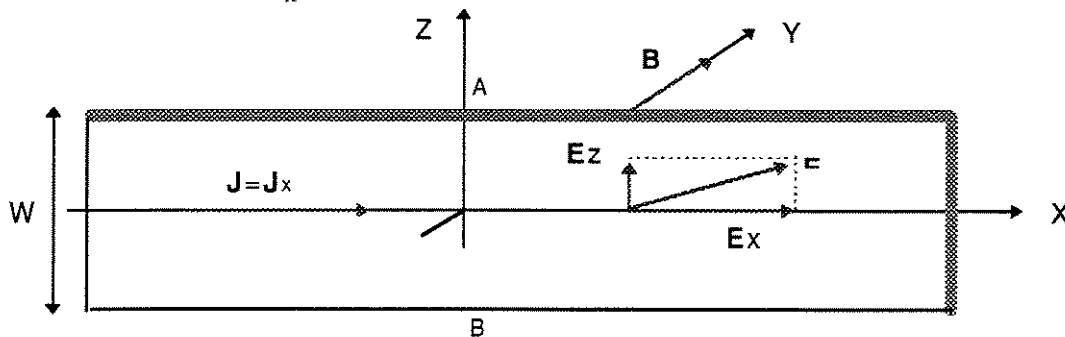


figura 1.3 O efeito Hall segundo o caso especial de uma fita muito comprida

Como o  $J_z=0$ , um campo elétrico transversal  $E_H$  aparece para agir contra a parte magnética da **força de Lorents**. Este campo  $E_H$  é chamado de **campo Hall** e pode ser obtido da equação de transporte, substituindo:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_{ext} + \vec{E}_H \\ \vec{E}_H &= (0, 0, \vec{E}_Z) \\ E_Z &= -\mu_H B E_X\end{aligned}\tag{1.5}$$

A existência de  $E_H$  dá origem à **tensão Hall**  $V_H$ :

$$V_H = \int_A^B \vec{E}_H \cdot d\vec{z} = \int_A^B \vec{E}_Z \cdot d\vec{z} = -\mu_H B E_X \int_A^B dz\tag{1.6}$$

Se  $w$  é a largura da fita:

$$V_H = -\mu_H B E_X w\tag{1.7}$$

O **ângulo Hall** é definido como a inclinação do campo elétrico total:

$$\tan\theta_H = E_Z / E_X\tag{1.8}$$

$$\tan\theta_H = -\mu_H B\tag{1.9}$$

Se o **campo magnético é fraco**, a tensão Hall é proporcional ao ângulo Hall:

$$V_H = (-\mu_H B) E_X w = \tan\theta_H E_X w\tag{1.10}$$

$$\text{Se o ângulo Hall é pequeno: } \tan\theta_H \approx \theta_H\tag{1.11}$$

$$\text{Logo, a } \textbf{tensão Hall} \text{ é: } V_H \approx \theta_H E_X w\tag{1.12}$$

$$\text{O } \textbf{coeficiente Hall} \text{ é definido como: } R_H = -\frac{E_H}{[\vec{J} \times \vec{B}]}\tag{1.13}$$

$$\text{Neste caso: } [\vec{J} \times \vec{B}] = (0, 0, J_X \cdot B) \quad \text{Logo: } R_H = \frac{\mu_H B E_X}{J_X B} = \mu_H \frac{E_X}{J_X}\tag{1.14}$$

$$\text{Como } J_X = \sigma E_X \text{ podemos obter: } R_H = \mu_H \frac{E_X}{\sigma E_X} = \frac{\mu_H}{\sigma}\tag{1.15}$$

Logo, o **coeficiente Hall** é:

$$R_H = \frac{\mu_H}{\sigma} \quad (1.16)$$

substituindo  $\mu_H$  na equação da **tensão Hall**:  
onde o sinal negativo foi omitido

$$V_H = \mu_H B E_X w = (R_H \sigma) B E_X w \quad (1.17)$$

$$V_H = R_H (\sigma E_X) B w \quad (1.18)$$

$$V_H = R_H J_x B w \quad (1.19)$$

## CAPÍTULO 2 - Sensores Magnéticos Semicondutores

### 2.1 Introdução

Neste capítulo apresentamos as bases teóricas e referências dos sensores magnéticos semicondutores, placa Hall e dispositivo Hall MOS nas versões modo tensão Hall e modo corrente Hall, e dispositivo MOS *Split drain*. Este capítulo será desenvolvido seguindo os seguintes itens.

- 2.2 A placa Hall
  - 2.2.1 Operação da Placa Hall: Modo corrente
  - 2.2.2 O Dispositivo Hall Dual
  - 2.2.3 A Corrente Hall
- 2.3 Dispositivos MOS de Efeito Hall
  - 2.3.1 Placa Hall MOS
  - 2.3.2 Propriedades do Transistor MOS
  - 2.3.3 Operação do Dispositivo Hall MOS: Modo Tensão Hall
  - 2.3.4 Operação do Dispositivo Hall MOS: Modo Corrente Hall
  - 2.3.5 Dispositivo MOS *Split Drain*

## 2.2 A PLACA HALL

A placa Hall é um sensor de campo magnético baseado no efeito Hall . Ela é uma placa retangular fina de material semicondutor como é ilustrado na figura 2.1

A corrente  $I$  é fornecida à placa e flui na direção dos contatos  $C1$  e  $C2$  (contatos de corrente). Os outros dois contatos  $S1$  e  $S2$  (contatos sensores) são posicionados em dois pontos equipotenciais nas laterais da placa.

Ao aplicar um campo magnético ao dispositivo, a tensão Hall,  $V_H$  , aparece entre os contatos sensores  $S1$  e  $S2$  .

Seguindo a análise de Gopel [5], a tensão Hall é proporcional ao produto:

$$V_H \approx B_Z I \quad (2.1)$$

No caso ideal da placa muito comprida ( $L:Long$ ) e com os contatos sensores pequenos (vide efeito Hall), a tensão Hall,  $V_H = V_{HL}$  , é:

$$V_H = V_{HL} = R_H J_X B w = R_H \left( \frac{I}{t w} \right) B w \quad J_X = \text{densidade de corrente} = \frac{I}{t w} \quad (2.2)$$

$$V_{HL} = \frac{R_H}{t} B I \quad R_H = \text{coeficiente Hall} \quad (2.3)$$

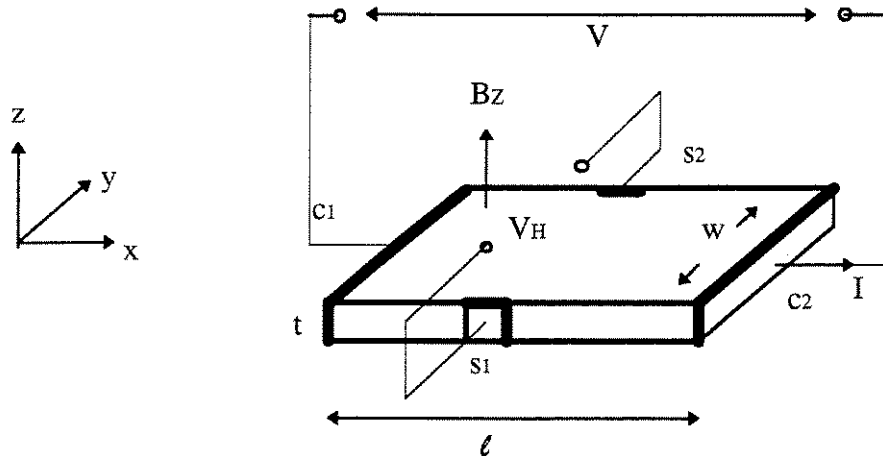


Figura 2.1 A placa Hall retangular fina de material semicondutor

No caso geral de uma placa com dimensões finitas e contatos de tamanho finito:

$$V_H = G \frac{R_H}{t} B I \quad G = \text{fator de correção geométrica} = \frac{V_H}{V_{HL}} \quad (2.4)$$

O fator  $G$  pode variar de 0 até 1

Em muitos casos práticos, a condutividade eletrônica é dominante, logo, o coeficiente Hall é:

$$R_H = R_{Hn} = \frac{r_n}{qn} \quad r_n = \text{fator Hall scattering} \quad (2.5)$$

$n$  = concentração de elétrons  $> p$   
 $n \approx N_d$  = densidade de doadores

$$V_H = G \frac{r_n}{qnt} BI \quad \text{Tensão Hall em termos da corrente } I \text{ entre os contatos C1 e C2} \quad (2.6)$$

Isto concorda com o fato das placas serem muito finas e com material de baixa concentração de portadoras. A corrente  $I$  entre os contatos C1 e C2 é produzido por uma tensão aplicada  $V$ :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{\rho \frac{\ell}{wt}} = \frac{V}{\frac{1}{q\mu n} \frac{\ell}{wt}} = q\mu n \frac{wt}{\ell} V \quad (2.7)$$

$\rho$  = resistividade do material semicondutor  
 $\mu$  = mobilidade

substituindo a corrente  $I$  na expressão de  $V_H$ :

$$V_H = \frac{r_n}{qnt} GBI = \frac{r_n}{qnt} GB(q\mu n \frac{wt}{\ell} V) = r_n \mu \frac{w}{\ell} GBV \quad (2.8)$$

$$V_H = r_n \mu \frac{w}{\ell} GBV \quad (2.9)$$

Mas  $r_n \mu$  é definido como a mobilidade Hall para elétrons. ( $\mu_{Hn} = r_n \mu$ )

$$V_H = \mu_{Hn} \frac{w}{\ell} GBV \quad \text{Tensão Hall em termos da tensão } V \text{ aplicada nos contatos C1 e C2} \quad (2.10)$$

Para obter a expressão de  $V_H$  em termos da potência dissipada pelo dispositivo, multiplicamos a expressão de  $V_H$  em termos de  $V$ , e a expressão de  $V_H$  em termos de  $I$ .

$$V_H V_H = \left( r_n \mu \frac{w}{\ell} GBV \right) \left( \frac{r_n}{qnt} GBI \right) = r_n^2 \frac{\mu w}{qnt \ell} G^2 B^2 VI = r_n^2 \frac{\mu w}{qnt \ell} G^2 B^2 P \quad (2.11)$$

$$V_H = r_n \left( \frac{\mu w}{qnt \ell} \right)^{\frac{1}{2}} GB P^{\frac{1}{2}} \quad \text{Tensão Hall em termos da potência dissipada no dispositivo} \quad (2.12)$$

### 2.2.1 OPERAÇÃO DA PLACA HALL: MODO CORRENTE

O efeito Hall também pode manifestar-se como efeito de deflexão de corrente (vide fig.2.3b). A deflexão de corrente nos terminais do dispositivo, está ligada à chamada corrente Hall. A saída do dispositivo tem a corrente Hall com um certo nível de *offset* e também de ruído. Para a análise usaremos o método do dispositivo dual e a corrente Hall só como saída ideal.

### 2.2.2 O DISPOSITIVO HALL DUAL

O efeito de deflexão de corrente prevalece no dispositivo Hall curto, e é chamado de dispositivo de contato grande[20]

**O dispositivo de contato grande:** Exemplos destes dispositivos são a fita curta e o disco de Corbino. [5]e[20]. Temos outro exemplo que é o dispositivo Hall dual para o dispositivo da figura 2.2 (a), isto é o dispositivo Hall com isolamento de ponto mostrado na figura 2.2 (b).

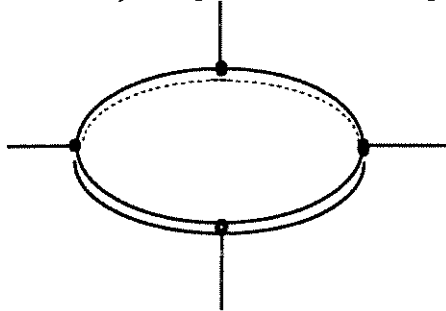


Figura 2.2(a) Dispositivo Hall contato de Ponto  $\lambda \rightarrow 0$

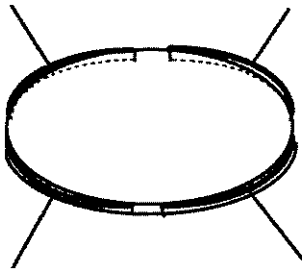


Figura 2.2 (b) Dispositivo Hall com isolamento de Ponto  $\lambda \rightarrow \infty$

Vários dispositivos podem ser classificados conforme o tamanho do contato, com auxílio do fator lambda.

$$\lambda = \frac{\sum \text{comprimento\_dos\_contatos}}{\text{comprimento\_total\_do\_contorno}} \quad (2.13)$$

**Um dispositivo Hall com contato de ponto** (e para um dispositivo infinitamente comprido):  $\lambda \rightarrow 0$  desenvolve o campo elétrico Hall

**Um dispositivo Hall com isolamento de ponto** (e para um dispositivo infinitamente curto) ou dispositivo de contato infinitamente grande:

$\lambda \rightarrow \infty$  não desenvolve campo elétrico Hall, logo não aparece tensão Hall, mas o efeito Hall é manifestado a traves do efeito de deflexão de corrente (vide fig.2.3b) que é observado diretamente a traves da medição da corrente Hall.

### 2.2.3 A CORRENTE HALL

Existe uma semelhança geométrica entre as linhas equipotenciais e as linhas de densidade de corrente nos **dispositivos Hall dual** como é mostrado na figura 2.3 e 2.5 para os casos: (a) com campo B e (b) sem aplicação de campo B.

As linhas equipotenciais são indicadas com linhas interrompidas e as linhas de corrente com linhas cheias. Num dispositivo de contato de ponto, as **linhas equipotenciais** inclinam de um **ângulo Hall** junto com o campo elétrico (operação em modo tensão) como é ilustrado na figura 2.3 (b)

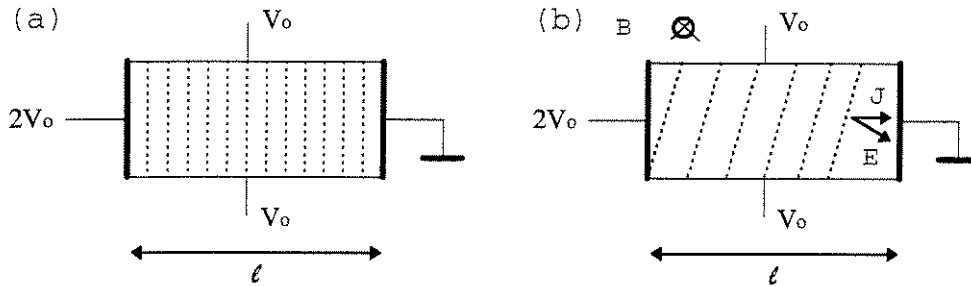


Figura 2.3 dispositivo de contato de ponto (a) sem campo B e (b) com campo B.

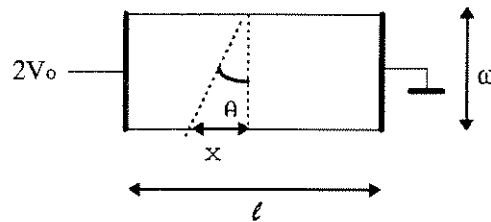


Figura 2.4 análise do dispositivo de contato de ponto

Numa análise geométrica e de proporcionalidade segundo a figura 2.4 :

$$\frac{2V_o}{l} = \frac{V_H}{x} \quad \text{onde : } \tan\theta_H = \frac{x}{\omega} \quad (2.14)$$

Logo, em cada contato sensor, a tensão varia segundo a expressão:

$$\pm \frac{V_H}{2} = \frac{V_o}{l} \omega \tan\theta_H \quad (2.15)$$

Sabendo que:  $\tan\theta_H = \mu_H B$  (vide efeito Hall, ítem 1.6))

A Tensão Hall que aparece entre os contatos sensores é:

$$V_H = \mu_H \frac{\omega}{l} B 2V_o \quad \text{Onde a tensão aplicada é } V=2V_o \quad (2.16)$$

$$\text{Logo: } V_H = \mu_H \frac{\omega}{l} B V \quad (2.17)$$



Num dispositivo de contato grande, na presença de campo magnético, as linhas de densidade de corrente inclinam um ângulo Hall mas na direção oposta, como é ilustrado na figura 2.5 (b) (operação em modo corrente)

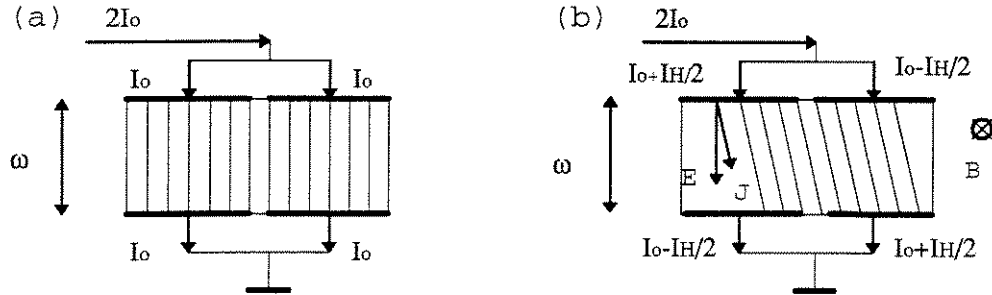


Figura 2.5 dispositivo de contato grande (a) sem campo B e (b) com campo B.

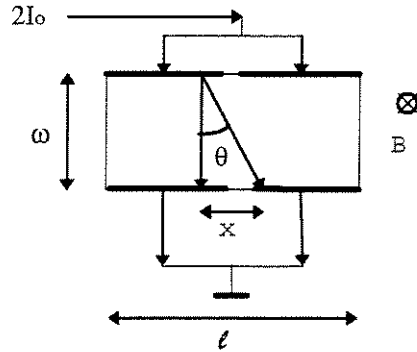


Figura 2.6 análise do dispositivo de contato grande

Numa análise geométrica e de proporcionalidade segundo a figura 2.6 :

$$\frac{2I_o}{\ell} = \frac{I_H}{x} \quad \text{onde:} \quad \tan\theta_H = \frac{x}{\omega} \quad (2.18)$$

Logo em cada contato , a corrente varia segundo a expressão:

$$\pm \frac{I_H}{2} = \frac{I_o}{\ell} \omega \tan\theta_H \quad (2.19)$$

Podemos simular estas variações, com uma fonte de corrente transversal equivalente  $I_H$  , chamada corrente Hall como é mostrado na figura 2.7

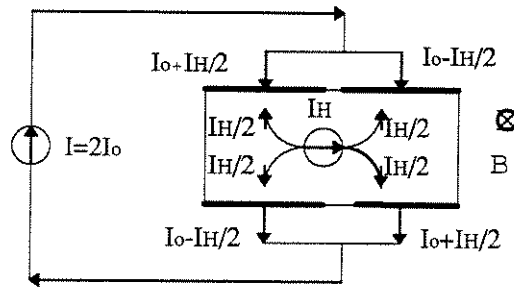


Figura 2.7 Fonte de corrente transversal equivalente  $I_H$

A corrente Hall é:

$$I_H = \mu_H \frac{\omega}{\ell} B 2I_0 \quad \text{Onde a corrente total } I = 2I_0 \quad (2.20)$$

$$I_H = \mu_H \frac{\omega}{\ell} B I \quad \text{A corrente Hall em termos da corrente total } I \quad (2.21)$$

Como o comprimento de um dispositivo é a largura do outro, nos podemos renomear:  $\omega = L$  e  $\ell = W$ . Logo, a corrente Hall em termos de  $L$  e  $W$  é:

$$I_H = \mu_H \frac{L}{W} B I \quad (2.22)$$

No caso geral, temos:

$$I_H = \mu_H \frac{L}{W} G B I \quad \text{A corrente Hall em termos da corrente total } I \quad (2.23)$$

Logo foi verificado que, existe uma analogia entre os diagramas do potencial elétrico e da densidade de corrente e também, existe analogia entre as expressões da tensão Hall e da corrente Hall.

### 2.3 DISPOSITIVOS MOS DE EFEITO HALL

Este dispositivo é um transistor MOS modificado, onde podem-se gerar as condições para a placa Hall: placa fina e material de baixa concentração de portadoras.

Assim, para ter baixa densidade de portadoras, é utilizado o canal como a região ativa do dispositivo Hall. [9],[10][11].

O atrativo deste dispositivo é que ele pode ser integrado com circuitos de processamento de sinais.

#### 2.3.1 PLACA HALL MOS

Uma placa retangular Hall realizada com um transistor MOS modificado [20] é mostrado na figura 2.8 .

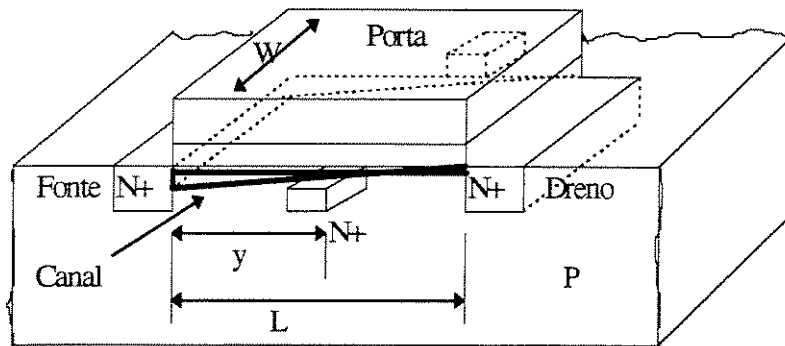


Figura 2.8 Placa Hall MOS

O canal do transistor MOS é usado como uma placa Hall extremamente fina , a fonte e o dreno são como os contatos de polarização.

A fonte e o dreno e os dois contatos sensores são fabricados simultaneamente com N+ .

L é o comprimento do canal, e W é a largura do canal, e y é a posição dos contatos sensores com referência à fonte.

#### 2.3.2 PROPRIEDADES DO TRANSISTOR MOS

Assumindo que o dispositivo é canal n, com fonte e substrato aterrados :

Se a tensão de dreno é baixa ( $V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$ ) :

A densidade de portadoras no canal é aproximadamente constante, logo:

$$Q_{ch} \approx C_{ox} (V_{GS} - V_T) \quad C_{ox} = \text{capacitância do óxido porta / área unitária} \quad (2.24)$$

A corrente de dreno é: (região linear de operação)

$$I_d \approx \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad \mu_{ch} = \text{mobilidade das portadoras no canal} \quad (2.25)$$

**Se a tensão de dreno é alta** ( $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$ ): a densidade de carga do canal fica diminuindo com o aumento da distancia  $y$  à fonte .

A corrente de dreno é:

$$I_d \approx \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} [(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2] \quad (2.26)$$

**Se a tensão de dreno é:**  $V_{DSsat} \approx V_{GS} - V_T$

A densidade de portadoras no canal ao lado do dreno , fica praticamente nula.

A corrente de dreno fica aproximadamente constante:  $I_{Dsat}(V_{Dsat})$

Neste caso, a corrente de dreno será :

$$I_{dsat} \approx \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} [(V_{Dsat})V_{DSsat} - \frac{1}{2} V_{DSsat}^2] = \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} \frac{1}{2} V_{DSsat}^2 \quad (2.27)$$

### 2.3.3 OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO HALL MOS: MODO TENSÃO HALL

Um dispositivo Hall MOS operando na região linear é equivalente a uma placa Hall convencional . A diferença é que numa placa Hall convencional , as portadoras de carga são fornecidas pelo material e na placa Hall MOS, as portadoras de carga são devidas ao efeito de campo superficial [12],[13] e [15].

Se  $I = I_D =$  corrente Dreno, então a tensão Hall na placa Hall MOS é :

$$V_H = G \frac{R_H}{t} B I_D \quad R_H = \frac{r_H}{Q_{ch}} \quad \text{é o coeficiente Hall} \quad (2.28)$$

$r_H$  é o fator Hall

$Q_{ch} = qnt$  é a carga do canal

Esta expressão é análoga à obtida para a placa Hall convencional, onde a tensão Hall continua sendo uma função linear do campo magnético só que agora a inclinação da reta é determinada pela constante Hall  $R_H$  , pela corrente dreno  $I_D$  e pela profundidade  $t$  do canal.

$$V_H = G \frac{r_H}{Q_{ch}} I_D B \quad \text{Tensão Hall em termos da corrente de dreno} \quad (2.29)$$

Para obter  $V_H$  em termos da tensão  $V_{DS}$  , substituímos a expressão da corrente de dreno correspondente.

Na região Linear a tensão de dreno é baixa ( $V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$ ), logo substituindo  $I_D$ :

$$V_H = G \frac{r_H}{Q_{ch}} \left[ \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_{GS} - V_T) V_{DS} \right] B \quad (2.30)$$

substituímos a expressão da carga do canal:

$$V_H = G \frac{r_H}{Q_{ch}} I_D B = G \frac{r_H}{C_{ox} (V_{GS} - V_T)} \left[ \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_{GS} - V_T) V_{DS} \right] B \quad (2.31)$$

$$V_H \approx r_H \mu_{ch} \frac{W}{L} G B V_{DS} \quad (2.32)$$

$$V_H \approx \mu_{Hch} \frac{W}{L} G B V_{DS} \quad \text{Tensão Hall em termos da tensão de dreno } V_{DS} \quad (2.33)$$

Na região de saturação [12] a tensão de dreno é  $V_{DSsat} \approx V_{GS} - V_T$  , e se substituímos a expressão da corrente de dreno correspondente na expressão de  $V_H$  :

$$V_H = G \frac{r_H}{Q_{ch}} I_D B = G \frac{r_H}{C_{ox} (V_{GS} - V_T)} \left[ \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} \frac{V_{DSsat}^2}{2} \right] B = G r_H \frac{W}{L} \mu_{ch} \frac{V_{DSsat}}{2} B \quad (2.34)$$

Finalmente:

$$V_H \approx \frac{1}{2} \mu_{Hch} \frac{W}{L} G B V_{DSsat} \quad (2.35)$$

### 2.3.4 OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO HALL MOS: MODO CORRENTE HALL

Um dispositivo Hall MOS operando no modo corrente Hall pode ser o dispositivo chamado *split drain* que tem dois drenos [16],[20],[31] e também pode ser outro dispositivo similar mas com três drenos [17]. Nosso interesse está no *Split drain*.

### 2.3.5 DISPOSITIVO MOS *SPLIT DRAIN*

Um dispositivo *split drain* MOS é um transistor MOS com dois drenos adjacentes substituindo uma só região dreno convencional, e esta ilustrado na figura 2.9

Os dois drenos dividem a corrente total .

Se é aplicado um campo magnético perpendicular ao dispositivo, as linhas de corrente são alteradas na sua distribuição com tendência a uma deflexão a esquerda ou direita, produzindo um desbalanceamento nas duas correntes de dreno [16]e[28].

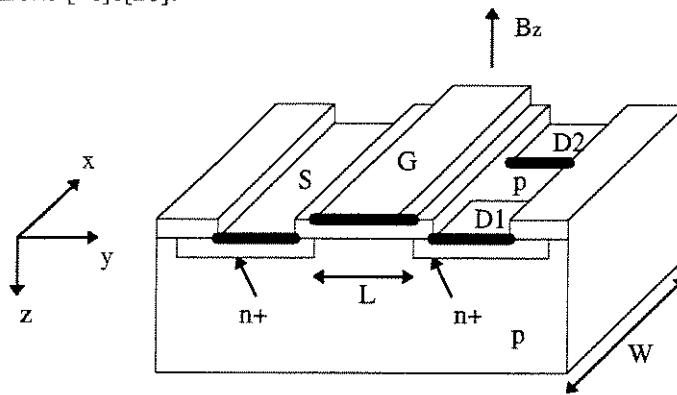


Figura 2.9 Dispositivo *split drain* MOS

Se a corrente de dreno é: 
$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (2.36)$$

Se a variação em cada corrente de dreno devido ao campo B é igual a  $\Delta I_D$

$$\Delta I_D = I_{D1}(B) - I_{D1}(0) = I_{D2}(B) - I_{D2}(0) \quad (2.37)$$

A sensibilidade absoluta é:

$$S_{abs} = \left| \frac{2\Delta I_D}{B} \right| \quad (2.38)$$

A sensibilidade relativa é:

$$S_r = \left| \frac{1}{I_D} \frac{2\Delta I_D}{B} \right| \quad (2.39)$$

A sensibilidade de desbalanceamento de correntes ou corrente Hall relativa é:

$$S_I = I_{Hr} = \left| \frac{2\Delta I_D}{I_D} \right| \quad (2.40)$$

Como este dispositivo *split drain* é um dispositivo Hall operando no modo corrente Hall,

$I_H = 2\Delta I_D = I_{D1}(B) - I_{D2}(B)$  é a corrente Hall .

Onde assumimos que  $I_{D1}(0) = I_{D2}(0)$

A analogia entre diagramas e a analogia entre as expressões  $V_H$  e  $I_H$  do dispositivo dual pode ser usada, como no caso da placa Hall. Assim, temos as correspondentes figuras 2.10 (a) e (b)

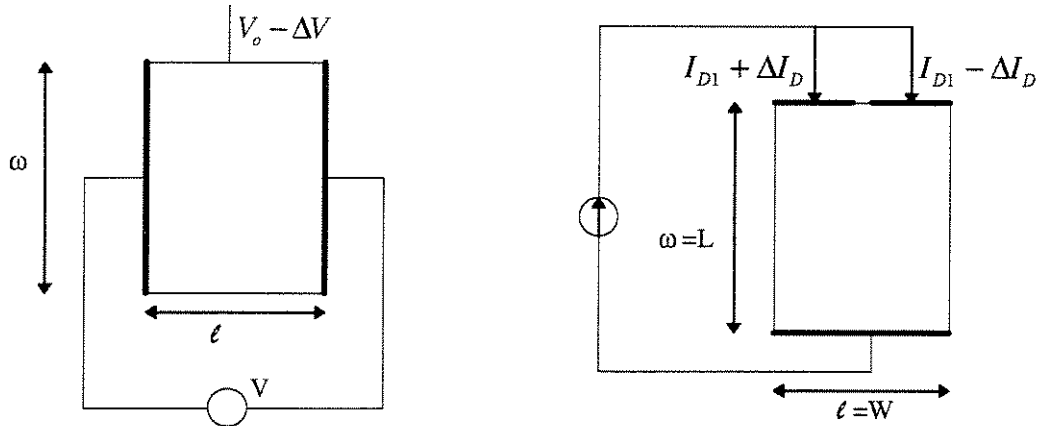


Figura 2.10 (a) Dispositivo Hall MOS: modo tensão (b) Dispositivo Hall MOS: modo corrente (*Split drain*)

Logo, com a equação 2.21 usada na placa Hall:

$$2\Delta I_D = I_H = \mu_{Hch} \frac{\omega}{\ell} B I_D \quad (2.41)$$

$\mu_{Hch}$  = mobilidade das portadoras no canal

Como o comprimento de um dispositivo é a largura do outro, renomeamos para o *split drain* :  $\omega = L$  e  $\ell = W$

No caso geral, em termos de  $L$  e  $W$  (equação 2.23):

$$I_H = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G B I_D \quad (2.42)$$

A sensibilidade absoluta é:

$$S_{abs} = \frac{I_H}{B} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G I_D \quad (2.43)$$

A corrente Hall relativa é:

$$I_{Hr} = \frac{I_H}{I_D} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G B \quad (2.44)$$

A sensibilidade relativa é:

$$S_r = \frac{I_H}{I_D} \frac{1}{B} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G \quad (2.45)$$

Muitos autores [14]e[5]têm contribuído para o estudo do fator geométrico, e do produto  $GL/W$ .

O que nós verificamos nesta literatura é que, para o *Split drain*, este produto é constante nas dimensões típicas

deste dispositivo com :  $\frac{L}{W} \rightarrow \infty \quad \theta_H \rightarrow 0$

ou aproximadamente constante com :  $\frac{L}{W} \rightarrow 1$

### CONCLUSÃO

Temos apresentado as bases teóricas e referências dos magneto sensores semi condutores da placa Hall e do dispositivo Hall MOS nas versões de modo tensão Hall e modo corrente Hall.



## CAPÍTULO 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 INTRODUÇÃO

O capítulo 3 é a parte experimental onde apresentamos os resultados das principais medições feitas no CI FAPESP 42 (ver fig.5.1, pág.85) para os dispositivos Hall, com o máximo interesse para o dispositivo Hall MOS chamado *Split drain*: são apresentadas as medições de tensão de saída, corrente Hall, sensibilidade absoluta, campo mínimo detetável, sensibilidade relativa, corrente Hall relativa e são verificados os efeitos da variação da tensão *offset*, variação da geometria, da variação da tensão VGS ou da corrente de dreno.

Este capítulo inclui os seguintes itens:

- 3.2 Medições de Sensibilidade de Campo Magnético.
- 3.3 Medições dos Dispositivos N MOS : Modo Tensão Hall
- 3.4 Medições dos Dispositivos P MOS: Modo Corrente Hall - *SPLIT DRAIN*
  - 3.4.1 Geometria do Dispositivo P MOS
  - 3.4.2 Medição da Tensão de Saída
  - 3.4.3 Tensão de Saída e a Variação da Tensão entre Porta e Fonte VGS
  - 3.4.4 Tensão de saída e a Variação da Tensão *Offset*
  - 3.4.5 Corrente Hall e a Variação da Tensão de Porta.
  - 3.4.6 Linearidade : Retas para Referência e Cálculo de suas Equações.
  - 3.4.7 Linearidade : Erro de Corrente Hall
  - 3.4.8 Sensibilidade Absoluta
  - 3.4.9 Campo Mínimo Detetável
  - 3.4.10 Sensibilidade Relativa
  - 3.4.11 Corrente Hall e a Variação da Tensão VDD ou VDS
    - 3.4.11.1 Medições na região de Saturação
    - 3.4.11.1 Medições na região Linear
  - 3.4.12 Corrente Hall e a Variação da Geometria : Razão W/L
  - 3.4.13 Sensibilidade Absoluta e a Variação da Geometria : Razão W/L
  - 3.4.14 Corrente Hall Relativa e a Variação da Geometria : Razão W/L
  - 3.4.15 Sensibilidade Relativa e a Variação da Geometria : Razão W/L

### 3.2 MEDIÇÕES DE SENSIBILIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO:

As medições de sensibilidade de campo magnético dos sensores NMOS Hall, modo tensão, foram realizadas só para mostrar que existe o efeito Hall. [19],[18]e[23].

As medições de sensibilidade de campo magnético dos sensores PMOS Hall, modo corrente, foram realizadas em detalhe e tratada com maior profundidade porque é o principal objetivo deste trabalho.

### 3.3 MEDIÇÕES DOS DISPOSITIVOS N MOS : MODO TENSÃO HALL

**Resultados:** No dispositivo N MOS foi medida a tensão de saída (tensão Hall mais tensão *offset*) como uma função da corrente Dreno e os resultados são mostrados, para as seguintes condições de medição.

**Condições de medição:**

- A tensão Hall foi medido nos terminais 27 e 23 do CI segundo o esquema do *layout* mostrado na figura 3.1 e nas fotografias 5.1e 5.3. (pág. 85 e pág. 86.).
- Uma medição foi feita na região linear para diferentes VGS e o resultado esta apresentado na figura 3.2 .
- A outra medição na região de saturação (VDSsat), para diferentes VGS, tem o resultado na figura 3.3
- Uma medição foi com o campo magnético num sentido (B+), outra medição foi no sentido inverso (B-) e uma outra medição sem nenhum campo magnético aplicado. (*offset*)
- O campo magnético foi gerado num eletroímã, onde o sensor foi localizado no entre-ferro do núcleo do eletroímã.

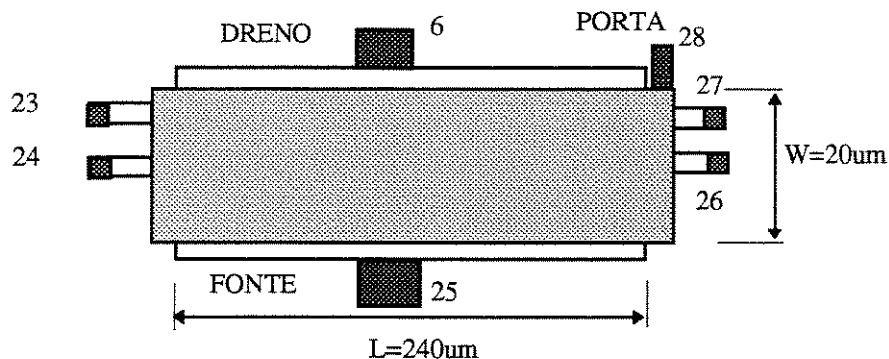


Figura 3.1 Esquema do *layout* do dispositivo NMOS Hall, modo tensão

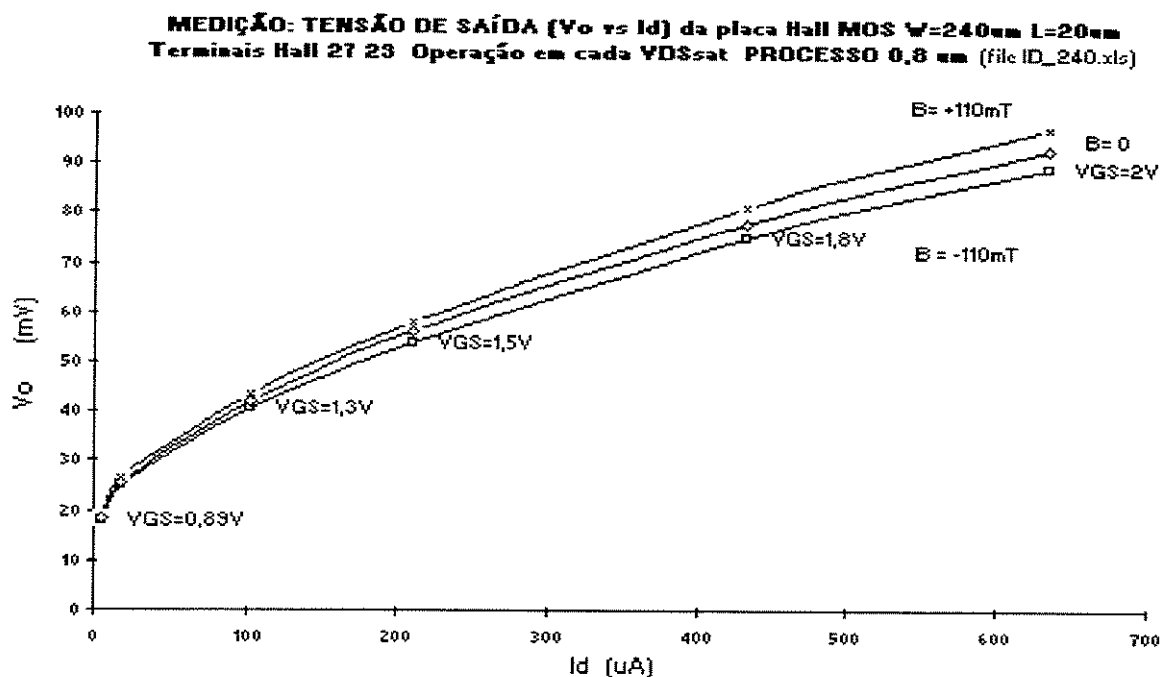


Figura 3.2 Tensão de saída da placa Hall NMOS  $W=240\mu m$   $L=20\mu m$ , região de saturação.

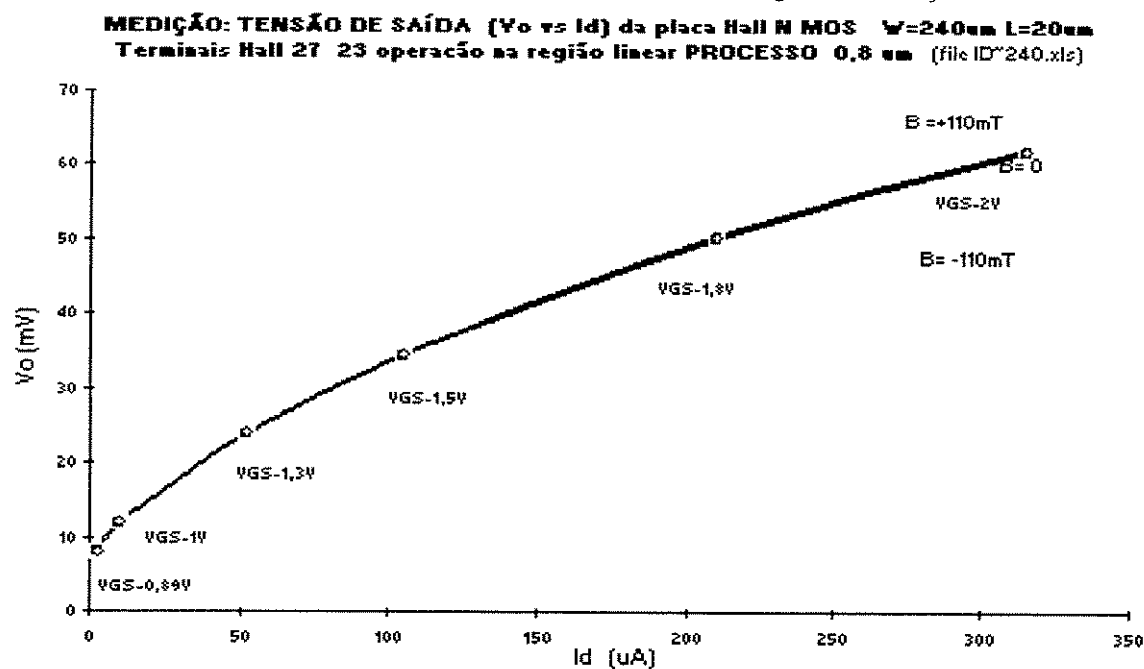


Figura 3.3 Tensão de saída da placa Hall NMOS  $W=240\mu m$   $L=20\mu m$ , região linear

Comparando os dois gráficos da figura 3.2 e 3.3, observa-se que a sensibilidade magnética é maior na região de operação de saturação que na região de operação linear.

Nos dois casos temos mantida constante a aplicação do campo magnético no sentido positivo (+110mT) e outra aplicação no sentido negativo.(-110mT).

### 3.4 MEDIÇÕES DOS DISPOSITIVOS P MOS : MODO CORRENTE HALL -*SPLIT DRAIN*

**Resultados:** No dispositivo P MOS (fig. 3.4 b e fotografias 5.1 e 5.4 , pág. 85 e 86) foi medida a corrente Hall como uma função do campo magnético e os resultados são mostrados para as seguintes condições de medição.

**Condições de medição:**

- Os terminais 18 e 15 foram conectados ao terminal 20 (fonte) para ter um efeito de dimensão L menor. ( $L=48\mu\text{m}$ ) ou estes terminais ficaram soltos para se ter um  $L=200\mu\text{m}$ .
- O *offset* foi ajustado ao nível próximo a zero, no início de cada medição.
- A corrente Hall foi medida à partir das correntes de dreno 1 e de dreno 2 nos terminais 16 e 17 respectivamente.
- A medição foi feita com o campo magnético num sentido (B+) e a outra medição foi no sentido inverso (B-).
- O campo magnético foi gerado e medido simultaneamente com a corrente Hall.
- O circuito de teste faz a conversão da corrente Hall numa tensão de saída.
- As medições foram feitas com campo fraco até 150 mT e outras com campo forte até 1,5 Tesla.
- O sistema de medição foi feito com varredura automática do campo magnético.
- O circuito de teste tem o seguinte esquema básico mostrado na figura 3.4 (a).

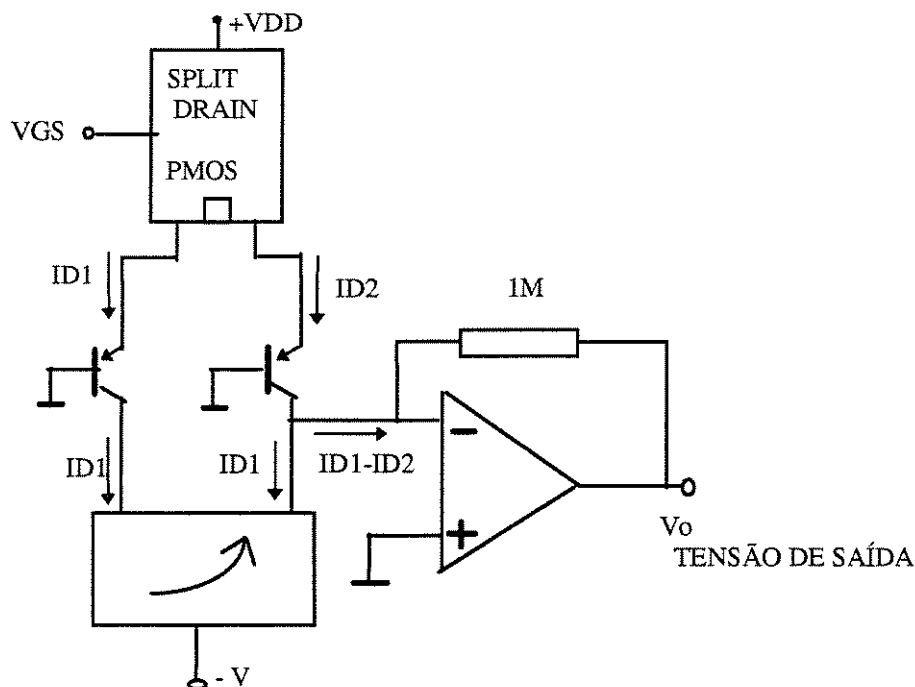


Figura 3.4 (a) Esquema do circuito de teste 1 incluindo um *layout* simplificado do dispositivo PMOS Hall, modo corrente: *Split drain*..

### 3.4.1 GEOMETRIA DO DISPOSITIVO P MOS

A geometria de projeto do dispositivo é mostrada na figura 3.4 (b) como um esquema do *layout* mais detalhado que a mostrada na figura 3.4 (a), para indicar as dimensões que afeta a sensibilidade do dispositivo P MOS como sensor de campo magnético.

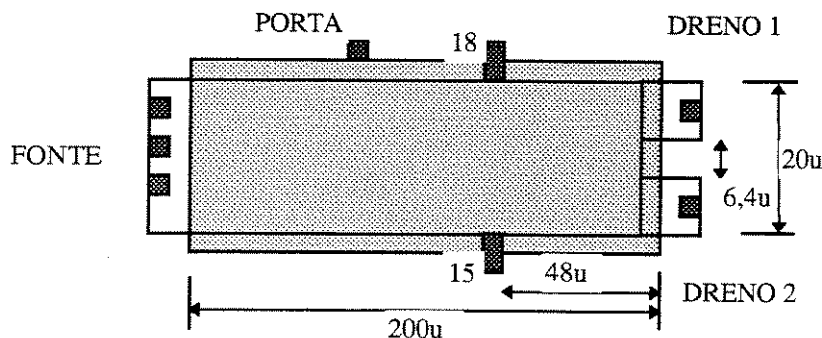


Figura 3.4 (b) Esquema do *layout* do dispositivo PMOS Hall, modo corrente: *Split drain*

O dispositivo PMOS (fig. 3.4-b e fotografias 5.1 e 5.4 , pág. 85 e 86) tem uma razão  $W/L=20\mu\text{m} / 200\mu\text{m}=0,100$  quando os terminais 18 e 15 estão soltos.

O mesmo dispositivo PMOS tem uma razão  $W/L= 20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}=0,416$  quando os terminais 18 e 15 estão ligados à fonte (terminal 20).

O espaçamento entre drenos é de 6,4um . ( vide [31] ).

### 3.4.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA

O circuito de teste faz uma conversão da corrente de saída (ID1-ID2 em nA) numa tensão de saída (mV).

Os miliVolts da tensão de saída podem-se interpretar como os nano-amperes da corrente de saída, devido ao fator de conversão que tem o circuito.

As medições foram feitas com campo magnético forte e depois foram feitas as medições com campo magnético fraco. Portanto, estas ultimas não representam uma ampliação (*zoom*) das primeiras.

Cada medição de tensão de saída mostra seus próprios níveis de *offset*, devido a que no início de cada medição foi necessário ajustar o *offset* para o nível mais próximo de zero.

O seguinte gráfico da figura 3.5 mostra o caso de uma medição de tensão de saída com campo forte (ver item 3.4), para uma tensão de porta  $V_{GS} = -4,0V$  e uma tensão  $V_{DD} = 5,0V$ .

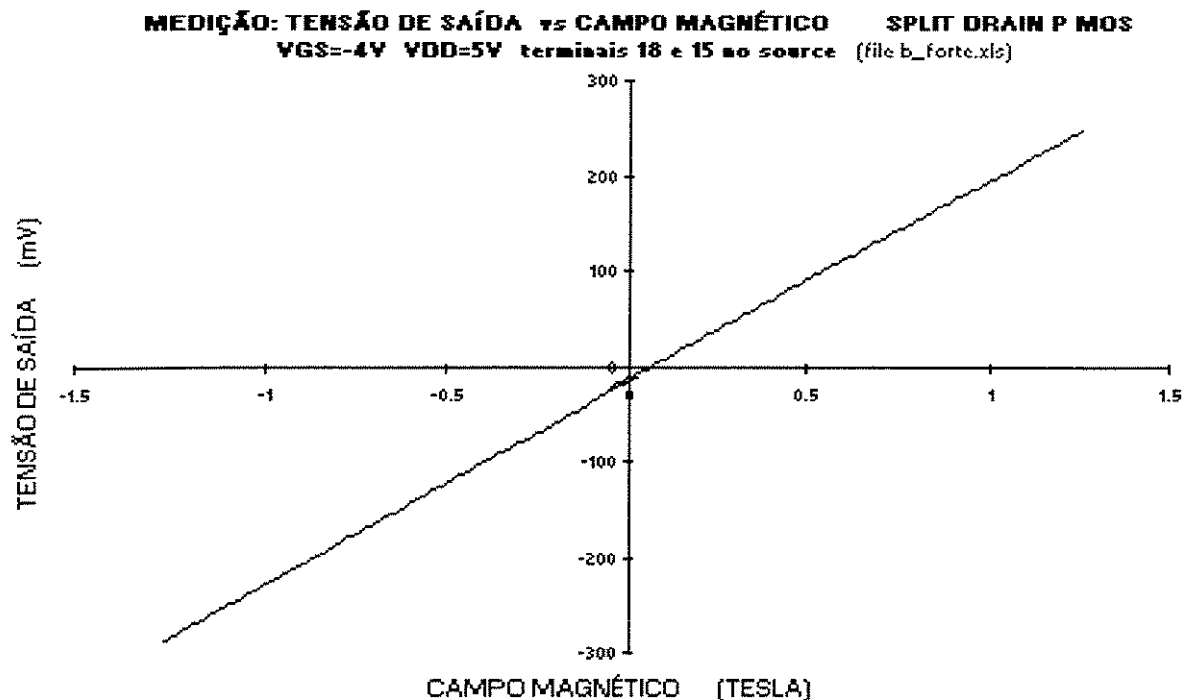


Figura 3.5 Tensão de saída com campo forte do *Split drain*  $W/L = 20\mu m / 48\mu m$ .

Neste gráfico 3.5 temos: uma medição com campo positivo e outra medição com campo negativo.

Observa-se que a tensão de *offset* é negativa em ambas as medições, mas o *offset* também pode ser positivo com valores perto de zero.

### 3.4.3 TENSÃO DE SAÍDA E A VARIAÇÃO DA TENSÃO ENTRE PORTA E FONTE VGS

As medições da tensão de saída, foram feitas para vários valores de tensão de porta, e os resultados (retas) são mostrados em grupos que têm igual tensão VDD e a mesma geometria.

Assim, o gráfico da figura 3.6 apresenta medições da tensão de saída com campo magnético forte e com tensão VDD=5,0V e a razão geométrica W/L=20 $\mu$ m / 48 $\mu$ m.

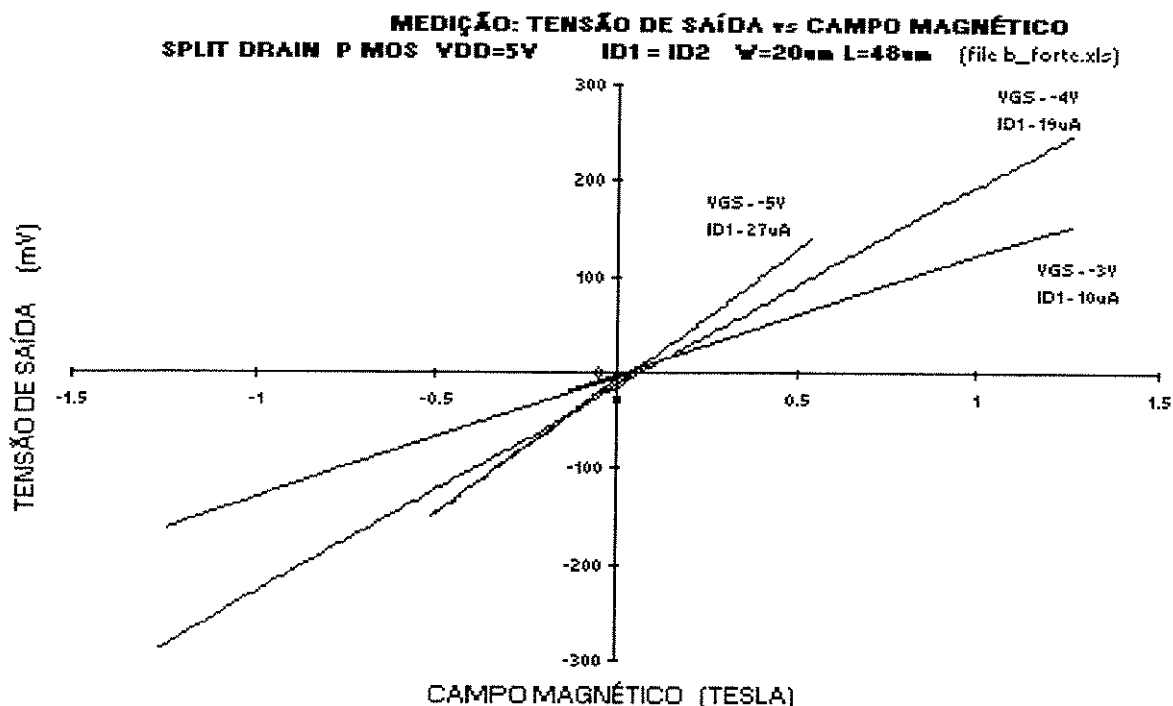


Figura 3.6 Tensão de saída com campo forte do *Split drain* W/L=20 $\mu$ m / 48 $\mu$ m ,VDD=5,0V

Observa-se na figura 3.6 um leque de retas que passam aproximadamente pelo zero.

O gráfico da figura 3.7 apresenta medições da tensão de saída com campo magnético fraco, a mesma tensão  $V_{DD}=5,0V$  e a mesma razão geométrica  $W/L=20\mu m / 48\mu m$ .

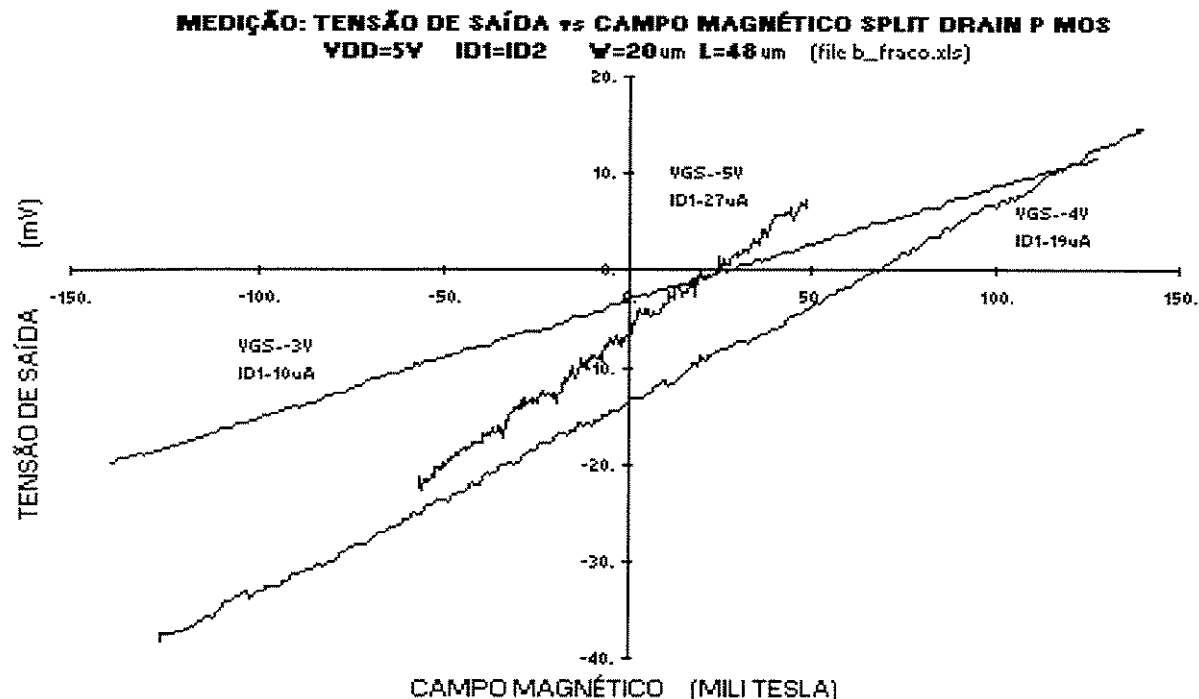


Figura 3.7 Tensão de saída com campo fraco do *Split drain*  $W/L=20\mu m / 48\mu m$ ,  $V_{DD}=5,0V$

Observa-se que este gráfico não é uma ampliação (*Zoom*) do gráfico anterior, porque as medições foram feitas separadamente.

Os níveis de *offset*, agora são mais notáveis devido às escalas menores.



### 3.4.4 TENSÃO DE SAÍDA E A VARIAÇÃO DA TENSÃO *OFFSET*

A tensão de saída corresponde a uma corrente igual à diferença entre as correntes dos drenos (devido ao conversor I-V, ilustrado na figura 3.8, que esta na saída do circuito de teste). [21]e[24].

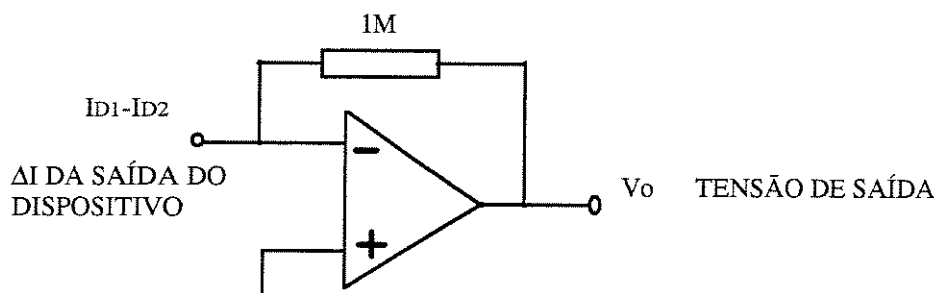


Figura 3.8 Conversor I-V na saída do circuito de teste.

Esta corrente diferencial, deve ser nula para campo magnético zero, mas se houver um nível de corrente, esta é a chamada corrente de *offset*.

Em geral temos:

$$\begin{array}{l} \text{Sem campo} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_o = I_{D1} - I_{D2} \\ I_o = I_{OFFSET} \end{array} \right. \end{array} \quad \begin{array}{l} (3.1) \\ (3.2) \end{array}$$

Como já foi observado, mesmo ajustando o circuito de teste para anular o *offset*, sempre temos um nível de *offset*, que deverá ser o mínimo possível.

Se aplicamos campo magnético (sinal de entrada) ao dispositivo, deve aparecer a corrente Hall (sinal de saída) somado ao mesmo nível de corrente de *offset* (sem campo magnético).

$$\text{Aplicando campo} \longrightarrow I_o = I_{HALL} + I_{OFFSET} \quad (3.3)$$

O gráfico da figura 3.9 mostra duas medições : Uma com um *offset* muito pequeno (1 nA) e outra medição feita com um *offset* maior (36nA) .

Verificamos na figura 3.9 que as duas medições, uma sem *offset* e outra com *offset*, têm as mesmas inclinações (retas paralelas) o que significa que as duas têm a mesma sensibilidade absoluta.

Então, a variação da corrente ou tensão de *offset* não afeta a informação (campo magnético) contida na corrente Hall.

#### Cálculo do fator angular

Para calcular o fator angular, ou equação das retas, usamos as retas de referência a partir dos pontos experimentais extremos.

Os cálculos foram realizados com a mesma ferramenta Excel e no seguinte gráfico da figura 3.10 apresentamos os resultados dos cálculos do fator angular.

Verifica-se que as retas são praticamente paralelas e os valores do fator angular são os mesmos com tolerâncias pequenas e aceitáveis.

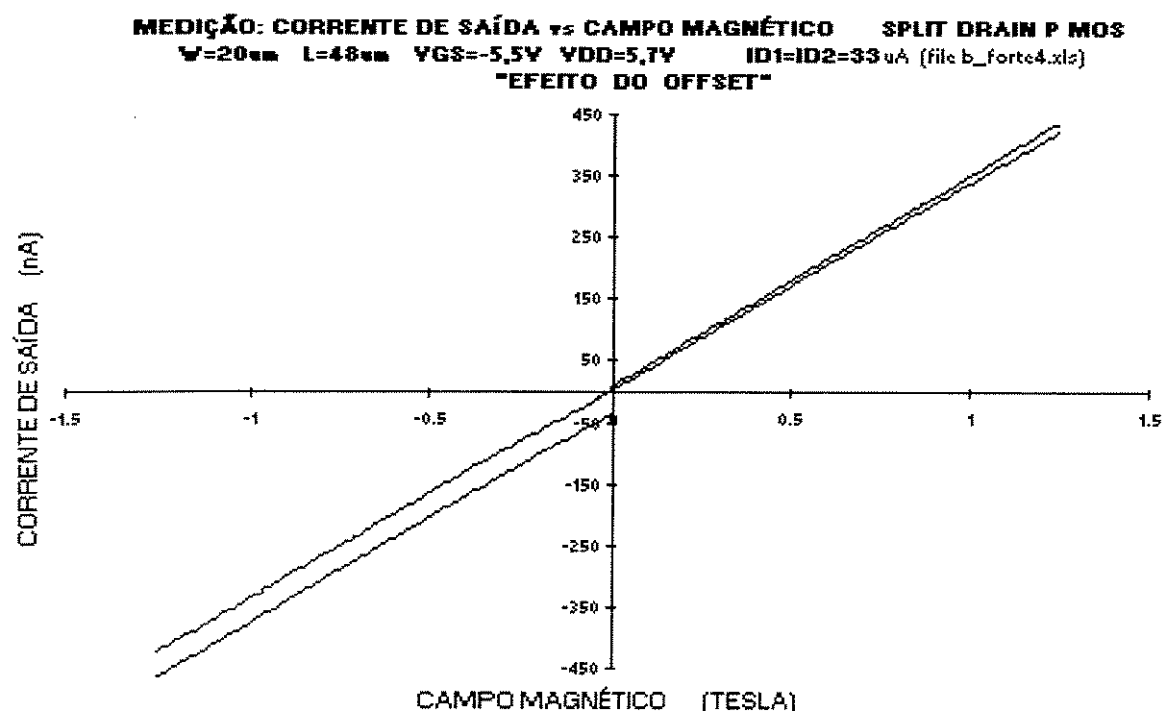


Figura 3.9 Duas medições de corrente de saída, uma sem *offset* e outra com *offset*

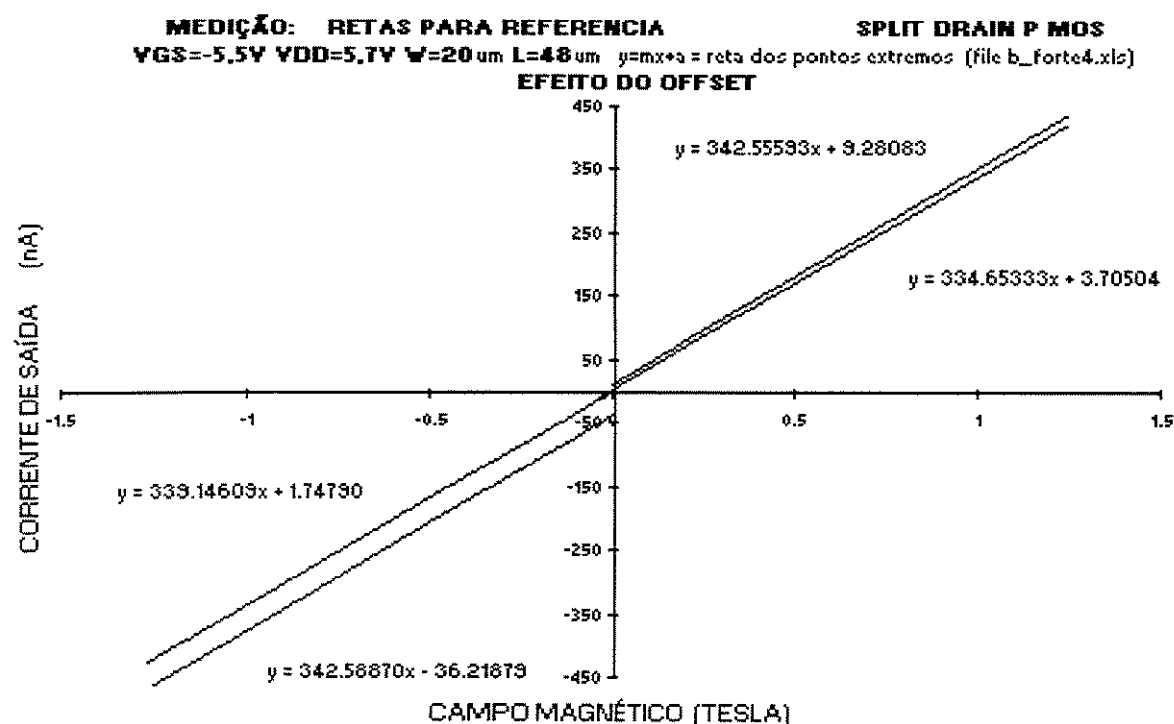


Figura 3.10 Resultados dos cálculos do fator angular, na curva sem *offset* e com *offset*.

### 3.4.5 CORRENTE HALL E A VARIAÇÃO DA TENSÃO DE PORTA.

Se subtraímos o valor do *offset* (assumido constante) de todos os valores de tensão de saída de uma reta, esta reta vai deslocar-se passando pelo zero. Estes valores de tensão sem *offset* (em mV) representam também a corrente diferencial sem *offset*, isto é, a corrente Hall.

Logo, as medições da corrente Hall, foram obtidas para vários valores de tensão de porta, e os resultados (retas deslocadas) são mostrados em grupos que têm igual tensão VDD e a mesma geometria.

Assim, o seguinte gráfico 3.11 apresenta medições da corrente Hall com campo magnético forte, com tensão VDD=5,0V e a razão geométrica W/L=20 $\mu$ m / 48 $\mu$ m.

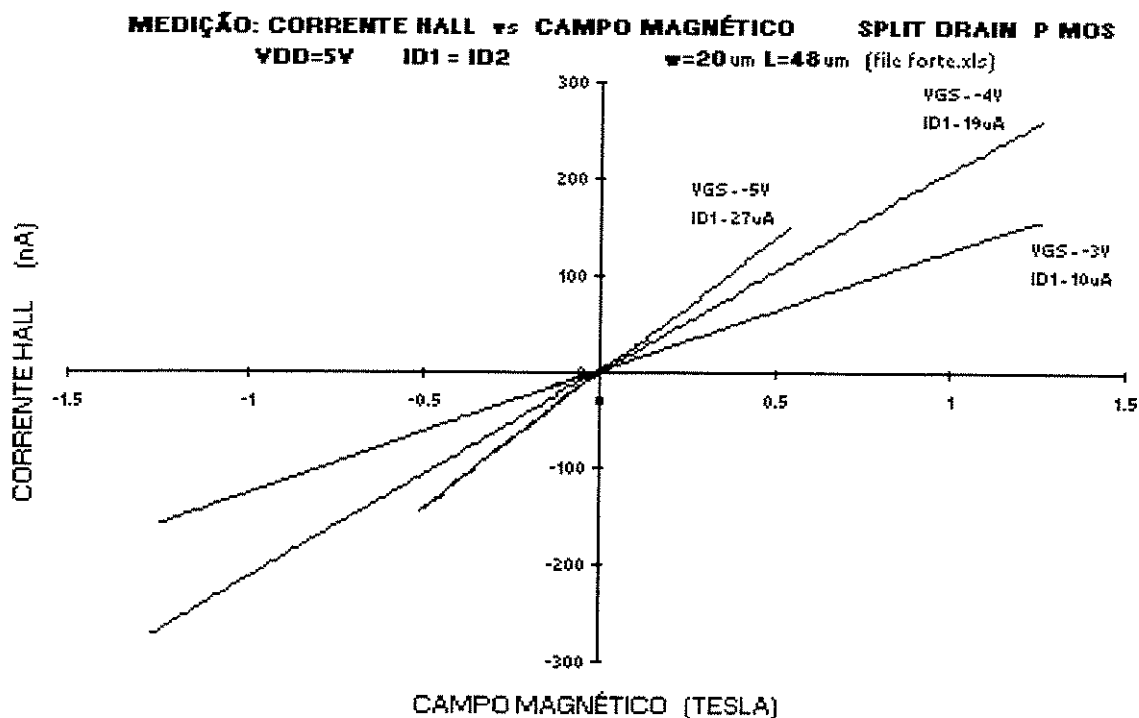


Figura 3.11 Corrente Hall com campo forte do *Split drain* W/L=20 $\mu$ m / 48 $\mu$ m, VDD=5,0V

Uma comparação com o gráfico anterior de tensão de saída com campo forte, mostra que as curvas são as mesmas e só temos um deslocamento das curvas porque subtraímos o valor do *offset*.

O seguinte gráfico da figura 3.12, apresenta medições da corrente Hall com campo magnético fraco, com a mesma tensão VDD=5,0V e a mesma razão geométrica W/L=20 $\mu$ m / 48 $\mu$ m.

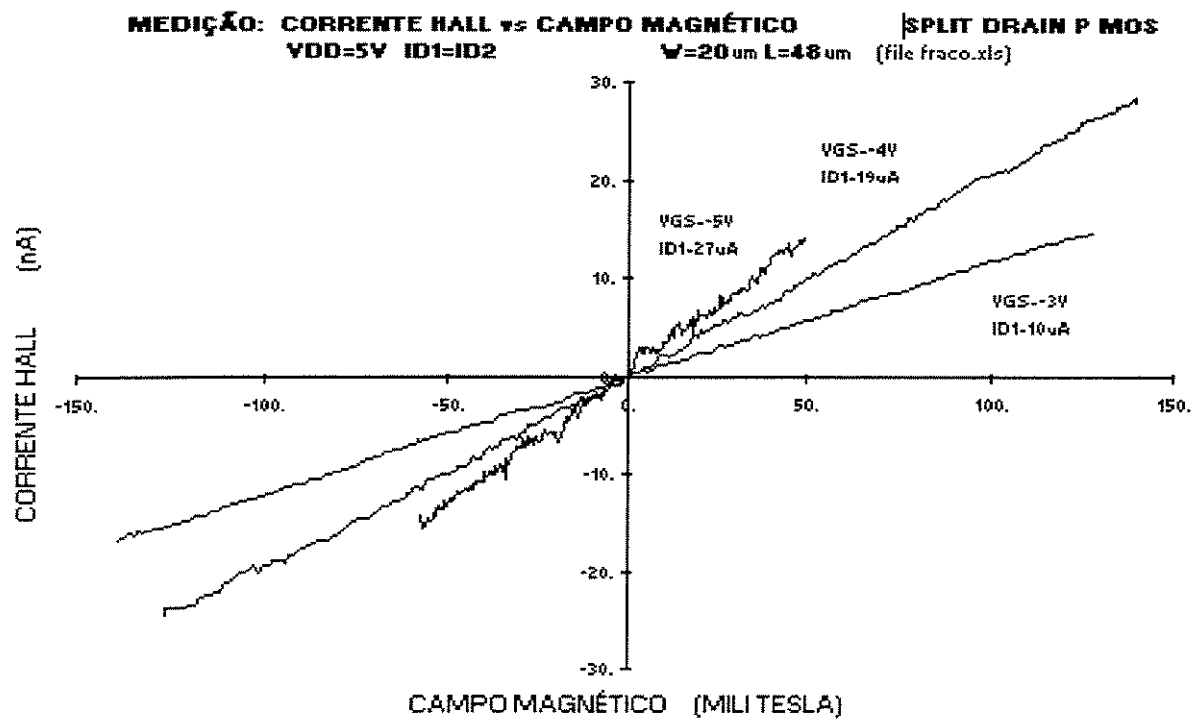


Figura 3.12 Corrente Hall com campo fraco do *Split drain* W/L=20um /48um, VDD=5,0V

Da mesma maneira que no caso anterior, observa-se que todas as curvas passam pelo zero.

### 3.4.6 LINEARIDADE : RETAS PARA REFERÊNCIA E CÁLCULO DE SUAS EQUAÇÕES.

A linearidade ideal é uma reta, por esta razão foram traçadas as retas que passam pelos pontos extremos com suas respectivas equações.

Observa-se que cada medição ou cada curva experimental foi construída com muitos pontos, na faixa de 200 até 400 pontos ou pares de valores. Isto é, valores de campo magnético e de tensão ou corrente.

Assim, o seguinte gráfico da figura 3.13 apresenta medições da corrente Hall com campo magnético forte e com tensão  $V_{DD}=5,0V$  e a razão geométrica  $W/L=20\mu m / 48\mu m$ .

As equações das retas foram calculadas e traçadas com ajuda da ferramenta Excel.

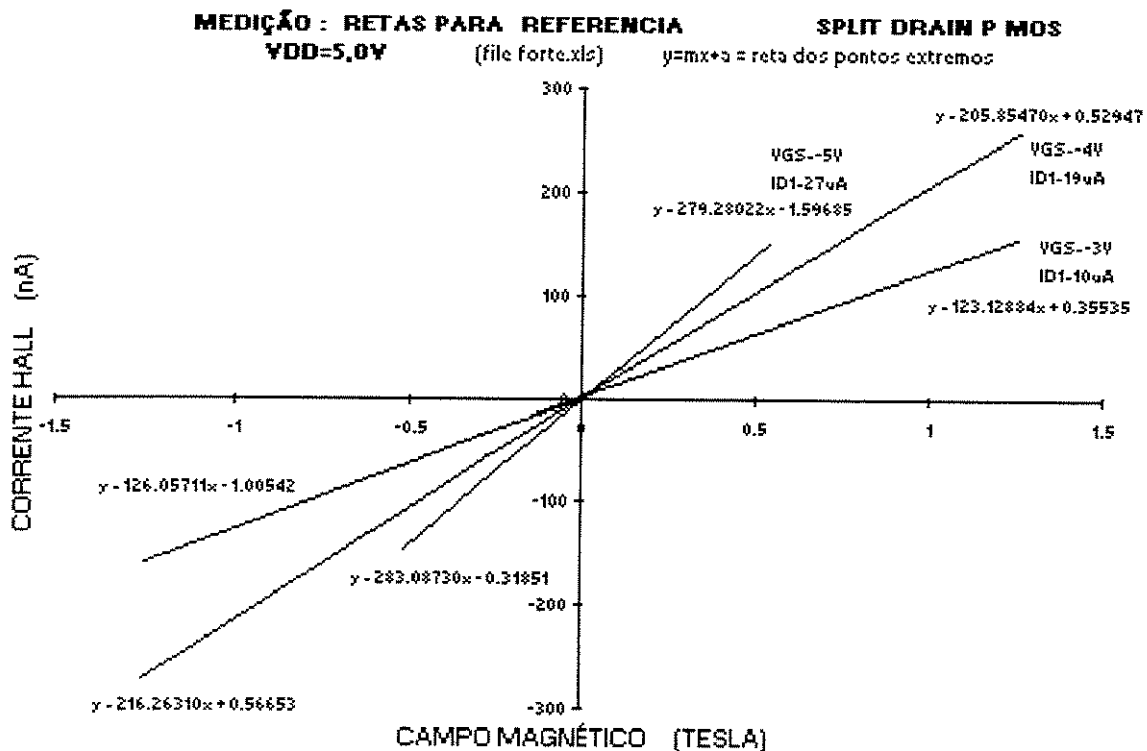


Figura 3.13 Resultados dos cálculos das equações das retas de referência, com campo forte

As retas de referência passam praticamente pelo zero, dentro de uma tolerância de 1nA, sendo que a curva experimental passa pelo zero com maior precisão.

As equações ainda mostram que o termo do *offset* é desprezível.

O seguinte gráfico da figura 3.14 , apresenta medições da corrente Hall com campo magnético fraco, com a mesma tensão  $V_{DD}=5,0V$  e a mesma razão geométrica  $W/L=20\mu m / 48\mu m$ .

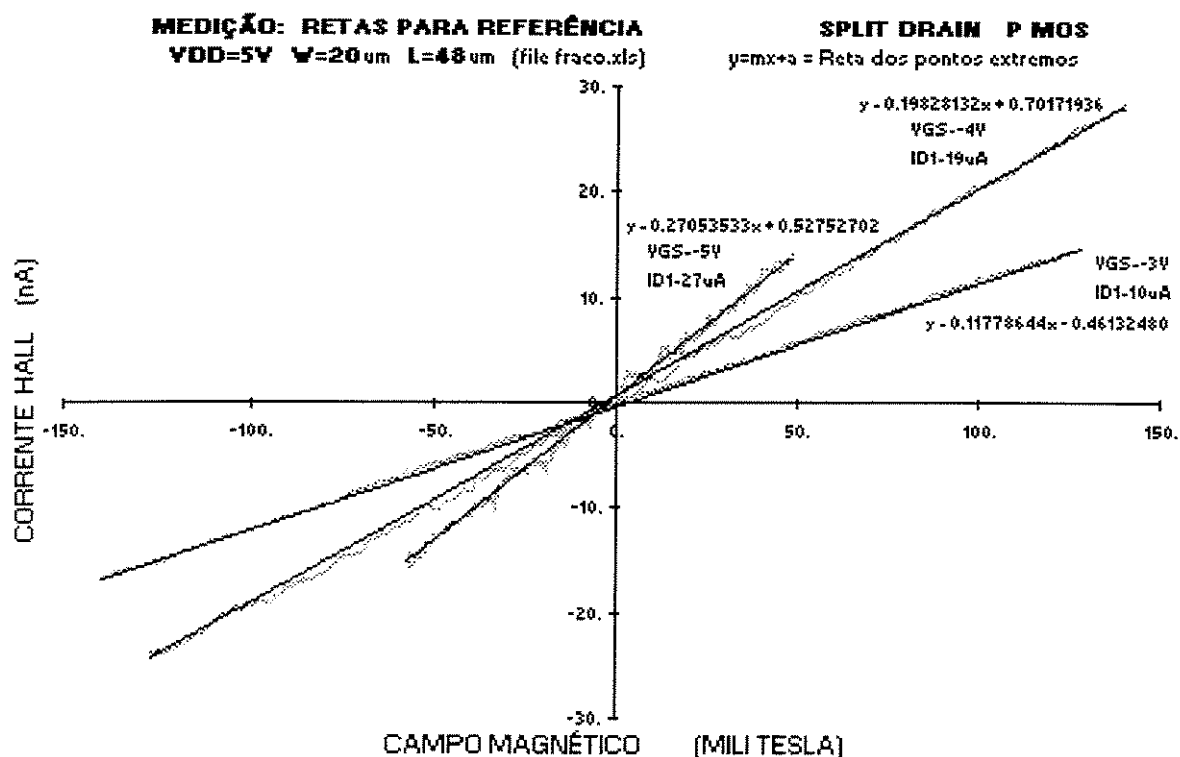


Figura 3.14 Resultados dos cálculos das equações das retas de referência, com campo fraco

Aqui também, as retas de referência passam praticamente pelo zero, dentro de uma tolerância de 1nA, sendo que a curva experimental passa pelo zero com maior precisão.

As inclinações ou fatores angulares obtidos, são praticamente os mesmos que as mostrados para o campo magnético forte, o que indica uma boa correspondência entre os valores experimentais.

verifica-se que:

- a corrente Hall **I<sub>HALL</sub>** aumenta com a tensão VGS.
- a corrente Hall varia linearmente com o campo B.

Concluimos que as medições realizadas concordam plenamente com a teoria.

### 3.4.7 LINEARIDADE : ERRO DE CORRENTE HALL

O erro de linearidade foi calculado com referência as retas traçadas com os pontos extremos das curvas experimentais.

Logo : **ERRO** = reta que passa pelos extremos - medidas

O valor pode ser tensão em **mv** ou corrente em **nA**, porque existe uma correspondência bem estabelecida. Os seguintes três gráficos das figuras 3.15 3.16 e 3.17, apresentam medições do erro de linearidade ou erro de corrente Hall com campo magnético forte e com a tensão  $V_{DD}=5,0V$  e a razão geométrica  $W/L=20\mu m / 48\mu m$ .

Em cada gráfico temos duas curvas : Uma para campo positivo e a outra para campo negativo, e ambas correspondendo a uma tensão  $V_{GS}$ .

As tensões de  $V_{GS}$  são:  $-5,0V$  -  $4,0V$  e  $-3,0V$ , logo temos seis curvas no total.

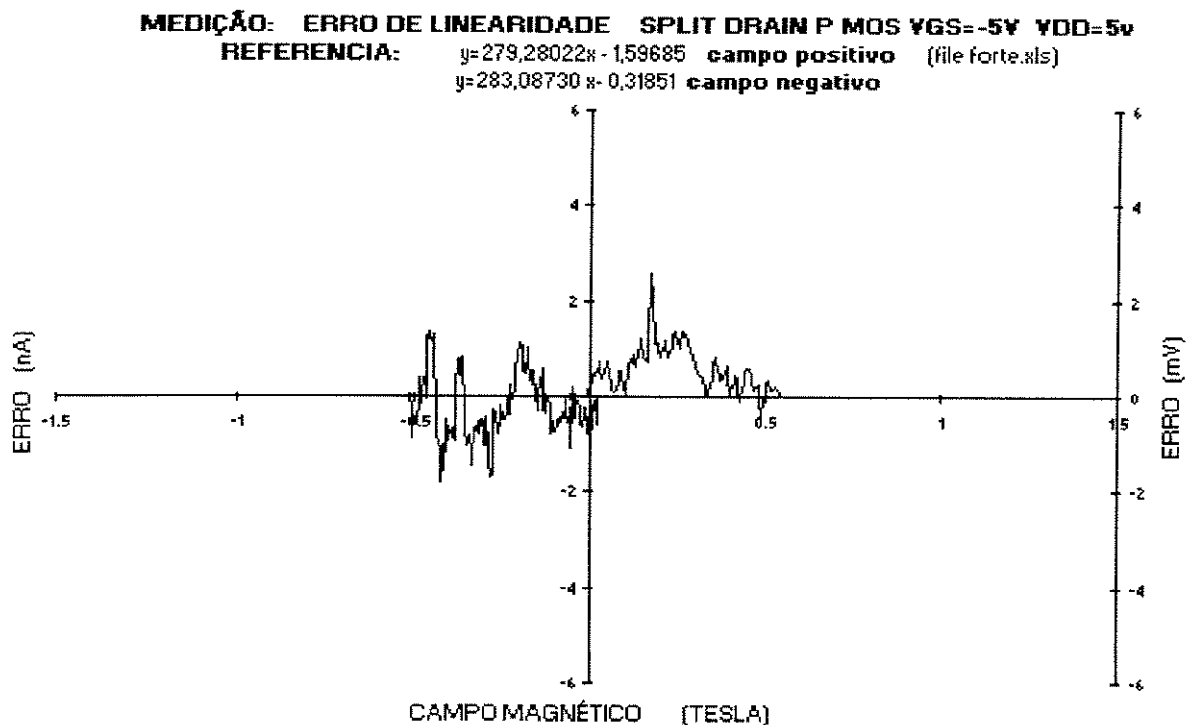


Figura 3.15 Erro de linearidade com campo forte e com  $V_{GS} -5,0V$   $W/L=20\mu m / 48\mu m$ .

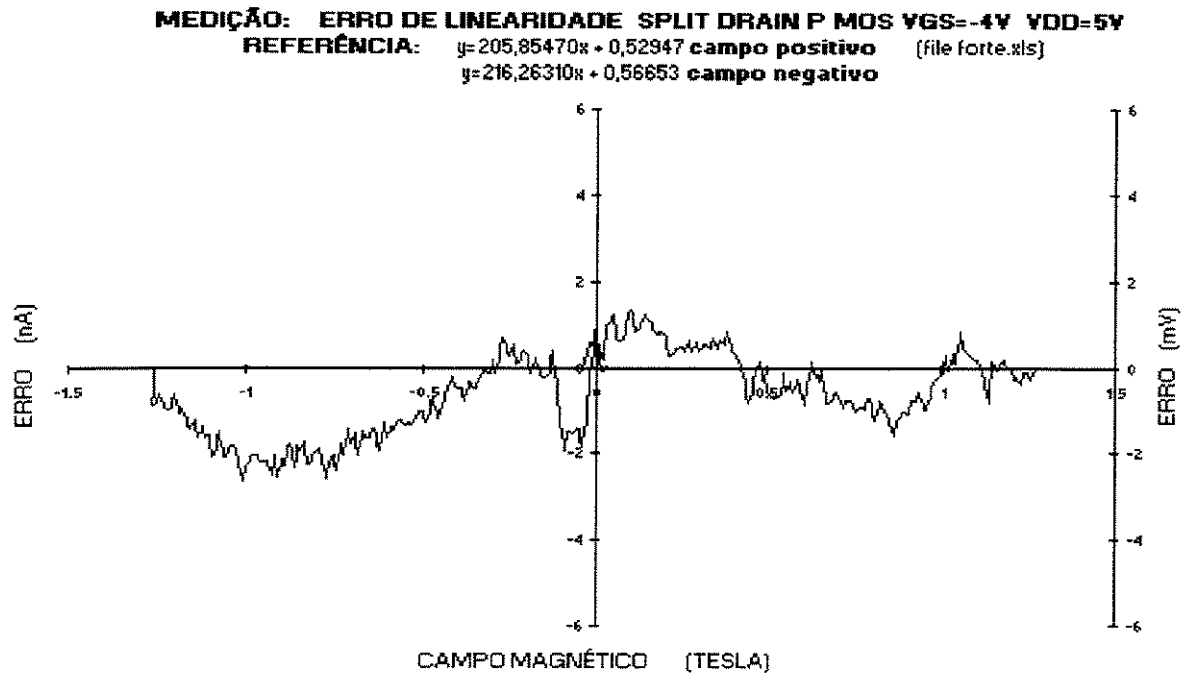


Figura 3.16 Erro de linearidade com campo forte e com VGS -4,0V W/L=20um / 48um .

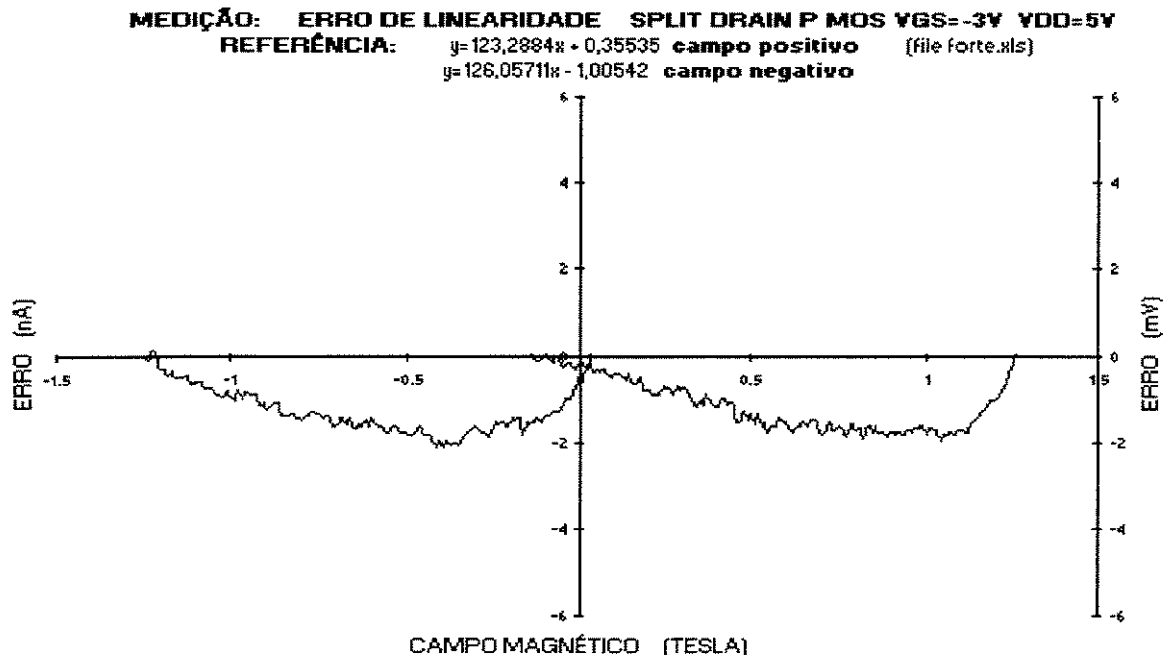


Figura 3.17 Erro de linearidade com campo forte e com VGS -3,0V W/L=20um / 48um .

Observando as figuras 3.15, 3.16 e 3.17, a placa de teste tem um deslocamento máximo da corrente de offset de  $\pm 2\text{nA}$  que acontece nos 10 minutos que dura a medição.

As três curvas traçadas apresentam uma leve correlação do erro (ruído) com a tensão VGS, mas, nenhuma correlação com o campo magnético.



Os seguintes três gráficos das figuras 3.18 3.19 3.20 , apresentam medições do erro de linearidade com campo magnético fraco e com a tensão VDD=5,0V e a razão geométrica W/L=20um / 48um .

**MEDIÇÃO: ERRO DE LINEARIDADE SPLIT DRAIN P MOS VGS=-5,0V VDD=5,0V**

**REFERÊNCIA:**  $y = 0,27053533x + 0,52752702 = \text{RETA DOS PONTOS EXTREMOS}$

(file fraco.XLS)

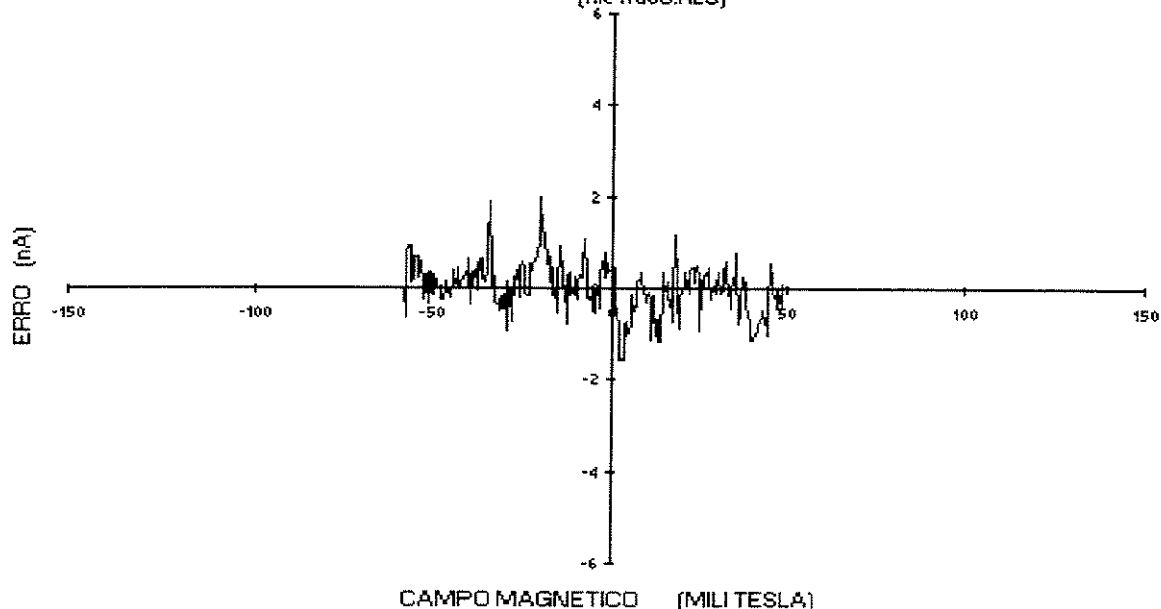


Figura 3.18 Erro de linearidade com campo fraco e com VGS -5,0V W/L=20um / 48um .

**MEDIÇÃO: ERRO DE LINEARIDADE SPLIT DRAIN P MOS VGS=-4,0V VDD=5,0V**

**REFERÊNCIA:**  $y = 0,13828132x + 0,70171936 = \text{RETA DOS PONTOS EXTREMOS}$  (file fraco.xls)

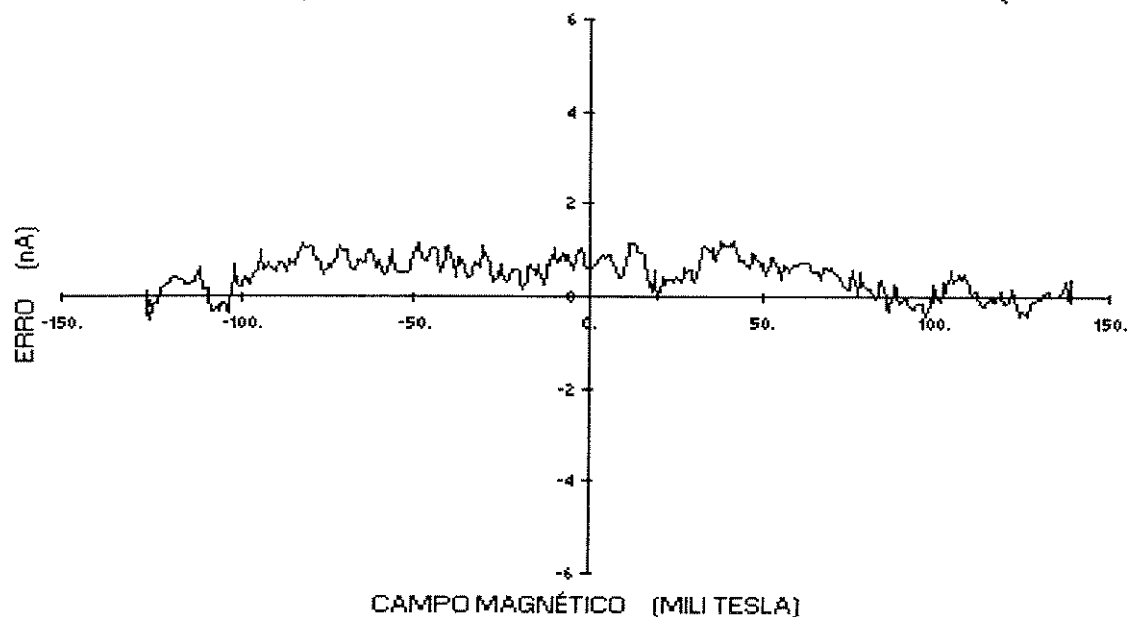


Figura 3.19 Erro de linearidade com campo fraco e com VGS -4,0V W/L=20um / 48um .

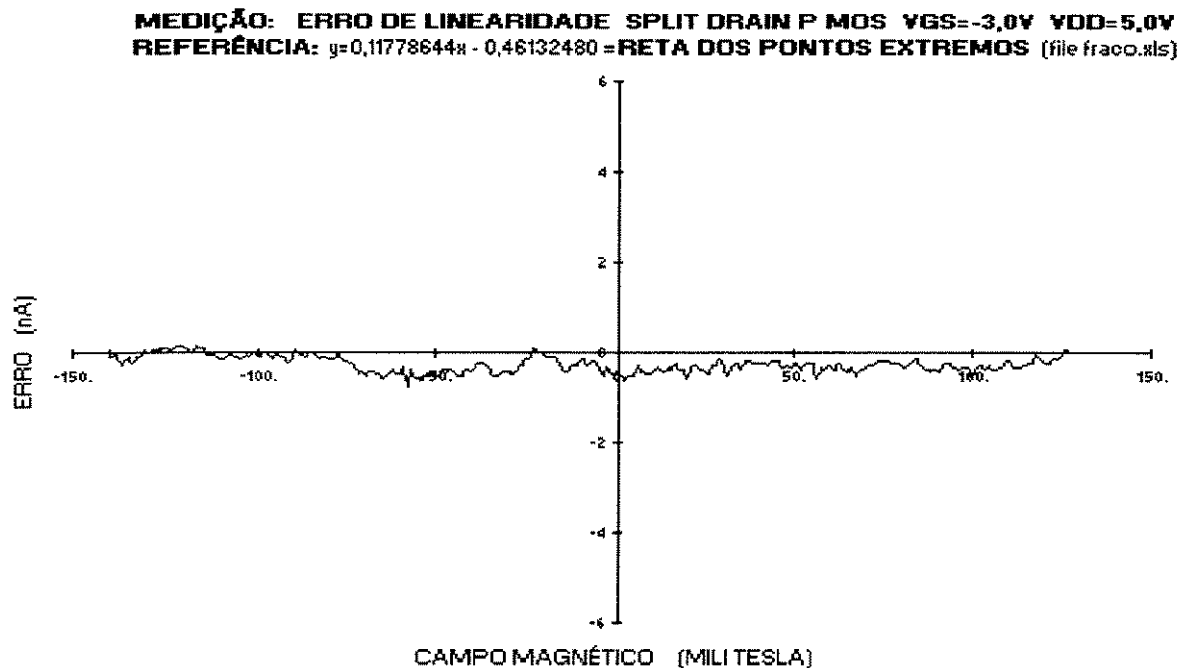


Figura 3.20 Erro de linearidade com campo fraco e com VGS -3,0V W/L=20 $\mu$ m / 48 $\mu$ m .

Verifica-se, para campo fraco, que o dispositivo apresenta aproximadamente:

um erro máximo de  $\pm 2$ nA para VGS=-5,0V

um erro máximo de  $\pm 1$ nA para VGS=-4,0V

um erro máximo de  $\pm 0,5$ nA para VGS=-3,0V

Portanto, as três curvas traçadas apresentam uma leve correlação do erro (ruído) com a tensão VGS, mas, nenhuma correlação com o campo magnético.

Logo, podemos afirmar que o verdadeiro erro de linearidade do dispositivo P MOS é menor que a tolerância dos circuitos de teste (placa) e dos instrumentos de medição.

Observando as figuras 3.18, 3.19 e 3.20, a placa de teste tem um deslocamento máximo da corrente de offset de  $\pm 1$ nA que acontece nos 10 minutos que dura a medição.

### 3.4.8 SENSIBILIDADE ABSOLUTA

A sensibilidade absoluta é a corrente Hall obtida por cada unidade de campo magnético aplicado, expressa em : **nano amperes / Tesla.**

$$S_{abs} = \text{corrente Hall} / \text{campo magnético} \quad (3.4)$$

$$S_{abs} = I_{HALL} / B \quad (3.5)$$

Onde a corrente Hall é como foi definida em 2.3.5 :  $I_{HALL} = I_{D1} - I_{D2}$

Portanto, o coeficiente angular da reta de referência que relaciona a corrente Hall com o campo B, é a sensibilidade absoluta.

### 3.4.9 CAMPO MÍNIMO DETETÁVEL

Determina-se o campo mínimo detetável, comparando o valor da corrente Hall medida com a amplitude do erro associado às medidas.

Para obter o campo mínimo detetável com maior estabilidade, foram selecionados pares de dados, onde o sinal fosse maior que o erro ( 3 ou 5 vezes) e verificado o campo correspondente. (na ordem de alguns mTesla) .

### 3.4.10 SENSIBILIDADE RELATIVA

A sensibilidade relativa é definida como sendo a razão corrente Hall / corrente total de dreno , obtida em cada unidade de campo magnético aplicado, expressa em porcentagem por Tesla.

$$S_r = \text{corrente Hall} / ((\text{corrente total de dreno}) B) \quad (3.6)$$

$$S_r = I_{HALL} / ( (I_{D1}+I_{D2}) B) \quad (3.7)$$

$$\text{Onde: Corrente Hall relativa} = I_{HALL} / (I_{D1}+I_{D2}) \quad (3.8)$$

A sensibilidade absoluta e a sensibilidade relativa são mostrados a seguir juntamente com a sensibilidade de referência, para cada tensão VGS.

Isto é possível porque para cada tensão VGS temos um valor constante de corrente total de dreno, logo a curva da sensibilidade relativa é a mesma, só muda a escala que é dividida pelo  $(I_{D1}+I_{D2})$ .

Os seguintes três gráficos das figuras 3.21 3.22 e 3.23 ,apresentam medições da sensibilidade com campo magnético forte e com a tensão VDD=5,0V. A razão geométrica W/L=20 $\mu$ m / 48 $\mu$ m .

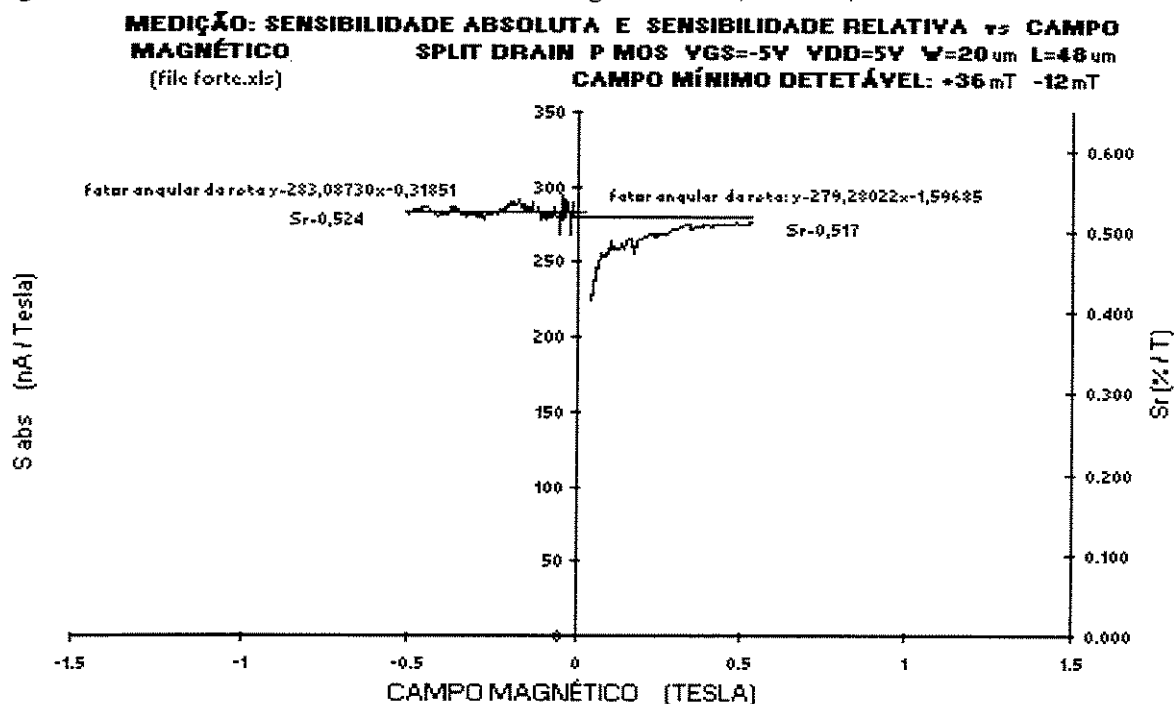


Figura 3.21 Sensibilidade com campo forte do *Split drain* VGS -5V W/L=20 $\mu$ m /48 $\mu$ m .

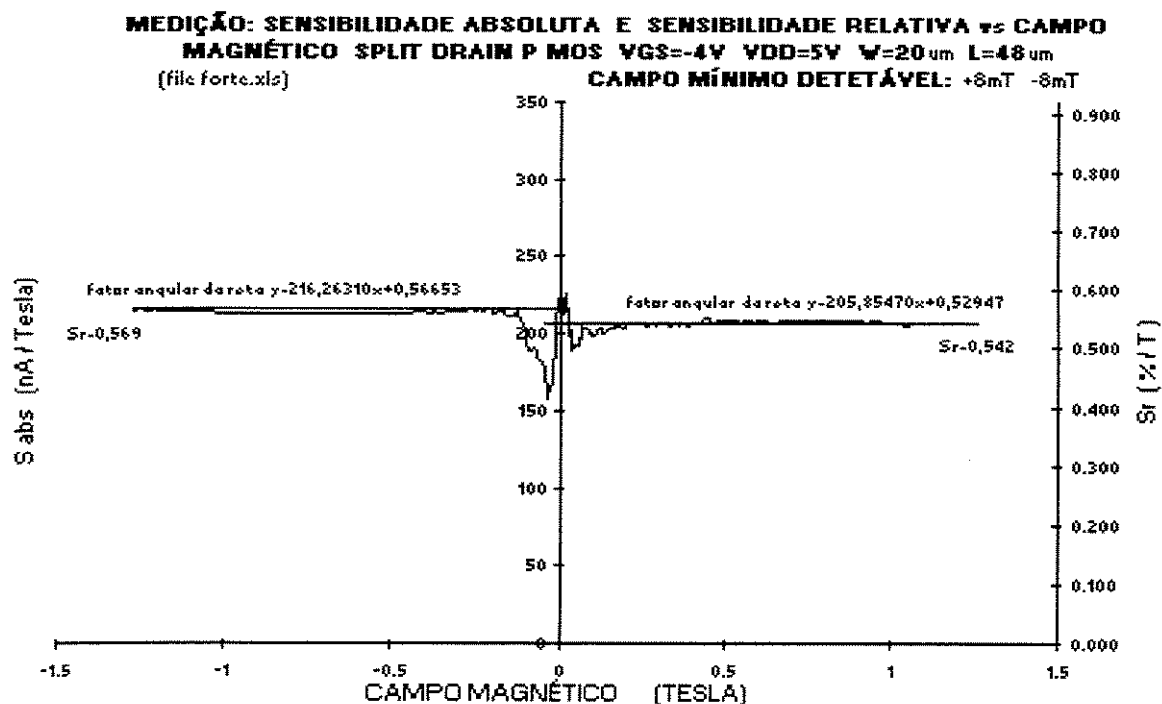


Figura 3.22 Sensibilidade com campo forte do *Split drain* VGS -4V W/L=20 $\mu$ m /48 $\mu$ m .

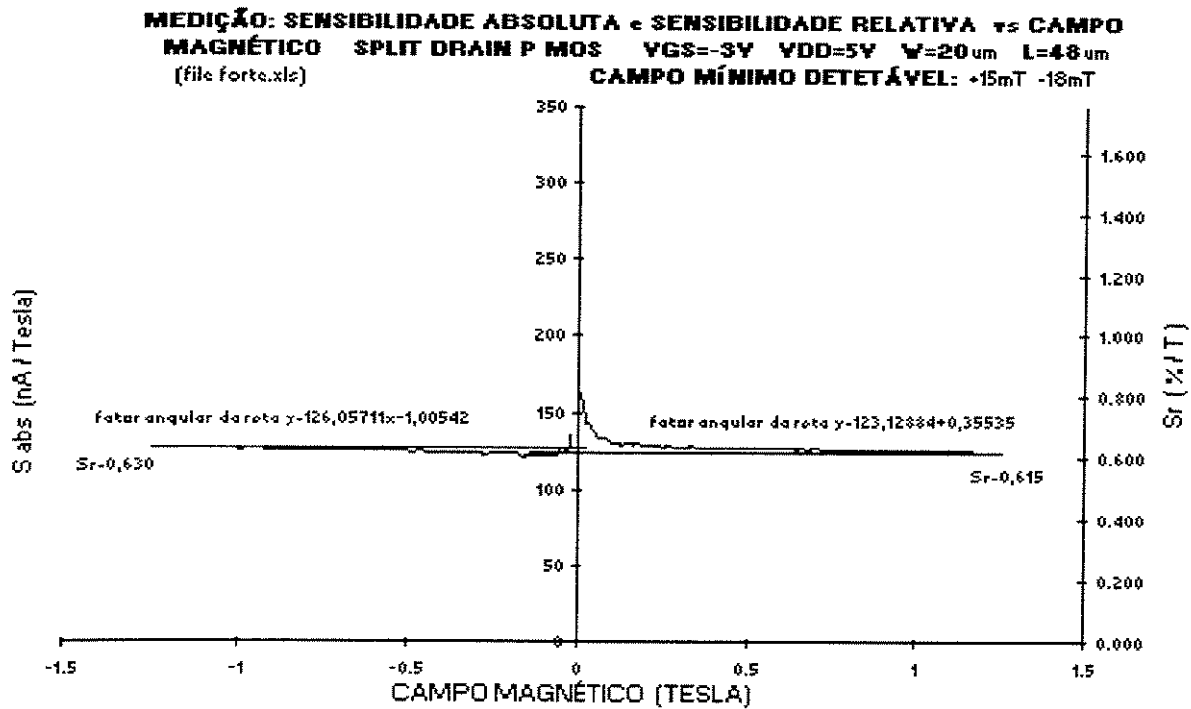


Figura 3.23 Sensibilidade com campo forte do *Split drain* VGS -3V W/L=20um /48um

verifica-se que:

- a sensibilidade absoluta ( $S_{abs}$ ) aumenta com a tensão VGS.

Isto, concorda com a análise (equação 2.43), onde  $S_{abs}$  é proporcional a  $I_D$

$$S_{abs} = \frac{I_H}{B} = \frac{I_{D1} - I_{D2}}{B} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G I_D \quad (3.9)$$

- a sensibilidade relativa ( $S_r$ ) praticamente é constante, concordando com a análise (equação 2.45) que diz que independe de  $I_D$ .

$$S_r = \frac{I_H}{I_D} \frac{1}{B} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G \quad (3.10)$$

Mas observa-se que aumenta debilmente quando diminui tensão VGS

- O campo mínimo detetável encontrado esta na faixa de 8 mili Tesla até 36 mili Tesla.

- A sensibilidade de referência mostra que a sensibilidade perde estabilidade, perto do campo mínimo detetável.

A polarização ótima é próxima da região de saturação, porque permite obter alta sensibilidade absoluta.

Os seguintes três gráficos das figuras 3.24 3.25 e 3.26 apresentam medições da sensibilidade com campo magnético fraco e com a mesma tensão VDD=5,0V. Mantém-se a mesma razão geométrica W/L=20um / 48um.

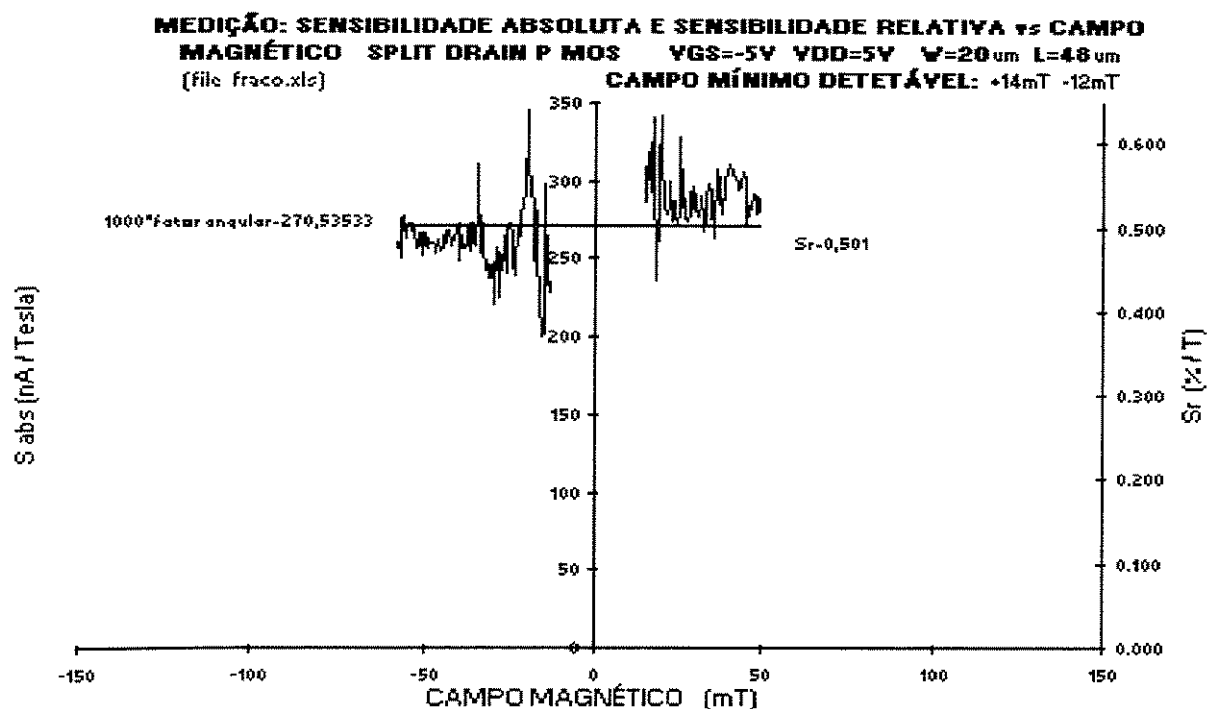


Figura 3.24 Sensibilidade com campo fraco do *Split drain* VGS -5V W/L=20um /48um .

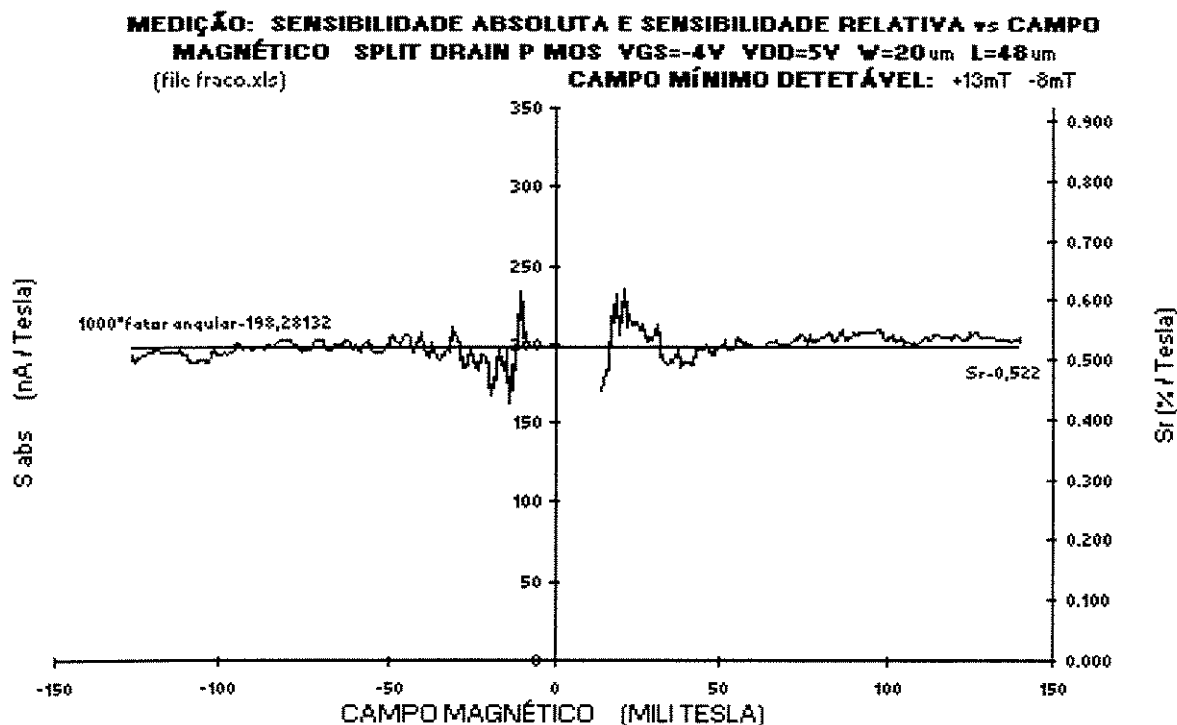


Figura 3.25 Sensibilidade com campo fraco do *Split drain* VGS -4V W/L=20um /48um .

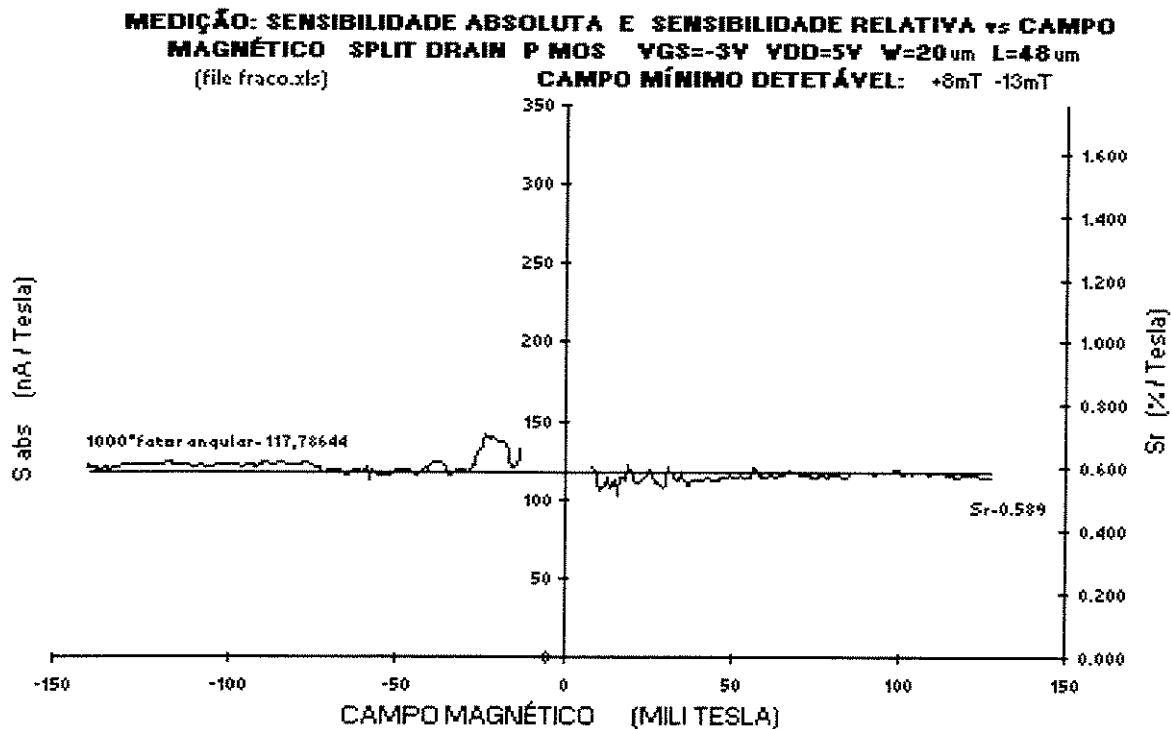


Figura 3.26 Sensibilidade com campo fraco do *Split drain* VGS -3V W/L=20um /48um

Verifica-se novamente que:

- a sensibilidade absoluta ( $S_{abs}$ ) aumenta com a tensão VGS.
  - a sensibilidade relativa ( $S_r$ ) praticamente é constante com a tensão VGS.
  - o campo mínimo detetável encontrado esta na faixa de 8 mili Tesla até 14 mili Tesla.
  - A sensibilidade de referência mostra que a sensibilidade perde estabilidade, perto do campo mínimo detetável.
- Comparando as medições de sensibilidade com campo forte e com campo fraco verificamos que os resultados praticamente são os mesmos.

### 3.4.11 CORRENTE HALL E A VARIAÇÃO DA TENSÃO VDS

As medições apresentadas até aqui, foram feitas com  $V_{DS}=4,3\text{ V}$  e agora mostraremos as medições com  $V_{DS}=5,0\text{ V}$  para comparar seus efeitos.

Para  $V_{GS}=5,0\text{ V}$  a tensão  $V_{DS}$  de saturação é:  $V_{DSsat}=V_{GS}-V_T=5,0-0,8=4,2\text{ V}$  logo estas duas polarizações, com tensão  $V_{DS}$  alto, estão perto da saturação para  $V_{GS}=5,0\text{ V}$  ou na região de saturação do dispositivo para as outras tensões de  $V_{GS} < 5,0\text{ V}$ .

Logo depois, são apresentadas as medições com  $V_{DS}=1,17\text{ V}$ , que é uma tensão  $V_{DS}$  pequena, menor que  $V_{GS}-V_T = 2,0-0,8=1,2\text{ V}$  o que garante que as polarizações estão na região linear do dispositivo para a faixa de tensão  $V_{GS}$  de  $5,0\text{ V}$  até  $2,0\text{ V}$ .

#### 3.4.11.1 MEDIÇÕES NA REGIÃO DE SATURAÇÃO

Devido ao circuito, nos temos que:  $V_{DD}=V_{DS}+0,7\text{ V}$

As medições da corrente Hall, foram feitas para dois valores de  $V_{DD}$ : com  $V_{DD}=5,0\text{ V}$  e com  $V_{DD}=5,7\text{ V}$

O primeiro caso já foi apresentado e equivale a  $V_{DS}=4,3\text{ V}$ , e o segundo caso equivale a  $V_{DS}=5,0\text{ V}$ .

Assim, o gráfico da figura 3.27 apresenta medições da corrente Hall com campo magnético forte e com tensão  $V_{DD}=5,7\text{ V}$  e a razão geométrica  $W/L=20\mu\text{m}/48\mu\text{m}$ .

A figura 3.28 apresenta as retas de referência e o resultado do cálculo das equações das retas de referência.

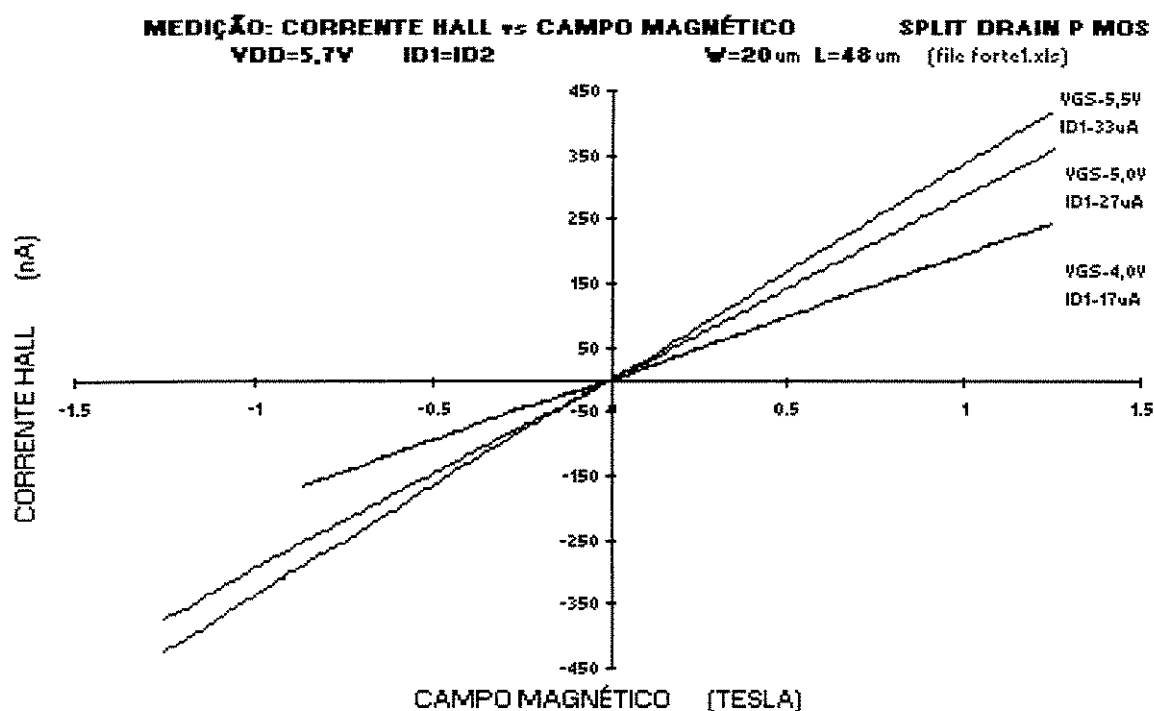


Figura 3.27 Corrente Hall com campo forte do Split drain  $W/L=20\mu\text{m}/48\mu\text{m}$ ,  $V_{DD}=5,7\text{ V}$ .



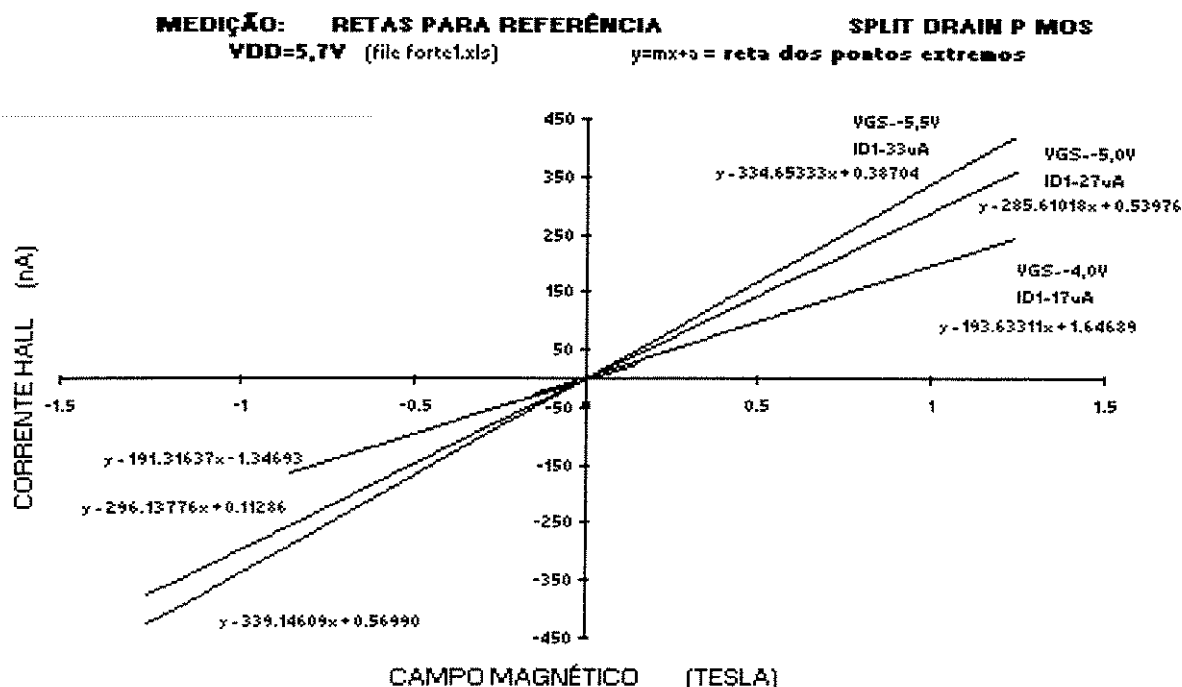


Figura 3.28 Equações das retas de referência, com campo forte W/L=20um /48um, VDD=5,7V.

Os seguintes gráficos das figuras 3.29 3.30 e 3.31 apresentam a sensibilidade obtida com VDD=5,7V , com campo forte e com VGS= -5,5V - 5,0V e -4,0 V respectivamente.

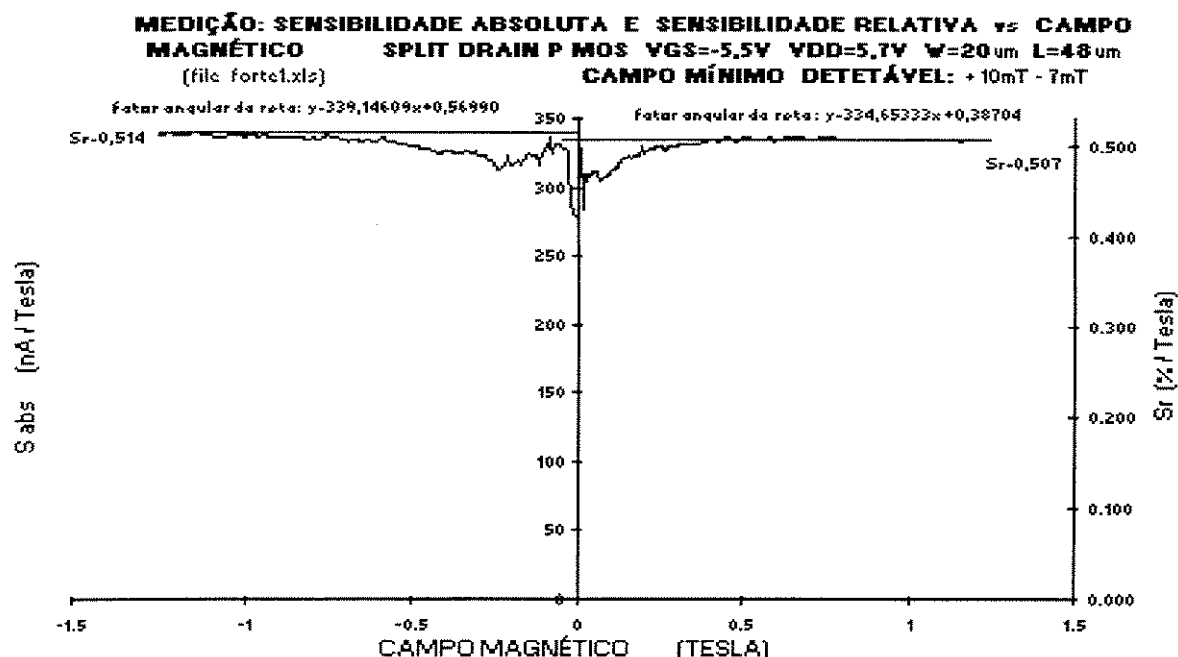


Figura 3.29 Sensibilidade com campo forte VGS -5,5v VDD=5,7V W/L=20um /48um .

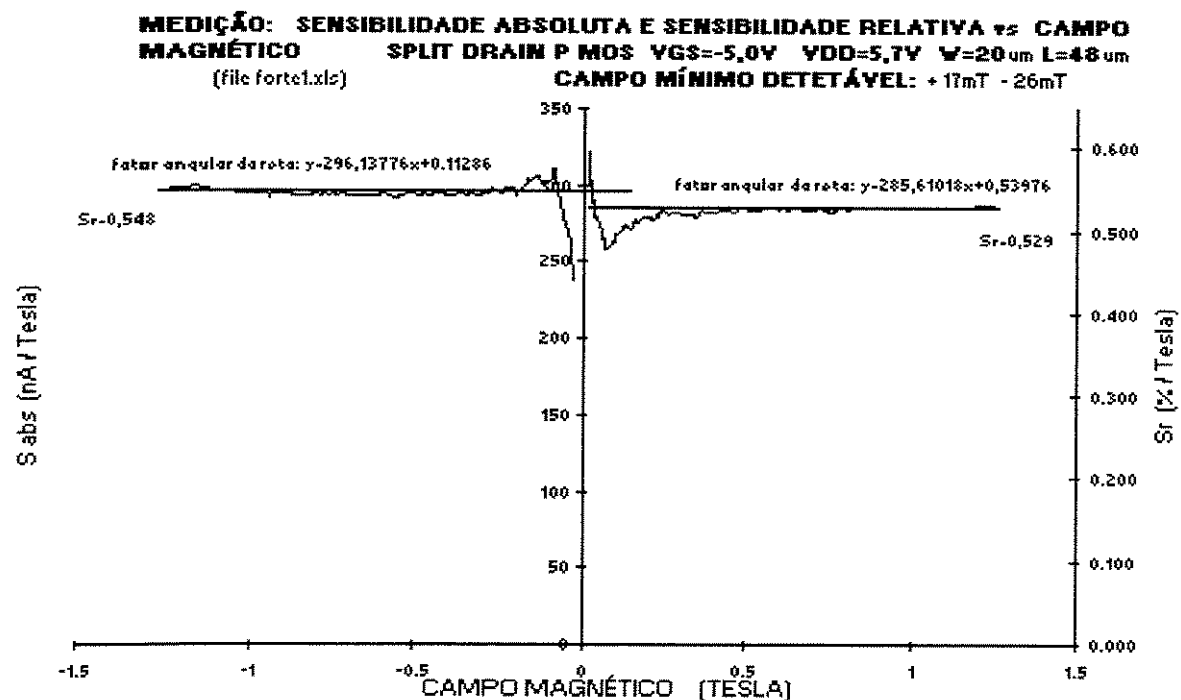


Figura 3.30 Sensibilidade com campo forte VGS -5,0V VDD=5,7V W/L=20um /48um .

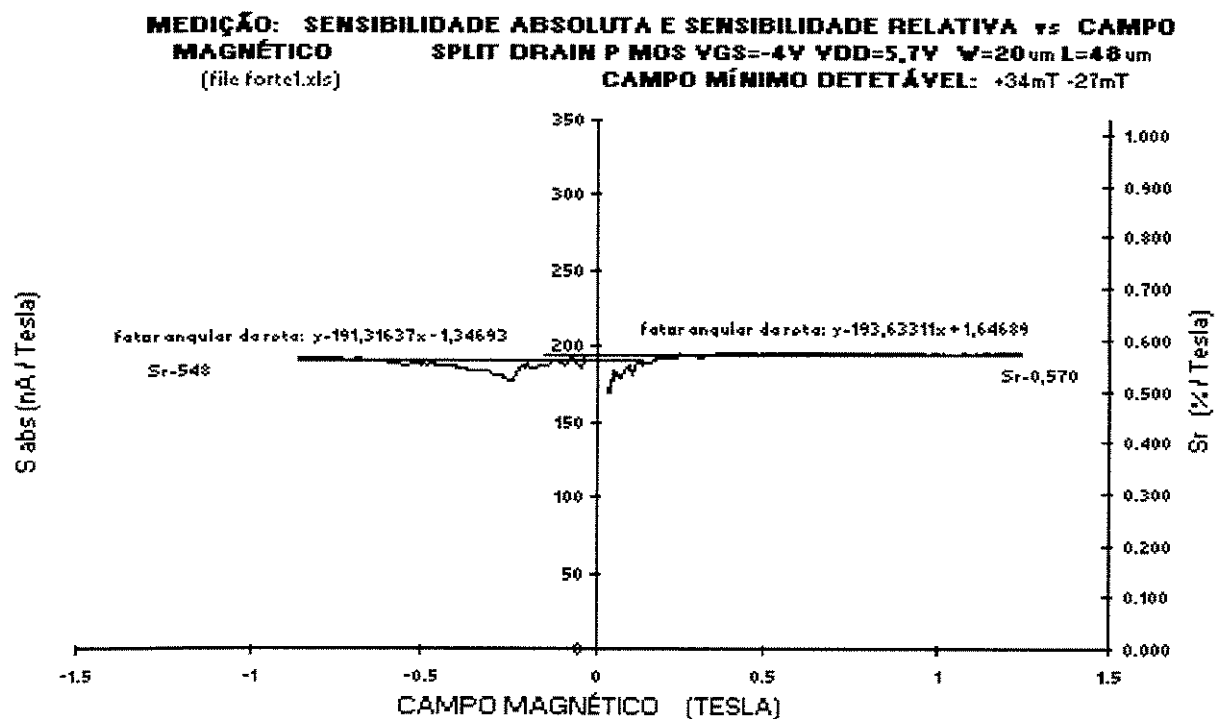


Figura 3.31 Sensibilidade com campo forte VGS -4,0V VDD=5,7V W/L=20um /48um .

Nas figuras 3.32 e 3.33 apresentam-se as medições de sensibilidade relativa ( com campo forte) num diagrama de barras vs tensão VGS para VDS=4,3V e VDS=5,0V respectivamente, e para a razão W/L=20um/48um, mostrando assim um resumo das medições na região de saturação.

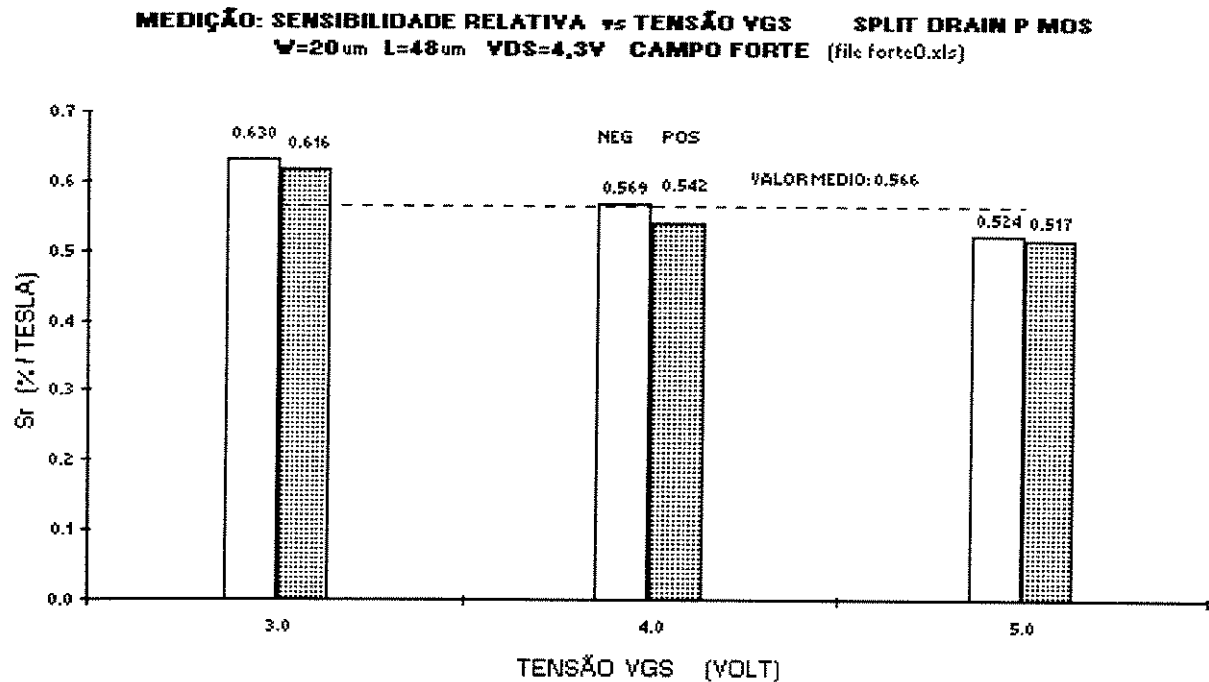


Figura 3.32 Sensibilidade relativa vs tensão VGS, VDS=4,3V e geometria W/L=20um/48um.

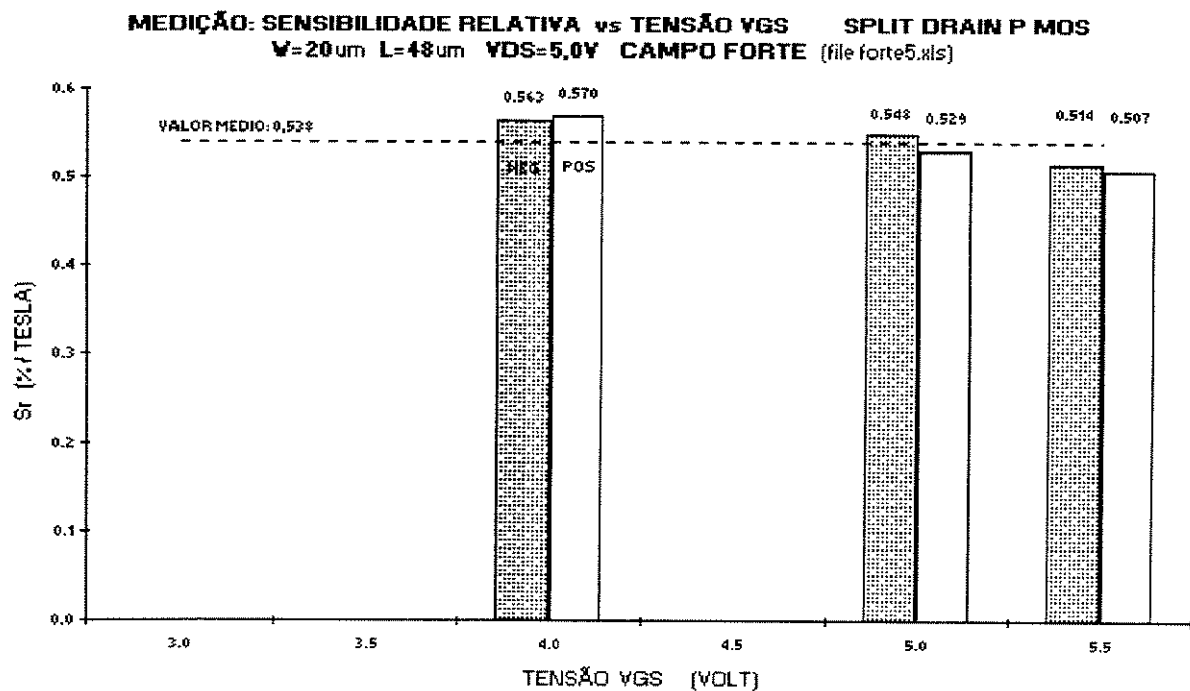


Figura 3.33 Sensibilidade relativa vs tensão VGS, VDS=5,0V e geometria W/L=20um/48um .

Para as mesmas tensões de VGS, a variação do VDS (de 4,3V para 5,0V) praticamente não afetou o comportamento do dispositivo:

A sensibilidade absoluta permanece igual, isto porque o dispositivo está na região de saturação.

A sensibilidade relativa é praticamente constante e independe da tensão VGS.

Mas observa-se que  $S_r$  aumenta levemente se diminui a tensão VGS.

Mesmo assim, com VGS=5,7V foi possível polarizar com VGS= 5,5V e obter maior corrente de dreno e maior corrente Hall. Aliás, com esta polarização o dispositivo apresentou a máxima sensibilidade absoluta obtida nestas medições: 339 nA / Tesla.

O seguinte gráfico da figura 3.34 apresenta medições da corrente Hall com campo magnético fraco, com tensão VDS=5,0V e a razão geométrica W/L=20um / 48um .

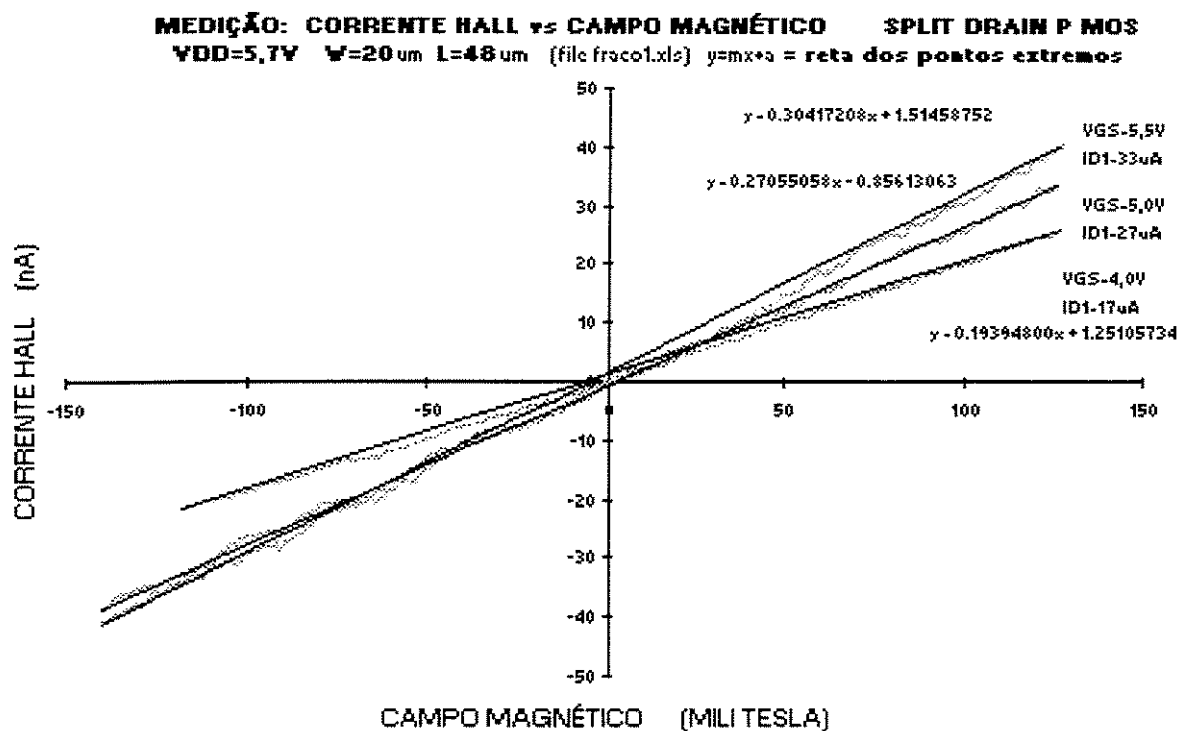


Figura 3.34 Corrente Hall com campo fraco do *Split drain* W/L=20um /48um, VDD=5,7V

Os seguintes gráficos das figuras 3.35 3.36 3.37 apresentam as medições de sensibilidade obtida com VDD=5,7V e com aplicação de campo fraco.

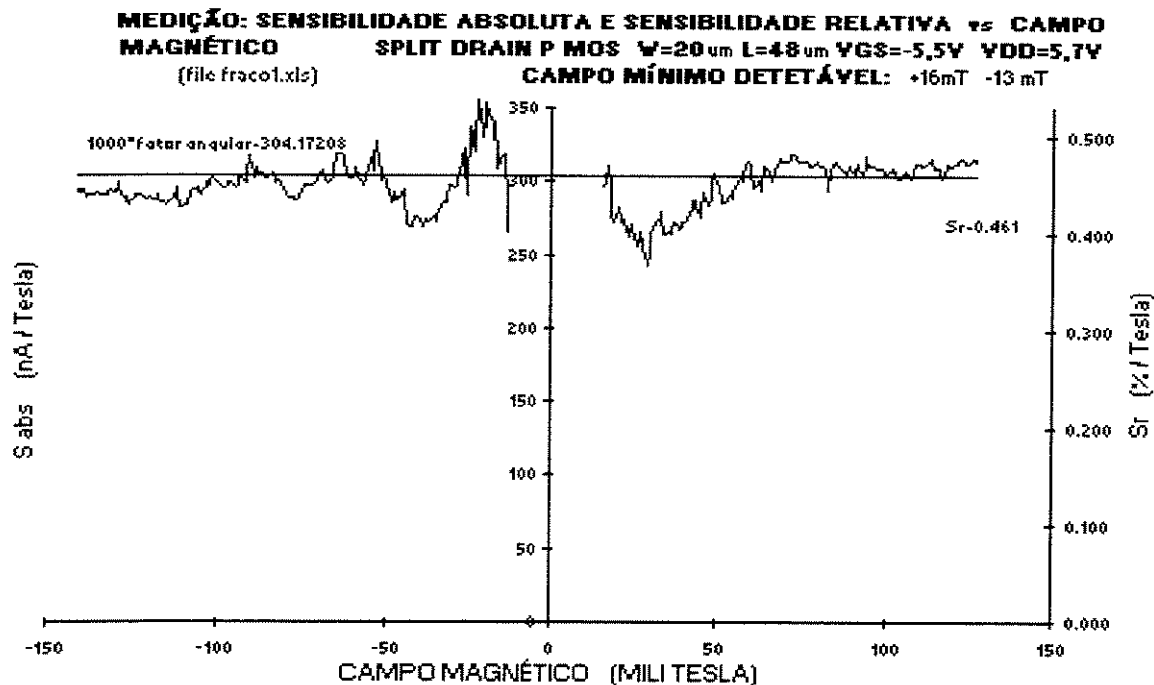


Figura 3.35 Sensibilidade com campo fraco VGS -5,5V VDD=5,7V W/L=20um /48um.

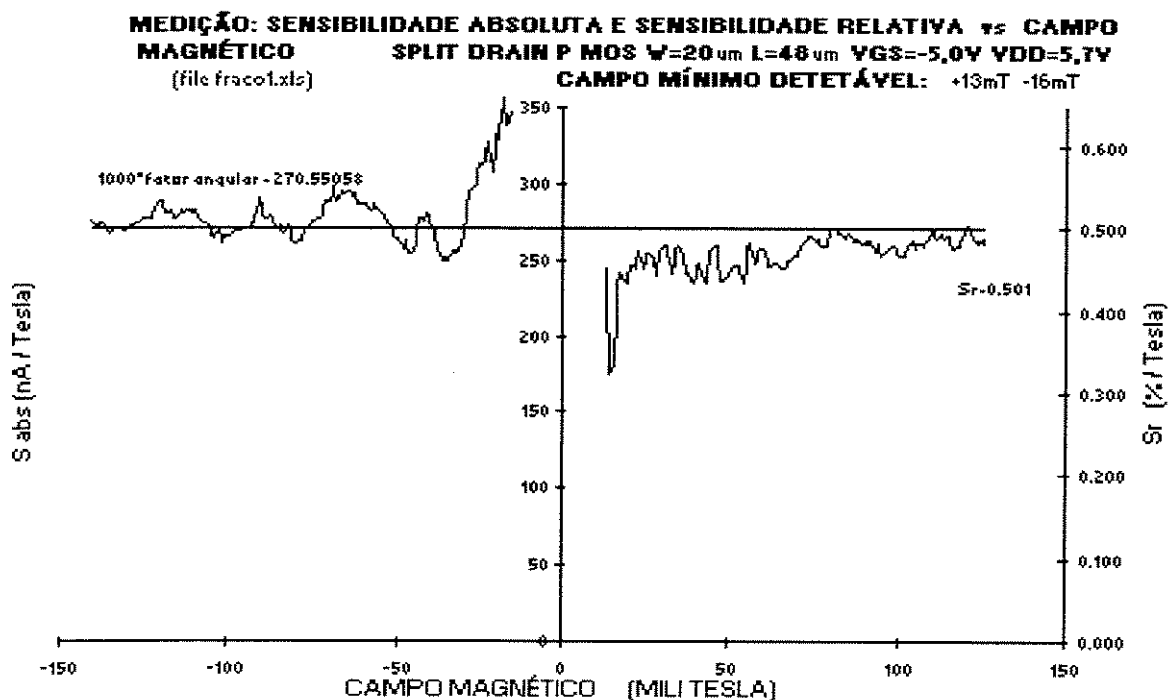


Figura 3.36 Sensibilidade com campo fraco VGS -5,0V VDD=5,7V W/L=20um /48um.

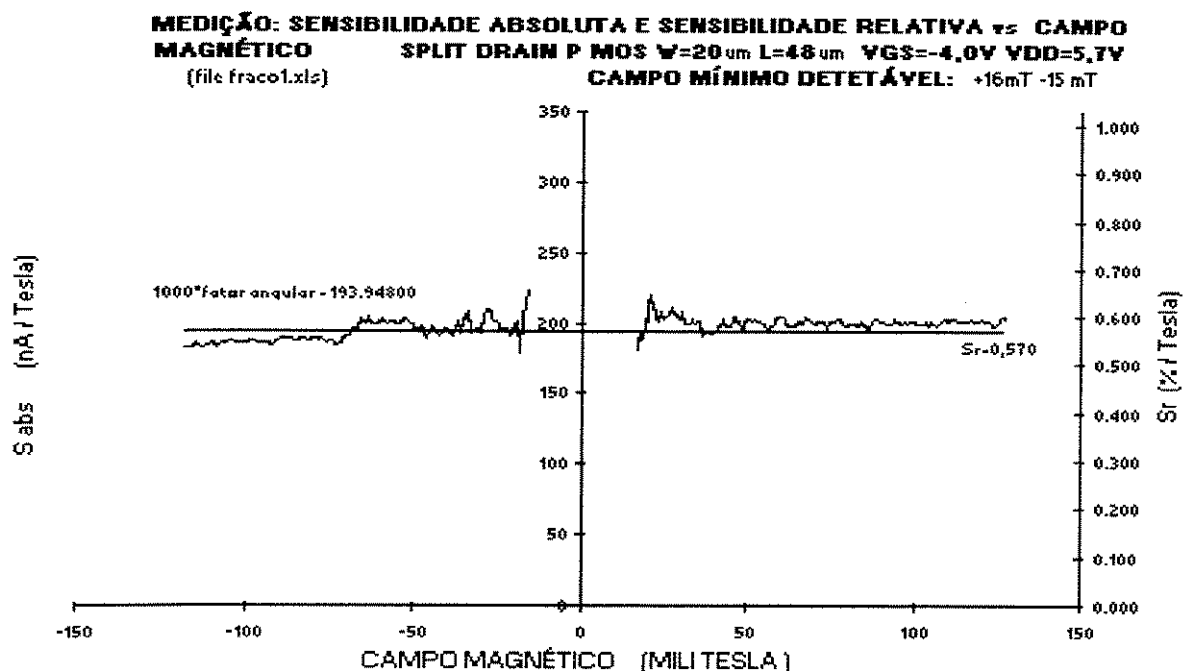


Figura 3.37 Sensibilidade com campo fraco  $V_{GS} -4,0V$   $V_{DD}=5,7V$   $W/L=20\mu m /48\mu m$ .

Para campo fraco ocorre o mesmo comportamento que com campo forte.

Para as mesmas tensões de  $V_{GS}$ , a variação do  $V_{DS}$  (de 4,3,0V para 5,0V) praticamente não afetou o comportamento do dispositivo: a sensibilidade absoluta permanece igual, isto porque o dispositivo está na região de saturação.

A sensibilidade relativa é praticamente constante e independente da tensão  $V_{GS}$ .

Mas observa-se que  $S_r$  aumenta levemente se diminui a tensão  $V_{GS}$ .

Mesmo assim, com  $V_{DD} = 5,7V$  foi possível polarizar com  $V_{GS} = -5,5V$  e obter maior corrente de dreno e maior corrente Hall.

#### 3.4.11.1 MEDIÇÕES NA REGIÃO LINEAR

Aqui são apresentados os resultados com  $V_{DS}=1,17V$  que garante uma operação na região linear. Para obter estas medições foi usado outro circuito de teste que é mostrado na figura 3.38

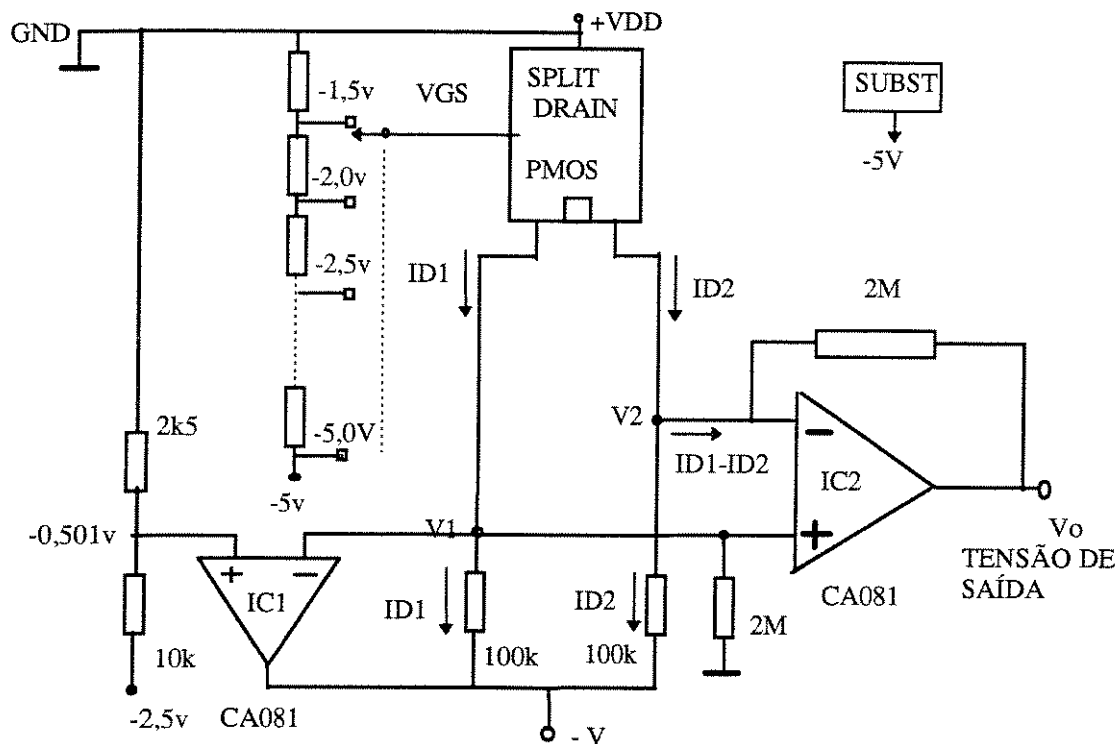


Figura 3.38 Esquema do circuito de teste 2 incluindo um *layout* simplificado do dispositivo PMOS Hall, modo corrente: *Split drain*..

O gráfico da figura 3.39 apresenta medições da corrente Hall com campo magnético forte, com tensão  $V_{DS}=1,17V$  e a razão geométrica  $W/L=20\mu m / 200\mu m$ .

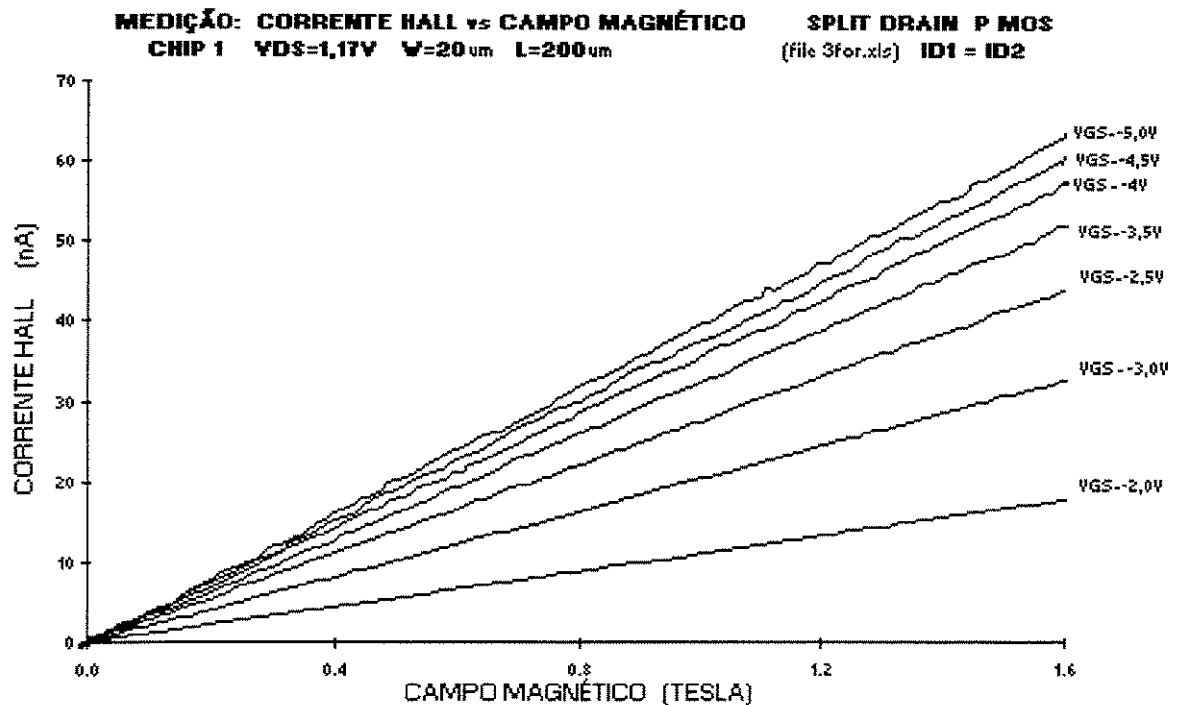


Figura 3.39 Corrente Hall com campo forte do *Split drain*  $W/L=20\mu m/200\mu m$ ,  $V_{DS}=1,17V$ .

A figura 3.40 apresenta as retas de referência e o resultado do cálculo das equações das retas de referência.

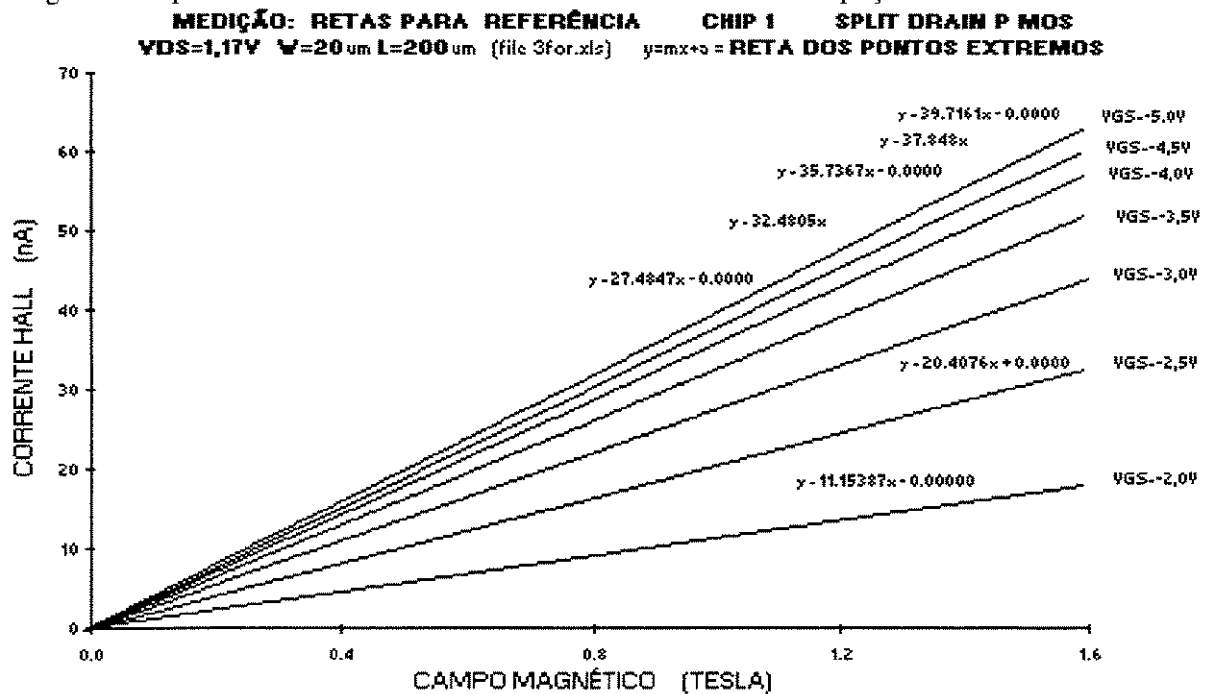


Figura 3.40 Resultados dos cálculos das equações das retas de referência, com campo forte e  $V_{DS}=1,17V$  e  $W/L=20\mu m/200\mu m$ .



Os seguintes quatro gráficos das figuras 3.41 3.42 3.43 e 3.44 , apresentam medições do erro de linearidade ou erro de corrente Hall (%) com campo magnético forte e com a tensão  $V_{DS}=1,17V$  e a razão geométrica  $W/L=20\mu m / 200\mu m$ .

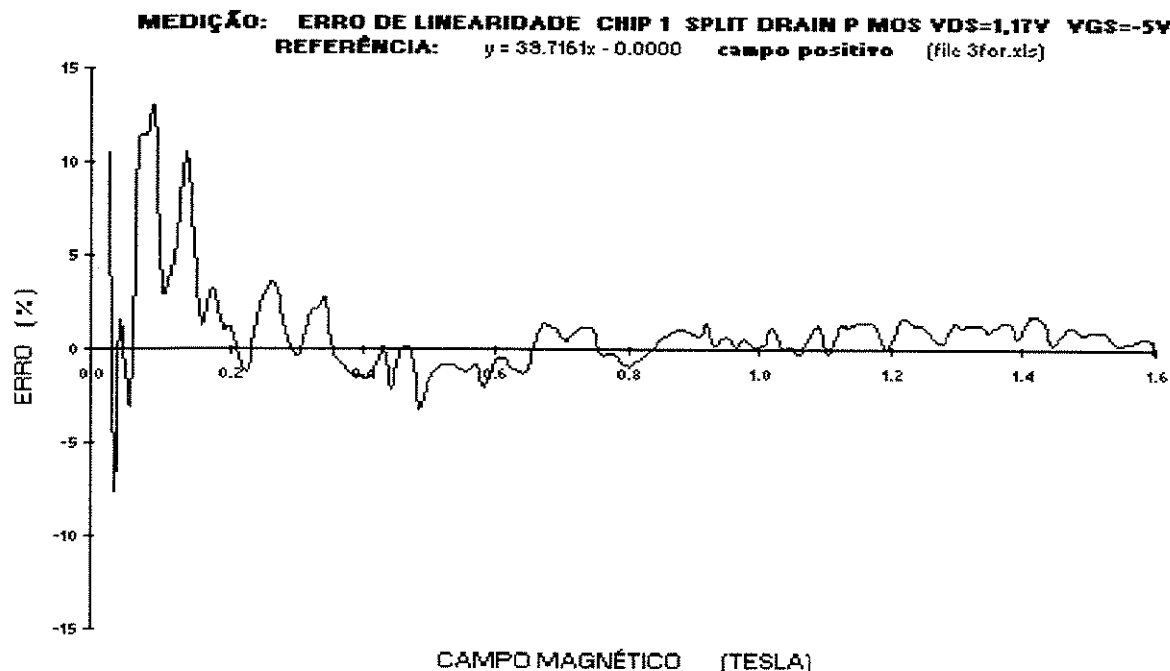


Figura 3.41 Erro de linearidade com campo forte e com  $V_{DS}=1,17V$   $V_{GS}=-5,0V$  e  $W/L=20\mu m / 200\mu m$ .

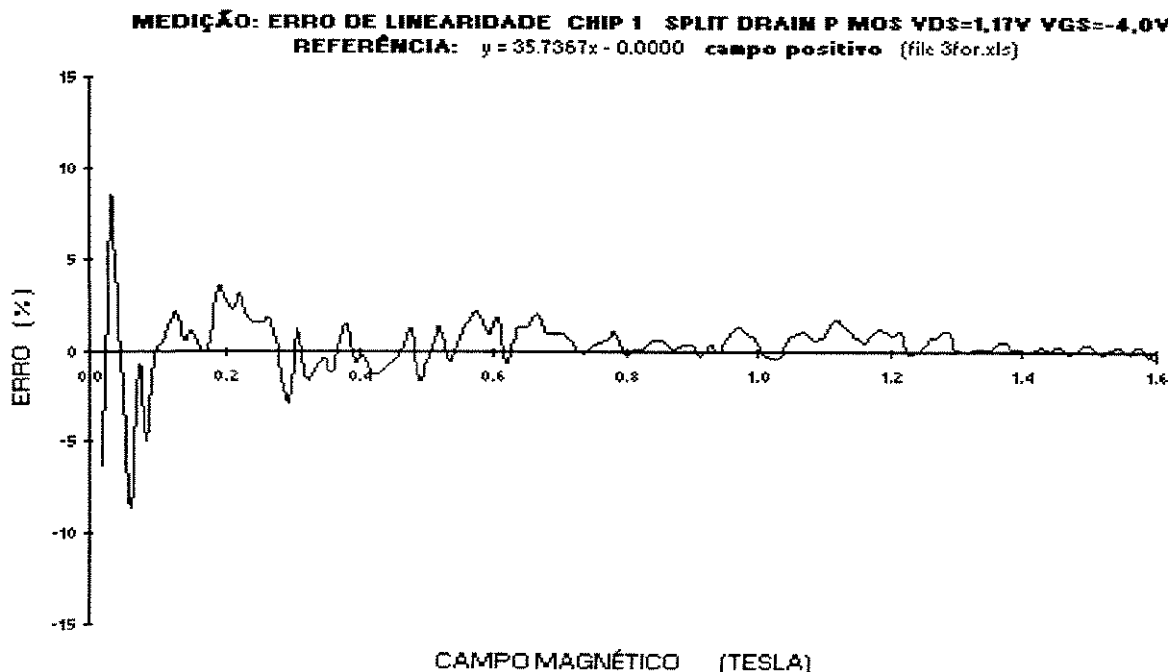


Figura 3.42 Erro de linearidade com campo forte e com  $V_{DS}=1,17V$   $V_{GS}=-4,0V$  e  $W/L=20\mu m / 200\mu m$ .

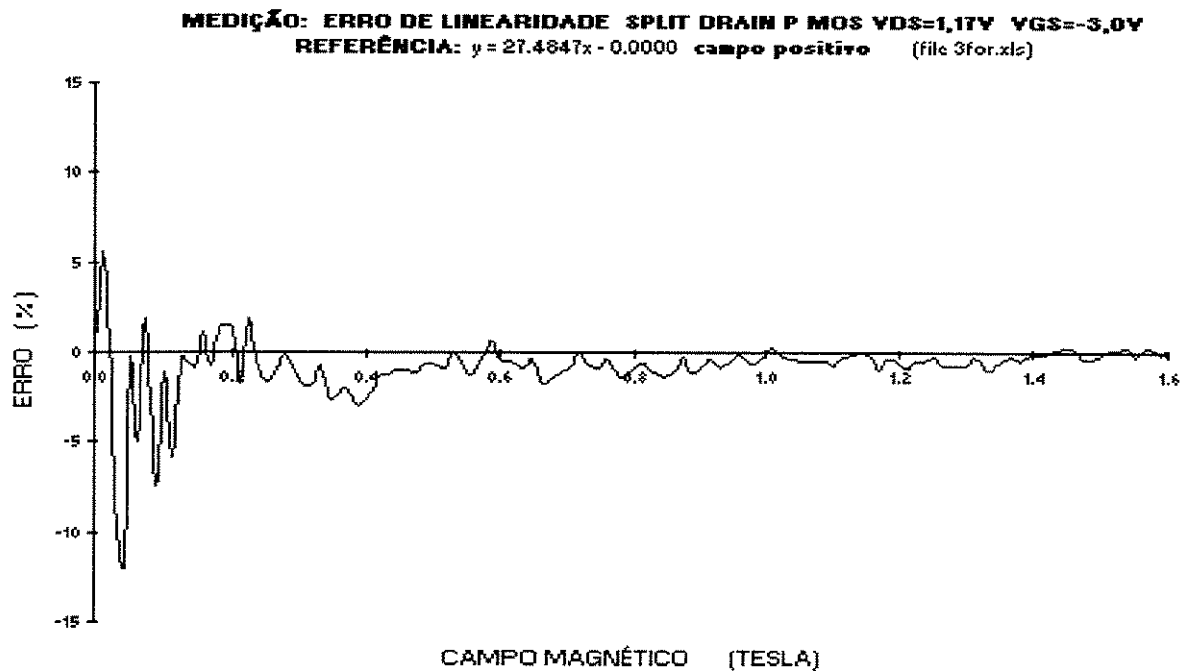


Figura 3.43 Erro de linearidade com campo forte e com VDS=1,17V VGS -3,0V e W/L=20 $\mu$ m / 200 $\mu$ m .

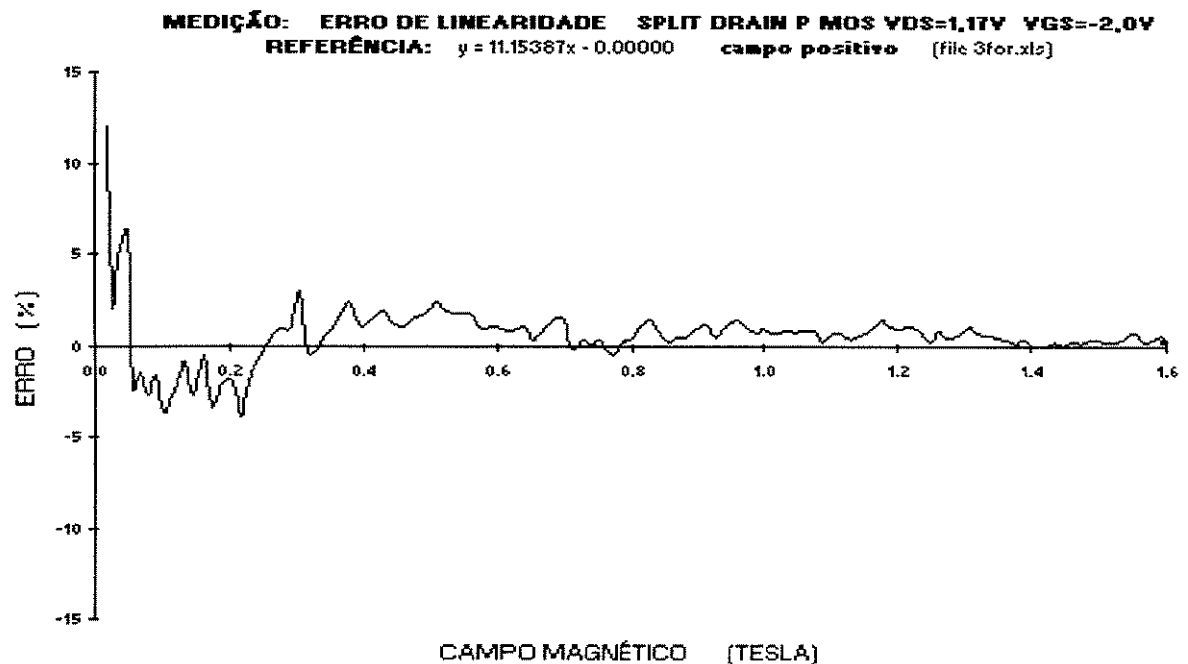


Figura 3.44 Erro de linearidade com campo forte e com VDS=1,17V VGS -2,0V e W/L=20 $\mu$ m / 200 $\mu$ m .

Os seguintes dois gráficos das figuras 3.45 e 3.46, apresentam medições da sensibilidade com campo magnético forte e com a tensão  $V_{DS}=1,17V$  e a razão geométrica  $W/L=20\mu m / 200\mu m$ .

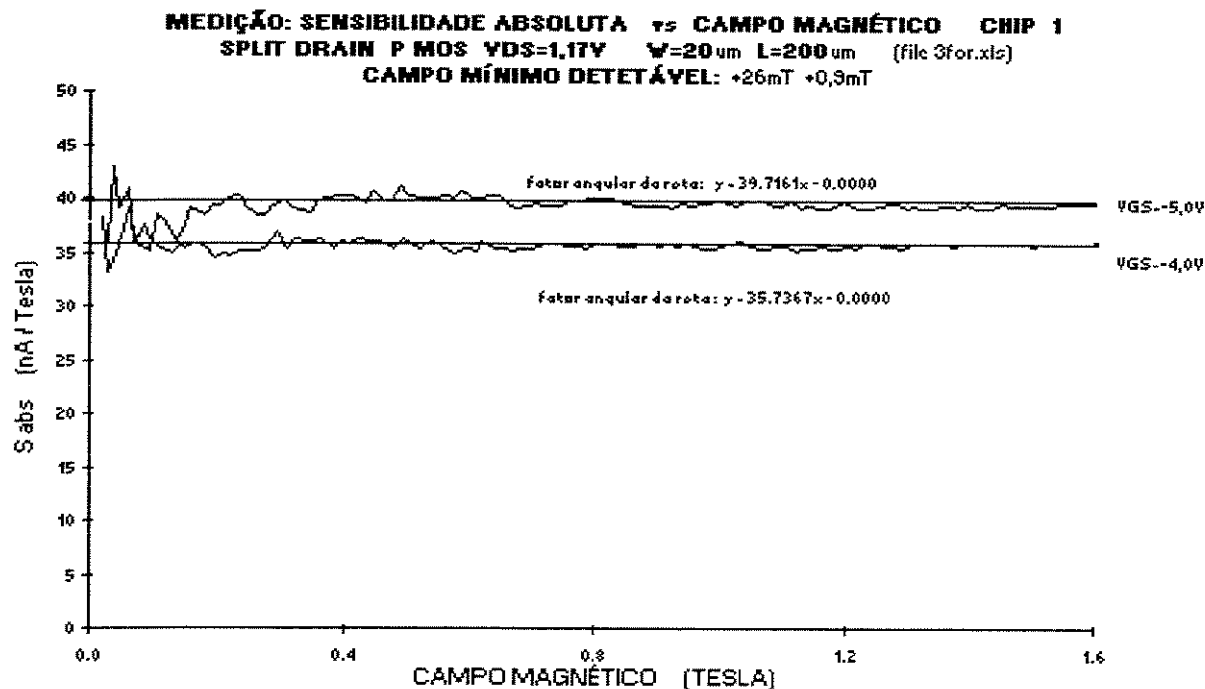


Figura 3.45 Sensibilidade com campo forte do *Split drain*  $V_{DS}=1,17V$  para  $V_{GS} = -5V$  e  $-4V$   $W/L=20\mu m/200\mu m$

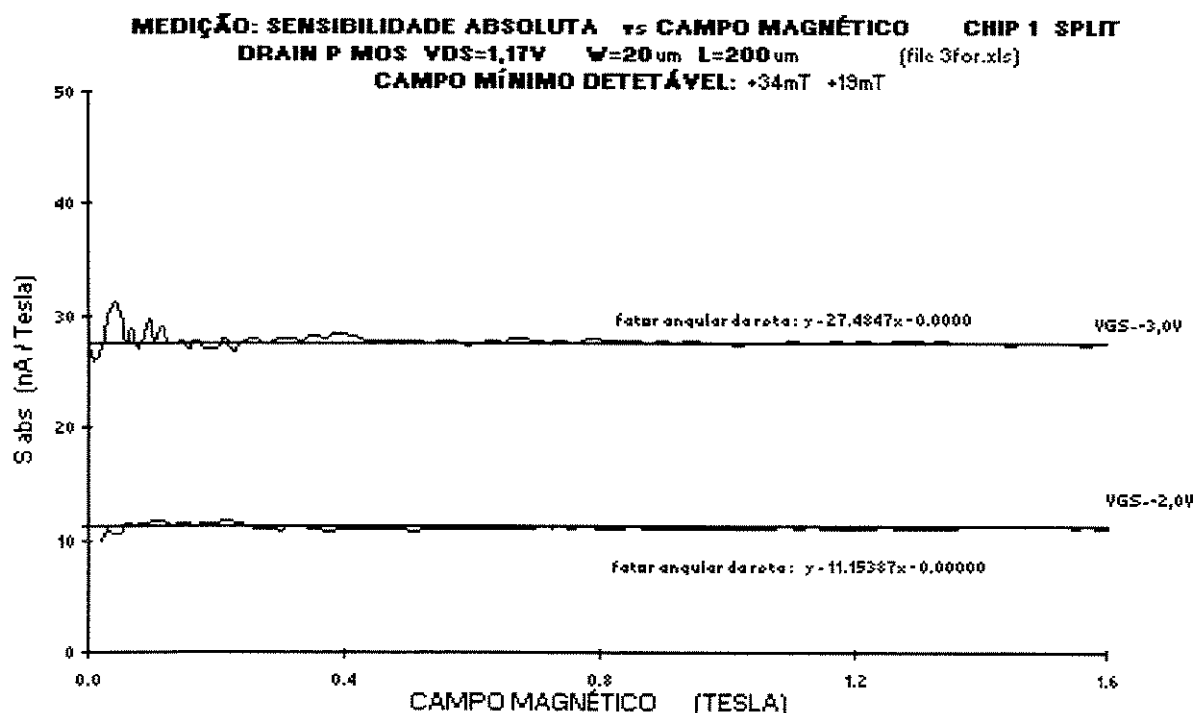


Figura 3.46 Sensibilidade com campo forte do *Split drain*  $V_{DS}=1,17V$  para  $V_{GS} = -3V$  e  $-2V$   $W/L=20\mu m/200\mu m$ .

Na figura 3.47 apresenta-se as medições de sensibilidade relativa ( com campo forte) num diagrama de barras vs tensão VGS para VDS=1,17V e a razão W/L=20um/200um .

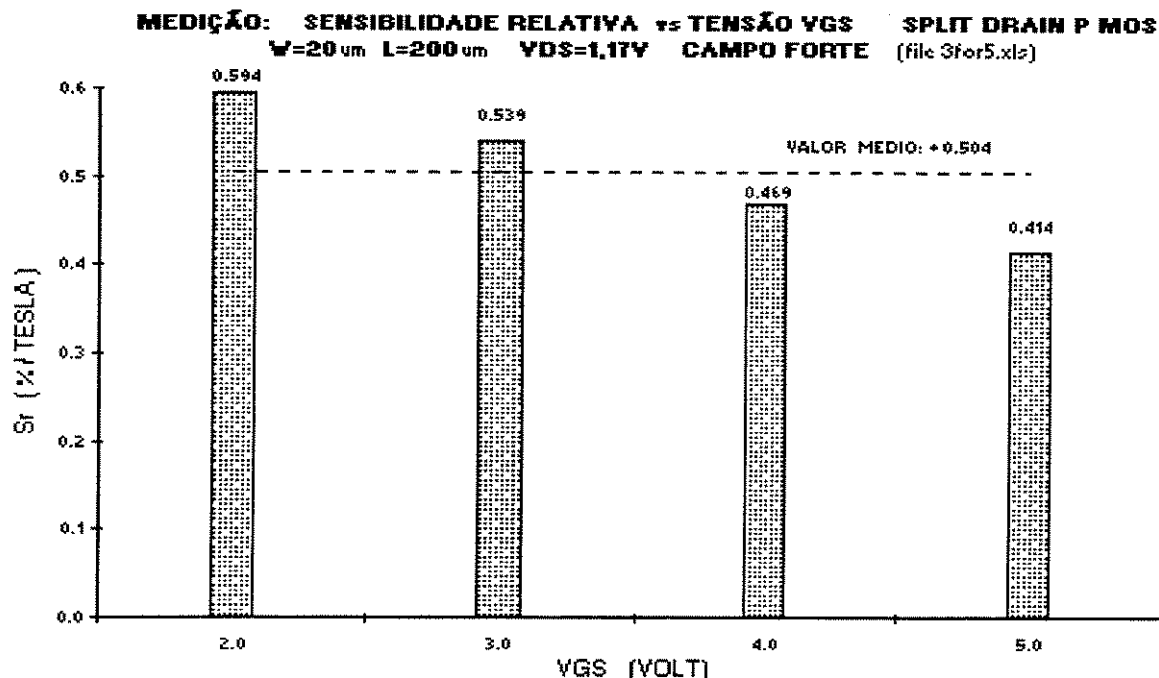


Figura 3.47 Sensibilidade relativa vs tensão VGS, VDS=1,17V e geometria W/L=20um/200um .

Na região linear, temos uma dependência da Sabs com VDS, (ou VDD) mas com correntes menores, crescendo até a região de saturação, seguindo a caracterização do dispositivo.

Na região linear, a sensibilidade absoluta aumenta com VDS.

Observa-se que a sensibilidade absoluta é maior na região de operação de saturação que na região de operação linear.

Se o interesse é uma dependência da sensibilidade Sabs com VDS, o ponto de operação ótimo deve estar na região linear mas também perto da tensão VDSsat para manter o máximo possível de sensibilidade absoluta. Assim como foi observado para a região de saturação, acontece o mesmo para a região linear em termos de sensibilidade relativa.

A sensibilidade relativa praticamente é constante e independe da tensão VGS dentro de uma pequena faixa. Isto concorda com a análise que indica o mesmo. (equação 3.7 e 3.10)

$$S_r = \frac{I_H}{I_D} \frac{1}{B} = \frac{I_{D1} - I_{D2}}{I_D} \frac{1}{B} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G \quad (3.11)$$

Observa-se que  $S_r$  aumenta levemente se diminui a tensão VGS.

Para comparar os resultados da sensibilidade relativa, na região de saturação e na região linear, mostramos o gráfico de sensibilidade relativa  $S_r$  vs a tensão VDS na figura 3.48

Os dados utilizados são das duas geometrias  $W/L=20\mu m/200\mu m$  e  $W/L=20\mu m/48\mu m$ , o que é possível porque a  $S_r$  independe da geometria.

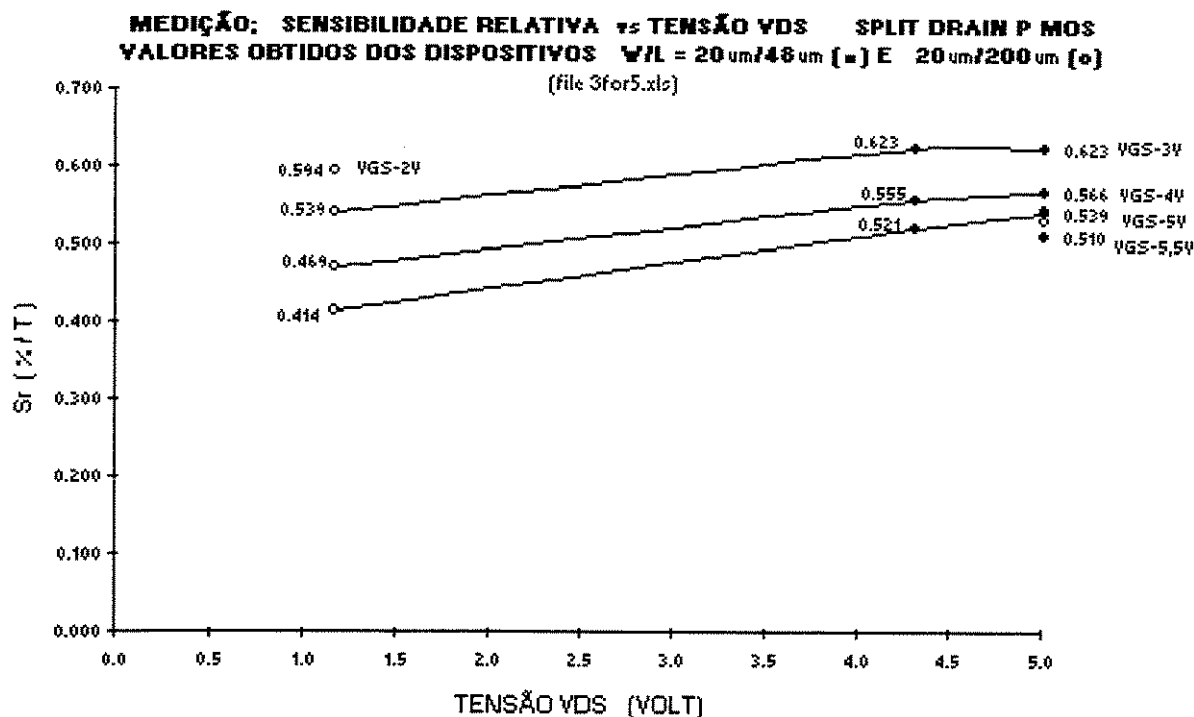


Figura 3.48 Sensibilidade relativa vs tensão VDS: região linear e região de saturação.

A sensibilidade relativa  $S_r$  não varia com a região de operação, pois na região linear e na região de saturação foram obtidos praticamente os mesmos resultados dentro de uma faixa pequena de aproximação. Isto também foi encontrado por J. Lau [31] (1995) e X.Zheng [25] (1991).

Observa-se que  $S_r$  tem uma pequena dependência com VGS:  $S_r$  aumenta quando VGS diminui. A explicação é que a mobilidade  $\mu$  do semiconductor ou a mobilidade Hall, diminui com o aumento da tensão VGS. [25].

A sensibilidade relativa  $S_r$  é constante para um determinado VGS, na região de saturação e mesmo na região linear. Mas, na região linear observa-se um pequeno aumento de  $S_r$  até a região de saturação.

Isto pode ser atribuído ao seguinte: Quando a tensão VDS aumenta, a tensão VGD diminui, deixando mais fraco o campo vertical perto do dreno. [25]

Outra explicação é o conceito de mobilidade superficial que diminui com o aumento do campo porta. [32].

No item 3.4.10 já comparamos as medições de sensibilidade com campo forte e com campo fraco e verificamos que os resultados são praticamente os mesmos.

### 3.4.12 CORRENTE HALL E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA: RAZÃO W/L

A geometria do dispositivo é mostrada novamente na figura 3.49 como um esquema do *layout*, para indicar que podemos mudar  $L$  ligando os terminais 18 e 15 com a fonte do dispositivo P MOS e assim produzir mudanças no comportamento como sensor de campo magnético.

Esta variação de  $L$ , também poderia ser ampliada aumentando outros pares de terminais.

A literatura [31] indica que nos dispositivos longos com o mesmo  $W$ , a sensibilidade relativa para uma variação de  $L$  não é afetada pelo efeito do espaçamento entre drenos (*drain-gap*).

A sensibilidade relativa aumenta, se o espaçamento entre drenos (*drain-gap*) diminui. Este efeito (*drain-gap*) é mais sensível nos dispositivos quadrados ou com  $W/L$  perto da unidade.[31].

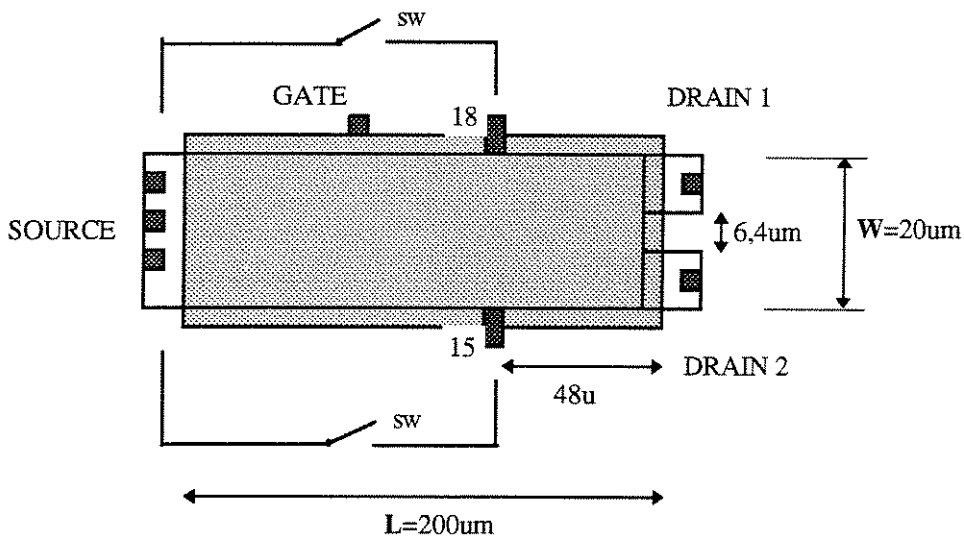


Figura 3.49 Esquema do *layout* do *Split drain* : ligando terminais 18 e 15

Na figura 3.50 e 3.51 são apresentados os resultados das medições com a geometria do dispositivo MOS com uma razão  $W/L=20\mu\text{m} / 200\mu\text{m}=0,100$  e com aplicação de campo forte, mas fazendo as comparações com a geometria  $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}=0,416$

Verifica-se que a corrente Hall é bem menor com a razão  $W/L=20\mu\text{m} / 200\mu\text{m}=0,100$  que com a razão  $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}=0,416$ .

Com campo fraco verifica-se novamente que a corrente Hall é bem menor com a razão  $W/L=20\mu\text{m}/200\mu\text{m}=0,100$  que com a razão  $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}=0,416$ .

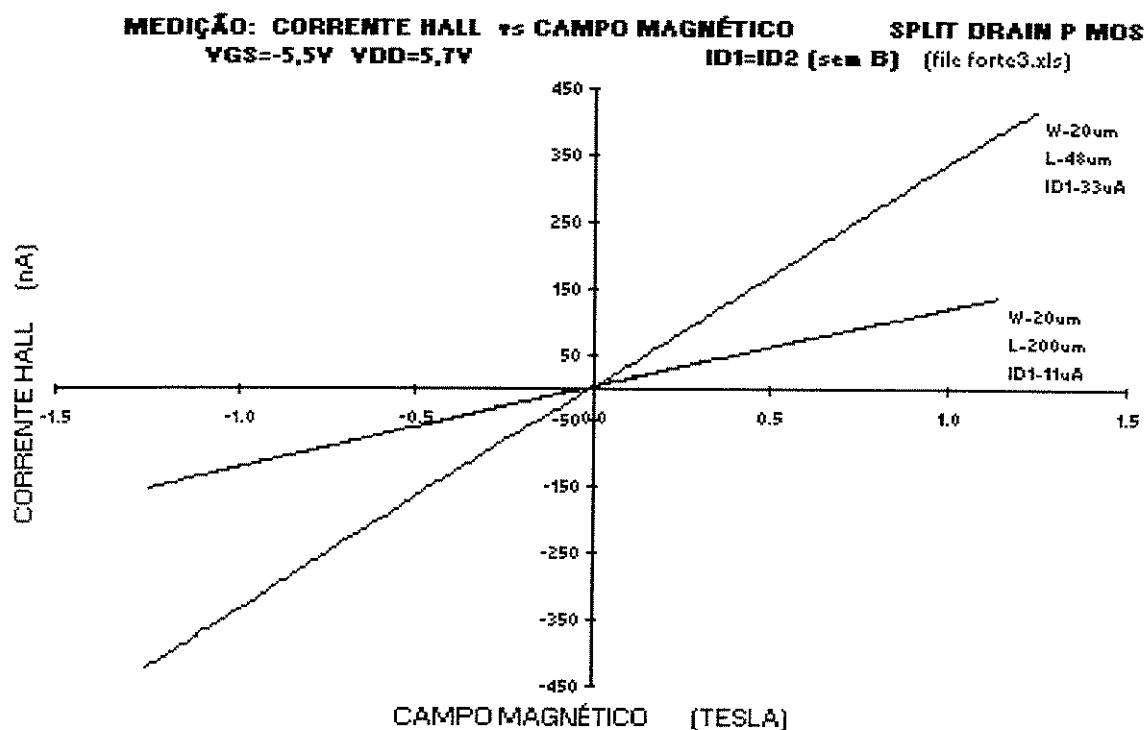


Figura 3.50 Corrente Hall com campo forte VGS=-5,5V VDD=5,7V L=48um e L=200um .

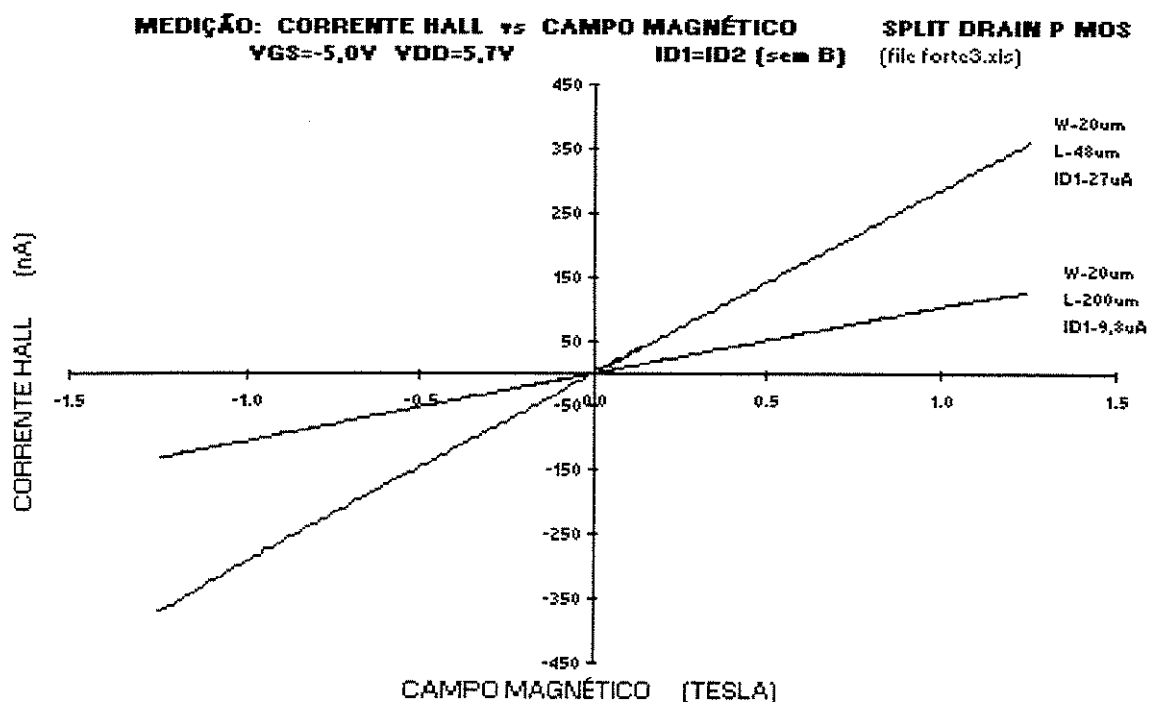


Figura 3.51 Corrente Hall com campo forte VGS=-5,0V VDD=5,7V L=48um e L=200um .

Na figura 3.52 e 3.53 apresentamos os resultados das medições com a geometria  $W/L=20\mu\text{m} / 200\mu\text{m}$  e com campo fraco, mas fazendo a comparação com a geometria  $W/L=20\mu\text{m} / 48\mu\text{m}$ .

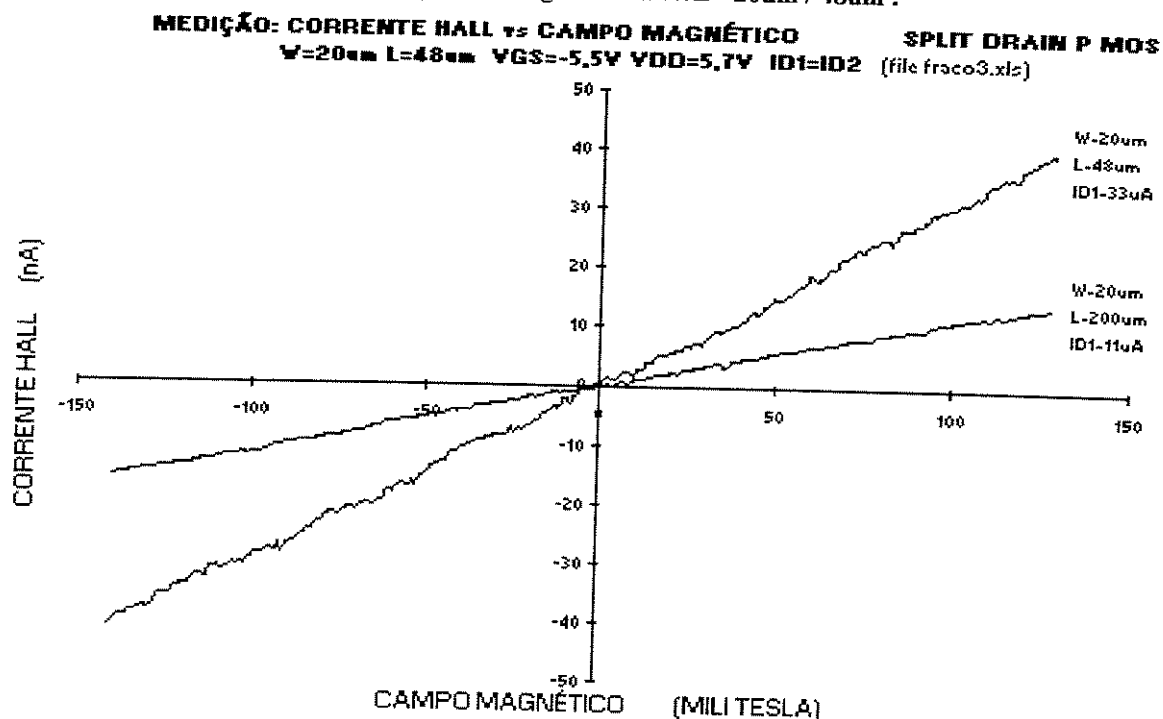


Figura 3.52 Corrente Hall com campo fraco  $V_{GS}=-5,5\text{V}$   $V_{DD}=5,7\text{V}$   $L=48\mu\text{m}$  e  $L=200\mu\text{m}$

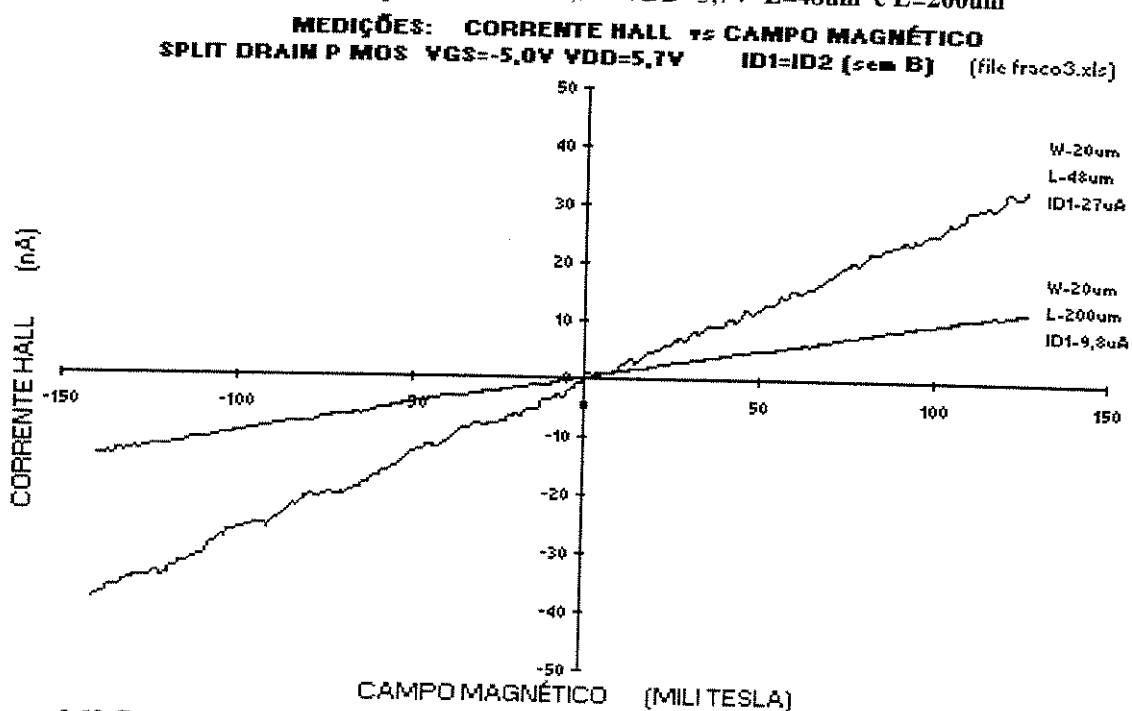


Figura 3.53 Corrente Hall com campo fraco  $V_{GS}=-5,0\text{V}$   $V_{DD}=5,7\text{V}$   $L=48\mu\text{m}$  e  $L=200\mu\text{m}$



### 3.4.13 SENSIBILIDADE ABSOLUTA E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA: RAZÃO W/L

Nos gráficos da figura 3.54 e 3.55 apresentam-se as medições de sensibilidade com campo forte, comparando-se as duas geometrias.

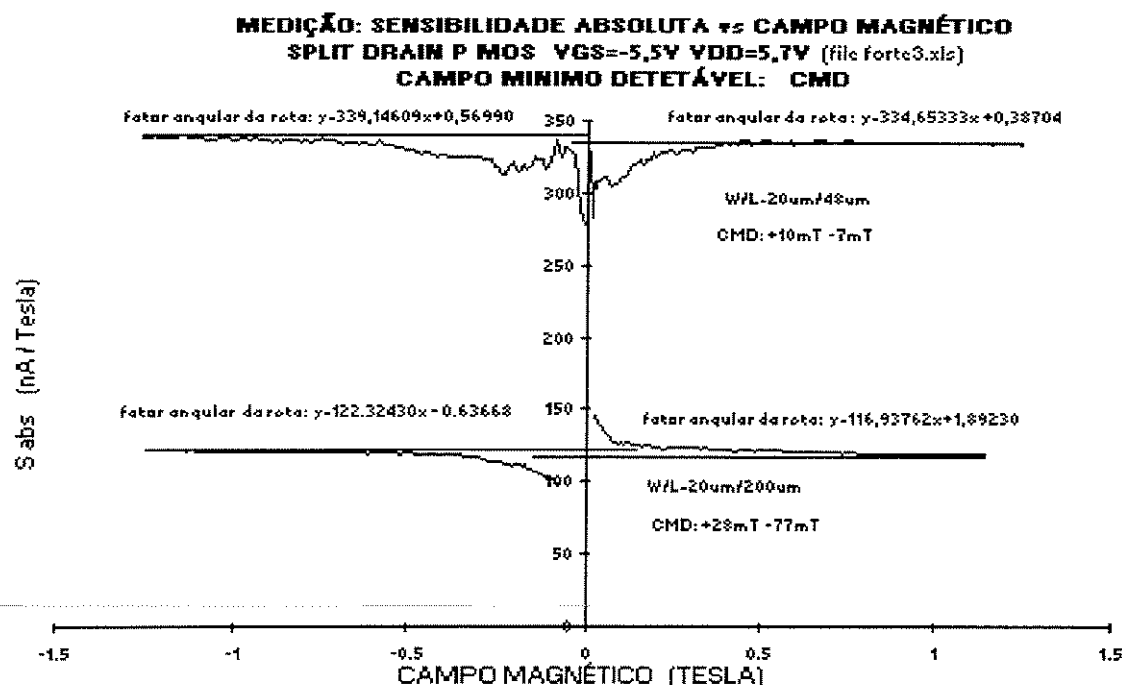


Figura 3.54 Sensibilidade absoluta, campo forte VGS=-5,5V VDD=5,7V L=48um e L=200u .

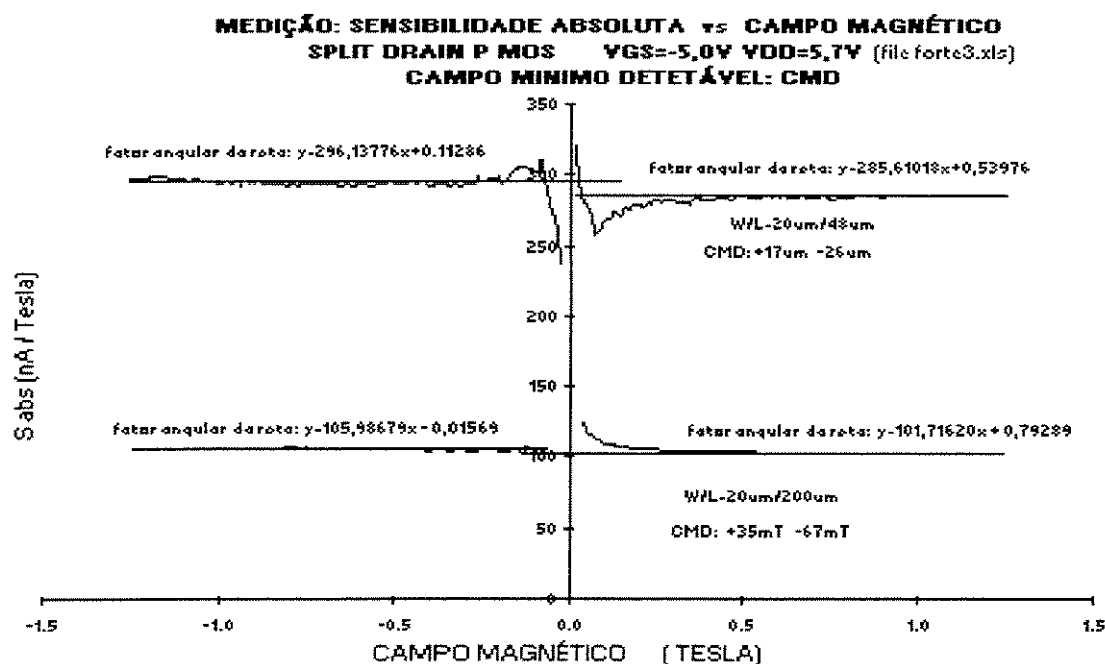


Figura 3.55 Sensibilidade absoluta, campo forte VGS=-5,0V VDD=5,7V L=48um e L=200u .

Nas figuras 3.56 e 3.57 apresenta-se as medições de sensibilidade absoluta com campo fraco, comparando-se as duas geometrias.

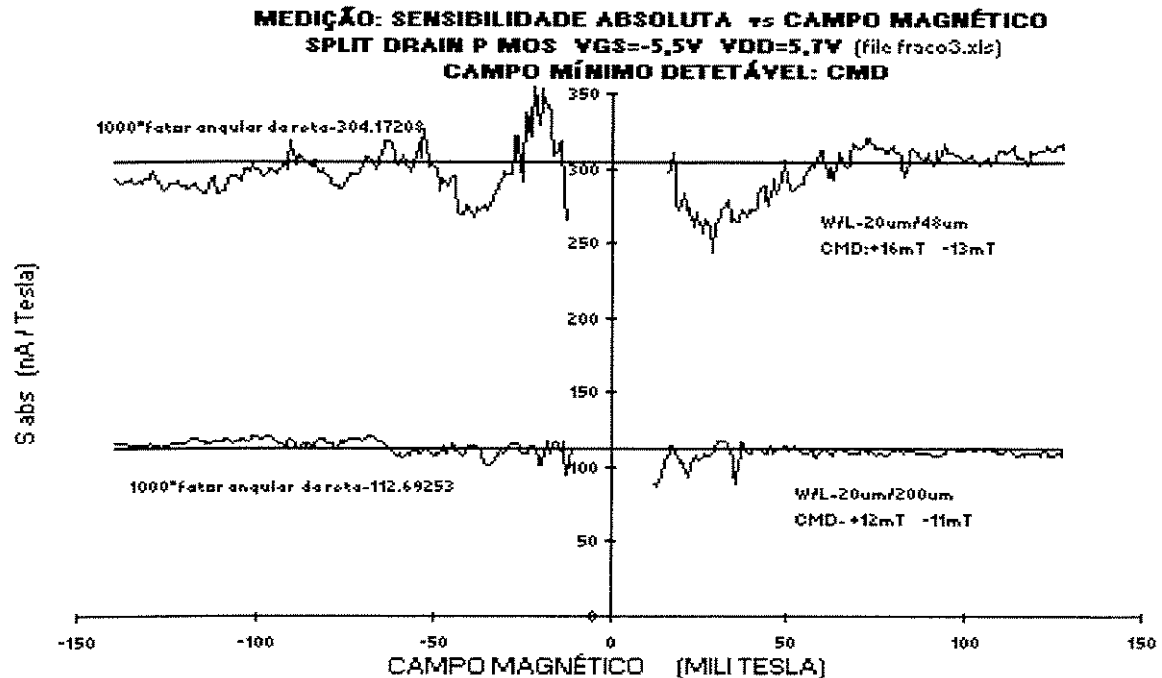


Figura 3.56 Sensibilidade absoluta, campo fraco VGS=-5,5V VDD=5,7V L=48um e L=200um .

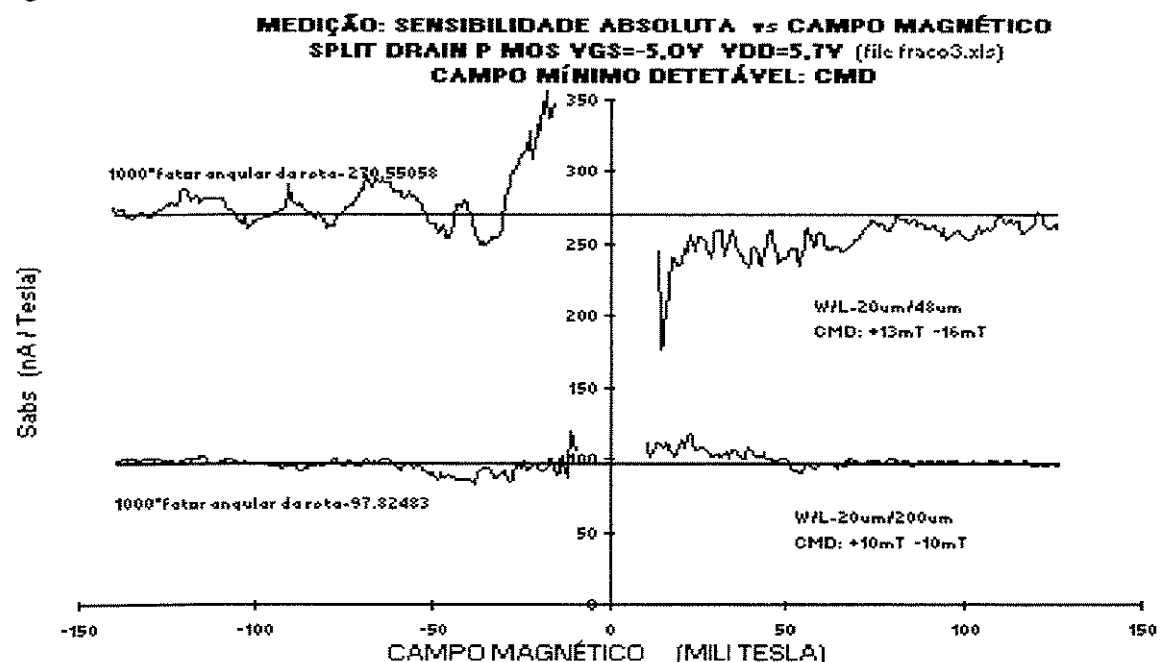


Figura 3.57 Sensibilidade absoluta, campo fraco VGS=-5,0V VDD=5,7V L=48um e L=200um . Verifica-se que a sensibilidade absoluta para a razão W/L=20um/48um é maior que para a razão W/L=20um/200um.

### 3.4.14 CORRENTE HALL RELATIVA E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA: RAZÃO W/L.

A corrente Hall é normalizada com a mesma corrente total de dreno e expressa em porcentagem.

$$\text{Corrente Hall relativa} = \text{CORRENTE HALL} / \text{CORRENTE TOTAL DE DRENO} \quad (3.12)$$

$$I_{Hr} = (I_{D1} - I_{D2}) / (I_{D1} + I_{D2}) \quad (3.13)$$

$$I_{Hr} = I_{HALL} / (I_{D1} + I_{D2}) \quad (3.14)$$

$$100 * nA / (1000 * uA) = nA / (10 * uA) \quad (3.15)$$

Na literatura, a corrente Hall relativa às vezes é chamada simplesmente de sensibilidade magnética [29] ou de sensibilidade do desbalanceamento das correntes [26] [17]. Também às vezes é chamada de desbalanceamento relativo entre as correntes [27] ou desvio relativo da corrente [25].

Os seguintes gráficos da figura 3.58 e 3.59 apresentam esta corrente relativa com aplicação de campo forte e para as duas geometrias em estudo.

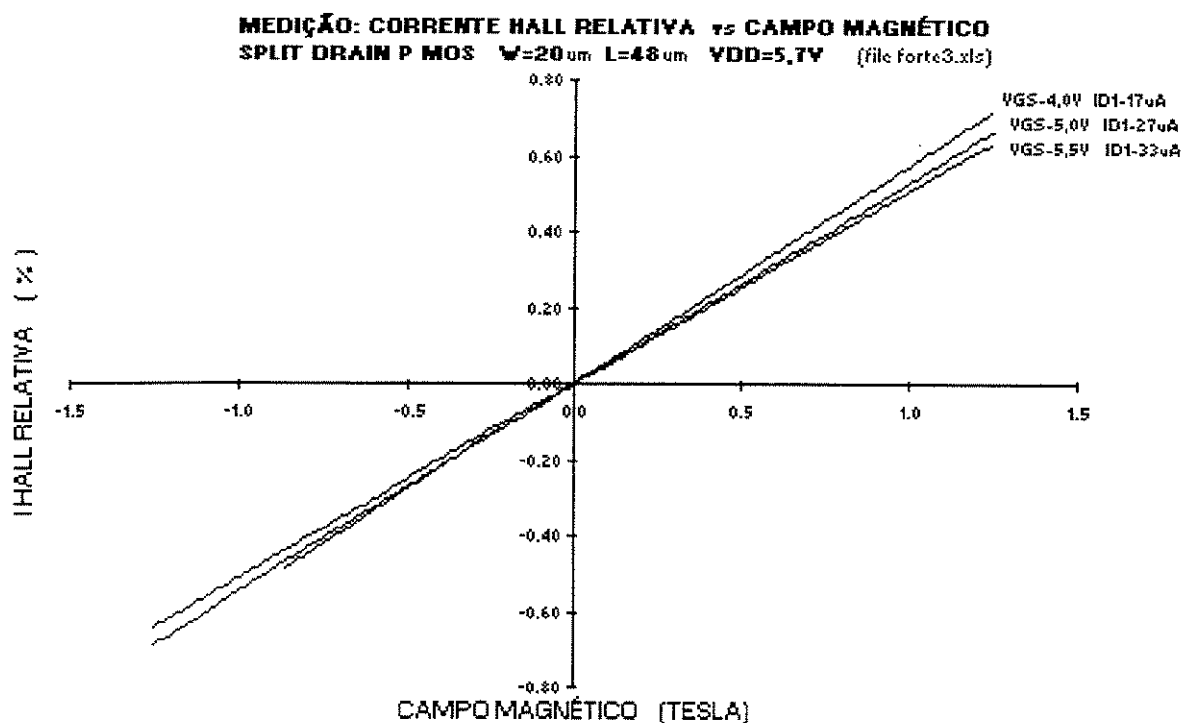


Figura 3.58 Corrente Hall relativa, campo forte VDD=5,7V W/L=20um /48um .

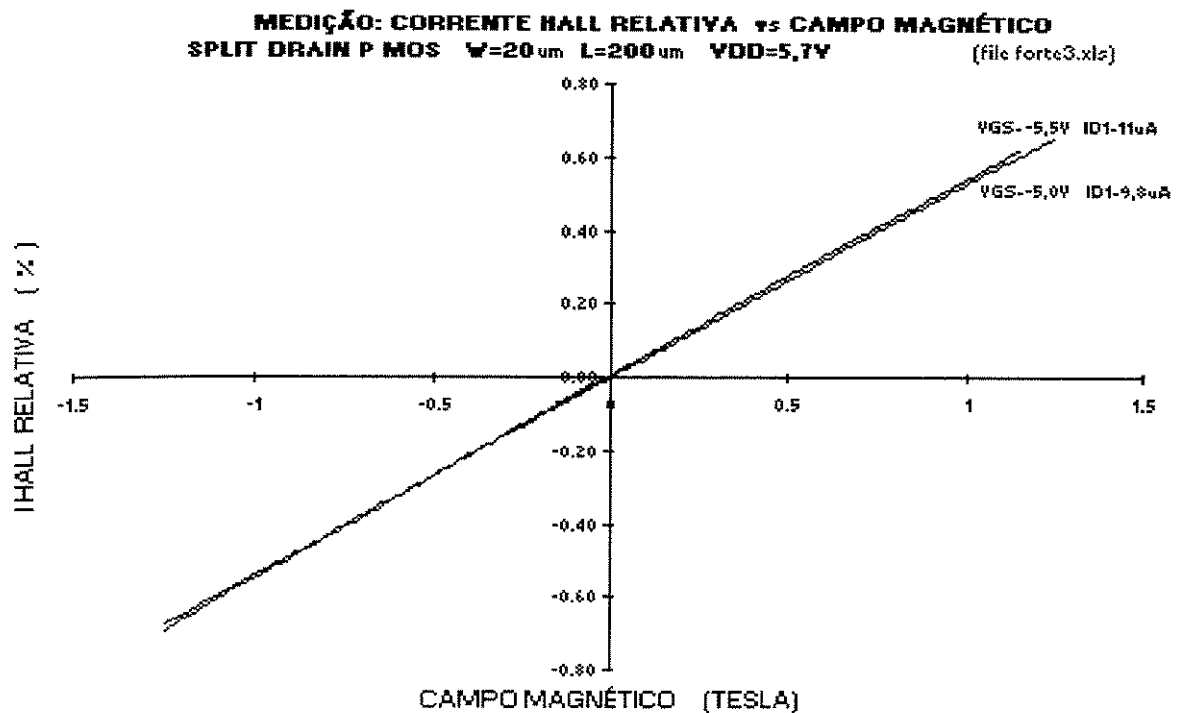


Figura 3.59 Corrente Hall relativa, campo forte  $VDD=5,7V$   $W/L=20\mu m/200\mu m$

As figuras 3.60 e 3.61 apresentam esta corrente relativa com aplicação de campo fraco:

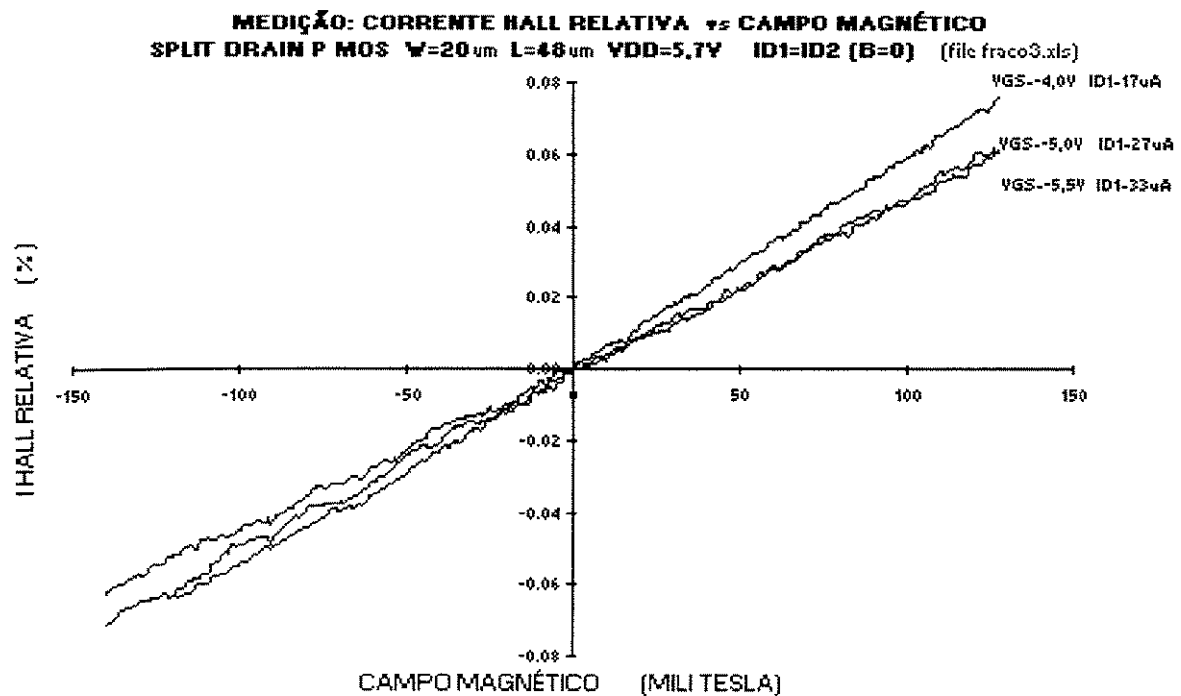


Figura 3.60 Corrente Hall relativa, campo fraco  $VDD=5,7V$   $W/L=20\mu m/48\mu m$ .

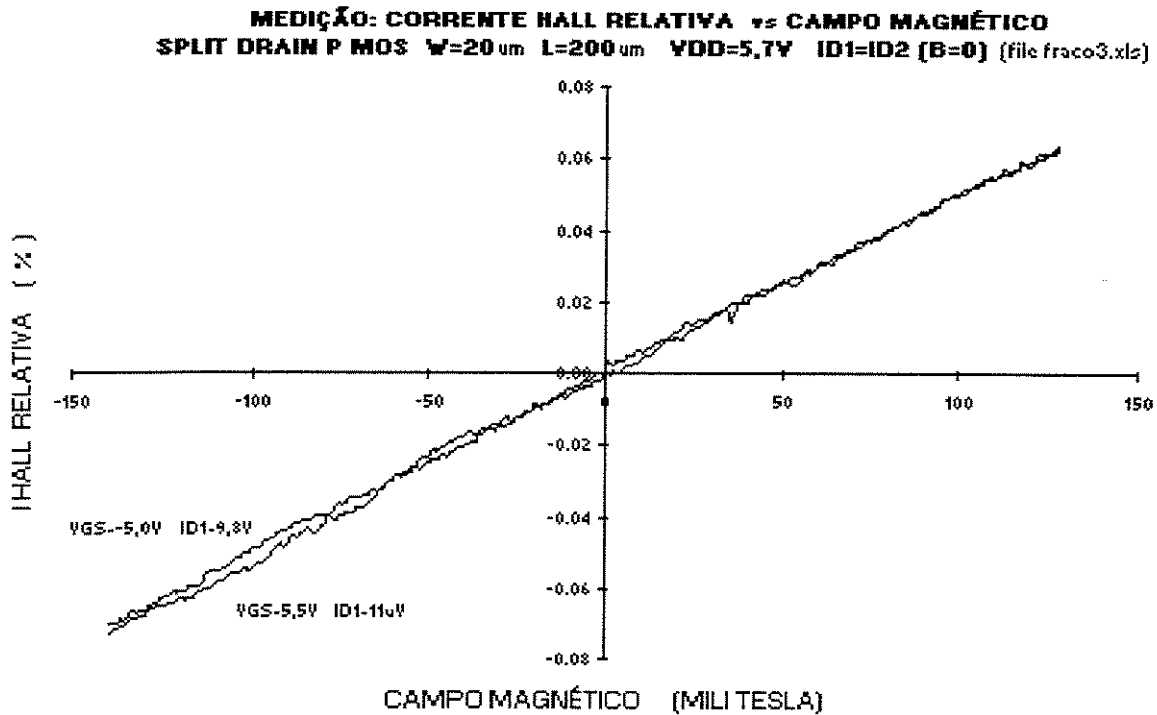


Figura 3.61 Corrente Hall relativa, campo fraco VDD=5,7V W/L=20um /200um .

Verifica-se que a corrente Hall relativa é linear com o campo magnético B e temos a mesma inclinação para diferentes tensões VGS. Isto concorda com a análise que indica o mesmo. (da equação 3.8 e 3.10 )

$$I_{Hr} = \frac{I_H}{I_D} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} GB \quad (3.16)$$

Entretanto, observa-se que a corrente Hall relativa aumenta levemente se diminui a tensão VGS.

A corrente Hall relativa melhora um pouco com menores tensões de gate (VGS=4,0V), mas já foi observado que a sensibilidade absoluta diminui.

Verifica-se que a corrente Hall relativa com a razão  $W/L=20\mu m/48\mu m$  é praticamente igual que para a razão  $W/L=20\mu m/200\mu m$ .

Isto indica que o efeito de deflexão de corrente pelo campo magnético está presente com sua máxima corrente Hall relativa , porque W é menor que L nas duas razões.

A literatura indica que o efeito de deflexão de corrente sofre uma queda na sua corrente Hall relativa, quando W é maior que L. ( pág.176 e 258 de [20]), [17],[26],[16].

A máxima corrente Hall relativa estará presente até perto de  $W=L$  , e como nesta razão a sensibilidade absoluta é maior, então esta geometria é ótima.

### 3.4.15 SENSIBILIDADE RELATIVA E A VARIAÇÃO DA GEOMETRIA: RAZÃO W/L

A sensibilidade relativa é a porcentagem (%) da razão corrente Hall / corrente total de dreno, obtida em cada unidade de campo magnético aplicado. Temos usado as dimensões: % / Tesla

$$Sr = \text{corrente Hall} / ((\text{corrente total de dreno})B) \quad (3.17)$$

$$Sr = I_{HALL} / (I_{D1} + I_{D2})B \quad (3.18)$$

A corrente Hall é como foi definida em 2.3.5 :  $I_{HALL} = I_{D1} - I_{D2}$

Onde a Corrente Hall relativa é:

$$I_{Hr} = \frac{I_{HALL}}{I_D} = \frac{I_{D1} - I_{D2}}{I_{D1} + I_{D2}} \quad (3.19)$$

Logo, a sensibilidade relativa é:

$$Sr = I_{Hr} / B \quad (3.20)$$

Para a dimensão da razão,  $I_{Hr}$  corrente Hall relativa, foi usada a porcentagem %

Outra relação equivalente é:

$$Sr = \text{sensibilidade absoluta} / (\text{corrente total de dreno}) \quad (3.21)$$

$$Sr = S_{abs} / (I_{D1} + I_{D2}) \quad (3.22)$$

Para a dimensão da sensibilidade absoluta foi usado nA/Tesla.

A sensibilidade relativa foi obtida com a dimensão: % /Tesla.

$$100 * nA / ((1000 * \mu A) T) = nA / ((10 * \mu A)T) \quad (3.23)$$

As medições de sensibilidade relativa já foram apresentadas dentro dos diagramas de sensibilidade absoluta, mas agora juntamos todas as medições para comparar facilmente os resultados.

Na figura 3.62 e 3.63 apresentam-se as medições de sensibilidade relativa ( com campo forte) num diagrama de barras vs tensão VGS para a razão  $W/L=20\mu m/48\mu m$  e num outro diagrama para a razão  $W/L=20\mu m/200\mu m$ .

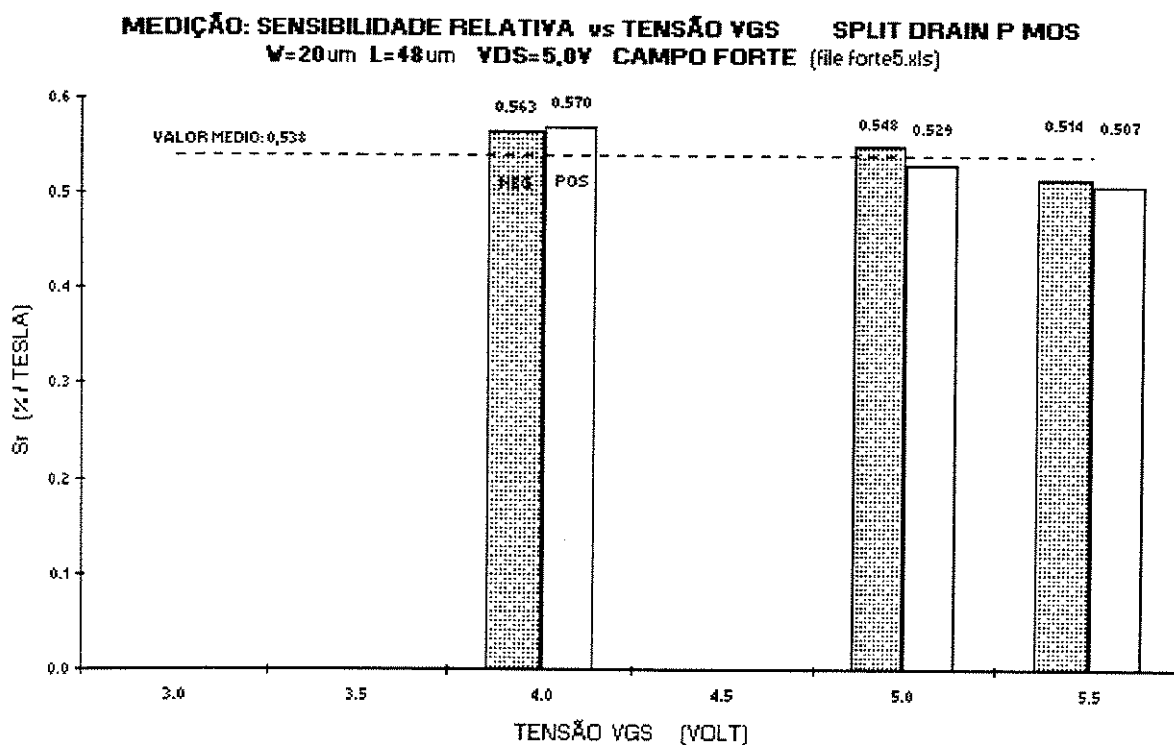


Figura 3.62 Sensibilidade relativa vs tensão VGS, geometria W/L=20um/48um .

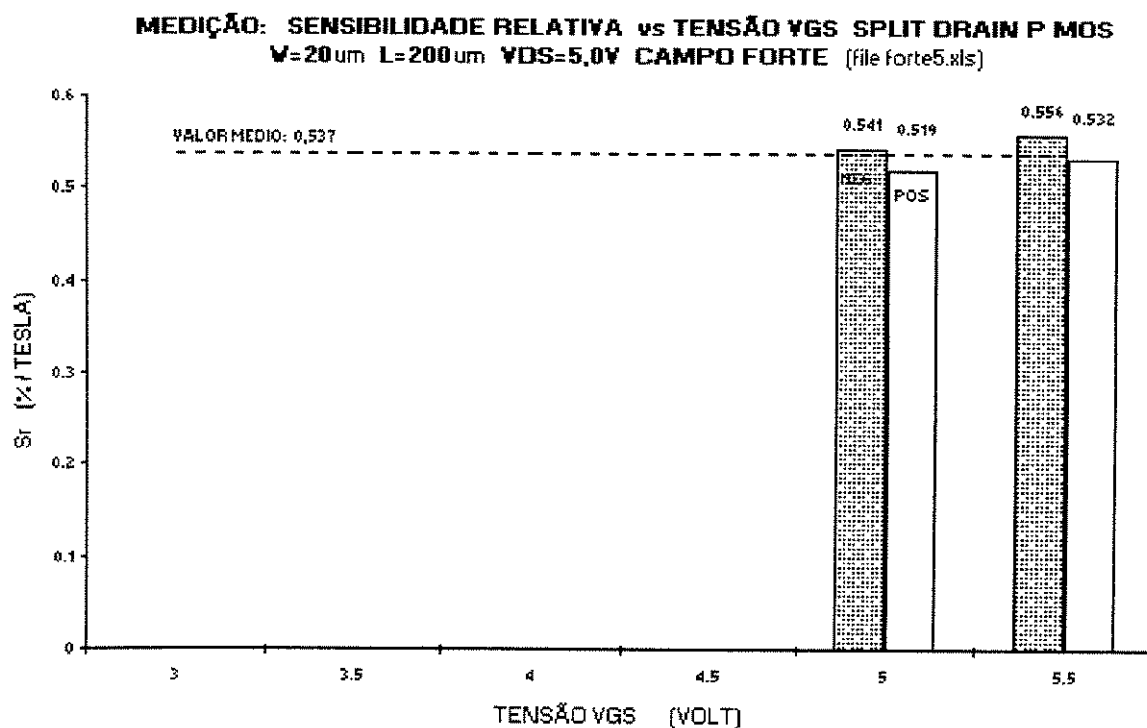


Figura 3.63 Sensibilidade relativa vs tensão VGS, geometria W/L=20um/200um .

Observando cada gráfico podemos verificar que a sensibilidade relativa ( $S_r$ ) é praticamente constante, concordando com a análise que diz que independe de  $I_D$  ou da tensão VGS. (da equação 3.6)

$$S_r = \frac{I_H}{I_D} \frac{1}{B} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G \quad (3.24)$$

Mas observa-se que aumenta debilmente quando diminui tensão VGS .

Observando os dois gráficos, para comparar as duas geometrias, verificamos também que a sensibilidade relativa  $S_r$  é constante, isto indica que o produto da razão  $L/W$  com o fator geométrico  $G$  é constante.

$$\text{Logo, se: } L/W \rightarrow \infty \quad \text{o produto } \left( \frac{L}{W} G \right) \rightarrow \text{constante} \quad (3.25)$$

O produto é praticamente constante até para valores da razão perto de um, isto é para valores típicos do *Split drain*.

Não é o caso típico do *Split drain* mas, em geral, conforme indica a literatura, este produto varia com a tendência de diminuir se  $L/W \rightarrow 0$  (caso do dispositivo MOS modo tensão).

Logo, o fator geométrico  $G$  é uma função da geometria, portanto é função da razão  $L/W$ .

Muitos autores têm verificado esta dependência de  $G$  e formulado expressões empíricas. (pág.168 e 176 [20]).



## CONCLUSÕES

O capítulo 3 foi a parte experimental que apresentou os resultados das principais medições feitas no CI FAPESP 42 para os dispositivos Hall, com o máximo interesse para o dispositivo Hall MOS chamado *Split drain*: foram apresentadas as medições de tensão de saída, corrente Hall, sensibilidade absoluta, campo mínimo detetável, sensibilidade relativa, corrente Hall relativa. São verificados os efeitos da variação da tensão *offset*, variação da geometria, da variação da tensão VGS ou da corrente de dreno.

As caracterizações dos dispositivos MOS, cujas fotos evidenciam a implementação do CI que têm área de  $1860 \mu\text{m} \times 1220 \mu\text{m}$ , foram satisfatórias.

As medições de sensibilidade ao campo magnético foram satisfatórias.

(a) No dispositivo modo tensão, para o qual só verificamos que existe o efeito Hall.

(b) No dispositivo modo corrente: O dispositivo *Split drain* funcionou e foi o centro de atenção do trabalho, por isso foram feitas todas as medições e estudos detalhados.

Uma limitação observada no *Split drain* é a falta de linearidade da corrente Hall com a tensão entre porta e fonte. Isto é mostrado com maior detalhe na seguinte figura 3.64.

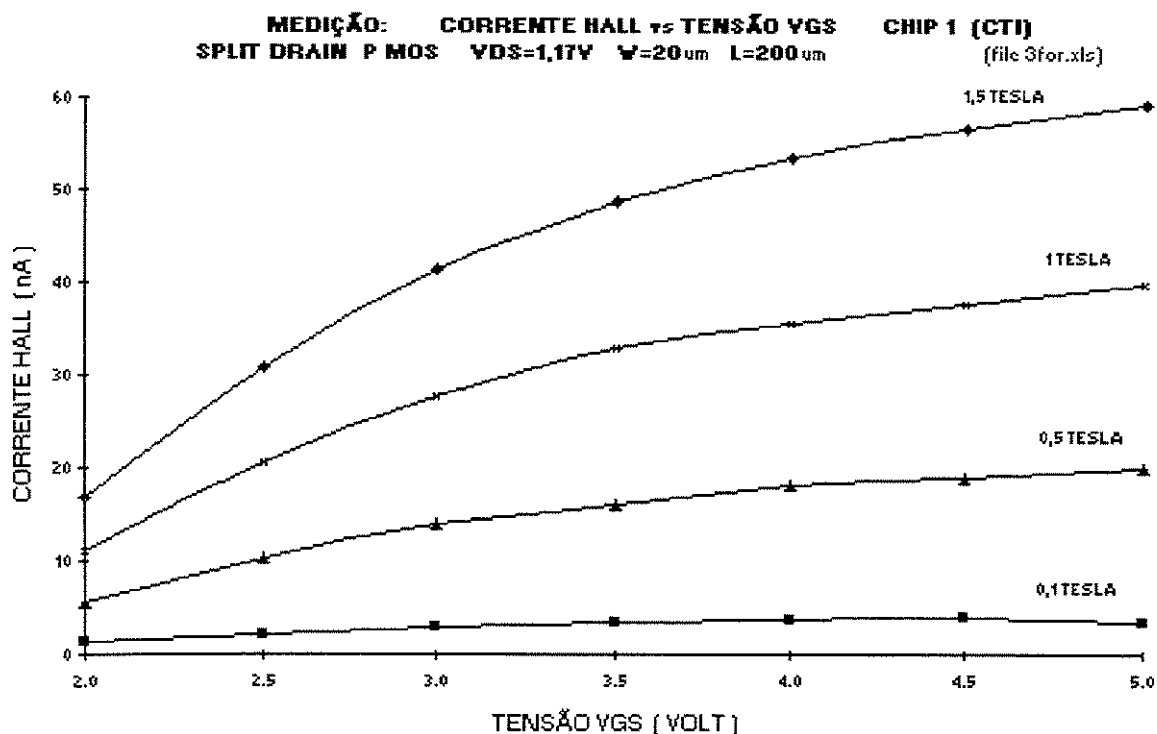


Figura 3.64 Corrente Hall vs Tensão VGS na região linear,  $V_{DS}=1,17\text{V}$ ,  $W/L=20\mu\text{m}/200\mu\text{m}$ .

## CAPÍTULO 4 - CÁLCULOS, COMPARAÇÕES E SIMULAÇÕES

### 4.1 Introdução

O capítulo 4 apresenta os cálculos teóricos e a comparação com os resultados experimentais, assim é feita a extração do produto (  $GL / W$  ) a partir do valor da sensibilidade relativa. Também são calculadas a corrente Hall relativa, a sensibilidade absoluta, a corrente Hall, e estes resultados são comparados com os resultados experimentais.

Este capítulo, apresenta também os resultados das simulações e são comparados com os resultados experimentais.

Este capítulo vai cobrir os seguintes itens:

4.2 Comparação do Modelo Teórico com os Resultados Experimentais.

4.3 Extração do valor do produto (  $\frac{L}{W} G$  ).

4.4 Cálculo da Corrente Hall Relativa.

4.5 Cálculo da Sensibilidade Absoluta.

4.6 Cálculo da Corrente Hall.

4.7 Comparação da Simulação com os Resultados Experimentais.

4.7.1 Medições de Caracterização.

4.7.2 Simulação da Caracterização.

## 4.2 COMPARAÇÃO DO MODELO TEÓRICO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A análise teórica apresentada no início deste trabalho, se baseia num modelo simples do dispositivo, o qual pressupõe que a mobilidade  $\mu$  dos portadores no canal é constante.

O modelo, também é chamado de nível 1 pela ferramenta Pspice.

Os cálculos seguintes, serão realizados e comparados com os resultados experimentais e os desvios observados podem ser indicados como consequência das limitações do modelo.

## 4.3 EXTRAÇÃO DO VALOR DO PRODUTO $(\frac{L}{W} G)$ .

O valor do produto  $(\frac{L}{W} G)$  pode ser determinado à partir da expressão de sensibilidade relativa.

O valor do fator Hall das lacunas no silício é menor que 0,9 e tipicamente é 0,8 . Isto foi verificado pelos estudos feitos em [30 ].

O valor da mobilidade do canal para MOS canal P, utilizado no modelo da AMS 1,2  $\mu\text{m}$  para simulação :

$$UO = \mu_{ch} = 178 \text{ cm}^2 / \text{Volt-seg}$$

Seu equivalente no sistema MKS é :  $\mu_{ch} = 0,0178 \text{ m}^2 / \text{Volt-seg}$

Para a geometria de  $W=20\mu\text{m}$  e  $L=48\mu\text{m}$  usaremos o valor médio das medições experimentais obtidas com varias tensões VGS:

$$Sr = (0,563+0,570+0,548+0,529+0,514+0,507) / 6$$

$$Sr = 0,538 \quad \% / \text{Tesla}$$

Este resultado foi mostrado na figura 3.49

Usaremos a expressão de Sr:

$$Sr = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G \quad (4.1)$$

Onde, a mobilidade Hall de canal é igual ao produto do fator Hall vezes a mobilidade de canal:

$$\mu_{Hch} = r_H \mu_{ch} = (0,8)(0,0178) = 0,0142 \quad (4.2)$$

Substituindo valores na expressão de Sr:

$$0,00538 = (0,0142) \left( \frac{L}{W} G \right)$$

$$\left( \frac{L}{W} G \right) = 0,379$$

Logo, o fator geométrico é:  $G = 0,379 (20\mu\text{m}) / (48\mu\text{m})$

$$G = 0,158$$

Para a geometria de  $W=20\mu\text{m}$  e  $L=200\mu\text{m}$  usaremos o valor médio das medições obtidas com varias tensões VGS:

$$S_r = (0,541+0,519+0,556+0,532) / 4$$

$$S_r = 0,537 \quad \% / \text{Tesla}$$

Este resultado foi mostrado na figura 3.50

Usamos a expressão de  $S_r$ :

$$S_r = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G \quad (4.3)$$

onde, a mobilidade Hall de canal já foi calculado:

$$\mu_{Hch} = r_H \mu_{ch} = (0,8)(0,0178) = 0,0142 \quad (4.4)$$

Substituindo valores na expressão de  $S_r$ :

$$0,00537 = (0,0142) \left( \frac{L}{W} G \right)$$

$$\left( \frac{L}{W} G \right) = 0,378$$

O fator geométrico é:  $G = 0,378 (20\mu\text{m}) / (200\mu\text{m})$

$$G = 0,0378$$

#### 4.4 CÁLCULO DA CORRENTE HALL RELATIVA

O valor da corrente Hall relativa pode ser calculado a partir da sensibilidade relativa média que temos como dado.

$$I_{Hr} = S_r B \quad (4.5)$$

Para o caso de  $W=20\mu\text{m}$  e  $L=48\mu\text{m}$  :

$$I_{Hr} = 0,538 B \quad \%$$

Para o caso de  $W=20\mu\text{m}$  e  $L=200\mu\text{m}$  :

$$I_{Hr} = 0,537 B \quad \%$$

Para efeito de comparação, foram traçadas curvas correspondentes a estas expressões teóricas junto com os resultados experimentais. Assim temos as seguintes figuras 4.1.e 4.2 .

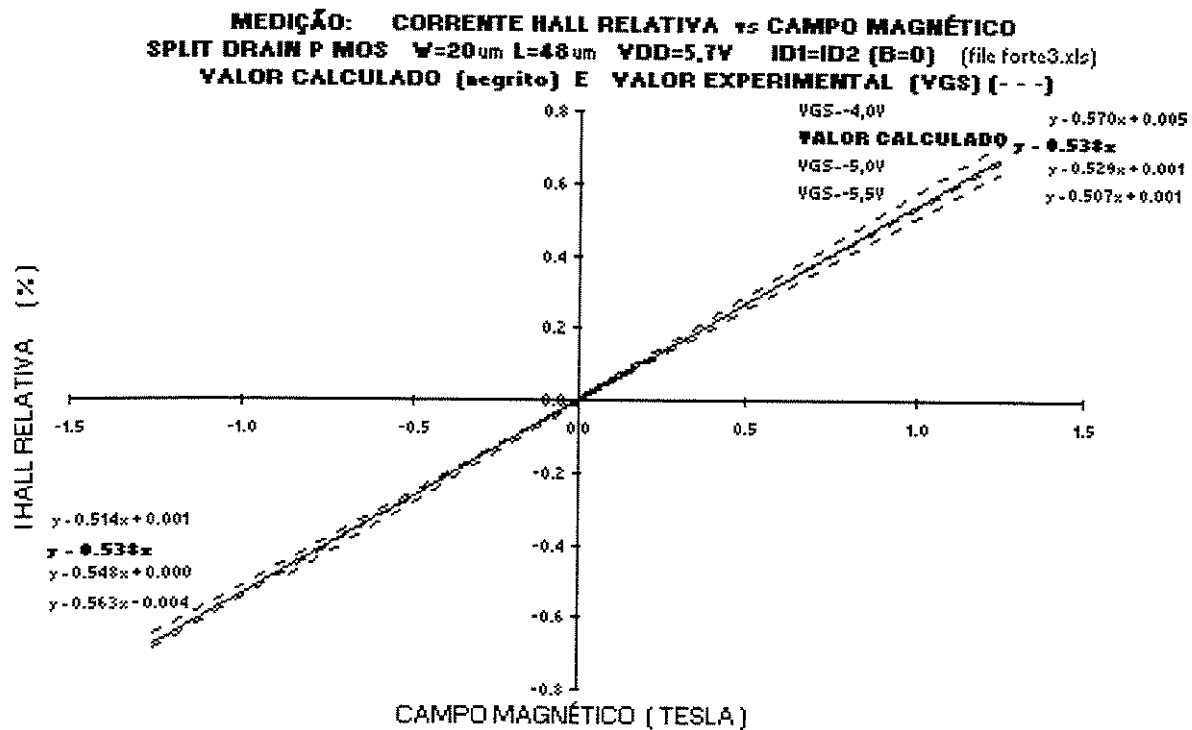


Figura 4.1 Corrente Hall relativa: resultados teóricos e experimentais W=20um e L=48um .

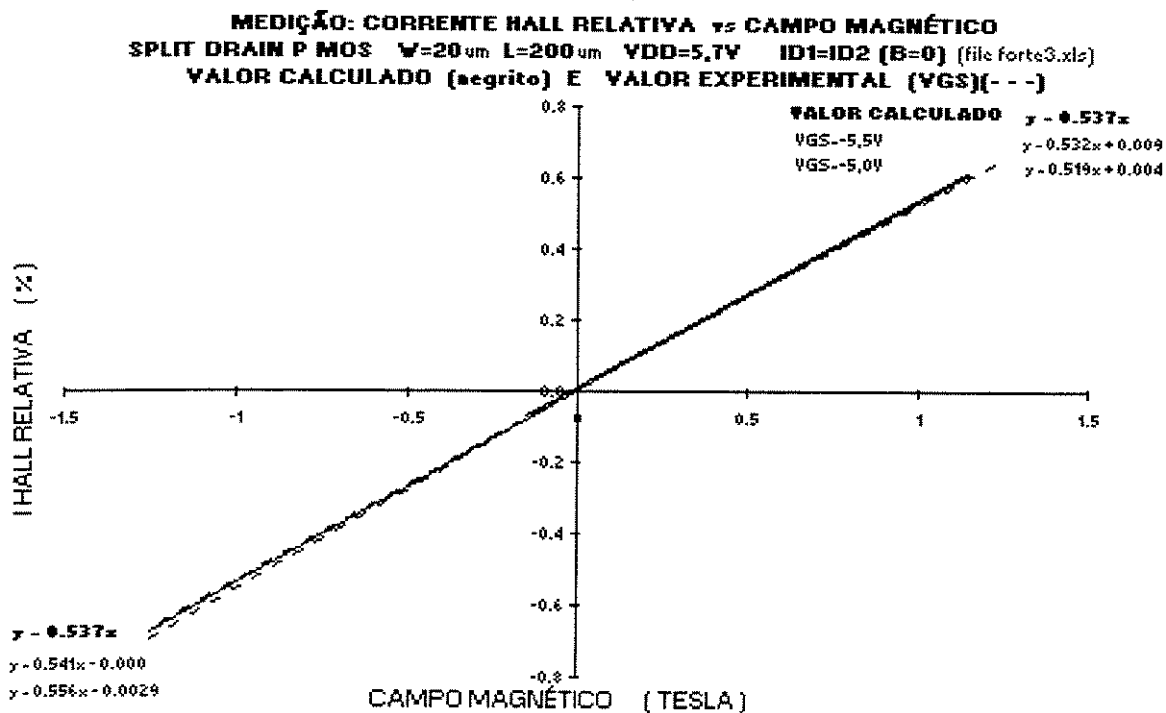


Figura 4.2 Corrente Hall relativa: resultados teóricos e experimentais W=20um e L=200um .

Verifica-se novamente que a corrente Hall relativa é linear com o campo magnético B. A inclinação ou fator angular das curvas experimentais é praticamente igual à inclinação da curva calculada da expressão teórica:

$$(equação 3.16) \quad I_{Hr} = \frac{I_H}{I_D} = \mu_{Hch} \frac{L}{W} GB$$

Também verifica-se que as inclinações das curvas para as duas geometrias são praticamente iguais.

#### 4.5 CÁLCULO DA SENSIBILIDADE ABSOLUTA

O valor da sensibilidade absoluta pode ser calculado à partir da sensibilidade relativa média que temos como dado.

Logo, pode-se determinar o valor da sensibilidade absoluta à partir da expressão equivalente:

$$S_{abs} = S_r I_D \quad (4.6)$$

Para o caso de  $W=20\mu m$  e  $L=48\mu m$  é:

$$S_{abs} = \frac{0,538}{100} I_D \quad nA / Tesla$$

Onde  $I_D$  têm dimensão de nA

$$S_{abs} = \frac{0,538}{100} 1000 I_D \quad \mu A / Tesla$$

Onde  $I_D$  têm dimensão de  $\mu A$ .

Logo, para os cálculos, usaremos a expressão:

$$S_{abs} = 0,538(10I_{D1} + 10I_{D2})$$

$$\text{Para } V_{GS}=-5,5 V \quad I_{D1}=33\mu A: \quad S_{abs} = 0,538(330 + 330) = 355$$

$$\text{Para } V_{GS}=-5,0 V \quad I_{D1}=27\mu A: \quad S_{abs} = 0,538(270 + 270) = 291$$

$$\text{Para } V_{GS}=-4,0 V \quad I_{D1}=17\mu A: \quad S_{abs} = 0,538(170 + 170) = 183$$

Para o caso de  $W=20\mu m$  e  $L=200\mu m$  é:

$$S_{abs} = \frac{0,537}{100} I_D \quad nA / Tesla$$

Onde  $I_D$  têm dimensão de nA.

$$S_{abs} = \frac{0,537}{100} 1000 I_D \quad \mu A / \text{Tesla}$$

Onde  $I_D$  têm dimensão de  $\mu A$

Logo, para os cálculos, usaremos a expressão:

$$S_{abs} = 0,537(10I_{D1} + 10I_{D2})$$

Para  $V_{GS} = -5,5 \text{ V}$   $I_{D1} = 11 \mu A$ :  $S_{abs} = 0,537(110 + 110) = 118$

Para  $V_{GS} = -5,0 \text{ V}$   $I_{D1} = 9,8 \mu A$ :  $S_{abs} = 0,537(98 + 98) = 105$

Para efeito de comparação foram traçados os gráficos correspondentes a estes valores calculados (expressões teóricas) junto com os resultados experimentais.

Na figura 4.3 e 4.4 (a) apresentam-se dois diagramas de barras  $S_{abs}$  vs. tensão  $V_{GS}$ , uma para a razão  $W/L = 20 \mu m / 48 \mu m$  e a outra para a razão  $W/L = 20 \mu m / 200 \mu m$ .

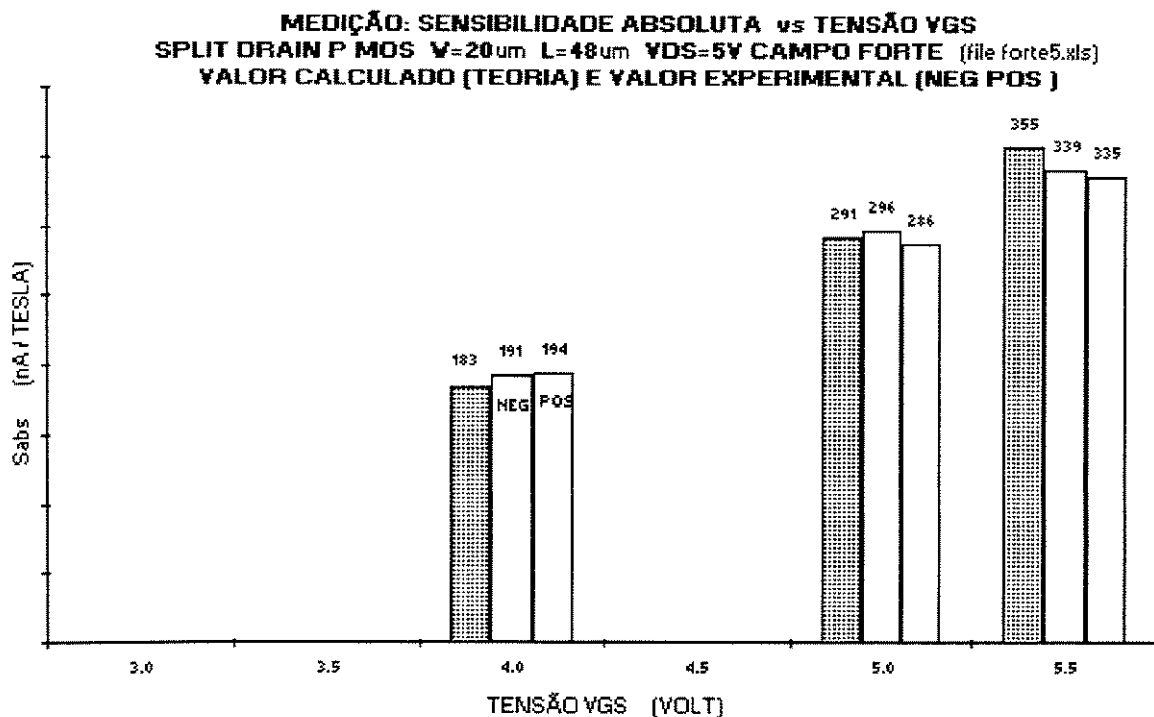


Figura 4.3 Sensibilidade absoluta: resultados teóricos e experimentais  $W=20 \mu m$  e  $L=48 \mu m$

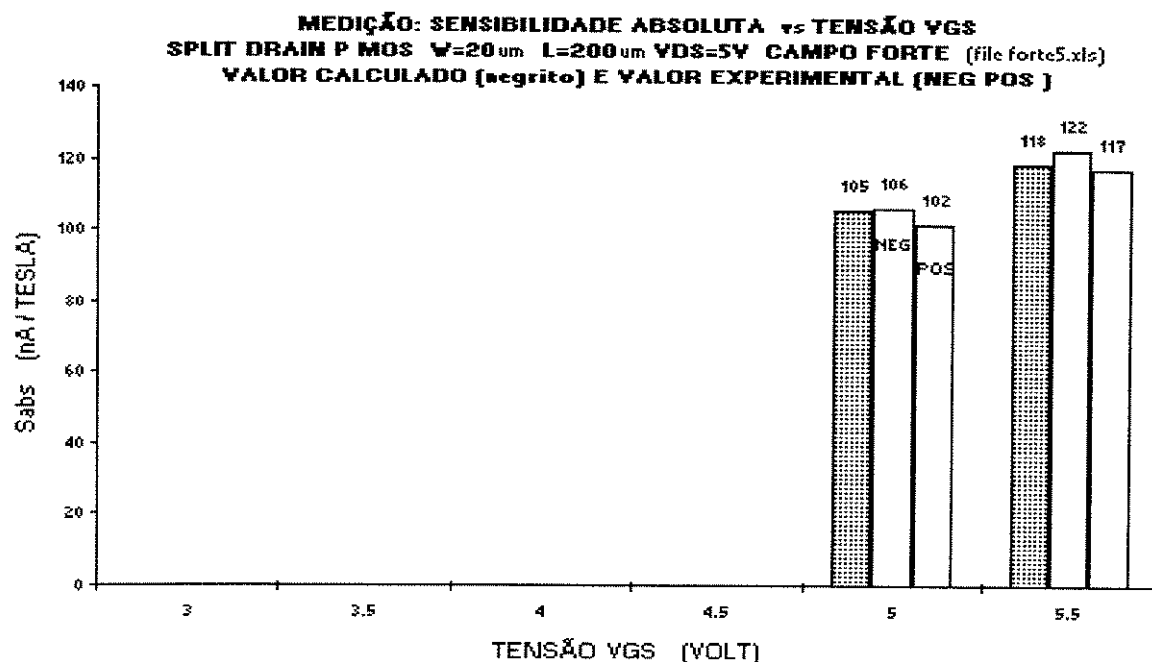


Figura 4.4 (a) Sensibilidade absoluta: resultados teóricos e experimentais W=20um e L=200um, região de saturação, VDS= 5V .

Na região linear, também foram feitos os mesmos cálculos e foram traçados os gráficos correspondentes e mostrados na figura 4.4 (b).

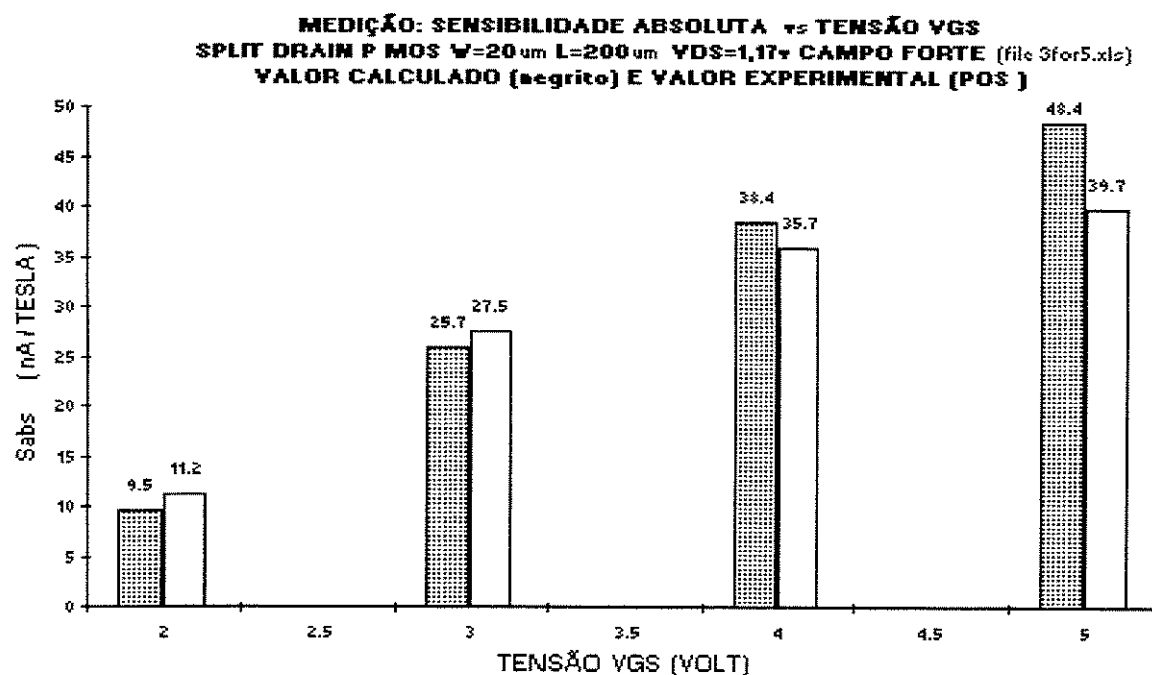


Figura 4.4 (b) Sensibilidade absoluta : resultados teóricos e experimentais W=20um e L=200um , região linear , VDS=1,17V.



#### 4.6 CALCULO DA CORRENTE HALL

Pode-se calcular o valor da corrente Hall à partir da sensibilidade absoluta que temos como dado. Logo, o valor da corrente Hall pode se determinar a partir da expressão equivalente:

$$I_H = S_{abs} B \quad (4.7)$$

Para o caso de  $W=20\mu m$  e  $L=48\mu m$  é:

Para  $V_{GS}=-5,5 V$   $ID1=33\mu A$ :  $I_H = 355 B$  nA

Para  $V_{GS}=-5,0 V$   $ID1=27\mu A$ :  $I_H = 291 B$  nA

Para  $V_{GS}=-4,0 V$   $ID1=17\mu A$ :  $I_H = 183 B$  nA

Para o caso de  $W=20\mu m$  e  $L=200\mu m$  é:

Para  $V_{GS}=-5,5 V$   $ID1=11\mu A$ :  $I_H = 118 B$  nA

Para  $V_{GS}=-5,0 V$   $ID1=9,8\mu A$ :  $I_H = 105 B$  nA

Para efeito de comparação foram traçados os gráficos correspondentes a estas expressões teóricas junto com os resultados experimentais. Assim temos as seguintes figuras 4.5 e 4.6

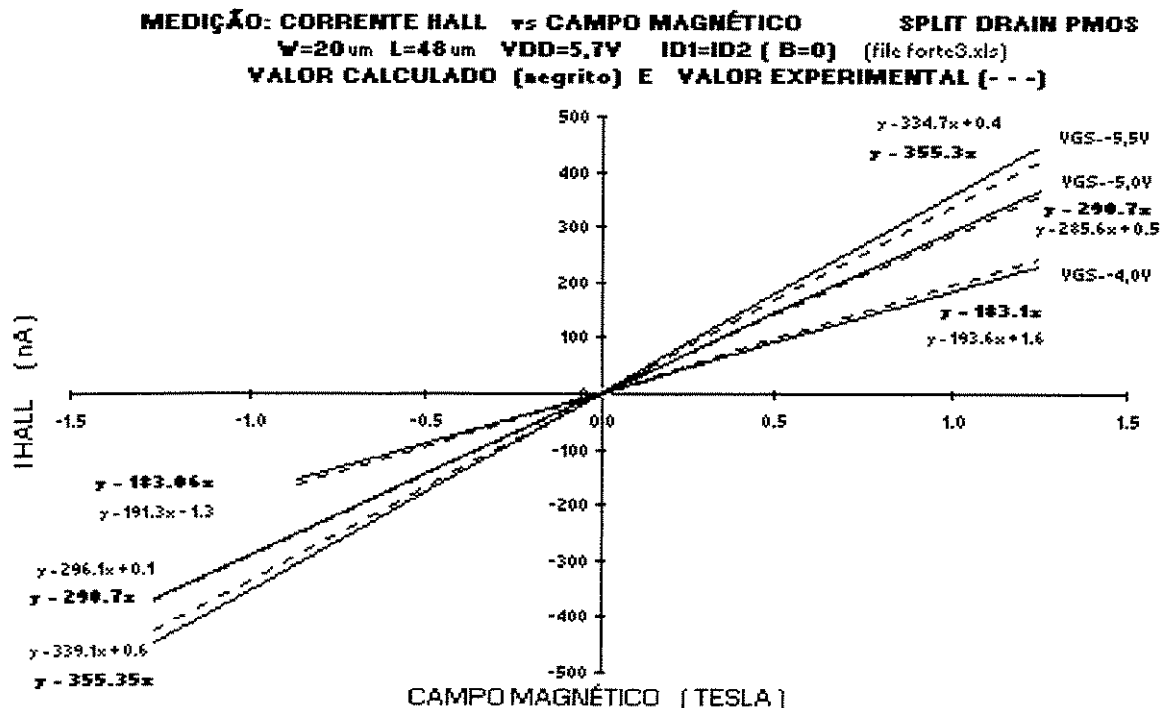


Figura 4.5 Corrente Hall : resultados teóricos e experimentais  $W=20\mu m$  e  $L=48\mu m$ .

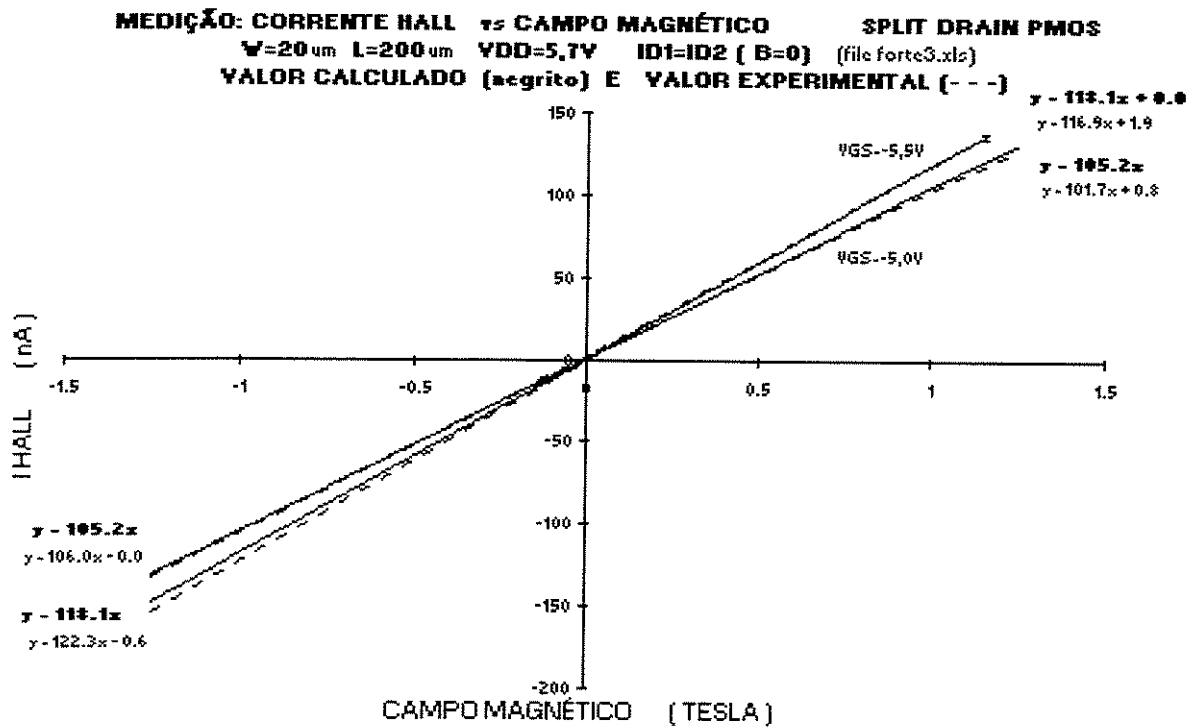


Figura 4.6 Corrente Hall : resultados teóricos e experimentais **W=20um** e **L=200um**.

Verifica-se que os cálculos da corrente Hall concordam com os valores experimentais. A inclinação das curvas experimentais é praticamente igual à inclinação da curva calculada com a expressão.

$$I_H = \mu_{Hch} \frac{L}{W} G I_D B$$

## 4.7 COMPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.7.1 MEDIÇÕES DE CARACTERIZAÇÃO:

A caracterização elétrica dos dispositivos Hall, configurados como transistores MOS, foi feita medindo-se a relação  $I_D \times V_{DS}$ . Estas curvas são apresentadas nas seguintes figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

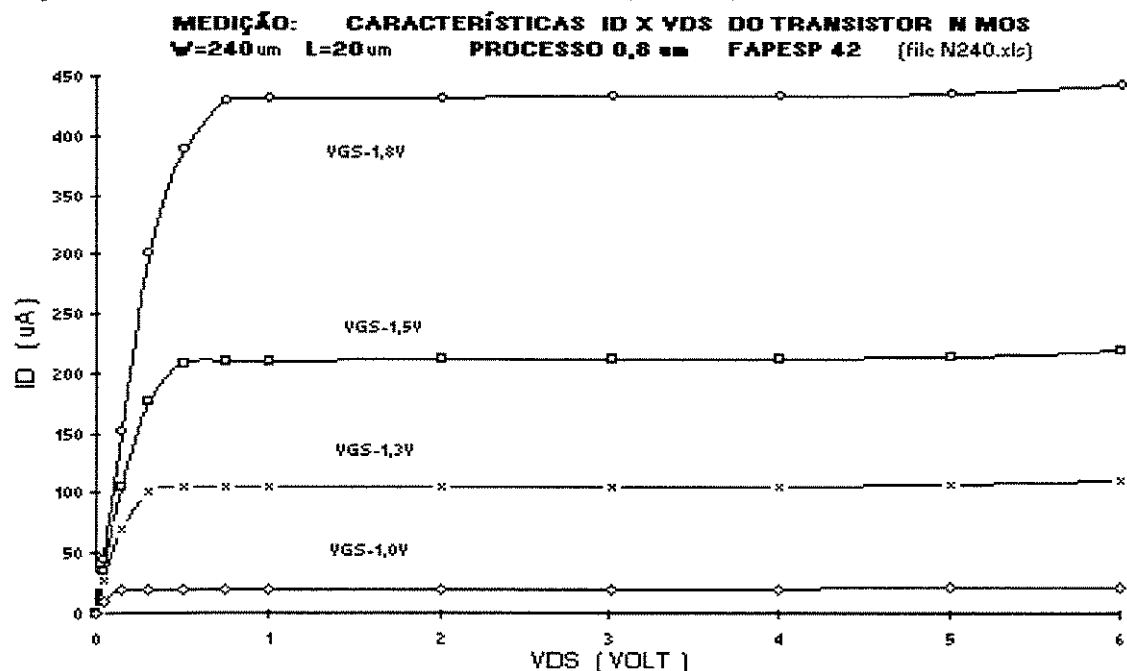


Figura 4.7 Características  $I_D$  vs  $V_{DS}$  do transistor NMOS  $W=240\mu m$   $L=20\mu m$ .

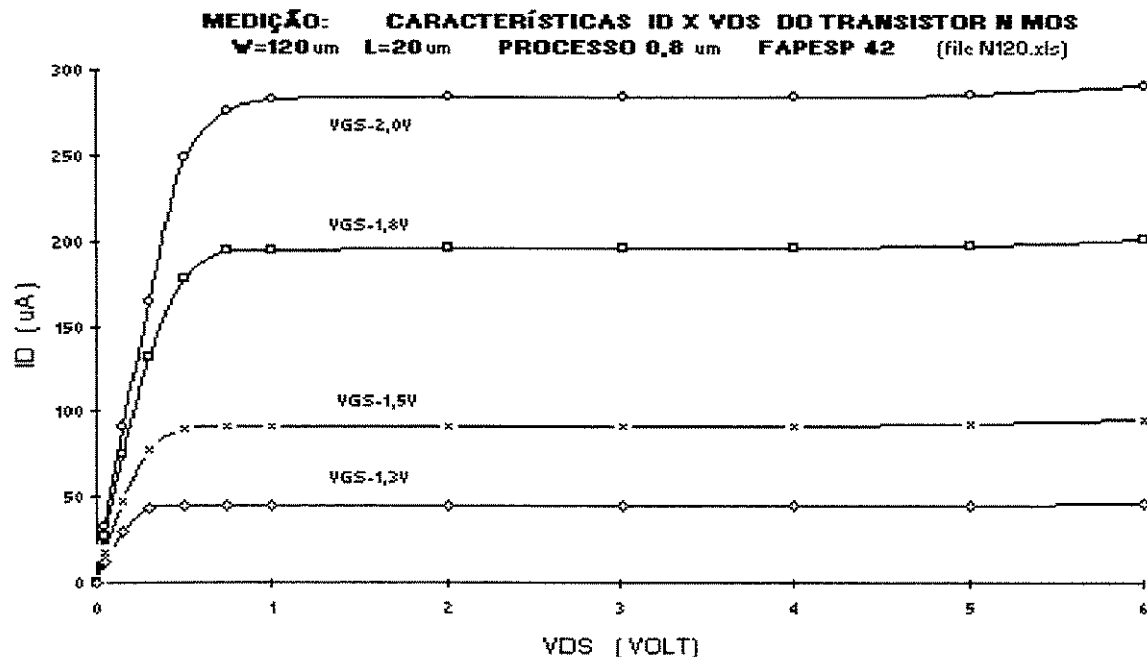


Figura 4.8 Características  $I_D$  vs  $V_{DS}$  do transistor NMOS  $W=120\mu m$   $L=20\mu m$ .

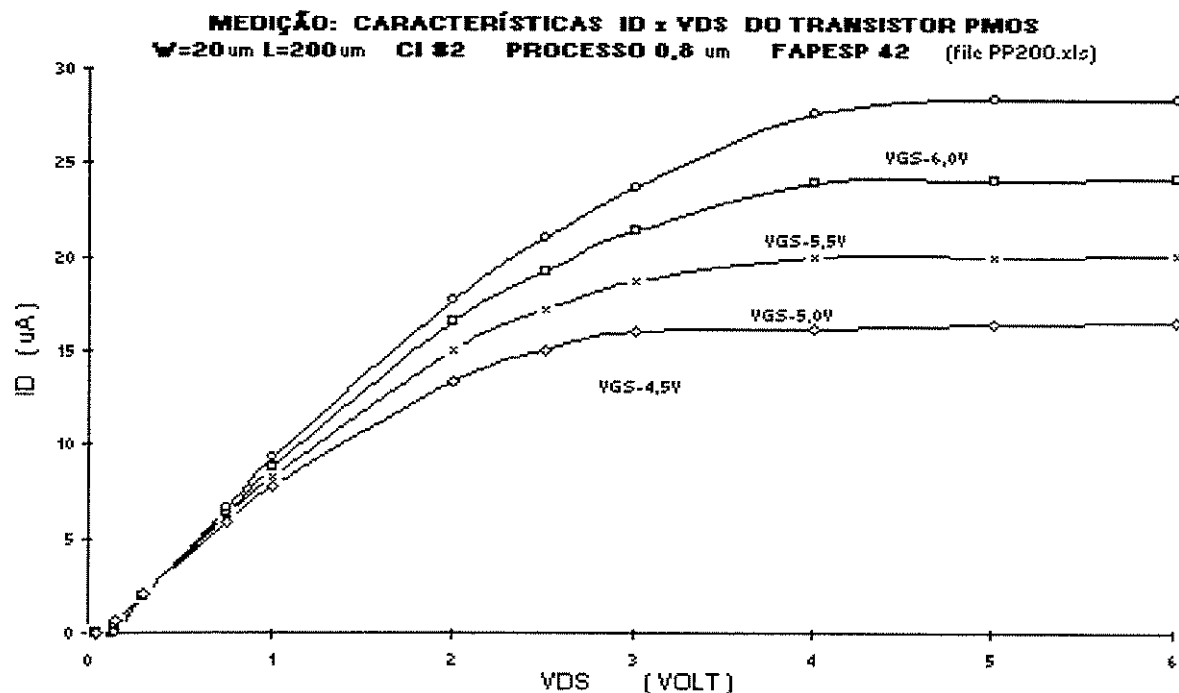


Figura 4.9 Características  $I_D$  vs  $V_{DS}$  do transistor PMOS  $W=20\mu m$   $L=200\mu m$ .  
 Também foi medida a relação  $I_D \times V_{GS}$  na região de saturação e na região linear.  
 Estas curvas são mostradas nas seguintes figuras 4.10 e 4.11.

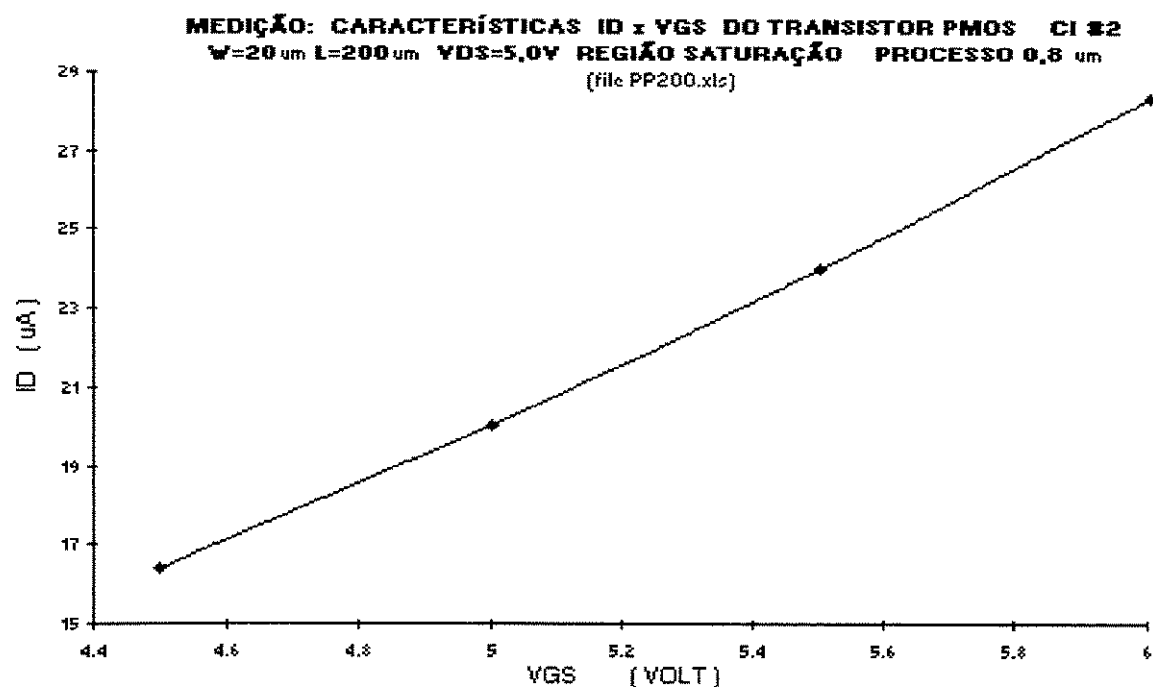


Figura 4.10 Características  $I_D$  vs  $V_{GS}$  na região de saturação do transistor PMOS  $W=20\mu m$   $L=200\mu m$ .

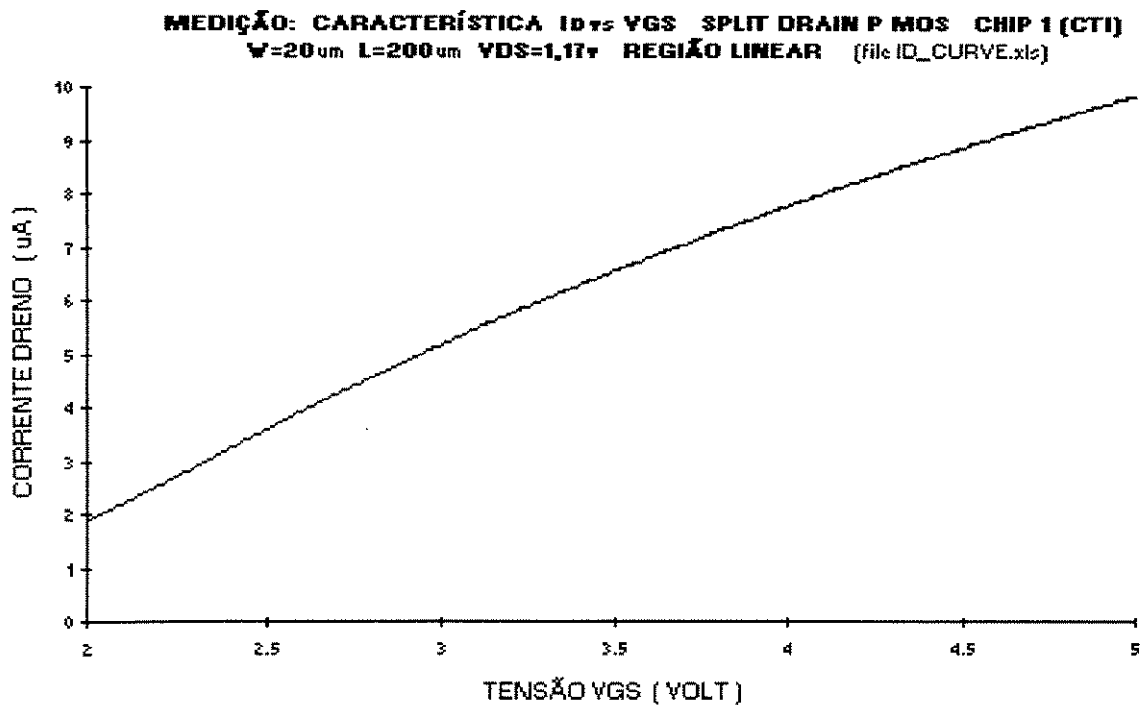


Figura 4.11 Características  $I_D$  vs  $V_{GS}$  na região linear do transistor PMOS  $W=20\mu m$   $L=200\mu m$ .

#### 4.7.2 SIMULAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO.

O programa PSPICE foi utilizado para realizar as simulações dos transistores MOS. Para isto, foi utilizado o arquivo AMS1U2.LIB com os modelos MODN e MODP fornecido pela AMS. Os seguintes gráficos das figuras 4.12, 4.13 e 4.14 mostram os resultados destas simulações.

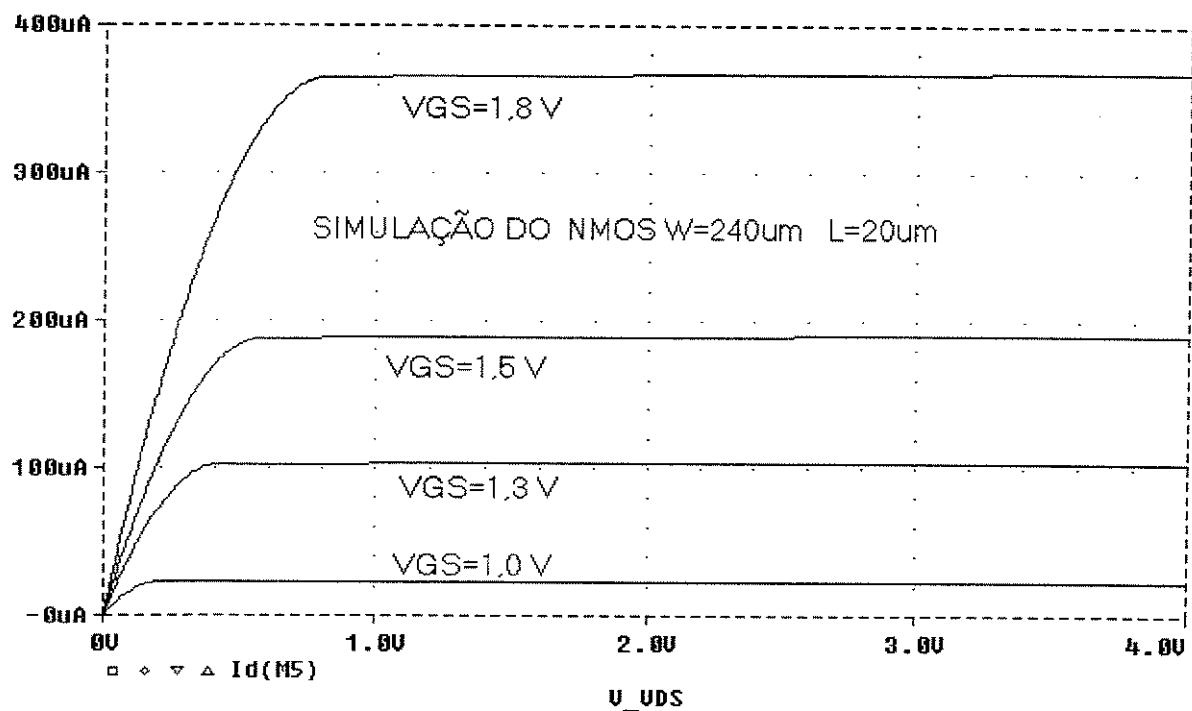


Figura 4.12 Simulação das características  $I_D$  vs  $V_{DS}$  do transistor NMOS  $W=240\mu\text{m}/20\mu\text{m}$ .

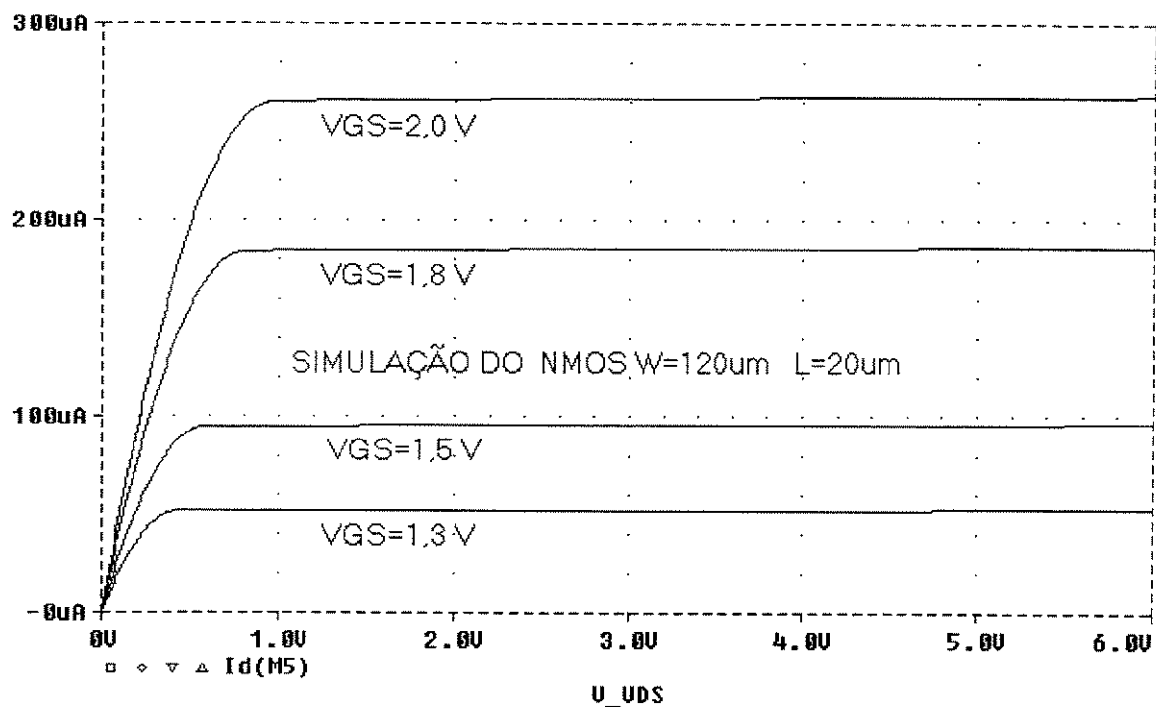


Figura 4.13 Simulação das características  $I_D$  vs  $V_{DS}$  do transistor NMOS  $W=120\mu\text{m}/20\mu\text{m}$ .

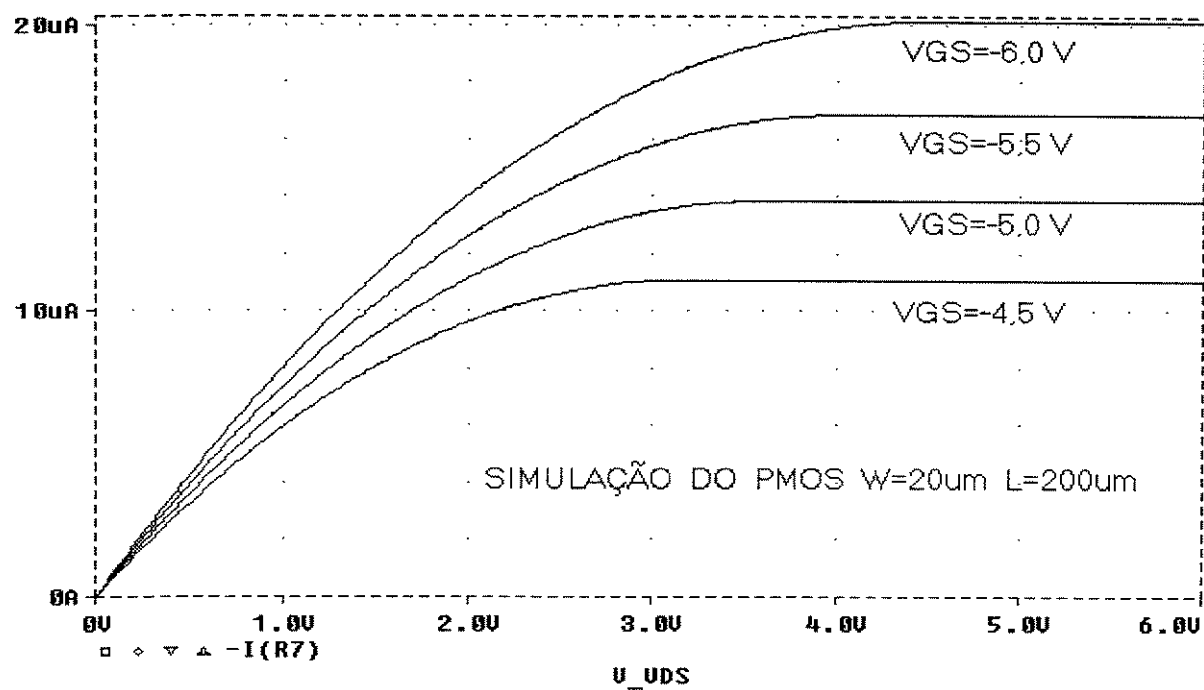


Figura 4.14 Simulação das características  $I_D$  vs  $V_{DS}$  do transistor PMOS  $W=20\mu\text{m}/20\mu\text{m}$ .

Os resultados experimentais da caracterização dos transistores foram comparados com os resultados da simulação e verifica-se que concordam dentro de aproximações aceitáveis.

## CAPÍTULO 5 - LAYOUT DO CI, MÉTODOS DE MEDIÇÃO E APLICAÇÕES

### 5.1 Introdução

O capítulo 5 apresenta a descrição e o layout do CI FAPESP42, que contém diferentes geometrias de transistores MOS *Split Drain*; circuitos de teste do CI e circuitos de condicionamento de sinais que foram desenvolvidos e aplicados para obter os resultados experimentais já apresentados.

Descrição do equipamento para gerar e medir o campo magnético.

Aplicação do sensor Hall na medição de potência numa linha de transmissão de energia elétrica: usando placa Hall, usando dispositivo Hall modo tensão, usando *Split drain*.

Logo este capítulo esta composto dos seguintes itens:

- 5.1 Introdução
- 5.2 Descrição do CI
- 5.3 Layout do CI
- 5.4 Métodos para as Medições de Caracterização
- 5.5 Método para as Medições da Sensibilidade ao Campo Magnético
- 5.6 Circuitos para a Medição da Corrente Hall
- 5.7 A Placa de Teste
- 5.8 Equipamento para gerar, medir e registrar os dados do Campo Magnético
- 5.9 Análise da Medição Magnética com núcleo e entreferro de ar
- 5.10 Aplicação do Sensor Hall na Medição de Corrente Elétrica
- 5.11 Aplicação do Sensor Hall na Medição da Potência Elétrica.



## 5.2 DESCRIÇÃO DO CI

O CI FAPESP42 foi apresentado com o título “ Projeto e Fabricação de CI com Dispositivos magneto sensíveis para detecção de sinais analógicas : sensor Hall modo corrente - *split drain*

O circuito inclui quatro diferentes configurações de sensores de campo magnético:

- Dois dispositivos sensor Hall no modo corrente que são transistores MOS *split drain*.
- Dois dispositivos sensores Hall no modo tensão.

Um dos transistores MOS *split drain* esta conectado a um amplificador diferencial *folded-cascode*.

## 5.3 LAYOUT DO CI

O projeto do CI foi realizado utilizando-se o ambiente de Software da Mentor Graphics.

O *chip* foi fabricado pela AMS com a identificação CMP RUN A97-09.

Protótipos foram encapsulados em DIL 28 pinos.

### Tecnologia de fabricação :

AMS CMOS 0,8  $\mu\text{m}$  DLP

CMOS n-well

### Área do *chip* :

$\Delta X = 1860 \mu\text{m}$        $\Delta Y = 1220 \mu\text{m}$

Área = 2,269  $\text{mm}^2$

### Data do envio do arquivo do *layout* :

CMP RUN : A97 -09      Data limite para envio : 06/06/1997

### CAD usado no projeto e formato do *layout* :

CAD : Mentor Graphics - Formato : GDSII

### CAD usado para checagem do projeto ( DRC, ERC, etc ) :

CAD : Mentor Graphics

Para o DRC da tecnologia AMS CMOS 0,8  $\mu\text{m}$ , foi usado o arquivo **Cyb.rules** localizado no diretório

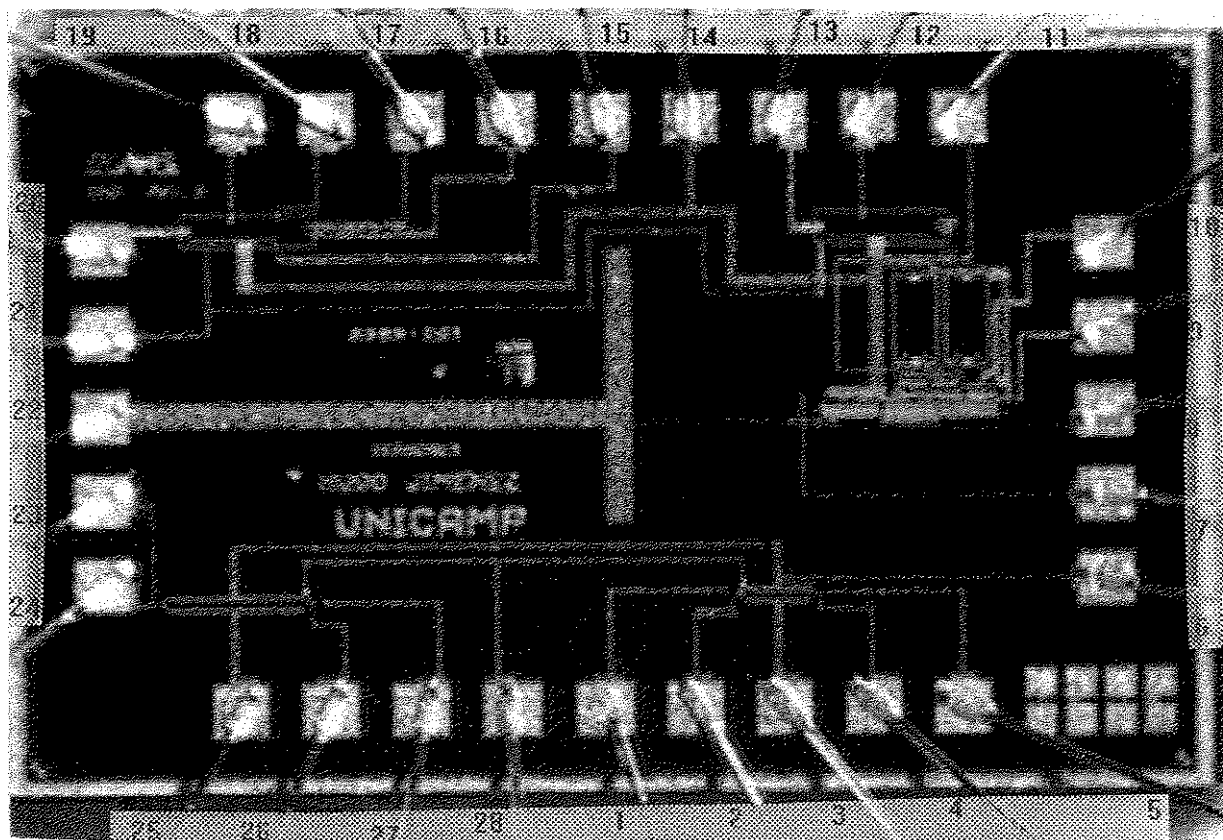
\$AMS\_DIR/mentor/ic\_station/Cyb/Cyb.rules

### Onde e com que facilidades foi medido o *chip* :

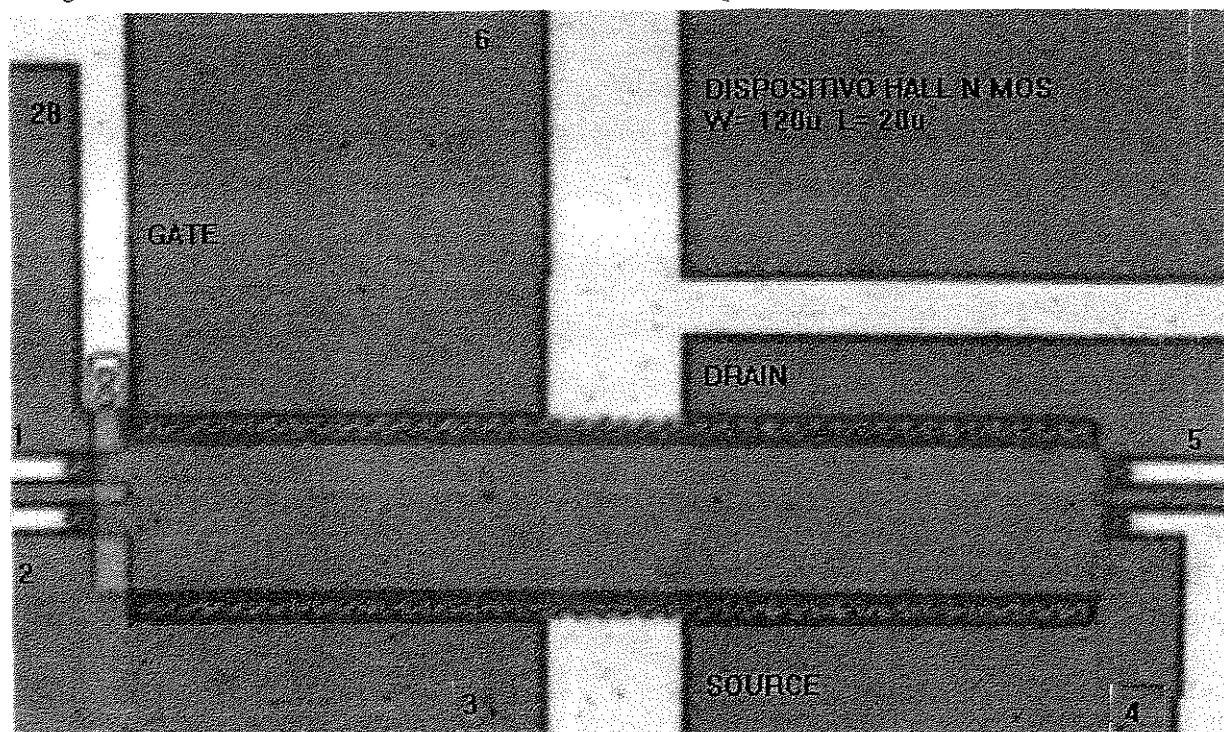
Equipamentos disponíveis na FEEC e no Instituto de Física UNICAMP.

**Fotos do CI:** Foram tiradas fotos do CI no Centro Tecnológico para Informática (CTI) , usando microscópios conectados num PC , após a digitalização da imagem e gravados em arquivos TIF.

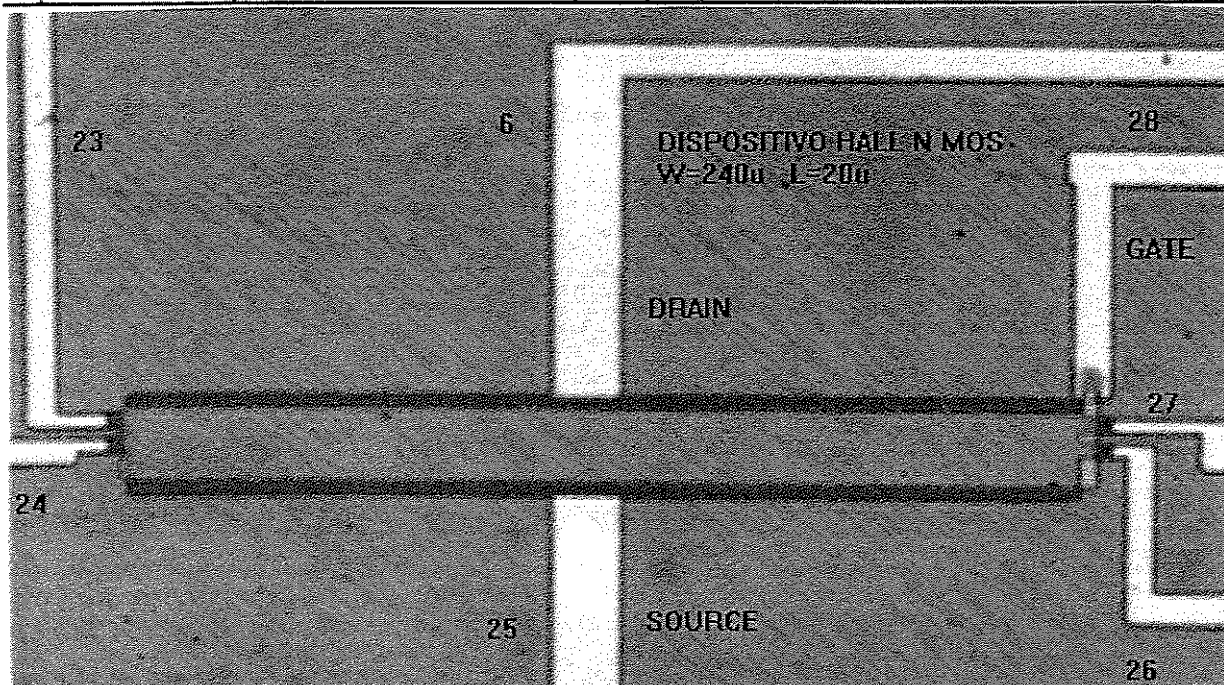
O circuito integrado é mostrado nas seguintes fotografias 5.1 5.2 5.3 5.4 e 5.5



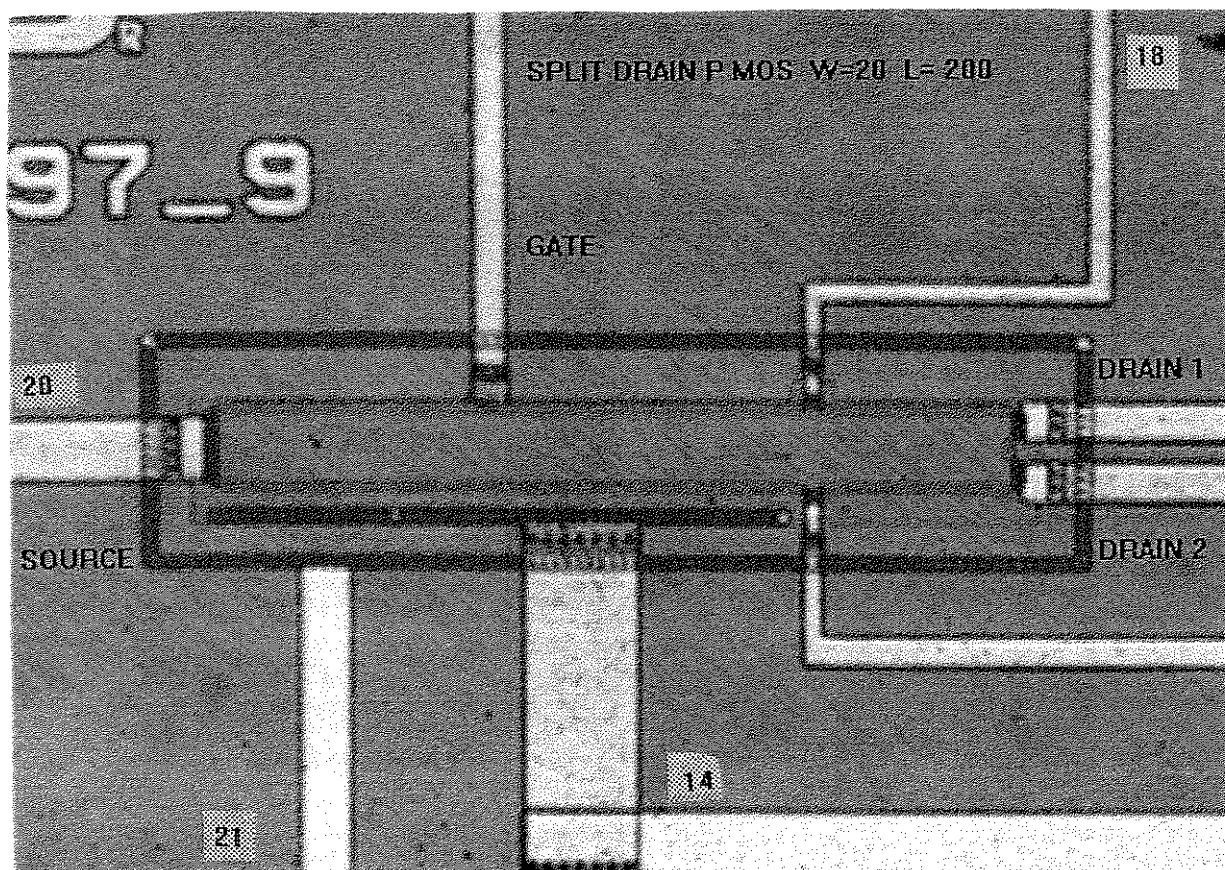
Fotografia 5.1 Área total do CI FAPESP 42 - com DIL 28pinos



Fotografia 5.2 Área do dispositivo Hall NMOS  $W=120\mu m$   $L=20\mu m$

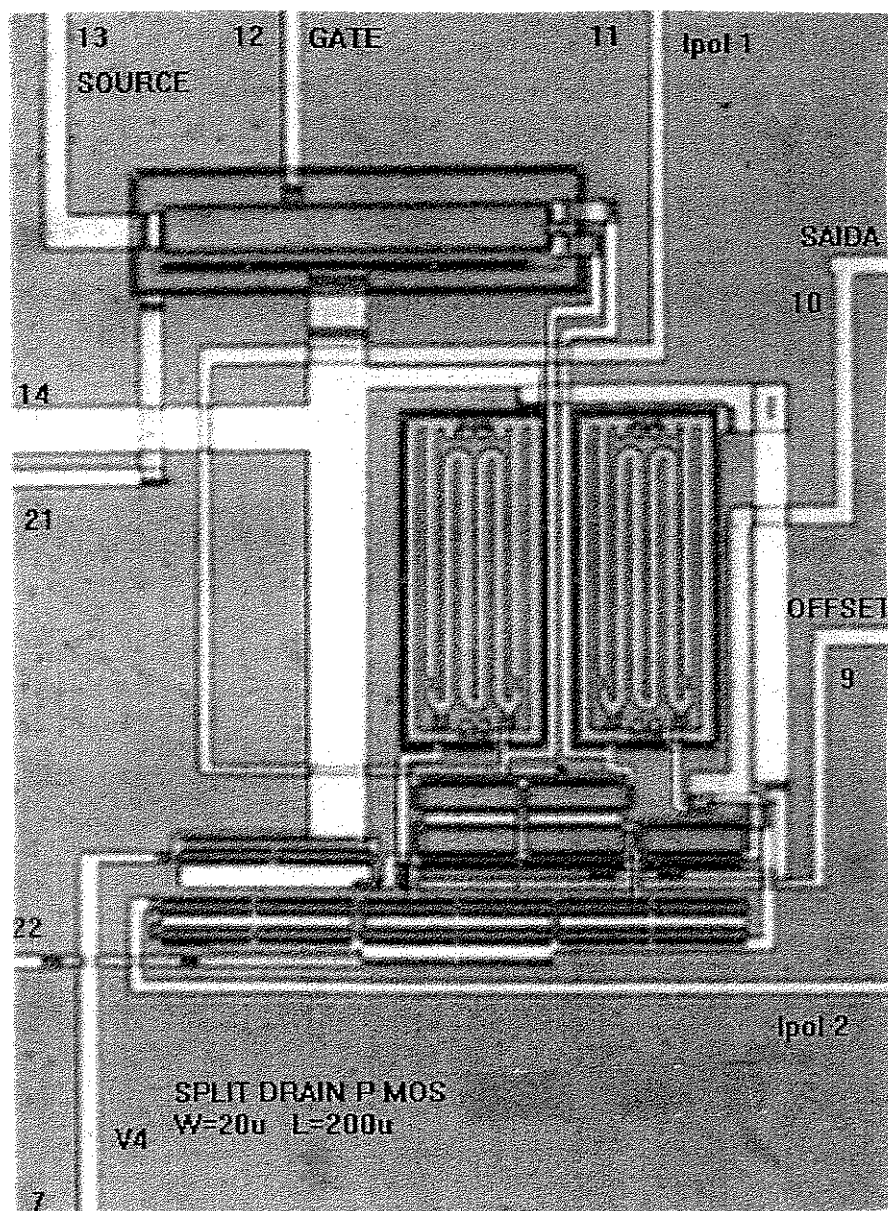


Fotografia 5.3 Área do dispositivo Hall NMOS  $W=240\mu m$   $L=200\mu m$



Fotografia 5.4 Área do Split drain PMOS  $W=20\mu m$   $L=200\mu m$





Fotografia 5.5 Área do circuito conversor I-V

#### 5.4 MÉTODOS PARA AS MEDIÇÕES DE CARACTERIZAÇÃO.

Os dispositivos Hall MOS precisam de circuitos adequados para fazer os testes como o de caracterização e de sensibilidade. Isto está relacionado com os métodos e esquemas de medição ilustrados nas figuras 5.1 5.2 5.3 e 5.4

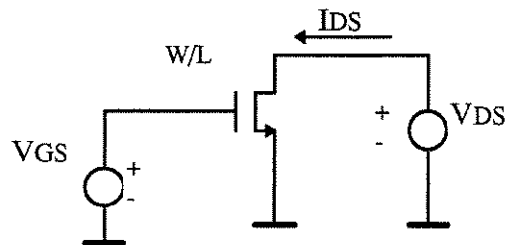


Figura 5.1 Esquema de medição da caracterização para N MOS

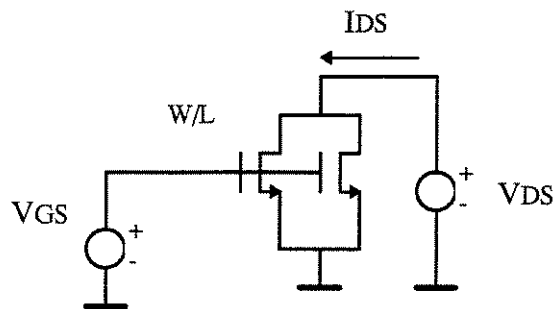


Figura 5.2 Esquema de medição da caracterização para Split drain N MOS

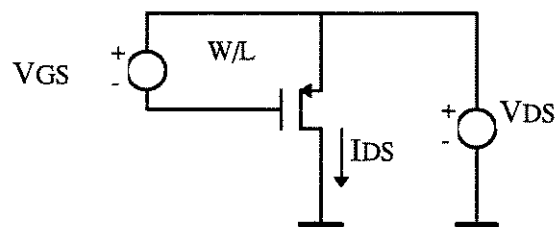


Figura 5.3 Esquema de medição da caracterização para o P MOS

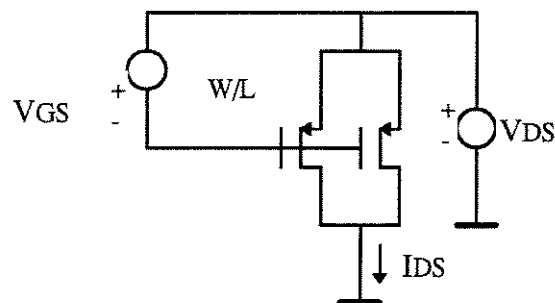


Figura 5.4 Esquema de medição da caracterização para o Split drain P MOS

### Condições de Medição:

Para:

Ajustar as polarizações necessárias ao dispositivo ou ao circuito integrado.

Fazer a montagem rápida ao *chip*.

Dar conexão rápida aos fios de ligação do circuito de teste com o *chip*.

Foi utilizado um circuito de teste com:

conectores de CI. (base )

fontes de tensão com regulação

conectores rápidos para fios. (tipo *proto board*)

fontes de corrente com regulação

Potenciômetros multivolta (*trimmer*).

Para facilitar o trabalho de caracterização foi utilizado o seguinte circuito de teste :

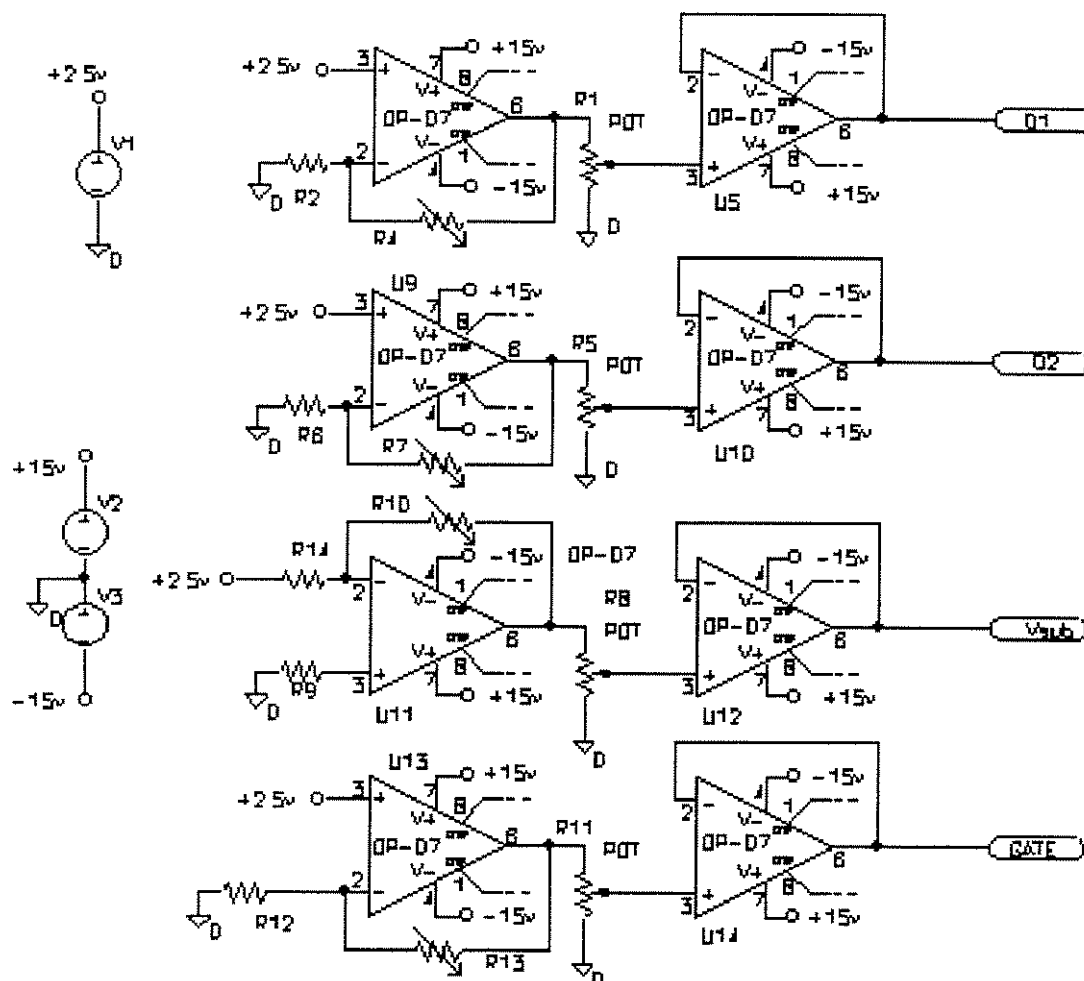


Figura 5.5 Circuito de teste para caracterização.

## 5.5 MÉTODO PARA AS MEDIÇÕES DA SENSIBILIDADE AO CAMPO MAGNÉTICO.

Para as medições da sensibilidade do dispositivo PMOS *Split drain*, foi utilizado um circuito para a medição da corrente Hall e também foi utilizado um equipamento para gerar e medir o campo magnético aplicado.

## 5.6 CIRCUITOS PARA MEDIÇÃO DA CORRENTE HALL

O Esquema do circuito utilizado para a medição da corrente Hall no dispositivo PMOS *Split drain* é o seguinte:

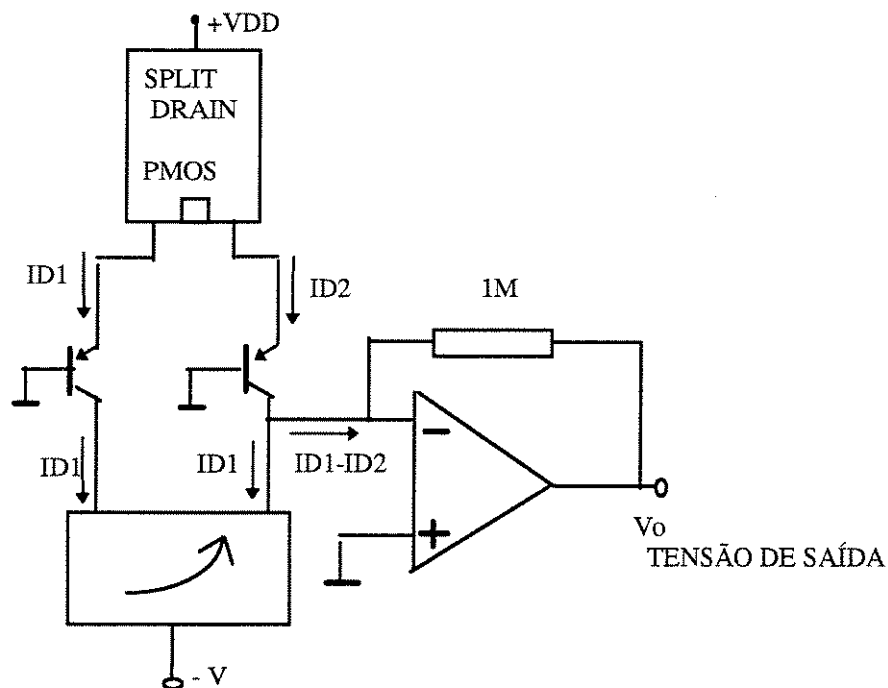


Figura 5.6 Circuito para a medição da corrente Hall no dispositivo PMOS *Split drain*

### Descrição do circuito

A corrente  $ID1$  do *split drain* alimenta um espelho de corrente, assim o espelho de corrente tem uma saída do mesmo valor de  $ID1$  no seu nó de saída. Como esta ligada ao mesmo nó onde ingressa  $ID2$ , a corrente diferencial  $ID1-ID2$  sai do nó para ingressar no amplificador operacional. A saída em mv do amplificador vai representar os nA da corrente diferencial.

Um circuito completo para a medição da corrente Hall, seguindo o método explicado, precisa de:

- circuito diferencial de corrente.
- um conversor corrente - tensão ou um multiplicador de corrente.
- circuitos buffer para as polarizações do CI.
- circuitos de tensão regulada.

**Circuito diferencial de corrente** para obter a corrente Hall , que foi utilizado para o dispositivo PMOS e acaba de ser explicado esta baseado num espelho de corrente, como é mostrado na seguinte figura 5.7 (a) Na figura 5.7 (b) da direita, apresenta-se o comparador similar mas para um dispositivo NMOS.

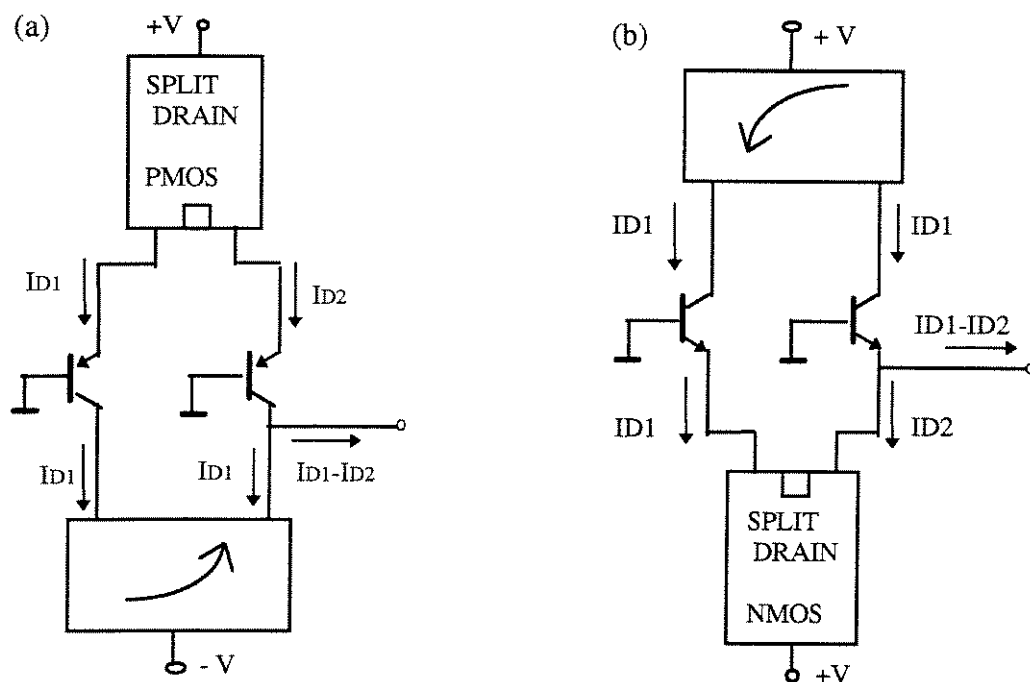


Figura 5.7 Comparador de correntes para obter a corrente Hall do:  
(a) *Split drain* PMOS (b) *Split drain* NMOS

O conversor corrente - tensão utilizado é o seguinte:

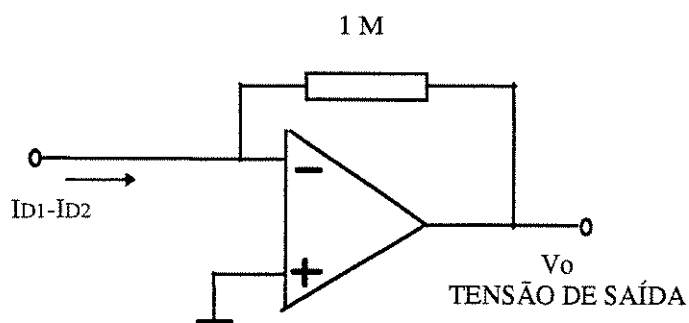


Figura 5.8 Conversor corrente - tensão.



Os circuitos buffer que foram utilizados para as polarizações do CI, são mostrados na seguinte figuras 5.9

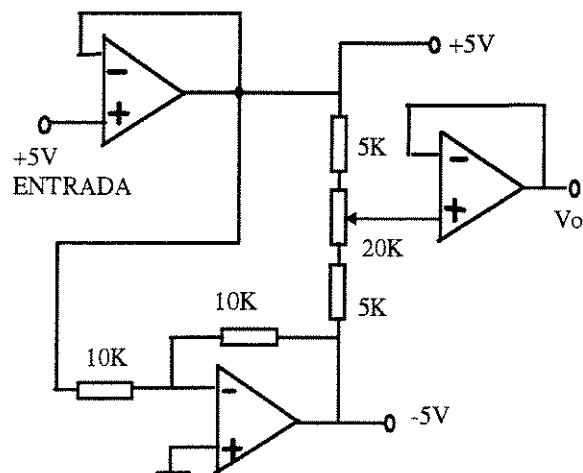


Figura 5.9 Os circuitos buffer para as polarizações do CI

O circuito de tensão regulada +5V que foi utilizado, baseado no CI LM7805 (regulador +5v) com opção de ajuste, é mostrado na seguinte figura 5.10

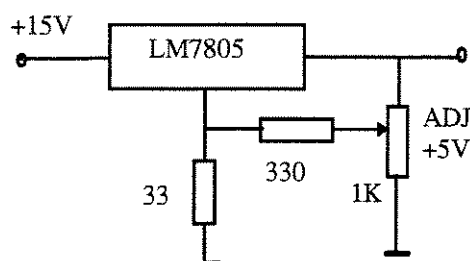


Figura 5.10 O circuito de tensão regulada +5V

O circuito de tensão regulada -10v que foi utilizado, baseado no CI LM7912 (regulador 12v ) com opção de ajuste, é mostrado na seguinte figura 5.11

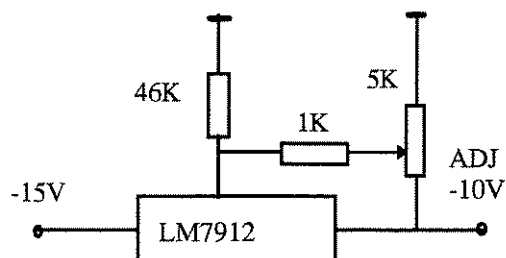


Figura 5.11 O circuito de tensão regulada -10v

O circuito de tensão regulada +10V que foi utilizado, baseado no CI LM7812 (regulador +12v) com opção de ajuste, é mostrado na seguinte figura 5.12

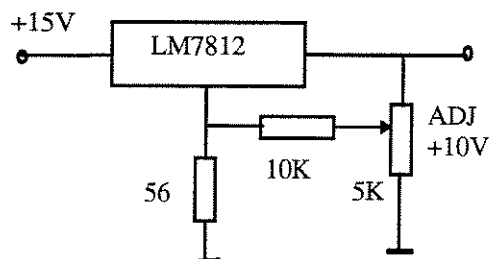


Figura 5.12 O circuito de tensão regulada +10V

O circuito completo que foi utilizado para medição do dispositivo PMOS *Split drain*, é mostrado na seguinte figura 5.13

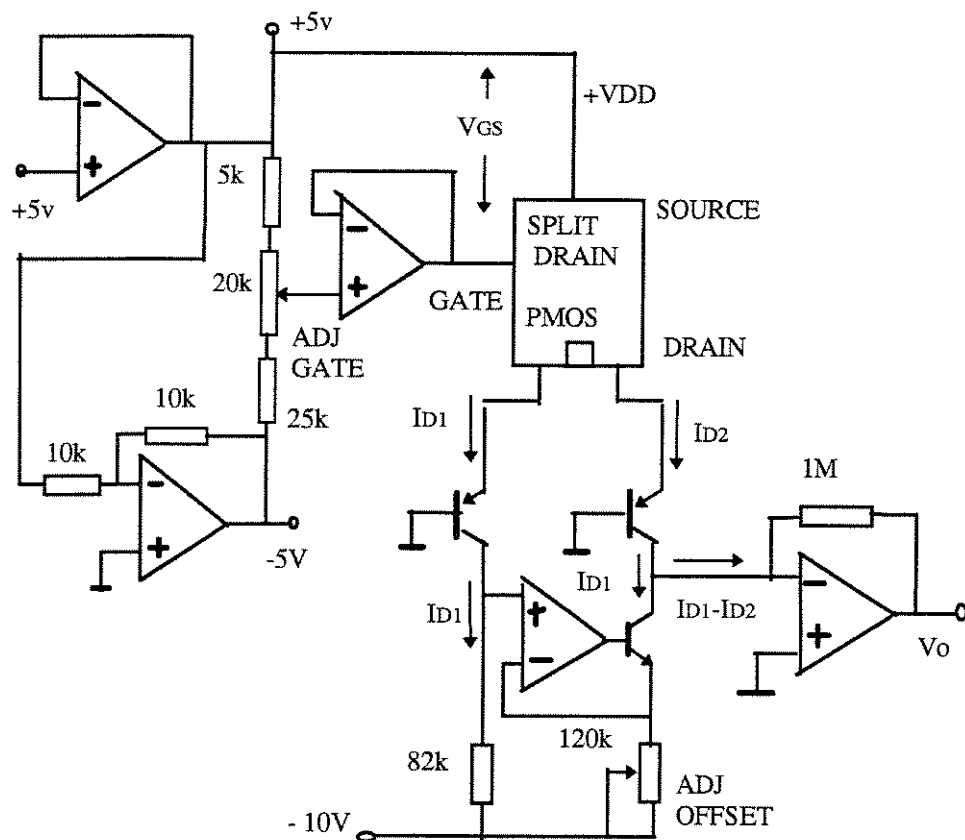


Figura 5.13 O circuito completo para a medição da corrente Hall do *Split drain* PMOS.

O circuito completo para medição do dispositivo NMOS *Split drain*, é mostrado na seguinte figura 5.14

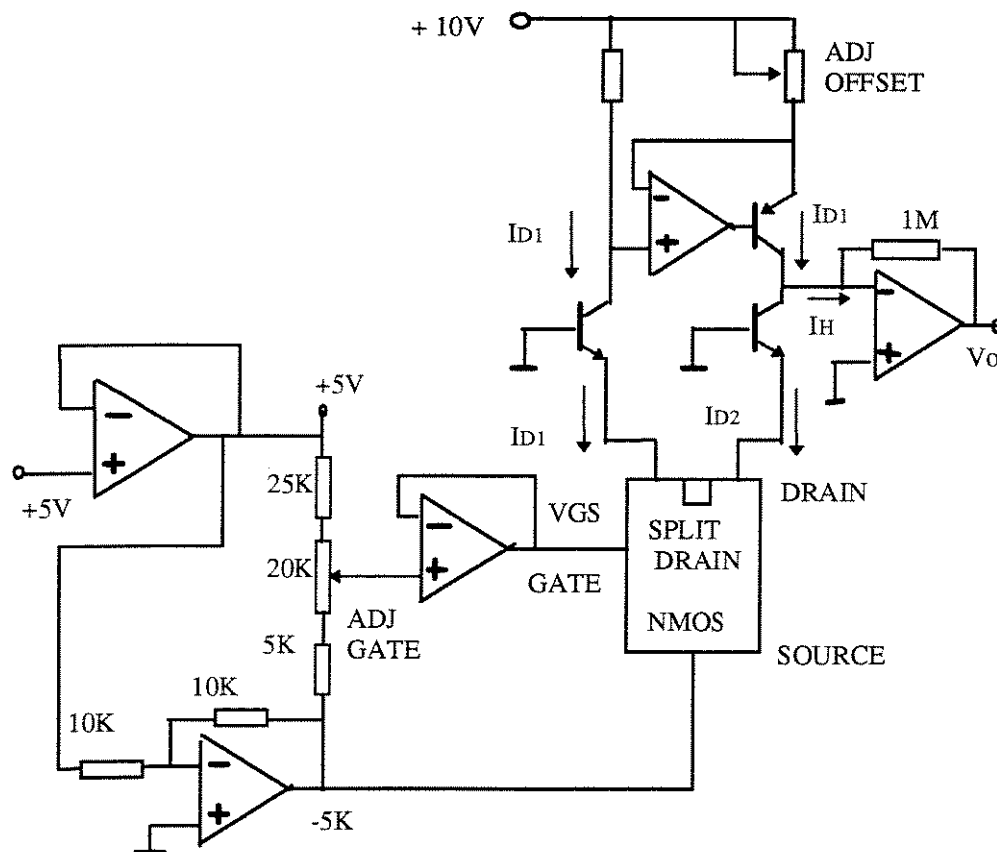


Figura 5.14 O circuito completo para a medição da corrente Hall do *Split drain* NMOS

### 5.7 A PLACA DE TESTE

O circuito completo para teste foi montado numa placa de circuito impresso desenhado com o programa Tango, incluindo todas as facilidades para a medição.

As seguintes figuras 5.15 5.16 e 5.17 mostram os desenhos correspondentes.

Figura 5.15

Placa impressa para teste: componentes

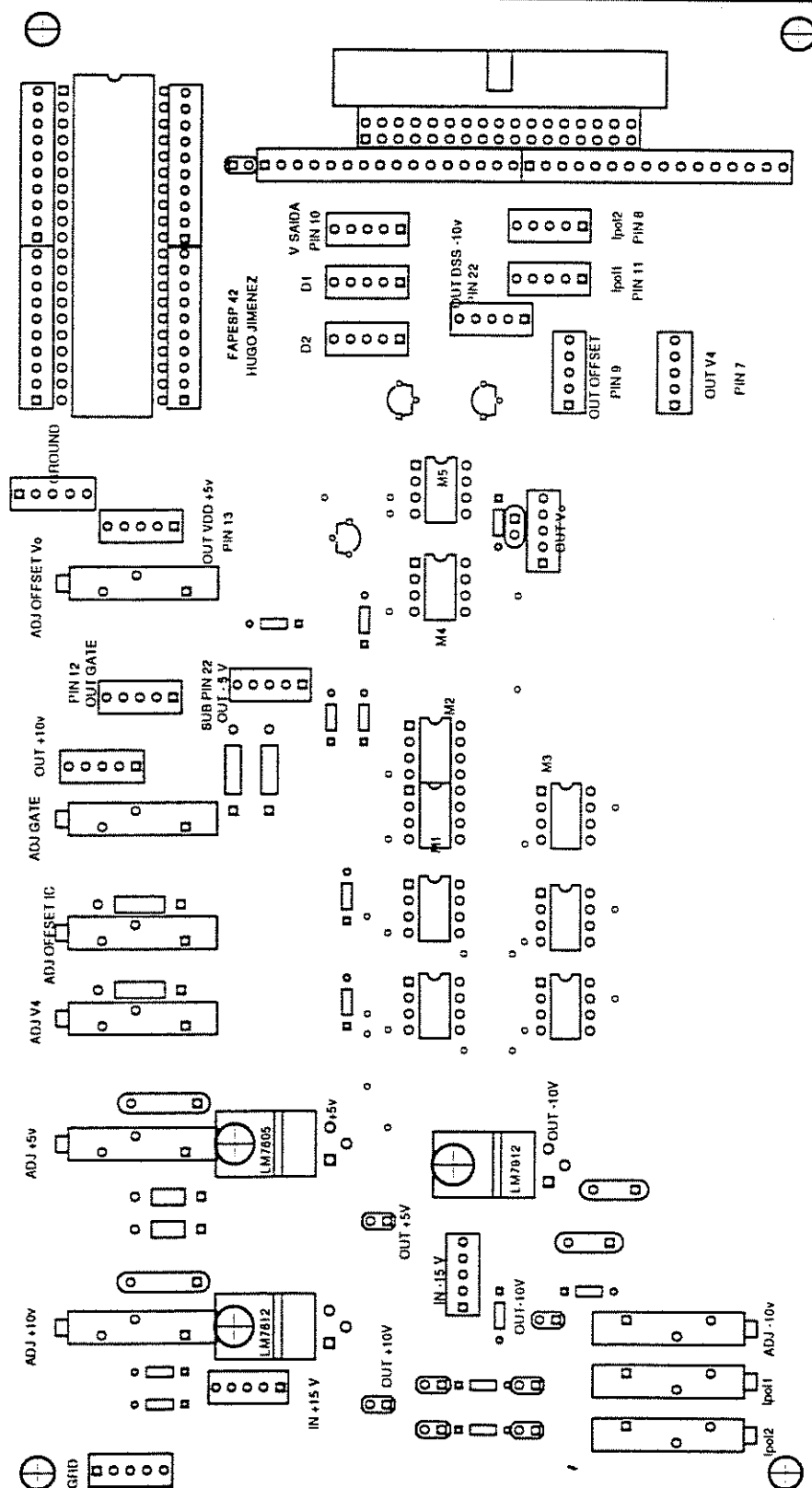


Figura 5.16  
Placa impressa para  
teste: lado da solda

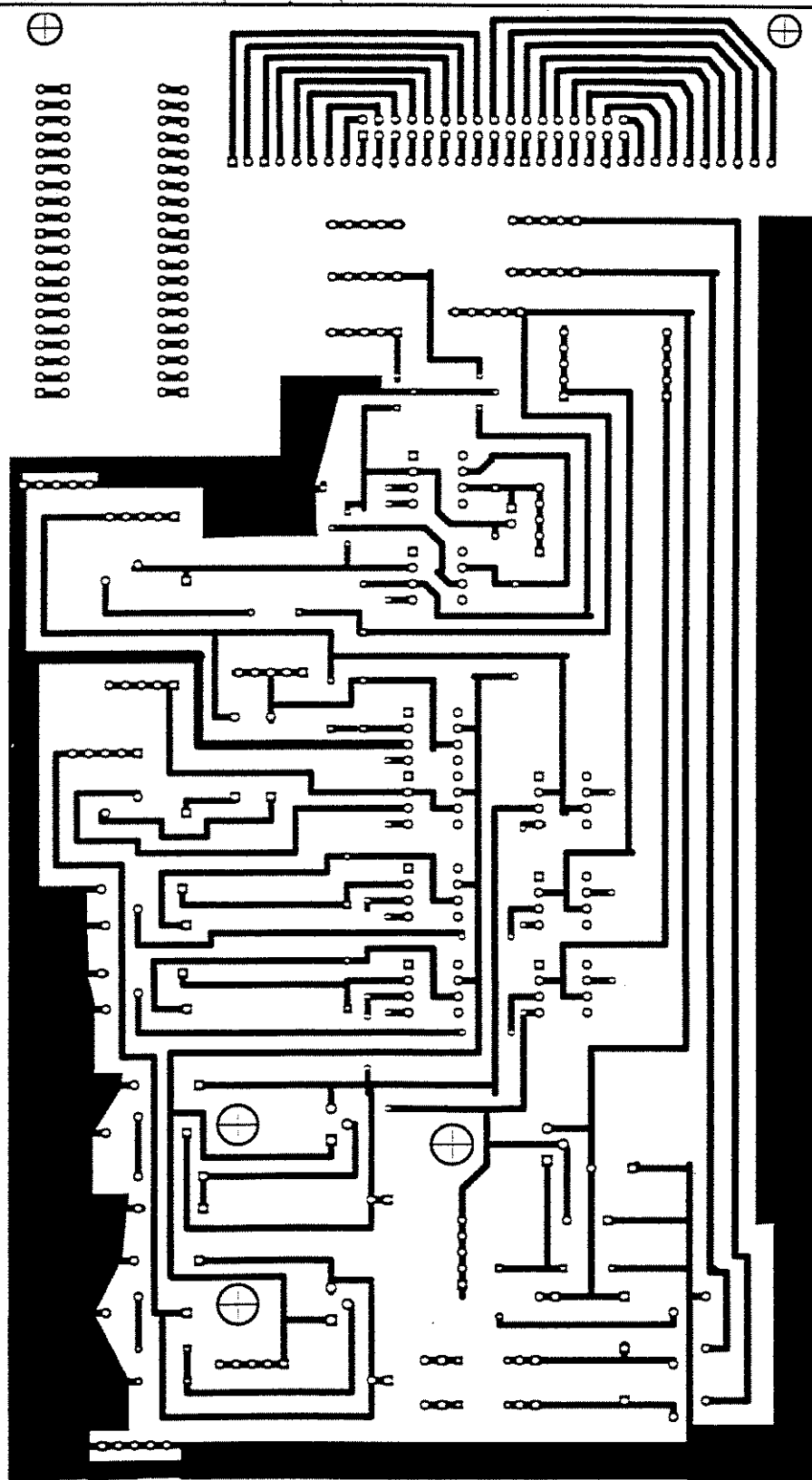
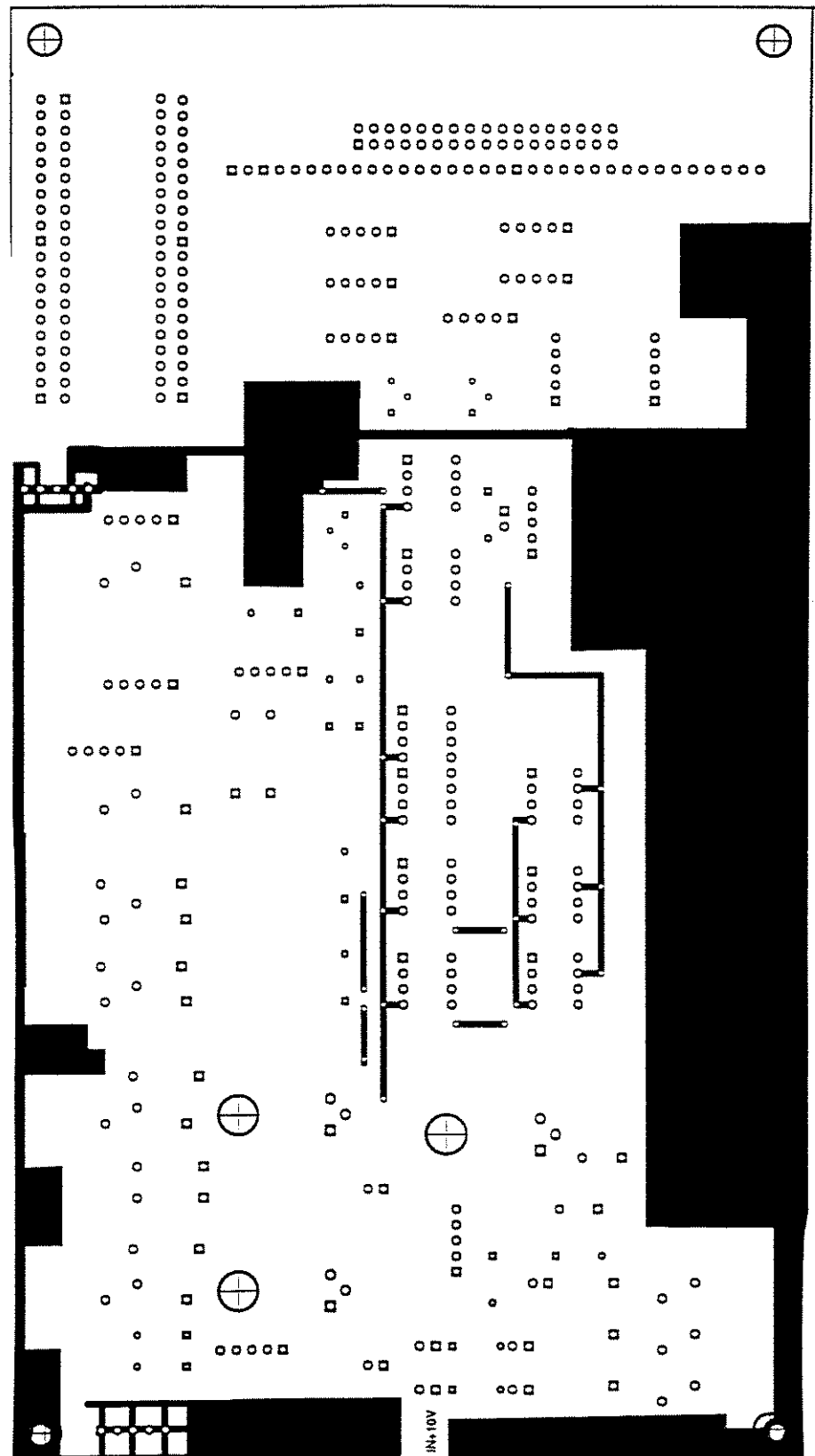


Figura 5.17

Placa impressa para teste: lado dos componentes



## 5.8 EQUIPAMENTO PARA GERAR, MEDIR E REGISTRAR OS DADOS DO CAMPO MAGNÉTICO.

A placa de teste com o CI em estudo, foi submetida a teste de medição com campo magnético.

**O equipamento utilizado** é ilustrado no esquema mostrado na figura 5.18 , as instalações são mostradas na fotografia 5.6 , o sistema de medição na fotografia 5.7 e a placa de teste no entreferro do eletroímã na fotografia 5.8

Então, temos ilustrado o sistema de medição que têm a seguinte relação de itens:

Um eletroímã da marca "Varian" modelo Fieldial Mark II com faixa até 1,5 Tesla e com controle de corrente com varredura.

Uma computadora pessoal (PC).

Um programa Pascal para formar o arquivo do grupo de dados medidos.

Dois multímetros autorange HP .

Uma fonte de alimentação dupla HP.

O lugar da medição foi no Instituto de Física da Unicamp, no Laboratório de medidas de altas e baixas temperaturas.

### Descrição da medição:

**O método utilizado** é a medição direta usando um núcleo com duas bobinas em série, e o sensor (placa de teste) localizado no entreferro de ar.

**O campo magnético** é produzido pela corrente que passa nas bobinas, mas como existe um controle de corrente com varredura, o campo magnético segue a mesma varredura.

**A tensão de saída**, segue a varredura do campo magnético e é medido com um voltímetro e este entrega os dados correspondentes ao computador.

**A forma de onda da varredura** selecionada foi o triângulo, isto é um avance linear no tempo, e temos programado 10 minutos para uma varredura de subida ( de zero a campo máximo) e 10 minutos para uma varredura de descida. ( de máximo a campo zero).

**O sinal do campo magnético** é medido com o sensor do equipamento e um voltímetro , e este entrega os dados ao computador.

**O computador** processa os dados e organiza eles em duas colunas dentro de um arquivo que no inicio da medição foi indicado com um nome e extensão DAT, isto é feito seguindo um programa Pascal.

**O controle de corrente com varredura** inclui um estagio retificador com refrigeração com água e um painel para selecionar o modo de operação.

**O procedimento da operação** com o equipamento é: abrir a válvula do circuito da água , ligar o equipamento e selecionar as condições do teste, ligar e posicionar a placa de teste, zerar o ajuste do offset, nomear o arquivo DAT e dar ENTER, logo dar inicio a varredura com o botão INCREASE .

Após os 10 minutos o equipamento deve ter atingido o valor máximo da corrente e do campo magnético, logo é o momento de parar com o botão OFF, do contrario ele volta a diminuir o campo até -0,150 Tesla e repetir o ciclo de medição.

**O painel do controle de corrente** tem as opções de operação que são mostradas na figura 5.18 .

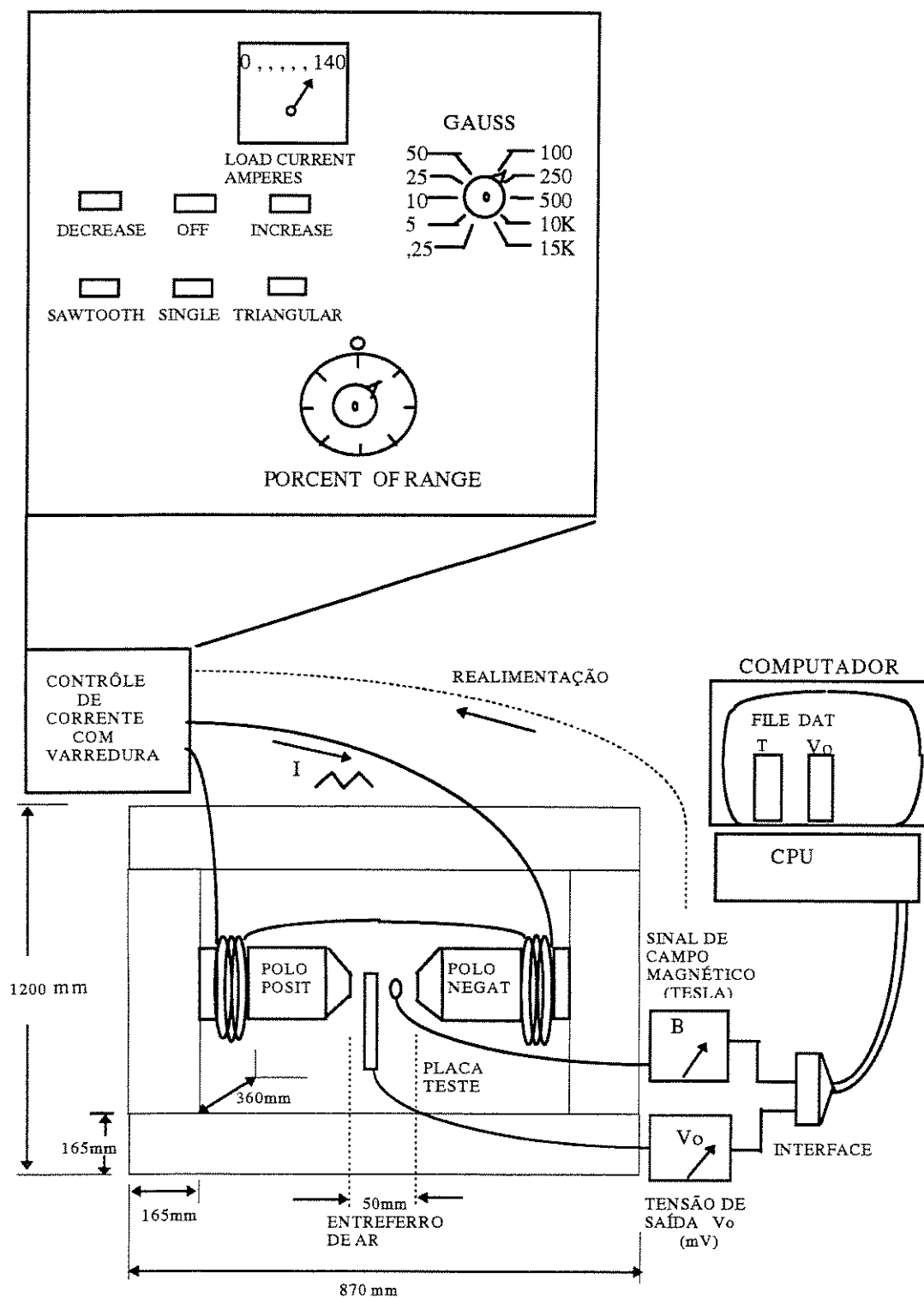
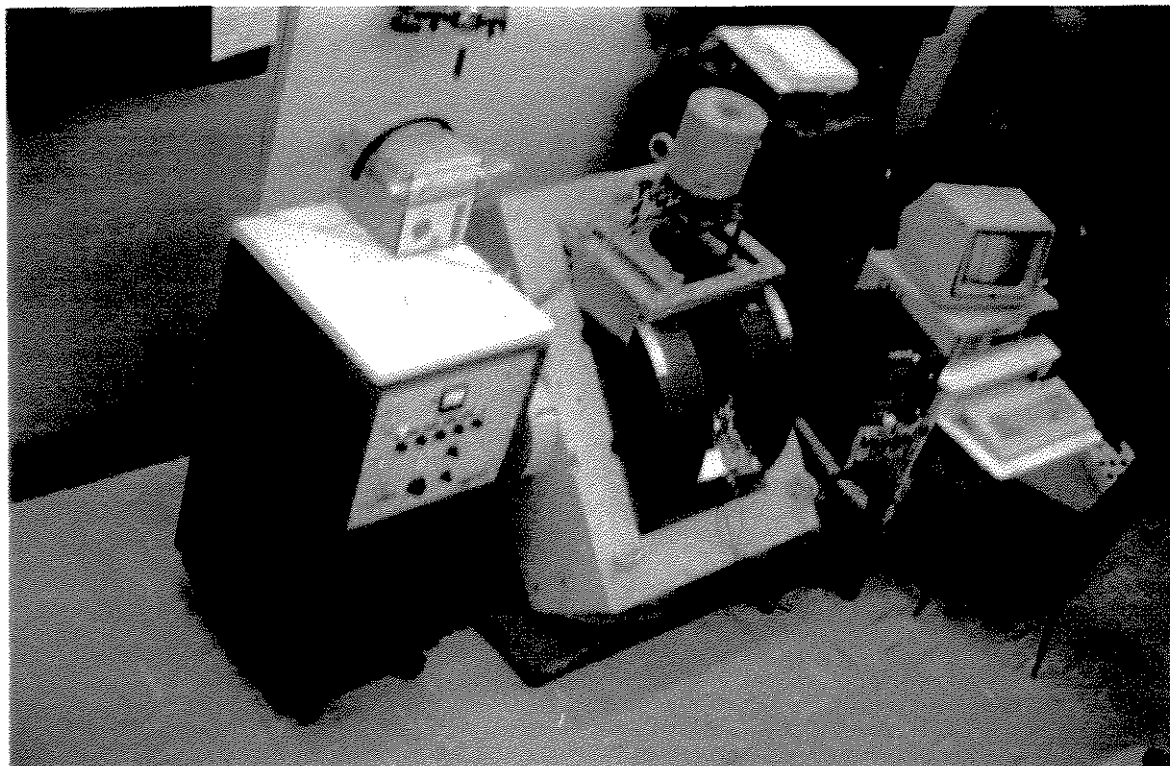
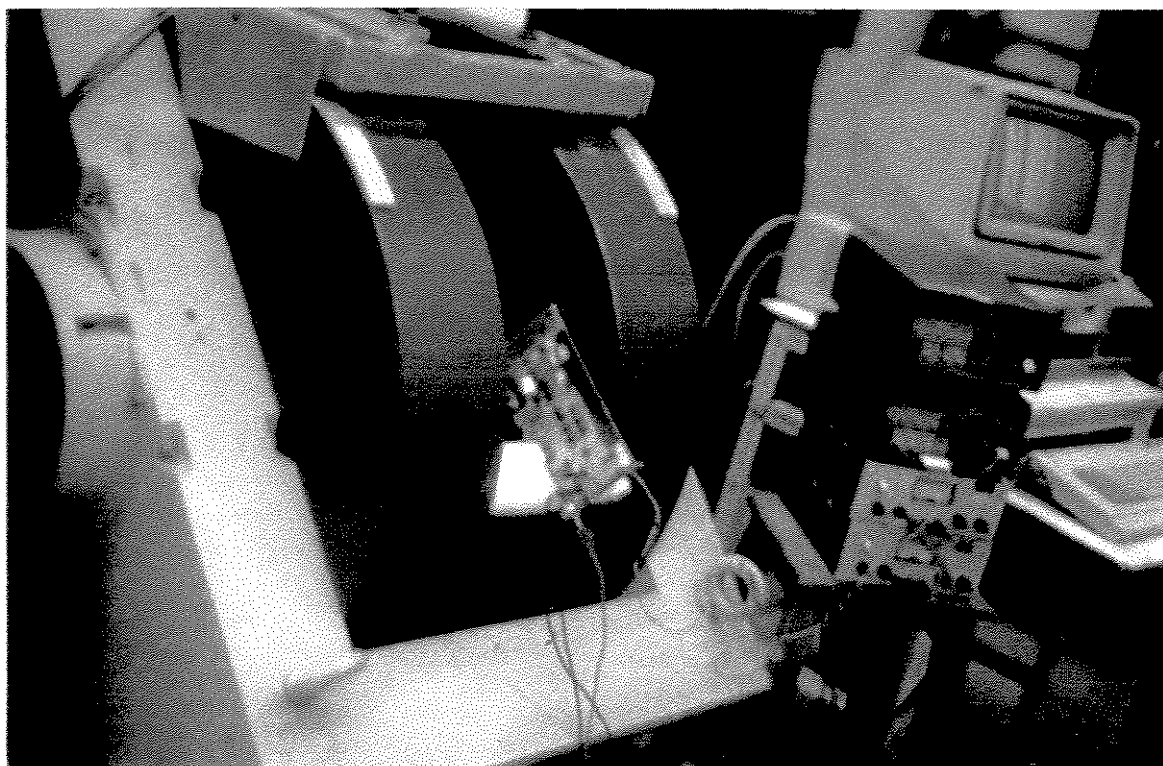


Figura 5.18 Esquema do equipamento usado para gerar e medir campo magnético.

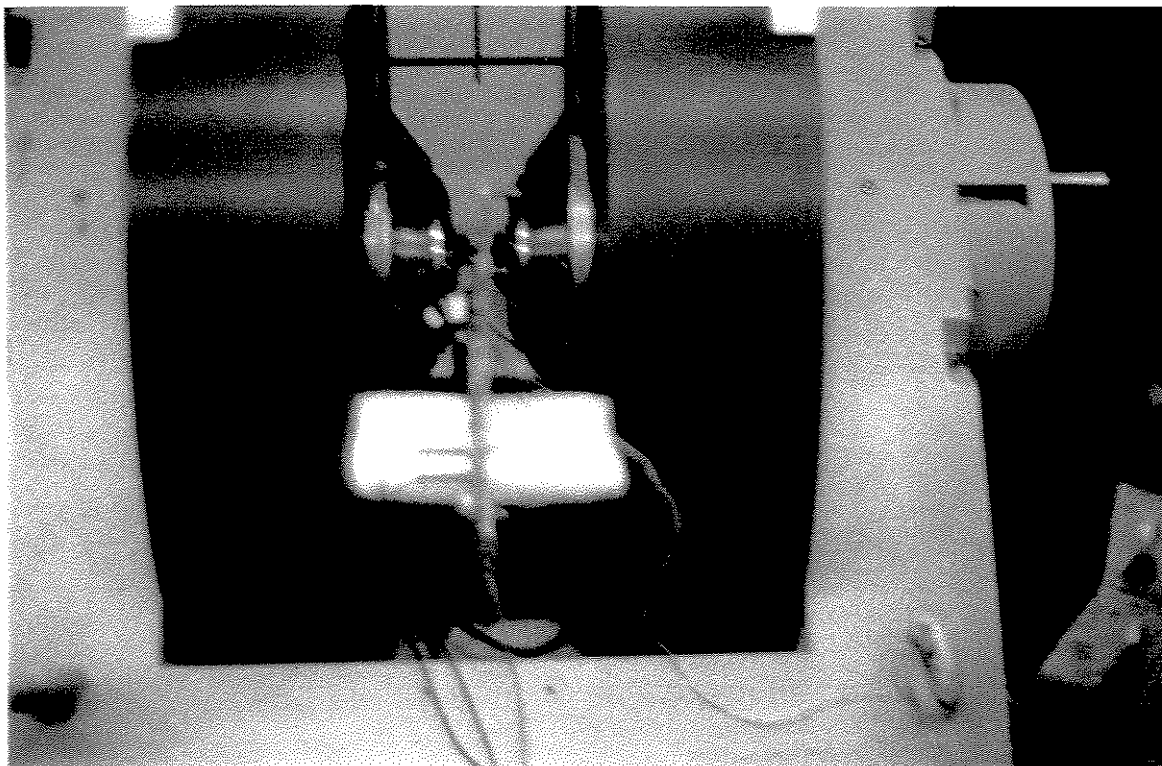




Fotografia 5.6 Instalações do sistema de medição de campo magnético - Instituto de Física da Unicamp.



Fotografia 5.7 Sistema de medição de campo magnético e a placa de teste.



Fotografia 5.8 Placa de teste na posição do entreferro do eletroímã.

### 5.9 ANÁLISE DA MEDIÇÃO MAGNÉTICA COM NÚCLEO E ENTREFERRO DE AR.

Para um núcleo com bobina de  $n$  voltas e com a corrente  $I$ :

$$In = \oint H \cdot ds \quad (5.1)$$

Para um núcleo com o comprimento médio do circuito magnético  $l_{Fe}$  e com o entreferro  $\delta$ :

$$In = H_L \delta + H_{Fe} l_{Fe} \quad (5.2)$$

Se ignoramos perdas :  $B_{Fe} = B_L$

Para o núcleo de ferro:  $B_{Fe} = \mu_r \mu_o H$  (5.3)

Onde:  $\mu_r$  é a permeabilidade do material do núcleo

$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$  é a permeabilidade do vácuo

Substituindo:  $In = \frac{B_L}{\mu_o} \delta + \frac{B_L}{\mu_r \mu_o} l_{Fe}$  (5.4)

Onde  $\frac{B_L}{\mu_o}$  é o valor de  $H$  no ar e  $\frac{B_L}{\mu_r \mu_o}$  é o valor de  $H$  no núcleo.

Tirando o valor de  $BL$  :

$$B_L = \frac{\mu_o In}{\delta + \frac{l_{Fe}}{\mu_r}} \quad (5.5)$$

Se o valor da permeabilidade do núcleo é grande ( $>1000$ ) , pode-se aproximar:

$$B_L = \frac{\mu_o n}{\delta} I \quad (5.6)$$

Logo o campo magnético é proporcional à corrente que flui pela bobina.

Observa-se que para correntes grandes, aparecem os efeitos de não linearidade do núcleo e também os efeitos de remanência magnética.[5].

### 5.10 APLICAÇÃO DO SENSOR HALL NA MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA

Cada corrente elétrica tem um campo magnético associado, logo este campo magnético é medido com o sensor Hall fornecendo um sinal com informação da corrente.[5].

Uma opção para obter maior sensibilidade é usar um concentrador magnético ao redor do condutor, como já foi analisado.

**Medição da corrente medindo o campo tangencial de um condutor elétrico.**

O campo tangencial produzido pela corrente que passa pelo condutor, é medido usando um sensor Hall como é mostrado na figura 5.19.

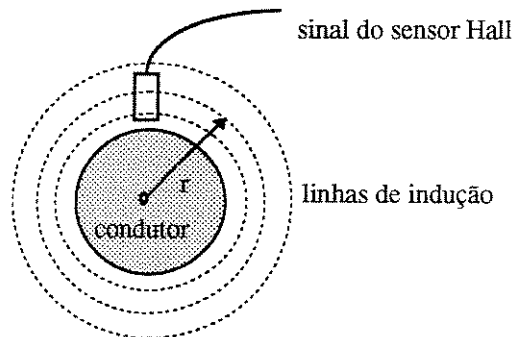


Figura 5.19 Condutor, campo tangencial e sensor Hall

A corrente do condutor é: 
$$I = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} \quad (5.7)$$

Integrando ao redor do condutor na posição de raio  $r$ : 
$$I = H 2\pi r \quad (5.8)$$

Tirando  $H$ : 
$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (5.9)$$

Se o condutor está no ar: 
$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (5.10)$$

Como o campo magnético é linearmente proporcional à corrente que flui pelo condutor, logo se medimos o campo estaremos medindo a corrente.

Para ter campo suficiente para medir é necessário correntes grandes e ou concentradores de fluxo magnético.

**Medição direta da corrente usando um concentrador magnético.**

Os concentradores magnéticos são de ferrite ou material ferro magnético com forma de núcleo com uma abertura pequena (entreferro) para posicionar o sensor Hall.

Pode-se obter maior sensibilidade usando o concentrador magnético ao redor do condutor com uma ou mais voltas, assim mostramos, na seguinte figura 5.20, o caso de varias voltas :

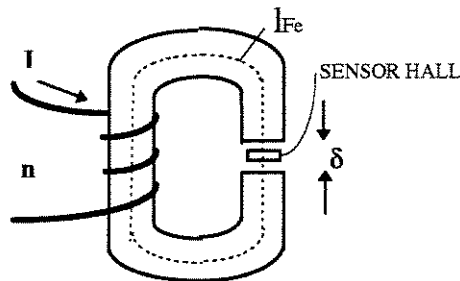


Figura 5.20 Concentrador magnético, condutor com varias voltas e sensor Hall

Como já foi verificado o campo no entreferro de ar, é proporcional á corrente que passa pelo condutor :

$$B_L = \frac{\mu_o n}{\delta} I \quad (5.11)$$

Para correntes grandes e no caso de uma volta:  $B_L = \frac{\mu_o}{\delta} I$  (5.12)

Na figura 5.21 e 5.22 mostramos o caso de uma volta

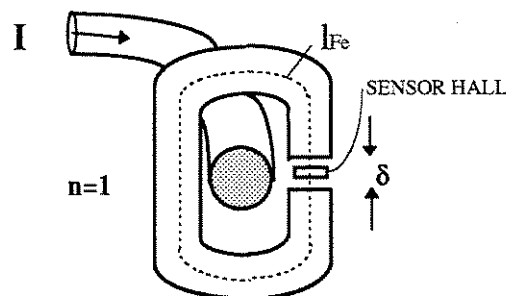


Figura 5.21 Concentrador magnético, condutor com uma volta e o sensor Hall

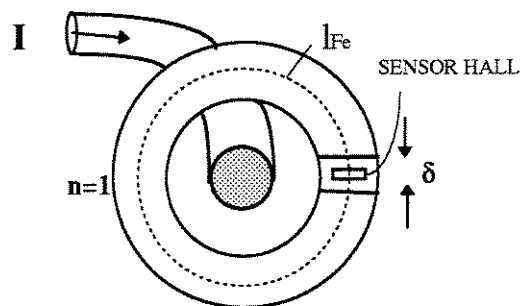


Figura 5.22 Concentrador magnético circular , condutor com uma volta e o sensor Hall

### 5.10 APLICAÇÃO DO SENSOR HALL NA MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA

A natureza multiplicadora do dispositivo Hall, que foi demonstrado experimentalmente, pode ser aplicada na medição de potência elétrica.

Um método elegante pode ser: [33]

Se a corrente de polarização do dispositivo Hall é proporcional à tensão de linha:  $I \sim v(t)$

e o campo magnético é proporcional à corrente de linha:  $B \sim i(t)$

então o dispositivo Hall vai fornecer um sinal proporcional ao produto  $BI$ : **sinal Hall**  $\sim vi$

Logo, o sinal Hall é proporcional à potência elétrica da linha: **sinal Hall**  $\sim p$

Como a corrente e a tensão são senoidais e assumindo uma diferença de fase  $\varphi$ , temos que para a tensão:  $v(t) = V_m \cos \omega t$

para a corrente:  $i(t) = I_m \cos (\omega t + \varphi)$  (5.13)

O sinal Hall é proporcional ao produto:

$$\text{sinal Hall} \sim v(t) \cdot i(t) = V_m \cos \omega t \cdot I_m \cos (\omega t + \varphi) \quad (5.14)$$

$$v(t) \cdot i(t) = \frac{V_m I_m}{2} \cos \varphi + \frac{V_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \varphi) \quad (5.15)$$

O primeiro termo da direita da equação (5.15) é uma tensão contínua proporcional à potência ativa e o segundo termo é uma tensão alternada que não interessa e pode eliminarse com um filtro passa baixo.

O esquema básico de um medidor de energia elétrica que usa uma placa Hall é mostrado no esquema da seguinte figura 5.23

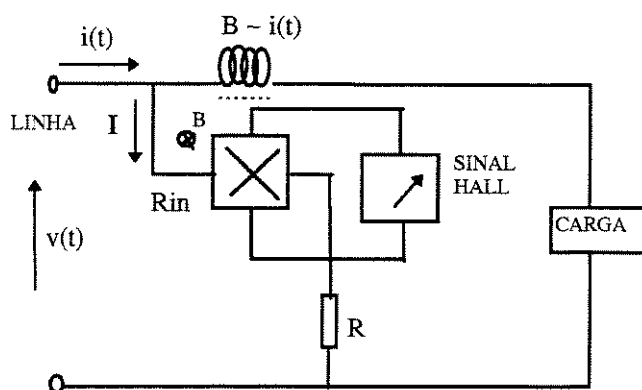


Figura 5.23 Esquema do medidor de energia elétrica com placa Hall

Neste esquema, a corrente de polarização  $I$  é proporcional à tensão de linha  $v(t)$ :

$$I = \frac{v(t)}{R_{in} + R} \quad (5.16)$$

onde  $R_{in}$  é a resistência de entrada do dispositivo Hall.

Pode-se fazer o isolamento da linha com um transformador, como é mostrado na seguinte figura 5.24 .

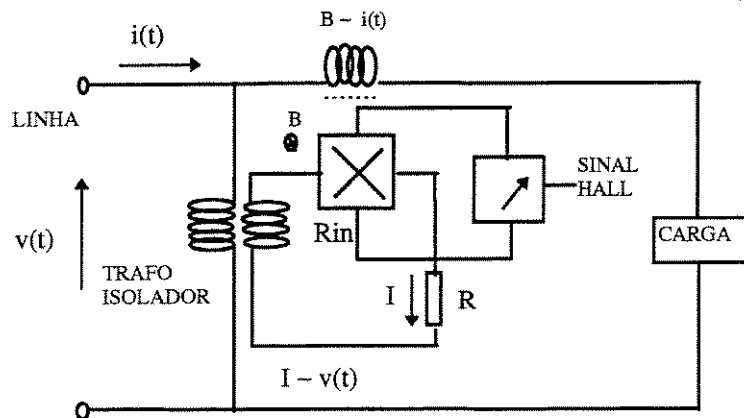


Figura 5.24 Esquema do medidor de energia elétrica com placa Hall e transformador

**Se o sinal Hall é de uma placa Hall modo tensão:**

A tensão Hall em função da sensibilidade relativa do dispositivo é:

$$V_H = S_r IB \quad (5.17)$$

Substituindo para o caso de campo tangencial de um condutor elétrico de radio  $r$  :

$$V_H = S_r \frac{v(t)}{R_{in} + R} \frac{\mu_o i(t)}{2\pi r}$$

Substituindo para o caso de um concentrador magnético com entreferro  $\delta$  :

$$V_H = S_r \frac{v(t)}{R_{in} + R} \frac{\mu_o i(t)}{\delta} \quad (5.18)$$

Assumindo que  $R \gg R_{in}$

$$V_H = S_r \frac{\mu_o}{R\delta} v(t) \cdot i(t) \quad (5.19)$$

**Se o sinal Hall é de uma placa Hall modo corrente**

A corrente Hall em função da sensibilidade relativa do dispositivo é:

$$I_H = S_r IB \quad (5.20)$$

Substituindo para o caso de campo tangencial de um condutor elétrico de radio  $r$  :

$$I_H = S_r \frac{v(t)}{R_{in} + R} \frac{\mu_o i(t)}{2\pi r} \quad (5.21)$$

Substituindo para o caso de um concentrador magnético com entreferro  $\delta$  :

$$I_H = S_r \frac{v(t)}{R_{in} + R} \frac{\mu_o i(t)}{\delta} \quad (5.22)$$

Assumindo que  $R \gg R_{in}$

$$I_H = S_r \frac{\mu_o}{R\delta} v(t) \bullet i(t) \quad (5.23)$$

Um medidor de energia elétrica usando dispositivo PMOS Hall modo tensão é mostrado no esquema com aplicação do filtro necessário para obter o sinal de potencia com  $v(t)$  e  $i(t)$  senoidais, e com o amplificador diferencial, é apresentado na seguinte figura 5.25

A referência é [33]

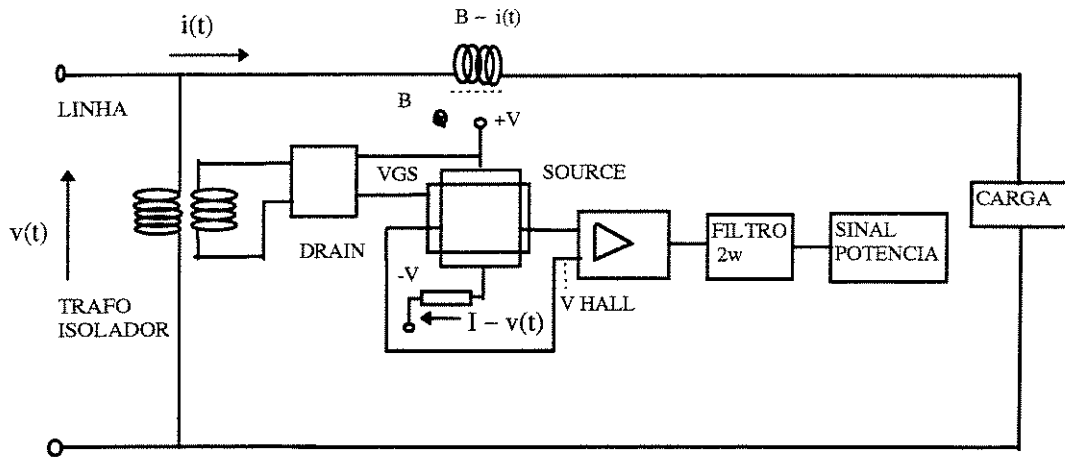


Figura 5.25 Medidor de energia elétrica usando dispositivo PMOS Hall modo tensão

A tensão Hall em função da sensibilidade relativa do dispositivo é:

$$V_H = S_r I_D B \quad (5.24)$$

Onde a corrente de dreno é: (região linear de operação)

$$I_d \approx \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_G - V_T) V_D \quad \mu_{ch} = \text{mobilidade das portadoras no canal} \quad (5.25)$$

Se aplicamos o sinal da tensão de linha, temos:

$$I_d \approx \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_G + v(t) - V_T) V_D \quad (5.26)$$

Típicamente o ponto de operação é com  $V_G > V_T$  para obter correntes grandes e alta sensibilidade absoluta. Também o ponto de operação é na região linear perto da tensão  $V_{DSsat}$  pela mesma razão.



Logo, também o sinal de tensão  $v(t)$  da linha, aplicado na porta, é linearmente proporcional ao sinal de corrente de dreno.

Substituindo para o caso de campo tangencial de um condutor elétrico de radio  $r$  :

$$V_H = S_r \left[ \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_G + v(t) - V_T) V_D \right] \frac{\mu_o i(t)}{2\pi r} \quad (5.27)$$

Substituindo para o caso de um concentrador magnético com entreferro  $\delta$  :

$$V_H = S_r \left[ \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_G + v(t) - V_T) V_D \right] \frac{\mu_o i(t)}{\delta} \quad (5.28)$$

Um medidor de energia elétrica que usa um dispositivo PMOS *Split drain*, com aplicação do filtro necessário para obter o sinal de potência com  $v(t)$  e  $i(t)$  senoidais, e com o circuito subtrator de correntes que foi utilizado experimentalmente, é apresentado na seguinte figura 5.26

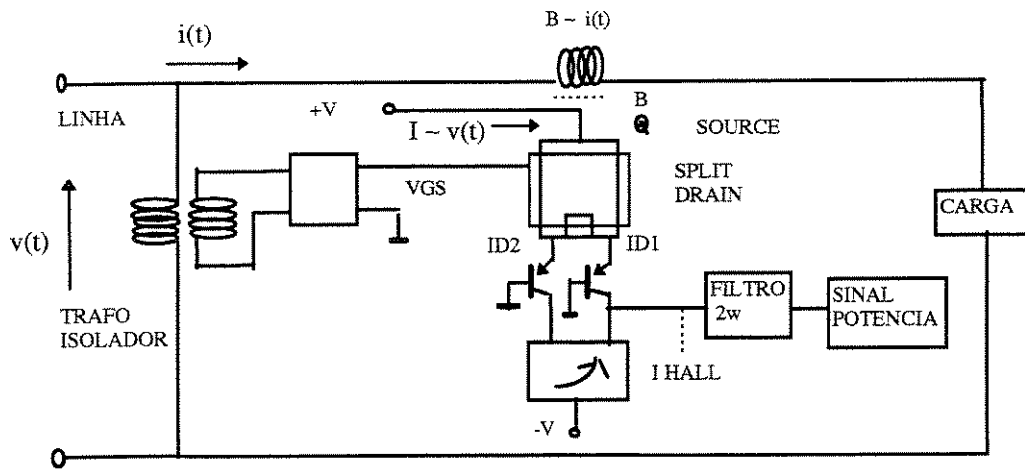


Figura 5.26 Medidor de energia elétrica usando dispositivo PMOS *Split drain*

A corrente Hall em função da sensibilidade relativa do dispositivo é:

$$I_H = S_r IB \quad (5.29)$$

Substituindo para o caso de campo tangencial de um condutor elétrico de radio  $r$  :

$$I_H = S_r \left[ \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_G + v(t) - V_T) V_D \right] \frac{\mu_o i(t)}{2\pi r} \quad (5.30)$$

Substituindo para o caso de um concentrador magnético com entreferro  $\delta$  :

$$I_H = S_r \left[ \frac{W}{L} \mu_{ch} C_{ox} (V_G + v(t) - V_T) V_D \right] \frac{\mu_o i(t)}{\delta} \quad (5.31)$$

## CONCLUSÕES

Neste trabalho relatam-se os resultados do estudo teórico e dos experimentos realizados sobre o dispositivo MOS *Split drain*.

Pôde-se concluir que o MOS *Split drain* apresenta uma sensibilidade ao campo magnético que permite a sua utilização na medição de corrente elétrica e que esta sensibilidade apresenta uma leve não linearidade em função da tensão entre porta e fonte. Foi à partir destes resultados que se estabeleceram as bases para o projeto de um circuito integrado que incorpora sensor e circuitos de processamento analógico e digital para a medição de potência elétrica. Este circuito integrado está sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa do LPM2-FEEC-UNICAMP.

O texto foi organizado em cinco capítulos: No primeiro é feita uma breve descrição dos diversos sensores magnéticos. No segundo, focalizam-se os sensores magnéticos implementados em materiais semi condutores, com especial ênfase nos dispositivos Hall. No terceiro, são apresentados os procedimentos adotados e os resultados obtidos do trabalho experimental. Destacam-se neste capítulo as diversas configurações geométricas dos dispositivos MOS *split drain* que foram projetados em tecnologia CMOS 0.8 $\mu$ m, cujos protótipos foram fabricados na AMS (Austria Mikrosysteme International). No quarto capítulo são apresentadas justificativas teóricas aos resultados experimentais obtidos, incluindo-se também comparações de medidas dos dispositivos com simulações do modelo MOS da AMS.

O capítulo cinco contém fotos de montagens, diagramas de circuitos de teste e suas respectivas descrições. Este capítulo mostra também os esquemas e o análise básico das aplicações dos dispositivos Hall na medição de corrente elétrica e na medição de potência elétrica, utilizando as opções de placa Hall, dispositivo PMOS Hall modo tensão e a proposta de utilizar o dispositivo PMOS *Split drain*.

Nos resultados experimentais obtidos, usando *Split drain*, verificou-se que os erros de linearidade da corrente Hall com o campo magnético, são extremamente pequenos, demonstrando-se assim a alta linearidade do dispositivo numa ampla faixa de 1,5 Tesla até 0 Tesla.

O campo mínimo detetável (CMD) medido é muito pequeno (CMD  $\approx$  10 mili Tesla) fazendo viável a medição de campos magnéticos fracos.

O máximo campo magnético medido é 1,5 Tesla, (a literatura mostra medidas iguais ou menores que 1,5 Tesla), e foi o máximo valor de campo magnético gerado pelo equipamento descrito no item 5.8 e mostrado nas fotografias 5.6, 5.7 e 5.8, o qual apresenta dimensões muito grandes como mostra a figura 5.18. Isto demonstra que o dispositivo tem um bom desempenho na medição de campos fortes, entretanto o campo máximo detetável é ainda maior que 1.5 Tesla.

A sensibilidade relativa medida é alta e praticamente não depende da região de polarização, demonstrando que o dispositivo é adequado para a medição de corrente elétrica. Isto, medindo o campo magnético associado à corrente elétrica (item 5.10).

A corrente Hall ideal para a aplicação de medição de potência é a mostrada na teoria (Cap.2) onde a análise indica que este sinal tem o efeito multiplicador do campo magnético B com a corrente de dreno, igualmente, a sensibilidade relativa ideal para esta aplicação é que seja constante como foi indicado na análise, mas os trabalhos experimentais (Cap 3) identificaram desvios que devem ser compensados.

Futuros trabalhos poderão envolver num só circuito integrado, o dispositivo *Split drain* e os circuitos de compensação. Assim, a natureza multiplicadora do dispositivo *Split drain*, poderá ser aplicada na medição de potência elétrica (item 5.11), sempre que sejam desenvolvidos os mecanismos de compensação da leve não linearidade da corrente Hall com a tensão porta fonte, medida mostrada na figura 3.64 (associada com a leve não linearidade da corrente dreno com a tensão porta fonte, figura 4.11), e também a compensação da leve dependência da sensibilidade relativa com a tensão porta fonte e com a tensão dreno fonte. (figura 3.48).

Em termos de comparação, o *split drain* fornece um sinal de corrente diferencial que tem suas vantagens no tratamento de sinal em relação ao sinal de tensão diferencial que fornece o tradicional dispositivo PMOS Hall. Consideramos as metas previstas na realização deste estudo foram plenamente cumpridas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K.Von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper. Phys. Rev. Lett. 45, 494 (1980)
- [2] Gelson M. da Rocha - Jose R. da Silva - INMETRO - 2do Seminario Internacional de Metrologia Eletrica.
- [3] Thomson, w. "On the effects of magnetization on the electric conductivity of metals"  
Trans. R. Soc. London A 146 - 1856
- [4] Hall, E.H. "On a new action of the magnet on electric current" Am. J. Math. 2 - 1879
- [5] W. Gopel, J. Hesse, J.N. Zemel "Sensors: a comprehensive survey" vol.5
- [6] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors" Proc IEEE, 78 (6) (1990) 973-989.
- [7] Baltes H P and Popovic R S 1986 "Integrated semiconductor magnetic field sensor" Proc. IEEE 74 1107-32
- [8] Baltes H P and Nathan A 1989 "Integrated magnetic sensors" sensor Handbook 1 ed. T Grandke and W H Ko (Weinheim: VCH) ch 7 pp 195-215
- [9] Gallagher R C and Corak W S 1966 "A metal oxide semiconductor (MOS) Hall element" Solid State Electron 9 571-80
- [10] Sze S M 1981 "Physics of semiconductor Devices (New York: Wiley) ch 8
- [11] Popovics R C 1985 "Numerical analysis of MOS magnetic field sensors" Solid State Eletron. 28 711-16
- [12] Mohan Rao G R and Carr W N 1971 "Magnetic sensitivity of a MAGFET of uniform channel current density" Solid State Eletron 14 995-1001
- [13] Yagi A and Sato S 1976 "Magnetic and electrical properties of n- channel MOS Hall effect device" Jpn, J. Applic. Phys. 15 655-61
- [14] R.S.Hemmert "Invariance of the Hall Effect MOSFET to gate geometry" solid state electronics 1974 vol 17 1039-1043
- [15] Popovic R S 1984 "A MOS Hall device free from short circuit effect" Sens. Actuator 5 253-62
- [16] Nathan A, Huizer A M J and Baltes H P 1985 "Two dimensional numerical modeling of magnetic field sensors in CMOS technology IEEE Trans.Electron Device ED-32 1212-19
- [17] A.Nathan, A.M.J. Huizer, H.P. Baltes and S.Weinmar "A triple drain MOSFET magnetic field sensor" CAN.J.Phys. vol.63 1985
- [18] Popovic RS and Baltes H P 1983 "A CMOS magnetic field sensor" IEEE J.Solid State circuits SC-18 426-8
- [19] D.Killat, J.Kluge, F.Umbach... "Measurement and modelling of sensitivity and noise of MOS magnetic field-effect transistors." sensors and Actuators A61 -1997 -346351
- [20] R.S. Popovic. in: B.E. Jones (Ed) "Hall Effect Devices", Adam Hilder, New York, 1991.
- [21] F. Ning, E. Bruun "An offset-trimmable array of magnetic-field-sensitive MOS transistors (MAGFETs) " Sensor and Actuators A 58 1997 pag. 109-112
- [22] P. Rombach and W. Langheinrich "An integrated sensor head in silicon for contactless detection of torque and force." Sensors and Actuators A. 42 , 1994 pag 410-416.
- [23] J. Ramirez -Angulo "Digitally trimmable MOS-current mirrors for high precision applications" Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Systems, ISCAS '93, Chicago, IL, USA 1993 pp 974-977
- [24] N. Mathieu, P. Giordano and A. Chovet, "Si MAGFETs optimized for sensitivity and noise properties." Sensors and Actuators A. 32 -1992- pag 656- 660.
- [25] X.Zheng and S. Wu "General characteristics and current output mode of a MOS magnetic field sensor" Sensors and Actuators A 28 - 1991
- [26] H.Y.W. Tongli, S. Kechang "Numerical Modelling of Magnetic Field Sensitivity MOSFET" sol-St. Devices, 527, 1988
- [27] B.S. Gill, E.L.. Heasell "A magnetic Field Sensor using a graded gate potential" sol-St. Devices 523, 1988
- [28] A. Nathan, L. Andor, H.P. Baltes, H.G. schmidt-Weinmar "Modelling of a Dual-Drain NMOS Magnetic-Field Sensor" IEEE journal of SI-St. Circuits, vol. sc-20. No 3, June 1985
- [29] J. Lau, C. T. Nguyen, P K. Ko, P .C. H. Chan "Minimum detectable signals of integrated magnetic sensor in bulk CMOS and SOI technologies for magnetic read heads" Sensor and Actuator A 54, 1996 pp 636-640.

- [30] Lin J F, Li S S , Linares LC, Teng K w "Theoretical analysis of Hall factor and Hall mobility in p-type silicon" Solid-State Electron. 24 827-33 - 1981
- [31] J. Lau, P K. Ko, P .C. H. Chan "Modelling of split-drain magnetic field-effect transistor (MAGFET)" Sensor and Actuator A 49, 1995 pp 155-162.
- [32] k. Yamaguchi "Fied-Dependent Mobility Model for Two-Dimensional Numerical Analysis of MOSFET's" IEEE Trans. of electron devices, vol. ED-26 , N 7 , July 1979.
- [33] W.E. Bulman "Applications of the Hall Effect" Solid-State Electronics 1966 ,vol. 9 , pp 361-372
- [34] D.J. Mapps "Magnetoresistive sensors" Sensors and Actuators A 59 (1997) ,pp 9-19