

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**MEDIDAS DE TRANSPORTE ELETRÔNICO  
EMPREGANDO BAIXÍSSIMAS CORRENTES.**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA II**

**Manoela Adams de Almeida**

**Santa Maria, 9 de dezembro de 2011.**

DEPTO. FÍSICA / UFSM, ALMEIDA, Manoela Adams TGF 2011

**MEDIDAS DE TRANSPORTE ELETRÔNICO EMPREGANDO  
BAIXÍSSIMAS CORRENTES**

**Manoela Adams de Almeida**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Física da Universidade Federal de Santa Maria como requisito parcial da obtenção do Grau de **Bacharel em Física.**

**Orientador: Prof. Dr. Lúcio Strazzabosco Dorneles.**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2011**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Naturais e Exatas- CCNE  
Departamento de Física**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova o Trabalho de Graduação em Física

**MEDIDAS DE TRANSPORTE ELETRÔNICO EMPREGANDO  
BAIXÍSSIMAS CORRENTES**

elaborado por  
**Manoela Adams de Almeida**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Bacharel em Física**

**Comissão Examinadora:**

**Lúcio Strazzabosco Dorneles Prof. Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

**Marcos Carara Prof. Dr. (UFSM)**

**Eleonir Calegari Prof. Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 9 de dezembro de 2011.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos professores do LMMM, afinal, sem eles este trabalho não se concretizaria.

Também aos colegas do LMMM, especialmente ao Matheus.

À minha família que me incentivou todos os dias, entre os quais minha mãe, minha tia Jaque e minha vó, que são a minha base, e sem as quais eu não seria quem sou.

Aos meus colegas Vivian, Paula, Andressa e Guilherme que estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins.

Às minhas amigas Lili e Angélica por não deixarem com que eu desistisse, nunca.

Ao meu namorado Marcel, que me ouviu, me ajudou e me cuidou com muito carinho.

## **RESUMO**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**

### **MEDIDAS DE TRANSPORTE ELETRÔNICO EMPREGANDO BAIXÍSSIMAS CORRENTES.**

Autor: Manoela Adams de Almeida  
Orientador: Prof. Dr. Lúcio Strazzabosco Dorneles

Data e Local: Santa Maria, Dezembro de 2011.

Este trabalho visa uma investigação detalhada das técnicas de medidas empregadas para o estudo dos fenômenos de transporte em estruturas com pelo menos uma dimensão em escala nanométrica, tais como filmes finos( uma dimensão nanométrica), ou granulares( três dimensões nanométricas).

Palavras chave: Dispositivos altamente resistivos. Baixíssimas correntes. Estruturas nanométricas.

## **ABSTRACT**

**FINAL GRADUATION WORK  
UNDERGRADUATED COURSE OF PHYSICS  
UNIVERSITY OF SANTA MARIA**

### **MEASURES OF ELETRONIC TRANSPORT EMPLOYING LOWEST CURRENT.**

**Author: Manoela Adams de Almeida  
Advisor: Prof. Dr. Lúcio Strazzabosco Dorneles**

**Date e Location: Santa Maria, in December 2011.**

This work aims at a detailed investigation of the measurement technique used for the study of transport phenomena in structures with at least one dimension on the nanoscale, such as thin films (a nanometer scale) or granular (three nanometer dimensions)

**Key words: Highly resistive devices. Very low current. Nanoscale structures.**

Aos meus irmãos Lucca, Henrique e Eduardo.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>LIMITES TEÓRICOS, INSTRUMENTOS USADOS PARA MEDIDAS DC E CIRCUITOS.....</b>	<b>11</b>
2.1	Limites Teóricos de Medidas .....	11
2.2	Instrumentos utilizados para Medidas DC .....	13
2.3	Circuitos .....	14
<b>3</b>	<b>MEDIDAS DE BAIXAS CORRENTES .....</b>	<b>18</b>
3.1	Correntes de Fuga e Proteção .....	18
3.2	Correntes “offset” .....	19
3.3	Medidas de Alta Resistência.....	21
<b>4</b>	<b>MEDIDAS DE RESISTIVIDADE.....</b>	<b>31</b>
4.1	Medidas de Quatro Pontas .....	31
4.2	Método Van der Pauw .....	40
<b>5</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>48</b>
	<b>Apêndice A-Especificações dos Instrumentos .....</b>	<b>50</b>
	<b>Apêndice B-Propriedades de vários materiais isolantes.....</b>	<b>56</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Diferenças de potencial (voltagens), correntes, resistências, etc, são grandezas físicas que determinam o desempenho de equipamentos elétricos e eletrônicos. Elas podem também fornecer informações importantes sobre os processos físicos atuando dentro dos materiais. A nossa capacidade de medi-las é, portanto, de fundamental importância em Física.

As medidas DC de correntes, tensões e resistências são frequentemente muito simples, bastando usar um multímetro digital e seguir regras elementares. Em alguns casos, a precisão exigida e as características da amostra demandam equipamentos, arranjos e cuidados especiais. Isto é, por exemplo, o caso quando as medidas são feitas em amostras muito pequenas (escalas micrométricas ou menores). Nestes casos, as resistências tendem a crescer, impondo limites para as correntes que podem ser usadas sem produzir aquecimento tornando a medida mais delicada, ficando sujeita a ruídos e outras fontes de erros.

Sempre que é efetuada uma medida de qualquer grandeza física acabasse interagindo com esta. Neste caso, é extremamente necessário alterar minimamente o circuito para que a medida tenha a maior confiabilidade possível.

Neste trabalho, foi realizada uma resenha dos procedimentos adotados para realizar medidas de níveis muito baixos de tensões e correntes elétricas. Equipamentos e alguns circuitos ou arranjos especiais usados são apresentados no capítulo dois e três do trabalho. No capítulo quatro alguns detalhes importantes na medida de filmes finos são apresentados.

## 2. LIMITES TEÓRICOS, INSTRUMENTOS USADOS PARA MEDIDAS DC E CIRCUITOS

### 2.1 Limites Teóricos para Medidas de Transporte Eletrônico

Tensão DC, corrente DC e resistência são as medidas mais frequentes obtidas com multímetros digitais (DMMs). Geralmente, esses instrumentos são adequados para medidas com níveis de sinal acima de  $1\mu\Omega$  ou  $1\mu A$  e abaixo de  $1G\Omega$ . ( $\mu=10^{-6}$  e  $G=10^9$ ). Esses instrumentos operam, normalmente, longe dos limites teóricos de sensibilidade.

Os limites teóricos de sensibilidade em uma medida são determinados pelo ruído, geralmente causado pela resistência presente no circuito. Este ruído de tensão é proporcional à raiz quadrada da resistência, largura da banda e temperatura absoluta. A figura 2.1 mostra os limites de medidas de tensão teóricos à temperatura ambiente, para amostragens em tempo que variam de 0.1 s até 10 s. Nota-se que altas fontes de resistência limitam a sensibilidade teórica das medidas de tensão. Podemos, por exemplo, medir um sinal de  $1\mu V$  em  $1\Omega$  de resistência, mas não podemos fazê-lo quando a resistência do circuito é de  $1T\Omega$ . Isso ocorre pelo fato de que, esta alta resistência  $1\mu V$  encontra-se muito próximo dos limites teóricos, o que nos impossibilita de fazer a medida com um multímetro digital (DMM).

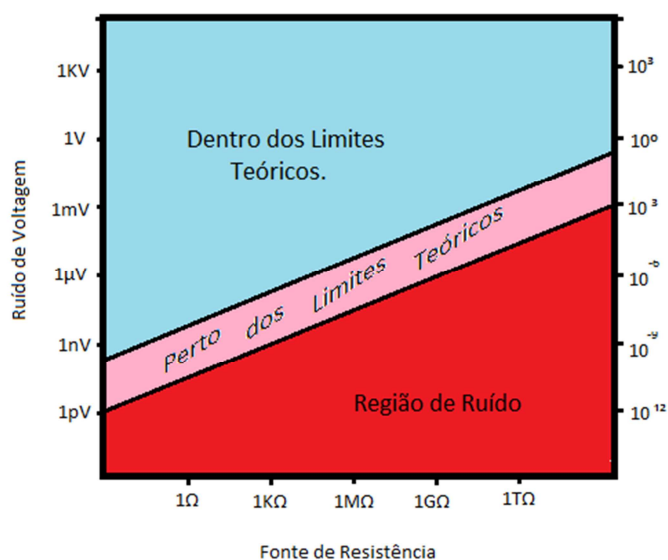


Figura 2.1 - Valores teóricos de medidas de tensão. (Keithley)

As características intrínsecas do multímetro digital fazem com que não seja possível medir sinais próximos aos limites teóricos, como é ilustrado na figura 2.2. Se a resistência da fonte for  $1\text{M}\Omega$  ou menos, ou se a resolução desejada não é melhor do que  $0.1\ \mu\text{V}$  (com baixa resistência da fonte), os níveis de sinais não estão perto dos valores teóricos e é possível utilizar o multímetro digital (DMM). Porém, se desejamos valores melhores de sensibilidade, e a resistência da fonte for baixa, um nano-voltímetro permitirá medidas em níveis muito mais próximos aos valores de limites teóricos. Um multímetro digital possui intervalos de resistência de entrada de  $10\text{M}\Omega$  até  $10\text{G}\Omega$ , com várias ordens de magnitude menores do que  $1\text{T}\Omega$ , o que resulta em vários erros de medida da resistência. Além disto, correntes de entrada podem gerar uma tensão de saída apreciável. Por seu turno, por causa dos valores maiores da resistência de entrada, um eletrômetro pode fazer medidas próximas aos valores de limites teóricos.

Outra situação a ser considerada é para baixos valores de corrente. Geralmente um multímetro digital produz alta queda na tensão de entrada, o que afeta medidas de corrente em baixos níveis. Assim, um multímetro digital não apresenta resolução maior do que  $1\text{nA}$ . Por isso, um eletrômetro ou um amperímetro que possui uma carga de entrada bem menor, e melhor sensibilidade próximo aos limites teóricos para medidas de baixa corrente, são melhores opções.

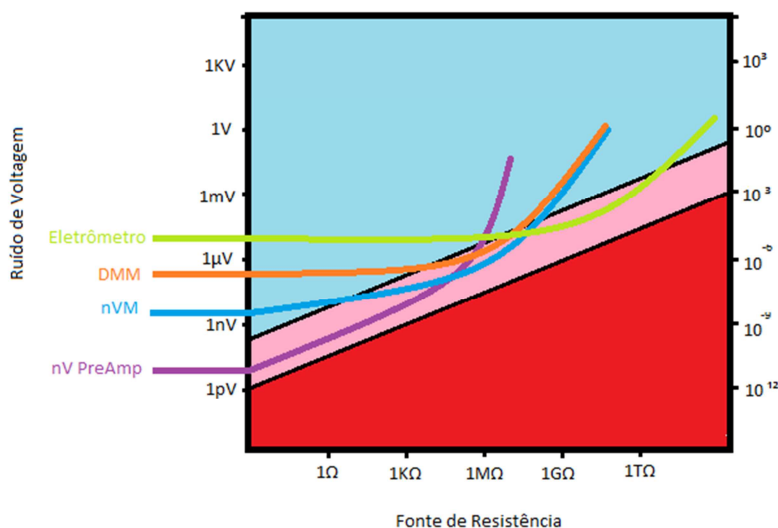


Figura 2.2 - Limites de resistência pelo ruído de tensão. (Keithley)

## 2.2 Instrumentos utilizados para Medidas DC

Existem muitos instrumentos para a realização de medidas DC, dentre eles estão os já citados, multímetros digitais, nano voltímetros, eletrômetros, nanovoltímetros com pré-amplificadores.

Um eletrômetro é um multímetro DC aprimorado. Sendo assim, ele pode ser usado tanto para executar medidas que requerem um nível maior de sensibilidade, como também medidas mais simples que são capazes de ser realizadas por um multímetro DC. Além disto, devido as suas características especiais, como alta sensibilidade, ele pode executar medidas de tensão, corrente, resistência e carga bem mais precisas do que um multímetro digital. Devemos usar um eletrômetro quando temos as seguintes condições: (i) Medidas de corrente menores do que 100pA ( $10^{-10}$ A), ou resistência maior do que 1G $\Omega$  ( $10^9\Omega$ ); (ii) Medidas de tensão sobre resistência de 1M $\Omega$  ou mais.

Eletrômetros podem ser usados em funções diferentes, como por exemplo: medidas de carga, medidas de corrente com alta sensibilidade ou ainda medidas de sinais no ou perto da faixa de ruído Johnson, causado pelo movimento dos portadores de carga. As vantagens de usar um eletrômetro são, além de suas capacidades avançadas em comparação a um multímetro digital (DMM), sua facilidade de operação e sua velocidade.

Quando usado como voltímetro, a resistência de entrada de um eletrômetro voltímetro é extremamente alta, acima de 100T $\Omega$  ( $10^{14}\Omega$ ) e pode chegar a ser até maior do que 10 P $\Omega$  ( $10^{16}\Omega$ ). Além disso, a corrente de “offset” na entrada é menor do que 5fA ( $5 \times 10^{-15}$ A). Essas características fazem dele um dispositivo que pode medir voltagens sem alterar o circuito. Por causa da alta resistência de entrada e baixa corrente de saída, o eletrômetro voltímetro causa efeitos mínimos dentro do circuito a ser medido. Assim, um eletrômetro voltímetro é usado em situações em que um multímetro não pode ser usado, podendo ser usado para medir, por exemplo, o potencial de cristais piezelétricos ou alta impedância em eletrodos de pH.

Usado como um amperímetro, um eletrômetro pode medir correntes extremamente pequenas, limitadas somente pelos limites teóricos e pela corrente de “offset” de entrada.

Ele tem capacidade de medir correntes de 1fA ( $10^{-15}$  A). Por sua alta sensibilidade, é possível medir correntes de saída de fotomultiplicadoras e câmaras de íons, bem como baixíssimas correntes em supercondutores, espectrômetros de massa, etc.

Se mantivermos uma corrente ou tensão (constante), um eletrômetro pode também medir resistência. Com corrente constante e uma alta resistência de entrada é capaz de medir resistências acima de  $200\text{G}\Omega$ . Quando medimos com tensão constante, o eletrômetro aplica essa tensão constante em uma resistência desconhecida, mede a corrente e a partir daí calcula a resistência. Este é um método bem eficiente, pois permite que um resistor desconhecido seja testado através de uma tensão conhecida. Essas medidas de resistência podem ser superiores a  $10\text{P}\Omega$  ( $10^{16}\Omega$ ).

Uma função menos conhecida dos eletrômetros é o seu uso como Coulombímetro. O eletrômetro/coulombímetro pode detectar cargas abaixo de  $800\text{aC}$  ( $8 \times 10^{-16}\text{C}$ ). Um coulombímetro é capaz de medir correntes menores do que um amperímetro, pois não há contribuição de ruído pelo resistor interno. Esta função permite detectar correntes menores do que  $10\text{aA}$  ( $10^{-17}\text{A}$ ).

Um nanovoltímetro é um voltímetro muito sensível, otimizado para fornecer medidas perto dos valores teóricos em circuitos com baixa resistência, em contraste com o eletrômetro, que é otimizado para ser usado com fontes de alta resistência. Comparado com um eletrômetro, os ruídos de tensão são muito mais baixos e o ruído (e “drift”) da corrente são maiores do que o dos eletrômetros.

Quaisquer que sejam os aparelhos, um ponto importante para fazer boas medidas de baixo nível é um apropriado entendimento das especificações do instrumento. Embora a precisão do instrumento seja, provavelmente, a mais importante destas especificações, outras características como rejeição de ruídos devem ser avaliadas. Uma lista com as principais especificações e sua descrição aparece nos apêndices.

## **2.3 Circuitos**

Instrumentos como voltímetros, amperímetros, ohmímetros ou coulombímetros dedicados para fazer medidas em sinais muito pequenos, incorporam em seu design circuitos que, de maneira simplificada, podem ser entendidos como amplificadores operacionais.

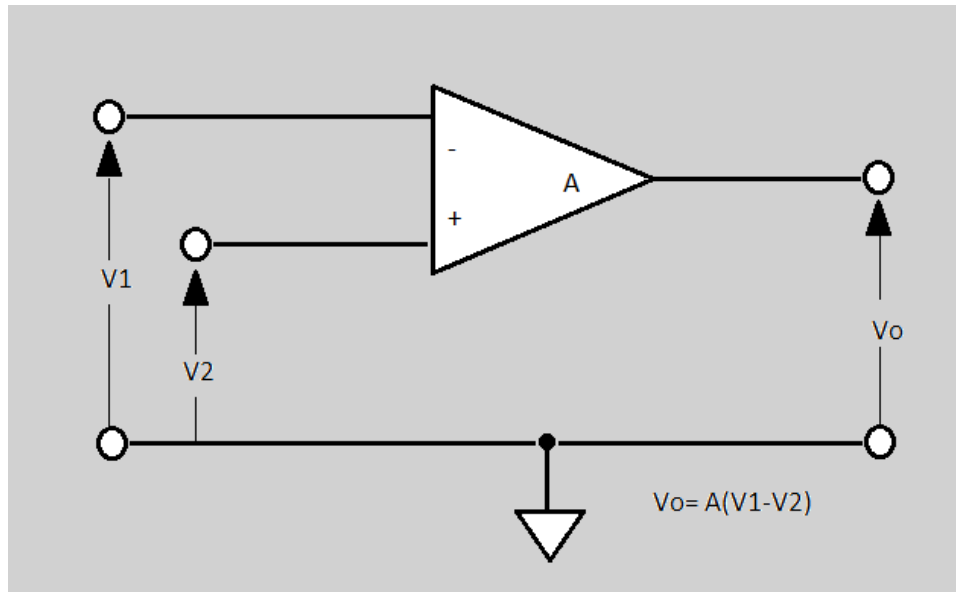


Figura 2.3 - Amplificador Operacional Básico. (Keithley)

A Figura 2.3 mostra o esquema de um amplificador operacional. A tensão de saída é dada por  $V_o = A(V_1 - V_2)$ . Já a corrente de entrada é zero.

Em um eletrômetro trabalhando como voltímetro, o amplificador operacional torna-se um amplificador de tensão quando conectado como esquematizado na figura 2.4. Se a corrente de “offset” é baixa, a corrente que flui através de  $R_A$  e  $R_B$  é a mesma. Supondo que o ganho ( $A$ ) seja muito alto, o ganho de tensão do circuito é definido como

$$V_o = V_2(1 + R_A/R_B). \quad (1)$$

Assim, a tensão de saída de baixa impedância ( $V_o$ ) é determinada tanto pela tensão de entrada ( $V_2$ ) quanto pelo ganho do amplificador definido pelas resistências  $R_A$  e  $R_B$ . Uma vez que  $V_2$  é aplicado na entrada do amplificador, a alta resistência de entrada deste é a única carga em  $V_2$ , e a única distorção na corrente é a baixa corrente “offset” de entrada do amplificador operacional. Em muitos eletrômetros/voltímetros,  $R_A$  é colocado em curto e  $R_B$  é mantido aberto, resultando em um ganho unitário.

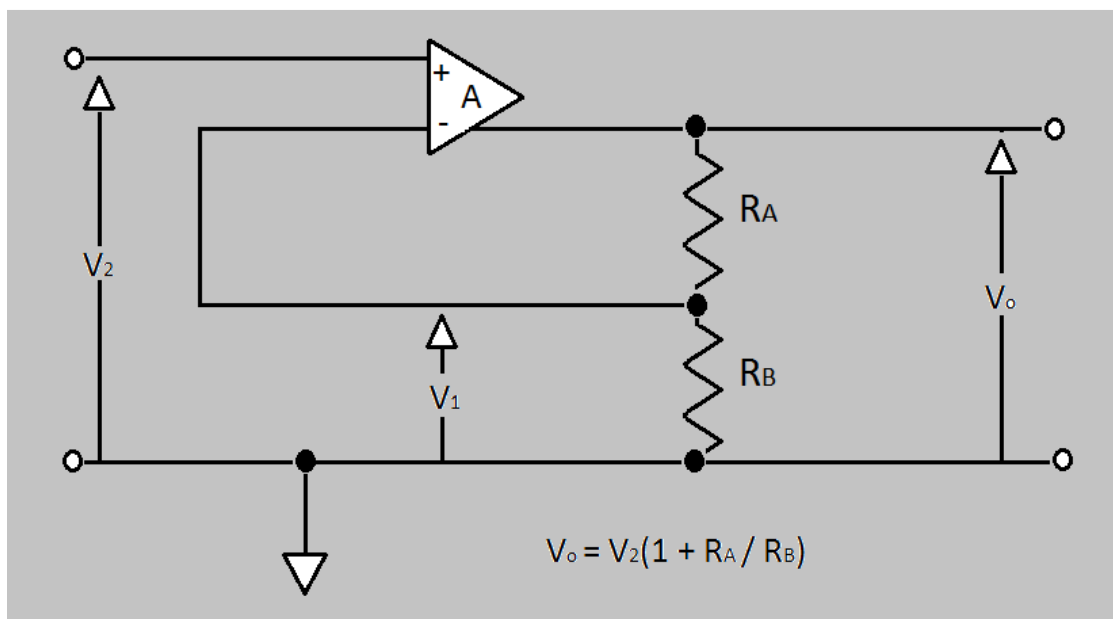


Figura 2.4 - Amplificador de Tensão para Eletrômetros. (Keithley)

Para descrever um nanovoltímetro pré-amplificado, o mesmo circuito básico da figura anterior pode ser usado, já que um ganho de tensão maior pode ser obtido adotando valores de  $R_A$  e  $R_B$  de acordo. Um ganho de tensão típico para um nanovoltímetro amplificador é 1000.

Como eletrômetros e nanovoltímetros possuem características diferentes, os amplificadores operacionais para os dois instrumentos são diferentes. Enquanto a característica mais importante do amplificador operacional do eletrômetro voltímetro é a baixa corrente “offset” de entrada e a alta impedância de entrada, para o nanovoltímetro é o baixo ruído de tensão de entrada.

Quando utilizamos um eletrômetro na função amperímetro, temos duas maneiras diferentes de medirmos corrente. São elas, a técnica do amperímetro com desvio e a técnica do amperímetro de realimentação.

Na primeira configuração, a corrente é desviada e passa sobre um resistor de valor conhecido. Este resistor deve ser de valor tão baixo quanto possível, de forma a pouco alterar a corrente medida. Valores baixos deixam também a medida mais rápida. Por último, resistências menores deixam as tensões de entrada menores, o que é conveniente. Este design é cada vez menos utilizado nos equipamentos mais modernos.

Na segunda configuração, a corrente de entrada ( $I$ ) flui através da realimentação do resistor ( $R_F$ ). A baixa corrente “offset” (deslocada do zero) do amplificador ( $A$ ) modifica a corrente ( $I$ ) em uma quantidade insignificante. A tensão de saída do amplificador é calculada por



$$V_o = -IR_f \quad (2)$$

Assim, a tensão de saída é a medida da corrente de entrada, e a sensibilidade é determinada pelo resistor de realimentação ( $R_F$ ).

### **3. MEDIDAS DE BAIXAS CORRENTES**

Neste trabalho temos como objetivo descrever medidas de baixa corrente. Essas medidas estão sujeitas a um grande número de fontes de erros, que podem acarretar em sérios impactos na precisão das medidas.

No caso do eletrômetro, estes erros já podem ser notados quando não são feitas conexões adequadas. A carga na tensão de entrada no voltímetro, e correntes “offset” de entrada do amperímetro, também podem afetar as medidas. A impedância da fonte do dispositivo a ser testado, afeta o desempenho do instrumento, e causa ruído. Erros de fontes externas podem ser provenientes de correntes de fuga nos cabos e correntes geradas por efeitos triboelétricos ou piezoelétricos.

#### **3.1 Correntes de Fuga e Proteção**

Correntes de fuga aparecem quando é alta a resistência entre o circuito medido e a fonte de tensão. Existem algumas técnicas que podem ser utilizadas para reduzir correntes de fuga, tais como isolamentos de boa qualidade, diminuição da umidade e proteção. Um blindagem de proteção também pode ser usado para reduzir os efeitos de desvios por capacitância no circuito. Uma maneira para reduzir correntes de fuga é utilizar isolantes de boa qualidade para construir o circuito teste como, Teflon, polietileno e safira. Devemos evitar materiais como nylon.

Um fator que pode degradar medidas de baixa corrente é a umidade. Por isso, a melhor escolha é utilizar materiais do tipo isolante, que não permite a formação de um filme contínuo de vapor d'água. Isso muitas vezes ocorre quando o material utilizado absorve água facilmente, sendo bom fazer medidas em um ambiente onde seja possível controlar a umidade. Em alguns casos, o isolante pode ter contaminantes iônicos que, especialmente em ambientes úmidos, geram falsas correntes.

Também podemos reduzir correntes de fuga utilizando uma proteção. Um protetor é um condutor conectado a um ponto de baixa impedância no circuito, que está perto do mesmo potencial de alta impedância que deve ser protegido. Um protetor pode isolar a alta impedância de entrada de um amperímetro, assim como fuga de tensão da fonte.

Um aspecto importante é o “set” do zero. Este ajuste do zero, em função do tempo da medida e de variações da temperatura pode ser perdido, gerando “drift” eletrônico.

Qualquer corrente estranha, gerada no sistema a ser testado, irá se adicionar à corrente que se deseja medir, causando erro. Tais correntes podem ser geradas internamente, como no caso das correntes de “offset” de entrada, ou podem ser externas, geradas por isolantes ou cabos. Os valores típicos aparecem na figura 3.1:

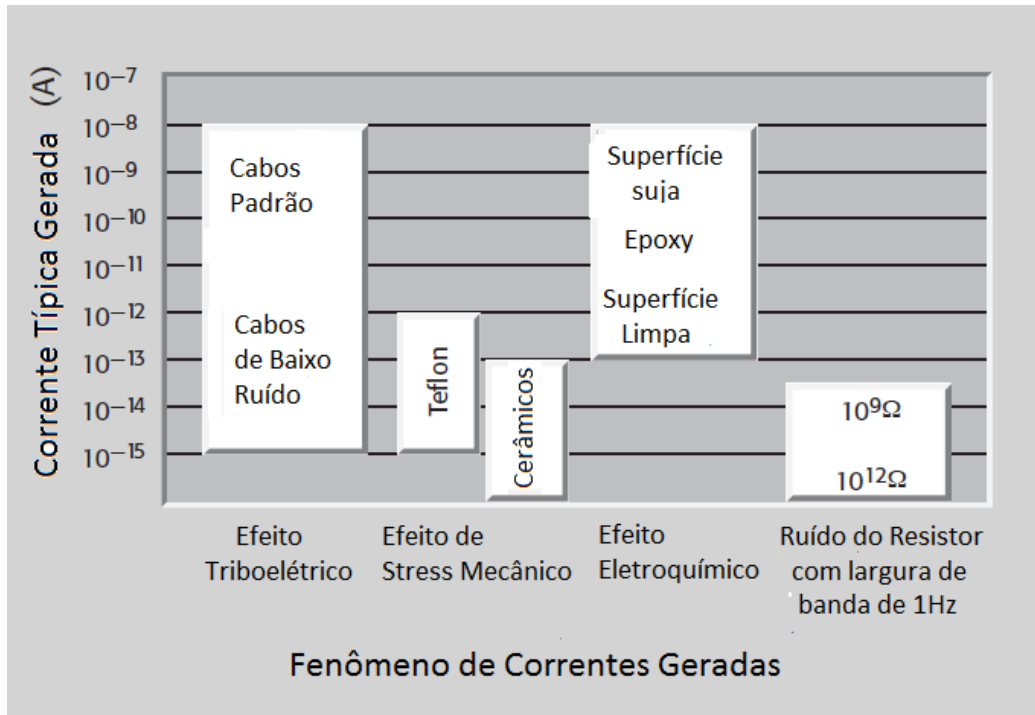


Figura 3.1 - Fenômeno de Correntes Geradas. (Keithley)

### 3.2 Correntes “offset”

O amperímetro ideal deve ter leitura zero quando os terminais de entrada são deixados abertos. No entanto, o circuito real apresenta uma pequena corrente que flui quando a entrada é aberta. Esta corrente é conhecida como corrente “offset” de entrada e é causada por correntes bias de dispositivos ativos, assim como correntes de fuga que fluem através de isolantes do instrumento. As correntes “offset” estão incluídas nas especificações dos instrumentos.

As correntes “offset” também podem ser geradas externamente por fontes triboelétricas ou piezoelétricas. As correntes “offset” externas são adicionadas a corrente da fonte e a corrente medida é a soma das correntes. As correntes triboelétricas são geradas por mudanças criadas entre o condutor e o isolante sob fricção. Neste caso, elétrons livres no

condutor criam uma carga, causando fluxo de corrente. Podemos tomar como exemplo uma corrente elétrica causada por condutores e isolantes friccionados juntos em um cabo coaxial.

Cabos de baixo ruído reduzem esse tipo de efeito. Geralmente são usados isolantes de polietileno revestido com grafite sob a blindagem externa. O grafite proporciona lubrificação e condução equipotencial cilíndrica que equaliza as cargas e minimiza cargas geradas pela fricção dos cabos em movimento. No entanto, mesmo cabos com baixos ruídos quando sujeitos a vibração e expansão ou contração criam ruídos, assim, todas as conexões devem ser mantidas longe de mudanças de temperatura, e colocadas sobre superfícies não vibracionais (estruturas rígidas).

Correntes piezoelétricas, por seu turno, são geradas quando um stress mecânico é aplicado em certos materiais cristalinos quando usados em terminais isolantes ou interconexão de “hardware”. Em alguns plásticos, ocorre acúmulo de cargas que faz com que o material tenha um comportamento similar aos materiais piezoelétricos. Para que possamos minimizar correntes provenientes deste efeito é necessário remover o stress mecânico dos isolantes. Isso pode ser feito usando materiais isolantes que não apresentam piezoeletricidade e acúmulo de cargas. Estes efeitos são dependentes das mudanças de capacitância entre a placa e os terminais. As cargas movem-se ao redor destes, formando um fluxo de corrente.

Na prática, é bem difícil distinguir os efeitos de acúmulo de cargas em isolantes dos efeitos piezoelétricos. Portanto, uma maneira eficaz é escolher bons materiais isolantes e fazer as conexões com estruturas mais rígidas possível.

Outra fonte de erros advém da umidade. Erros nas medidas de corrente também surgem através de efeitos termoelétricos, quando íons criam baterias fracas entre os condutores de borda do circuito. A resistência dos isolantes pode ser bastante reduzida quando há alta umidade ou contaminação iônica.

Condições de alta umidade ocorrem por condensação ou absorção de água, enquanto contaminantes iônicos ocorrem por óleos, sais, etc.. Enquanto a primeira contaminação é pela redução da resistência do isolante, a combinação de ambos pode formar um padrão de condutividade, ou ainda, agir como uma célula eletroquímica com altas resistências. Este tipo de célula pode formar nanoampères ou picoampères de corrente por um longo período. Assim, para evitar contaminações e umidade, devem-se escolher isolantes que sejam resistentes à absorção de água, e manter a umidade em níveis moderados. Também é necessário manter o isolante sempre limpo e livre de contaminantes.

Caso isso não seja possível e o isolante seja contaminado, um agente de limpeza como o metanol, deve ser usado para a descontaminação. Após a descontaminação é correto isolar a

causa da contaminação e removê-la para que não possa voltar a contaminar a amostra. Para esta limpeza, usa-se apenas solventes muito puros, pois de outra maneira corre-se o risco de criar uma película eletroquímica.

A absorção dielétrica é um fenômeno que ocorre no isolante quando a tensão passa através do mesmo e induz cargas negativas ou positivas por polarização, pois várias moléculas polares estão em diferentes posições. Quando a tensão é removida, as cargas separadas geram um decaimento na corrente do circuito conectado ao isolante. Para amenizar os efeitos da absorção dielétrica na corrente medida, evitamos correntes maiores que alguns volts em isolantes usados para medidas de correntes sensíveis. Se isto não for possível, é preciso esperar até mesmo horas para que a corrente causada por absorção dielétrica se dissipe.

### **3.3 Medidas de Alta Resistência:**

Quando precisamos fazer medidas de alta resistência, ou seja, resistência maior do que  $1\text{G}\Omega$ , estas são feitas preferencialmente por um eletrômetro. Eletrômetros são capazes de medir altas resistências através do método de tensão constante, ou de corrente constante. O método da tensão constante consiste em usar um eletrômetro na função amperímetro e uma fonte de tensão, enquanto o método da corrente constante usa um eletrômetro na função voltímetro e uma fonte de corrente.

Para fazer medidas de alta resistência utilizando o método da tensão constante, um amperímetro e uma fonte de tensão constante, são necessários. Alguns tipos de eletrômetros têm fontes de tensão interna e automaticamente calculam a resistência.

A configuração básica do método da tensão constante é demonstrada pelo circuito da figura 3.2. Neste método, a fonte de tensão  $V$  é colocada em série com um resistor desconhecido  $R$  e um amperímetro  $I_M$ . Desde que a queda de tensão detectada pelo amperímetro possa ser desprezada, essencialmente toda a tensão aparece através de  $R$ . A corrente resultante é medida pelo amperímetro e a resistência é calculada pela Lei de Ohm

$$R = V/I. \quad (3)$$

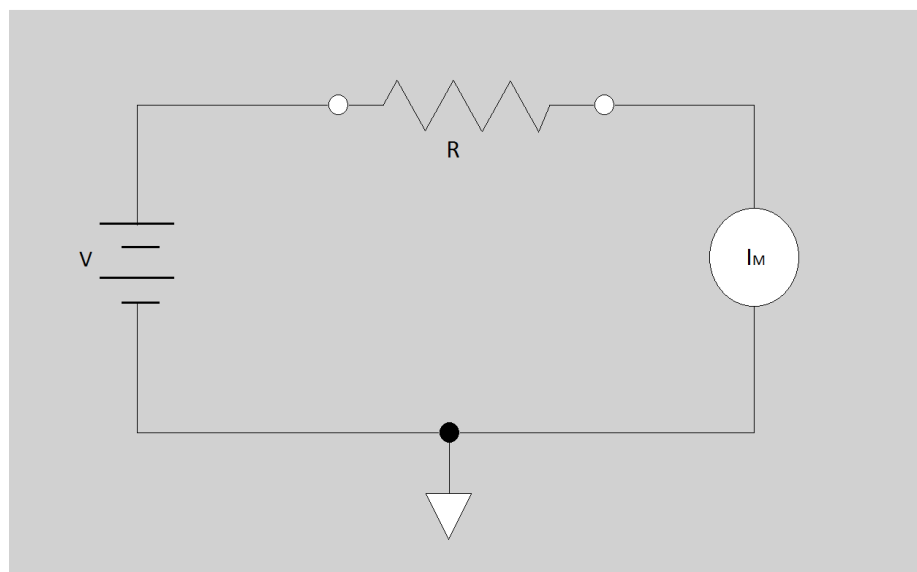


Figura 3.2 - Método da Tensão constante para medir Altas Resistências. (Keithley)

Pelo fato da alta resistência ser usualmente uma função da tensão aplicada, este método é comparado com o método da corrente constante. Testando várias voltagens, a curva da resistência pela tensão pode ser traçada e a tensão pode ser determinada pelo coeficiente da resistência.

Devemos ressaltar que um dos erros comuns neste tipo de medida é causado devido à fugas geradas pela resistência nos cabos. Podemos eliminar tais fugas utilizando dois métodos que são a proteção e supressão por uma linha de base.

Embora o método da tensão constante seja eficiente para medir resistências muito altas, devemos proceder com cautela para poder eliminar fugas de correntes no circuito. Qualquer fuga de corrente é adicionada a corrente testada e diminui a precisão da resistência medida. Esta corrente pode ser anulada usando uma supressão por uma linha de base.

Podemos fazer medidas de alta resistência pelo método da corrente constante usando um eletrômetro utilizado na função voltímetro e uma fonte de corrente. Usando esta configuração temos uma fonte de corrente separada possibilitando fazer medidas de quatro pontas e controlar a corrente sobre a amostra.

Outra possibilidade é usar um eletrômetro/voltímetro junto com uma fonte de corrente externa. Uma corrente proveniente de uma fonte de corrente constante ( $I$ ) flui através de uma resistência desconhecida ( $R$ ) e a queda de tensão é medida pelo eletrômetro/voltímetro ( $V$ ). Usando este método, resistências de aproximadamente  $10^{14}\Omega$  podem ser medidas. Mesmo parecendo um procedimento bem simples, alguns cuidados devem ser tomados.

A impedância interna do voltímetro precisa ser pelo menos 100 vezes maior do que a resistência desconhecida para que possamos evitar erros. Tipicamente, a impedância interna de um eletrômetro voltímetro é cerca de  $10^{14}\Omega$ . A resistência externa da fonte de corrente deve ser muito maior do que a resistência desconhecida para que a medida seja linear. Como a tensão através da amostra depende da resistência da amostra, é difícil medir o coeficiente da tensão usando o método da corrente constante. Como o coeficiente de tensão é preocupante, é mais seguro usar o método da tensão constante.

Quando usamos o eletrômetro/voltímetro para fazer as medidas de alta resistência, os erros das técnicas descritas anteriormente também se aplicam.

Um eletrômetro/voltímetro e uma fonte de corrente separada são usados para determinar alta resistividade utilizando a técnica da sonda de quatro fios de Van der Pauw.

Ainda devemos citar erros devido a acoplamentos eletrostáticos e interferências, que ocorrem quando um objeto eletricamente carregado é trazido para perto de um objeto não carregado. Com baixos níveis de impedância os efeitos de interferência não são observáveis, pois a carga se dissipa rapidamente. Porém, os materiais com alta resistência não permitem que essas cargas se dissipem rapidamente, causando medidas instáveis. Estes erros na leitura podem ser causados devido a campos elétricos AC ou DC, assim, é necessário fazer uma blindagem eletrostática que ajudará a minimizar estes efeitos.

Podemos analisar os campos DC, eles produzem leituras ruidosas e erros que podem ou não ser detectáveis. Estes campos podem ser detectados por movimentos perto do experimento, o que ocasiona flutuações nas leituras feitas pelo eletrômetro. Para executar uma verificação rápida da existência de interferência, basta colocar um pedaço de plástico carregado próximo do circuito. Uma grande mudança nas medidas indica uma proteção insuficiente.

Os campos AC podem ser igualmente um problema. Estas interferências são causadas mais frequentemente por linhas de força ou por campos de radiofrequência (RF). Se a tensão AC de entrada é alta, parte deste sinal é corrigido, produzindo um erro no sinal DC que está sendo medido. Isto pode ser verificado observando-se o sinal analógico da saída do eletrômetro com um osciloscópio. Uma forma de onda cortada indica que é preciso melhorar a blindagem eletrostática.

Para reduzir os efeitos de campo, uma blindagem pode ser construída ao redor do circuito a ser medido. O tipo mais fácil de blindagem é construir uma caixa de metal que encubra o circuito teste.

A interferência causada por fontes de radiofrequência pode afetar a sensibilidade das medidas feitas por eletrômetro. Este tipo de interferência pode ser indicado por uma mudança de carga repentina, sem explicação aparente, na leitura das medidas.

Um dispositivo não linear ou junção no circuito de entrada pode retificar a energia de radiofrequência e causar erros significativos. Fontes de interferência são encontradas perto de transmissores, válvulas solenoides, e até mesmo de telefones celulares e rádios bidirecionais portáteis.

Uma vez que a fonte é identificada, esta energia deve ser reduzida ou eliminada através de blindagens.

O limite fundamental das medidas é o ruído Johnson que aparece a partir da resistência da fonte. Em qualquer resistência, a energia térmica produzida pelo movimento das partículas carregadas resulta em um ruído, que é frequentemente chamado de ruído térmico de Johnson. A potência disponível a partir deste movimento é dada pela equação:

$$P = 4kTB \quad (4)$$

Onde:

k é a constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K);

T é a temperatura absoluta em Kelvin;

B é a largura da banda de ruído in Hz.

Os condutores metálicos podem aproximar-se dos limites teóricos de ruído, enquanto outros materiais produzem um ruído ligeiramente superior. O ruído Johnson de tensão (E) desenvolvido num resistor (R) é

$$E = \sqrt{4kTRB} \quad V_{\text{rms}}. \quad (5)$$

E o ruído Johnson de corrente desenvolvido por um resistor R é

$$I = (\sqrt{4kTRB}) / R \quad A_{\text{rms}}. \quad (6)$$

Algumas considerações estatísticas mostram que o ruído pico-a-pico será, aproximadamente, cinco vezes maior do que o ruído rms em 99% do tempo. Portanto, o nível rms é geralmente multiplicado por cinco para ser convertido em pico-a-pico. Quando a temperatura ambiente é aproximadamente 300K, as equações anteriores tornam-se



$$E_{p-p} = 6,4 \times 10^{-10} \sqrt{RB} \quad (7)$$

$$I_{p-p} = 6,4 \times 10^{-10} (\sqrt{B/R}) \quad (8)$$

A figura 3.3 abaixo representa o ruído de tensão em função da largura de banda do ruído para alguns valores de resistências.

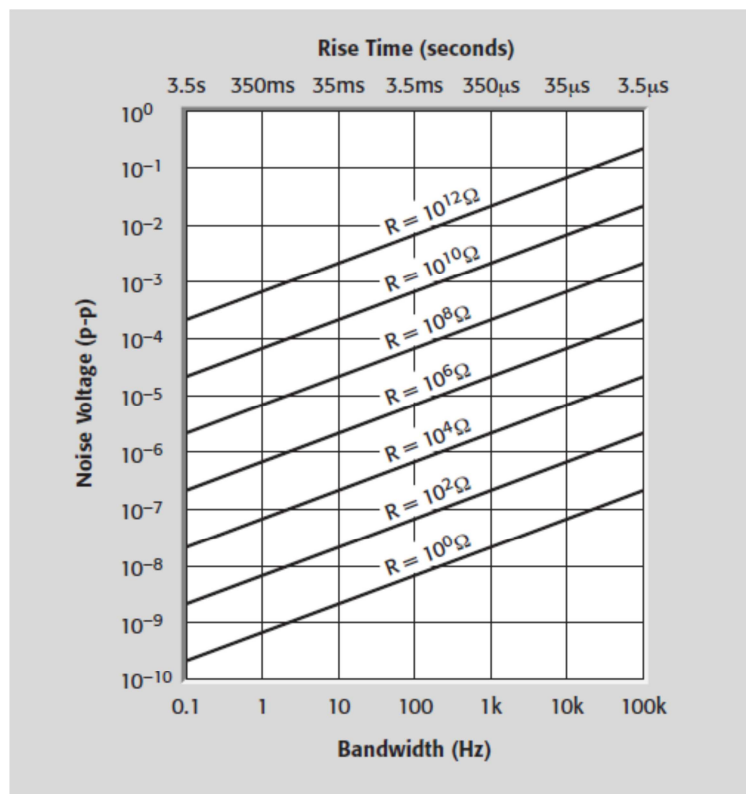


Figura 3.3 - Ruído de tensão em função das larguras de banda do ruído da resistência da fonte.

(Keithley)

Já para as correntes medidas, apresentamos uma figura que define o ruído de corrente de várias resistências em função de várias larguras de banda. Pelo diagrama podemos notar que um decréscimo no ruído de corrente gera um aumento na resistência, enquanto o ruído de tensão aumenta.

O ruído Johnson impõe um limite teórico de tensão ou resolução da corrente. As equações anteriores sugerem que existem várias maneiras de reduzir o ruído Johnson. Pode ser possível reduzir a largura da banda, a temperatura ou a resistência da fonte.

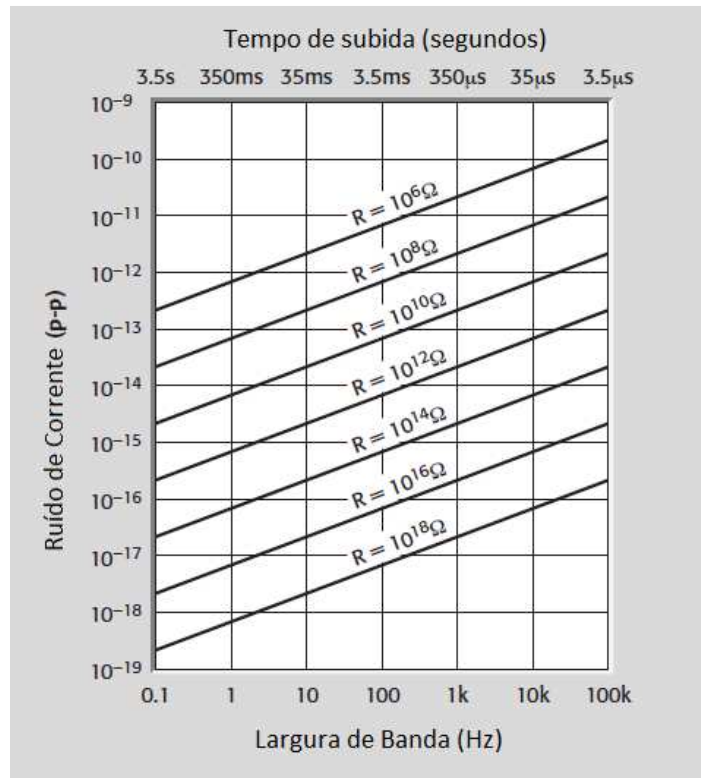


Figura 3.4 - Ruído de corrente pela largura de banda do ruído da resistência da fonte.  
(Keithley)

Uma vez que o ruído Johnson é uniforme sobre um intervalo de frequência, reduzindo-se o ruído da largura de banda, efetivamente reduz-se o ruído da medida. É importante notar que o ruído da largura de banda não é necessariamente o mesmo valor da largura de banda do sinal.

Em circuitos de alta resistência, o ruído da largura de banda é limitado pela resistência da fonte e pela capacitância de entrada. Neste caso, o ruído da largura de banda é:

$$B_{\text{Ruído}} = \pi/2 (f_{3\text{dB}}) = \pi/2 (1/(2\pi R_{\text{efetivo}} C_{\text{entrada}})) = 1/(4R_{\text{efetivo}} C_{\text{entrada}}) \quad (9)$$

Onde o  $R_{\text{efetivo}}$  é a resistência da fonte em paralelo com a resistência de entrada do dispositivo medido, e  $C_{\text{entrada}}$  é a soma dos desvios de capacitâncias de entrada do instrumento.

O ruído da largura de banda pode ser reduzido artificialmente pela média das medidas analógicas em um longo período, pela média das leituras digitais feitas por um computador, ou por uma filtragem digital interna. Outra maneira é usar filtros passa-baixa antes do dispositivo de leitura.

Há um limite que se pode reduzir a largura de banda, já que uma redução excessiva pode tornar as medidas suscetíveis a outros erros, como de tempo ou desvio de temperatura.

Reduzindo-se a temperatura da fonte de sinal, da temperatura ambiente até  $-270^{\circ}\text{C}$  (3K), reduz-se o ruído de tensão por um fator de 10. Analogamente, uma redução da temperatura ambiente até a temperatura do nitrogênio líquido (77K), reduzimos o ruído em um fator 2. Entretanto, muitos experimentos são desenvolvidos para operar dentro de certo intervalo de temperatura, que determina o ruído que se espera da fonte.

O único problema que resta é determinar o valor efetivo do ruído gerado pela resistência da fonte. Mudar a resistência da fonte geralmente não é uma boa opção para reduzir o ruído. Mas, se a mudança pode ser feita, as equações mostram que se R for menor gera-se uma redução no ruído de tensão ou um aumento no ruído de corrente.

Nas medidas de tensão, a resistência da fonte de tensão está em paralelo com a resistência de entrada do voltímetro. A resistência de entrada é normalmente muito maior que a resistência da fonte, portanto, os valores da resistência da fonte determinam a tensão do ruído Johnson.

Em medidas de corrente, a resistência da fonte e o desvio de resistência contribuem para o ruído. A resistência efetiva é a combinação da resistência da fonte em paralelo com a resistência de desvio. A realimentação do amperímetro com altos valores de resistência de desvio tem baixo ruído de corrente Johnson e maior sensibilidade e, portanto, maior sensibilidade do que o amperímetro com menor resistência de desvio.

O ruído Johnson do resistor está relacionado apenas com a resistência, a temperatura e a largura de banda. Quando a corrente passa através do resistor, o ruído sofre um aumento maior do que o ruído Johnson calculado. Esse acréscimo de ruído, muitas vezes é denominado ruído de excesso da corrente.

Em todos os casos, esse excesso de ruído é proporcional à corrente através do resistor.

Um ponto importante que deve ser levado em consideração em uma medida são as conexões dos aparatos experimentais. Embora a precisão do instrumento seja de grande importância na tomada das medidas de baixo nível, as conexões do dispositivo são quase igualmente importantes. O caminho completo dos conectores, através dos cabos, deve degradar o sinal o mínimo possível.

Embora multímetros digitais geralmente utilizem esquemas de ligação do tipo banana, estes não são os mais eficazes para se realizar as medidas. Estes instrumentos requerem cabos do tipo coaxial ou triaxial, pois apresentam maior eficiência.

Um cabo coaxial consiste em um condutor único cercado por uma proteção, enquanto um cabo triaxial apresenta uma segunda proteção em torno da primeira. Com cabos triaxiais, a

blindagem interna pode ser conduzida por um potencial de proteção, a fim de reduzir as fugas dos cabos e minimizar o tempo de subida do circuito. A blindagem externa é conectada ao aterramento. Em qualquer um dos tipos preferenciais, a proteção dos cabos não deve flutuar mais do que 30Vrms acima do aterramento por questões de segurança. Cabe lembrar que estes também promovem um escudo contra interferências eletrostáticas.

Ambos os casos, coaxial e triaxial, são boas opções para minimizar os ruídos, devendo ser usados para medidas de níveis baixos.

Os isolamentos da resistência são importantes para um sistema de testes de baixa resistência, especialmente quando fazemos medidas de alta impedância. Conseqüentemente, o isolamento da resistência nas conexões é uma consideração fundamental.

Parâmetros importantes, tais como resistência dos cabos, capacitância, e correntes de fuga, mudam com o comprimento dos cabos. Por isso, é essencial que todas as conexões necessárias sejam feitas com o menor comprimento possível.

Existem dois tipos gerais de conectores usados por eletrômetros. O conector do tipo BNC, é um tipo comum de conector de radiofrequência, tipicamente usado em cabos coaxiais. Ele inclui um condutor central e um escudo, enquanto um cabo triaxial inclui um condutor central, um escudo interno e outro externo.

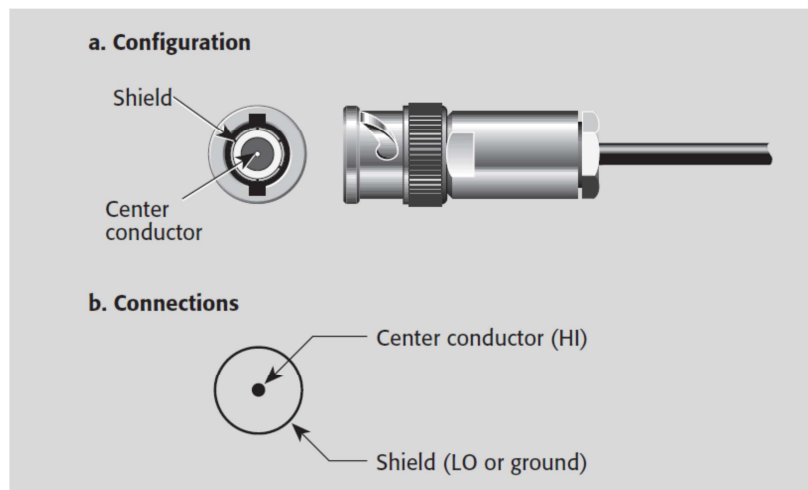


Figura 3.5 - Conectores BNC. (Keithley)

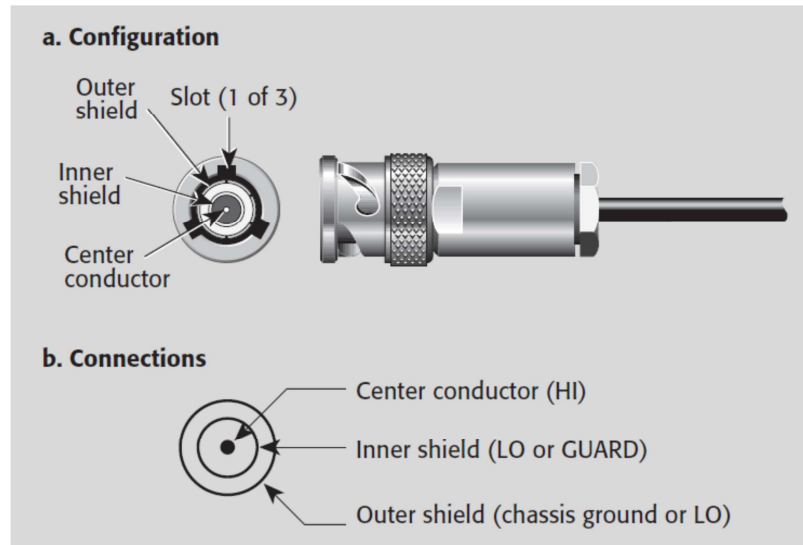


Figura 3.6 - Conector triaxial. (Keithley)

## **4. MEDIDAS DE RESISTIVIDADE E RESISTÊNCIA DE FOLHA**

Pesquisas e testes com materiais semicondutores muitas vezes envolvem a determinação da resistividade e da mobilidade Hall da amostra. Nesses dispositivos a resistividade pode afetar a capacitância, a resistência em série e o limiar de tensão.

A resistividade de materiais semicondutores é frequentemente determinada usando a técnica das quatro pontas. Com esta técnica, duas das pontas são usadas para a fonte de corrente e as outras duas para medir tensão. Usando este método eliminamos os erros devido à resistência das pontas e a resistência dos contatos entre cada ponta e o material semicondutor. Isto acontece porque um voltímetro possui alta impedância de entrada que drena pouca corrente, levando a uma pequena queda de tensão nas pontas.

Dois técnicas são muito usadas para fazermos este tipo de medidas: a Técnica de Quatro Pontas e o Método de Van der Pauw.

### **4.1 Medidas de Quatro Pontas**

Para fazermos medidas de resistividade e de resistência de folha, uma técnica muito eficaz a ser utilizada é a técnica de quatro pontas. Este método é empregado desde 1916 para medidas de resistência da terra. Já em 1954, esta começou a ser utilizado para fazer medidas de resistividade elétrica em “wafers” de materiais semicondutores. Atualmente tem sido muito utilizado para caracterizar filmes ultrafinos (10 a 40nm). Esta grande utilização pode ser explicada pelo fato de ele não ser um método do tipo destrutivo, ainda que a pressão exercida pelos eletrodos na superfície possa danificar o material se esta for excessivamente grande. Uma vantagem que explica a grande usabilidade do método é a sua simplicidade, e também de que esta não requer um bom contato ôhmico entre o eletrodo e a amostra.

Primeiro devemos entender a geometria desta técnica. Ela consiste em quatro eletrodos dispostos linearmente. A corrente é injetada através dos dois eletrodos externos, e a tensão é medida nos outros dois. Existem duas configurações possíveis na montagem desta técnica, a de pontas igualmente espaçadas e a de pontas com diferentes espaçamentos.

No caso de pontas com diferentes espaçamentos sobre a superfície semi-infinita temos que a resistividade é dada por

$$\rho = [2\pi(V/I)] / [1/S_1 + 1/S_3 - 1/(S_1 + S_2) - 1/(S_2 + S_3)] \quad (10)$$

onde temos que:  $S_1, S_2$  e  $S_3$  são as distâncias entre as pontas,  $V$  e  $I$  são respectivamente a tensão medida e a corrente injetada.

Agora, para o caso de as pontas serem colocadas de maneira igualmente espaçada, como mostra o esquema da figura 4.1, ou seja,  $S = S_1 = S_2 = S_3$ , a equação da resistividade pode ser simplificada para

$$\rho = 2\pi S V / I \quad (11)$$

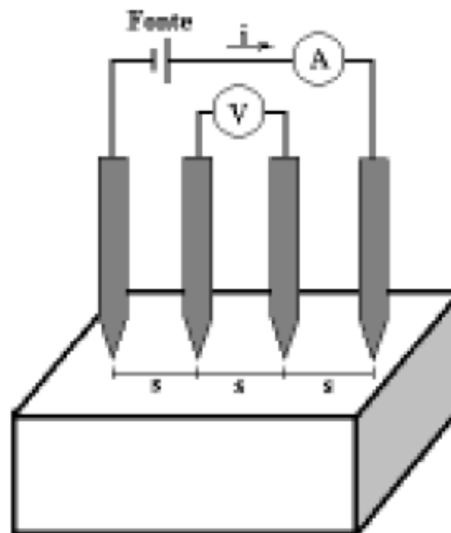


Figura 4.1 - Arranjo para medidas de resistividade pela Técnica de Quatro Pontas, onde  $S$  representa o espaçamento entre as pontas. (Santos, 2001)

A figura 4.2 mostra como devem ser feitas as sondas na amostra para efetuarmos este tipo de medidas. Em princípio são usados três equipamentos. Nas pontas externas conectamos uma fonte de tensão DC, que está ligada em série com um multímetro que mede a corrente que passa entre as pontas. Nas pontas internas é conectado um voltímetro, que irá monitorar a tensão entre as mesmas. O voltímetro conectado as pontas internas irá medir a tensão que, não será a mesma aplicada pela fonte. Esta tensão medida é originada pelo campo elétrico criado pela aplicação da tensão entre as pontas externas, e é esta tensão que deve ser considerada no desenvolvimento dos cálculos matemáticos. Existem alguns pontos que devem ser observados:

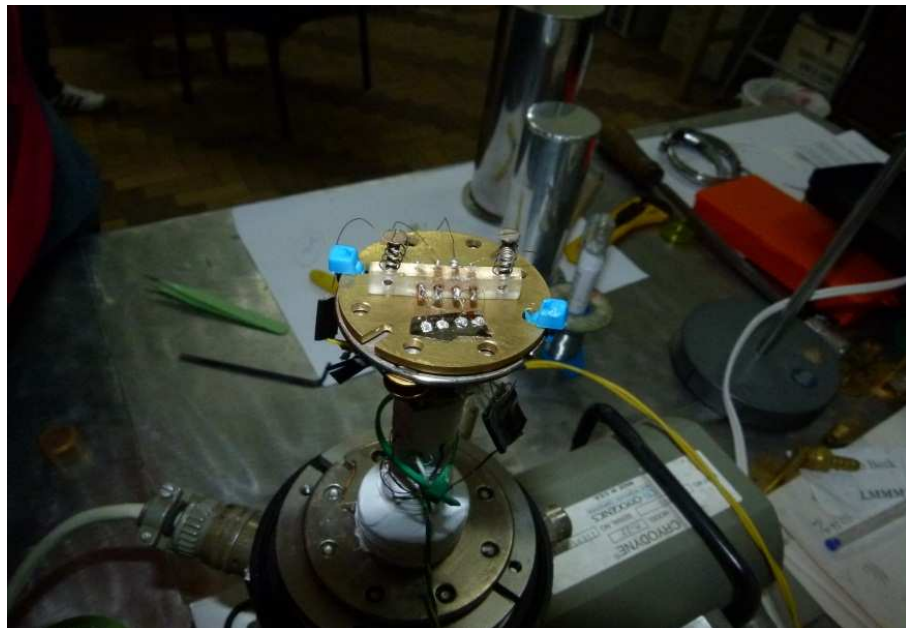
1- O valor do potencial aplicado pela fonte não deve ser usado para o cálculo da resistividade. Os valores de  $V$  e  $I$  usados devem ser aqueles medidos.

2- O valor do potencial aplicado nas pontas externas depende da amostra. A tensão aplicada pela fonte DC deve ser a menor possível, pois quanto menor a tensão, mais rapidamente os gradientes de potencial irão se estabilizar.

3- Antes de efetuar a leitura de tensão é necessário que haja a estabilização dos gradientes de potencial.

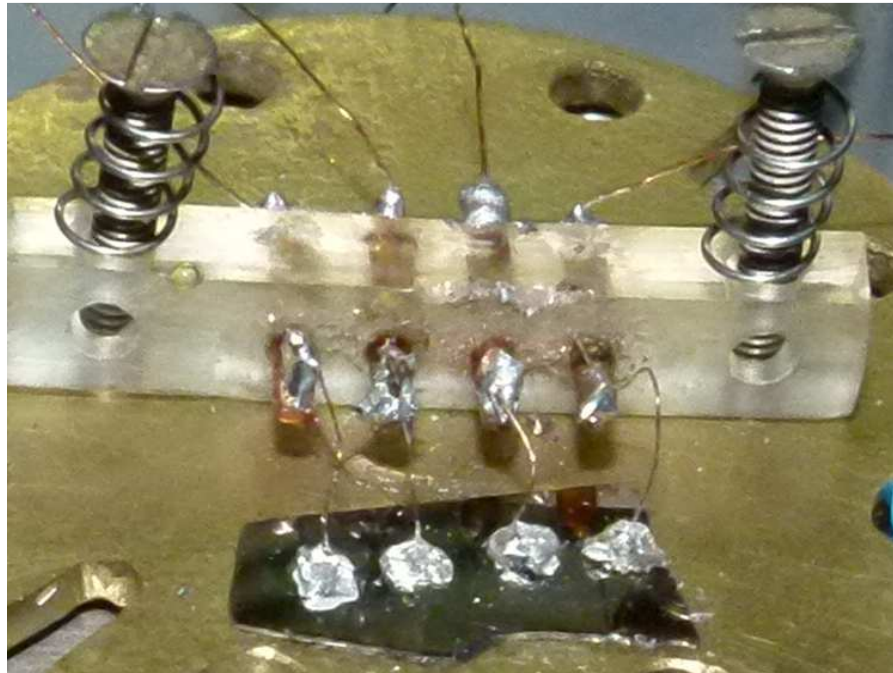
4- Para evitar interferências externas que causam flutuações nas medidas, deve-se usar cabos blindados para as conexões.

5- Para cada tipo de amostra existe um tipo mais fortemente recomendado de sonda. Em amostras de materiais semicondutores usa-se, por exemplo, tinta condutora a base de prata.





(a)



(b)

Figura - 4.2: (a) Foto de uma amostra preparada pela técnica de quatro pontas. (b) Zoom na amostra e sondas.

Como a aproximação de substratos semi-infinitos nem sempre é válida, muitas vezes é importante adicionarmos à equação de resistividade um fator de correção geométrico.

O esquema a seguir demonstra, como exemplo, os fatores de correção usados em alguns casos:

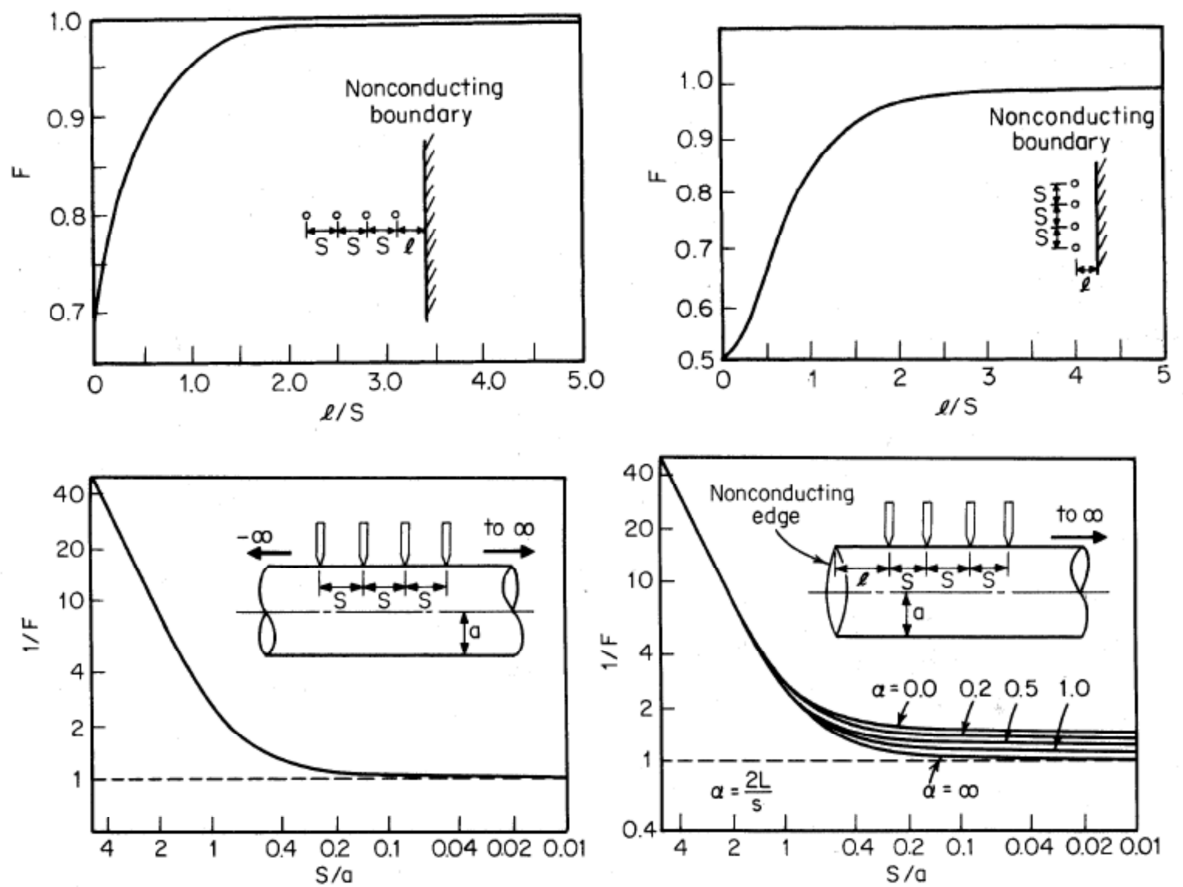


Figura - 4.3: Neste esquema podemos observar os fatores de correção empregados em medidas de quatro pontas com  $\rho_{\text{real}} = F\rho_{\text{medido}}$ , em superfícies planas e cilindros circulares. (Massazumi,2000)

Considerando um caso bastante prático, onde temos um filme de espessura  $t$  e resistividade  $\rho_1$ , colocado sobre uma camada de espessura infinita e resistividade  $\rho_2$ , podemos provar que

$$\rho_{\text{medido}} = \rho_1 \left( 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2nt/15)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + (2nt/15)^2}} \right] \right) \quad (12)$$

Onde

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (13)$$

Podemos analisar mais detidamente, casos em que a camada dois é constituída por um isolante ideal, ou um condutor ideal. Se, esta camada for constituída de um isolante, e que  $t/s$  é menor do que um, dizemos que a expressão para  $\rho_{\text{medido}}$  fica

$$\rho_1 \cong 0.73(t/s)\rho_{\text{medido}} \quad (14)$$

Analisando o caso em que a segunda camada é um condutor ideal, ou um material com resistividade baixa, a solução analítica pode apenas ser encontrada quando  $t/s$  é maior do que 0.5. Isto significa que, quanto menor é a espessura da camada que se quer medir, menor deve ser a distância entre as pontas.

No caso em que temos a necessidade de medir uma camada fina de dimensões reduzidas, é de extrema importância que adicionemos duas correções. Estas condições são independentes uma da outra e são dadas em termos de  $V/I$ .

De fato

$$\rho = F_1 \cdot F_2 \cdot \rho_{\text{medido}} \quad (15)$$

onde  $F_1$  é o fator de correção da proximidade da borda e  $F_2$  é a correção da espessura fina.

Para o caso de filmes finos, devemos avaliar o filme, não em relação a resistividade, mas sim em termos de resistência de folha, chamada de  $R_s$ , e definida como

$$R_s = \rho/t \quad (16)$$

Posto que a relação entre resistência e resistência de folha é dada por

$$R = \rho \cdot L/Wt = R_s \cdot L/W \quad (17)$$

onde  $L$  é o comprimento do elemento resistivo,  $W$  é a largura, e  $t$  a espessura.

Logo, a resistência de folha pode ser definida como sendo a resistência de um elemento resistivo que tenha certa unidade de comprimento e largura padrão. Da mesma forma que para a resistividade, a resistência de folha é

$$R_s = F^* (V/I) \quad (18)$$

onde  $F^*$  é o fator de correção geométrico para a resistência de folha. Se considerarmos medidas feitas pela técnica de quatro pontas dispostas linearmente, igualmente espaçadas, com a corrente sendo injetada nas pontas da extremidade e a queda de potencial medida nas pontas internas, temos que o fator de correção ( $F^*$ ) é dado por  $\pi/\ln 2$ .

Um ponto importante que deve ser observado também é em relação à instrumentação, onde a fonte de corrente e o medidor de tensão devem possuir aterramentos distintos.

O erro mais elementar que ocorre no uso desta técnica é quando não são efetuadas as correções geométricas necessárias.

Outros tipos de fontes de erro que ocorrem são correntes de fuga no substrato, espaçamento entre as pontas, luz, temperatura, efeito termoelétrico, injeção pelas pontas, correntes induzidas, corrente injetada e tensão aplicada.

Quando a amostra em questão é uma junção do tipo p-n, a corrente de fuga pode ocasionar um erro de medida. Esta corrente de fuga pode ser consideravelmente alta em casos de junção defeituosa, ou quando esta junção sofre despolarização. A despolarização da junção ocorre quando a resistência de folha torna-se maior do que  $1000\Omega/\text{quadrado}$  ou quando a corrente injetada é muito alta.

Se houver dúvida, a forma mais segura é efetuar medidas com alguns valores de corrente, e também na faixa em que a medida é independente da corrente aplicada.

No caso do espaçamento entre as pontas, esta distância afeta diretamente os cálculos da resistividade. Com isso, qualquer erro cometido na determinação da distância entre as pontas é convertido em erro de leitura. No caso de o espaço entre as pontas ser um pouco diferente do valor nominal de  $s$ , temos

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{4s} (3\Delta x_1 - 5\Delta x_2 + 5\Delta x_3 - 3\Delta x_4) \quad (19)$$

onde  $\Delta x_i$  é o deslocamento da posição da  $i$ -ésima ponta em relação à sua posição nominal.

A luz incidente em uma superfície pode adicionar uma tensão espúria, ou seja, uma corrente adulterada. Isto ocorre devido ao efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico é a criação de tensão elétrica ou uma corrente elétrica correspondente num material após sua exposição à luz. Embora este efeito esteja diretamente relacionado com o efeito fotoelétrico, trata-se de efeitos diferentes. No efeito fotoelétrico, os

elétrons são ejetados da superfície de um material após exposição à radiação com energia suficiente.

O efeito fotovoltaico é diferente, pois os elétrons gerados são transmitidos entre bandas diferentes, isto é, das bandas de valência para as bandas de condução, dentro do próprio material, resultando no desenvolvimento de tensão elétrica entre dois eletrodos.

Também existem erros gerados pela temperatura. Isto ocorre pelo fato de que a resistividade dos semicondutores costuma variar de forma considerável com a temperatura, ocorrendo um erro, que pode chegar a alguns por cento. Isto ocorre tanto pela falta de controle da temperatura ambiente quanto pelo aquecimento da amostra por efeito Joule que ocorre por causa da corrente injetada.

O caso de aquecimento por efeito Joule é mais comum em amostras pouco resistivas, onde uma corrente considerável é necessária para obter-se uma leitura confiável de tensão. Podemos usar como exemplo amostras com resistividade superior a  $10\Omega\cdot\text{cm}$ , onde uma mudança de aproximadamente  $5^\circ\text{C}$  de temperatura, acarreta em uma leitura de resistividade com 4% de erro.

Erros por efeitos termoelétricos acontecem quando ocorrem gradientes de temperatura, tanto pelo ambiente, como pelo fato de a corrente injetada ser excessivamente alta. Esta é a conversão direta de diferença de temperatura em voltagem elétrica e vice-versa. Na escala atômica, especialmente em portadores de carga, um gradiente de temperatura aplicada provoca portadores carregados no material, se existem elétrons ou vazios, que difundem o calor desde o lado quente até o lado frio. Similarmente ao que ocorre na expansão de um gás clássico quando é aquecido. Por conseguinte, há corrente induzida termicamente.

A determinação da resistividade pode ser prejudicada em amostras onde ocorre a modulação da condutividade devido às amostras com altos tempos de vida média dos portadores.

Já, quando trabalhamos com corrente contínua existe a possibilidade de correntes espúrias induzidas na amostra serem retificadas nos contatos das pontas. Uma maneira que evita o problema, é blindando o sistema.

É fortemente recomendado efetuar a medida em várias direções, isto garante que, se constatadas leituras divergentes, existe a necessidade de melhorar a blindagem ou eliminar fontes de correntes induzidas.

Também quando a corrente injetada nas pontas da amostra for excessivamente alta, ocorre uma modulação da condutividade da amostra.

E, se o campo elétrico torna-se muito mais alto, a mobilidade dos portadores se satura, resultando em uma resistividade maior do que a real.

#### 4.2 Método Van der Pauw

No método Van Der Pauw a resistividade do material ( $\rho$ ) é obtida através da equação de Van der Pauw (20). Assim, com a resistência de folha  $R_s$  da amostra, colocamos na equação (21), utiliza-se a espessura da amostra ( $t$ ) para calcular a resistividade do material ( $\rho$ ) com (21)

$$e^{-\pi(R_{\text{vertical}})/R_s} + e^{-\pi(R_{\text{horizontal}})/R_s} = 1 \quad (20)$$

$$R_s = \rho \cdot t \quad (21)$$

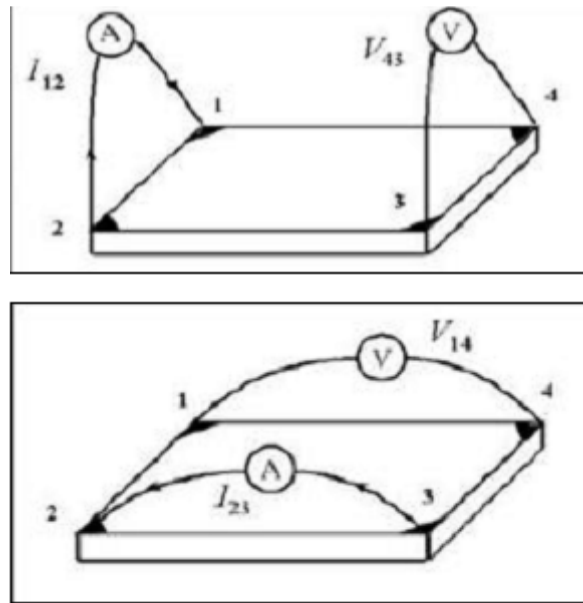


Figura - 4.4: Esquema de medidas Van der Pauw. (França, 2010)

Para obter as resistências  $R_{\text{vertical}}$  e  $R_{\text{horizontal}}$  utilizadas em (20) aplica-se a corrente elétrica  $I_{12}$  nos contatos 1-2 e mede-se a diferença de potencial (ddp)  $V_{34}$  nos contatos 3-4, de acordo com a figura acima, e assim com os demais contatos sucessivamente para aplicar na equação (22). Utilizando-se da equação (22) obtêm-se as resistências horizontal e vertical da amostra. Segundo o teorema da reciprocidade para  $\ln(1)=0$  na equação (20)  $R_{\text{vertical}}=R_{\text{horizontal}}=R$ , assim pode-se utilizar a equação (23) para o cálculo da resistência de folha  $R_s$ .

$$R_{\text{vertical}} = (R_{12,34} + R_{34,12})/2 ; R_{\text{horizontal}} = (R_{23,41} + R_{41,23})/2 \quad (22)$$

$$R_s = (\pi R) / \ln 2 \quad (23)$$

Pode-se utilizar o método Van der Pauw para obter a tensão Hall ( $V_H$ ) quando a amostra esta inserida em um campo magnético, somando diversas ddps de diferentes extremidades da amostra segundo a equação (24). Então pode-se calcular o número de portadores de carga  $n_s$ . Inserindo o fluxo de campo  $B$ ,  $n_s$  e  $R_s$  na equação (25), calcula-se a mobilidade  $\mu$  pela equação (26).

$$V_H = (V_{13} + V_{24} + V_{31} + V_{42}) / 8 \quad (24)$$

$$n_s = (IB) / qI_H V \quad (25)$$

$$\mu = 1 / q.n_s.R_s \quad (26)$$

Este procedimento é repetido, alternando-se a posição dos eletrodos em relação aos pontos de caracterização e a polaridade da corrente.

Sua grande utilização pode ser explicada pela capacidade de medir com precisão as propriedades de uma amostra de qualquer forma arbitrária, desde que a amostra seja bidimensional, ou seja, muito mais fina do que larga.

Há cinco condições que definem a possibilidade de utilização do método. São elas:

1. A amostra deve ter uma forma plana de espessura uniforme.
2. A amostra não deve conter nenhum “buraco” isolado.
3. A amostra deve ser homogênea e isotrópica.
4. Todos os quatro contatos devem ser feitos nas bordas da amostra.
5. A área de contato deve ser de pelo menos uma ordem de magnitude menor do que a área da amostra.

A fim de usar o método, a espessura da amostra deve ser muito menor do que a largura e o comprimento. Para que possamos reduzir o erro dos cálculos, a amostra deve ser preferencialmente simétrica.

Abaixo são mostrados alguns esquemas de possíveis colocações de contatos:

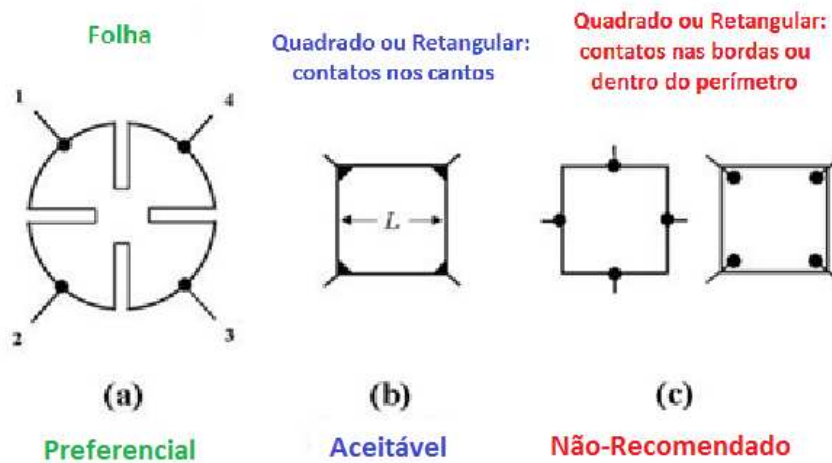


Figura 4.5 - Posicionamento dos contatos.

Existem algumas condições que devem ser obedecidas quanto à colocação dos contatos nas amostras:

- Os contatos devem ser ôhmicos.
- Os contatos devem ser tão pequenos possíveis, os erros provenientes do tamanho serão da ordem de  $D/L$ , onde  $D$  é o diâmetro do contato, e  $L$  a distância entre eles.
- Todas as ligações devem ser feitas do mesmo lote de fios e os quatro contatos devem ser do mesmo material. Isto para que possamos minimizar ao máximo o efeito termoelétrico.

Uma melhoria na precisão dos valores de resistência pode ser obtida mediante a repetição das medidas de resistência após a mudança de polaridade da fonte de corrente e do medidor de tensão. Isto ocorre, pois, uma vez que, a medida é feita na mesma porção da amostra, apenas com sentido oposto, os valores de  $R_{\text{vertical}}$  e  $R_{\text{horizontal}}$  ainda podem ser calculados como a média das medidas padrão e polaridade invertida. A vantagem de fazer isto é que as tensões “offset”, como aquelas devido a efeito termoelétrico ou efeito Seebeck, serão anuladas.

Combinando este método, com as medidas descritas anteriormente, chegamos à conclusão que

$$R_{\text{vertical}} = (R_{12,34} + R_{34,12} + R_{21,43} + R_{43,21}) / 4 \quad (27)$$

$$R_{\text{horizontal}} = (R_{23,41} + R_{41,23} + R_{32,14} + R_{14,32}) / 4 \quad (28)$$

A equação de Van der Pauw tem a mesma forma que tinha anteriormente.

Em relação à precisão do método, podemos concluir que se quaisquer uma das medidas de polaridade invertida não forem concordantes, em um grau suficientemente



aceitável de precisão, ou seja, dentro de 3% com a medida padrão correspondente, provavelmente existe uma fonte de erro.

Quando uma partícula carregada, tal como um elétron, é colocado sobre o efeito de um campo magnético, ele sofre uma força conhecida como força de Lorentz, que é proporcional ao campo. Esta força é mais forte quando a direção do movimento é perpendicular à direção do campo magnético. Neste caso, a força

$$F_L = qvB \quad (29)$$

onde  $q$  é a carga da partícula,  $v$  é a velocidade, e  $B$  é a força do campo magnético.

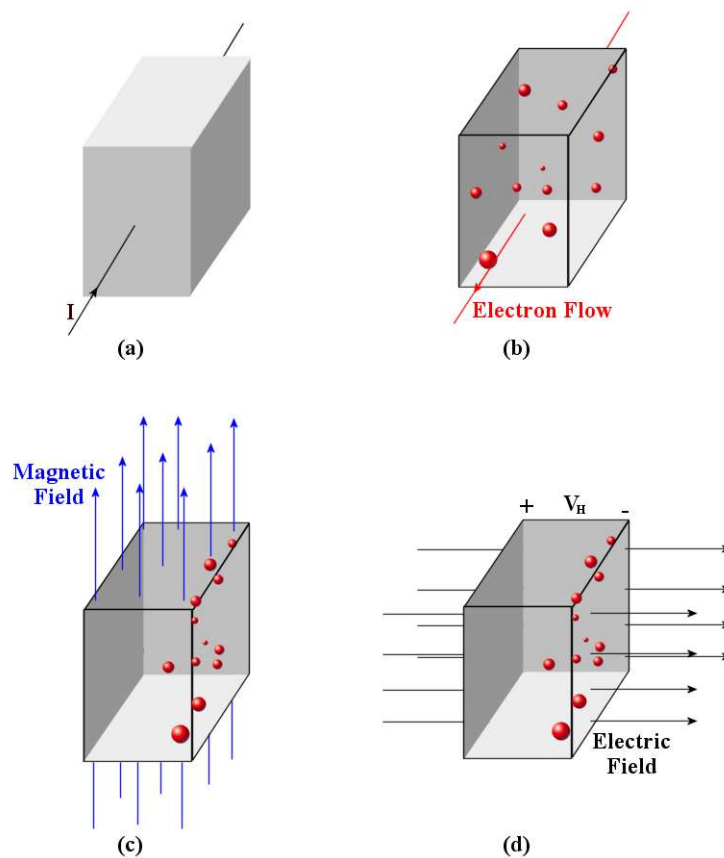


Figura 4.6 - Efeito Hall utilizado no método Van der Pauw. (a) uma corrente flui através de um material semicondutor. (b) os elétrons fluem devido a corrente. (c) os elétrons acumulam-se em uma borda devido ao campo magnético. (d) o campo elétrico resultante é dado em função da tensão de Hall ( $V_H$ ).

Quando uma corrente é aplicada em um pedaço de material semicondutor, isto resulta em um fluxo constante de elétrons no material. A velocidade do movimento dos elétrons é determinada através de

$$V = I / (nAq) \quad (30)$$

onde  $n$  é a densidade de elétrons,  $A$  é a área da seção transversal e  $q$  é a carga do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  coulombs).

Caso o campo magnético aplicado seja perpendicular ao sentido do fluxo de corrente, a força de Lorentz resultante fará com que os elétrons se acumulem em uma borda da amostra. Combinando as equações de (29) e (30), determina-se que a força de Lorentz é

$$F_L = (IB) / nA \quad (31)$$

Este acúmulo de elétrons por sua vez, dará origem a um campo elétrico através do material devido à distribuição desigual de carga. Finalmente, ocorrerá uma diferença de potencial (ddp) em toda a amostra, conhecida como tensão Hall. A força sobre os elétrons devido ao campo elétrico equilibra-se com a força de Lorentz. Assim deduzimos que a força do campo elétrico sobre um elétron é

$$\epsilon = (IB) / qnA \quad (32)$$

Assim, podemos calcular a magnitude da tensão Hall, como sendo simplesmente a força do campo elétrico multiplicado pela largura da amostra, o que nos leva a

$$V_H = \epsilon \cdot W \quad (33)$$

$$V_H = (WIB) / qnA \quad (34)$$

$$V_H = (IB) / qnd \quad (35)$$

onde  $d$  é a profundidade da amostra.

Desta forma a densidade da folha  $n_s$  é definida como a densidade de elétrons multiplicada pela profundidade do material, e assim, podemos definir a tensão Hall em termos da densidade do material

$$V_H = (IB)/qnd \quad (36)$$

## **5. Conclusão**

Medidas elétricas DC são extremamente importantes para o estudo de materiais. Quando o material sob estudo apresenta dimensões muito reduzidas, os valores de resistência elétrica tendem a ser altos e há limites para os valores de correntes que podem ser utilizados. Os procedimentos necessários para medidas de baixas correntes e voltagens são, pois, cruciais.

Neste trabalho de graduação foi realizada uma resenha dos aspectos mais importantes para a realização de medidas de níveis baixos de correntes e tensões. As características de equipamentos especiais, como eletrômetros, nanovoltímetros e nanoamperímetros foram estudadas e resumidas, e exemplificadas através de circuitos com amplificadores operacionais. Mesmo que os equipamentos mais adequados sejam usados para a realização das medidas, cuidados especiais devem ser tomados com relação às diferentes

fontes de ruído, como laços de terra, ruído Johnson, fugas em cabos das conexões e outras interferências.

Métodos de medidas úteis para medidas de filmes finos, como a técnica de quatro pontas e o métodos de Van der Pauw são explicados e exemplificados, mostrando que embora estas técnicas sejam ao mesmo tempo muito utilizadas e de manejo muito simples e prático, por outro lado, são necessários cuidados básicos que garantem que as medidas realizadas por estas técnicas estejam dentro de uma certa precisão desejável. Um deles muito importante é o fator de correção geométrico.

O conjunto de aspectos abordados demonstra que, mesmo que os níveis de sinal sejam baixos ou muitos baixos, medidas com precisão podem ser atingidas se as prescrições forem adotadas de maneira judiciosa.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**BRENNAN, ROGER; DICKEY, D., Selecon Labs Technical Note – Determination of Diffusion Characteristics using Two and Four- Point Probe Measurements, California.**

**COMER, D.; COMER, D., Fundamentos de Projetos de Circuitos Eletrônicos, Rio de Janeiro, LTC, 2005.**

**EECS 143, Microfabrication Technology Four-Point Probe Manual.**

**FRANÇA, MAURÍCIO PAZ; DEDAVID, DR. BERENICE ANINA, V Amostra de Pesquisa de Pós-Graduação – Projeto de Equipamentos de Efeito Hall de acordo com método Van der Pauw para caracterização elétrica de cristais GaSb, PUCRS, Porto Alegre.**

**GIROTTI, EMERSON M.; SANTOS, IVAN A., Medidas de Resistividade Elétrica em Sólidos: Como Efetuá-las Corretamente, São Carlos, 2001.**

HALLIDAY, **Fundamentos de Física - Eletromagnetismos**, 6ª edição, Rio de Janeiro, LTC, 2007.

KEITLEY INSTRUMENTS INC., **Application Note Series – Four-Probe Resistivity and Hall Voltage Measurements with the Model 4200-SCS**.

KEITLEY INSTRUMENTS INC., **Low Level Measurements Handbook - Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements**, 6<sup>th</sup> edition, Cleveland, Ohio, 2004.

KITTEL, C., **Introdução a Física do Estado Sólido**, New York, John Wiley and Sons, 1978.

LEWIS, WAYNE; BROWN, CHRIS; GEERTS, WILHELMUS J., **Laboratory on the Four-Point Probe Technique**, Texas, 2003.

MASSAZUMI, MAURICIO OKA, **Medida de Quatro Pontas**, 2000.

RUNYAN, W.R.; **Semiconductor Measurement and Instrumentation, Handbook-Texas Instruments Electronics Series**, 1975.

SMITS, F.M., **Measurements of Sheet Resistivity with the Four-Point Probe**, 1957.

TIPLER, PAUL A., **Física – Eletricidade e Magnetismo**, 5ª edição, Rio de Janeiro, LTC, 2006.

TSAI, JANG-ZERN; CAO, HONG; TUNGJITKUSOLMUN, SUPAN; WOO, EUNG JE; VORPERIAN, VICKEN R.; WEBSTER, JOHN G., **IEEE Transactions on Biomedical Engineering – Dependence of Apparent Resistance of Four-Electrode Probes on Insertation Depth**, 2000.

## Apêndice A - Especificações dos Instrumentos:

Um número de termos é frequentemente usado para definir as especificações do instrumento. Alguns deles, considerados mais importantes, são definidos abaixo.

**Sensibilidade:** A sensibilidade é a menor mudança de sinal que pode ser detectada.

**Resolução:** A resolução é a menor porção de sinal que pode ser observada.

**Repetibilidade:** Grau de concordância entre medições sucessivas realizadas nas mesmas condições.

**Reprodutibilidade:** Grau de concordância entre as medidas da mesma quantidade realizada com uma mudança fixa nas condições.

**Precisão Absoluta:** Grau de concordância entre o resultado de uma medida e de seu valor real.

A precisão é muitas vezes separada em termos de ganho e de “offset”.

**Precisão Relativa:** O ponto em que uma medida reflete com precisão a relação entre um valor desconhecido e um valor de referência.

**Erro:** É a diferença ou razão da medida que está longe de seu valor padrão.

**Erro Randômico:** A média de um grande número de medições influenciado pelo erro aleatório correspondente ao valor verdadeiro.

**Erro Sistemático:** A média de um grande número de medições influenciado pelo erro sistemático desviado do valor verdadeiro.

**Incerteza:** Uma estimativa do possível erro de uma medida, isto é, o desvio estimado possível de seu valor real. A incerteza é o oposto da precisão.

A precisão é a mais qualitativa especificação dentre os citados. Ela refere-se a liberdade de incerteza da medida. Frequentemente pode estar dentro do contexto de repetibilidade ou reprodutibilidade, mas não pode ser usada no lugar de precisão.

Porcentagem	PPM	Dígitos	Bits	Db	Porcentagem de 10V	$\tau=RC$
10 %	100000	1	3.3	-20	1 V	2.3
1%	10000	2	6.6	-40	100 mV	4.6
0.1%	1000	3	10	-60	10 mV	6.9
0.01%	100	4	13.3	-80	1mV	9.2

0.001%	10	5	16.6	-100	100 $\mu$ V	11.5
0.0001%	1	6	19.9	-120	10 $\mu$ V	13.8
0.00001%	0.1	7	23.3	-140	1 $\mu$ V	16.1
0.000001%	0.01	8	26.6	-160	100 nV	18.4
0.0000001%	0.001	9	29.9	-180	10 nV	20.7

Tabela\_1: Especificação dos Fatores de Conversão.

### 1. Precisão:

Uma das considerações mais importantes nas medidas é a precisão da leitura. Para qualquer configuração teste fornecida, um número de fatores pode afetar a precisão. O fator mais importante é a precisão do instrumento, que pode ser especificado de diversas maneiras, incluindo a porcentagem de escala inteira e a porcentagem de leitura, ou uma combinação destas. Outros fatores importantes, que não podem deixar de ser citados são: carga de entrada, fuga de resistência e corrente.

**Precisão das especificações analógicas:** A especificação das medições analógicas normalmente é dada como uma porcentagem da escala total. A principal consideração é que a precisão da leitura diminui à medida que a leitura torna-se uma porcentagem menor da escala.

**Precisão das especificações digitais:** A precisão do medidor digital é normalmente especificada como uma porcentagem da leitura, mais uma porcentagem do intervalo. Podemos notar que o percentual da leitura é mais significativo quando a leitura está perto da escala completa, enquanto a porcentagem de variação é mais significativa quando a leitura é uma pequena fração da escala completa.

### 2. Resolução:

A resolução de um instrumento digital é determinada pelo número de contagens que podem ser mostradas, e isto depende do número de dígitos. Um eletrometro digital deve ter

4,5 dígitos, que são 4 dígitos inteiros (valores que vão de 0 até 9), mais meio dígito, que são valores que variam de 0 até  $\pm 1$ . Este tipo de display pode mostrar portanto de 0 até 19999, o que nos leva a um total de 20000 contagens. A resolução é dada pela razão da menor contagem, ou seja, 1, pela contagens máxima, neste caso 20000, assim temos:  $1/20000 = 0.005\%$  para um display de 4 dígitos e meio. Quanto maior a resolução melhor será a precisão.

### 3. Sensibilidade:

A sensibilidade de uma medida é a menor mudança de sinal que pode ser detectada. Se, por exemplo, temos um instrumento cujo a sensibilidade de tensão é  $1\mu\text{V}$ , simplesmente significa que qualquer mudança de sinal menor do que  $1\mu\text{V}$  não pode ser detectada. A sensibilidade de um instrumento de medidas depende de sua resolução e do menor intervalo de medidas.

### 4. Estabilidade de Transferência:

Um caso especial de precisão relativa é a estabilidade de transferência, que define a precisão do instrumento em relação a um padrão de referência secundário ao longo de um período de tempo muito curto e estreita faixa de temperatura ambiente (tipicamente dentro de cinco minutos e  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Esta especificação é útil em situações onde as medidas de alta precisão devem estar em concordância com um padrão conhecido secundário.

Podemos calcular o erro seguindo o exemplo dos parâmetros abaixo:

Precisão:  $\pm(25\text{ppm de leitura} + 5\text{ppm de intervalo})$

Range: 2V

Sinal Interno: 1.5V

$$\begin{aligned}\text{Erro} &= 1.5(25 \times 10^{-6}) + 2(5 \times 10^{-6}) \\ &= (37.5 \times 10^{-6}) + (10 \times 10^{-6}) \\ &= 47.5 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

Isso significa que a leitura pode falhar em qualquer lugar entre  $1.5\text{V} \pm 47.5 \mu\text{V}$ , um erro de  $\pm 0.003\%$ .

Outro ajuste que dever ser feito com cuidado é o ajuste dos coeficientes de temperatura. A temperatura do ambiente onde serão efetuadas as medidas pode afetar a precisão. Por esta razão, as especificações dos instrumentos são baseadas em um ajuste de temperatura. Geralmente esta temperatura é setada entre  $18^\circ\text{C}$  e  $28^\circ\text{C}$ . Para temperaturas fora deste limite, é necessário calcular um novo ajuste padrão. Este valor é dado através de uma porcentagem de



leitura mais o número de contagens do último dígito significativo, para o caso dos instrumentos digitais. Se tomarmos como base o exemplo utilizado, temos que para um eletrômetro de 4,5 dígitos, temos uma resolução de 0,005%, e 1ppm como o número de contagens do último dígito significativo, assim, para o ajuste teremos:  $\pm(0,005\% + 1\text{ppm})/^{\circ}\text{C}$ . Este ajuste deve ser considerado para cada grau acima de 28 ou abaixo de 18, que são os valores limite.

## 5. Ruído:

O ruído deve ser considerado em qualquer medida eletrônica, mas em particular em medidas de baixa intensidade, e é por esta razão que este tópico deve ser bem entendido.

### 5.1 Relação de Rejeição em Modo Normal (NMRR):

É a capacidade de um que um instrumento tem de rejeitar a interferência em seus terminais de entrada. Normalmente expressa em decibéis em uma frequência específica, como a de linhas de energia AC. O ruído de modo normal é um erro de sinal que aparece no sinal de entrada.

O ruído de modo normal é detectado como um desvio no pico do ruído em um sinal DC. Ele é calculado pela expressão:

$$\text{NMRR} = 20 \log [(\text{pico do ruído de modo normal})/(\text{desvio na medida do pico})]$$

O ruído de modo normal pode afetar seriamente as medidas, a menos que sejam tomadas medidas para minimizar seus efeitos. Cuidados como a blindagem geralmente podem atenuar ruídos de modo normal e ainda, alguns instrumentos possuem filtro interno para reduzir mais ainda.

A relação de rejeição de modo normal é dada para as frequências específicas, ou faixas de frequência, de modo a rejeitar o ruído, apesar de não rejeitar baixas frequências ou sinais DC de modo normal.

### 5.2 Índice de Rejeição de Modo Comum (CMRR):

Especifica o quão bem um instrumento rejeita um sinal de ruído que aparece entre as a entrada baixa e a entrada alta e aterramento da carcaça. Geralmente é medido com um resistor de  $1k\Omega$  em desequilíbrio em um dos terminais de entrada.

Além disto, para ambos os casos é especificado entre 50 e 60Hz, onde as frequências nas interfaces são de grande interesse. Geralmente os valores de NMRR são superiores à 80dB e de CMRR superiores à 120dB. Onde a cada 20dB a rejeição do ruído reduz proporcionalmente o ruído de tensão ou corrente em um fator de 10.

#### 6. Velocidade:

A velocidade indica o número de medidas por segundo. Porém, certos fatores, como o período de integração, por exemplo, pode afetar esta velocidade. Mas como alterar este padrão pode acarretar em correr o risco de modificarmos outros parâmetros como a resolução e precisão. Por isso, devemos considerar qual parâmetro é mais significativo dependendo do tipo de medida.

#### **Apêndice B-Propriedades de vários materiais isolantes:**

PROPRIEDADES					
<b>Material</b>	<b>RESISTIVIDADE (Ohm-cm)</b>	<b>RESISTÊNCIA PARA ABSORVER ÁGUA</b>	<b>EFEITOS PIEZOELÉTRICOS MÍNIMOS</b>	<b>EFEITOS TRIBOELÉTRICOS MÍNIMOS</b>	<b>ABSORÇÃO DIELÉTRICA MÍNIMA</b>
SAFIRA	$> 10^{18}$	+	+	0	+
TEFLON	$> 10^{18}$	+	-	-	+
POLIETILENO	$10^{16}$	0	+	0	+
CERÂMICA	$10^{14}-10^{15}$	-	0	+	+
NYLON	$10^{13}-10^{14}$	-	0	-	-
EPOXY	$10^{13}$	-	0	-	-
PVC	$5 \times 10^{13}$	+	0	0	-

**LEGENDA:**

+ MATERIAL MUITO BOM EM PROTEGER A PROPRIEDADE

0 MATERIAL MODERADAMENTE BOM

- MATERIAL FRACO