

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

MÉTODOS EXPERIMENTAIS
USADOS NA DETERMINAÇÃO
DO COMPORTAMENTO
DE DIODOS DE TÚNEL,
FUNÇÃO DA TEMPERATURA
E DA FREQUÊNCIA.

Tese apresentada ao concurso para
provimento do cargo de Professor
Catedrático da Cadeira de Eletrônica
Fundamental da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
São Paulo — Brasil — 1967

Carlos Américo Morato de Andrade

Fevereiro — 1967

FT-101

DEDALUS - Acervo - EPBC



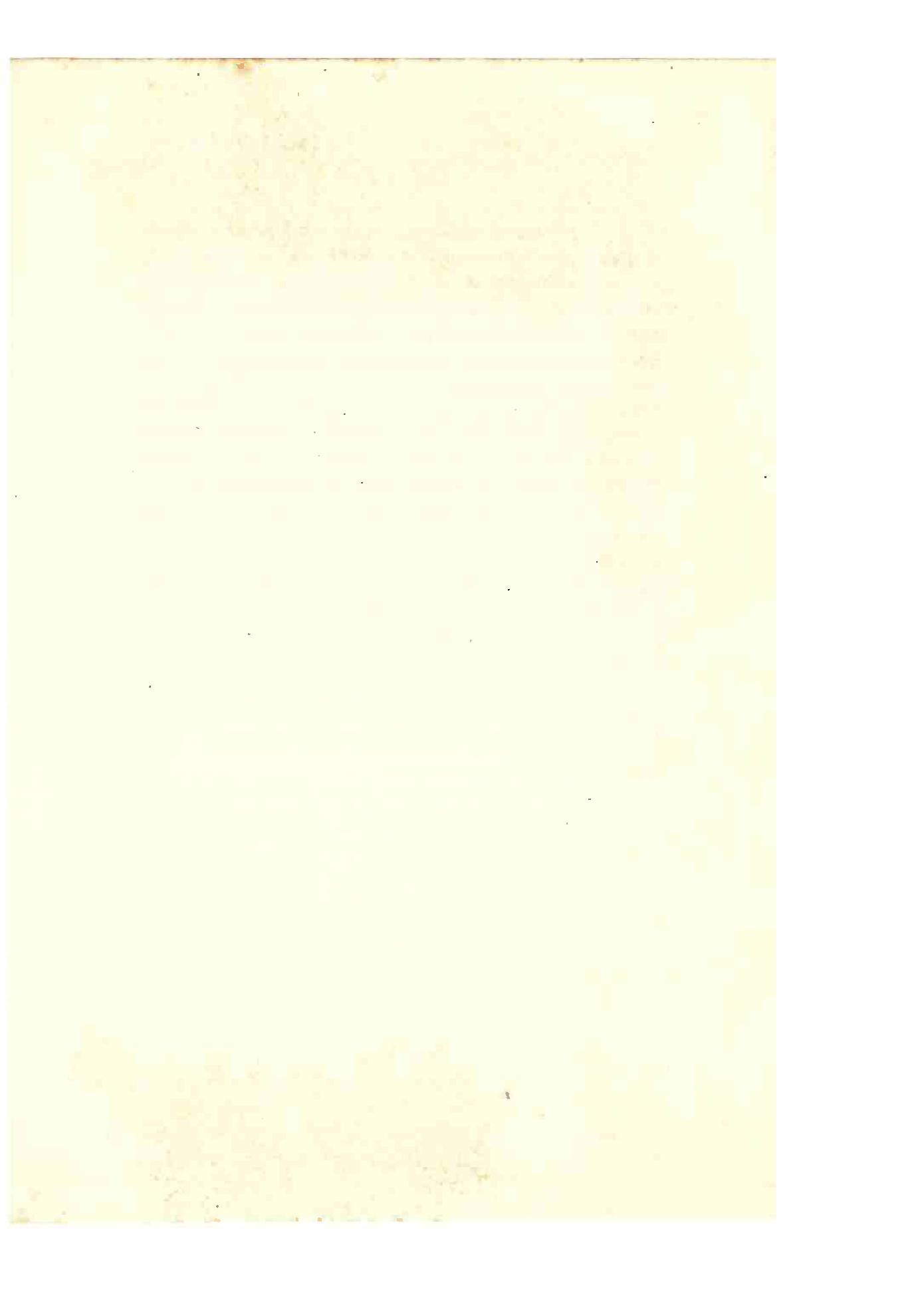
31200030717

**À MEMÓRIA DE
MEU PAI,
AMÉRICO**

卷之三

AGRADECIMENTO

O autor agradece, em primeiro lugar, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro que deu ao projeto ora finalizado. Parte do equipamento usado e do pessoal que auxiliou nas medidas foi conseguido através desta Instituição. Agradece, também ao Dr. Richard Louis Anderson pela gentileza de conseguir os dispositivos usados nas medidas; aos engenheiros Hélio Shigueto e Eduardo Bonilha Leite pelo auxílio no preparo do sistema de medida; aos alunos Paulo Sérgio Custódio e Francisco Miraglia Neto pela obtenção da fase final de dados; ao Sr. Angelo Piccini pela ajuda nas medidas feitas na temperatura do Hélio líquido, bem como pela construção do calorímetro usado nas mesmas; ao pessoal do setor de Estado Sólido da Universidade de São Paulo por nos ter cedido o equipamento necessário para as medidas em baixas temperaturas; ao Centro de Cálculo Numérico da Universidade de São Paulo que nos auxiliou na programação e computação dos resultados obtidos pela ponte de impedâncias; aos funcionários José Serrano e Joaquim Jorge Pereira pela confecção das resistências de disco; finalmente ao Serviço de Documentação da Universidade de São Paulo pela ajuda prestada na datilografia e impressão deste trabalho.



SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
2. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIDA	
2.1 Adaptador para os diodos de túnel	5
2.2 Câmara termostatada para medidas função da temperatura	9
2.3 Controle automático da temperatura	16
2.4 Descrição da ponte usada nas medidas	22
2.5 Resistências de disco	25
2.6 Obtenção da característica tensão-corrente por meio de um circuito em ponte	33
3. COMPONENTES DA CORRENTE DE DIODOS	41
4. COMPORTAMENTO DOS DIODOS DE TÚNEL COM A TEMPERATURA NA FAIXA DE 77° a 400° K.	
4.1 Considerações gerais	51
4.2 Capacidades que influem numa junção de materiais degenerados	53
4.3 Adaptação das teorias de Sah às medidas de capacidade função da temperatura.	55
4.4 Resultados experimentais obtidos	57
5. COMPORTAMENTO DOS DIODOS DE TÚNEL COM A FREQUÊNCIA	
5.1 Considerações gerais	69
5.2 Oscilações acima da freqüência de corte (resumo histórico)	69
5.3 Considerações teóricas sobre as oscila- ções de diodos de túnel	75
5.4 Resultados experimentais	82

5. O DIODO DE TÚNEL COMO OSCILADOR

6.1 Considerações gerais	93
6.2 O diodo de túnel como um oscilador discreto	94
6.3 Considerações sobre a estabilidade da frequência gerada em diodos de túnel	105
6.4 Variação da freqüência com a temperatura	110
7. RESUMO DAS CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	119
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

RESUMO

A finalidade primeira deste trabalho foi a de desenvolver técnicas de medida para dispositivos semi condutores. Procurou-se estabelecer um método e uma rotina para testes quando os parâmetros em questão fossem a polarização externa, a temperatura e a freqüência.

Os trabalhos função da temperatura realizaram-se na faixa de 77° a 400° K. A fim de conseguirmos as diversas temperaturas dentro deste intervalo, foi construída uma câmara especial termostatada que nos permitiu não apenas medir o valor da temperatura, como também controlá-la. Esta câmara foi projetada de tal modo a poder ser adaptada a linhas de transmissão coaxiais e, portanto, utilizada para as medidas de parâmetros em pontes de VHF e UHF.

A mesma câmara descrita acima foi usada para as medidas função da freqüência na faixa de 100 a 2.000 mega Hertz. Pudemos estabelecer leis de variação para três dos quatro parâmetros que constituem o circuito diferencial dos diodos de túnel. Foram estes os dispositivos que usamos nos diferentes testes, porém o sistema projetado e a rotina mostrada podem ser aplicados a outros dispositivos.

Quanto aos resultados obtidos pudemos concluir:

- a) a capacidade nas regiões de alta corrente obedece às leis deduzidas por Sah⁽¹³⁾ no seu comportamento função da temperatura.
- b) a resistência e a indutância séries dos diodos de túnel aumentam com a freqüência.
- c) a capacidade de junção diminui ligeiramente com a freqüência.
- d) é improvável a existência de freqüências autônomas superiores a freqüência de corte dos diodos de túnel.
- e) os osciladores a diodos de túnel têm seu comportamento função da temperatura muito variável, dependendo das condições externas de circuito. Em particular, quando polarizamos o diodo próximo de sua condição de máxima freqüência, torna-se bastante estável.
- f) existem situações especiais onde a estabilidade dos

referidos osciladores torna-se muito alta, comparável a de cristais inferiores. Dados para projeto dos osciladores são fornecidos com a finalidade de se obter grande estabilidade.

g) fica definitivamente provada a existência das duas componentes de corrente de excesso em diodos de Arseneto de Gálio. Correntes do tipo túnel foram localizadas em baixas temperaturas (próximas da do Hélio Líquido) em diodos comuns, de materiais não degenerados.

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

É nossa intenção, neste trabalho, procurar analisar uma série bastante grande de resultados experimentais obtidos de diodos de túnel de Germanio e Arseneto de Gálio. Procurando investigar pormenorizadamente o comportamento dos referidos diodos, obtivemos uma coleção de resultados interessantes e ainda não relatados, resultados estes que acreditamos poder conduzir à compreensão mais completa dos mecanismos estáticos e dinâmicos que regem os diodos de túnel.

Dentre os inumeráveis pontos a serem atacados, procuramos aqueles que fornecessem resultados práticos mais imediatos. Desta forma, acreditamos que muitas das conclusões aqui apresentadas, qualitativas ou quantitativas, serão de valor para os engenheiros projetistas de circuitos que pretendam utilizar os dispositivos em pauta.

Duas são as grandes aplicações dos diodos de túnel : como elementos de comutação ou como osciladores nas faixas de VHF e UHF. Em qualquer destas duas aplicações precisamos conhecer o comportamento da característica estática do dispositivo. Este estudo já foi bastante desenvolvido nos últimos sete anos por engenheiros e físicos estudiosos do problema. Nós mesmos tivemos oportunidade de dar nossa contribuição neste campo, principalmente no que se refere a diodos de Arseneto de Gálio (1), (2), (3) e (4). De todos estes trabalhos resultou não apenas uma facilidade maior para os engenheiros projetistas de circuitos como também possibilitou uma compreensão bastante completa dos fenômenos que dão origem às referidas características tensão-corrente. É desta forma que, hoje em dia, já se consegue construir dispositivos semi-condutores com propriedades previamente requeridas e obtidas de fato. Parte-se definitivamente através dos filmes finos e circuitos integrados, para a verdadeira síntese de circuitos. Esta síntese nos princípios fica limitada a faixas de variações de determinados parâmetros, como temperatura, freqüência ou tempo de comutação, pressão, luz, mas aos poucos vai tendo sua área de utilização prática aumentada a limites quase impossíveis de se imaginar.

Os diodos de túnel foram, desde sua descoberta em 1958⁽⁵⁾, dispositivos usados para grandes variações de freqüência e temperatura. O próprio comportamento destes diodos está a recomendá-los para trabalhos em amplas faixas de temperatura pois operam normalmente na temperatura do Hélio Líquido ($4,2^{\circ}\text{K}$) não perdendo nenhuma de suas propriedades mais importantes, o que já não acontece com a maioria dos diodos e transistores comerciais. É assim que detectores de baixíssimos nível de ruído são construídos utilizando-se na entrada dos mesmos diodos de túnel.

Ao contrário do que acontece com outros dispositivos os diodos de túnel são pouco sensíveis a flutuações de temperatura conduzindo portanto a circuitos de alta estabilidade. Teremos oportunidade de mostrar no capítulo 4 como variam os parâmetros mais importantes dos diodos de túnel com a temperatura. Ficará patente que, na faixa de 4°K a 400°K , dificilmente deixaremos de utilizar um diodo de túnel por causa de suas variações.

Por outro lado, também devido à sua própria constituição, as junções de diodos de túnel se prestam bastante a aplicações em altas freqüências, sendo comuns as aplicações na faixa de micro ondas e até mesmo em algumas poucas centenas de giga Hertz.

Para o aparecimento das correntes de túnel, que vão dar origem à região de resistência diferencial negativa, é necessário que se construam diodos cuja largura de junção é inferior a uma centena de Angstroms. Portanto, como natural consequência, era de se esperar uma capacidade de junção bastante grande, apesar de se tentar diminuir ao máximo a área efetiva das mesmas. É muito comum encontrarmos diodos que operam na faixa de micro ondas com capacidade de junção superior a 10 pico Farads. Este valor, em se tratando de freqüências tão altas, é muito elevado e é sempre um obstáculo sério a ser transposto. Já se tem notícia, no entanto, de diodos de túnel com capacidade de junção da ordem de $1/100$ de pico-Farad. Está claro que, nestas condições, as áreas efetivas e as densidades de correntes serão extremas. As técnicas modernas de obtenção dos dispositivos semi-condutores têm permitido tais avanços, de tal forma, que já existem trabalhos na faixa de 100 a 300 giga Hertz. Os diodos

utilizados nesta faixa tão elevada de freqüência ainda são experimentais.

O outro elemento que condiciona a máxima freqüência de utilização dos diodos de túnel é a sua indutância série. Este valor também deve ser minimizado e constroi-se hoje em dia diodos praticamente sem cápsulas, onde a junção é protegida por uma camada plástica especial. Elimina-se desta forma os inevitáveis fios de contacto com os terminais da base do diodo. Sempre existirá porém, a indutância deviда aos fios de contacto com os circuitos externos, como linhas de transmissão, cavidades, etc... Os valores usuais desta indutância são inferiores ao nano Henry.

Levando em conta esta linha de interesse de investigação científica e prática, procuramos realizar uma série de medidas de forma a conhecer o comportamento dos parâmetros do circuito diferencial dos diodos de túnel. Procuramos realizar este trabalho na faixa de 77 a 400°K e 100 a 2.000 MHz, respectivamente para a temperatura e freqüência. A faixa de temperatura está limitada pelo semi-condutor que forma a junção e a de freqüências pela instrumentação que hoje possuímos na medida de elementos concentrados como os são os diodos em questão. Os resultados obtidos nestes setores estão desenvolvidos nos capítulos 4 e 5.

Complementando o trabalho resumido nestes dois capítulos, no capítulo 6 apresentamos um estudo do comportamento da freqüência de oscilação dos diodos quando colocados em terminais especiais para linhas de transmissão. Novamente a temperatura é usada como parâmetro de variação e resultados foram obtidos de tal forma a podermos qualificar o comportamento dos dispositivos quanto às oscilações. Procuraremos em seguida relacionar as variações dos parâmetros dos circuitos diferenciais, obtidas anteriormente com o comportamento das freqüências de ressonância. Vários resultados serão analizados do ponto de vista qualitativo apenas, pois o objetivo deste trabalho experimental é fornecer elementos para projeto na utilização dos dispositivos em questão e portanto não procuraremos ligar por agora quantitativamente todos os resultados obtidos. Além deste fato, a grande quantidade de resultados experimentais vai nos exigir vários

trabalhos teóricos futuros onde procuraremos formular teorias que justifiquem os dados fornecidos.

Para finalizar, apresentaremos o capítulo 3 onde, desviando um pouco do roteiro que nos propuzemos para este trabalho, vamos apresentar resultados que obtivemos das características tensão-corrente de diodos de Arseneto de Gálio feitos de materiais não degenerados e que portanto não devem apresentar correntes do tipo túnel. A razão da apresentação destes resultados prende-se ao fato de podermos comprovar dois fatos que, do ponto de vista da compreensão teórica da junção, reputamos importantíssimo: primeiro, provaremos a existência de correntes do tipo túnel nos diodos comuns de Arseneto de Gálio, feitos de material não degenerado; o segundo é a comprovação definitiva da existência da segunda corrente de excesso, fato este por nós relatado no trabalho ⁽³⁾ de tese apresentado à Universidade de São Paulo e em ⁽⁴⁾. A importância do fato nos levou a reservar um capítulo especial à descrição dos resultados obtidos e à explicação das razões que nos levam a concluir pela existência definitiva da componente de corrente por nós denominada em ⁽³⁾ de "segunda corrente de excesso".

Tratando-se de trabalho eminentemente experimental reservamos o capítulo seguinte à descrição do equipamento e dos métodos de medidas utilizados. Na maioria das vezes estas medidas exigiram a construção do sistema de medida já que não pudemos usar os equipamentos convencionais.

CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIDA

2.1 Adaptador para os diodos de túnel.

Como se sabe, os diodos de túnel apresentam-se comercialmente em diversos tamanhos de cápsulas dos formatos A82, M83, A₂, de acordo com convenção internacional.

O primeiro problema que surge ao utilizarmos um destes diodos é seu encaixe num circuito quer de parâmetros concentrados quer de parâmetros distribuídos. Os soquetes normais de diodos não se prestam para tal fim por razões de estabilidade como mostraremos a seguir. Somos obrigados a construir soquetes especiais para adaptar cada modelo de diodo usado.

Tendo-se em vista também, que nossos diodos serão todos medidos em linhas coaxiais de 50 ohms, procuramos construir um soquete que se adaptasse a estas linhas como mostra a figura 1. Tivemos o cuidado de não produzir nenhuma descontinuidade na linha de transmissão a não ser no ponto onde o diodo é colocado. Este fica preso como que em continuação ao condutor central da linha. Imediatamente após o diodo, terminamos a linha com um curto feito de latão tendo as dimensões externas da linha. Este disco de latão possui um pequeno furo no centro onde se adapta um dos fios do diodo (o fio isolado da cápsula no formato A82).

Vários métodos foram empregados para a fixação do soquete e do disco de curto circuito. Os processos de contato por pressão tiveram de ser abandonados porque trabalhamos em ampla faixa de temperaturas e em baixos níveis de impedância; como era de se esperar, nesta condições, os maus contatos fizeram-se sentir de tal forma a invalidar as medidas. Optamos pelo sistema de roscas para encaixe. Apesar de mecanicamente mais difíceis de serem construídas, as peças rosqueadas não sofreram problemas quando das grandes variações de temperatura a que foram submetidas. Procuramos fazer as peças da câmara onde se instalaram os diodos de túnel numa sucessão de roscas direitas e esquerdas, de tal

forma a obtermos sempre um aperto maior das peças entre si quando da colocação sucessiva das diversas partes. Mais adiante teremos oportunidade de descrever as câmaras usadas para as medidas de temperatura variável.

Como os conectores com que trabalhamos são todos do tipo General Radio, procuramos montar a câmara onde se situa o diodo de túnel num terminal General Radio de 3 cm. normalmente usado como um curto circuito. Em lugar deste curto circuito vamos encontrar o diodo, que poderá vir acompanhado ou não de uma resistência de disco em paralelo com o mesmo.

Para maior precisão no ajuste das linhas de transmissão em medidas de alta freqüência (superior a um giga Hertz) construímos um disco de latão, usado para curto como descrito acima, com afastamento ajustável através de rôsca de passo bastante fino, de modo a poder precisar a posição correta do disco. Este curto circuito ajustável será usado para medirmos com precisão o comprimento elétrico da câmara onde alojamos o diodo. Em outras palavras, poderemos através dos parafusos de controle do comprimento das linhas da ponte General Radio 1607 determinar o plano de referência a partir do qual estaremos medindo a admitância nos terminais da linha.

Junto com este terminal, e feito para ser adaptado nele, desenvolvemos nas oficinas do Departamento de Engenharia de Eletricidade da Universidade de São Paulo uma série de resistências de disco, possuindo geometria idêntica ao disco de latão usado como curto circuito, acima descrito.

Fomos obrigados a enveredar por este aspecto realmente tecnológico de fabricação de resistências de disco, por não podermos encontrar no Brasil aquelas que necessitávamos para nossas medidas.

Os requisitos que previamente tínhamos eram por demais exigentes para que, em curto espaço de tempo, pudéssemos chegar a resultados satisfatórios. Precisávamos de resistências lineares, isto é, com seu valor inalterado quando submetido a polarizações crescentes até 2 a 3 Volts, dentro de 1% do valor sem polarização; precisávamos também que as resistências tivessem componente reativa

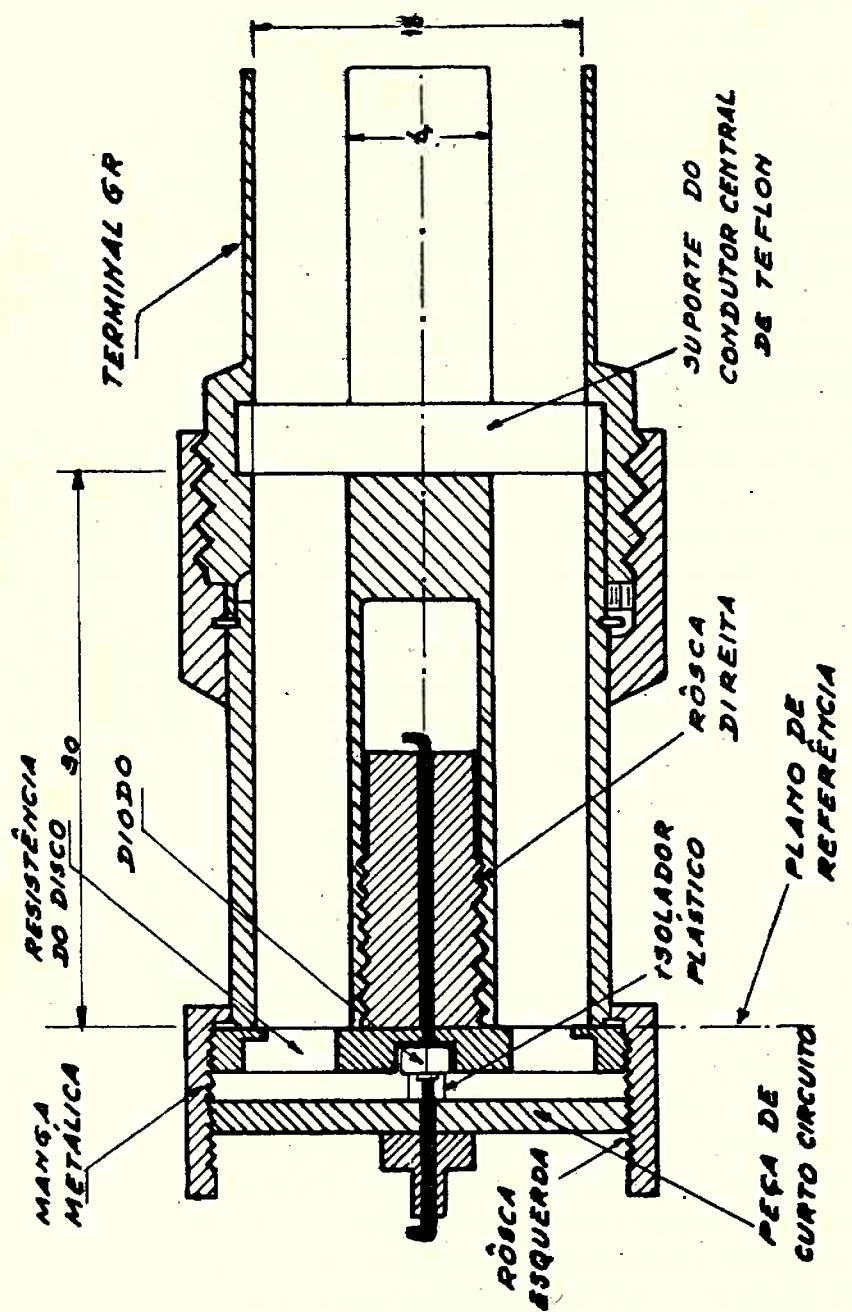
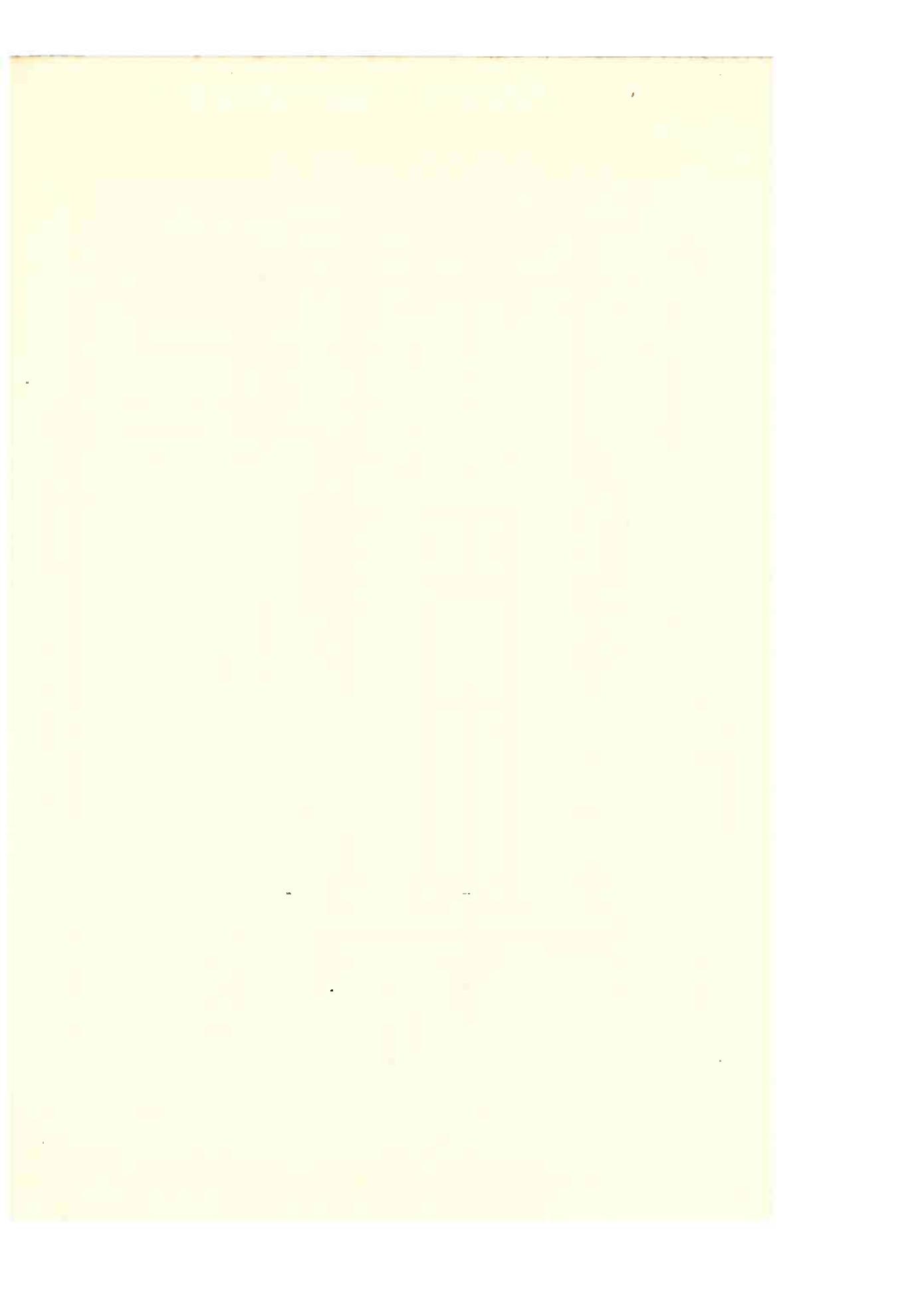


FIGURA 1 Esquema do adaptador para diodo de tunel feito num terminal
General Radic de 3 cm. (Dimensões em mm).



praticamente nula, certamente indutância série inferior a 1 na
no Henry ; as resistências deveriam ser bastante estáveis
com a temperatura na faixa de trabalho e principalmente deveri
am ser fícies, reproduzindo seu valor após os ciclos de tempe
ratura e tensão a que seriam submetidas.

Claro está que todos estes requisitos não puderam ser obtidos ao mesmo tempo. Os métodos empregados
na fabricação das resistências ainda são rudimentares, principalmente
no que concerne a obtenção da fina película condutora que constitue a parte mais importante das resistências de
disco.

Daremos mais adiante alguns pormenores da fab
bricação destas resistências na sua parte elétrica e mecânica.
Forneceremos dados também do comportamento das mesmas
com a temperatura e freqüência.

De um modo geral podemos dizer que as resist
tências construídas por nosso pessoal técnico foram satisfatórias, possibilitando a maior parte das medidas programadas.

Estas resistências foram geométricamente constru
ídas de tal forma a conter no seu centro o soquete adaptador
dos diodos de túnel, colocando em paralelo com os mesmos uma resistência praticamente sem parte reativa e possibilitando desta forma a estabilização dos diodos.

2.2 Câmara termostatada para medidas função da temperatura.

Um dos objetivos deste trabalho, e provavelmente uma das maiores novidades que ele apresenta pois quase nada ou mesmo nada existe a respeito na literatura, é o da medida do circuito diferencial dos diodos de túnel função da tempe
ratura. Destas medidas precisamos extrair o comportamento dos quatro parâmetros que constituem o circuito diferencial do diodo função da mesma temperatura.

Como não podemos usar as pontes normais para realizar esta tarefa, já que todas operam apenas em temperatura ambiente, fomos obrigados a idealizar uma câmara especial, adaptável ao término de uma linha de transmissão, onde

pudéssemos controlar a temperatura e medi-la.

Em ⁽³⁾ descrevemos uma câmara construída por nós e que foi utilizada para obtermos as características tensão-corrente dos diodos em qualquer temperatura. Lá, no entanto, bastava-nos ter as tensões e as correntes que atravessam o diodo por meio de fios que saíndo da câmara, devidamente isoladas do ponto de vista térmico, dirigiam-se aos instrumentos de medida. Agora porém, não podemos utilizar o mesmo processo, pois perderíamos a informação de níveis de impedâncias que queremos medir. Idealizamos uma câmara térmica e termostatada que adaptou-se perfeitamente ao terminal de medida descrito em 2.1. Desta forma, pudemos manter a continuidade da linha de transmissão, mesmo dentro da câmara, até o ponto em que se localiza o diodo. A figura 2 nos mostra o esquema da câmara em conjunto com o sistema de medida da temperatura.

Como podemos observar a câmara é totalmente envolta em uma superfície metálica de latão constituída pelo terminal General Radio, a manga metálica onde se rosqueia a resistência de disco e uma capa metálica que suporta o aquecedor fechando ao mesmo tempo o conjunto. Excepção feita à parte em contacto com a linha de transmissão, todo o resto da câmara é formado por uma superfície metálica boa condutora de calor e portanto uma equipotencial de temperatura. Isto nos garante uma temperatura constante dentro da câmara desde que não haja fontes internas de calor.

Se considerarmos a simetria radial que existe numa linha de transmissão e a referida equipotencial cilíndrica de temperatura, veremos que o único gradiente possível será na direção axial. Este gradiente vai existir porque as fontes de calor em jôgo são fisicamente limitadas na direção axial a pequenos trechos. A fonte fria será o Nitrogênio Líquido (77° K) que irá envolver a câmara em toda a sua altura. A fonte quente será o aquecedor mostrado na figura 2 e que é preso à capa metálica rosqueada externamente à manga sustentadora da peça de curto.

A fim de minimizarmos os efeitos deste gradiente de temperatura inevitável que aparece no eixo da linha de transmissão, colocamos o elemento de medida de temperatura,

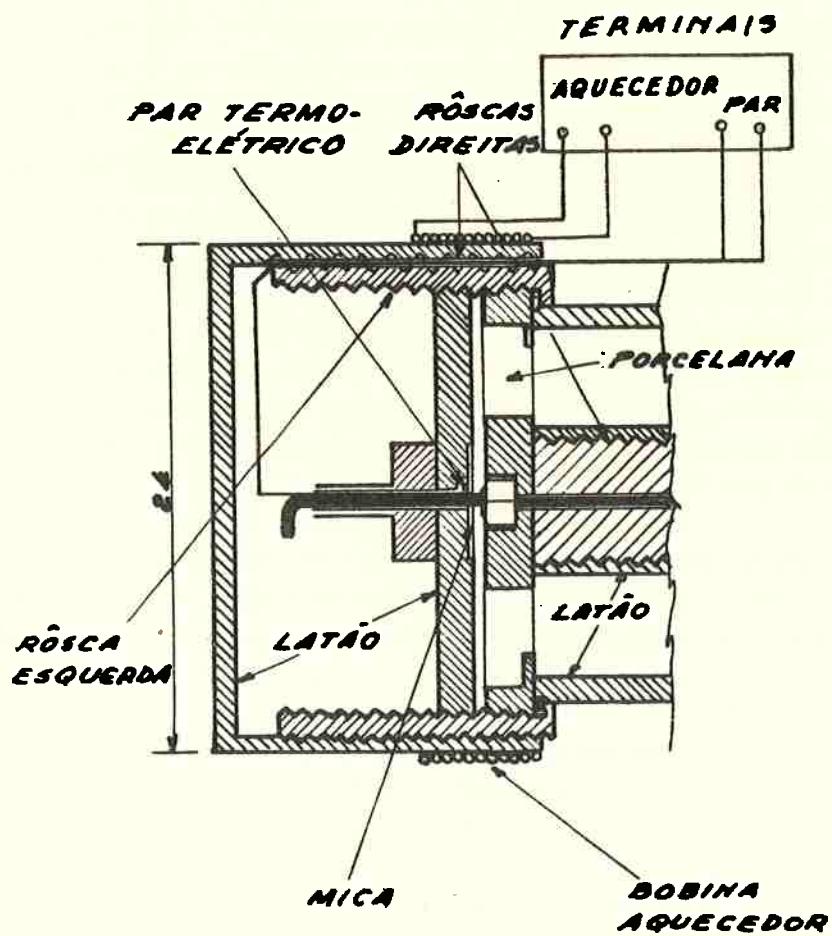
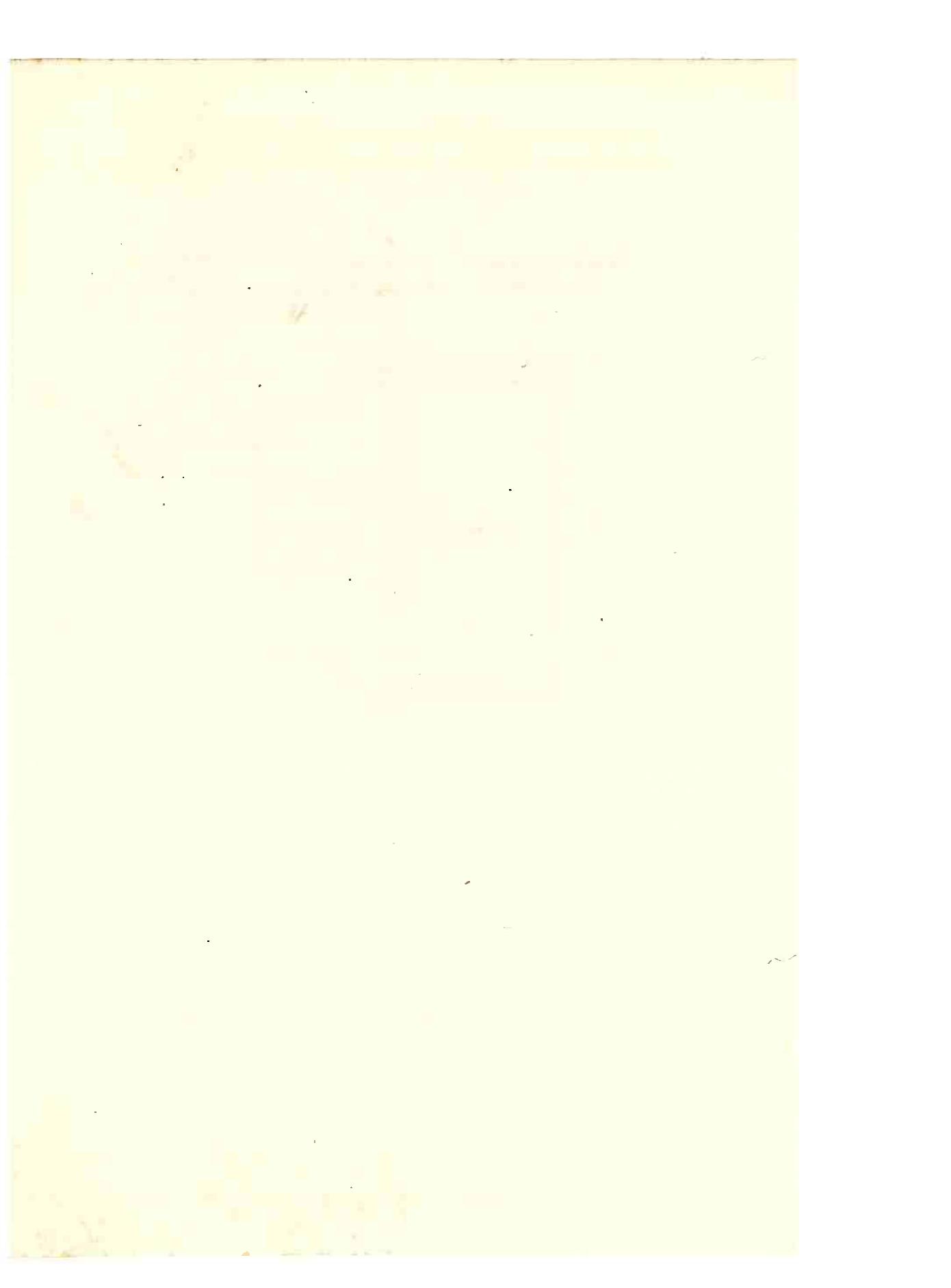


FIGURA 2 Esquema da camara termostatada.



uma junta de um par termo-elétrico de Cobre-Constantan, pràticamente junto do diodo a ser medido, separado do mesmo a penas por uma película isolante de mica. Esta película será necessária pois o contacto elétrico da junta com o diodo provoca, quando este é polarizado, pequenas tensões de fuga suficientes para alterar o valor da tensão termo-elétrica, já que poucos micro-volts são o bastante para isto. Além do mais, se não fosse a lámina de mica sempre haveria o perigo da capa do diodo tocar a peça de curto circuito, curtocircuitanto então o próprio diodo. A colocação do par termo-elétrico na posição indicada na figura 2 provou bastante bem na prática, mostrando que existe um verdadeiro curto circuito térmico entre o diodo e a junta do par, portanto, a mesma temperatura. O sistema de medida de temperatura tornou-se desta forma bastante sensível, detetando até pequenas variações na temperatura da junção ocasionadas pela passagem de corrente através da mesma. Em diodos de túnel as maiores potências elétricas transformadas em calor por efeito Joule não superam a 10 mwatts. Pudemos observar pequenas variações de temperatura devido a este efeito.

Uma vez instalada a junta do par termo elétrico dentro da câmara, a retirada dos fios foi feita através de duas pequenas canaletas rasgadas na manga metálica que suporta a peça de curto circuito. A partir deste ponto os fios de cobre e constantan se encontram na parte externa da câmara e são conduzidos ao sistema de medida que é bastante semelhante ao descrito em (3). Em resumo este sistema é constituído de um potenciômetro da firma Leeds & Northrop tipo K-3, que juntamente com um galvanômetro do tipo "spot" nos deteta a temperatura com precisão superior ao décimo de gráu centígrado. Nas nossas medidas nós nos restringimos à precisão de 1 gráu centígrado por duas razões: a mais importante é que, para o tipo de leis que estamos investigando, esta precisão é suficiente, e em segundo lugar porque para maiores precisões necessitavamos de elaborar em muito a câmara utilizada, a fim de garantir uma uniformidade de temperatura no seu interior da ordem da precisão requerida. Como não precisavamos de tanta acuidade resolvemos optar por uma câmara de latão em vez de usar Cobre eletrolítico, além de outros cuidados que certamente deveríamos ter se quiséssemos, por

exemplo, uma uniformidade de um décimo de grau centígrado. Ficamos portanto, com um sistema de medida bastante superior ao necessário.

Uma vez visto como se mediu a temperatura, passaremos agora ao problema do controle da mesma. Como dissemos acima a nossa fonte fria será normalmente o Nitrogênio Líquido, que além de nos fornecer uma temperatura bastante baixa (77°K), possui um alto calor de vaporização, pressionando-se portanto ótimamente como fonte fria, isto é, elemento receptor de calor num circuito térmico. Além do mais, o Nitrogênio Líquido é razoavelmente barato e é produzido em nossa Universidade pelo Instituto de Estado Sólido. A fonte quente será um aquecedor constituído de um fio de Níquel Cromo enrolado em torno da capa metálica que fecha a câmara. Esta bobina assim formada é isolada eletricamente da câmara através de folhas de mica, que, ao mesmo tempo, proporciona um bom contacto térmico com o conjunto a ser aquecido. procuramos reduzir ao máximo a massa da câmara para que esta tivesse uma capacidade térmica reduzida e, desta forma, facilitasse o controle da temperatura com baixos níveis de potência fornecida pelo aquecedor.

Fomos obrigados a construir mais de uma câmara, até chegarmos numa solução como a mostrada na figura 2, onde as paredes da capa de latão têm espessura da ordem da $1/2\text{ mm}$. As dimensões da capa metálica são ligeiramente superiores às do condutor externo da linha de transmissão.

Como já dissemos acima, a temperatura dentro da câmara, uma vez aplicadas as fontes quente e fria, manter-se-á bastante uniforme, a menos de um pequeno gradiente crescente de temperatura que se observa na direção axial da linha de transmissão. Haverá, portanto, um fluxo de calor por condutividade térmica na direção do eixo do sistema, fluxo este que deverá ser compensado por um outro na direção radial. Isto significa que não podemos chegar à condição ideal, onde não haveriam trocas de calor da câmara para o ambiente. O problema foi superado porém, com a colocação da junta do par termo elétrico bem próxima do diodo a ser testado. Este gradiente parece ser muito pequeno dentro da câmara, onde a massa metálica estabiliza a temperatura.

A fim de operar propriamente a fonte fria do sistema, o Nitrogênio líquido, devemos isolá-la térmicamente da câmara através de uma grande resistência como mostra a figura 3. Esta resistência térmica é constituída por um envô lucro metálico, cilíndrico, de uns 8cm de diâmetro, aproximadamente, que enchemos de lá de vidro. Desta forma, apresenta-se entre a fonte fria e a câmara uma resistência térmica elevada, capaz de permitir a elevação da temperatura da câmara, dependendo da temperatura do aquecedor. A figura 4 nos mostra um esquema do circuito térmico que aparece nestas medidas. A necessidade de R_B , ou seja, este envô lucro contendo lá de vidro torna-se evidente, pois do contrário teríamos um curto circuito térmico com o Nitrogênio Líquido e a temperatura da câmara seria sempre 77°K. Este fato foi verificado experimentalmente, bem como o da potência a ser fornecida pelo aquecedor função da mesma resistência R_B . Esta potência elétrica, ou seja, o fluxo de calor que atravessa R_A será tanto menor quanto maior o valor de R_B . Por outro lado, não podemos tornar R_B exageradamente grande, pois na hora em que quisermos esfriar a câmara na temperatura do Nitrogênio Líquido iremos observar grandes constantes de tempo no resfriamento e mesmo, se R_B for comparável a R_C , nunca poderemos ter tal temperatura. O circuito da figura 4 nos mostra isto claramente. Como estes valores de resistências térmicas não são bem definidos, foi necessário uma grande dose de experiências para conseguirmos chegar numa solução que se aproximasse da ideal. A fim de facilitar outros pesquisadores fornecemos na figura 2 as dimensões e os materiais empregados na confecção da câmara.

Como já dissemos acima, a resistência do aquecedor foi isolada da massa metálica através de folhas de mica. Ela é formada de 14 espiras de Niquel Cromo, fio nº 36, igualmente espaçadas, de tal forma a fornecer um comprimento da bobina de aproximadamente 1 cm. A resistência ôhmica deste aquecedor é da ordem de 100 ohms na temperatura ambiente. A corrente máxima que utilizamos no aquecimento não superou a 400 mA e o controle da potência transferida à câmara pode ser facilmente feito através de um Variac de 110 Volts.

Em resumo, pela variação da temperatura do aquecedor e por algum pequeno controle possível em R_B podemos determinar o valor da temperatura da câmara, T_C . Na prática, para grandes faixas de temperatura, deixamos fixo R_B e variamos apenas T_A . Quando a potência elétrica exigida for muito grande (corrente térmica ou fluxo de calor), aumentamos o valor de R_B . Desta forma podemos trabalhar com relativa facilidade na faixa de 77° a 400° K.

2.3 Controle automático da temperatura.

Vimos na secção anterior que podemos obter to da uma larga faixa de temperaturas através de controles destinados a fixar a temperatura desejada. Surge agora o problema da estabilização desta temperatura porque, do ponto de vista prático, as constantes de tempo são tão grandes que teríamos de esperar muitas horas para conseguir a obtenção de um ponto estável.

Apesar de procurarmos reduzir ao máximo as massas (capacidades térmicas), as resistências práticas são muito altas, e consequentemente as constantes de tempo constam-se por horas. Este é problema inerente a todas as medidas feitas com trocas de calor. Mesmo os criostatos mais modernos e sofisticados têm seus pontos de equilíbrio atingidos depois de algumas horas.

Não nos resta outra alternativa a não ser a de aquecer ou esfriar de modo mais rápido o sistema levando-o para a temperatura que se procura até que, pouco antes de atingir-se o valor desejado, inverte-se o processo para que o sistema fique oscilando em torno deste ponto. Desta forma, podemos em questão de poucos minutos, quando bem familiarizados com os controles, obter os pontos desejados. Muitas vezes, depois de bastante prática neste tipo de controle, conseguimos chegar a uma situação quase igual a de equilíbrio estático mostrada na figura 4. Isto significa que as potências usadas para conseguir-se esta oscilação de temperatura em torno de equilíbrio são quase iguais a da condição estática. Quando aplicamos potências muito grandes, por exemplo, a

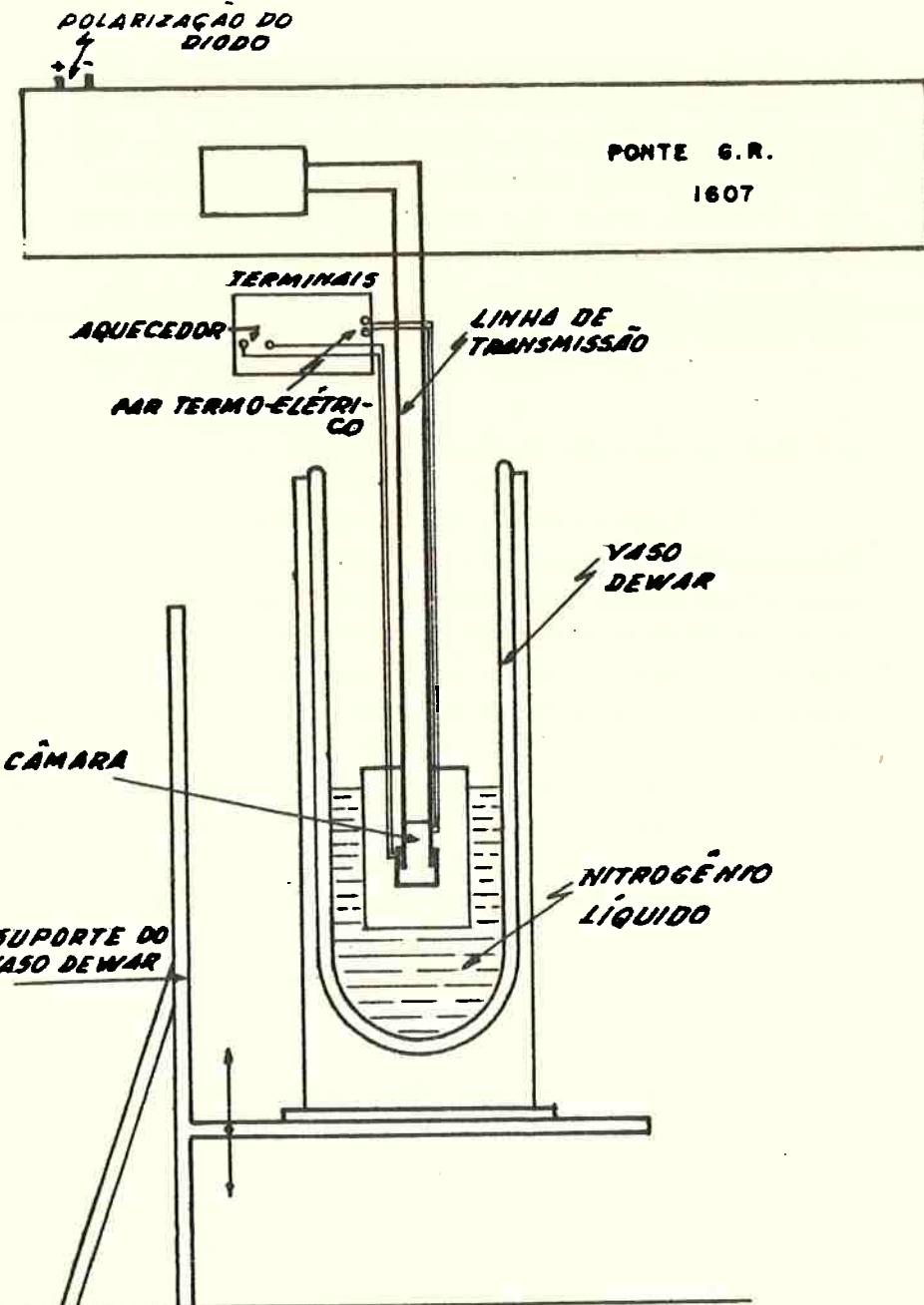


FIGURA 3 Esquema do sistema de medidas de pármetros na faixa de 77° a 400° K.
 A ponte General Rádio, as linhas de transmissão e a câmara encontram-se fixas. O vaso Dewar desloca-se verticalmente para ajuste do nível do Nitrogênio líquido.

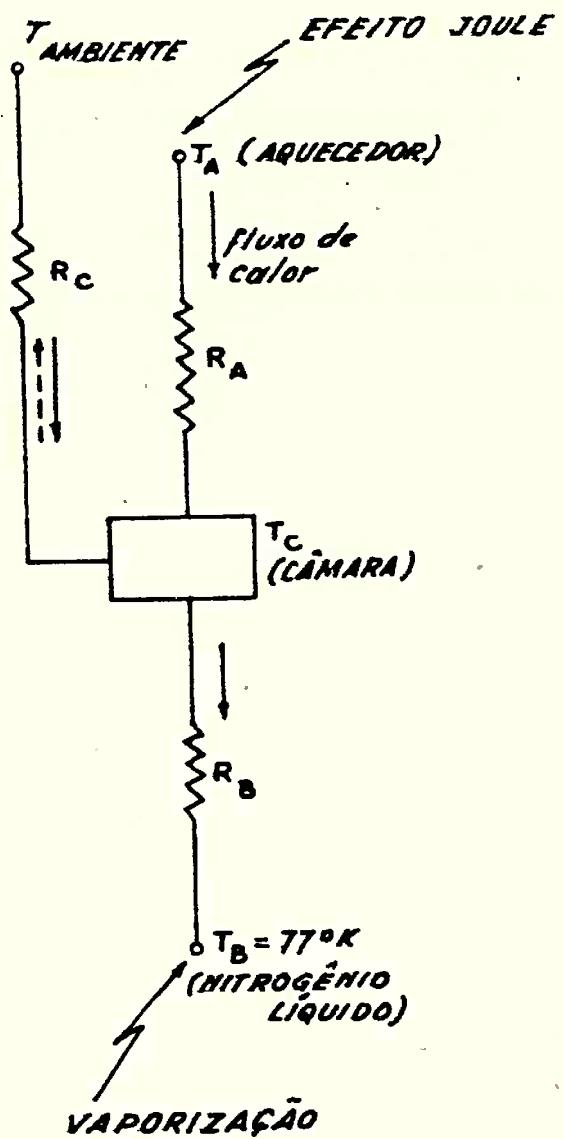


FIGURA 4 Circuito térmico para controle da temperatura da câmara.



temperatura sobe bastante acima da escolhida e a amplitude da oscilação torna-se muitas vezes superior à precisão necessária.

Este processo, que consiste em aplicarmos duas temperaturas, T_C' e T_C'' , em torno da temperatura T_C , foi utilizado com êxito. Está claro que as medidas só poderão ser feitas quando o intervalo de temperatura for inferior à precisão exigida.

O controle automático de temperatura usado é muito semelhante ao descrito em (3). Consiste em retirarmos uma informação que seja função da temperatura atual da câmara menos a mesma função na temperatura final desejada. Esta diferença é ampliada e levada ao circuito controlador do aquecimento da câmara. Na verdade trata-se de um circuito bastante realimentado, onde um erro final é ampliado e leva do a corrigir a resposta do mesmo.

A diferença entre o circuito apresentado em (3) e o atual que aparece na figura 5 consiste no tipo de informação que retiramos da câmara para o controle. Primeiramente usamos um termistor que nos fornecia uma resistência variando exponencialmente com a temperatura e agora estamos empregando o sinal do próprio par termo elétrico usado para a medida. Desta forma conseguimos simplificar o sistema no que diz respeito à confecção da câmara pois dispensamos o uso de um terceiro elemento dentro da mesma. Outra vantagem é a de evitar que o elemento controlador da temperatura lesse um valor ligeiramente diferente do par termoelétrico que é o elemento de medida. Quando isto se dá pode acontecer que o valor de equilíbrio não seja atingido, ou mesmo que a temperatura se desloque definitivamente para outro ponto.

A tensão fornecida pelo par termo elétrico é aplicada ao potenciômetro K-3 que medirá então através de um galvanômetro o valor desta tensão. Tratando-se de um par de Cobre Constantan, é só procurar numa tabela o correspondente valor da temperatura. O sinal de saída do potenciômetro, que deve se anular quando estivermos na temperatura ou tensão indicada, é aplicada a um amplificador DC de alto ganho (maior do que 100). O sinal ampliado é aplicado a um galvanômetro do tipo "spot" que possui numa das extremidades de sua escala 2 LDR em série. Sempre que a temperatura for

a desejada, o sinal na saída do potenciômetro se anulará e a luz do galvanômetro acima citado irá se localizar exatamente sob as LDR. A resistência das LDR diminuirá bastante sob a ação da luz, de tal forma a acionar um relé que se encontra em série com as mesmas. O relé irá então desligar o aquecedor da câmara. Desligado o aquecedor, a figura. 4 nos mostra que a temperatura da câmara só pode diminuir depois de algum tempo. Esta diminuição fará com que o par termoelétrico acuse uma diferença de tensão. Esta diferença fará com que surja na saída do potenciômetro K-3 um sinal que, ampliado, irá retirar a luz do galvanômetro de sob as LDR. Devido à busca variação da resistência das LDR o relé em série com as mesmas será desacionado e teremos novamente calor sendo introduzido na câmara pelo aquecedor. Isto irá acontecer até que o equilíbrio de novo se restabeleça. Dependendo da potência do aquecedor a temperatura poderá subir pouco ou muito do ponto previsto. Será necessário portanto, diminuirmos gradativamente a potência aplicada até que as oscilações de temperatura estejam dentro das precisões em jogo. Uma vez atingida esta situação, o sistema funcionará automaticamente.

2.4 Descrição da ponte usada nas medidas.

Grande parte de nosso trabalho consistiu na medida dos parâmetros do circuito diferencial dos diodos de túnel. Para realizar esta função, independentemente da grandeza que iremos variar, tensão aplicada, temperatura, ou frequência, utilizaremos a ponte 1607 da General Radio. Ela prestou-se admiravelmente bem ao trabalho que tínhamos em pauta, pois opera até 2 giga Hertz, possui um circuito especial de polarização do diodo e possibilita uma série de arranjos de suas linhas de transmissão que nos proporcionaram a oportunidade de realizar as medidas em altas e baixas temperaturas.

A figura 6 nos mostra um esquema das ligações desta ponte. Quando da medida na temperatura ambiente, colocamos o adaptador descrito em 2.1 diretamente nos terminais de saída da ponte.

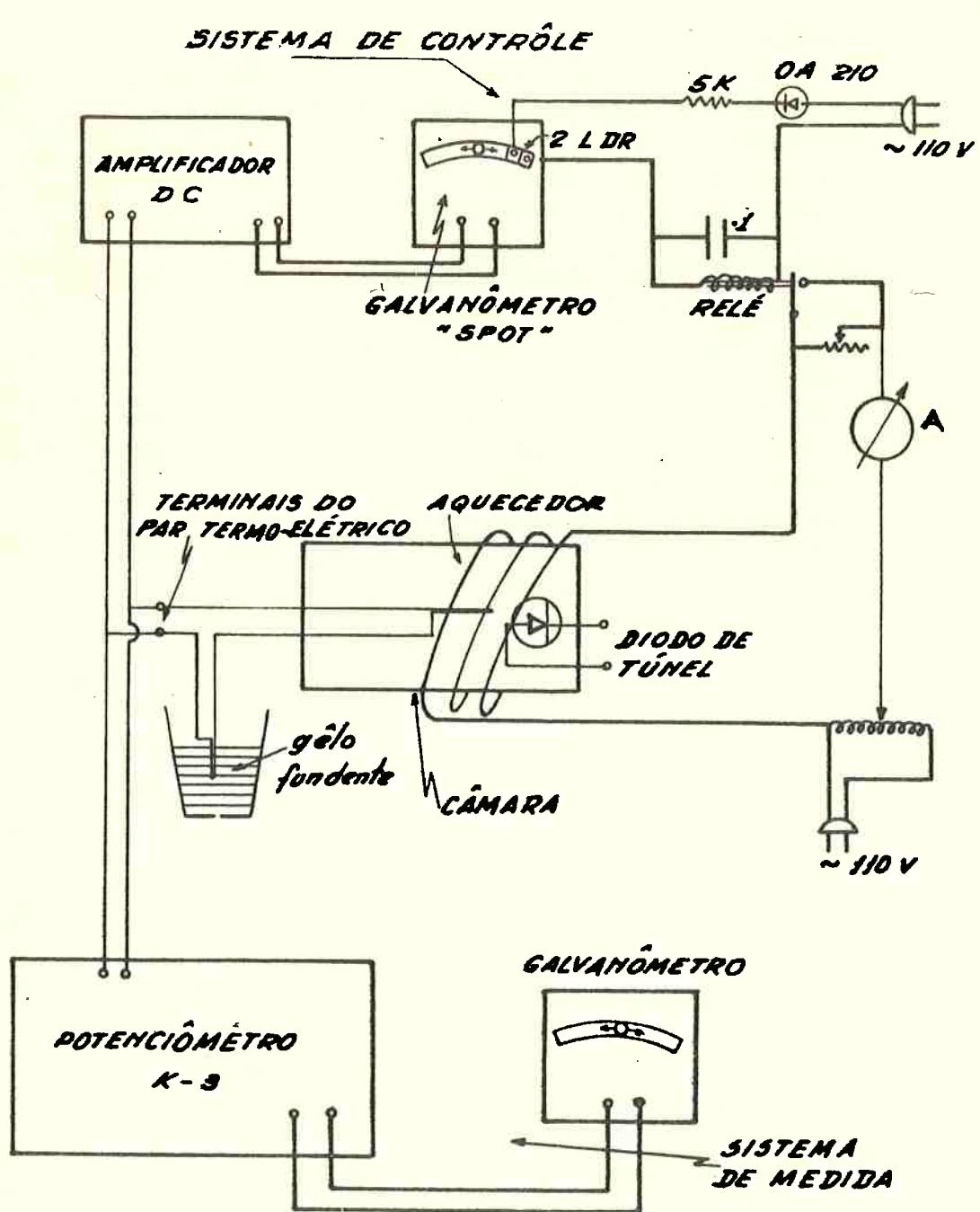


FIGURA 5 Esquema do circuito que controla e mede a temperatura.

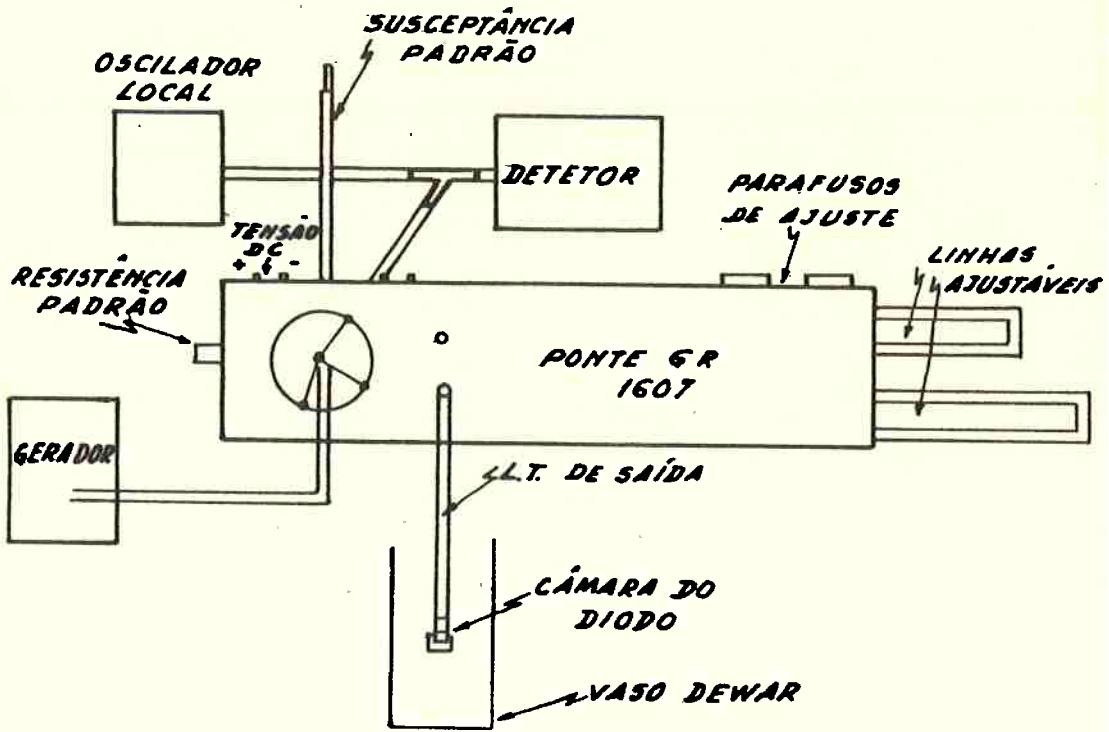
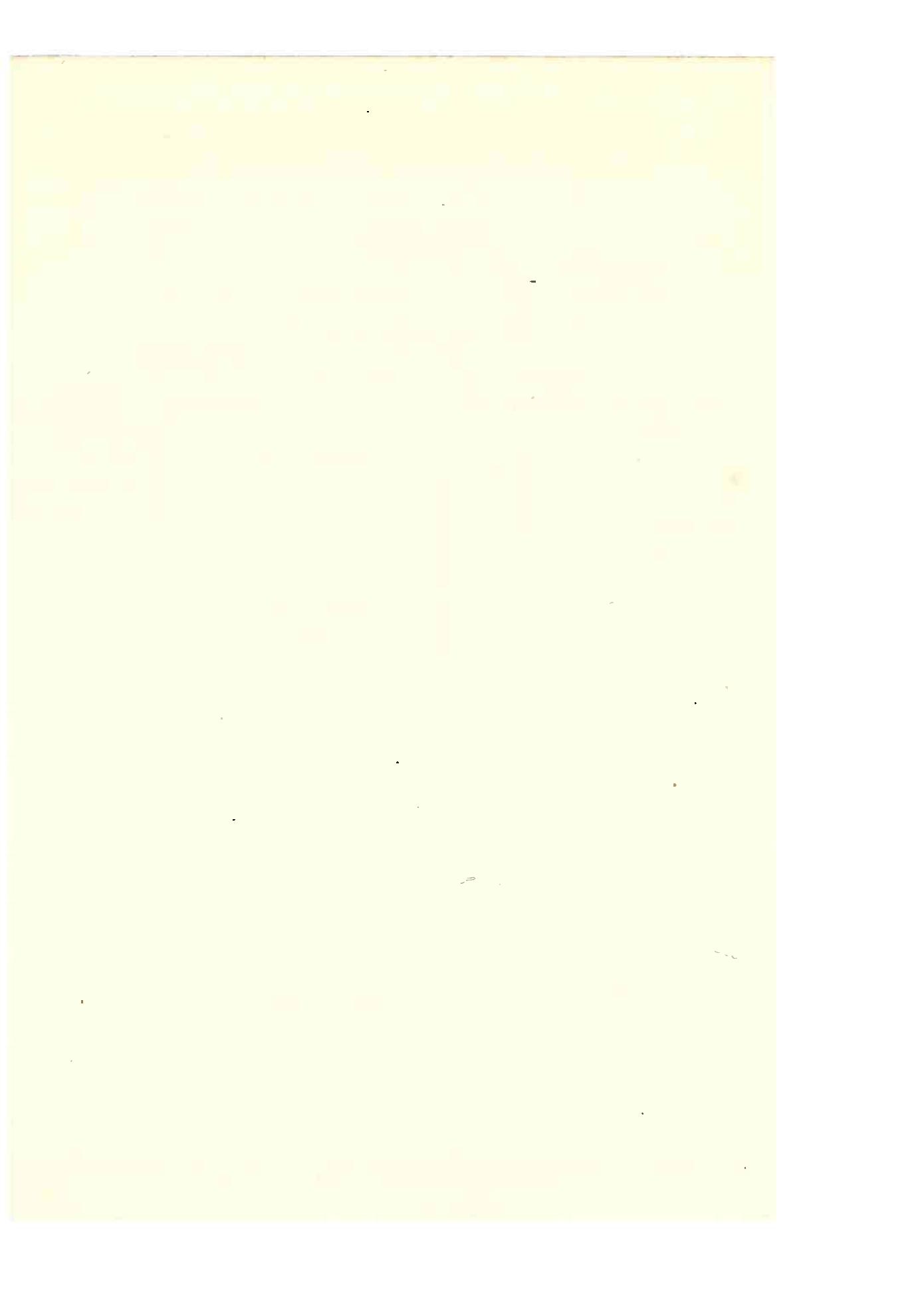


FIGURA 6 Esquema da ponte General Radio 1607.



A polarização do diodo é feita em bornes especiais para este fim. A tensão aplicada passa através de um filtro de alta freqüência e da linha de transmissão de saída da ponte, indo então polarizar o diodo colocado no seu terminal. A grande vantagem deste sistema de polarização é a de não afetar a medida dos parâmetros quando da variação do ponto de repouso, uma vez que a fonte de alimentação é colocada antes das caixas onde é feito o equilíbrio da ponte. Desta forma, qualquer variação da impedância da fonte de alimentação em nada afetará a medida do circuito diferencial no ponto previsto. Este problema foi particularmente sério para diodos de túnel há alguns anos, quando tínhamos de polarizar o diodo a través de um circuito em paralelo com o mesmo e externo à ponte. Isto fazia com que as medidas ficassem ligeiramente afetadas pelas variações das impedâncias internas do circuito de alimentação. Os diodos de túnel precisam ser alimentados por fontes de tensão e portanto serão postos em paralelo com fontes de impedâncias muito baixas. Estas impedâncias irão fatalmente afetar as medidas da ponte. Este problema porém, foi superado, e não tivemos maiores dificuldades em polarizar corretamente os diodos.

A medida da tensão de polarização nos trouxe algum problema, pois o filtro de alta freqüência em série com a alimentação do diodo possuía originalmente o valor de 0,25 ohms. Este valor adapta-se muito bem para polarizações de transistores comuns, onde a tensão normal é da ordem de alguns Volts. Neste caso poucos miliamperes atravessando 0,25 ohms nos dariam uma queda de poucos milivolts, totalmente desprezível em face da polarização do dispositivo. Acontece porém, que os diodos de túnel recebem muitas vezes polarizações de poucas dezenas de milivolts, fazendo com que a queda na resistência do filtro torne-se importante. Por outro lado, a medida direta da tensão de polarização no diodo, torna-se impraticável porque afeta a impedância a ser mediada a ser medida e prejudica o funcionamento da ponte que não mais equilibra. Nossa única solução foi a de melhorar o indutor série do filtro, substituindo o fio originalmente usado por outro de manganina que nos deu uma resistência inferior a 0,08 ohms e mesmo valor de indutância.

A ponte em pauta é uma ponte de admitâncias. Tem acoplada a si uma linha de transmissão de comprimento variável, de tal forma que podemos medir admitâncias ou impedâncias conforme tomemos comprimentos múltiplos de 1/2 ou 1/4 do comprimento de onda utilizado.

Nas medidas de baixas freqüências (inferiores a 200 mega Hertz) o valor do comprimento da linha até o diodo na câmara não é muito crítico, podendo aceitar variações de até 1 cm sem afetar demasiadamente as medidas. Quando nos aproximamos porém, da faixa do giga Hertz precisamos de terminar o comprimento da linha com grande precisão. Aí surge a vantagem da utilização de uma peça de curto circuito a justável como a descrita anteriormente. Pudemos realizar diversas medidas ajustando em cada uma a peça de curto para uma certa posição relativamente ao diodo e concluimos que a melhor posição para o plano de referência era mesmo aquela onde terminava os condutores cilíndricos que constituem o terminal mostrado na figura 1.

Para as medidas função da temperatura modificamos um pouco o arranjo aconcelhado pelos fabricantes para dispor a linha de transmissão. Com os próprios acessórios que acompanham a ponte podemos dirigir a extremidade da linha de transmissão para baixo, de forma que o adaptador do diodo pudesse facilmente ser colocado no interior de um vaso Dewar contendo Nitrogênio Líquido. Esta medida evidentemente deve ser feita numa freqüência constante e o comprimento da linha pode ser ajustado antecipadamente na temperatura ambiente. Substitui-se o terminal de 3 cm por um outro de curto circuito, também de 3 cm, e ajusta-se a linha para lemos um curto na ponte. Para obtermos maior precisão devemos seguir um roteiro cuja explicação se encontra nos manuais do instrumento. A nova disposição geométrica da linha em nada afeta o procedimento clássico. Colocamos então o terminal contendo previamente o diodo, o par termo elétrico e o aquecedor. O sistema está em condições de ser operado em qualquer temperatura. Basta para isto envolvermos a câmara com lá de vidro e, em seguida, mergulharmos o conjunto em Nitrogênio Líquido. A temperatura desejada será marcada no potenciômetro K-3 e o sistema se deslocará até

chegar nessa temperatura, quando o controle automático pas
sará a comandar. Pode-se em seguida proceder às medidas
num ou vários pontos de polarização.

A câmara construída em nossos laboratórios comportou-se mecanicamente bem quanto às grandes e bruscas variações de temperaturas. O contatos elétricos das di
versas partes com o diodo também se comportaram bem, quan
do usamos o arranjo definitivo mostrado na figura 2.

A fim de não termos problemas mecânicos com o disco de material plástico sustentador do terminal central da linha de transmissão junto ao adaptador do diodo, substi
tuimos o original por um geométricamente idêntico de teflon, material cujas propriedades elétricas e mecanicas muito bem se adaptaram ao caso. Não tivemos problemas quanto a este ponto também.

Durante as medidas em baixas temperaturas formou-se gelo em torno da linha de transmissão num espaço de 20 cm aproximadamente. Quanto ao interior da câmara a pe
ça de curto circuito vedou perfeitamente a linha e a parte in
terna da câmara onde se alojam o diodo e o par termo elétri
co. Não houve formação de gelo no interior da câmara e da li
nha.

Possui a ponte 1607 da General Radio uma sé
rie de acessórios cuja descrição se encontra nos seus manuais e que seria tedioso repetir aqui. Procuramos apenas expli
car o funcionamento das peças que construimos para adaptar na ponte ou que modificamos de alguma forma.

2.5 Resistências de disco.

Como já dissemos acima, fomos obrigados a en
veredar por este campo um pouco diverso da linha de pesqui
sas que realizamos, porque não encontramos no Brasil algo que as substituisse. As técnicas até agora empregadas ainda são rudimentares, mas os resultados obtidos já são animado
res.

Partimos de um disco de porcelana de dimensão ligeiramente menor do que o condutor externo da linha de

transmissão. Este disco já vem furado no seu centro de forma que nos facilitou o encaixe da peça metálica central. Esta peça central é um pequeno cilindro de uns 4mm de diâmetro no qual é feita uma rosca para prendê-lo no condutor central do terminal por nós construído que também leva uma rosca como é evidente. Nesta mesma peça torneamos, do lado oposto ao da rosca, uma cavidade de uns 2mm de diâmetro para o encaixe dos diodos.

A resistência propriamente dita é formada de uma película depositada num ou ambos os lados do disco de porcelana. Os materiais usados para esta deposição foram Manganina, grafite, e um mistura de grafite com prata. Uma vez formada a camada, esta é aquecida e protegida com uma camada de araldite, material que resiste admiravelmente às flutuações de temperatura.

Os maiores problemas na confecção destas resistências apareceram na solda da peça central e do aro de lato externo como mostra a figura 7. Estas peças devem estar presas formando ângulos retos com estreita margem de erro pois, do contrário, não se apoiarão por igual na borda do condutor externo da linha de transmissão. Isto acarretará uma componente indutiva para a resistência, suficientemente alta para não poder ser usada em circuitos estabilizadores de diodos de túnel. Todo o trabalho exigido para a obtenção de resistências de baixíssimo componente reativo estaria então perdido. Foi necessário a confecção de peças especiais para soldar as diferentes partes das resistências e ao mesmo tempo manter o perpendicularismo. Nossos técnicos já conseguiram resolver esta parte do problema pois as resistências que possuímos tocam o condutor externo da linha de transmissão por igual.

Dois problemas ainda existem para serem resolvidos: o primeiro é o do controle da parte reativa que até agora tem variado aleatoriamente, porém sempre pequena em relação a resistiva. Não nos referimos aqui à indutância que surge devido ao encosto de apenas um setor da periferia da resistência na linha pois, segundo já foi dito, este problema está quase superado. A própria película, que teóricamente não deve ter componente reativa, de fato a apresenta e de

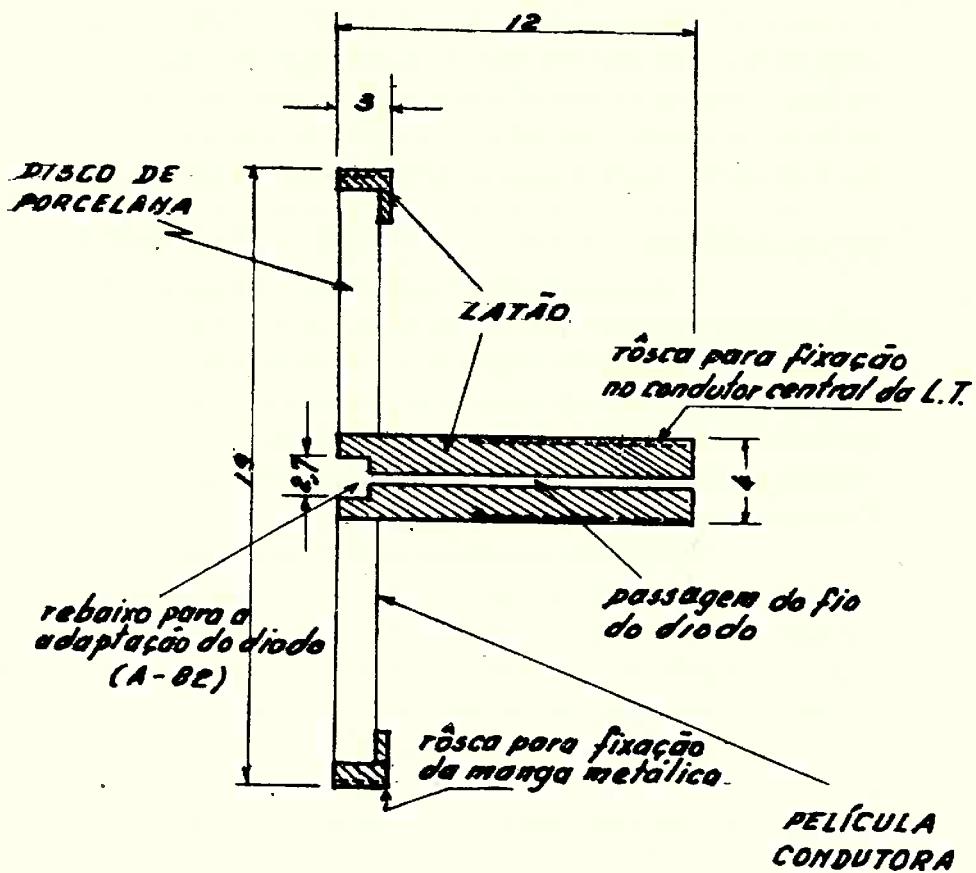


FIGURA 7 Esquema das resistências de disco usadas nas medidas.
O rebaixo central é feito de acordo com o formato da
cápsula do diodo. No caso, apresentamos o formato A-82

ambos os valores: capacitiva ou indutiva. O segundo problema é o da soldagem dos contatos metálicos com a película, pois, segundo experiências por nós conduzidas, ao aplicarmos ciclos de temperatura, de 77°K a 300°K , alguns contatos se abrem, alterando a estrutura da resistência e modificando seu valor ôhmico. Estamos tentando novos tipos de contatos e soldas para resolver este problema.

Ao medirmos o comportamento das resistências construídas função da freqüência, concluímos que podem ser usados para valores bastante altos, talvez vários giga Hertz. Estas resistências estão se aproximando do limite a que podemos chegar com elementos concentrados dentro destatécnica.

Estamos iniciando uma investigação sistemática destas resistências e esperamos poder em breve ter prontas outras de comportamento bem mais aperfeiçoado. Até agora apenas nos utilizamos das mesmas para satisfazer os requisitos de nossas medidas. Acreditamos porém, que o conhecimento que adquirimos pode ser canalizado para um estudo de aplicação mais geral do dispositivo.

Para finalizar podemos informar que foi possível obter resistências de alguns Kohms até 1 ohm. As de valores altos são mais fáceis de se conseguir e mais estáveis. Devido ao problema de contato que temos é natural que as resistências de baixo valor sejam pouco estáveis. Assim mesmo, pudemos trabalhar normalmente com várias resistências dentro de faixa de 5 a 1 ohm.

2.6 Obtenção da característica tensão-corrente por meio de um circuito em ponte.

A característica tensão-corrente dos dispositivos usados é o dado fundamental de que necessitamos para realizarmos as outras medidas. É através dela que sabemos em que parte da curva estamos operando e portanto que fenômenos estão em jogo. É raro o trabalho com diodos de túnel que prescinda desta medida.

Os métodos normais de obtenção de características tensão-corrente não podem ser usados para diodos de túnel quando necessitamos da região de resistência negativa.

Temos, neste caso, que utilizar outros processos, todos eles visando a estabilização do diodo nesta região.

Tratando-se os diodos de túnel de dispositivos que apresentam uma característica tensão-corrente do tipo N, precisam ser alimentados por uma fonte de tensão a fim obtermos toda a característica. A rigor basta-nos utilizar uma fonte cuja impedância interna DC seja inferior a mínima resistência negativa do diodo. Caso isto não aconteça o mesmo sofrerá saltos de posição, sendo-nos impossível traçar toda a região de resistência negativa.

A simples alimentação do diodo por meio de fonte de baixa impedância interna não resolve totalmente o problema pois este, apesar de ser polarizado na região em estudo, não nos fornecerá a corrente DC da característica estática porque fatalmente oscilará e oscilando, dentro de toda a faixa não linear da região de resistência negativa, produzirá uma componente contínua de corrente. Esta componente contínua irá mascarar a característica que estamos tentando obter.

Surge portanto um segundo problema a ser resolvido. A da estabilização AC do diodo, como é chamada na literatura especializada.

O estudo completo das condições de estabilização e oscilação dos diodos de túnel tem merecido a atenção de inúmeros pesquisadores nestes últimos anos. Os trabalhos que surgiram sobre o assunto contam-se às dezenas. O problema teórico ainda não foi totalmente resolvido, se bem que em (6) encontramos um tratamento bastante geral. Uma condição necessária para a estabilidade é enunciada e uma outra, suficiente, mas de menor amplitude é demonstrada. Não temos portanto, ainda, nem mesmo uma condição necessária e suficiente para a estabilização dos diodos de túnel.

Os trabalhos teóricos surgidos, normalmente baseiam-se em modelos lineares. Se considerarmos agora que os diodos na região em pauta são bastante não lineares, é fácil de se prever as dificuldades com que se deparam os que pretendem enfrentar o problema.

É a não linearidade a principal causa do não ajustamento das previsões teóricas com a experiência. Muitas vezes um diodo que teóricamente deveria estabilizar-se acionado por determinada fonte em determinado circuito, oscila na

prática e não raro deixamos de estabilizar o diodo quaisquer que sejam as condições externas impostas.

A referência ⁽⁷⁾ apresenta um método que tem provado bem na prática. Ele consiste em medirmos o diodo através de um sistema de resistências colocadas em ponte, como mostra a figura 8. A fim de usarmos este processo precisamos primeiro equilibrar a mesma, o que fazemos retirando o diodo do adaptador especial já descrito em 2.1. No adaptador fica apenas a resistência de disco, R_3 . O detetor que usamos será a entrada "y" de um traçador de curvas modelo 135A da Moseley Co. A entrada "x" foi reservada para a colocação dos fios de tensão em paralelo com o diodo. O equilíbrio da ponte é feito pela escolha conveniente dos valores de R_1 , R_2 e R_4 . Ao variarmos a tensão da fonte de alimentação devemos impor sinal nulo no eixo vertical do traçador, o que significa, a ponte equilibrada. As resistências R_1 , R_2 e R_4 são caixas de resistências padrão da General Radio 1432-T cuja precisão e estabilidade é muito alta: 0,01% do valor nominal. Desta forma podemos proceder a um levantamento de característica com grande precisão.

Uma vez equilibrada a ponte, introduzimos o diodo no adaptador. Pode-se demonstrar facilmente que, nestas condições, ao variarmos a tensão da fonte de alimentação, obteremos no traçador a característica tensão corrente do dispositivo. É claro que o eixo vertical nos dará um sinal de tensão proporcional à corrente no diodo. A referência ⁽⁷⁾ nos fornece os pormenores desta medida e as demonstrações teóricas necessárias. Mostra-se também em ⁽⁷⁾ que

$$V_{\text{detetor}} = I_{\text{diodo}} \times \frac{R_4}{1 + R_4/R_3}$$

Podemos portanto, até mesmo escolher a escala ou o multiplicador conveniente para a leitura.

Existem algumas restrições que devem ser obedecidas e cujas explicações encontram-se em ⁽⁷⁾. Em primeiro lugar o detetor deve apresentar uma impedância de saída bem maior do que as resistências que constituem a ponte. Esta exigência é relativamente fácil de se conseguir se trabalharmos com valores baixos nas caixas de resistências. Daí

surge a segunda restrição, alias consequência da primeira : existe uma limitação natural da corrente máxima a passar pelas resistências de precisão para não danificá-las. Como a tensão no diodo já está previamente fixada e a primeira restrição nos leva a utilizar valores baixos para as resistências padrão, devemos cuidar para que este abaixamento no nível de impedâncias não nos leve a valores exagerados de corrente.

Os valores típicos que usamos foram :

$$R_1 = 10 \text{ ohms}$$

$$R_2 = 100 \text{ ohms}$$

$$R_3 = (\text{resistência de disco}) \text{ de } 1 \text{ a } 20 \text{ ohms}$$

$$R_4 = 10R_3, \text{ para termos o equilíbrio da ponte.}$$

Nos diodos de Germanio, a tensão máxima é da ordem de 600 mV. Isto nos dá, para a mínima resistência de disco ($R_3 = 1 \text{ ohm}$), uma corrente de 600 mA nessa resistência. Esta corrente é suportada pelas resistências construídas em nosso Departamento, bem como pelas caixas de resistências padrão. A fonte de alimentação usada foi a de modelo LT - 2095 AM da firma Lambda, capaz de fornecer até 2 Amperes e 36 Volts de tensão.

Na mesma referência ⁽⁷⁾ encontramos a já clásica fórmula que nos dá a condição de estabilização dos diodos de túnel:

$$\frac{Lg}{C_d} < R + r_g < \frac{1}{g}, \quad (2-1)$$

onde L é a indutância série da malha onde se encontra o diodo
 g é o valor absoluto da maior condutância negativa do diodo
 C_d é a capacidade da junção
 $R + r_g$ é a resistência série total da malha.

A expressão acima só é verdadeira quando o circuito externo ao diodo pode ser simplificado a uma bateria e uma resistência. Em casos mais gerais somos obrigados a deduzir novas e mais complexas expressões que deixaremos de fazer aqui pois fugiria ao escopo do trabalho.

Mesmo este caso mais simples pode mostrar a necessidade de colocarmos o diodo num adaptador especial em paralelo a uma resistência de disco. Qualquer outra montagem iria acarretar uma indutância série da malha onde se

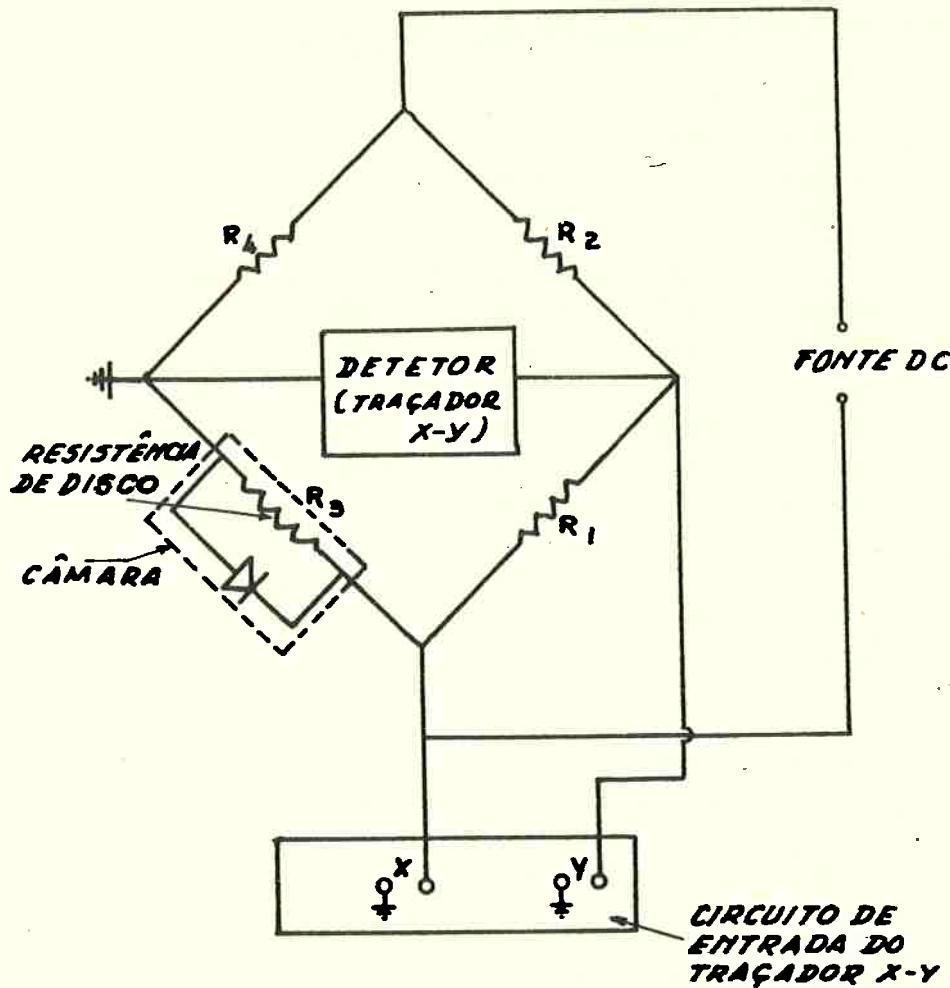


FIGURA 8 Esquema de obtenção da característica tensão-corrente de diodos de túnel na região de resistência negativa.

encontra o diodo muito alta e não satisfaria a primeira inequaçāo de 2-1. Na prática, valores de 10 nanoHenries já são suficientes para fazer o diodo oscilar. As resistências comuns, mesmo as chamadas não indutivas, certamente apresentam, ligadas em paralelo com um diodo, indutância série de vários nanoHenries o que, na maioria das vēzes, implica em oscilação.

No capítulo 6 iremos fornecer mais informações sobre as diversas situações e tipos de oscilações que podem ocorrer com os diodos de túnel. Por ora, estamos apenas descrevendo os métodos experimentais.

Uma vez de posse da característica completa do diodo, podemos escolher os pontos onde iremos medir determinadas propriedades. As características conseguidas pelo processo acima nos permitem interpretar inclusive o fenômeno que está ocorrendo no ponto em estudo.

3. COMPONENTES DA CORRENTE DE DIODOS

Este capítulo foi introduzido neste trabalho, afim de relatarmos uma descoberta que reputamos de grande valor científico. Quando da realização de trabalhos anteriores, tivemos a oportunidade de descobrir uma nova componente de corrente em diodos de túnel que chamamos de 2a. corrente de excesso^{(3), (4)}. Procuramos apresentar naquela ocasião alguns dados experimentais que comprovassem a existência desta componente. Em seguida, demos algumas idéias gerais das possíveis causas do fenômeno. A falta de maior número de medidas nos impediu de conclusões mais completas. Um pouco mais tarde, quando da publicação de⁽⁴⁾, concluímos que algumas hipóteses formuladas por Sommers em⁽⁸⁾ poderiam nos dar a solução do problema e fomos acompanhados em nossa hipótese pelos consultores da revista Solid State Electronics.

Mostramos também em⁽³⁾ como esta componente de corrente se comporta na faixa de 4 a 100° K.

Neste trabalho, aproveitando sugestões de especialista no assunto, procuramos levantar as características tensão-corrente de diodos comuns de Arseneto de Gálio. Este trabalho foi mais uma vez feito no sistema criogênico do Instituto de Estado Sólido da Universidade de São Paulo.

Foi necessário construir-se um novo calorímetro, especialmente projetado para estas medidas. Este calorímetro funcionou de modo análogo à câmara termostatada descrita em 2.2. Como fonte fria usamos o Hélio Líquido, ou seja, 4,2° K. Como fonte quente empregamos o Nitrogênio Líquido, ou seja, 77° K. O isolante térmico empregado foi o vácuo dentro do calorímetro (10^{-5} mmHg) no qual opcionalmente colocávamos vapor de Hélio com pressão controlável. Pudemos desta forma levantar as características de vários diodos de túnel e comuns de AsGa.

A fim de separarmos a queda de tensão devida à resistência série, empregamos o método descrito em⁽⁹⁾, que alias foi o mesmo que usamos em⁽³⁾. Uma vez separada esta queda de tensão, as curvas obtidas pelo traçador x-y 135A da Moseley foram transportadas para um papel semi-logarítmico. Dois exemplos dos resultados obtidos estão apresentados nas

figuras 9 e 10. Por aí vemos um fato novo e talvez inesperado: as duas componentes de corrente, a de excesso e a 2a. corrente de excesso estão presentes em todas as medidas realizadas. Infelizmente não possuímos dados sobre outros materiais, mas para Arseneto de Gálio parece certo que estas duas componentes de corrente aparecem mesmo quando os materiais não são degenerados. Isto implica em dizer que estas componentes independem, ou pelo menos, não estão necessariamente ligadas a problemas de penetrações das bandas de condução ou caudas que podem surgir na banda proibida. Podemos, portanto, afirmar que correntes do tipo "túnel" existem mesmo em diodos comuns de AsGa, em baixas temperaturas e compostas de duas componentes.

A fim de se ter uma melhor idéia do que pode vir a ser explicado desta experiência, é só pensarmos que todas as explicações até agora dadas baseiam-se em trajetórias que os elétrons realizam, deslocando-se da banda de condução para a de valência. Isto implica na existência a priori de elétrons na banda de condução, o que é verdade somente para o caso de materiais degenerados. Acontece, no entanto, que o Arseneto de Gálio não degenerado também exibe as referidas componentes de corrente e a antiga explicação precisa ser alterada. Devemos admitir agora que os elétrons saiam dos próprios níveis de energia em que se encontram nos átomos doadores e então realizem os diversos percursos já comentados em ⁽¹⁰⁾ (ver figura 11).

Quanto à segunda corrente de excesso, as explicações baseadas nas caudas das duas bandas condutoras não mais se aplicam, pelo menos da forma como foi apresentada em (3) e (4).

Os resultados experimentais são bastante claros quanto à existência das duas componentes de corrente. As inclinações obtidas são bastante diversas com valores médios em torno de 9 Volts⁻¹ para a corrente de excesso e 25 Volts⁻¹ para a segunda corrente de excesso. Os próprios valores destas inclinações nos levam a concluir que estas componentes sejam as de excesso pois nos trabalhos anteriores obtivemos para diodos de túnel números bem próximos a estes.

Além deste fato, o comportamento com a temperatura nos demonstra que as duas componentes de corrente

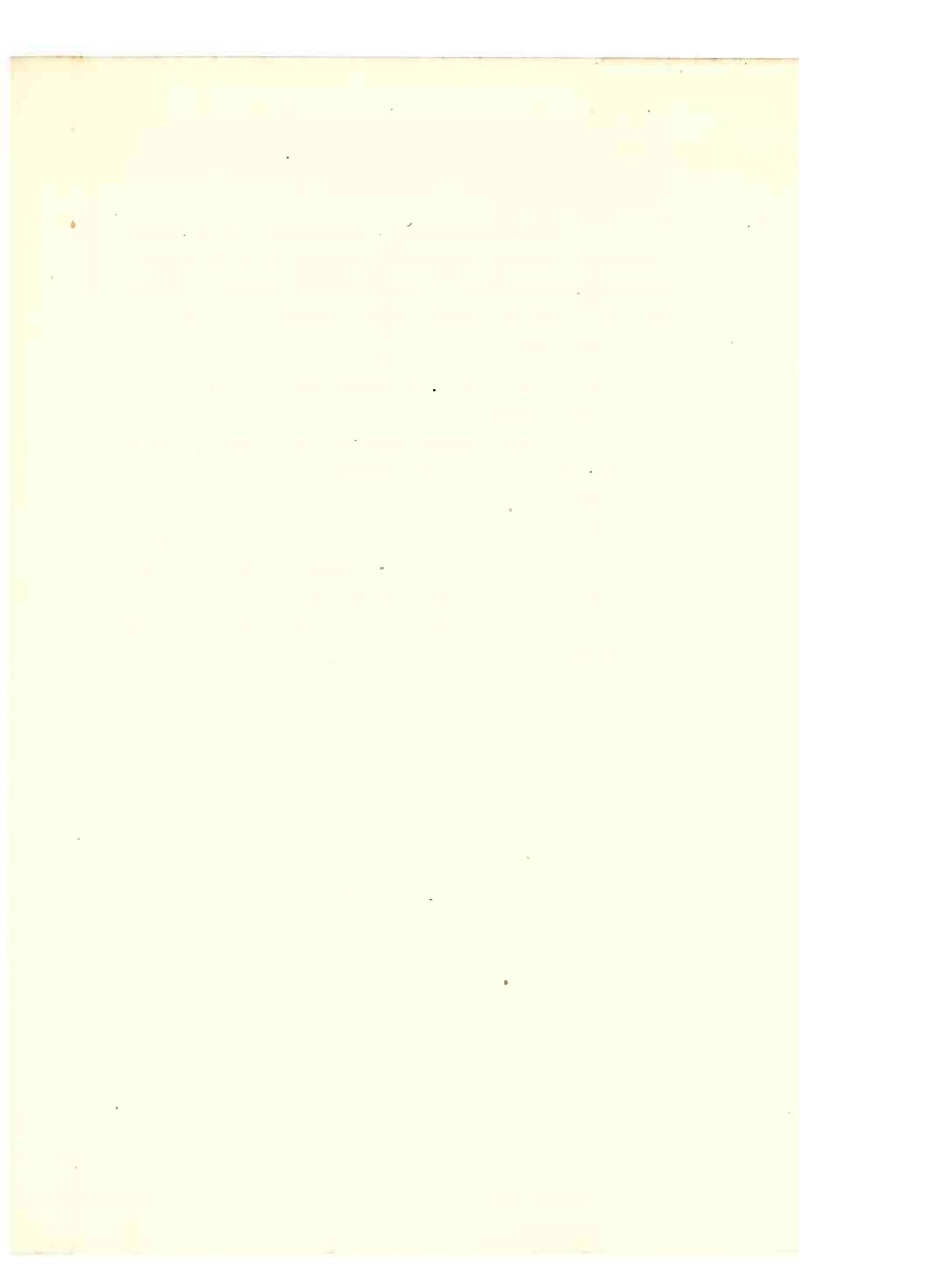
são do tipo túnel e não térmicas, pois as inclinações se mantêm praticamente constantes desde 4 até 77°K. Qualquer corrente do tipo térmica teria sua inclinação variando bastante no referido intervalo.

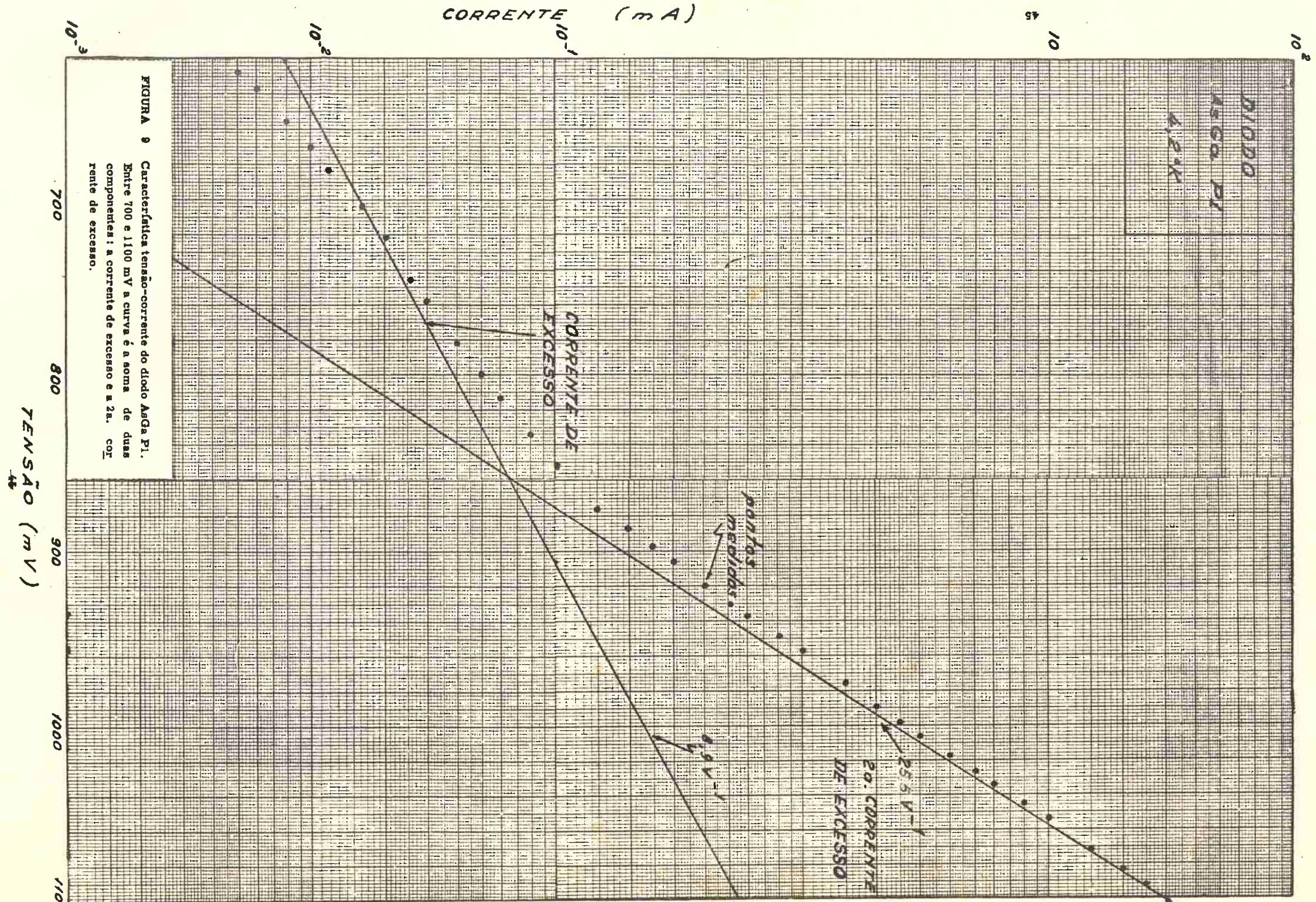
Quanto ao fato de S_x , a inclinação da primeira corrente de excesso, ser duas vezes maior do que os valores obtidos em diodos de túnel⁽³⁾, a explicação é simples. Mostramos em⁽³⁾ que S_x é inversamente proporcional a $N^{1/2}$, a concentração equivalente de contaminações da junção. Ora, como temos concentrações bem menores do que no caso de materiais degenerados, era de se esperar valores de S_x da ordem dos encontrados.

O fator multiplicativo, K, da corrente de excesso é agora bem menor do que o encontrado em diodos de túnel. Como este número está relacionado com a densidade de impurezas existentes na região proibida, somos levados a acreditar que em diodos comuns a banda proibida é bem mais livre de impurezas. Aliás, este resultado era esperado, em se tratando de materiais de baixo nível de contaminação.

Tudo está, pois, a formar um corpo coerente, explicando as duas componentes simultaneamente para os dois tipos de diodos. Resta apenas encontrar uma explicação melhor para a segunda corrente de excesso em diodos de materiais não degenerados.

Resumindo, podemos dizer que a corrente de excesso é realmente composta de duas componentes e aparece em todos os diodos de Arseneto de Gálio.





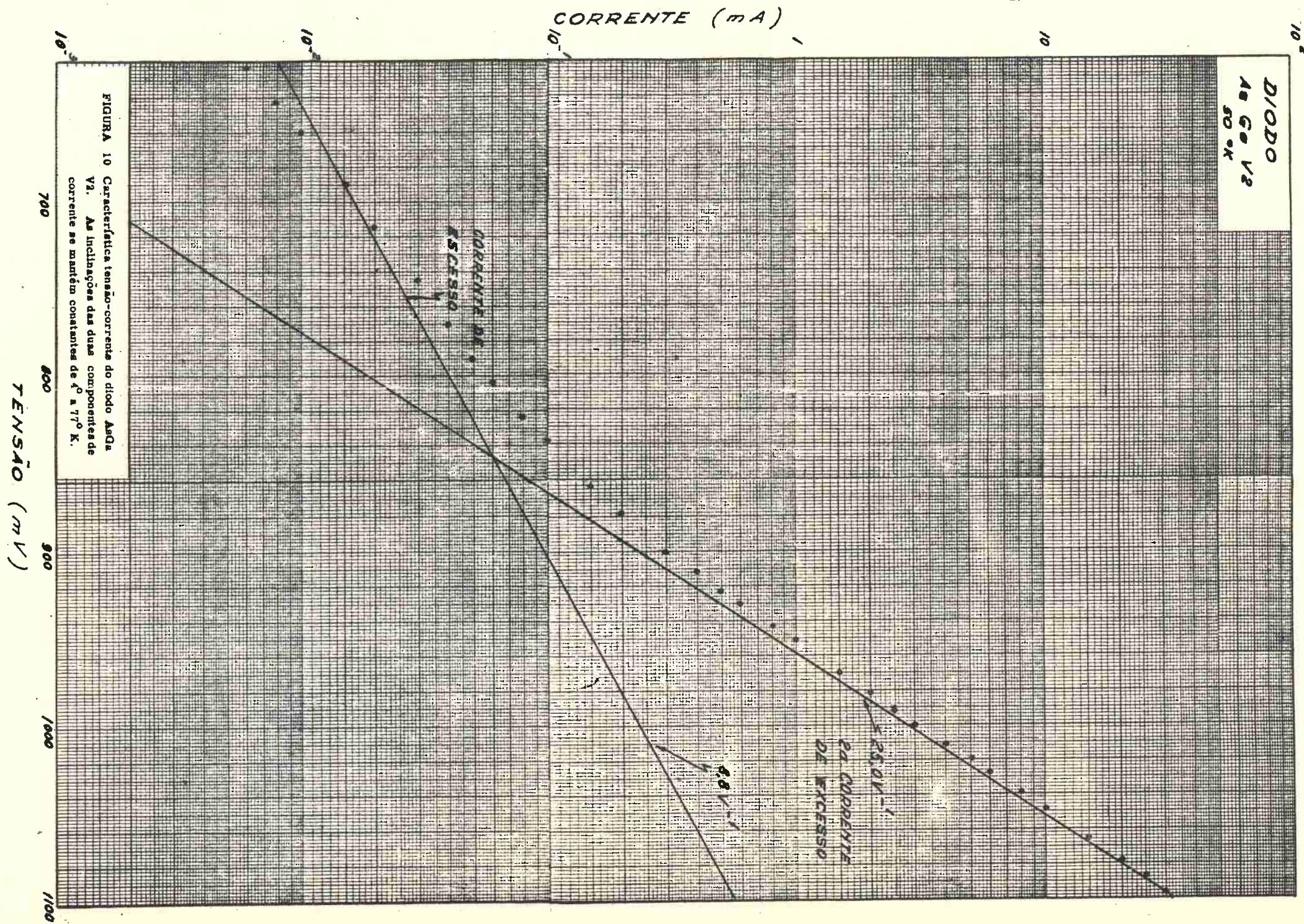


FIGURA 10 Característica tensão-corrente do diodo GaAs
 V_2 . As inclinações das duas componentes de corrente se mantêm constantes de 4° a 77°K .

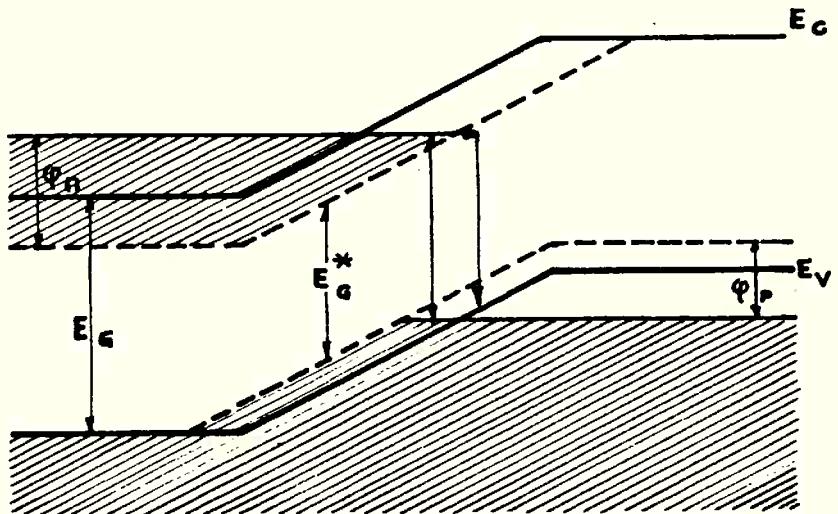


FIGURA 11 Modelo de uma junção de materiais degenerados onde as possíveis trajetórias das partículas são mostradas.



4. COMPORTAMENTO DOS DIODOS DE TÚNEL COM A TEMPERATURA NA FAIXA DE 77 a 400° K.

4.1 Considerações gerais

Em qualquer trabalho sobre diodos de túnel faz-se referência especial às grandes vantagens que este dispositivo possui sobre outros no que concerne ao comportamento com a temperatura. Este fato é devido ao próprio efeito túnel que, comparado com os fenômenos de injeção térmica, são bastante insensíveis à temperatura, operando normalmente mesmo na temperatura do Hélio Líquido.

Se, por um lado, os diodos semi-condutores comuns e transistores não podem operar em baixas temperaturas, de outro, os diodos de túnel se prestam ótimamente para este trabalho. Quer usemos os diodos de túnel como osciladores na região de resistência negativa, quer como elementos binários, comutando da região imediatamente após o vale para a anterior ao pico, estamos nos utilizando da parte da característica que fundamentalmente depende do efeito túnel. Apenas na região de altas correntes, muitas vezes bastante maiores do que a corrente de pico, é que vamos encontrar fenômenos térmicos, como as correntes de geração-recombinação, de injeção ou alta injeção. Nesta região, é claro, as grandes envolvidas variam bastante com a temperatura.

Como muitas vezes os projetistas de circuitos binários empregam os diodos na posição de alta tensão com correntes elevadas, torna-se necessário conhecer-se o comportamento de todos os parâmetros do diodo nesta região.

Por outro lado, do ponto de vista científico, é precisamente neste lugar que muitos e interessantes fenômenos ocorrem. Não é raro portanto, estarmos trabalhando nas regiões de corrente térmica. Tudo isto vem justificar que procuremos encontrar o comportamento de cada parâmetro do diodo até mesmo dentro da citada região.

Dos quatro parâmetros diferenciais que constituem o circuito dos diodos de túnel o que mais interesse desperta no estudo em questão é a capacidade de junção. A resistência série é devida na sua maior parte à resistência do

semiconductor que forma a junção. Desta forma, tem comportamento conhecido, diminuindo na região de temperaturas muito baixas, aumentando ligeiramente até quase a temperatura ambiente e depois diminuindo rapidamente. Na faixa em que operamos, os diodos se encontram na região de comportamento metálico, apresentando pequena variação com a temperatura. Estas variações são tão pequenas que normalmente necessitamos de métodos mais precisos, como levantamento de características, para obtermos resultados satisfatórios. A indutância série praticamente não varia com a temperatura e as oscilações encontradas em medidas na ponte são inferiores à precisão da mesma. Nestas condições vamos considerá-la constante. Isto vem comprovar que a indutância série é devida primordialmente aos fios de contactos da junção aos terminais de acesso do dispositivo. A componente de difusão que surge quando do estudo teórico das junções deve ter pequeno efeito na indutância série. Quanto à condutância diferencial, que representa papel de grande importância nos osciladores e na sua estabilidade, como veremos no capítulo 6, seu comportamento com a temperatura também não apresenta novidades pois as medidas são extraídas da própria característica tensão-corrente. No caso particular de diodos de Arseneto de Gálio, tivemos a oportunidade de fornecer dados a respeito na referência ⁽³⁾. De um modo geral, o módulo da condutância negativa cresce com a temperatura, até próximo da ambiente, quando então satura. Em alguns casos, pode vir até a decrescer ligeiramente para temperaturas mais altas.

O parâmetro que precisa ser obtido através de medidas em pontes ou sistemas equivalentes, e que exige o diodo em câmaras especiais como a que construímos é a capacidade de junção. Será sobre ela que depositaremos nossas atenções neste capítulo. Vamos procurar fazer umapanhado das teorias existentes, citar alguns trabalhos por nós realizados sobre o assunto, e finalmente, através dos resultados obtidos optar por hipóteses que nos parecem mais adequadas.

4.2 Capacidades que influem numa junção de materiais degenerados.

Procuraremos apresentar aqui um resumo teórico do cálculo da capacidade de junção. Este trabalho foi feito desde o início do desenvolvimento das teorias que procuram explicar o comportamento das junções. Trabalhos fundamentais neste setor como as referências (11) e (12) já forneceram métodos de ataque do problema. Estes métodos foram utilizados posteriormente por outros pesquisadores que completaram as antigas teorias, como (13).

Todos os trabalhos acima citados referem-se a junções de materiais não degenerados, portanto, junções que não apresentavam penetrações nas bandas de portadores. Em (14) procuramos, pela primeira vez, encontrar uma teoria que explicasse o comportamento geral das cargas numa junção composta de materiais degenerados. Este trabalho teve algum sucesso, mostrando de que forma certas cargas irão influir na capacidade e em que valor de tensão externa aplica da elas se tornam mais aparentes.

Procurando fazer um rápido resumo de uma teoria, que é bastante complexa, podemos dizer que o cálculo da capacidade de junção é feito procurando-se obter a distribuição espacial de todas as cargas junto à mesma e, em seguida, calculando-se o modo como esta carga varia devido a uma pequena variação de tensão. A fim de que este dQ/dv represente uma capacidade que interesse do ponto de vista de circuito, é necessário que esta carga dQ passe através dos fios externos da junção. É exatamente o que acontece pois na mesma temperatura a geração de pares elétrons-lacunas é constante e qualquer alteração de portadores junto à junção só será possível por deslocamento de cargas através dos fios de ligação.

As cargas que normalmente se procura estudar junto à uma junção são os portadores livres e as cargas ligadas que representam os núcleos dos átomos de impurezas adicionados ao semi condutor. Nas teorias clássicas como as de (11) e (12) considerava-se a junção como livre de portadores devido ao campo intensíssimo que afí aparece e que procura exatamente afastá-los da mesma. Desta forma, na junção

ficamos apenas com as cargas ligadas que não podem mover-se mesmo sob a ação dos campos intensos produzidos.

Como a carga total numa junção é sempre nula, torna-se indiferente estudarmos o comportamento de elétrons ou lacunas, pois ambos vão nos fornecer os mesmos valores e as mesmas variações ou capacidades.

As teorias clássicas, como já vimos, apenas consideram as cargas ligadas. Daí vem a natural dificuldade de se entender o conceito de capacidade de junção pois depende de cargas ligadas que, não podendo mover-se, não poderiam criar uma capacidade. O que vai realmente acontecer é uma variação na largura da junção quando da aplicação de uma tensão diferencial. Esta variação de largura, implica em que uma certa região do semi condutor deverá ter todos os seus portadores retirados ou colocados novamente. Isto fará com que a carga ligada total junto à junção varie, não porque ela se desloca, mas porque os portadores se deslocaram. Esta variação da carga ligada dividida pela tensão que a ocasionou é que nos fornece o conceito clássico de capacidade. A aproximação usada, que consistiu em considerarmos a junção completamente livre de portadores é conhecida como "aproximação de cargas espaciais".

Em⁽¹³⁾, num trabalho de grande envergadura, Sah levantou a hipótese da aproximação de cargas espaciais e procurou calcular com mais rigor o que realmente acontecia na junção. Concluiu este autor que as hipóteses clássicas eram bastante boas para tensões reversas aplicadas à junção e pequenas e médias tensões diretas. Quando as tensões diretas aproximavam-se do valor da banda proibida, a aproximação usada normalmente não mais valia pois portadores eram encontrados na junção. O número destes portadores aumentava tanto que, ao aplicarmos tensões próximas da banda proibida, a junção já se encontrava quase completamente neutralizada. Neste caso, a capacidade passaria a depender da variação dos portadores nas regiões próximas à junção e nada mais terá a ver com a variação da largura da mesma como acontecia anteriormente. Os resultados experimentais obtidos vieram a comprovar exatamente o que dizia esta teoria.

Em⁽¹⁴⁾, baseados no trabalho de Sah⁽¹³⁾, procuramos estudar as junções de materiais degenerados que

apresentavam pequenas anomalias em relação aos outros diodos. Nossa trabalho consistiu em considerarmos outras cargas que normalmente não são levadas em consideração pois apenas surgem devido às penetrações dos materiais degenerados. Estas cargas são os elétrons de túnel que estão em permanente transição da banda de condução do lado n para a banda de valência do lado p. Ao calcularmos a função probabilidade destes elétrons para todos os níveis de energia que nos interessam, verificamos que elas são diferente de zero dentro da banda proibida. Aliás, isto se torna evidente quando pensamos na corrente de túnel. Além destas cargas, existem alguns portadores que se localizam na junção mesmo na temperatura do zero absoluto. Isto é devido ao nível de Fermi dos materiais degenerados estar dentro das bandas de portadores. Estes elétrons e lacunas que se localizam na junção precisam agora ser considerados e em ⁽¹⁴⁾ e ⁽¹⁵⁾ nós mostramos que este efeito deve ser mais pronunciado para altas tensões diretas, junto ao potencial de difusão da junção.

Devido ao tamanho das penetrações, o efeito acima mencionado deve ser muito maior em Arseneto de Gálio do que em Germanio pois este último possui pequenas penetrações de banda. As medidas função da temperatura que realizamos, atacando o problema por outro lado, nos mostraram que, em diodos de Germanio, o efeito é realmente pequeno e as teorias de Sah aplicam-se muito bem qualitativa e quantitativamente.

4.3 Adaptação das teorias de Sah às medidas de capacidade função da temperatura.

Até a data deste trabalho quase todo o material publicado refere-se ao comportamento dos parâmetros função da tensão externa aplicada. Movidos por uma razão de ordem prática, o estudo do comportamento do dispositivo com a temperatura, medimos o modo de variação da capacidade da junção com esta grandeza. Pudemos, portanto, estabelecer padrões definitivos do comportamento da capacidade e ao mesmo tempo comprovar, através de um método totalmente

diverso, as teorias enunciadas há seis anos por Sah sobre es te mesmo parâmetro da junção.

A região onde verificamos ser a teoria acima o bedecida é a de altas tensões diretas. Nesta região, pode-se demonstrar ⁽¹³⁾, a capacidade de transição clássica devido às cargas ligadas é desresível em face da capacidade devida aos portadores dentro e fora da junção. No seu trabalho teórico Sah separou estas cargas em duas partes, as que se encon tram dentro e as que estão fora da junção. As primeiras dão origem à capacidade de transição de portadores e as segundas à capacidade de difusão.

Considerando-se como válida, neste caso, a aproximação de neutralidade de cargas, Sah chegou a expressões para as duas capacidades que passaremos a enunciar :

$$C_d = K T^2 \exp - (E_G - qV) / KT \text{ para a capacidade de difusão} \quad (4-2)$$

$$C_{tc} = K' T^{9/8} \exp - 5 (E_G - qV) / 8KT \text{ para a capacidade de transição} \quad (4-1)$$

onde : T é a temperatura absoluta

K, K' são constantes

E_G é o valor da banda proibida medido em elétrons Volts

V é a tensão externa aplicada em Volts

q é a carga do elétron

k é a constante de Boltzman

Como podemos verificar das equações 4-1 e 4-2, as capacidades variarão primordialmente devido à exponencial em $-1/T$. Além disto, como K e K' não são muito diferentes, a capacidade de transição deve ser bastante maior do que a de difusão, a não ser quando as tensões externas superarem o valor de V_G . Como isto implica em correntes altíssimas que o dispositivos às vezes não suporta, trabalhamos na região on de a tensão era inferior ao valor da banda proibida e, portanto, a capacidade de transição era bem superior a de difusão. Como mostraremos na próxima secção apenas em uma medida foi observado um comportamento que pode ser associado à capacidade de difusão. Isto aconteceu porque polarizamos

muito alto o diodo neste caso.

Vamos, portanto, concentrar nossas atenções para a expressão da capacidade de transição, C_{tc} . Ao tentarmos tomar o logaritmo desta expressão, obteremos :

$$\log C_{tc} = A - 5(E_G - qV)/2,3 \times 8 \times kT$$

Considerando-se que a variação de A com a temperatura será muito pequena em face do termo exponencial, vamos desprezá-la e, em seguida, calcular o coeficiente que deveremos obter num gráfico semi-logarítmico desta função. A banda proibida tem variação com a temperatura do tipo :

$V_G = V_{Go} - \beta T$, onde $V_G = E_G/q$. Podemos portanto, calcular o coeficiente da função de variável $1/T$. Este coeficiente, α , será :

$$\alpha = 5(E_{Go} - qV)/2,3 \times 8 \times k \quad \text{ou}$$

$$\alpha = 1.500(V_{Go} - V)/2,3 \times 8 \times 25 \quad \text{onde } V_{Go} - V \text{ é dado em miliVolts.}$$

Resumindo e simplificando o exposto acima, chegamos a uma fórmula prática que aplicaremos na próxima secção, para os casos de alta tensão :

$$\alpha = 0,0814(V_{Go} - V)/25 \quad (4-3)$$

onde a tensão é dada em mV e a variável é $1.000/T$.

4.4 Resultados experimentais obtidos

Procuraremos, nesta secção, salientar alguns dos resultados obtidos e que demonstram as considerações que fizemos na secção anterior. Como já vimos, estas medições foram feitas colocando-se o diodo na câmara termostata da que construímos e adaptada à ponte General Radio 1607. Os resultados obtidos representavam a impedância total do diodo na polarização indicada e na temperatura da câmara.

A fim de obtermos destas medidas os valores das capacidades, empregamos o processo do diagrama de círculo descrito em (16) com ligeiras modificações explicadas em nosso trabalho sobre medida de capacidade de junções de materiais degenerados (17). O emprego deste processo exige, além da medida na polarização desejada, uma outra, para tensões reversas bastante altas, a fim de se curto-circuitar a junção propriamente dita e ficarmos com o valor da componente série do diodo. Da diferença das duas medidas, uma na tensão desejada e outra no lado reverso, obtemos o valor da capacidade da junção e sua condutância (16). Para realizar este trabalho, que exige uma quantidade enorme de cálculos, nos utilizamos dos serviços do computador IBM 1620 da Universidade de São Paulo que nos transformou os dados obtidos na ponte diretamente em capacidade da junção. Um programa foi especialmente projetado para este trabalho numérico.

Como estávamos interessados no comportamento da capacidade da junção em todas as regiões de trabalho, fizemos medidas no lado reverso, junto ao vale e nas regiões de alta corrente.

As medidas feitas no lado reverso só serviram para nos fornecer as componentes série dos diodos. A junção, nesta região, torna-se praticamente um curto circuito impedindo qualquer medida mais acurada da capacidade.

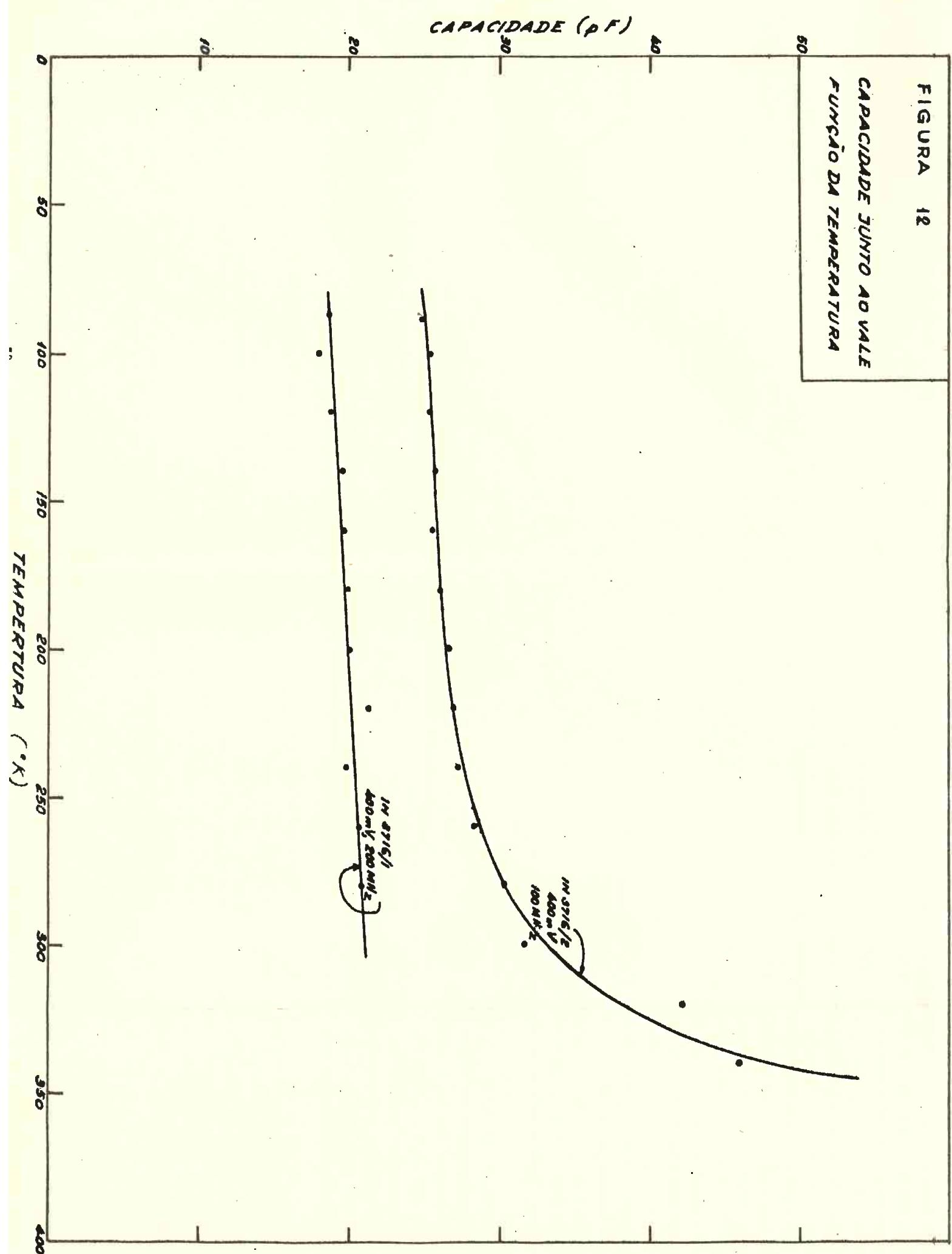
Quanto às medidas junto ao vale, um resultado típico é apresentado na figura 12 onde podemos observar que a capacidade cresce lentamente com a temperatura até perto da ambiente e, em seguida, aumenta de forma quase exponencial.

A teoria que acima formulamos explica bem este comportamento. Em primeiro lugar, junto ao vale a capacidade dominante é a relacionada com as cargas ligadas, isto é, a capacidade clássica de junção. A expressão desta capacidade encontra-se em qualquer livro que trata de teorias de junção como, por exemplo, a referência (18). Esta capacidade vale :

$$C_{ti} = K'' / (V_D - V)^{1/2} \quad (4-4)$$

FIGURA 12

CAPACIDADE JUNTO AO VALE
FUNÇÃO DA TEMPERATURA



onde : K'' é uma constante com a tensão e com a temperatura, a menos de pequenas variações da constante dielétrica

V_D é o potencial de difusão da junção
 V é a tensão externa aplicada

Esta fórmula vale para junções abruptas como são, normalmente, os diodos de túnel. No caso de junções graduais o expoente passa a ser $1/3$ no lugar de $1/2$.

Como se vê da equação supra, apenas V_D varia com a temperatura e, mesmo assim, muito pouco. A lei de variação do potencial de difusão é praticamente a da variação da banda proibida, pois, em Germanio, as penetrações de banda são muito pequenas e constantes. Desta forma, podemos dizer que

$$V_D = V_{D0} - \frac{q}{2} T$$

Se tentarmos aplicar a equação 4-4 no caso mostrado pela figura 12, onde a polarização em ambos os diodos é 400mV, vamos verificar que o pequeno aumento da capacidade é o predrto pela fórmula clássica, mostrando que, neste caso, a capacidade deve-se exclusivamente às cargas ligadas.

Quando aumentamos bastante a temperatura, perdo ambiente, dois fatores fazem com que o aumento de capacidade cresça. O primeiro, é que a diferença ($V_D - V$) vai se tornando pequena e, portanto, começa a influir mais na capacidade. Em segundo lugar, quando a temperatura é elevada, já nesta tensão de 400mV vamos observar componentes de corrente térmicas e a capacidade devida aos portadores torna-se importante, impondo sua lei de variação ao fenômeno. Este fato está bem nítido na figura 12, para o caso do diodo 1N3716/2 que foi submetido a temperaturas de 340° K. Quanto ao diodo 1N3716/1, que foi medido até a temperatura de 280° K, apenas o comportamento clássico é mostrado, o que significa, apenas a capacidade de cargas ligadas é importante.

Vamos agora nos referir às medidas feitas em altas tensões. As figuras 13 e 14 nos mostram exemplos destas medidas. O gráfico utilizado foi um mono-logarítmico e

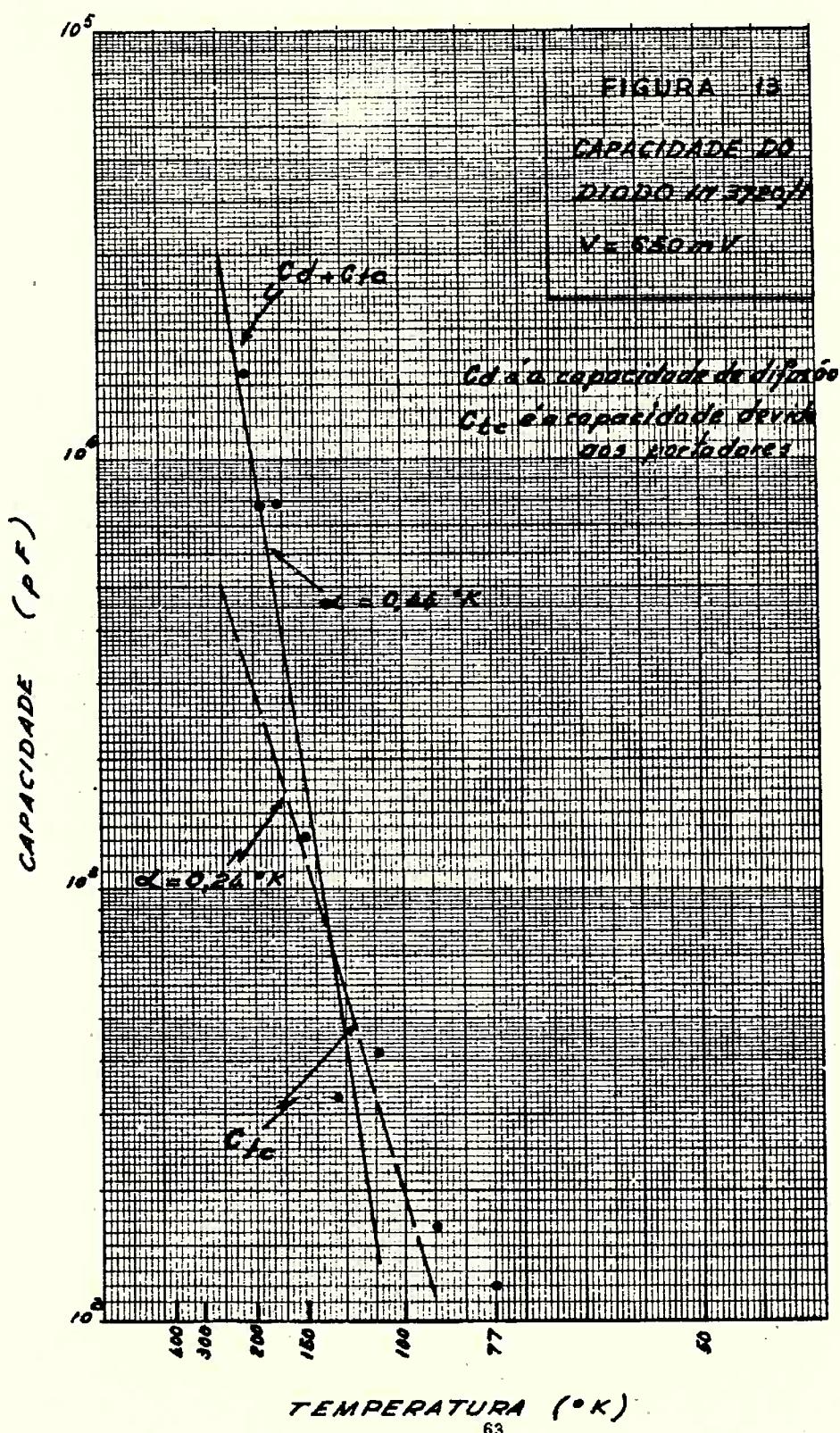
as variáveis capacidade versus $1.000/T$. Os pontos obtidos estão aproximadamente em torno de retas cujos coeficientes nós calculamos para comparar com os teóricos da fórmula 4-3. Para temperaturas abaixo de 100°K , os pontos fornecem capacidades maiores do que a teoria prevê. Este fato é de simples explicação. Nestas temperaturas a capacidade das cargas ligadas ainda é importante e bem maior do que a capacidade devido aos portadores. A medida que aumentamos a temperatura, sendo o crescimento da capacidade de portadores exponencial, logo torna-se dominante e faz com que a lei mostrada pela equação 4-2 seja obedecida.

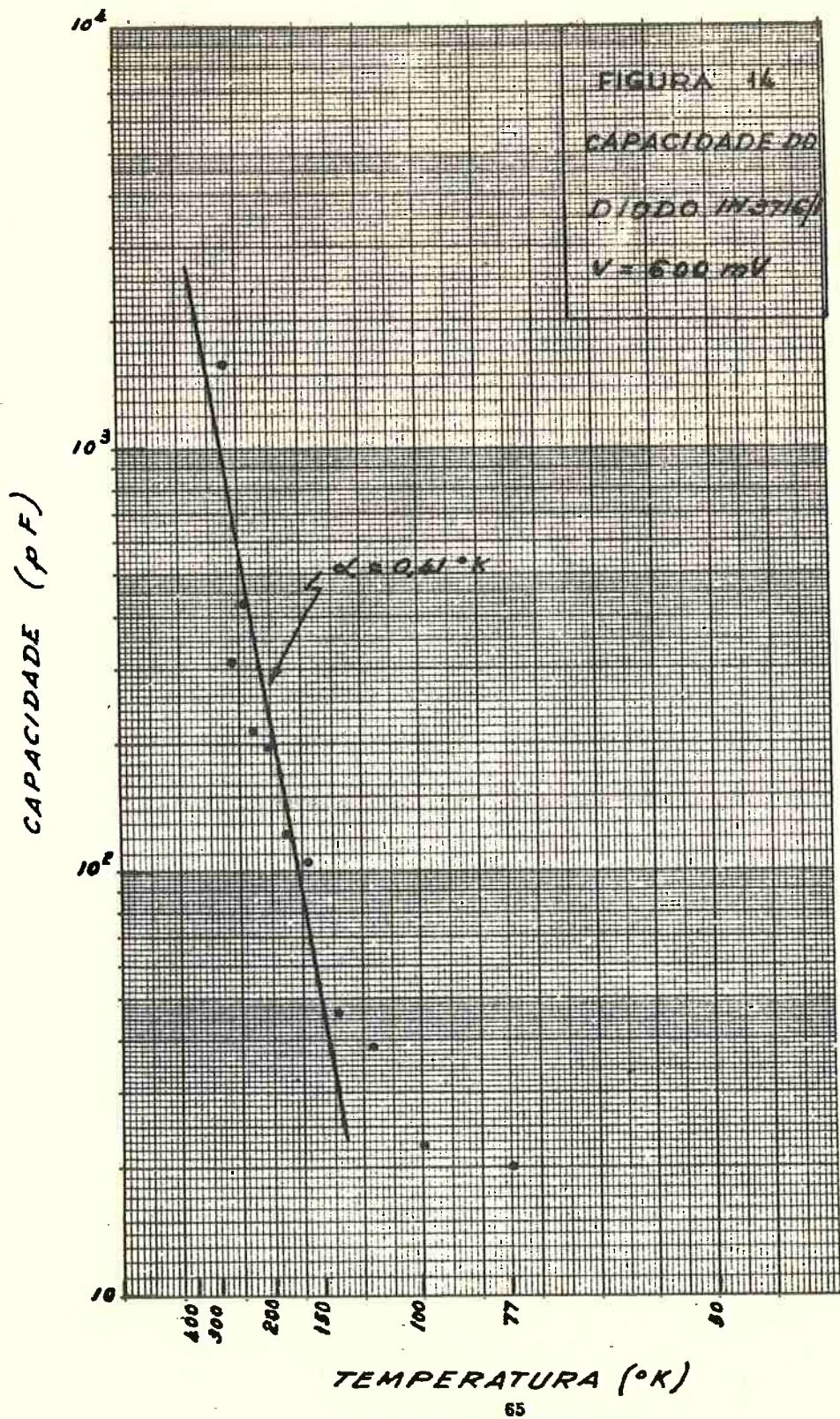
A medida dos coeficientes das retas obtidas nos forneceu os seguintes resultados :

diodo	tensão(mV)	coef. teórico	coef. medido
1N3716/1	600	0,39	0,41
1N3720/1	650	0,23 ou 0,37	0,24 ou 0,44
Ge 20	520	0,65	0,63

Como vemos, o acôrdo entre teoria e prática é muito bom se levarmos em conta a complexidade destas medidas. No caso do diodo 1N3720/1, que se vê na figura 13, a tensão aplicada foi tão alta, que se torna superior ao valor da banda proibida. Nestas condições, as equações 4-1 e 4-2 nos mostram que a capacidade de difusão torna-se importante e pode mesmo vir a ser a maior componente, fazendo com que o coeficiente da reta de capacidade fique multiplicado por $8/5$. Esta é a razão de colocarmos os dois valores na tabela acima. Outro ponto que aumenta ligeiramente a capacidade medida é o fato de termos desprezado o fator $T^{9/8}$ que multiplica a capacidade C_{tc} . Levando-se em conta este fator, os coeficientes medidos seriam ligeiramente menores do que os fornecidos.

Uma outra explicação para o aumento exagerado da capacidade da figura 13 pode ser o surgimento da capacidade das cargas, devido às penetrações das bandas, dentro da junção. O pequeno tamanho das penetrações em Germânio nos faz achar que isto não deve acontecer. Até o momento nós só observamos esta capacidade em diodos de Arseneto de Gálio, cujas penetrações são bem maiores do que as de Germânio.





Resumindo, a capacidade de junção tem um comportamento bastante estável com a temperatura, crescendo ligeiramente. Isto acontece para as tensões inferiores ao ponto de vale. Para altas tensões, a capacidade passa a variar de forma exponencial com a temperatura e precisa ser limitada no caso de necessitarmos de rápidos tempos de comutação. Quanto aos outros parâmetros do circuito diferencial, suas variações são muito pequenas e desresolvíveis em face da variação da capacidade.

5. COMPORTAMENTO DOS DIODOS DE TÚNEL COM A FREQUÊNCIA

5.1 Considerações Gerais.

Procuraremos neste capítulo fornecer um apanhado geral do problema da freqüência no que concerne ao comportamento dos diodos de túnel. Em primeiro lugar, o conhecido circuito diferencial dos diodos deve ser estudado a fim de se ter elementos para colocar os dispositivos em questão em circuitos desejados. Todo e qualquer projeto que inclua os diodos de túnel deve ser precedido de um estudo dos parâmetros do circuito diferencial.

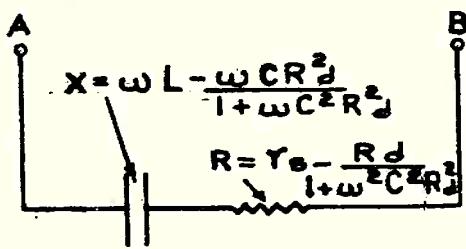
Dos quatro parâmetros que constituem este circuito, os dois em série, ou seja, a resistência série e a indutância, não variam com a tensão externa aplicada. Os outros dois, a capacidade e a condutância, representam a junção pròpriamente dita e são variáveis com o ponto de repouso. A figura 15 nos mostra este circuito diferencial.

A fim de medirmos estes quatro parâmetros, vários métodos foram apresentados e um deles achamos particularmente interessante e o adotamos: é o método do diagrama de círculo apresentado em ⁽¹⁶⁾. Este método foi originalmente usado para medidas em VHF, porém nós o adaptamos para medidas em UHF como já o fizeram outros pesquisadores ⁽¹⁹⁾.

Por se tratar de medidas na faixa de UHF, procuramos um método que adaptasse o diodo e seu sistema de polarização em linhas coaxiais de 50 ohms. Para isto nos utilizamos da ponte General Radio e do adaptador descrito no capítulo 2.

5.2 Oscilações acima da freqüência de corte (resumo histórico)

A figura 15 nos mostra o circuito equivalente dos diodos de túnel e o chamado circuito reduzido, onde mais fácilmente observamos as partes real e imaginária que medimos numa ponte de impedâncias. Da simples inspecção desta



*circuito reduzido
equivalente*

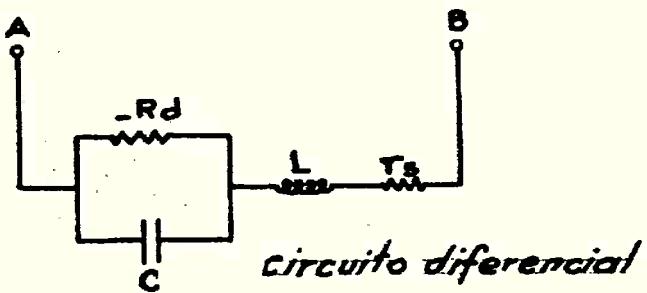


FIGURA 15 Circuitos diferenciais dos diodos de túnel.

figura vemos que sua parte resistiva é negativa até a freqüência

$$f = [(R_d/r_s) - 1]^{1/2} / 2 \pi R_d C_d \quad (5-1)$$

que é conhecida como a freqüência de corte do diodo. Acima desta freqüência o diodo não mais funciona como um elemento ativo.

Com o intuito de utilizar os diodos de túnel em freqüências cada vez mais altas, os pesquisadores procuraram empregá-los em cavidades cuja freqüência de corte inferior é maior do que a freqüência de corte dos diodos e, apesar da aparente incongruência, observaram sinais gerados pelo dispositivo. Isto foi pela primeira vez relatado em 1962 na referência (20).

Desta data para cá muitos trabalhos têm surgido procurando demonstrar teóricamente esta evidência experimental. Muitos outros apareceram também, mostrando que o fenômeno de oscilações acima da freqüência de corte não passa de um problema de harmônicas de uma fundamental dentro da faixa do diodo. Nós iremos fazer um resumo destas opiniões porque, apresentaremos a seguir nossas idéias sobre o assunto, bem como algumas evidências experimentais por nós obtidas.

Em 1963, na referência (21), novamente Ishii e seus co-autores apresentam novas evidências de oscilações na banda X de diodos comercialmente feitos para operar na banda S. Assim foi possível obter-se, de um diodo da General Electric 1N3219A cuja freqüência de corte é 3,4 giga Hertz, oscilações em torno de 8,2 giga Hertz. Isto foi conseguido adaptando-se o diodo num guia de onda tipo RG-52/U.

Ainda em 1963, na referência (22), o mesmo autor, juntamente com McPhun, procuraram analisar teoricamente o problema e encontraram uma solução bastante discutida. Imaginaram estes autores que o diodo, quando colocado num guia de onda, tivesse o campo elétrico formado agindo diretamente sobre a junção, curto-circuitando desta forma a resistência série que é uma das limitadoras da freqüência de corte dos diodos. Além disto, mostraram estes autores que uma indutância haveria de aparecer em paralelo com a

capacidade da junção diminuindo seu valor efetivo e, portanto, aumentando a freqüência de corte do diodo. Tomando esta li-
nha de idéias, Scanlan (23) obteve interessantes conclusões só-
bre o que deveríamos esperar para o produto ganho-banda pas-
sante do dispositivo. Infelizmente este trabalho era teórico e
nenhuma evidência experimental foi apresentada.

Na mesma época, apareceu uma comunicação de Thomson (24) onde este autor mostra que as dispersões nos va-
lores típicos dos diodos de túnel fornecidas pelos fabricantes poderiam ser responsáveis pelas altas freqüências observadas Assim, mostrava Thomson, o diodo 1N3219A cuja freqüência de corte nominal é de 3,4 giga Hertz poderia ter valores má-
ximos em torno de 20 giga Hertz. Aconcelhava nesta altura, que os dados específicos de cada diodo medido deveriam ser apresentados antes de qualquer conclusão a respeito.

Em dezembro de 1964, McPhun apresentou mais uma comunicação (19) onde procurou realizar o único tra-
balho que conhecemos sobre a medida dos quatro parâmetros dos diodos de túnel função da freqüência. Este trabalho foi realizado na mesma faixa onde nós o procuramos fazer. Os re-
sultados mostrados são poucos e, o mais importante deles que seria o da diminuição da condutância com a freqüência, ficou invalidado por trabalho futuro de Hawkins (26) onde mostra es-
te último autor que a condutância é praticamente constante com a freqüência. O próprio McPhun concordou com os re-
sultados de Hawkins. Desta forma, a nós pareceu que o cam-
po ainda continuava aberto, a não ser pelos resultados publica-
dos por Hawkins que concluiu pela constância da condutância.
Quanto aos outros parâmetros nada se disse a respeito.

Em Junho de 1965 surge uma comunicação de Rivier (27) onde este autor mostra os resultados que obteve da repetição da experiência de Ishii numa montagem que diz ser superior à original. A conclusão a que chega Rivier é que as freqüências medidas acima da de corte são harmônicas de fundamentais que se encontram dentro da região normal de trabalho. Mostra também Rivier toda a série de harmônicas que obteve procurando, desta forma, comprovar suas afirma-
tivas. Em resposta a esta comunicação, Ishii rebate dizendo que existem vários modos de oscilação de diodos de túnel e

que Rivier apenas considerou um caso. Cita, por exemplo, trabalhos anteriores, como as referências⁽²⁵⁾ e⁽²⁸⁾ onde é mostrada a possibilidade de diodos oscilarem no chamado modo de múltiplas freqüências. No capítulo seguinte iremos tratar pormenorizadamente deste tipo de oscilação.

Ainda dentro da mesma polêmica, Rosenberg a presenta na referência⁽²⁹⁾ um outro aspecto do problema. Mostra que a fórmula 5-1, normalmente usada para definir a freqüência de corte dos diodos de túnel, é mal empregada já que costuma-se adotar para a resistência R_d da junção seu valor mínimo. Conclui que, se adotarmos a relação

$$R_d = 2r_s$$

teremos a maior freqüência de corte possível, e que esta pode abranger as altas freqüências observadas por Ishii. Assim, o diodo 1N3219A teria uma freqüência de corte de aproximadamente 16 giga Hertz, bem acima dos 8 giga Hertz observados por Ishii.

Um mês após esta última comunicação, em Setembro de 1966, surge um trabalho⁽³⁰⁾ de Serophim e Stephen son, bastante completo, onde estes autores concluem pela não existência de freqüências de oscilação como as descritas por Ishii. Da mesma forma como Rivier, acham que as oscilações obtidas por Ishii eram harmônicas de fundamentais dentro da faixa normal do diodo.

5.3 Considerações teóricas sobre as oscilações de diodos de túnel.

Após este breve apanhado do que existe sobre este palpitante assunto e que tanta polêmica vem causando nos últimos dois anos, vamos procurar fornecer nossa contribuição a respeito.

Em Março de 1966 apareceu um trabalho⁽³¹⁾ que, apesar de procurar mostrar um outro aspecto do problema, na nossa opinião revolucionou o tratamento do mesmo mostrando outras facetas até então ignoradas.

Em primeiro lugar gostaríamos de tecer algumas

considerações sobre o modo como a oscilação aparece nos diodos de túnel. O método clássico de fazer este estudo é tomar-se o circuito diferencial reduzido, como o mostrado na figura 15 e, adicionando-se-lhe uma carga resistiva, calcular-se os polos da função impedância entre os pontos A-B. Em seguida, impondo-se que estes polos estejam no eixo jw das freqüências, deparamos com duas equações reais relacionando os parâmetros do diodo e a freqüência. Neste ponto quase todos os autores nos fornecem duas equações :

$$L = R_d r_s C_d \quad (5-2)$$

$$f = [(R_d/r_s) - 1]^{1/2} / 2\pi R_d C_d. \quad (5-1)$$

A equação 5-2 nos dá a condição de oscilação mantida, senoidal. A outra equação nos dá o valor da freqüência desta oscilação. Temos, portanto, de 5-2 um valor da resistência negativa que nos garante a oscilação senoidal. O valor de R_d obtido depende dos outros três parâmetros e, portanto, pode ou não ser possível de realização prática. É preciso fazer aqui duas considerações que a maioria dos autores não faz ou considera implícito acarretando muitos erros de interpretação:

1 - a equação 5-2 como condição de oscilação deve ser escrita:

$1/g = R_d < L/r_s C_d$, já que isto implica em se ter os polos da função impedância no semi plano direito.

2 - devido às não linearidades da característica tensão-corrente do dispositivo, a condutância que irá reger o fenômeno de oscilação será um valor médio ou equivalente de um circuito linear, estando sempre entre o valor da condutância no ponto de polarização e zero. A referência 31 trata bastante bem do problema, quando procura mostrar que as oscilações são possíveis mesmo tendo-se em vista que apenas alguns valores discretos são teoricamente possíveis. Isto acontece devido ao acomodamento da condutância negativa do diodo ao valor requisitado por 5-2.

Das duas considerações acima concluímos :

a - a equação 5-1 nos fornece verdadeiramente a freqüência de oscilação, mas é preciso conhecermos de ante mão o valor da condutância equivalente no ponto de repouso. A maioria dos autores admite, como bem mostrou Rosemberg⁽²⁹⁾, na expressão da freqüência de oscilação, o valor máximo permitido pelo diodo para a condutância (ou mínimo de R_d). É desta forma que são calculadas as freqüências de corte dos diodos fornecidas pelos manuais. Como o valor de R_d colocado em 5-1 é o menor possível, teremos para a freqüência o maior valor possível, porém neste caso a oscilação não pode rá ser senoidal e sim de relaxação. Na grande maioria dos diodos o valor de R_d calculado de 5-2 é bem maior do que o valor mínimo determinado pela curva característica. Daí, portanto, em se tratando de oscilações senoidais, achamos que a freqüência de corte dada por 5-1 não tem nenhum significado. A expressão correta obtemos substituindo 5-2 em 5-1 :

$$f = 1/2 \pi (1/LC_d - r_s^2/L^2)^{1/2} \quad (5-3)$$

Teremos oportunidade de mostrar nas verificações experimentais que as freqüências determinadas por 5.3 são as obtidas e não as dadas por 5-1 onde R_d é o menor valor possível. A freqüência de 5-1 permanecerá sempre como um máximo teórico, porém apenas atingido para os diodos cujos parâmetros obedecem à relação 5-2 .

b - desde que estejamos interessados em qualquer tipo de oscilação, então podemos falar na freqüência de 5-1, com $R_{d\min}$, como uma freqüência de corte possível de ser obtida. Jamais porém, poderemos diminuir o valor de R_d abaixo do mínimo permitido pela característica, pois este valor nunca poderia ser atingido pelo diodo. Desta forma, as observações feitas por Rosemberg em⁽²⁹⁾ pelas quais obtemos a máxima freqüência diferenciando 5-1 e conseguindo uma relação

$$R_d = 2r_s \quad (5-4)$$

não tem sentido, pois dificilmente existirá um diodo que forneça tal condição. A argumentação de⁽²⁹⁾, mostrando que com

a condição (5-4) poderemos ter uma freqüência de corte de 16 gi ga Hertz para o diodo 1N3218A, torna-se desta forma sem sentido. As não linearidades da característica só podem aumentar o valor de R_d no ponto e nunca diminuí-lo até $2r_s$. Na resposta apresentada por Ishii, rebateando este argumento de Rosenberg, aquele não notou este ponto. Notou por outro lado que, como R_d equivalente pode crescer até 1.000 vezes o valor de r_s , deveríamos ter oscilações de baixas freqüências, o que ele não havia encontrado. Ora, este é precisamente o ponto interessante que a demonstração encontrada na referência (31) nos aponta: podemos ter oscilações de baixas freqüências em conjunto com as outras normalmente encontradas. Tivemos oportunidade de verificar a justezza deste fato em muitas experiências obtendo freqüências de relaxação de até 100 kilo Hertz com diodos normalmente usados em micro ondas.

c - voltando mais uma vez às oscilações senoidais, Serephim e Stephenson mostram em (30) que a maior freqüência de oscilação possível se dá para o diodo curto circuitado e o valor é o dado em 5.1. Isto apenas é verdade se nos referimos a qualquer tipo de oscilação. Quando estamos tratando de oscilações senoidais esta conclusão é errônea como mostraremos a seguir. Ora, estes dois autores referiam-se ao caso senoidal pois, mostram em seu trabalho que, as oscilações de relaxação podem ser deixadas de lado. Daí a demonstração apresentada em (30) poder levar a conceitos errados e necessitar de uma explicitação neste sentido.

Apesar da simples verificação do exemplo apresentado em (31) ser o suficiente para demonstrar que curto circuitando-se o diodo não obteremos a maior freqüência senoidal de oscilação, vamos provar aqui esta afirmativa. Para isto, tomemos a equação (10) do trabalho em pauta. Esta equação nos fornece uma das condições que se obtém quando imponemos que os polos da função impedância estejam no eixo imaginário de tensões. Reproduzindo a equação (10) da referência (31) :

$$g^2 [r_s(r_s + R_2) + w^2 L^2] - g(R_2 + 2r_s) + [(w^2 LC - 1)^2 + w^2 C^2 r_s(r_s + R_2)] = 0 \quad (5-5)$$

Se substituirmos nesta equação w^2 pelo valor obtido da equação 5-3, que é a real expressão da freqüência da oscilação senoidal, temos:

$$g = 1/R_d = r_s C_d / L$$

Esta relação é exatamente a que obtivemos em 5-2 como condição para que o diodo oscilasse senoidalmente. Isto vem reafirmar que as equações mostradas em (31) estão corretas e se aplicam às oscilações senoidais. Ora, isto posto, é só voltarmos à equação original, 5-5, e calcularmos as freqüências máximas que podemos obter para outros valores de R_2 , a resistência em paralelo com o diodo. Observa-se que valores bem maiores do que a freqüência dada em 5-3 podem ser obtidos desmentindo, portanto, a afirmação da referência (30). Está claro, no entanto, que a freqüência de 5-1 continua sendo um máximo dos máximos e não será ultrapassada.

d - nas conclusões acima tratamos de tópicos que nos pareceram ter sido deixado de lado nesta discussão a respeito de oscilações acima da freqüência de corte. Sómente agora iremos dar nossa opinião sobre o problema propriamente dito, quando já deixamos bem claros os pontos essenciais para a sua completa compreensão.

Na resposta apresentada na referência (27), Ishii fala em quatro modalidades de oscilações dos diodos de túnel:

- 1 - freqüência simples
- 2 - harmônicas
- 3 - múltiplas freqüências
- 4 - múltiplas freqüências e harmônicas.

Os dois primeiros casos são de simples compreensão graças à natureza não linear do dispositivo. Os terceiro e quarto casos são estudados teoricamente nas referências (28), (31) e (32). Sempre que tenhamos linhas de transmissão ou guias de onda, graças às propriedades periódicas das ondas eletro-magnéticas, vamos encontrar soluções múltiplas para as possíveis freqüências de oscilação dos diodos de túnel. A rigor, o quarto caso abrange os demais e é o esperado sempre que temos os diodos adaptados em linhas de

transmissão ou guias de onda.

Ishii procurou argumentar em (27) que o autor da referida comunicação estava considerando apenas um ponto do conjunto e que se Rivier não tinha encontrado o caso por ele apontado, era porque estava se dando exatamente um ou tro modo de oscilação. Esta argumentação não nos parece rigorosa. Se é verdade que Rivier estava detetando oscilações do tipo de harmônicas, nada impediria Ishii de encontrar harmônicas no seu caso, isto é, na terceira modalidade. O fato de Ishii não detectar nenhuma harmônica de seu oscilador a 8,2 giga Hertz nos dá uma idéia de que a instrumentação usada, por qualquer razão, não tinha sensibilidade suficiente para obter os referidos harmônicos. Rivier obteve 21 harmônicos da fundamental e Ishii diz que sómente em alguns casos observou harmônicos como os de Rivier. Este assunto fica prejudicado porque não se conhece maiores explicações das montagens usadas por estes dois autores.

Um ponto, no entanto, nos parece bastante estranho. Ishii usou um guia de onda cuja freqüência de corte inferior vale 6,6 giga Hertz. Montou neste guia um diodo de freqüência de corte nominal clássica de 3,4 giga Hertz. Em seguida, constatou (20), (21) e (22) que o diodo oscilava em 8,2 giga Hertz. Do quanto conhecemos, parece que não houve nenhum esforço de Ishii no sentido de verificar a possibilidade da existência de sub-harmônicas que iriam contrariar por completo sua teoria. Os guias de onda não permitem freqüências inferiores a 6,6 giga Hertz e desta forma não poderiam detectar, por exemplo, as freqüências de 2,7 e 5,4 giga Hertz que talvez estivessem presentes. Sendo verdade esta última hipótese, teríamos como fundamental a freqüência de 2,7 giga Hertz com suas duas harmônicas seguintes 5,4 e 8,2 giga Hertz, onde apenas a terceira harmônica seria medida.

Contra argumenta Ishii em (27) que o escrito de Rivier sobre o conjunto de harmônicas não é válido porque a quem não encontrou em suas medidas um conjunto de harmônicas e, portanto, estava numa outra modalidade de oscilação. Quase ao terminar sua argumentação Ishii escreve :

"If Rivier were right, then the writer and his co-workers must have missed not only the fifth harmonic but also the

second, third, sixth, seventh, eighth, ninth, tenth, and all the way up except the eleventh harmonic. The experimental evidence stated in Rivier's reference (3) contradicts Rivier's contention."

Entendemos deste final de argumentação que as únicas freqüências que Ishii pode detetar foram as que se aproximavam da quarta e décima primeira harmônica do oscilador de Rivier. Estas freqüências são respectivamente 4,1 e 12,2 giga Hertz. Ora, sabemos de (21) que Ishii obteve um oscilador na freqüência de 8,2 giga Hertz; portanto, é bem provável que a freqüência real do oscilador de Ishii fosse 4,1 com as harmônicas de 8,2 e 12,3 giga Hertz que foram precisamente as freqüências por ele obtidas. Ainda agora permaneceria a dúvida se a freqüência era mesmo 4,1 giga Hertz ou um seu sub-harmônico. Como os números estão bem mais perto dos valores de freqüência de corte comerciais é mais fácil se aceitar a argumentação de Thomson (24) de que as variações medidas são devidas às dispersões de fabricação dos dispositivos. Se não aceitamos completamente esta argumentação, pelo menos torna-se mais plausível agora.

Na nossa opinião a melhor argumentação, baseada em resultados experimentais, que já se publicou sobre o assunto é a de Serophim e Stephenson (30). Procuraram estes autores montar o diodo de túnel num guia de onda similar aos usados anteriormente, porém colocando junto ao diodo uma pequena sonda com a finalidade de detetar oscilações inferiores à freqüência de corte inferior do guia de onda. Desta forma puderam verificar com bastante clareza que o diodo GETD 401 ($f_{ro} = 8,5$ giga Hertz) oscilava na freqüência de 3,8 giga Hertz e apresentava bem nítidas sua segunda e terceira harmônicas. A penas a terceira harmônica estava acima da freqüência de corte do diodo. O modo como se desenvolveu esta experiência nos faz acreditar em seus resultados, principalmente tendo em vista outros dados experimentais que mostraremos a seguir.

e - como argumento final de discussão, precisamos tratar da variação dos parâmetros do circuito diferencial com a freqüência. Poucos trabalhos experimentais neste sentido foram feitos. A referência (19) trata do problema, mas como já citamos anteriormente, ficou invalidada pelas conclusões de

Hawkins (26) que constatou uma constância no valor da condutância negativa com a freqüência. Como a condutância negativa depende apenas de fenômenos quânticos para os quais a freqüência só começa a influir quando da ordem de 10^{12} Hertz, esta conclusão vem confirmar a expectativa.

Exceção feita a esta tentativa frustrada de Mc Phun, no sentido de provar que a condutância crescia com a freqüência e que, portanto, poderíamos obter freqüências de oscilação maiores que a de corte (medida em baixas freqüências) não conhecemos mais nenhum outro trabalho experimental sobre o comportamento dos parâmetros de diodos de túnel.

Uma vez que as explicações referentes à ação do campo elétrico dentro do diodo colocado num guia de onda foram rebatidas e aparentemente deixadas de lado pelos próprios autores, a única explicação possível teria de vir da variação dos parâmetros com a freqüência. Este foi precisamente o trabalho experimental que realizamos para completar esta contribuição de caráter teórico feita nesta secção. Os resultados experimentais mostrados a seguir nos levam à conclusão que a freqüência de corte só tende a diminuir e não aumentar quando levamos em conta as variações dos parâmetros. Aliás, seria algo bastante novo, encontrarmos um dispositivo que tenha seu comportamento melhorado em freqüência devido exatamente às restrições em freqüência que seus parâmetros apresentam. Pelo menos, é exatamente o contrário que observamos em outros dispositivos.

5.4 Resultados experimentais.

Os resultados experimentais que gostaríamos de apresentar estão resumidos nas figuras 16, 17 e 18.

A figura 16 nos mostra o comportamento típico da resistência série e da indutância dos diodos de túnel. A resistência série tem seu valor crescendo de modo mais ou menos linear, chegando mesmo a aumentar de umas cinco vezes seu valor em baixa freqüência quando medido em 2 giga Hertz. Tendo-se em vista que o tempo de vida médio dos portadores em diodos de túnel são da ordem de 10^{-9} s, é de se

RESISTÊNCIA SÉRIE (Ω)

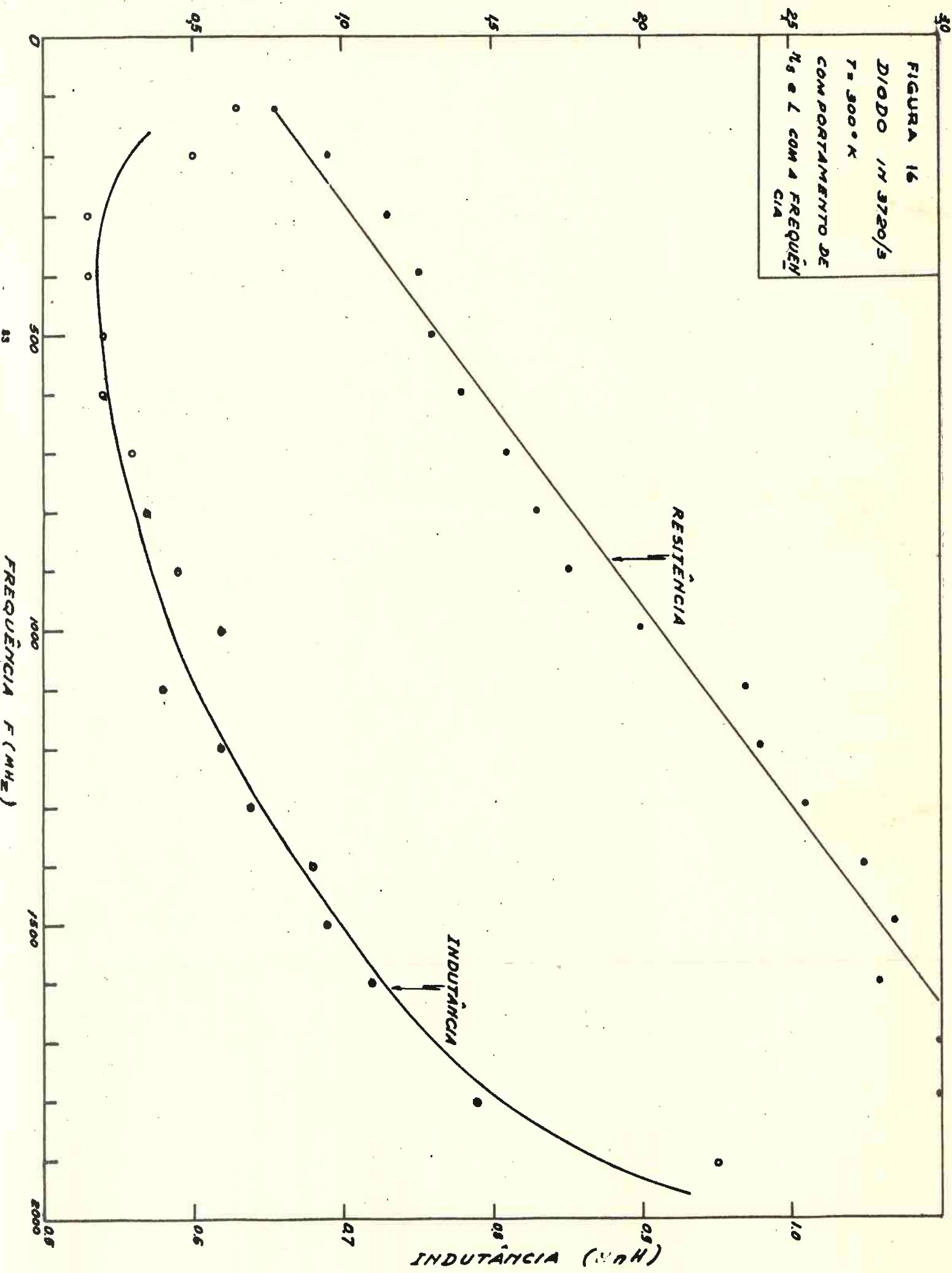


FIGURA 16
DÍODO IR 3720/3
 $T = 300^\circ K$
COMPORTAMENTO DE
 $N_S + L$ COM A FREQUÊNCIA

FIGURA 17

DÍODO IN 3716/3
 $T = 300^\circ K$ $V = 500 mV$
CAPACIDADE FUNÇÃO
DA FREQUÊNCIA

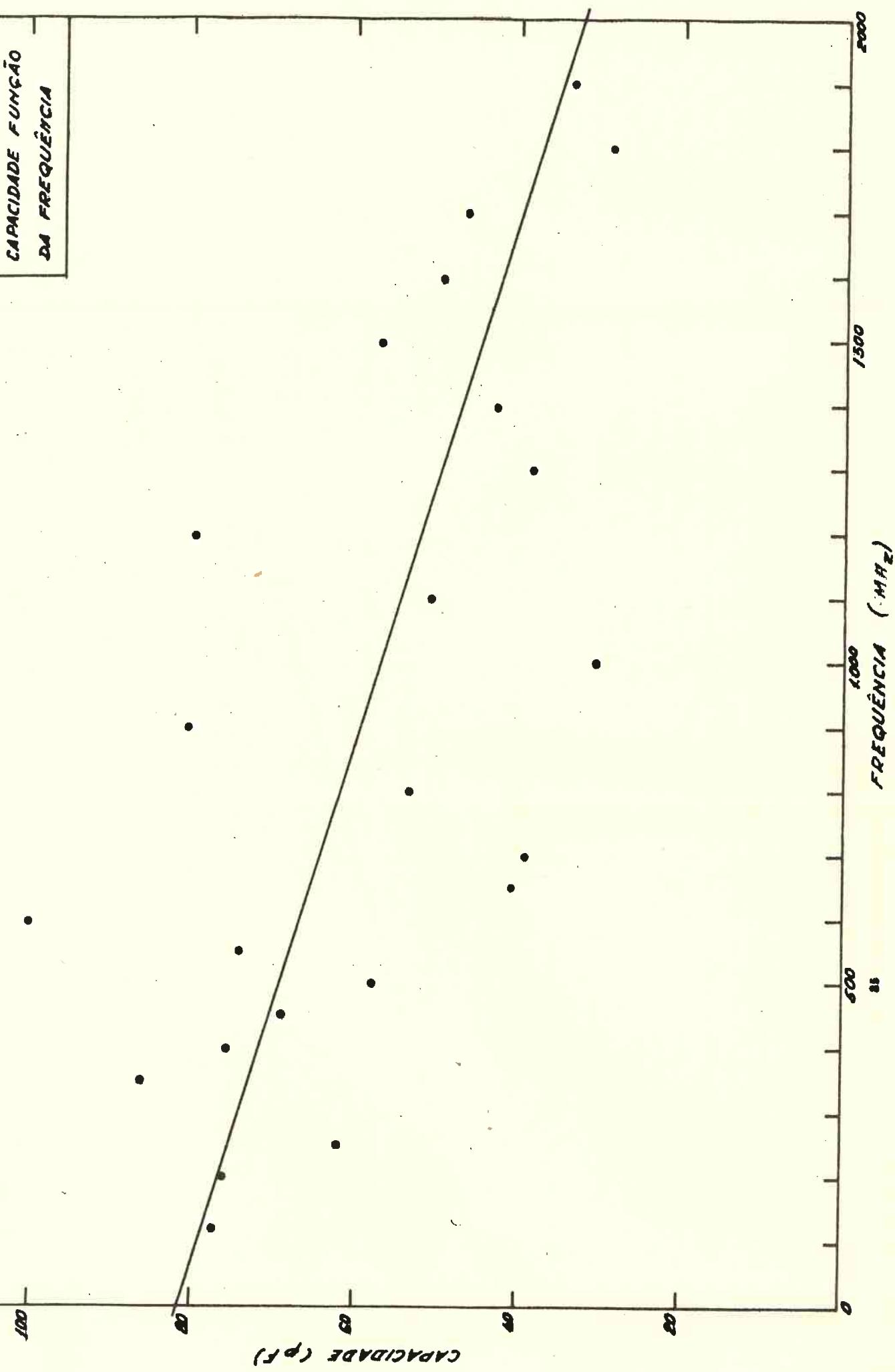
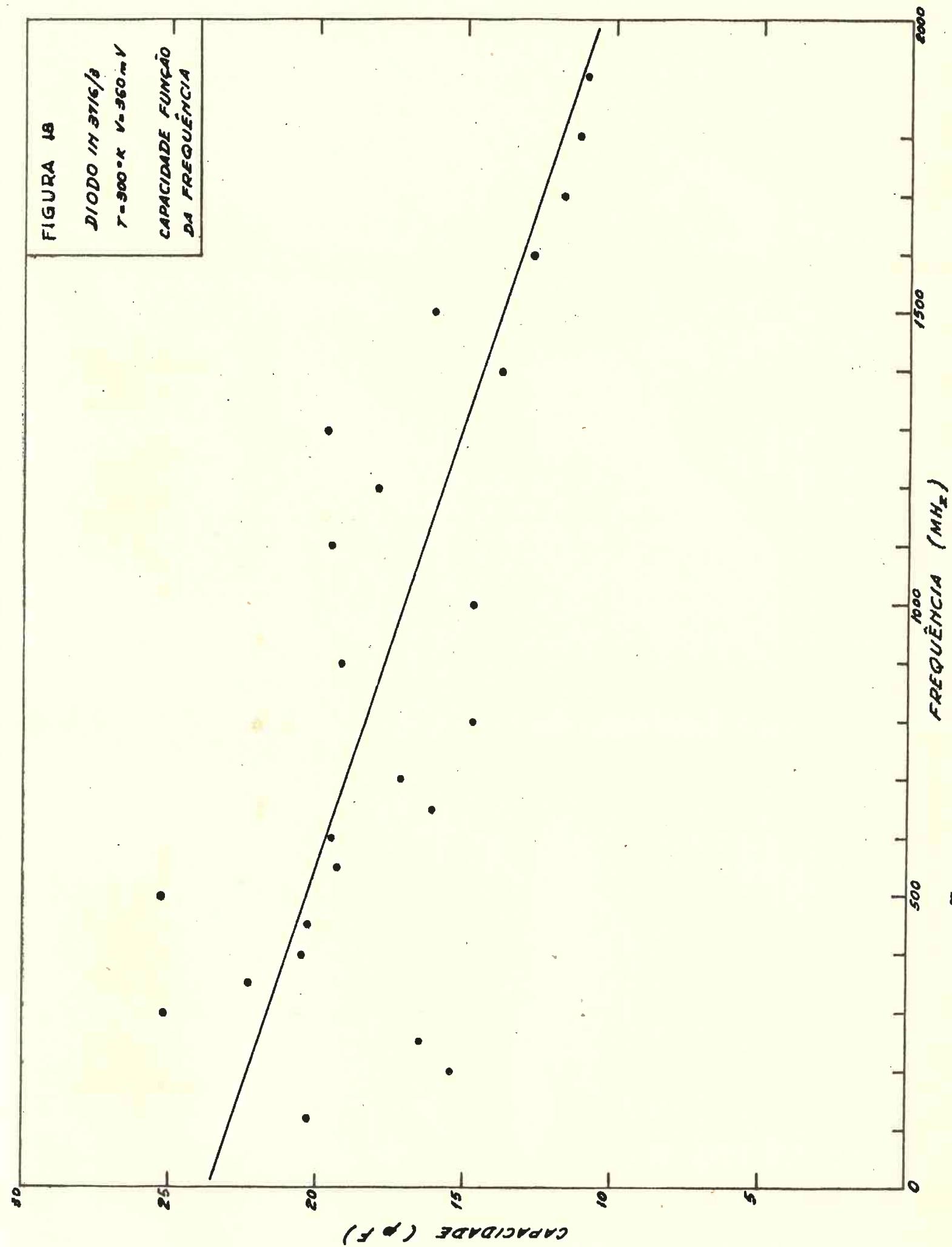


FIGURA 18

DODD IN 31/6/8
 $T = 300^\circ K$ $V = 360 mV$

CAPACIDADE FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA



esperar para freqüências acima de 100 mega Hertz um efeito deste tempo na resistência de um pedaço de semi condutor. Como a resistência série depende de vários fatores, englobando as resistências de contato, efeitos de superfície, tridimensionalidade, é quase impossível fazermos um tratamento teórico da mesma e apenas resultados experimentais são levados em conta.

Quanto à indutância, tudo indica ela é constituída de duas partes: uma devida aos fios de contacto e soquete e, portanto, independente da freqüência; outra, que é muito pequena em baixas freqüências, devida aos fenômenos de difusão junto à junção. Esta segunda componente começa a surgir por volta de 400 mega Hertz na maioria dos diodos testados. Um resultado bastante estranho, cuja explicação não encontramos, foi a diminuição do valor da indutância que se observa em baixas freqüências até uns 300 mega Hertz. Procuramos verificar experimentalmente toda e qualquer fonte de erro nas medidas, mas não pudemos encontrar a razão desta diminuição.

Quanto ao aumento de valor, bastante sensível aliás, de r_s e L , por se tratar de algo novo, procuramos levar em conta várias imprecisões de medida. Estudamos, por exemplo, a existência de uma capacidade em paralelo com o diodo. Concluímos que 1 pico Farad em paralelo com o dispositivo não altera a não ser em poucos % os resultados obtidos até 2 giga Hertz. Maior valor do que este, dificilmente poderia existir na montagem dos diodos de túnel modernos como os que utilizamos. Procuramos levar em conta um erro no acerto do plano de referência e verificamos que nem mesmo erros da ordem de 5mm deixariam de mostrar os parâmetros comportando-se do modo apresentado. Tendo-se em vista o cuidado com que foi projetada a câmara utilizada, os 5mm tornaram-se erro absurdamente grande e quase impossível de ser cometido.

Quanto aos erros de medida, diríamos que raramente são superiores a 3%. Utilizamos um divisor da ponte General Radio 1607 que nos permite ler com bastante facilidade até 0,1 ohm. Desta forma as resistências série que são da ordem de 1 ohm puderam ser medidas com acuidade.

As figuras 17 e 18 nos mostram o comportamento da capacidade da junção, primeiro na região de altas correntes e depois junto ao vale. Assim fizemos porque, como já vimos no capítulo anterior, no vale a capacidade é ainda a clássica, isto é, devido às cargas ligadas. Já na região de altas correntes, surgem as capacidades devidas aos portadores.

No que diz respeito à freqüência o comportamento foi semelhante para ambas as capacidades: elas diminuem ligeiramente com a temperatura. Pensando-se em termos do modelo de uma junção, vamos ver que este resultado também é esperado, porque ao nos aproximarmos de freqüências correspondentes aos tempos de vida dos portadores, qualquer alteração de cargas devido à uma alteração de potencial vai ficar diminuída. O tempo de acomodação dos portadores já começa influir no valor da capacidade e a influência é a do tipo indicado. Variações de fase ou retardos também devem ser observados.

As mesmas considerações que já fizemos sobre imprecisões de medida foram repetidas agora e concluímos pela exatidão de nossos resultados apesar de uma maior dispersão. As medidas agora são feitas por diferença de duas outras e, portanto, a precisão cal. De qualquer forma a lei de variação não deixa dúvidas quanto ao fato de a capacidade diminuir ligeiramente com a freqüência.

Dos resultados mostrados concluímos que os efeitos na resistência série e na indutância tendem a diminuir a freqüência de corte dos diodos enquanto que o efeito na capacidade procuraria aumentar aquela grandeza. No conjunto, as variações das componentes série são muito mais fortes e fazem com que a freqüência de corte dos diodos diminua. Isto significa dizer que devemos esperar freqüências de oscilação sempre inferiores aos valores teóricos calculados pelo circuito diferencial em baixa freqüência. Este fato nós já tínhamos verificado, experimentalmente, mesmo antes das medidas acima descritas.

A fim de completar as conclusões que mostramos item a- da secção anterior, gostaríamos de salientar um fato que nos parece importante. Excepção feita às medidas de freqüências acima da de corte dos diodos de túnel, todos os

outros resultados referem-se a oscilações em freqüências bem abaixo da de corte dada por 5-1. As medidas por nós realizadas em regime senoidal e a de outros autores nos levam à conclusão que a fórmula realmente válida é 5-3 e não 5-1 como normalmente aceita. Mesmo os autores que fornecem esta última fórmula, nos seus resultados apresentam freqüências que muito se aproximam de 5-3. Assim por exemplo:

referência	diodo	freqüência dada por 5-1(giga Hertz)	freqüência medida (giga Hertz)
(31)	-	2,2	1,0
(27)	RCA 1N3849	1,3	1,11
(30)	GE TD 401	8,5	3,8
nossas medidas	1N3720	1,6	0,4
"	1N3718	1,8	1,3
"	1N3713	2,3	1,6
"	RCA 1N3138	1,0	0,46

Se substituirmos os valores dos parâmetros desse diodos em 5-3, obteremos freqüências que se aproximam bastante das medidas. Não encontramos até agora nenhum caso de freqüência de oscilação comprovadamente senoidal próximo da chamada freqüência de corte do diodo. Esta é uma comprovação adicional às considerações que fizemos acima e uma argumentação a mais contra a existência de oscilações acima da freqüência de corte dos diodos.

CAPÍTULO 6 - O DIODO DE TÚNEL COMO OSCILADOR

6.1 Considerações gerais.

Procuraremos neste capítulo estudar o diodo de túnel como um oscilador, investigando algumas das propriedades dos sinais por ele gerados. Os diodos de túnel são frequentemente usados em transmissores de micro ondas, e até em faixas de freqüências mais elevadas. Já existem, comercialmente, diodos de túnel com freqüências de corte superior a 10 giga Hertz. Experimentalmente temos diodos operando na faixa até 500 giga Hertz.

Sempre que quisermos utilizar os diodos de túnel como osciladores precisamos polarizá-los na região de resistência negativa, condição sem a qual o dispositivo não funciona como elemento ativo. Já vimos que diversos são os circuitos normalmente utilizados em paralelo com os diodos. Quase todos os trabalhos teóricos surgidos nestes últimos dois anos se referem a circuitos colocados em guias de onda. Outro modo de empregar os diodos é colocá-los em extremidades de linhas coaxiais. Podemos desta forma interligar os instrumentos de medida de sinal, contadores, pontes, todos eles adaptados para este tipo de conexão.

A ligação de diodos de túnel com linhas de transmissão deu origem à descoberta de novos e interessantes aspectos do problema. Teremos oportunidade de ver na seção seguinte uma descrição do trabalho apresentado na referência (31), onde os autores mostram a comprovação do fato de um diodo de túnel poder agir como um oscilador discreto em freqüências.

Achamos este aspecto do problema interessantíssimo e procuramos desenvolvê-lo já que o referido artigo foi o primeiro a surgir sobre o assunto. Devido ao caráter do nosso trabalho procuramos nos ater aos resultados experimentais obtidos mostrando novos aspectos que auxiliam a comprovação da teoria apresentada em (31). Dentro desta linha procuramos estudar o comportamento das freqüências das oscilações

função da temperatura com o auxílio da câmara termostatada descrita em 2.2. Do ponto de vista experimental a parte mais complexa do problema já estava resolvida e pudemos, portanto, obter uma série de resultados que se casam muito bem com a teoria aproximada exposta em (31).

Outro ponto interessante e importantíssimo do ponto de vista prático é o que apresentaremos mais a seguir sobre a estabilidade de freqüências. Pudemos observar ao realizar medidas das freqüências de oscilação que a estabilidade das mesmas variava muito conforme as condições a que eram submetidos os diodos. Apesar da grande quantidade de parâmetros em jogo, pudemos ir separando as causas e seus respectivos efeitos, a tal ponto de poder apresentar um pequeno resumo de caráter teórico justificando este fato.

Os dois problemas aqui estudados, o do comportamento com a temperatura e o da estabilidade, são problemas novos e cujos resultados experimentais, apesar de poucos até o momento, não nos deixam dúvidas de que poderemos no futuro melhorar de muito as características elétricas dos osciladores com diodos de túnel.

6.2 O diodo de túnel como um oscilador discreto.

Apesar de tão importante e rico em conclusões, este assunto foi pela primeira vez exposto na referência (31), há apenas um ano. Por ser um primeiro trabalho sobre o assunto, muita coisa foi deixada de lado e vários aspectos novos ainda podem surgir. Como já dissemos procuraremos chamar a atenção para dois destes aspectos: comportamento com a temperatura e estabilidade de freqüência.

A figura 13 mostra o modo como fizemos esta experiência bem como o circuito diferencial adotado. Mais uma vez aproveitamos da versatilidade da ponte General Radio 1607, empregando sua linha de transmissão denominada "entrada". Esta, nada mais é do que uma linha de comprimento ajustável, terminada por um curto circuito AC, e possuindo um circuito próprio e devidamente desacoplado para polarizações DC. A realização mecânica destas funções sem

perturbarmos a característica da linha é difícil de se conseguir; daí a razão de nos utilizarmos do instrumento ou parte dele.

Temos portanto numa extremidade da linha um curto circuito, e na outra encontram-se o adaptador do diodo de túnel com a resistência de disco em paralelo e o contador Hewlett Packard 5245-L tendo na entrada o conversor de freqüências 5253B que mede até 500 mega Hertz.

Este sistema assim montado está em condições de polarizar o diodo de túnel em estudo no ponto que desejarmos e medir a respectiva freqüência de oscilação desde que esta seja inferior a 500 mega Hertz. Acima deste valor utilizamos batimento com um oscilador local para medirmos a freqüência.

Como não iremos construir nenhuma teoria nova para o estudo em pauta, vamos nos basear no modelo de circuito diferencial adotado em (31) com todas as simplificações lá apontadas pelos autores. Estas simplificações parecem razoáveis e nos forneceram resultados coerentes. A única diferença entre o circuito adotado em (31) e o mostrado na figura 19 está na terminação da linha de transmissão que passou de um circuito em aberto para um curto circuito. Em se tratando de linhas de transmissão esta modificação não é essencial e não altera as conclusões.

O problema teórico é atacado calculando-se a impedância entre os pontos A e B e impondo-se que esta função tenha polos sobre o eixo $j\omega$ de freqüências. Como se trata de uma equação de variável complexa esta imposição implica em duas equações reais de variável real, ω . A obediência simultânea destas duas equações nos dará a condição de oscilação do diodo que pode ser resumida nas relações:

$$g = G(\omega) \quad (6-1)$$

$$\operatorname{tg}(\omega T/2) = F(\omega) \quad (6-2)$$

Estas equações estão deduzidas em (31). A segunda delas nos mostra exatamente o ponto que estamos estudando, isto é, o diodo de túnel operando como um oscilador discreto onde apenas determinadas freqüências são permitidas. A figura 20 nos mostra um exemplo de solução para as equações

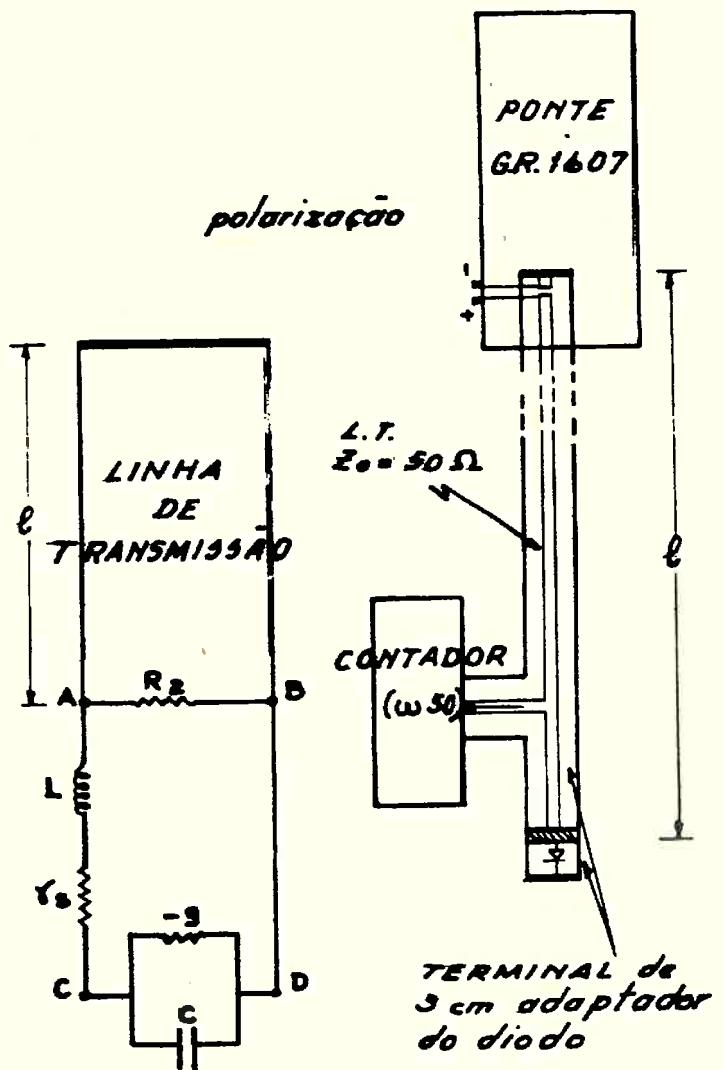
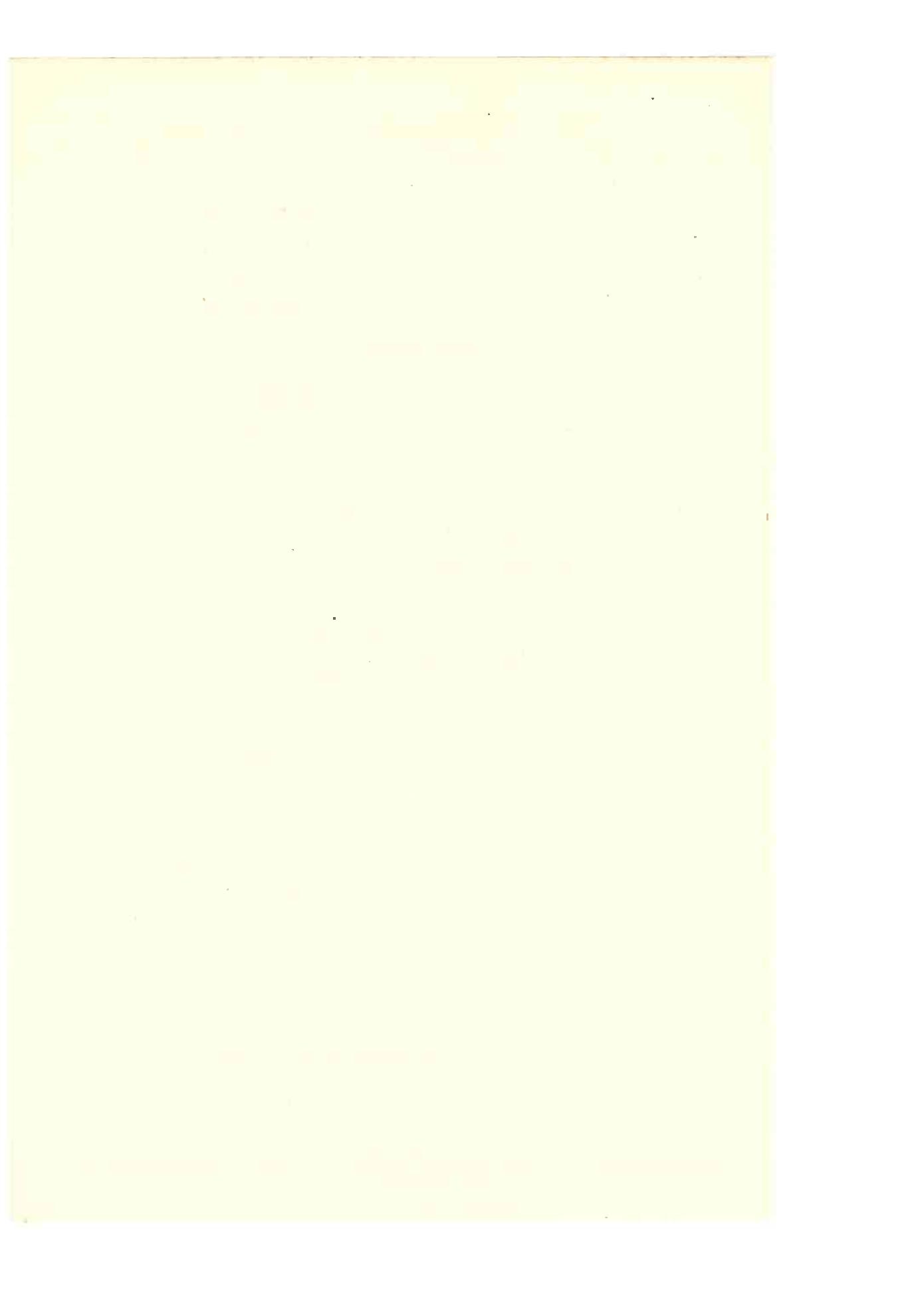


FIGURA 19 Circuito e montagem da medida da freqüência de oscilação.



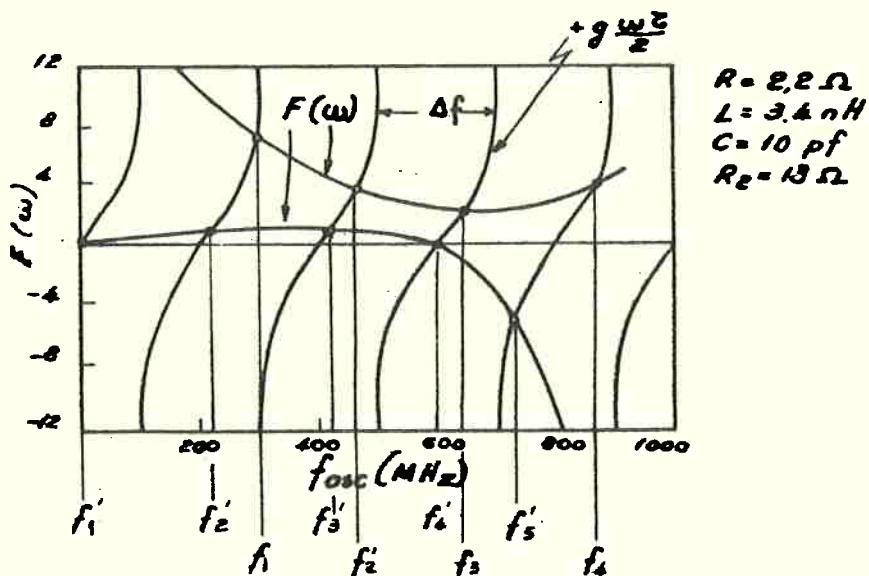
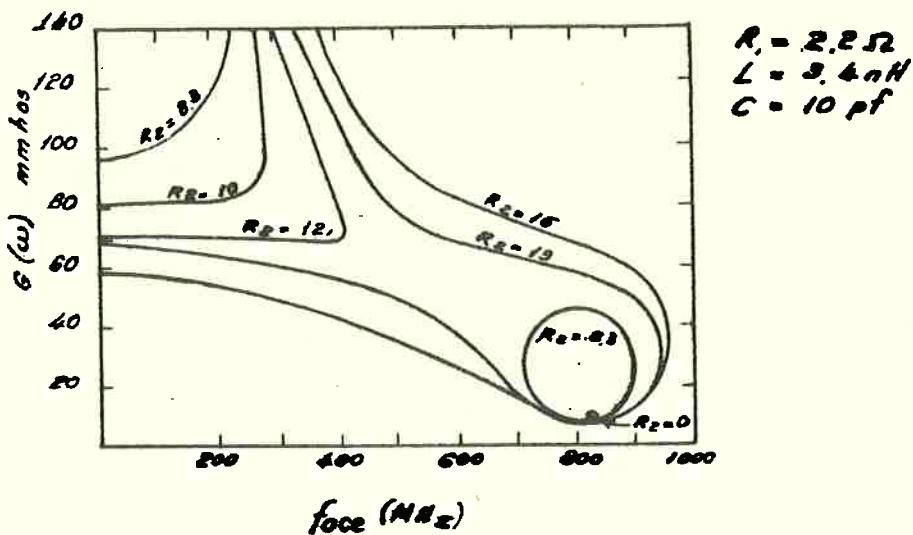


FIGURA 20 Exemplo de solução das equações: $g = G(\omega)$ e $\operatorname{tg}(\omega Z/2) = F(\omega)$.

acima, dando-nos uma idéia da periodicidade das soluções.

Resumindo o estudo teórico apresentado em (31) podemos dizer que a equação (6-2) nos determina, para dado circuito e comprimento da linha de transmissão, uma série discreta de valores possíveis para a freqüência ω . Chamemos a estes valores: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$.

A equação (6-1) nos fornecerá por outro lado uma série de valores da condutância correspondentes aos de freqüência acima enumerados:

$$g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$$

Nestas condições apenas os pontos da curva característica que apresentam condutâncias g_n é que irão proporcionar oscilações do diodo. Na prática porém, estes pontos de polarização se convertem em faixas devido a não linearidade da característica tensão-corrente. Um modelo mais aperfeiçoado do diodo nos daria este resultado fazendo com que, dentro de cada uma destas faixas, a condutância efetiva vista pelo circuito seja uma das g_n requeridas pela equação (6-1). No domínio das freqüências teremos em contrapartida pequenas faixas de valores possíveis em torno das soluções ω_n de (6-2). Como estas faixas na maioria das vezes é bastantemente estreita estará preservado o aspecto de descontinuidade que a teoria de modelos lineares nos mostra.

Desde que as condições para oscilação sejam impostas, qualquer que seja o ponto onde polarizarmos o diodo na região de resistência negativa, haverá oscilação sendo que a freqüência corresponderá à condutância g_n mais próxima daquela no ponto. Ao tentarmos variar lentamente o ponto de repouso, as amplitudes de oscilação vão se alterando de forma a manter a condutância efetiva constante e por conseguinte a freqüência. Teremos apenas uma pequena variação de ω_n devido às não linearidades envolvidas e à variação de C (capacidade da junção) com o ponto de repouso. Portanto, deslocando-se monotônicamente a polarização do diodo, teremos esta adaptação, da condutância real para a condutância exigida

pela região em estudo, g_n , até um ponto onde as amplitudes de oscilação não mais a permitam. Neste instante surge um salto de freqüência e correspondente condutância efetiva. Este salto se dá para a condutância mais próxima e na direção em que estamos variando a polarização. A direção é importante porque, tratando-se de problema não linear, certamente aparecerão histereses que modificarão os resultados conforme o sentido da variável.

Se o salto da condutância não pode ser detetado por tratar-se de valores efetivos, tal já não acontece com a freqüência que pode ser medida e que realmente sofre uma descontinuidade brusca. O valor deste salto, conforme nos mostra a periodicidade da equação (6-2) depende da relação :

$$\Delta \omega \tau / 2 = \pi \quad \text{ou} \quad \Delta \omega = 2\pi / \tau$$

Como temos uma linha cujo atraso é $\tau / 2$, podemos escrever :

$$\tau = l/c$$

onde $l/2$ é o comprimento da linha de transmissão

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s, é a velocidade da luz.}$$

Substituindo-se o valor do atraso da linha na expressão da descontinuidade de freqüência angular, $\Delta\omega$, temos :

$$\Delta f \times l = c \quad (6-3)$$

A equação (6-3) nos diz que o salto em freqüênciá é inversamente proporcional ao comprimento da linha. A fim de comprovar este fato realizamos uma série de medidas destes saltos. Os mesmos podem ser obtidos variando-se qualquer parâmetro que tenha influência na freqüênciá dô diodo. Em (31) a variação apresentada foi a da polarização. Nós procuramos neste trabalho variar além da polarização, o comprimento da linha e a temperatura, cujos resultados mostraremos na próxima secção. Por ora, vamos apresentar alguns números obtidos para reforçar a teoria apresentada em (31).

Estes são os valores por nós obtidos:

Δf (mega Hertz)	ℓ (metros)	$\Delta f \times \ell$ (Hertz x m)
55	5,4	$2,97 \times 10^8$
55,8	4,8	$2,67 \times 10^8$
40	6,8	$2,73 \times 10^8$
26	11,0	$2,87 \times 10^8$
19,89	15,36	$3,05 \times 10^8$
18,55	15,36	$2,85 \times 10^8$
16,94	15,46	$2,62 \times 10^8$
17,47	16,66	$2,92 \times 10^8$
16,38	17,94	$2,94 \times 10^8$
16,06	18,78	$3,01 \times 10^8$

A tabela acima vem comprovar a validade da equação (6-3). Os desvios observados em relação ao valor da velocidade da luz, prende-se ao fato de que os saltos não significam necessariamente que o diodo passe, de uma curva de $\text{tg}(\omega T/2)$ para a seguinte, conservando o mesmo valor de $F(\omega)$ da equação (6-2). Daí podermos ter no salto uma variação de $\Delta \omega T/2$ diferente de $T\bar{\omega}$, o que implicaria num produto $\Delta f \times \ell$ ligeiramente diverso de 3×10^8 .

Até este ponto nós apenas fizemos um resumo da teoria desenvolvida em (31). Daqui para frente iremos tomar pontos não estudados, fornecer complementação teórica quando necessário e principalmente dados experimentais novos que obtivemos mantendo a configuração mostrada na figura 19.

Ainda dentro desta secção, que estuda as descontinuidades sofridas pela freqüência dos osciladores de diodos de túnel, vamos tratar da variação monotônica do comprimento da linha de transmissão.

A figura 21 nos mostra um resultado típico desta experiência. Escolhidas uma polarização e a resistência de disco, variamos continuamente o comprimento da linha através dos ajustes que a ponte 1607 possui. Esta variação precisa ser monotônica sob pena de saltarmos para outra curva de $\text{tg}(\omega T/2)$ e perdemos o comportamento do fenômeno em pauta. Mais uma vez a ponte 1607 mostrou-se utilíssima porque possui ajustes contínuos das linhas de transmissão e nos possibilitou, portanto, a obtenção da curva mostrada na figura 21.

Variamos o comprimento da linha no sentido crescente. Ao aumentarmos o valor de L , estamos diminuindo o valor do período de $\text{tg}(\omega T/2)$, Δf , segundo a equação (6-3). Isto significa que, na figura 20, as curvas de $\text{tg}(\omega T/2)$ se deslocam para a esquerda, fazendo com que a freqüência ω_n em estudo diminua. Como ω_n varia, a condutância efetiva correspondente variará também, implicando numa nova adaptação da amplitude de oscilação a fim de que a condutância no ponto de polarização se transforme na condutância efetiva que está se alterando. Isto acontece até que ω_n exija um valor de condutância g_n tal que a condutância no ponto não possa mais se adaptar. Quando isto se der, o diodo é obrigado a saltar para a curva de ω_n imediatamente superior, pois esta certamente exigirá uma condutância bastante próxima da original. Não acontece aqui o fenômeno que se dá quando da variação de polarização, onde o diodo tem seu ponto de repouso sucessivamente alterado para o ponto seguinte. Agora, o ponto de repouso é fixo, e o diodo obriga a freqüência, depois de ter se deslocado um certo valor, a voltar às condições primitivas. Um estudo pormenorizado feito diretamente sobre as figuras 20 e 21 pode mostrar com mais

clareza o percurso que o ponto de repouso faz durante as transições.

Outro aspecto interessante da figura 21 é que ela nos mostra um fato sobejamente conhecido, mas que pode parecer não obedecido pelas equações (6-1) e (6-2). Toda a vez que aumentamos uma linha de transmissão de um número inteiro de meios comprimentos de onda o circuito a ela associado não pode se alterar. É exatamente este fato que observamos na figura 21. O período da curva em forma de dente de serra é de aproximadamente 55 cm em baixo de 50 cm. em cima. Ora, meio comprimento de onda para a freqüência de 273 mega Hertz é exatamente 55 cm, e para a freqüência de 291 mega Hertz é de 51,5 cm. Isto nos demonstra cabalmente que a periodicidade da linha de transmissão é respeitada. Os saltos obtidos quando da passagem de uma curva para a seguinte também são bem próximos dos esperados pela equação (6-3); são ligeiramente menores devido ao fato de termos variações sensíveis de $F(\omega)$ durante o salto.

6.3 Considerações sobre a estabilidade da freqüência gerada em diodos de túnel.

No transcorrer das medidas referentes às outras secções deste capítulo, observamos que a estabilidade da freqüência variava muito conforme as condições externas impostas ao diodo.

Apesar deste assunto não ter sido levantado em (31), vamos procurar, baseados na teoria ali desenvolvida, demonstrar qualitativamente o porque das grandes variações observadas.

Como já dissemos em 6.2, as medidas de freqüência foram feitas com o contador da Hewlett Packard 5245-L, aparelho de grande precisão, que nos permite ler com segurança superior a uma parte em 10^7 . Isto significa dizer que podemos fazer um estudo de estabilidade de osciladores sem termos problemas quanto à instrumentação de medida.

Para compreender melhor o porque da instabilidade no valor da freqüência de oscilação, vamos fornecer os fatores que podem alterar continuamente e causar as citadas variações.

O primeiro fator é a polarização. Qualquer pequena variação na tensão de polarização dos diodos alterará a freqüência como aliás já citamos. Devemos portanto, no caso de desejarmos um oscilador estável, polarizar o diodo com fonte de boa regulação.

Outro fator será a temperatura, que aliás, influem quase todos os osciladores de maior precisão. No caso, a temperatura irá afetar os valores dos parâmetros internos do diodo, principalmente a resistência série e a capacidade de junção, conforme já vimos no capítulo 4. O valor da resistência de disco também sofrerá pequenas alterações que irão repercutir no da freqüência.

O comportamento mecânico da linha é de grande importância, pois variações micrométricas no comprimento ou nos diâmetros da mesma irão se multiplicar muitas vezes na freqüência de oscilação.

Todos estes fatores e outros, talvez, não mencionados, fazem com que tenhamos um desvio médio de freqüência bem determinado e de fácil medida para cada caso.

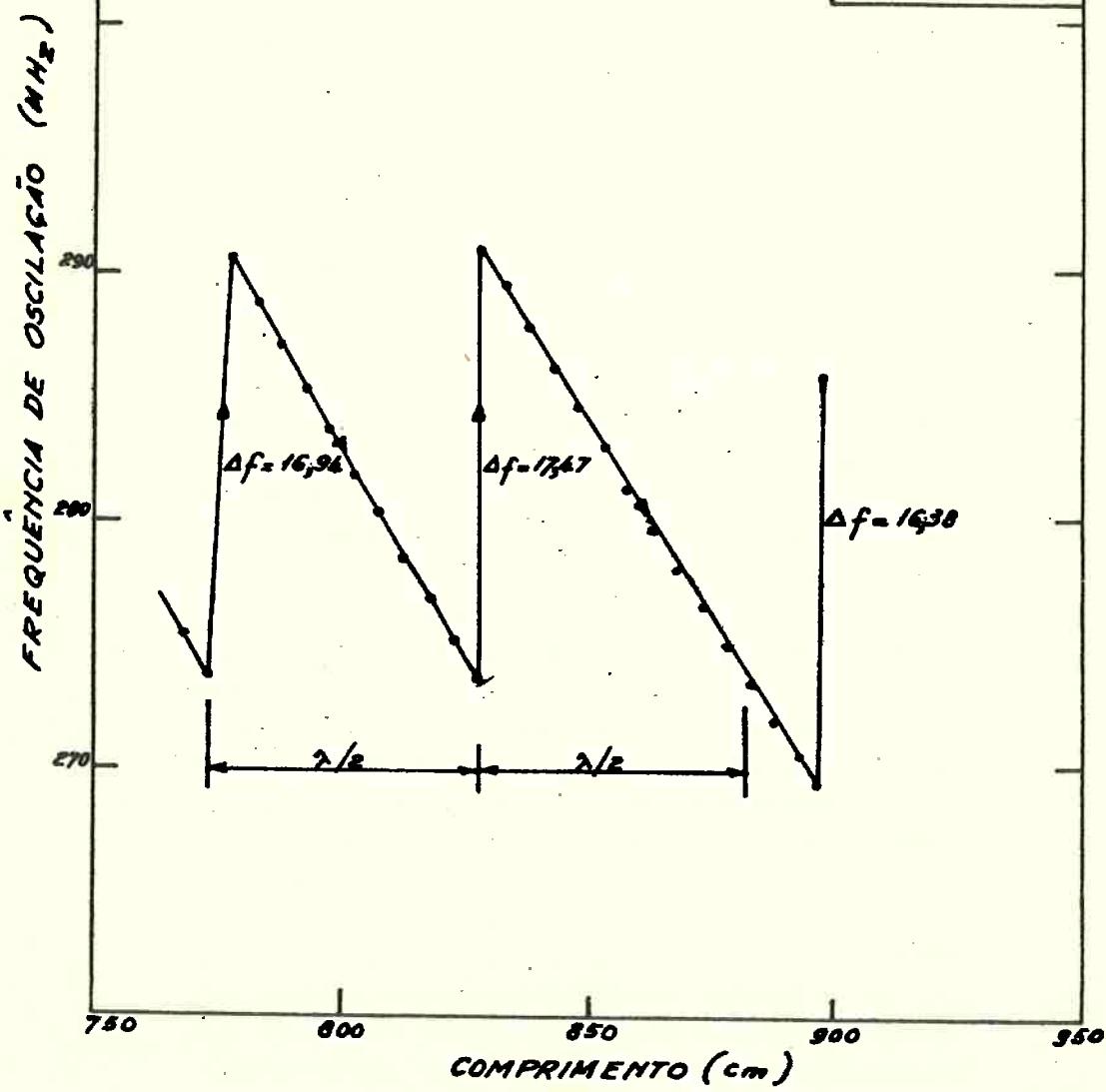
O primeiro elemento de circuito que favorece a estabilidade da freqüência de oscilação é o comprimento da linha, ou o seu atrazo. Quanto maior o comprimento menor será o salto em freqüência de acordo com (6-3). Portanto, considerando-se apenas o aspecto das curvas de $\operatorname{tg}(\omega T/2)$, na figura 20, vemos que, quanto menor o período, menor a possibilidade de variações da freqüência numa mesma curva. Já vimos que os diodos têm grande capacidade de adaptação da condutância no ponto de repouso para a condutância efetiva exigida por $F(\omega) = \operatorname{tg}(\omega T/2)$; logo, se variarmos determinadas grandezas no transcorrer do tempo e o diodo puder adaptar a sua condutância ao valor efetivo, teremos o ponto solução da equação supra deslocando-se sempre dentro de meio período. É lícito esperar portanto, que se Δf é pequeno, a estabilidade deverá ser boa, sempre inferior a $\Delta f/2$.

Daí a conclusão: ao aumentarmos o comprimento das linhas de transmissão melhoramos a estabilidade do oscilador.

Este fato é de grande importância prática, por que significa que podemos adaptar os diodos de túnel em paralelo com linhas de atrazo, simulando linhas de transmissão

FIGURA 21

DIODO
IN 3720/2
 $V = 156 \text{ mV}$
 $T = 300^\circ \text{K}$



Aumentando-se o comprimento das linhas para 7 metros ($f = 300$ mega Hertz) conseguimos uma estabilidade de uma parte em 20.000. Este é um número médio, pois o desvio de freqüências depende de uma série bastante grande de fatores.

Quando trazemos a freqüência de oscilação para junto de seu valor máximo, conseguimos levar a estabilidade para uma parte em 300.000, o que já nos aproxima do comportamento de cristais.

Pudemos, em casos extremos, quando maximizamos todos os fatores, obter num intervalo de meia hora, uma estabilidade de uma parte por milhão. Neste caso tivemos que estabilizar a temperatura da câmara também.

Estamos convencidos de que, com uma pequena prática de circuitos com diodos de túnel, pode um operador comum, levar o diodo para uma situação onde a estabilidade seja de pelo menos uma parte em 10^5 . A freqüência de oscilação é determinada primeiramente pelos parâmetros do diodo e secundariamente pela resistência de disco e a linha de transmissão. Torna-se a linha portanto, um ótimo elemento de ajuste fino de freqüência através da variação de seu comprimento.

Devemos procurar projetar o oscilador de tal forma que o ponto de repouso esteja próximo da condição de máxima freqüência, ou seja, de grande estabilidade.

6.4 Variação da freqüência com a temperatura.

De todos os fatores que influem na estabilidade de freqüência, dois podem ser controlados: a polarização e a temperatura. A polarização depende exclusivamente da qualidade da fonte de tensão que estamos empregando; quanto à temperatura, podemos estabilizá-la colocando o diodo e a resistência de disco em uma câmara como a descrita em 2.2.

A fim de avaliar a importância das variações de temperatura nas de freqüência, procuramos medir, fixadas todas as outras variáveis, o comportamento da freqüência função da temperatura. Isto foi feito em diversas circunstâncias

e alguns resultados são mostrados nas figuras 22 e 23.

Estes gráficos se referem a situações bastante diversas de modo que podemos avaliar o efeito que estamos procurando. A primeira conclusão é a de que a temperatura realiza um papel muito importante nas variações de freqüência. Na figura 22, por exemplo, em baixas temperaturas, a variação obtida foi de 0,4 mega Hertz / $^{\circ}$ K, o que significa uma instabilidade de aproximadamente uma parte em mil quando a temperatura varia de um gráu Kelvin. Os maiores gradientes de freqüência foram observados em baixas temperaturas, sendo que em temperatura ambiente medimos variações dez vezes menores. É o que nos mostram as figuras 22 e 23. Neste último caso podemos obter, sem cuidados especiais, uma variação em torno de 0,04 mega Hertz / $^{\circ}$ K que nos fornece uma estabilidade de uma parte em 5.000 para variações de \pm 1 gráu centígrado. Este resultado é o suficiente para demonstrar nossa afirmativa de que a temperatura é uma das principais causas da variação de freqüência. Já foi dito acima, que variações de uma parte em 3.000 são normalmente encontradas para os diodos de túnel na temperatura ambiente.

Ao tentarmos mostrar as razões de tal comportamento com a temperatura, precisamos nos referir à figura 20. A razão disto está na forma da curva $g = G(\omega)$ que, por se tratar de curva do segundo gráu, tem comportamentos diversos conforme a região em estudo.

Do capítulo 4 sabemos que a capacidade de junção junto ao vale varia lentamente, crescendo com o crescer da temperatura. A resistência série tem normalmente um comportamento metálico na faixa em estudo, isto é, cresce com a temperatura, ligeiramente também. Quanto à condutância, existem muitos trabalhos que procuraram estudar as suas variações função da temperatura. Em se tratando de diodos de túnel de Germanio utilizaremos os dados da referência (10), que nos mostram, através das correntes de pico e vale, que a condutância cresce com a temperatura até perto da ambiente, quando então satura. Para diodos de AsGa, o trabalho por nós feito, (3), fornece dados mais ou menos semelhantes para a condutância. Quanto ao efeito da resistência de disco, desde que ela seja bem menor do que a impedância característica da linha, podemos dizer que pouco influi no

valor da freqüência. Se R_2/Z_0 for pequeno, teremos $F(\omega)$ grande e a curva $\text{tg}(\omega T/2)$ será praticamente vertical, fazendo com que a freqüência fique insensível às variações da resistência de disco.

Uma vez analizado cada fator que determina o comportamento da freqüência, podemos concluir do seu próprio comportamento. O mais importante elemento deste estudo é, sem dúvida, a condutância. Os gráficos da figura 20 nos mostram como a mesma se comporta em relação à freqüência. Admitamos que a temperatura esteja crescendo e, portanto, a condutância. Segundo a equação $g = G(\omega)$, podemos esperar normalmente um decréscimo no valor da freqüência. Quanto à $F(\omega)$, que é a função que determina o ponto de trabalho, nada podemos dizer, pois isto vai depender dos outros parâmetros. Nos casos em estudo tivemos $F(\omega)$ diminuindo com a temperatura e, portanto, a freqüência. Isto significa que a condutância efetiva determinada pela equação (6-1) através de (6-2), varia no mesmo sentido que a condutância real. Desta forma podemos ter grandes variações de temperatura sem observar saltos de uma curva para outra. É o que nos mostra a figura 22, onde temos uma variação desde 100°K até 200°K contínua e decrescente com a freqüência, como previsto pela teoria acima exposta. A variação de freqüência é devida principalmente às variações da condutância. No caso de a função $F(\omega)$ variar com a condutância no sentido oposto do indicado, deveríamos ter uma grande sucessão de saltos. Este fenômeno nós não conseguimos observar porque todos os casos experimentados dão o mesmo tipo de variação para $F(\omega)$.

Um exemplo típico do efeito do ponto de polarização escolhido na estabilidade com a temperatura é o mostrado na figura 23, onde um mesmo diodo foi polarizado nas tensões de 250 e 158 mVolts. O ponto de 250 mV corresponde a um baixo valor de condutância e se encontra bastante afastado da freqüência máxima onde $d\omega/dg$ é nulo. Aí temos uma influência bastante forte da temperatura através de sua influência na condutância. A variação obtida foi de 0,4 mega Hertz / $^{\circ}\text{K}$. O mesmo diodo, nas mesmas condições de circuito, foi polarizado em 158 mV, onde a freqüência é máxima. Nestas condições o efeito da variação da condutância não deve e

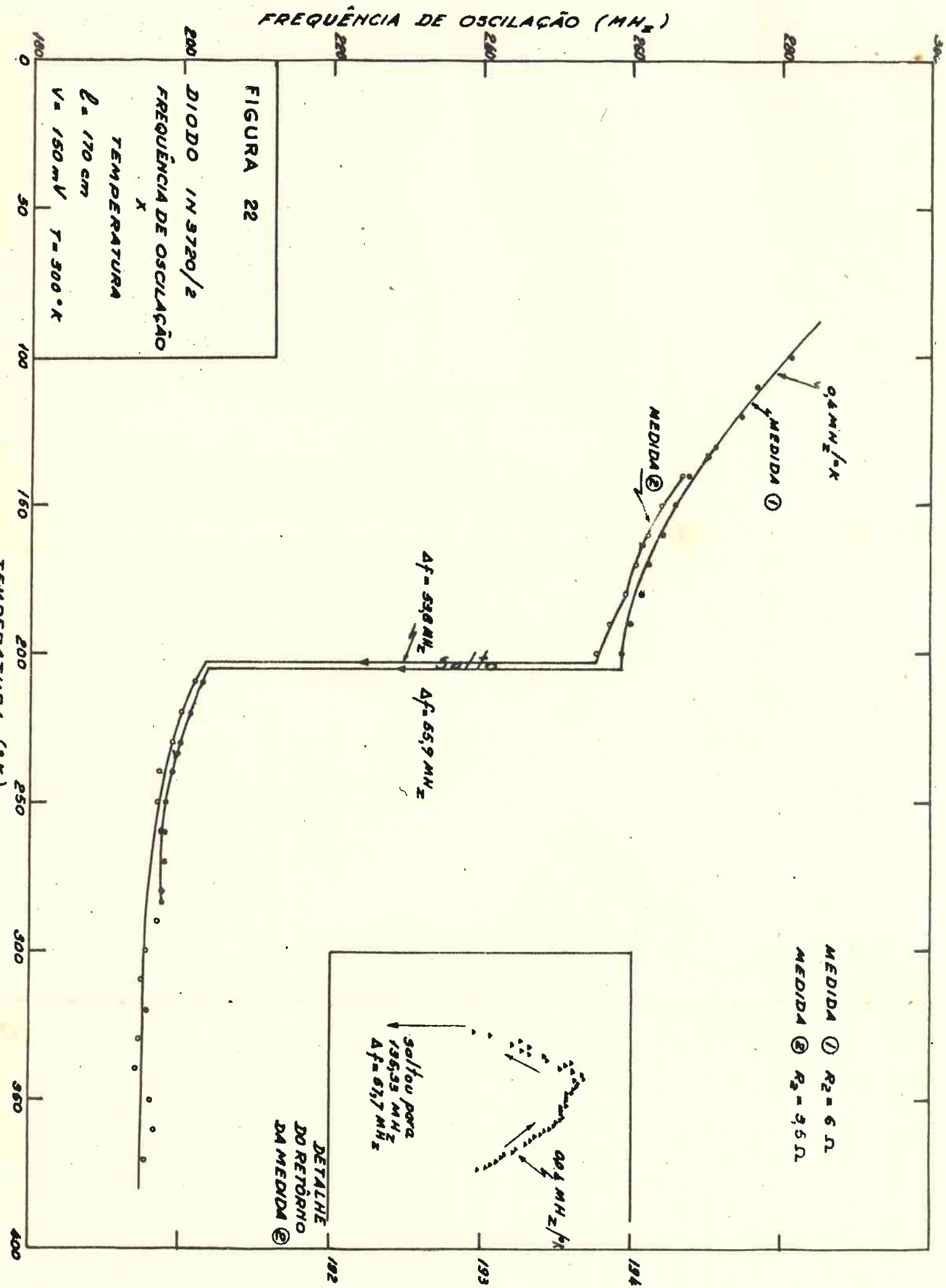


FIGURA 23

DIODO IN3720/2

 $I = 939 \text{ mA}$ $T = 300^\circ\text{K}$ $R_s = 2.5\Omega$ FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO (MHz)

430

426

420

415

410

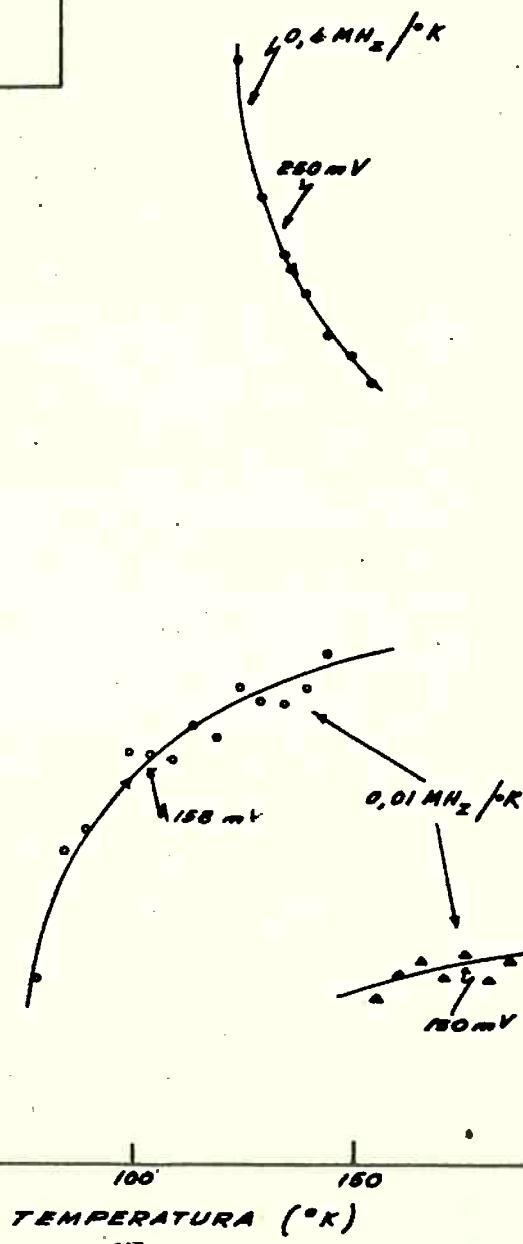
367

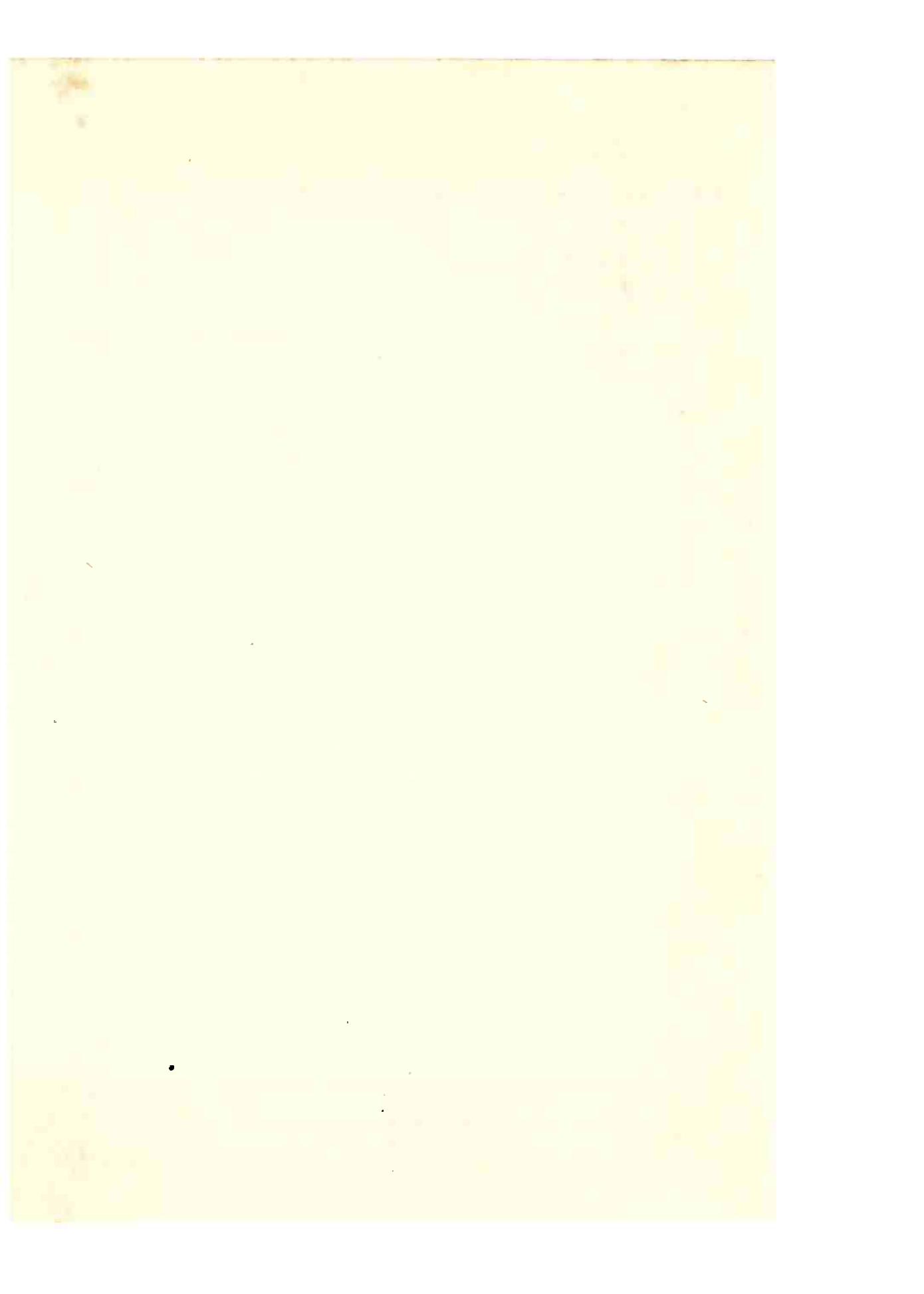
366

365

364

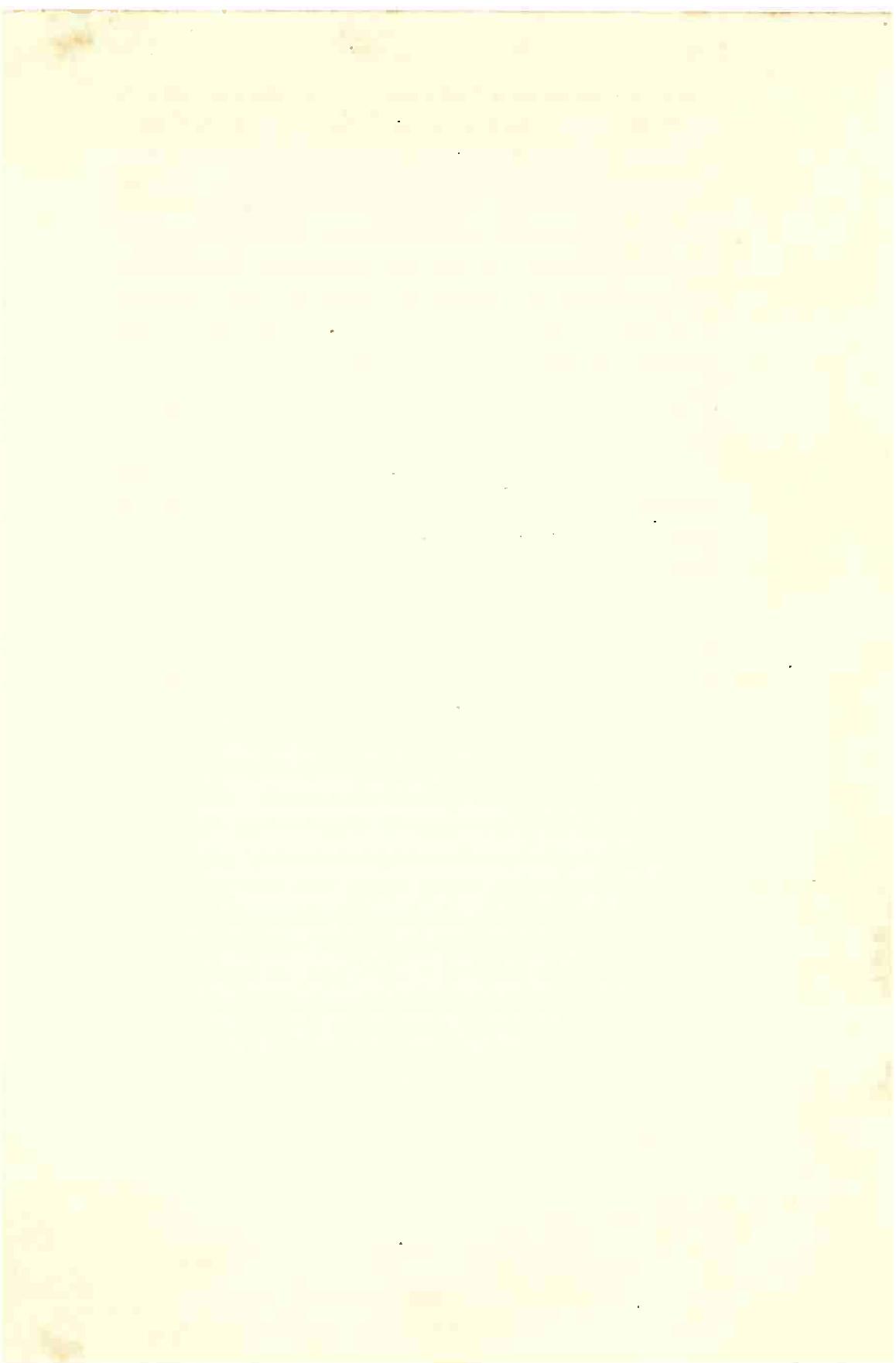
363

FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO (MHz)



realmente não variou a freqüência. Obtivemos um comportamento totalmente diferente do anterior, com a freqüência crescendo com a temperatura. Isto acontece porque, uma vez eliminado o efeito da condutância, restam os efeitos secundários das variações das resistências série e de disco, que a gem em sentido oposto ao primeiro como mostra a figura 20. A um aumento de R_2 , devido a um aumento da temperatura, vai corresponder um aumento da freqüência. Este aumento, no entanto, é muito menor do que os observados anteriormente, pois a influência de R_2 na freqüência é muito menor do que a da condutância. A variação encontrada neste último caso foi de 0,01 mega Hertz/ $^{\circ}$ K, ou seja, 40 vezes menor do que a da polarização anterior.

Verifica-se, portanto, que os raciocínios feitos na secção referente à estabilidade continuam válidos aqui. De vemos, portanto, procurar polarizar o diodo próximo do valor que forneça máxima freqüência, para termos boa estabilidade devido a efeitos de temperatura. A esta mesma conclusão já tínhamos chegado sem nos referir especificamente à temperatura. Os resultados da figura 23 tornam-se, portanto, mais uma prova das conclusões a que chegamos na secção anterior.



CAPÍTULO 7 - RESUMO DAS CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

O trabalho em pauta procurou abranger uma série bastante grande de medidas realizadas com diodos de túnel. As finalidades destas medidas são a maior compreensão dos mecanismos que envolvem este dispositivo, bem como o fornecimento de dados que auxiliem os engenheiros projetistas no cálculo dos circuitos.

Dentro da primeira finalidade, apresentamos o capítulo 3 que conclui pela existência de componentes de corrente de túnel em diodos comuns de Arseneto de Gálio. Foi possível mostrar que existem duas componentes de corrente bem distintas e que estas componentes estão intimamente relacionadas com a corrente de excesso e segunda corrente de excesso observadas em diodos de túnel de Arseneto de Gálio.

Ainda dentro desta finalidade de caráter teórico, mostramos no capítulo 4 que a capacidade de junção nos diodos medidos depende das cargas dos portadores junto à junção, isto quando a tensão externa é elevada. Quando estamos polarizando o diodo com tensões iguais ou inferiores a de vale, a capacidade vai depender primordialmente das cargas ligadas. Foi verificado experimentalmente que a teoria desenvolvida por Sah aplica-se bem ao caso das altas tensões, não apenas quando medimos a capacidade função da tensão, mas também função da temperatura. Desta forma, uma nova justificativa experimental é fornecida comprovando a teoria de Sah. Os resultados obtidos concordaram qualitativa e quantitativamente com os teóricos.

Resumindo as conclusões do capítulo 4 podemos afirmar :

- a) a capacidade junto ao vale aumenta lentamente com a temperatura, desde 77° K até a ambiente. Em alguns casos, para temperaturas maiores, poderá aumentar de modo bem mais rápido.
- b) a capacidade na região de altas correntes aumenta exponencialmente com $-1/T$.

A maior parte das conclusões apresentadas, no

entanto, referem-se à segunda finalidade. Os próprios resultados da variação de capacidade são úteis aos projetistas a fim de que os mesmos saibam do comportamento do dispositivo em outras temperaturas que não a ambiente.

No capítulo 5 procuramos estudar o comportamento dos diodos com a freqüência. Foi dada ênfase no estudo da variação da resistência série, da indutância e da capacidade de junção. Leis de variação bem definidas foram obtidas. Várias verificações experimentais foram feitas com a finalidade de procurar erros sistemáticos que estivessem afeitando os resultados apresentados. Nenhuma das causas normalmente apontadas como fontes de erro puderam ser consideradas responsáveis pelo comportamento final mostrado. Os resultados a que chegamos foram:

a) a resistência série aumenta com a freqüência de maneira aproximadamente linear.

b) a indutância aumenta com a freqüência a partir de 400 mega Hertz apresentando uma componente constante e outra variando bastante, de forma quase exponencial.

c) a capacidade tanto no vale como para altas correntes decresce ligeiramente com a freqüência.

Ainda dentro deste capítulo, procuramos fazer um apanhado histórico da literatura sobre o problema da existência de freqüência de oscilação acima da de corte dos diodos. Mostramos a seguir, como, a nosso ver, deve ser encarado o problema da freqüência de corte de um diodo de túnel. Resultados experimentais foram dados para comprovar nossa ideia. Em resumo, achamos que, para calcular a freqüência de corte: não podemos introduzir nas expressões dos polos da função impedância o valor mínimo da resistência negativa. Isto não pode ser feito indiscriminadamente, pois é preciso provar antes que tal valor de resistência efetiva pode ser assumido pelo diodo quando polarizado num ponto determinado. O método de calcular, a efetiva freqüência de oscilação deve ser feito utilizando-se os resultados de Manney e Doemland (31). Este processo é válido para oscilações senoidais mantidas o que não exclui a possibilidade de rápidos transitórios onde a maior freqüência possível seria a normalmente dada como de corte. Finalizamos este capítulo, concluindo pela não existência de freqüências estacionárias superiores a de corte.

No capítulo 6, aproveitando as teorias dos autores acima mencionados, procuramos estudar a freqüência dos diodos de túnel no que diz respeito à sua estabilidade e comportamento com a temperatura. Mostramos que a estabilidade da freqüência pode variar muitíssimo, dependendo do circuito associado ao diodo e da polarização. Dados para projeto foram mostrados quando se deseja obter um oscilador bastante estável.

Isto foi o que realizamos até o presente e que constituiu a matéria deste trabalho. Certamente muita coisa ainda está por ser feita. Os resultados apresentados em alguns casos nos parecem definitivos e fora de qualquer contestação de caráter experimental. Outros porém, pela absoluta falta de verificação na literatura, ou mesmo pela dificuldade das medidas realizadas, podem trazer dúvidas e devem ser verificados, se possível, por outros processos.

Dentro desta linha de pensamento, procuraremos medir, no futuro, os parâmetros dos diodos de túnel em freqüências bem mais altas. Da mesma forma vamos procurar construir adaptadores para operarem em guias de onda até a banda X ou mais além.

A rotina do projeto de um oscilador a diodo de túnel é ainda complicada e precisa ser simplificada. Acreditamos que um maior número de experiências sobre a medida da freqüência de oscilação dos diodos irá fornecer elementos de simplificação. Um ponto importante e que não foi experimentado é o da colocação de diodos em paralelo com linhas de atraço construídas com elementos concentrados. Estas linhas podem fornecer um atraco muito maior do que o que obtivemos com, por exemplo, 10 metros de cabo coaxial. É bem provável, que a freqüência obtida desta forma seja de grande estabilidade. No entanto, nada podemos firmar de ante mão porque o problema do ponto onde os diodos saltam em freqüência é bastante complexo.

Esperamos, e para isto já temos idéias bem determinadas a respeito, elaborar um programa de computação a partir da característica real do diodo a ser usado, de tal forma a termos a freqüência de oscilação, a amplitude da mesma, e o conjunto de harmônicas geradas. Trabalhos como este já estão surgindo na literatura, porém nenhum procurando

considerar o aspecto da influência das não linearidades da ca
racterística tensão-corrente em um oscilador discreto em
frequência. Talvez deste trabalho possa surgir a resposta de
finitiva ao problema das oscilações acima da frequência de
corte do diodo.

Como pode ser visto, estes e muitos outros pro
blemas não apontados aqui devem ser desenvolvidos no futuro.
Sistemas de medidas, como os descritos no capítulo 2, devem
ser conservados e aprimorados para o uso em outros disposi
tivos que estão surgindo. Do conhecimento cada vez maior
das propriedades que aqui foram estudadas, pode-se pensar
em sintetizar dispositivos ou circuitos com propriedades pr
viamente desejadas. Aí está um imenso campo de pesquisa
por onde pretendemos penetrar em breve. Vamos fabricar
nossas junções, do modo como acharmos que melhor vão a
presentar determinadas propriedades e, em seguida, medí-
las. Desta forma estaremos abrangendo uma área bem mais
larga de conhecimentos e teremos uma flexibilidade incompa
ravelmente maior do que a que temos agora. O trabalho com
diodos de túnel não passa de uma gôta neste oceano que está se
abrindo aos nossos olhos. Os filmes finos e os circuitos inte
grados já estão revolucionando tudo o que se fazia sobre cir
cuitos até cinco anos atrás. Isto foi possível e continua a sê-
lo porque milhares de pesquisadores continuam a descobrir
propriedades novas dos materiais, quer sejam semi conduto
res, condutores ou isolantes.

REFERÉNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NANAVATI, Rajendra P. e ANDRADE, Carlos Américo Morato de - "Excess Current in Gallium Arsenide Tunnel Diodes". Proc. IEEE, vol. 52, p. 869, Julho de 1964.
2. GOLD, R.D. e NANAVATI, R.P. - "Comments on 'Excess Current in Gallium Arsenide Tunnel Diodes'" Proc. IEEE, vol. 53, p. 486-487, Maio de 1965.
3. ANDRADE, Carlos Américo Morato de - "Estudo Integrado da Característica Tensão-Corrente de Diodos de Túnel de Arseneto de Gálio e seu Comportamento com a Temperatura". Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo, 1966.
4. ANDRADE, Carlos Américo Morato de - "Excess and Thermal Currents in Gallium Arsenide Tunnel Diodes". Solid State Electronics, p. 901-903, Setembro de 1966.
5. ESAKI, Leo - "New Phenomena in Narrow Germanium p-n Junctions". Physical Review, vol. 109, p. 603-604, 1958.
6. FRISCH, I. T. - "A Stability Criterion for Tunnel Diodes". Proc. IEEE, vol. 52, p. 922-923, Agosto de 1964.
7. WILFINGER, R.J. e ZOLOTAR, B.A. - "A Bridge for Tracing Tunnel Diode I - V and Conductance Curves", IBM Technical Record, TD 184, Junho de 1962.
8. SOMMERS, H. S. - "Degenerate Germanium II. Band Gap and Carrier Recombination". Physical Review, vol. 124, p. 1101-1110, Novembro de 1961.

9. EISENCRAFT, Marcos - "A Study of the Temperature Dependence of Gallium Antimonide Tunnel Diode I-V Characteristics". Tese de Master of Sciences pela Universidade de Syracuse, EE.UU., Agosto de 1965.
10. CHYNOWETH, A.G.; FELDMAN, W.L.; LOGAN, R.A. - "Excess Tunnel Current in Silicon Esaki Diodes". Physical Review, vol. 121, p. 684-694, Fevereiro de 1961.
11. BARDEEN, J. - The Bell System Technical Journal. vol. 28, p.428, Julho de 1949.
12. SHOCKLEY, W. - "Theory of P-N Junctions in Semiconductors and P-N Junction Transistors". The Bell System Technical Journal, vol. 28, p. 436-489, Julho de 1949.
13. SAH, C.T. - "Effects of Electrons and Holes on the Transition Layer Characteristics of Linearly Graded P-N Junctions". Proc. IRE, vol. 49, p. 603-618, Março de 1961.
14. ANDRADE, Carlos Américo Morato de - "Tunnel Diode Capacitance as a Functions of Applied Voltage". Tese de Master of Sciences pela Universidade de Syracuse, Fevereiro de 1963.
15. NANAVATI, Rajendra P. e ANDRADE, Carlos Américo Morato de - "Tunnel Diodo Junction Capacitance in the Vicinity of Built-in Voltage". Proc. IEEE, vol. 51, p. 1679, Novembro de 1963.
16. CARD, W. Howard - "Bridge Measurement of Tunnel Diode Parameters", IRE Transactions of Electron Devices, vol. ED-8, nº 3, p.215-219, Maio de 1961.

17. ANDRADE, Carlos Américo Morato de - "Anomalias no Comportamento de Junções P-N de Materiais Degenerados (Diódos de Túnel)". Tese de doutoramento, Escola Politécnica da U. S. P., Agosto de 1964.
18. MIDDLEBROOK, R.D. - "An Introduction to Junction Transistor Theory". John Wiley & Sons, 1957.
19. McPHUN, M.K. - "The Equivalent Circuit of the Tunnel Diode". Proc. IEEE, vol. 52, p. 1754, Dezembro de 1964.
20. ISHII, K. e HOFFINS, C.C. - "X-Band operation of S-Band Esaki Diodes". Proc. IRE, vol. 50, p. 1698-1699, Julho de 1962.
21. HOFFINS, C.C. e ISHII, K. - "Microwave Tunnel Diode Operation Beyond Cutoff Frequency". Proc. IEEE, vol. 51, p. 370-371, Fevereiro de 1963.
22. McPHUN, M.K.; ISHII, K. e HOFFINS, C.C. - "Operation of the Tunnel Diode Above its Resistive Cutoff Frequency". Proc. IEEE, vol. 51, p. 1265-1267, Setembro de 1963.
23. SCANLAN, J.O. - "Operation of Tunnel Diode Amplifiers Beyond Cutoff Frequency". Proc. IEEE, vol. 52, p. 435-436, Abril de 1964.
24. THOMPSON, G.W. - "Operation of the Tunnel Diode Above its Resistive Cutoff Frequency". Proc. IEEE, vol. 52, p. 303, Março de 1964.
25. HOFFINS, C.C. e ISHII, K. - "Conditions of Oscillation for Waveguide Mounted Tunnel Diodes". Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-12, p. 176-183, Março de 1964.

26. HAWKINS, P. - "The Equivalent Circuit of the Tunnel Diode". Proc. IEEE, vol. 54, p. 1451-1452, Outubro de 1966.
27. RIVIER, E. - "Comments on Waveguide Mounted Tunnel Diodes"; Proc. IEEE, vol. 53, p. 639, Junho de 1965.
28. JASKOLSKI, S. V. e ISHII, K. - "Multifrequency Microwave Generation Using a Large Capacitance Tunnel Diode". IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-12, p. 361-362, Maio de 1964.
29. ROSENBERG, G. - "Tunnel Diode Cutoff Frequency". Proc. IEEE, vol. 54, p. 1073-1074, Agosto de 1966.
30. SHEROPHIM, G.R. e STEPHENSON, I.M. - "Operation of Tunnel Diodes Above their Resistive Cutoff Frequency". Proc. IEEE, vol. 54, p. 1167-1171, Setembro de 1966.
31. MANNEY, C.H. e DOEMLAND, H.H. - "A Tunnel Diode Discrete-Frequency Oscillator". IEEE Transactions on Circuit Theory, vol. CT-13, p. 71-73, Março de 1966.
32. YAMASHITA, E. e BAIRD, J.R. - "Theory of a Tunnel Diode Oscillator in a Microwave Structure". Proc. IEEE, vol. 54, p. 606-611, Abril de 1966.