

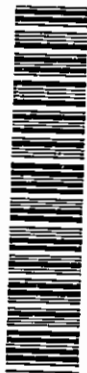
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



"CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIDA
DE UMIDADE DO SOLO ATRAVÉS DE TÉCNICA DE
MICROONDAS"

Dissertação apresentada junto ao
Departamento de Engenharia Elétrica
da Escola Engenharia de São Carlos
- USP - para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100035595

Autor: *Paulo Sergio de Paula Herrmann Jr*

Orientador: *Prof. Dr. Sergio Mascarenhas*

São Carlos

-1993-

Eng. Electrica

| | |
|--------|-----------|
| Class. | Jese EESC |
| Curr. | 2731 |
| Tombo | 029193 |

31100035595

st 0736496



[Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page]

"Quando a história está em sua mente, você percebe sua relevância para com aquilo que esteja acontecendo em sua vida. Isso dá perspectiva ao que lhe está acontecendo. Com a perda disso, perdemos efetivamente algo, porque não possuímos nada semelhante para pôr no lugar."

Joseph Campbell
(1904-1987)

Dedico

Aos meus pais, Paulo Sergio e Maria de Lourdes, a meus irmãos Marcelo (*in memoriam*), Anelise e Pedro Henrique, a minha esposa Eliana e a meus filhos Leonardo e Paulo Lourenço. Por serem a seiva da árvore que representa a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Não é fácil lembrar de todas pessoas as quais devo, com toda a minha gratidão, os meus sinceros agradecimentos pelo apoio, incentivo e compreensão. Alguns nomes dos que acreditaram neste trabalho estão vagos em minha mente, se não os cito com palavras, conservo-os na memória.

Ao professor Dr. Sergio Mascarenhas de Oliveira. Impossível seria nas poucas palavras que transcrevo, traduzir a admiração e o apreço que lhe tenho. Na sua pessoa e nas suas realizações pude vislumbrar a importância do conhecimento científico para o desenvolvimento humano e que, acima das dificuldades, a ciência pode ser um misto de exploração e divertimento. Agradeço a oportunidade de sua orientação, como também aprendizado científico, por compartilhar de sua amizade e, sobretudo, por sua dedicação e empenho para a realização deste trabalho.

Ao Dr. Paulo Estevão Cruvinel expresse o meu profundo sentimento de gratidão, pois me transmitiu com amizade, companherismo, dedicação e responsabilidade, conhecimentos científicos ímpares, os quais provocaram o despertar de meu interesse pelo desafio que é a pesquisa.

Ao Dr. Silvio Crestana pela proposição deste trabalho, por acreditar em sua realização, por sua amizade e incentivo constante.

Ao Dr. Luiz Alberto Colnago pelas importantes sugestões no transcorrer do trabalho e por sua amizade sincera e tranquila.

Ao Dr. Ladislau Martin Neto pelo seu incentivo e apoio com a infra-estrutura.

Ao pesquisador Carlos Manoel P. Vaz pelo incentivo e pelas sugestões direcionadas para a física do solo.

Ao pesquisador Clovis Isberto Biscegli pelas proveitosas discussões e sugestões no início deste trabalho.

Ao prof. Dr. José Carlos Sartori da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, pela oportunidade de discutir e por suas sugestões no trabalho.

Ao Rubens Bernardes Filho pelo apoio e ajuda na editoração do texto da dissertação.

Aos companheiros Ladislau M. Rabello, Wilson S. Ferreira, André T. Neto, Lucio A. C. Jorge, Alvaro Macedo, João M. Naime, José Dalton e Ricardo Ynamasu pelo incentivo e amizade.

A minha esposa Eliana e meus filhos Leonardo e Paulo Lourenço pelo carinho, compreensão, paciência e força.

A meus pais, irmãos e familiares que me fortalecem com o seu entusiasmo e nossa união.

À Maria Lucia de P. Herrmann pela constante harmonia que nos cerca.

Ao pesquisador do CNPMF, Dr. Luis Marcelo A. Sans, pela ajuda com as amostras de solo e discussões sobre o trabalho.

Às bibliotecárias da EMBRAPA-NPDIA Véra L. C. Octaviano e Janis P. Baldovanotti, pelo apoio nas correções e nas referências bibliográficas.

Aos companheiros da XVII turma de formandos da Faculdade de Engenharia de Barretos, Douglas Lunardi, José Ordálio, Valdir Velone, Ricieri Carlone, Paulo Correa Alves e Nádia Pagnoca pela união demonstrada em nossos anos do curso de engenharia.

Aos colegas do CPqD da TELEBRÁS, os engenheiros Mauro de L. Coimbra, Edson C. dos Reis, Paulo R. Favareto e Samuel Lauretti, pelo apoio fundamental na área de processos de medidas com sistemas de microondas e pelas valiosas discussões.

Ao Valentim Monzane pelos laboriosos desenhos desta dissertação.

Ao Luiz Aparecido de Godoy e Wilson Risardi, técnicos da oficina mecânica do NPDIA pelo apoio no desenvolvimento das peças utilizadas no sistema.

Aos pesquisadores do IAC Dr. Sidney R. Vieira, pelo seu incentivo e amizade e Dr. Otavio Camargo pelo valioso apoio na obtenção de amostras e sugestões.

Às secretárias Suzete e Ana Maria, do NPDIA, pelo serviço de datilografia.

A todos os funcionarios da EMBRAPA-NPDIA pelo apoio pela amizade e pelo cordial ambiente de trabalho.

A todos os meus familiares que com suas orações, incentivo e apoio me ajudaram a concluir e a realizar este trabalho.

RESUMO

O conteúdo e a disponibilidade de água no solo são parâmetros de fundamental importância nos vários campos da ciência básica e aplicada bem como nos de tecnologias para agricultura, geologia, meteorologia, hidrologia e várias áreas da engenharia.

As técnicas mais utilizadas para medida de água no solo são as gravimétricas, a de moderação de neutrons e atenuação de raios gama e sensoriamento remoto.

Propomos no presente trabalho um sistema para medida do teor de umidade do solo que utiliza a transmissão e a recepção de sinal de microondas por intermédio da técnica de guia de onda, na banda X, com frequência de trabalho de 10 GHz e potência de 25 mW.

Através da interação de ondas eletromagnéticas, na frequência de microondas, com o sistema água solo obtém-se uma maior ou uma menor atenuação do sinal dependendo do conteúdo de umidade volumétrica presente. Em testes que realizamos a nível de laboratório comprovamos, a correlação da atenuação em dB com a umidade volumétrica em solos dos tipos argilosos e arenosos, que permite a utilização da técnica proposta.

Dentre os principais benefícios que podem ser obtidos com o instrumento aqui proposto, pode-se citar: o uso de uma metodologia não-destrutiva, fácil medida da água do solo, portabilidade, o uso de radiação não-ionizante, rapidez na medida e baixo custo.

ABSTRACT

The availability and the water content in soils are important parameters in fields of both basic and applied science. They are also very important in the areas of agriculture, geology, meteorology, hydrology, and others engineering fields.

The conventional techniques used to measure water content in soils are: the gravimetry, neutron probes and gamma-ray attenuation.

In this work we investigate the use of microwaves attenuation to measure soil water content. In this work an instrument was designed, built and developed for such measurements. A new architecture using a Gunnplexer diode was used working at a frequency of 10GHz (X-Band) allowing a 25mW output microwave signal.

Measurements of the water content using both sand and the clay soils samples were carried out. Results confirmed the relationship between soil water content and the attenuation of the microwave signal.

The main advantages of this design and methodology are: it is a non-destructive technique, the apparatus is easy to use and handle, it does not use radioactivity sources, and it has a low cost.

ÍNDICE

| | | |
|---|--|----|
| Glossários de Símbolos | I | |
| Lista de Figuras | IV | |
| Capítulo I | PRINCIPAIS MÉTODOS PARA MEDIDA DE UMIDADE DO SOLO | 1 |
| 1.1 - Introdução | | 1 |
| 1.2 - Técnica Gravimétrica | | 2 |
| 1.2.1 - Umidade à Base de Peso μ | | 2 |
| 1.2.2 - Umidade à Base de Volume θ | | 3 |
| 1.3 - As Técnicas Nucleares | | 5 |
| 1.3.1 - O Espalhamento de Nêutrons | | 5 |
| 1.3.2 - A Atenuação de Raios gama | | 8 |
| 1.3.3 - A Tomografia Computadorizada | | 13 |
| 1.4 - As Técnicas Eletromagnéticas | | 18 |
| 1.4.1 - Métodos Utilizando Microondas | | 21 |
| 1.4.1.1 - Métodos de laboratório | | 21 |
| 1.4.1.2 - Métodos de campo | | 23 |
| 1.4.1.3 - Técnica de reflectometria no domínio do tempo | | 25 |

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| | 1.5 - Técnica Higrométrica | 28 |
| | 1.5.1 - Método de Medida de Umidade do Solo Utilizando a Resistência Elétrica do Solo | 28 |
| Capítulo II | FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE MICROONDAS | 31 |
| | 2.1 - Introdução | 31 |
| | 2.2 - Propriedades das Ondas Eletromagnéticas- microondas | 34 |
| | 2.3 - Guias de Onda | 38 |
| | 2.4 - Detecção de Potência de Microondas | 50 |
| | 2.5 - Propriedades de Transmissão | 51 |
| | 2.5.1 - Acoplamento Energético | 51 |
| | 2.5.2 - Absorção Energética | 54 |
| Capítulo III | CIRCUITOS E DISPOSITIVOS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DE MICROONDAS | 57 |
| | 3.1 - Introdução | 57 |
| | 3.1.1 - Tubo de Vácuo de Microondas | 57 |
| | 3.1.1.1 - Oscilador Barkhausen - Kurz | 57 |
| | 3.1.1.2 - Magnetron | 58 |

| | | |
|-------------|---|----|
| | 3.1.1.3 - Klystron | 59 |
| | 3.1.2 - Semicondutores | 61 |
| | 3.1.2.1 - Diodo por efeito avalanche | 61 |
| | 3.1.2.2 - TRAPATT | 63 |
| | 3.1.2.3 - Oscilador Gunn | 64 |
| Capítulo IV | ARQUITETURA PROPOSTA DO INSTRUMENTO PARA MEDIDA DA UMIDADE DO SOLO UTILIZANDO TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE MICROONDAS | 72 |
| Capítulo V | RESULTADOS | 82 |
| | 5.1 - Calibração da técnica e comparação com métodos convencionais para medida de umidade do solo | 82 |
| | 5.1.1 - Materiais e Métodos | 82 |
| | 5.1.2 - Preparação de Amostras | 84 |
| | 5.2 - Resultados e Discussões | 87 |
| | 5.2.1. Análise dos parâmetros S para validar a utilização do guia de onda com a fenda; | 88 |
| | 5.2.2. Análise da instabilidade da fonte de alimentação e sua influência na medida; | 90 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| | 5.2.3. Cálculo do erro de leitura, feito com o multímetro de Fluke; | 91 |
| | 5.2.4. Cálculo do número de repetições de amostras através da Lei de Tukey; | 93 |
| | 5.2.5. Medida experimental de erro imposto pelo sistema; | 94 |
| | 5.2.6. Relação da umidade volumétrica θ_V (%) com atenuação do sinal em dB para os dois tipos de solo já citados e as microesferas de vidro; | 96 |
| | 5.2.7. Validação do método, comparando com medidas do parâmetro S21, perda de inserção, através de um Network analyser Mod. 805 -Hewlett Packard; | 104 |
| | 5.2.8. Influência da densidade na medida da umidade volumétrica: | 107 |
| | 5.2.9. Influência da variação da temperatura ambiente nas medidas | 107 |
| Capítulo VI | DISCUSSÕES E CONCLUSÕES: PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PRESENTE DISSERTAÇÃO. | 109 |
| Capítulo VII | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 112 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 114 |
| | APÊNDICE A | 123 |

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS

| | | |
|---------------------------------|---|-------------------------|
| c | velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no espaço (vácuo) = 3×10^8 | m/s |
| E, (E _o) | vetor intensidade de campo elétrico, (no vácuo) | V/m |
| f | frequência | Hz, (s. ⁻¹) |
| f _c | frequência de corte | Hz |
| f _o | frequência no vácuo | Hz |
| H, (H _o) | vetor intensidade de campo magnético | C/m s |
| N _o | nº de fótons incidentes | |
| N _(x) | nº de fótons que passa através de uma amostra | |
| P _o , P _m | potências acopladas pela carga não-casada | W |
| PR | potência refletida de microondas | W |
| PT | potência transmitida de microondas | W |
| P _v | potência dissipada por unidade de volume | W/m ³ |
| R | resistência elétrica | ohm |
| R _n | coeficiente de reflexão normal da onda | |
| SWR | razão de voltagens de ondas estacionárias | (decimal) |
| UH | unidade Hounsfield | |
| S | salinidade | |
| T | tempo de trânsito | s |
| E | campo elétrico vetorial | V/m |
| H | campo magnético vetorial | |
| P | vetor de Poyting | W/m ² |
| tan δ | fator de perda = $\epsilon_{i(\omega)} / \epsilon_{r(\omega)}$ | |
| T | temperatura | ° C, K |
| T = 1/f | período | s |
| T _n | coeficiente de transmissão normal da onda | |
| TE | modo de propagação de onda transversal elétrico | |
| v | velocidade de fase = ω/β | m/s |
| v _g | velocidade de grupo de propagação das microondas | m/s |

| | | |
|------------------------|--|---------------------------------|
| x_s | dimensão linear das partes sólidas | m |
| z | profundidade de penetração no material = $1/\alpha m$ | |
| x_r | dimensão linear do recipiente | m |
| x_w | dimensão linear da parte líquida | m |
| Z_m | impedância intrínseca do dielétrico | ohm |
| Z | impedância intrínseca do espaço livre (vácuo) | ohm |
| α | fator (constante) de atenuação | m^{-1} |
| β | fator (constante) de fase da onda = $2\pi/\lambda$ | m^{-1} |
| γ | fator de propagação complexo = $\alpha + j\beta$ | m^{-1} |
| $\epsilon_{r(\omega)}$ | constante (permissividade) dielétrica real | F/m |
| $\epsilon_{i(\omega)}$ | constante (permissividade) dielétrica imaginária | F/m |
| ϵ_r' | constante (permissividade) dielétrica relativa = $\epsilon_{r(\omega)}/\epsilon_o$ | |
| ϵ_r'' | fator de perda elétrica relativa = $\epsilon_{i(\omega)}/\epsilon_o$ | |
| ϵ_o | constante dielétrica do vácuo = $8,854 \times 10^{-12}$ | F/m |
| $\epsilon_{(\omega)}$ | constante dielétrica complexa = $\epsilon_{r(\omega)} - j\epsilon_{i(\omega)}$ | F/m |
| ϕ | ângulo de incidência da onda no espaço livre | rad |
| ψ | ângulo de refração da onda no dielétrico | rad |
| λ | comprimento de onda | m |
| λ_c | comprimento de onda de corte | m |
| λ_n | comprimento de onda de corte na direção normal ao guia de onda | m |
| λ_p | comprimento de onda do guia de onda | m |
| λ_o | comprimento de onda no vácuo ou na direção de propagação | m |
| ν | inclinação do cilindro | grau |
| μ' | permeabilidade magnética | kg m/C ² |
| μ'' | fator de perda magnética | kg m/C ² |
| μ | permeabilidade magnética complexa = $\mu_r - j\mu_i$ | kg m/C ² |
| ω | frequência angular | rad/s |
| ρ | densidade | kg/m ³ |
| σ | condutividade elétrica | Siemens/m |
| μ_m | umidade a base de peso | kg.kg ⁻¹ |
| θ_v | umidade a base de volume | m ³ .m ⁻³ |
| ρ_g | densidade global do solo seco | kg/m ³ |

| | | |
|------------|--|----------|
| μ | coeficiente de atenuação linear da amostra | m^{-1} |
| μ_s | coeficiente de atenuação de massa da parte sólida | m^2/kg |
| ρ_s | densidade volumétrica da parte sólida | kg/m^3 |
| μ_w | coeficiente de atenuação de massa da parte líquida | m^2/kg |
| ρ_w | densidade volumétrica da parte líquida | kg/m^3 |
| μ_r | coeficiente de atenuação de massa do recipiente | m^2/kg |
| ρ_r | densidade volumétrica do recipiente | kg/m^3 |
| ω_R | frequência de relaxação dos dipolos no meio | rad/s |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura I-1- Feixe colimado de radiações gama para determinação de densidade aparente e umidade do solo. | 10 |
| Figura I-2 - Diagrama de blocos do minitomógrafo de raio X e raio γ computadorizado (CRUVINEL; 1987; CRUVINEL et al; 1990). | 17 |
| Figura I-3 - Medida da constante dielétrica para cinco tipos de solo (HALLIKAINEM; et all, 1985). | 19 |
| Figura-I-4 - Diagrama de bloco de um sistema para a medida da constante dielétrica com a técnica de guia de onda. | 22 |
| Figura-I-5 - Diagrama de bloco de um sistema para a medida da constante dielétrica no espaço livre. | 22 |
| Figura I-6 - Princípio básico de medida da constante dielétrica do solo utilizando a técnica TDR. | 27 |
| Figura I-7. Construção dos blocos de absorção | 29 |
| Figura II-1. Uma onda eletromagnética monocromática plana. | 32 |
| Figura II-2. Faixa Espectral e estado de energia | 35 |
| Figura II - 3. A representação esquemática de uma linha de transmissão coaxial. | 39 |
| Figura II-4. Representação gráfica das múltiplas reflexões em zigzague da onda eletromagnética em um duto. | 41 |
| Figura II-5. Representação do campo elétrico: (a) tridimensional; (b) corte da secção transversal. | 42 |
| Figura II-6. Comportamento dos campos magnético e elétrico no modo $TE_{1,0}$. | 43 |
| Figura II-7. Representação dos campos elétricos e magnéticos no interior de um guia de onda retangular. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura II-8. Ilustração da reflexão em ziguezague da onda eletromagnética e a representação matemática | 46 |
| Figura II-9. Reflexão e transmissão da energia de microondas. | 52 |
| Figura III-1. Princípio de funcionamento do oscilador Barkhausen-Kurz, que se constitui em método simples de obtenção de sinais de rf em uhf. | 57 |
| Figura III-2. Diagrama esquemático do magnetron. | 58 |
| Figura III-3. Princípio de funcionamento da válvula Klystron. | 59 |
| Figura III-4. Podem ser vistos a estrutura do diodo IMPATT, o campo elétrico e formas de onda de tensão e corrente. | 61 |
| FIGURA III-5- Quando a tensão de polarização aplicada a uma amostra de arseneto de gálio do tipo-n (GaAs) é aumentada acima do ponto limite, a corrente passa a se tornar instável e pulsar de modo cíclico. Este é um resultado da resistência negativa e é denominado efeito GUNN. | 64 |
| FIGURA III-6. A velocidade do elétron em um GaAs como uma função do campo elétrico aplicado. | 65 |
| Figura III-7 - Diodo Gunn em sua forma de "wafers", de arseneto de gálio | 66 |
| FIGURA III-8. Quando a "wafer" do GaAs é polarizada acima do limite, V_{th} , o material se comporta como uma resistência negativa (A). Uma camada de carga se forma no cátodo quando o material é polarizado acima do limite (B), e o deslocamento através do ânodo gira em torno de 10^7 cm por segundo (C) e (D). Nota-se que, quando se forma o domínio do campo, o campo elétrico no resto do material cai abaixo do nível limite. Quando o domínio é coletado no ânodo (E), o campo momentaneamente incrementa acima do limite, um novo domínio se forma no cátodo e o processo é repetido, oscilando. | 67 |
| FIGURA III-9. Um simples oscilador à diodo Gunn usado em uma cavidade coaxial de meio comprimento de onda. | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura III-10 A construção do guia ressoador se baseia na colocação de um diodo Gunn no interior de uma cavidade, preso por um suporte. A fonte de alimentação é acoplada a esse suporte no intuito de energizar o diodo. Um parafuso de ajuste é também colocado no interior dessa cavidade, onde seu movimento irá propiciar a mudança no fator Q da cavidade e, conseqüentemente, na freqüência de oscilação. A frís colocada na saída da cavidade otimiza a máxima potência de saída e serve também como isolamento e casamento de impedância entre a cavidade ressonante e o guia de onda. | 70 |
| Figura IV-1 - Diagrama de blocos do equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas. | 72 |
| Figura IV-2. Corte e medidas em cm da secção transversal de um guia de onda. | 75 |
| Figura IV-3. Corte seccional de um diodo a cristal, mostrando os elementos de um cristal retificador. Alguns detalhes de construção mudam de um fabricante para outro. | 77 |
| Figura IV-4. Uma característica estática típica de um retificador de cristal à sílicio quando usado como um retificador (a), e como um detector de envoltória (b) | 78 |
| Figura IV-5 - Foto do equipamento desenvolvido para medida de umidade do solo, através de atenuação de microondas | 79 |
| Figura V-1. Efeito da salinidade sobre as propriedades dielétricas de um volume de água a 20° C (STOGRYN, A. 1971). | 85 |
| Figura V-2 - Relação da variação da tensão de alimentação e o sinal lido no detector | 90 |
| Figura V-3 -Curva de calibração da atenuação em dB, em função da umidade volumétrica $\theta V(\%)$ do solo arenoso. A densidade global variou de 1,196 g/cm ³ a 1,255 g/cm ³ . | 97 |
| Figura V-4 -Curva de calibração da atenuação em dB, em função da umidade volumétrica $\theta V(\%)$ do solo argiloso. A densidade global das amostras variou de 0,826 (g/cm ³) a 0,91: (g/cm ³). | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura V-5 -Curva de calibração da atenuação em dB, em função da umidade volumétrica θV (%) da microesfera de vidro. A densidade global das amostras variou de 1,13 (g/cm ³) a 1,19 (g/cm ³). | 100 |
| Figura V-6 .- Sobreposição das três curvas dos diferentes tipos de solo e microesfera de vidro | 101 |
| Figura V-7 - Comparação entre os resultados obtidos com o sistema proposto e os obtidos com um analisador de rede 8510 HP. | 105 |
| Figura V-8 - Resultado relacionando a influência da variação da temperatura na atenuação do sinal em dB, para um solo arenoso sêco ao ar. | 107 |

CAPITULO I - OS PRINCIPAIS MÉTODOS PARA MEDIDAS DA UMIDADE DO SOLO.

1.1-INTRODUÇÃO

O conteúdo de água no solo e a sua disponibilidade são de fundamental importância para os mais variados campos da ciência básica e aplicada, bem como de tecnologias em agricultura, geologia, meteorologia, hidrologia e vários campos da engenharia. O conhecimento do conteúdo e da variação de água no solo sobre áreas extensas é necessário para o seu uso na otimização das áreas cultivadas e controle de fluxo.

As variações de umidade são um reflexo das taxas de evapotranspiração, precipitação pluvial, irrigação e movimentos de água no perfil do solo. Todos os parâmetros acima citados possuem propriedades características e apresentam implicações significativas, em termos da produtividade do solo e em particular para a agricultura. Um importante aspecto do trabalho de pesquisa neste setor é o de correlacionar estes dados com a produtividade e a conservação do solo. IDSO et al.(1975a) descreveram a necessidade de mensuração da umidade do solo para as mais diversas aplicações, incluindo o melhoramento do prognóstico da produção e o planejamento da irrigação. Recentes modelos e estudos descritos na literatura mostram a importância da umidade do solo no estudo de diversos fenômenos e processos, particularmente no caso da desertificação(CHARNEY, et al., 1977; IDSO, 1977; WALKER; ROWNTREE, 1977)

Em pesquisas hidrológicas, o conteúdo de umidade das camadas superficiais do solo é importante para a caracterização do escoamento da chuva e componentes da infiltração. Na meteorologia, por exemplo, a umidade do solo afeta os processos de absorção e emissão de irradiação térmica.

Para a agricultura, os estudos relacionados à umidade do solo se desenvolvem em torno de uma camada de 0 a 2 m de profundidade. A umidade do solo sob a superfície terrestre é da ordem de 0,005% do total de água no planeta (NACE, 1964).

As técnicas de medida da umidade do solo podem ser classificadas, em geral, como medidas "*in situ*" e por sensoriamento remoto. Serão abordadas neste capítulo as principais técnicas de medida "*in situ*" descritas na literatura, ou sejam: a gravimétrica, a nuclear, a eletromagnética e a higrométrica.

1.2 - A TÉCNICA GRAVIMÉTRICA

O método gravimétrico para caracterização de umidade do solo consiste, basicamente, da utilização da medida do peso de uma amostra de solo úmido e da medida do peso da mesma amostra de solo, após o processo de secagem em estufa.

A determinação quantitativa da fração líquida ou simplesmente da água do solo nessa técnica pode ser expressa em diferentes formas.

Dentre as formas disponíveis encontram-se:

1.2.1) Umidade à base de peso (μ_m)

A umidade à base de peso μ_m é adimensional ($g * g^{-1}$) conforme ilustra a equação (I.1), mas suas unidades devem ser mantidas para não ser confundida com a umidade à base de volume, que também é adimensional e numericamente diferente. A umidade μ é também frequentemente apresentada em porcentagem. Sua medida é bastante simples ou seja, a amostra é pesada úmida e em seguida deixada em estufa a 105° C, por um período de 24 a 48 horas. Após esse período de secagem, ocorrem mudanças no peso da amostra e uma vez pesada a amostra seca pode-se determinar

a massa de água m_l , pela diferença dos pesos anterior e posterior à secagem. Este método possibilita analisar amostras entre 50 e 500 g, bem como as amostras podem apresentar estruturas com formas diversas. Portanto, este método possibilita analisar amostras retiradas do campo com qualquer instrumento ou seja, trado, pá, enxada, colher, entre outros, devendo-se, entretanto, tomar o cuidado de proteger a amostra contra efeitos de evaporação devido ao meio ambiente

$$\mu_m = \frac{m_l}{m_s} \quad (I.1)$$

onde: m_l é a massa de água (g);

m_s é a massa de solo sêco (g).

1.2.2) Umidade à base de volume (θV)

A umidade à base de volume θV é adimensional ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) e freqüentemente é apresentada em porcentagem. Considerando como sendo V_T o volume físico de uma amostra de solo e como sendo V_L o volume de água nessa amostra, pode-se determinar a umidade à base de volume conforme expressa a equação (I.2)

$$\theta V = \frac{V_L}{V_T} \quad (I.2)$$

e uma vez que a densidade da água é de 1 g/cm^3 , toma-se o volume de água a ser medido como sendo a massa de água presente na amostra, ou seja, $V_L = m_L$

Esta medida é mais difícil de ser realizada, quando comparada à

medida de umidade à base de peso, de vez que a medida de V_T apresenta dificuldades. Sendo assim, anéis volumétricos ou cilindros de "Huland" com volumes pré-determinados são utilizados no processo de amostragem do solo com o objetivo de contornar as dificuldades na medida de V_T .

Considerando a densidade global ρ_g , é possível correlacionar a medida de umidade à base de peso com a medida de umidade à base de volume. A equação (I.3) ilustra a relação θ com μ

$$\theta V = \mu_m * \rho_g \quad (I.3)$$

onde: ρ_g , é a densidade global do solo seco (g / cm^3).

O método gravimétrico tem sido utilizado como padrão básico para calibração de outras técnicas para a determinação da umidade do solo. BLACK (1965); REYNOLDS (1970a,b) e REICHARDT (1985) são pesquisadores que detalharam a utilização do método em seus trabalhos.

O método gravimétrico apresenta vantagens e desvantagens.

Podem-se enumerar as seguintes vantagens:

- (a) as amostras podem apresentar diferentes formatos;
- (b) a coleta de amostra é de baixo custo;
- (c) a medida de umidade do solo é facilmente calculada.

Dentre as desvantagens, podem-se enumerar:

- (a) as medidas são pontuais e não-representativas em um perfil de solo heterogêneo;
- (b) tendo em vista o aspecto destrutivo de amostragem, o método gravimétrico não é recomendado para estudos de variação de umidade do solo, quando longos períodos de tempo são considerados.

1.3 AS TÉCNICAS NUCLEARES

1.3.1 O espalhamento de nêutrons

A técnica do espalhamento de nêutrons possibilita determinar por método indireto, o conteúdo da umidade do solo. Este método estima o conteúdo da umidade do solo em função do número de nêutrons térmicos obtidos a partir da moderação de nêutrons rápidos, pela interação com o hidrogênio da água presente no solo.

Desenvolvimentos iniciais de sondas de nêutrons começaram em 1950 (BELCHER et al 1950, 1952). GARDNER e KIRKHAM (1952) definiram os princípios do método. Nêutrons de alta energia(1 Mev ou mais) são emitidos por uma fonte radioativa, dentro do solo, e são termalizados por colisões elásticas. A perda média de energia é muito maior para os nêutrons que colidem com os átomos de baixo peso atômico ou átomos de hidrogênio. Assim, a nuvem resultante de nêutrons térmicos é uma função do conteúdo de umidade do solo no estado líquido, sólido e gasoso. O número de nêutrons lentos detectados são contados em um intervalo de tempo pré-definido. Dessa forma, a umidade do solo é determinada interpolando-se ou extrapolando-se o valor de contagens obtidas em uma curva de calibração previamente determinada, a qual relaciona a contagem de nêutrons térmicos com o conteúdo de água volumétrico.

Dois tipos de sondas de nêutrons são apresentados na literatura. Um deles é a sonda de profundidade, a qual é colocada dentro do solo através de um tubo de acesso. Esse tubo de acesso deve permitir que o sistema fonte-detector seja colocado na profundidade onde se deseja conhecer a umidade. Quando em uso o tubo de acesso deve ser posteriormente fechado em um compartimento por questões de segurança. O tamanho e a composição do tubo de acesso podem afetar a taxa de

contagem resultante do espalhamento de neutron (STOLZY e CAHOON 1957). A outra sonda disponível é a de superfície. Ela fornece o conteúdo de umidade do solo a apenas alguns centímetros de profundidade, próximo da superfície.

Várias fontes de nêutrons de alta energia têm sido utilizadas. A fonte de *Americium-Berilium* (*Am-Be*) é uma das mais utilizadas(BELL e McCULLOCH, 1966). As primeiras sondas de nêutrons usaram fontes de *Radium-Berilium* (*Ra-Be*). VAN BAVEL e STIRK (1967) mostraram que o uso das fontes de *Am-Be* diminuem o efeito da radiação gama, diminuem o peso físico da sonda, bem como melhora a taxa de contagem.

A intensidade da fonte de nêutrons rápidos varia com o tipo do rádio-isótopo empregado, bem como com a construção. VAN BAVEL (1962) mostrou ser adequado o uso de fontes de *Ra-Be* com 1 ou 2 milicuries (mCi). A atividade da fonte de *Am-Be* usada por VAN BAVEL e STIRK (1967) foi de 150 mCi. Outros cientistas, tais como LONG e FRENCH (1967); BEL e McCULLOCH (1966), descreveram o uso de fontes de *Am-Be* de 10, 20, 30, 50 e 300 mCi.

A sensibilidade de uma sonda de nêutrons pode ser determinada utilizando-se regressão numérica, aonde a contagem de nêutrons é correlacionada com o conteúdo de umidade volumétrica(VISVALINGAM e TANDY, 1972). A calibração da sonda de nêutrons depende da intensidade da fonte, da natureza do detector, da geometria empregada na sonda, dos materiais utilizados para a construção da sonda, das dimensões e da composição do tubo de acesso bem como das propriedades físico-química do solo (Mc CAULEY e STONE, 1972).

Métodos de calibração para a medida da umidade do solo com o uso de sonda de nêutrons em nível de campo ou em nível de laboratório foram desenvolvidos por DOUGLASS,(1966); COHEN,(1964); VACHAUD et al. (1977); LAL, (1979).

Procedimentos na calibração de laboratório estabelecem que o solo usado deva ser homogêneo em textura, em estrutura, em densidade e no conteúdo de umidade (BELCHER et al., 1950; VAN BAVEL, 1961, 1962; DOUGLASS, 1966;).

A calibração de campo da sonda de nêutrons é apresentada por vários autores como sendo extremamente difícil. Entretanto, ela é mais representativa que a obtida em laboratório (STEWART; TAYLOR, 1957; RAWLS; ASMUSSEN, 1973).

VAN BAVEL et al. (1956) definiram uma esfera de influência no método de sonda de nêutrons como sendo o volume no qual estão presentes 95% dos nêutrons térmicos.

Em muitos estudos da água no solo, o diâmetro da esfera de influência não pode ser facilmente determinado devido à heterogenidade do solo na região de medida.

As sondas de nêutrons apresentam as seguintes vantagens, em relação a outros métodos de medida da umidade do solo:

- (a) o conteúdo médio de umidade pode ser determinado em diferentes profundidades;
- (b) pode ser interfaceada com coletores automáticos de dados, possibilitando armazenagem de dados;
- (c) a variação temporal da umidade do solo pode ser facilmente monitorada;
- (d) as rápidas variações na umidade do solo podem ser detectadas;
- (e) as leituras estão diretamente relacionadas com a umidade do solo;
- (f) as medidas podem ser feitas repetidas vezes no mesmo local.

Dentre as desvantagens, pode-se citar:

- (a) o posicionamento incorreto da sonda dentro do tubo de acesso causa erros na medida do conteúdo de umidade;
- (b) a medida de umidade depende de muitas propriedades físico-químicas do solo, as quais são por si só difíceis de medir;
- (c) uso de material radioativo;
- (d) a esfera de influência de sondas de profundidade não possibilita medidas exatas de água no solo na proximidade da superfície do mesmo.

1.3.2 - A atenuação de raios gama

O método de atenuação de raio gama é uma técnica radioativa que pode ser usada para determinar o conteúdo de umidade do solo em amostras com espessuras conhecidas.

Esse método mostra que o espalhamento e a absorção de raios gama estão relacionados com a densidade da matéria e que a densidade global do solo ρ_g , conforme apresentado na equação (I.3), permanece relativamente constante com aumento ou diminuição do conteúdo de umidade na amostra sob estudo.

Variações no coeficiente de atenuação são medidas pela técnica de transmissão de raios gama e o conteúdo de umidade determinado pela variação desse coeficiente.

A colimação da fonte com o detector é importante para minimizar erros ocasionados pelas variações eletrônicas dos instrumentos de medida nuclear, da espessura da amostra e da energia de radiação. GURR (1962), FERGUSON e GARDNER (1962) e DAVIDSON et al (1963) desenvolveram as bases teóricas e práticas do método do uso de atenuação de raios gama no solo.

Ao contrário das partículas com cargas, não se pode dizer que a radiação ionizante possui um percurso definido na matéria. O número de fótons irá decair exponencialmente com a espessura do material, segundo a lei de Beer, para materiais homogêneos:

$$N_{(x)} = N_0 * e^{-\mu * x} \quad (I.4)$$

onde:

N_0 é o número de fótons incidentes;

$N_{(x)}$ é o número de fótons que passam através de uma amostra;

μ é o coeficiente de atenuação linear da amostra (cm^{-1});

x é a espessura da amostra (cm).

O coeficiente de atenuação do material irradiado depende do seu número atômico, de sua densidade e também da energia da radiação.

O equipamento básico utilizado na técnica de raios gama inclui uma fonte de raios gama, colimadores, detector de raios gama e uma eletrônica convencional para medidas nucleares. A figura I-1 ilustra a instrumentação utilizada em nível de laboratório, como também o diagrama experimental comumente utilizado para medida da umidade do solo pelo método de atenuação gama.

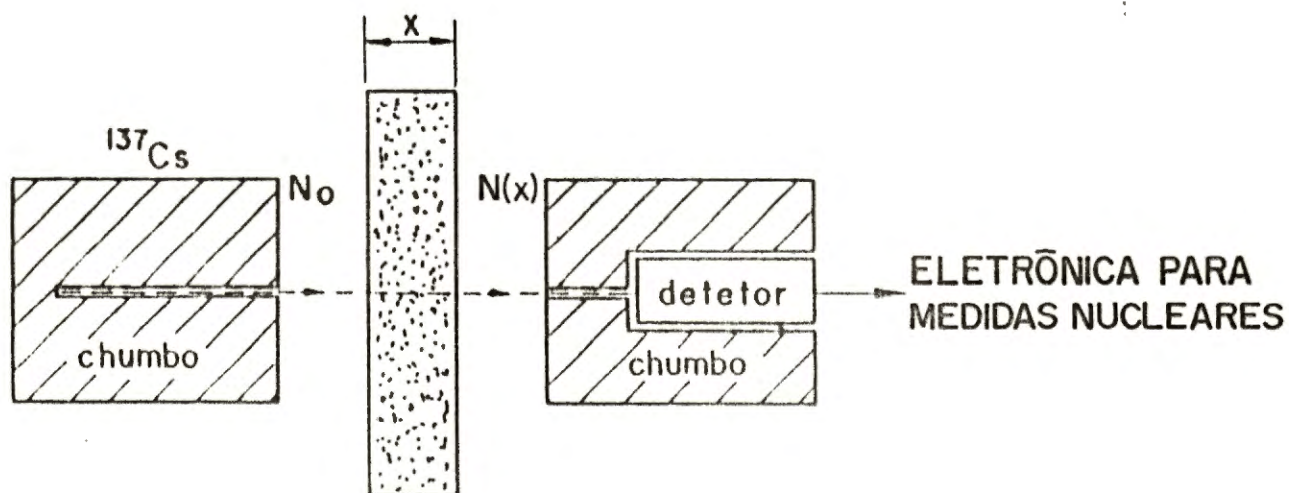


FIGURA I-1- Feixe colimado de radiações gama para determinação de densidade aparente e umidade do solo.

Genericamente, o solo é constituído de uma parte sólida, uma parte líquida(água) e uma parte gasosa(ar). Ao caminhar da fonte ao detector, os raios γ colimados e monoenergéticos atravessarão o ar, as paredes iguais e paralelas do recipiente que contém a amostra de solo e a amostra de solo propriamente dita, a qual poderá se encontrar tanto úmida como seca. A atenuação do ar é desprezível no processo de medida, devido ao seu coeficiente de atenuação para radiação γ ser de cerca de 10^3 a 10^4 vezes menor que a contribuição dos outros constituintes considerados na trajetória dos fótons. Denominando-se, respectivamente, por x_s , μ_s , ρ_s , x_w , μ_w , ρ_w , e x_r , μ_r , ρ_r as dimensões lineares (em *cm*), os

coeficientes de atenuação de massa (em cm^2/g) e as densidades volumétricas (em g/cm^3) das partes sólidas (s) e líquida (w) de solo e (r) caracterizando o recipiente. A equação de Lambert-Beer para o esquema mostrado na figura I-1 pode ser expressa por:

$$N_{(x)} = N_0 * e^{-(2*\mu_r*\rho_r*x_r + \mu_s*\rho_s*x_s + \mu_w*\rho_w*x_w)} \quad (I.5)$$

Pode-se simplificar a equação (I.5), considerando junto a N_0 a atenuação proporcionada pelo recipiente sem a amostra (N_1), bem como assumindo a água utilizada como água pura $\rho_w = 1 g/cm^3$, e sabendo-se ainda que a densidade volumétrica da parte sólida ρ_s multiplicada por x_s nos fornece a densidade global seca (ρ_g*x) e que x_w é igual a $x*\theta$, a equação (I.5) fica:

$$N_{(x)} = N_1 * e^{-[x*(\mu_s*\rho_s + \mu_w*\theta)]} \quad (I.6)$$

Conhecidos os valores de x , μ_s e μ_w , pode-se determinar a densidade global a partir da equação I.6 ou θ , conhecendo-se previamente uma das duas variáveis (CRESTANA, 1985).

Outra possibilidade de medida de umidade do solo está no uso de dupla energia. MANSELL et al. (1973) mostraram, através de experimento realizado com duas fontes radioativas, uma de Am^{241} e outra de Cs^{137} , ambas com atividades de 300 mCi, um simples detector e um sistema eletrônico convencional para medidas nucleares com dois canais, que o erro na medida do conteúdo de água no solo foi não-

¹ Definição de densidade global (sêca) como o quociente da massa do solo sêco pelo volume total de solo sêco

superior a um desvio padrão de 1 %.

Dupla energia com raios gama foi utilizada para medida simultânea de densidade e conteúdo de umidade de uma coluna de solo (SOANE, 1967 e COREY et al., 1971). Outros que investigaram a técnica foram GARDNER e ROBERTS (1967), GARDNER et al. (1972) e REGINATO (1974), os quais utilizaram fontes de raios gama de Am^{241} e Cs^{137} separados entre si com ambos os feixes colimados. Para o desenvolvimento de suas medidas foi necessário movimentar a coluna de solo de uma fonte radioativa para outra, com o objetivo de conseguir o resultado desejado. Em seus estudos os erros na determinação de ρ_g e θ ocorreram devido à estatística da emissão das fontes, do erro estatístico na medida do coeficiente de atenuação e nas medidas da espessura da coluna de solo, como também pela presença de um pequeno pico de alta energia no espectro do ^{241}Am e na contagem do tempo morto.

A variabilidade devida às diferenças de ρ_g e θ de um solo causam grandes erros, quando da utilização de sistema com dupla energia. GOIT et. al. (1976) mostraram experimentalmente essa relação.

Solos estratificados podem causar erros significativos nas medidas de ρ_g e θ pelo uso da dupla energia, como demonstrado por NOFZIGER (1978). Ele também confirmou que ambos os sistemas, tanto a simples como a dupla energia por gama, com feixes colimados, proporcionam medidas com boa exatidão do conteúdo médio de água, se a densidade volumétrica do solo for constante.

A atenuação de raios gama é independente do estado da água na amostra. A medida de atenuação não é afetada pela transição da água

líquida para o gelo. Portanto, o uso de atenuação gama possui uma vantagem, visto que medidas da densidade volumétrica seca e o total do conteúdo de água (incluindo o gelo) em gramas por cm^3 podem ser feitas simultaneamente.

A técnica de atenuação por raios gama possui as vantagens relacionadas para as sondas de nêutrons, em particular as apresentadas nos itens a, b, c e d, bem como se pode considerar adicionalmente:

- a) os dados podem ser obtidos sob um horizonte muito pequeno ou verticalmente;
- b) a medida é não destrutiva.

Dentre as desvantagens pode-se citar:

- a) a precisão da medida fica limitada, devido às grandes variações na densidade volumétrica e no conteúdo de umidade que ocorrem normalmente em solos altamente estratificados;
- b) a instrumentação de campo é de alto custo e difícil utilização;
- c) uso de material radioativo.

1.3.3- A Tomografia Computadorizada

Em concordância com os resultados obtidos em pesquisas independentes de PETROVIC et al. (1982), HAINSWORTH et al. (1983) e CRESTANA et al. (1985), foi desenvolvido, um novo método de investigação da física da água no solo usando tomografia computadorizada de raio X. Essa técnica apresenta correlação das medidas de umidades do solo, quando comparados a procedimentos

clássicos, tais como a gravimétrica e a atenuação de raios γ . Permite também acrescentar enfoques e análises que um sistema tomográfico propicia ao estudo dinâmico bi e tridimensional, com a detecção de heterogeneidade e da distribuição de água pixel a pixel².

A Tomografia Reconstitutiva (T.R.) consiste em reconstruir uma dada secção de um corpo a partir de suas projeções obtidos em diferentes direções. Com a T.R. é possível encontrar a distribuição de coeficientes de atenuação (no caso de tomografia por transmissão) e a densidade de radioisótopos (no caso da tomografia por emissão) do meio observado.

A reconstrução da imagem de um objeto a partir de suas projeções em diversas direções se baseia em equações matematicamente complexas. Por esta razão, utiliza-se normalmente os computadores para a implementação da reconstrução.

Os algoritmos de reconstrução atribuem a cada pixel da matriz-imagem um coeficiente de atenuação linear. Tais coeficientes são posteriormente convertidos em números correspondentes às unidades medidas pelo tomógrafo, isto é, unidades Hounsfield (UH). Esta unidade é definida como sendo:

$$UH = 1000 * [(\mu - \mu_w) / \mu_w] \quad (I.7)$$

onde μ_w é o coeficiente de atenuação da água e geralmente é considerado como valor-padrão. Convencionalmente adotou-se uma escala que varia de -1000 UH a +1000 UH ou de -500 UH a +500 UH em tomógrafos mais antigos.

² é a célula básica de uma imagem digital (picture element).

Tratando-se de uma nova fronteira na instrumentação e na metodologia de pesquisas em solos, CRUVINEL (1987) e CRUVINEL et al. (1990) desenvolveram e implementaram um minitomógrafo de raio X e raio gama dedicado à física de solos.

O sistema é constituído por uma mesa mecânica com dois motores de passo para movimentos de rotação e translação, fonte radioativa, colimadores, detector com cristal de NaI(Tl), cadeia de detecção nuclear, interface e microcomputador com duas unidades de disco flexível de 5 1/4", vídeo de alta resolução e impressora gráfica.

Foram desenvolvidos programas computacionais, em linguagem Pascal e C, para o controle e a aquisição de dados, reconstrução da imagem e visualização da secção reconstruída, com a possibilidade de análise quantitativa do coeficiente de atenuação linear ao longo da imagem. A figura I-2 ilustra em diagrama de blocos o sistema do minitomógrafo para medidas de umidade do solo.

Dentre as vantagens da tomografia computadorizada (T.C.) aplicadas em medidas do conteúdo de água em solos, destacam-se:

- a) A T.C. pode ser usada para observar e medir qualitativa e quantitativamente a densidade global e o conteúdo de água no solo pixel a pixel;
- b) A T.C. pode ser usada em estudos dinâmicos do movimento da água no solo;
- c) A T.C. pode ser usada para obtenção de informações sobre heterogeneidades presentes na distribuição da densidade global e do conteúdo de água no solo;
- d) A T.C. pode ser usada para fornecer as distribuições espaciais e temporais simultâneas do conteúdo da água no solo;

e) método não-destrutivo;

f) A T.C. pode ser usada para estudos do efeito de compactação e do umidecimento prévio do solo na infiltração vertical;

Dentre as desvantagens do método, pode-se citar:

a) Uso de material radioativo;

b) A dificuldade de portabilidade;

c) Custo relativamente elevado;

d) Tecnologia pouco disponível.

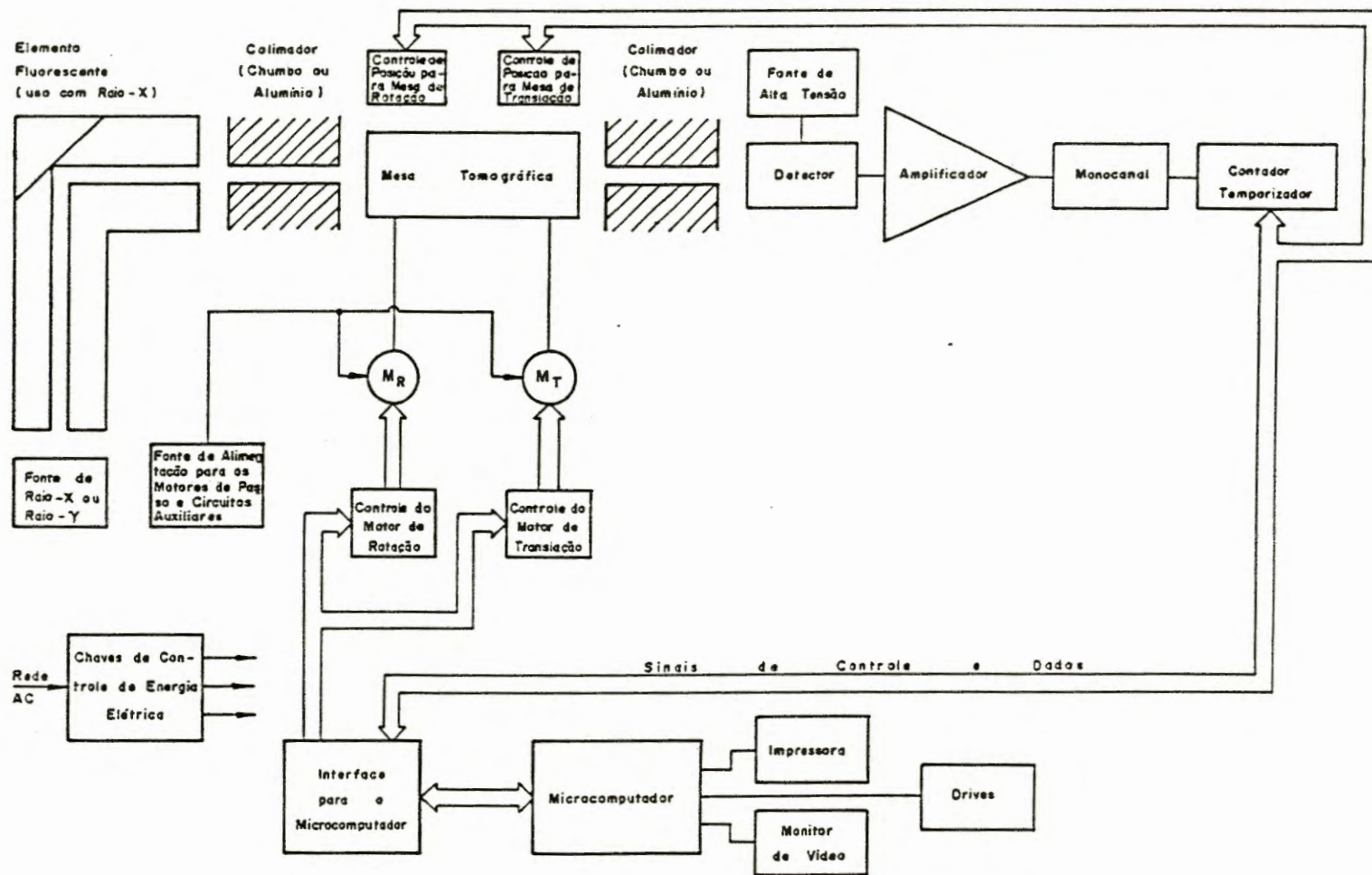


Figura (I.2) - Diagrama de blocos do minitomógrafo de raio-X e raio-Y computadorizado

1.4-AS TÉCNICAS ELETROMAGNÉTICAS

Sob o ponto de vista eletromagnético, o solo é considerado uma mistura de quatro composições dielétricas, consistindo de ar, da parte sólida do solo, da água ligada e da água livre. Uma molécula de água ligada ao solo interage com uma onda eletromagnética incidente diferente daquela da molécula de água livre, desse modo exibindo um espectro de dispersão dielétrica que é muito diferente da água livre. As constantes dielétricas na forma complexa de água livre e ligada são funções da frequência eletromagnética f , da temperatura física T e da salinidade S . Conforme apresentado por HALLIKAINEN et al., 1985, a constante dielétrica do solo misturado é, em geral, uma função de :

- 1-) f , T , e S ;
- 2-) conteúdo de água volumétrica total θ_v ;
- 3-) a fração relativa de água livre e ligada, a qual está relacionada à área de superfície do solo por unidade de volume;
- 4-) a densidade volumétrica do solo ϕ_b ;
- 5-) formato das partículas do solo;
- 6-) a forma da absorção da água pelo solo.

A figura I-3 apresenta o gráfico que relaciona a umidade volumétrica (%) com a variação da constante dielétrica de cinco tipos de solos com textura diferentes, na frequência de 1.4 GHz. A variação, devido à textura, está relacionada, portanto, ao comportamento da água livre e da água ligada no solo.

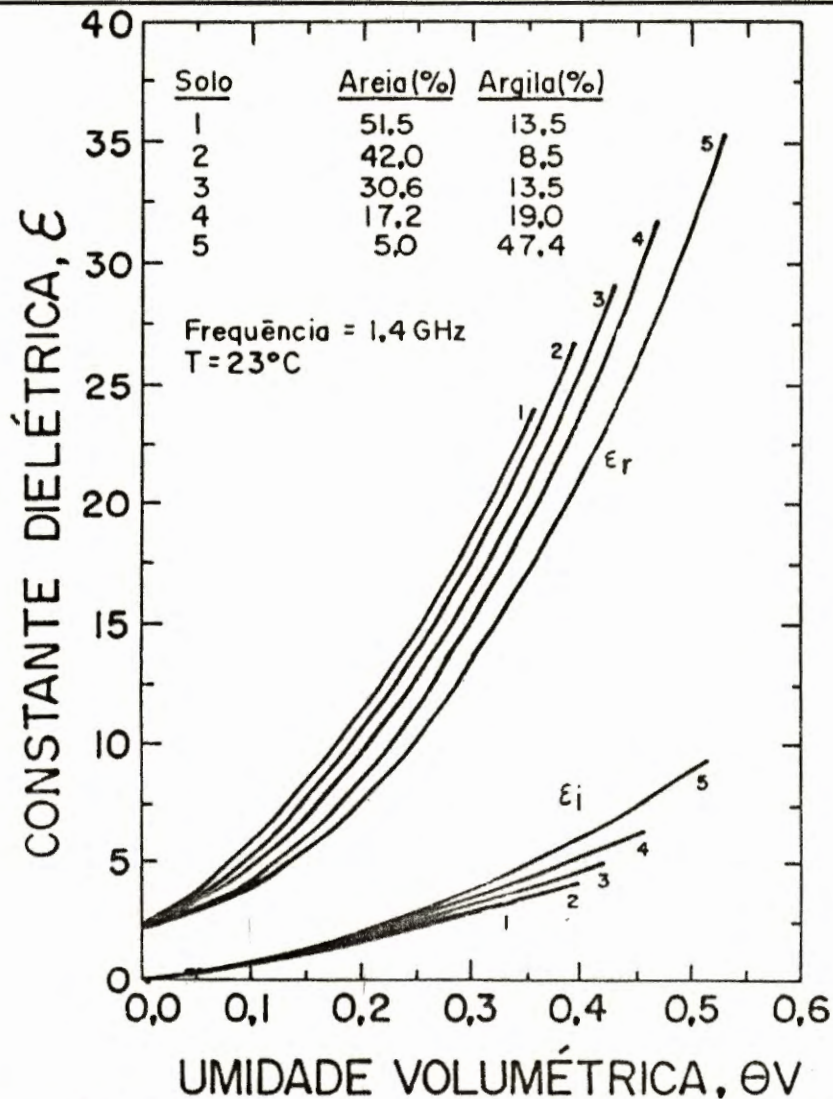


Figura I-3 - Medida da constante dielétrica para cinco tipos de solo (HALLIKAINEM; et all, 1985).

As propriedades dielétricas do solo úmido, como já foi dito anteriormente, devem ser caracterizadas pela dependência da frequência como função da resposta da constante dielétrica complexa, ou seja:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_r(\omega) - j\epsilon_i(\omega) \quad (I.8)$$

onde $\epsilon_r(\omega)$ é a parte real de ϵ , $\epsilon_i(\omega)$ é a parte imaginária de $\epsilon(\omega)$, $j = \sqrt{-1}$ e ω é a frequência (angular).

A função $\epsilon_r(\omega)$ é aproximadamente constante para $\omega = 0$ fora, portanto, da vizinhança da frequência de relaxação ω_R dos dipolos no meio. O tempo ω_R^{-1} é a

constante de tempo para o decaimento da polarização, quando o campo elétrico está ausente. Ao redor de ω_R , a função ϵ_r decai ainda na região do visível do espectro e é igual ao índice de refração ao quadrado. A parte real da função-resposta dielétrica é uma medida da energia armazenada pelos dipolos alinhados por um campo eletromagnético aplicado. Quando a frequência é maior que ω_R , os dipolos podem não acompanhar o campo e a capacidade do meio para armazenar energia do campo elétrico decai.

A função $\epsilon_i(\omega)$ é uma medida da taxa de energia dissipada no meio. Visualizando como uma função da frequência e inicializando para um baixo ω , este irá aumentar até um pico de ω_R e depois disso decairá. O comportamento descrito é devido aos dipolos permanentes no solo. Entretanto, em frequências abaixo de ω_R , o meio pode mostrar dispersão característica e regiões de absorção, devido à excitação molecular direta. A frequência ω_R irá, geralmente, se encontrar na faixa de microondas, 18 GHz na H_2O .

Em um solo, os valores de $\epsilon_r(\omega)$ estão tipicamente entre 3 e 5 (F/m). Na água, os valores de $\epsilon_r(\omega)$ estão em torno de 80 (F/m). Dessa forma, relativamente, pequenas quantidades de água livre no solo irão afetar enormemente suas propriedades eletromagnéticas (SCHUMUGGE et al., 1980).

Em baixos níveis de umidade, existe um pequeno aumento de $\epsilon(\omega)$ com a umidade do solo mas, acima de um certo ponto, a declividade da curva incrementa acentuadamente. Tal comportamento é devido à água no solo. Quando a água é adicionada ao solo torna-se fortemente ligada às partículas do solo. Nesse estado, as moléculas de água não são livres para se tornarem alinhadas, e as propriedades dielétricas se parecem com as propriedades dielétricas do gelo para o qual $\epsilon(\omega) = 3,5$ (F/m). Como a camada de água ao redor das partículas do solo se tornam maiores, as ligações das partículas decaem devido à ausência de superfície de contato e as moléculas de água se comportam como se estivessem no estado

líquido. Portanto, ocorre uma maior declividade na curva que relaciona constante dielétrica com umidade volumétrica para maiores valores de umidade do solo. O conteúdo de umidade do solo θ_V nesta transição depende da textura do solo, isto é, da distribuição do tamanho das partículas.

Estudos relacionando a variação da frequência à umidade volumétrica mostram que a sensibilidade da medida aumenta com o aumento da frequência, de 1,4 GHz a 18 GHz.

Emprega-se, normalmente, a medida volumétrica no estudo da interação da onda eletromagnética com a água e o solo, para quantificação da umidade; isso porque a constante dielétrica da mistura água-solo é uma função da fração do volume da água no sistema (HALLIKAINEN et al. 1985).

1.4.1 - Métodos Utilizando Microondas

1.4.1.1 - Métodos de Laboratório

Dois técnicas que utilizam microondas na faixa de 1,4 a 18 GHz são utilizadas para as medidas de propriedades dielétricas, as quais estão correlacionadas com medidas de água no solo. A primeira dessas técnicas é a da transmissão de microondas utilizando um guia de onda, conforme ilustra a figura I-4. A segunda é a técnica de transmissão de microondas no espaço livre, na qual a transmissão e recepção do sinal ocorrem por intermédio de duas antenas na configuração de cornetas, conforme ilustrado na figura I-5. Cada uma dessas técnicas possui propriedades particulares, com modelos distintos e coeficiente de transmissão também distintos (HALLIKAINEN et al., 1985).

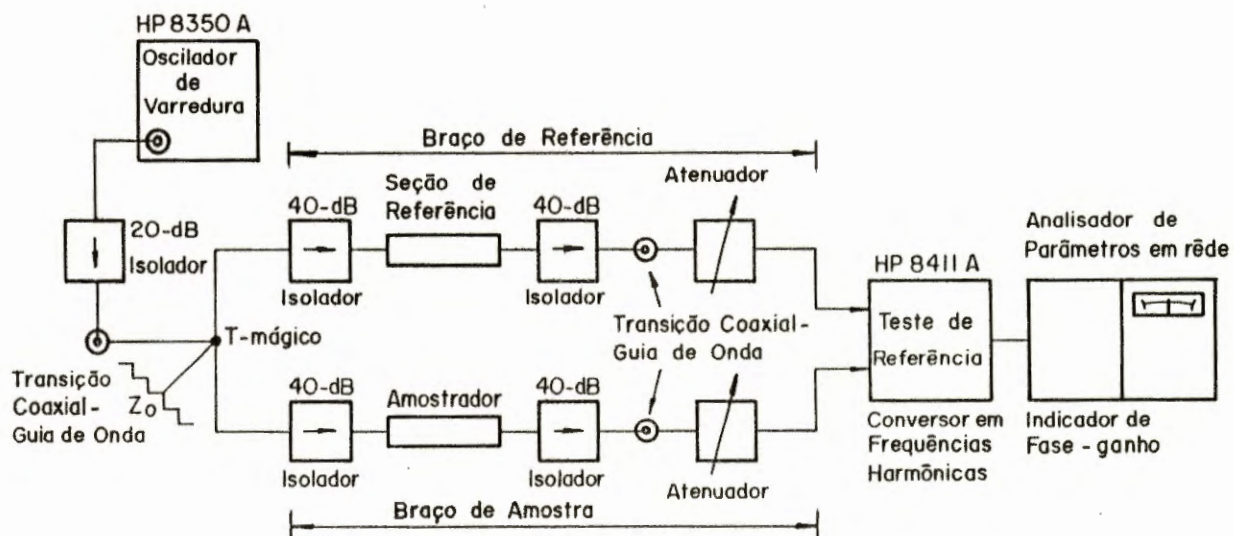


Figura-I-4 - Diagrama de bloco de um sistema para a medida da constante dielétrica com a técnica de guia de onda.

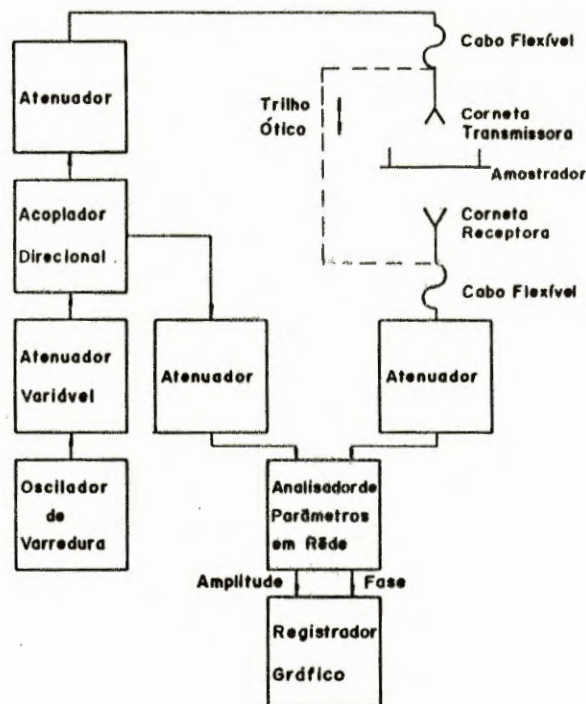


Figura-I-5 - Diagrama de bloco de um sistema para a medida da constante dielétrica no espaço livre.

Utilizando essas técnicas, as propriedades do solo, tais como o efeito da densidade volumétrica, os efeitos da textura do solo, os efeitos da temperatura, e os efeitos da salinidade, foram estudadas e correlacionadas com a propagação da microondas nesse meio. Todos os estudos foram desenvolvidos em nível de laboratório (HALLIKAINEN et al., 1985 e STROGRY, 1971).

As principais vantagens do uso da técnica de microondas são:

- a) o fornecimento de valores absolutos para umidade do solo;
- b) a sensibilidade na medida de umidade volumétrica é alta e cresce com o aumento da frequência;
- c) resolução é da ordem de 0,1% na medida de umidade volumétrica $\theta V(\%)$, com erro de 0,05%;
- c) técnica não-destrutiva e não-radioativa;
- d) Em altas frequências (banda X do espectro de frequência (de 5,2 GHz a 10,9 GHz)), a influência da densidade do solo nas medidas de umidade diminui significativamente;

Dentre as desvantagens, pode-se citar:

- a) Custo de equipamentos relativamente alto;
- b) Sensível influência da variação da temperatura para conteúdo de umidade acima de 35 %;
- c) O poder de penetração de microondas no solo diminui com o aumento da frequência, principalmente com aumento da umidade.

1.4.1.2 - Métodos de campo

Em condições de campo, utiliza-se o sensoriamento remoto, com microondas como uma alternativa de se obter informação localizada. Lembremo-nos, como uma desvantagem, que a resolução, dependendo da forma de utilização, é um fator

limitante, uma vez que a técnica de sensoriamento remoto trabalha em regiões com áreas maiores que 1 m².

Um exemplo de aplicação da técnica de detecção de umidade do solo por sensoriamento remoto, relacionado ao sistema ativo de microondas - mede através do coeficiente de espalhamento as propriedades dielétricas do meio (radar) - é o do radar de penetração terrestre (RPT). Este radar foi utilizado como ferramenta para detectar frente de molhamento de solo arenoso. Imagens do campo com RPT foram produzidas em seis intervalos de tempo, antes e depois de estabelecida a irrigação da área em estudo, e os resultados mostraram o perfil da frente de molhamento no solo (VELLIDIS et al., 1990).

Outro método muito utilizado é o método passivo de microondas - o qual mede umidade do solo através da emissão de microondas as propriedades dielétricas e a temperatura do solo (radiômetro). Tal sistema é muito utilizado através do sensoriamento remoto, em nível de campo com vários trabalhos referenciando os estudos desenvolvidos (NEWTON, 1977). Dentre eles, foram estudados os efeitos de material ferromagnético do solo (PALME, 1988) e os efeitos do conteúdo de matéria orgânica no solo (O' NEIL & JACKSON, 1990).

Abaixo, a tabela 1 apresenta um quadro com as vantagens e desvantagens dos dois métodos abordados para o sensoriamento remoto, em nível de campo. Esses dois métodos apresentam ainda todas as vantagens apresentadas no método de laboratório (ENGMAN, 1991):

| <i>MÉTODO</i> | <i>VANTAGENS</i> | <i>DESVANTAGENS</i> | <i>PROPRIEDADE OBSERVADA</i> |
|------------------------------|--|--|---|
| MICROONDAS ATIVO (1-100cm) | Preciso e robusto; largura de banda limitado | Rugosidade da superfície; vegetação; topografia | Coefficiente de espalhamento; constante dielétrica |
| MICROONDAS PASSIVO (1-100cm) | Robusto; penetra algumas vegetações; cobre grandes áreas | Resolução espacial limitada; temperatura do solo; rugosidade da superfície; interferência das comunicações | Constante dielétrica; temperatura do solo; temperatura da potência radiante, em uma dada direção, por unidade de ângulo sólido e por unidade de área projetada da fonte |

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do método de sensoriamento remoto para medida de umidade do solo em campo.

Já para regiões que estão abaixo da resolução do radar (< 1 metro) e em condições de campo, existe um grande interesse no desenvolvimento de instrumentação envolvendo tal técnica.

1.4.1.3 TÉCNICA DE REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR)

FELLNER-FELDEGG (1969) introduziu a reflectometria no domínio do tempo (do inglês TDR) como sendo um método para medir a permissividade dielétrica de líquidos. Desde então, a técnica de TDR tem sido aplicada a medidas de propriedades dielétricas de muitos outros materiais, inclusive do solo. Recentemente, os resultados de investigações da aplicação de TDR para medida da

constante dielétrica do solo ou do conteúdo de água no solo foram descritos na literatura (TOPP et al., 1980; TOPP & DAVIS, 1985). Nessa técnica, como pode ser visto na figura I-6, a medida do conteúdo de umidade do solo depende somente da velocidade de propagação de um sinal eletromagnético de alta frequência (aproximadamente 2 GHz) no meio onde se está realizando o experimento.

No caso de solos, a constante dielétrica é calculada a partir da medida do tempo que um pulso eletromagnético leva para transitar entre duas hastes metálicas que operam como guias de onda e que são introduzidas no solo. Esse método de medida estabelece que é preciso considerar que o pulso emitido caminhe de uma haste metálica para outra e retorne à posição de partida. Considerando como sendo l o comprimento do guia de onda, t o tempo de trânsito e v a velocidade de propagação do pulso para um meio não-dispersivo $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ (onde c é a velocidade da luz), definiu-se a constante dielétrica do solo como sendo:

$$\epsilon = \left(\frac{c * t}{2 * l} \right)^2 \quad (I.9)$$

Foi mostrado por TOPP et al. (1980) que a constante dielétrica se relaciona com o conteúdo de água (θ) do solo da seguinte forma:

$$\theta = -0,053 + 0,0292 * \epsilon \quad (I.10)$$

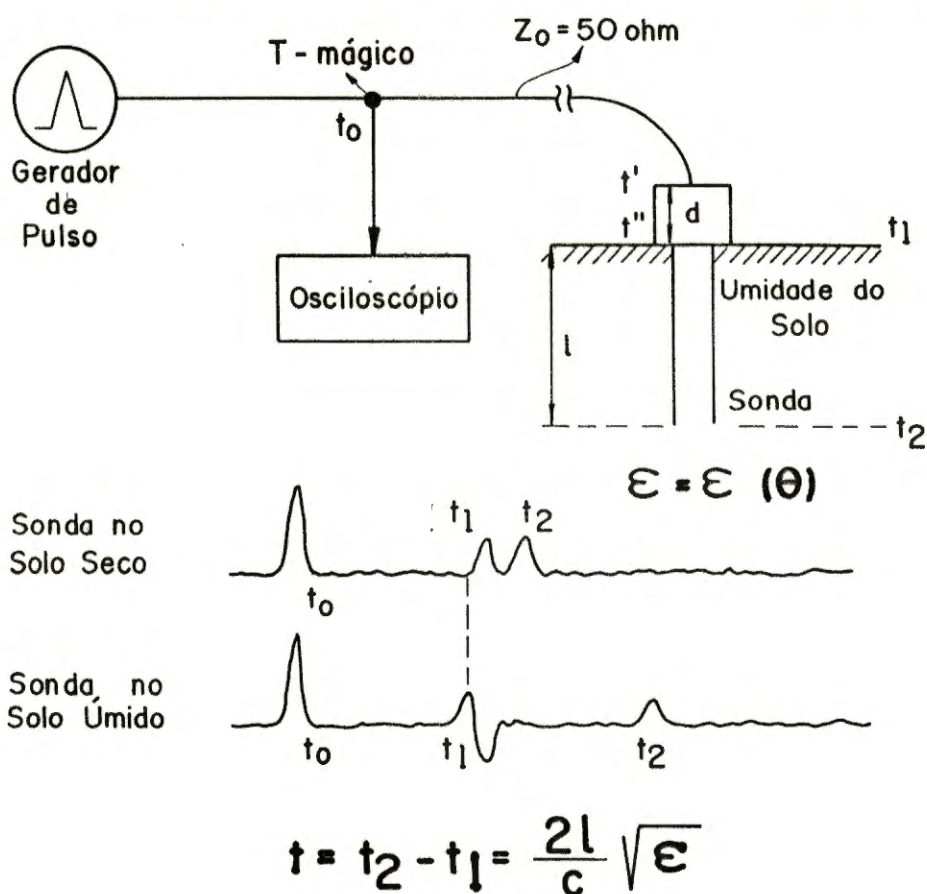


Figura I-6 - Princípio básico de medida da constante dielétrica do solo utilizando a técnica TDR.

Vários autores na literatura têm utilizado a técnica de TDR para medida simultânea de salinidade e conteúdo de água no solo (DALTON,1984), validação de modelos do fluxo da água no solo (KACHANOSKI et al.,1990), medida de potencial matricial no solo (PHENE et al., 1988) e o estudo tridimensional do transporte de solutos durante o fluxo de água não saturado com a utilização de várias linhas de transmissão - feitas de corda de piano - colocadas no interior da amostra de solo e monitoradas por um testador de cabo TDR (WARD et al., 1988).

Dentre as vantagens do uso da técnica de TDR, pode-se citar:

- a) técnica não-destrutiva;
- b) não utiliza radiação ionizante;
- c) alta exatidão na medida de conteúdo de água;
- d) baixo custo no acoplamento a um coletor de dados;

- e) podem-se fazer medidas, tanto no perfil horizontal como no perfil vertical no solo.
- f) portabilidade;
- g) medidas de campo sem causar distúrbio no solo.

Dentre as desvantagens, pode-se citar as seguintes:

- a) a influência da salinidade nas medidas da umidade volumétrica;
- b) a influência dos óxidos de ferro no processo de leitura, através da permeabilidade característica de cada óxido;
- c) dependência do tipo de solo, isto é, a dependência das características de solos minerais e solos inorgânicos na calibração;
- d) variações significativas da densidade global do solo, em particular em solos expansivos, provocam substancial mudança na leitura do conteúdo de água.

1.5 - TÉCNICA HIGROMÉTRICA

1.5.1 - MÉTODO DE MEDIDA DE UMIDADE DO SOLO UTILIZANDO A RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO SOLO

Métodos para detecção de condutividade elétrica e medidas das variações do conteúdo de umidade de cerâmicas argilosas foram empregados industrialmente por vários anos. Métodos para a medida direta de resistência elétrica também têm sido usados em fundições para medir umidade de areias.

O método de medida da resistência elétrica do solo para a medida indireta de umidade do mesmo se baseia em dois princípios: primeiro, um bloco de absorção, poroso, é instalado no solo e é estabelecido um equilíbrio entre a umidade no solo e a umidade no bloco poroso. O bloco tende a estabelecer seu próprio equilíbrio, o qual logo se torna constante, quando imerso no solo ou em água. Caso o bloco estiver seco e o solo úmido, o bloco absorve uma certa quantidade de

umidade. Se, entretanto, o solo estiver com pouca umidade, o bloco absorverá pouca umidade. Quando o conteúdo de umidade do solo varia depois do equilíbrio que já foi estabelecido entre o solo e o bloco, o bloco irá ganhar ou perder umidade para corresponder a essa variação no solo. Dessa maneira o conteúdo de umidade do bloco acompanhará as variações que estão ocorrendo no solo. Segundo: o conteúdo de umidade absorvida pelo bloco, com dois eletrodos em seu interior, determinará a resistência elétrica. Desde que a densidade, a textura, a compactação e o conteúdo de sal deste bloco permaneçam parcialmente constantes, uma variação na resistência indicará uma variação no conteúdo de umidade do bloco e dessa forma uma variação na umidade do solo (BOUYOUCOS, MICK, 1940).

Os blocos podem ser construídos a base de gesso, náilon ou fibra de vidro (COLMAN; HENDRIX, 1949 e CRUVINEL; CALHEIROS, 1985). A figura I-7 ilustra um típico bloco de Bouyoucos, como é chamado.

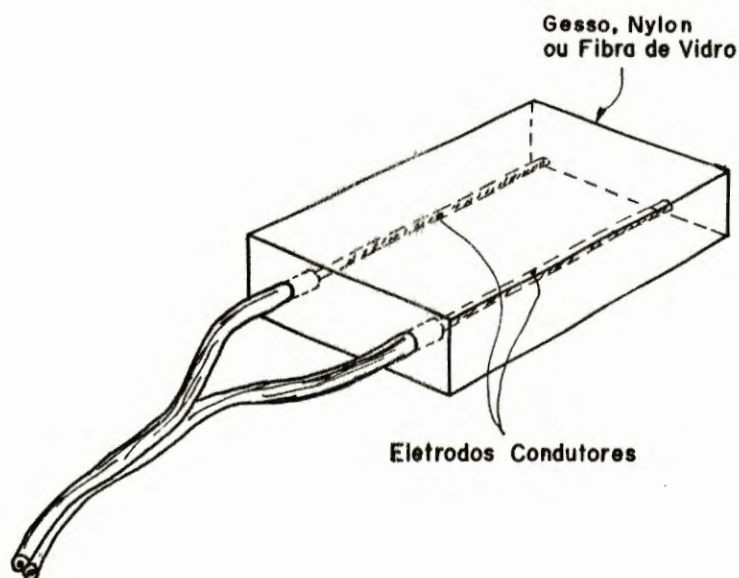


Figura I-7. Construção dos blocos de absorção

A instrumentação de medida consiste dos bocos de absorção e de uma adaptação especial da ponte de Wheastone na qual se irá medir a resistência elétrica do conjunto bloco e solo.

As vantagens do método de medida de resistência elétrica com bloco de gesso são:

- a) simplicidade do instrumental envolvido;
- b) baixo custo;
- c) condições de utilização no campo, podendo realizar medidas tanto na posição vertical como na horizontal.

Como desvantagens, pode-se citar:

- a) deterioração do elemento sensor, devido a interação com os compostos físico-químicos do solo;
- b) a necessidade de calibração especial para cada tipo de solo.

CAPITULO II - FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE MICROONDAS.

2.1 Introdução

Analisando os fatos históricos do desenvolvimento da teoria do campo eletromagnético, observa-se que um longo período de tempo foi necessário para que se obtivessem os importantes resultados relacionados à unificação do campo elétrico e campo magnético.

Os conhecimentos referentes a campo elétrico e campo magnético já eram utilizados desde meados do século XIX, e não se limitavam apenas ao emprego do formalismo matemático. As novas idéias e conceitos que Faraday introduziu sobre campo elétrico e campo magnético foram recebidas ceticamente pela maioria dos cientistas da época. A importante controvérsia estava entre acreditar na teoria das "ações à distância" ou se converter para à recém-proposta teoria denominada "teoria de campo", que era o ponto alto das discussões. Faraday foi também o primeiro (segundo James Clerk Maxwell) a acreditar na existência do campo eletromagnético.

A teoria da "ação à distância" surgiu dos resultados de trabalhos realizados por Ampere, ocorridos entre 1820 e 1825, e da correlação com a famosa lei da gravitação de Newton, descoberta um século atrás, onde se assumia que à ação a distância não considerava a necessidade de qualquer meio para a transmissão da força gravitacional. A base para essa teoria foi proveniente das conclusões obtidas por Ampere em seu experimento, ao considerar que uma corrente circulando por um fio condutor exercia uma força sobre outro fio, que também estava sujeito a uma corrente, sem haver qualquer interferência externa na ocorrência do fenômeno.

Faraday, no entanto, concebeu a realidade física de campos elétrico e magnético, enquanto Maxwell se empenhou em expressar as relações matemáticas envolvidas.

Há mais de cem anos J. C. Maxwell desenvolveu a teoria clássica do eletromagnetismo e demonstrou que a luz visível era um tipo de onda eletromagnética. Ele previu, corretamente, que uma onda eletromagnética tem associados um campo elétrico vetorial E e um campo magnético H , também vetorial, que obedecem às equações de campo por ele desenvolvidas. O tipo mais simples de onda eletromagnética é a monocromática, plana, linearmente polarizada no vácuo, tal como está ilustrado na figura II - 1.

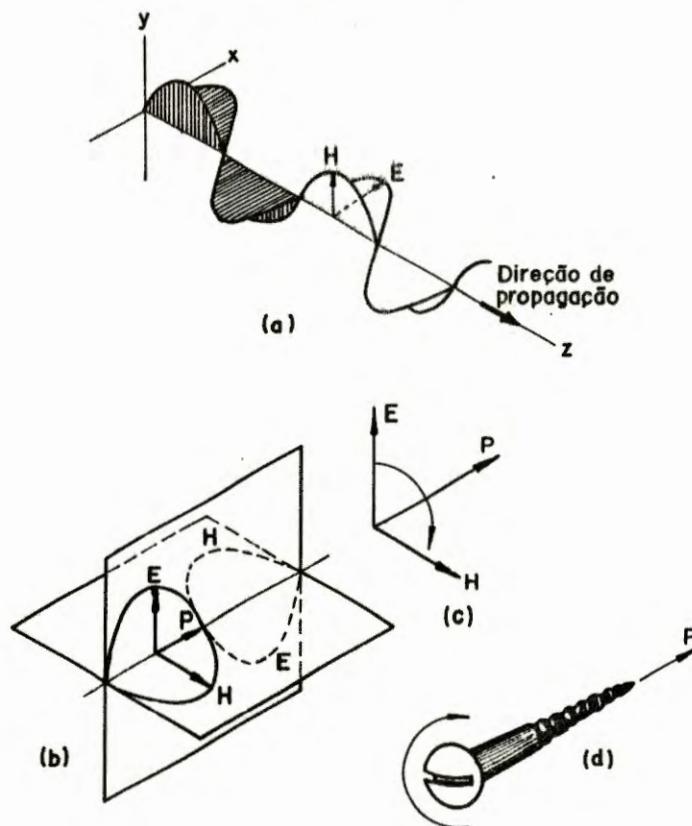


Figura II-1. Uma onda eletromagnética monocromática plana (a) e o vetor de Poynting são representados nesta figura (b), (c) e (d).

Suponhamos uma onda eletromagnética do tipo monocromática para a qual a intensidade do campo, em qualquer ponto de espaço, varia com o tempo, de acordo com uma função senoidal ou co-senoidal, a saber:

$$E = E_0 \text{ sen } (2\pi t/T) \quad (\text{II.1})$$

$$H = H_0 \text{ sen } (2\pi t/T) \quad (\text{II.2})$$

onde T é o período da onda e E_0 e H_0 são amplitudes dos campos elétricos e magnéticos, respectivamente. O termo "plano" significa que, em todos os pontos do espaço considerado, a onda viaja na mesma direção. No caso da figura II-1 é a direção z e em qualquer instante o módulo de E é o mesmo em todos os pontos sobre um plano perpendicular a essa direção. O mesmo se aplica para H . O termo "Linearmente polarizado" significa que o vetor campo elétrico E permanece em uma direção somente.

O vetor P , visto na figura II-1, é chamado vetor de Poynting e seu módulo tem dimensões de W/m^2 . A figura II-9 ilustra em (a) o plano de propagação da onda elétrica E e magnética H vetorial. Em (b) apenas os vetores E e H são desenhados. Para explicar o avanço na direção de P , o exemplo do movimento de um parafuso é bastante útil (c), sendo da mesma forma relacionado ao giro de E , no sentido de encontrar H .

A teoria descrita por Maxwell prevê que E e H devem ser perpendiculares entre si e à direção de propagação.

A frequência f da onda é o número completo de ciclos por segundo em um ponto. Como o período T representa o tempo necessário para um ciclo, então $f = 1/T$. O comprimento de onda λ é a distância mais curta ao longo da qual a onda se repete. Dado que a onda viaja uma distância de um comprimento de onda em um tempo de um período, a velocidade c a que qualquer onda se desloca através do espaço é $c = \lambda / T$ ou $c = f \lambda$. A onda mostrada na figura II-1 é, então, descrita por:

$$E = E_0 \text{ sen } (\omega t - \beta x) \quad (\text{II.3})$$

$$H = H_0 \text{ sen } (\omega t - \beta x) \quad (\text{II.4})$$

onde $\omega = 2 \pi f$ e $\beta = 2 \pi / \lambda$.

2.2 Propriedades das Ondas Eletromagnéticas - Microondas

Os trabalhos com microondas (300 MHz - 300 GHz) surgiram na década de 40, durante a segunda guerra mundial, com a invenção do radar para ser utilizado na II guerra mundial. Desde então essa técnica, que trabalha em ultra-alta frequência, tem sido utilizada no desenvolvimento de numerosos tipos de radares e sistemas de telecomunicações, bem como em pesquisas científicas investigando vários tipos de materiais e plasmas.

Dentro do espectro de radiação eletromagnética, a microonda ocupa uma pequena faixa desse amplo conjunto do espectro eletromagnético. A figura II-2 mostra o espectro de radiação eletromagnética e o estado de energia que se estende desde as muito baixas (da ordem de 1 Hz) até as mais altas frequências, no campo das aplicações dos raios - γ (até 10^{20} Hz). A parte visível do espectro nos é mais familiar, pelo fato de podermos observar os efeitos provocados pela mesma. Dessa forma, o comportamento da luz visível pode ser utilizado como auxiliar para ilustrar as propriedades das radiações eletromagnéticas.

Analisando a luz como fenômeno ótico, observa-se que a mesma pode ser focalizada, refletida por espelhos, refratada ou forçada a mudar de direção ao incidir sobre uma interface, ou absorvida por uma superfície negra. A luz é difratada ao redor de objetos, exhibe características de polarização e possui energia ou potência associada à mesma.

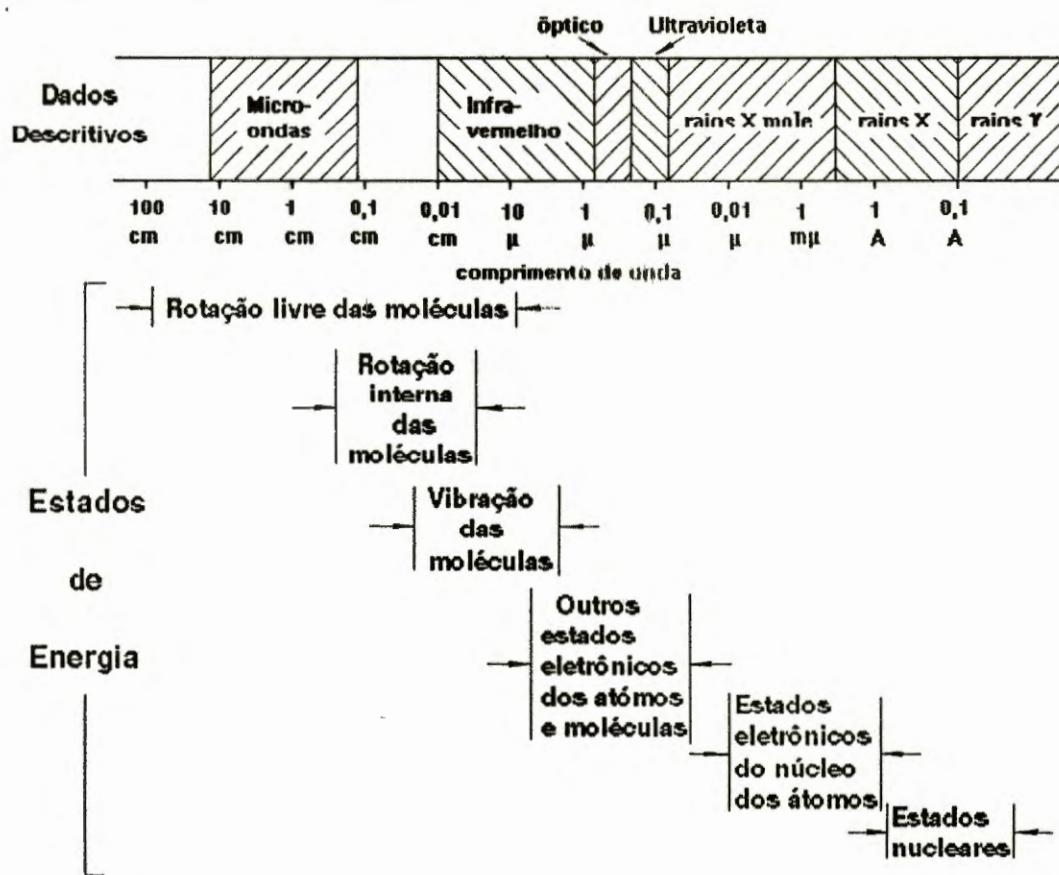


Figura II-2. Faixa Espectral e estado de energia

As microondas, como a luz, irradiam-se através do espaço com uma velocidade de 3×10^8 m/s. Um simples espelho ou mesmo uma placa metálica pode afetar, através dos fenômenos de reflexão e refração, a propagação das microondas, exatamente como a luz, sobre uma interface dielétrica. O processo de focalização também ocorre com as microondas, porém o sistema de espelhos e lentes freqüentemente utilizados em óptica, dá lugar à utilização de refletores ou antenas do tipo corneta. As microondas são absorvidas por diferentes materiais e substâncias - no caso desse trabalho, o sistema água-solo - e mostram fenômenos de interferência. Nas freqüências das microondas, a difração é uma propriedade importante. O fenômeno da difração, que é entendida como a superposição de

muitas ondas, influencia consideravelmente a formação dos campos elétricos e magnéticos, quando um objeto é exposto à energia das microondas. O efeito não é tão acentuado na faixa das frequências ópticas, em que as dimensões dos objetos geralmente correspondem a um grande número de comprimento de onda.

Em síntese, as microondas são uma forma de radiação eletromagnética que possuem propriedades similares às da luz visível, mas distintas daquela em que o comprimento de onda é aproximadamente cinco ordens de grandeza maior. A diferença de comprimento de onda exige técnicas necessariamente diferenciadas para geração, transporte e detecção dos campos de microondas em relação às técnicas da óptica.

A combinação de duas ondas que viajam opostamente é denominada *onda estacionária*.

Considera-se como um bom refletor de microondas uma chapa metálica, isso porque os elétrons de um bom condutor, no caso a chapa metálica, quando estão sujeitos a um campo elétrico das ondas, movem-se de tal forma a reduzir a componente tangencial do campo elétrico, no metal, a zero. As cargas elétricas no metal respondem de tal forma que a onda refletida se destaque da superfície do mesmo, o que cancela a componente tangencial do campo da onda incidente na superfície. Sempre que houver uma interface entre materiais com diferentes propriedades elétricas, deverá ocorrer uma reflexão parcial. A lei da reflexão vale para as microondas refletidas de uma superfície, ou seja, o ângulo do feixe refletido com a normal à superfície é igual ao ângulo do feixe incidente com a normal em um mesmo plano.

As ondas sintonizadas na frequência de microondas sofrem a influência do fenômeno da refração, da mesma forma que com as outras radiações eletromagnéticas. Caso um feixe de microondas incida sobre uma interface entre duas regiões de diferentes propriedades elétricas, com um ângulo de incidência

diferente da normal, teremos que a direção de propagação da onda mudará. Como exemplo, pode-se citar o efeito causado a um feixe de luz quando o mesmo atravessa o meio ar - água, isto é, o feixe é desviado. Para a quantificação dos valores em termos de refração dos feixes incidentes de microondas, utilizam-se as mesmas leis ópticas que governam um feixe de luz.

A polarização é outra propriedade importante das microondas. Para visualizar o fenômeno, imaginam-se ondas em uma corda. Se uma onda sobre uma corda horizontal provoca uma oscilação vertical da mesma, diz-se que a onda é polarizada verticalmente. Se a corda oscila horizontalmente, perpendicularmente à extensão da mesma, diz-se que a onda é polarizada horizontalmente. Somente ondas transversais, ou sejam, ondas cujo movimento ondulatório é perpendicular à direção de sua propagação, podem exibir polarização.

Especificamente para o caso de ondas eletromagnéticas, temos que as mesmas podem apresentar polarização. Portanto, conclui-se que são ondas transversais. A onda é uma oscilação dos campos elétrico e magnético, os quais estão direcionados perpendicularmente à direção de propagação da onda.

A polarização das ondas eletromagnéticas é determinada pela direção do movimento de cargas oscilatórias que atuam como fonte das ondas. Qualquer frequência de onda, em particular as microondas são, em geral, geradas pela aceleração das cargas de elétrons a alta frequência em um fio de antena ou sobre a superfície interna de um guia de onda.

2.3 - Guias de Onda

Quando uma onda eletromagnética é enviada através do espaço vazio, a partir de um ponto de geração, ela, devido à natureza da propagação, torna-se uma onda esférica. Dessa forma, viaja com igual velocidade em todas as direções. Não havendo obstáculos, a mesma pode fluir livremente de sua fonte. Mas a presença de algum tipo de material na trajetória, irá afetar sua propagação.

Os vários tipos de guias de onda são usados para direcionar a propagação de ondas eletromagnéticas, isso se deve à capacidade que uma superfície condutora possui de atuar como invólucro de uma onda elétrica.

Tal qual a luz visível, a energia de microondas pode ser transferida através do espaço por radiação, contudo este meio é bastante ineficiente, quando comparado com outros meios para transporte a distâncias relativamente curtas (VANKOGHNETT, 1972 e SMIT, 1987).

Para a transmissão de microondas, não só linhas de transmissão mas também guias de ondas podem ser usadas para transportar sua energia. Normalmente são utilizadas linhas de transmissão coaxiais, devido ao fato que linhas de transmissão com condutores abertos tendem a irradiar parte da energia e, por esse fato, não são comumente utilizadas nas frequências de microondas.

Uma linha ou cabo coaxial consiste, usualmente, de um condutor cilíndrico circular externo combinado com um condutor interior circular localizado axialmente, como ilustrado na figura II-3. Na construção dos cabos coaxiais ambos os condutores, externo e interno, são feitos de metais que possuem elevada condutividade, tais como cobre ou alumínio. A configuração dos campos elétrico e magnético no cabo está representada na figura II - 3, com o campo elétrico confinado à direção radial e as linhas do campo magnético envolvendo o condutor central. Frentes de onda e energia se propagam no cabo coaxial com uma

velocidade menor do que a velocidade da luz no ar; isto se deve ao preenchimento com uma substância dielétrica no espaço entre os condutores externo e interno.

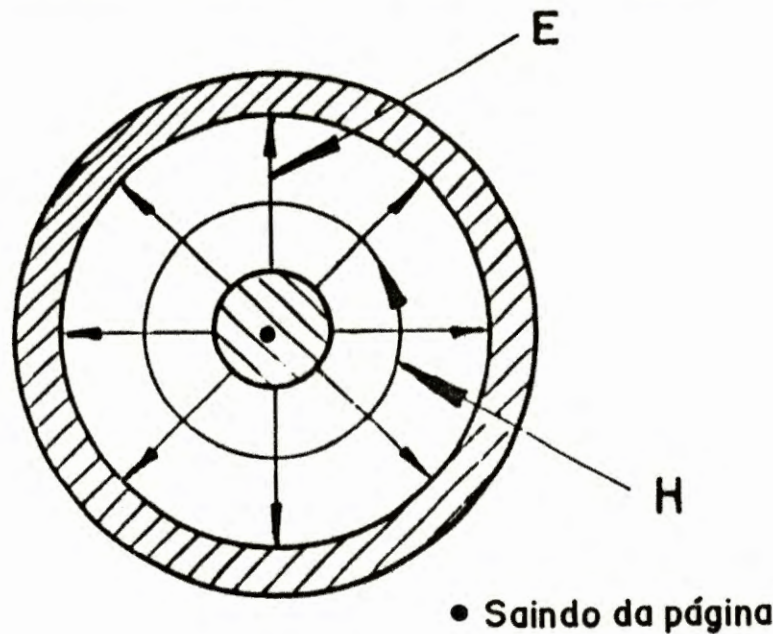


Figura II - 3. A representação esquemática de uma linha de transmissão coaxial.

A forma mais comum da linha coaxial é do tipo de um condutor flexível central, preenchido com um material isolante, um condutor externo trançado e por fim coberto com uma capa resistente e flexível.

A impedância característica de um cabo coaxial pode ser obtida usando-se a seguinte equação:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{b}{a} \quad (\text{II.5})$$

onde ϵ = constante dielétrica do material isolante (F/m)

b = diâmetro interno do condutor externo (m)

a = diâmetro externo do condutor interno (m)

Uma outra maneira de transportar a energia de microondas é através de guias de ondas, com dois tipos característicos: o guia de onda retangular e o guia de onda circular. A utilização de um ou outro tipo de guia está condicionada ao grau

de necessidade. Normalmente, o guia de onda retangular rígido, é mais utilizado, em aplicações experimentais de transmissão de sinais de microondas, devido à facilidade de construção e adaptação aos sistemas-padrões de geração e recepção de microondas e também devido às suas propriedades, que são uniformes e fáceis de calcular.

Uma desvantagem do guia de onda circular com relação ao retangular é que seu corte transversal é muito maior em área do que um correspondente guia de onda retangular usado para transmitir o mesmo sinal. Dessa forma, o espaço físico ocupado é menor no guia de onda retangular, quando comparado ao circular. Outra dificuldade diz respeito à matemática envolvida, que é complexa, quando relacionado ao comportamento do guia de onda com a propagação.

O guia de onda é constituído, simplesmente, de um tubo metálico de condutividade elevada, com secção transversal retangular. Já foi mencionado anteriormente que um bom condutor, tal como uma chapa metálica, é um refletor de microondas. Dessa forma, não é de surpreender que, quando a energia de microondas, mostrada na figura II-2, é introduzida no guia de onda, pode ricochetear em ziguezague entre as paredes, com alguma transferência líquida de energia para diante no guia de onda. Com essa ilustração - a do ricocheteamento - pode-se caracterizar, mas com precisão, o mecanismo pelo qual se efetua a propagação através do guia de onda no modo dominante, que será definido a seguir. As figuras II-4 (a) e (b) ilustram como as múltiplas reflexões ocorrem na forma ziguezague, de lado para lado da parede, em diferentes ângulos, dependendo do comprimento de onda e do tamanho do guia.

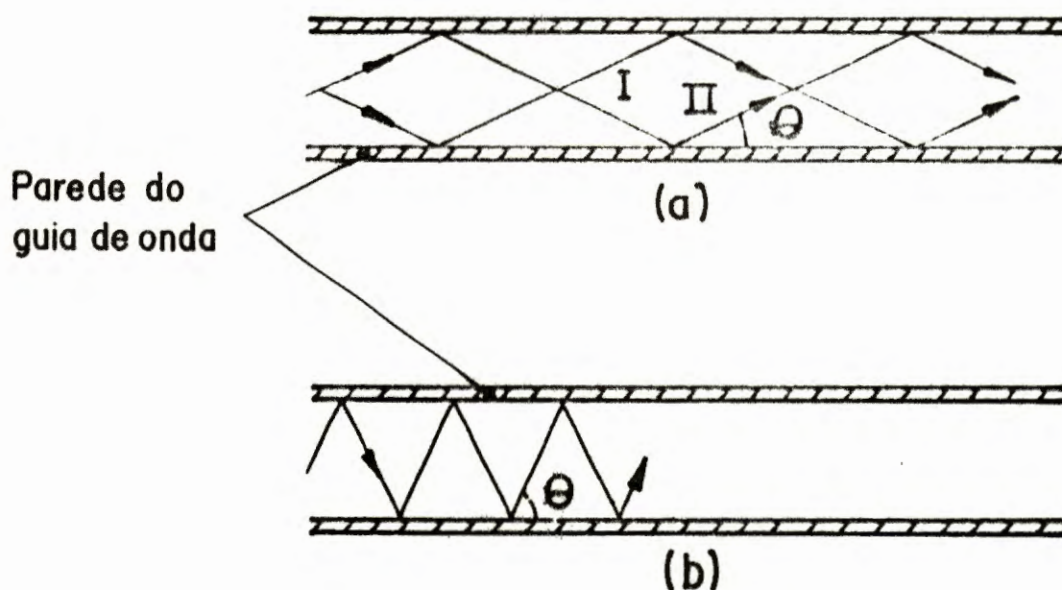


Figura II-4. Representação gráfica das múltiplas reflexões em zigzag da onda eletromagnética em um duto.

As equações de Maxwell revelam que a energia pode se propagar ao longo de um guia de onda com diversas distribuições dos campos elétrico e magnético ou **modos**. No entanto, se a maior das dimensões do guia de onda "a" excede $0,5 \lambda_0$ mas é menor que λ_0 , onde λ_0 é o comprimento de onda da radiação no vácuo, a propagação é possível somente em um modo, que é chamado de **modo dominante**. O modo dominante do campo elétrico possui apenas um componente na direção y, que varia senoidalmente com x, com um máximo de $x=a/2$ e anulando-se em $x=0$ e $x=a$, sendo uniforme na direção y. As figuras II-5 (a) e (b) mostram respectivamente, o campo elétrico na forma tridimensional (a) e no corte da seção transversal do guia de onda retangular (b). O campo magnético possui um componente na direção x, que varia senoidalmente com y, com um máximo em $y=b/2$ e é uniforme na direção y. O campo magnético possui um

componente também tem um componente na direção de propagação que varia cossenoidalmente com x .

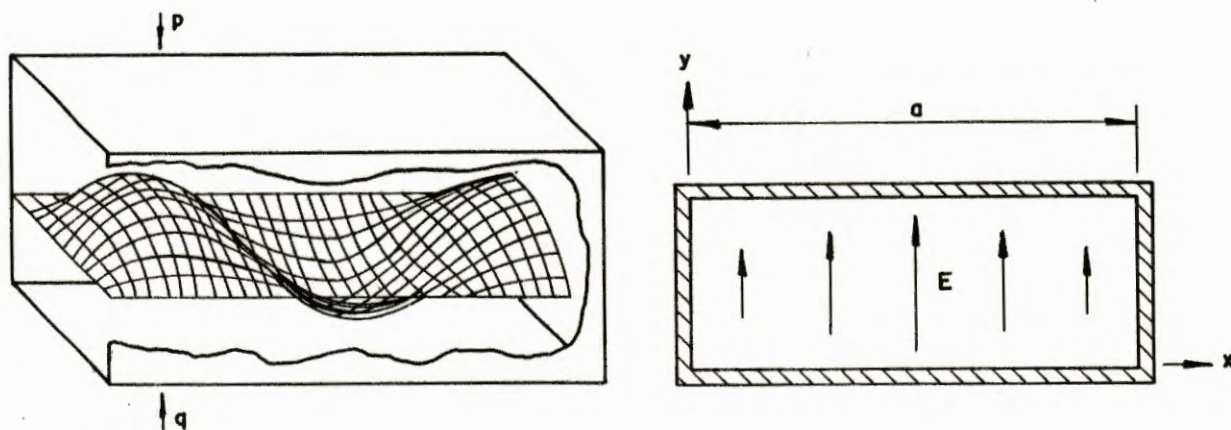


Figura II-5. Representação do campo elétrico: (a) tridimensional; (b) corte da secção transversal.

As ondas guiadas podem, em geral, possuir componentes em todas as três direções coordenadas. Isso é sempre possível se considerarmos, a onda como a soma de duas ondas, uma das quais possui somente campo magnético transversal e não-axial, da mesma forma que o outro possui somente campo elétrico transversal e não-axial. A figura II-6 mostra o comportamento dos dois tipos de campo entre as paredes de um guia de onda retangular.

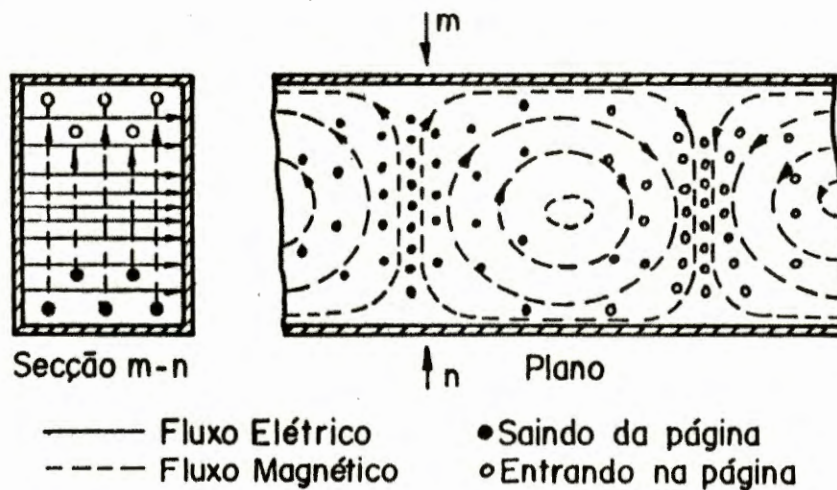


Figura II-6. Comportamento dos campos magnético e elétrico no modo $TE_{1,0}$.

O primeiro tipo é chamado onda *transversal magnética* ou *TM*, a seguinte é denominada de onda *transversal elétrica* ou *TE*. Utiliza-se costumeiramente, para distinguir os vários modos possíveis de $TE_{m,n}$ ou modos $TM_{m,n}$, onde o índice m é o número de meio ciclos do campo-padrão no guia na direção x , sendo um número inteiro, e n é o número de meio ciclos do campo-padrão no guia na direção y , sendo também um número inteiro. Dessa maneira, a/m é o comprimento de meio ciclo na direção x e b/n é o comprimento de meio ciclo na direção y , ambas as medidas em metros.

Caracteriza-se como modo $TE_{1,0}$ aquele em que o modo possui um máximo na variação de x , mas não tem variação em y . Embora seja possível a propagação de modos de ordem mais alta no guia de onda, as suas dimensões são quase sempre escolhidas de forma que somente a propagação do modo dominante seja possível, na faixa de frequências de interesse. A figura II-7 ilustra a representação dos campos elétricos e magnéticos no interior de um guia de onda retangular.

Como discutido acima, observa-se que a propagação somente é possível se a dimensão "a" do guia de onda excede $0,5 \lambda_0$. Se λ_0 for maior que $2a$,

a propagação ou transferência de potência da microonda não consegue seguir adiante no guia de onda. Sendo assim, um guia de onda possui um comprimento de onda de corte, que é para o modo de propagação $TE_{1,0}$, $\lambda_c = 2a$ e uma frequência de corte associada $f_c = c/\lambda_c$. Para frequências abaixo de f_c ou comprimentos de onda maiores do que λ_c , a propagação pelo guia de onda não é possível.

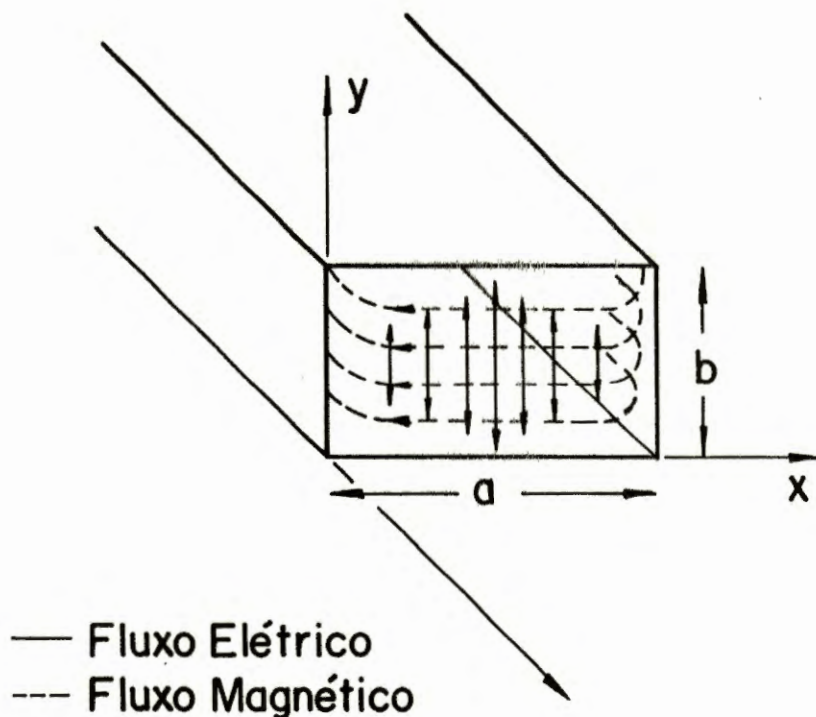


Figura II-7. Representação dos campos elétricos e magnéticos no interior de um guia de onda retangular.

Após a definição de modo dominante, um exemplo matemático mostrará a diferença, física, existente entre a área do guia de onda retangular e a

área de um guia de onda circular. Isso pode ser melhor observado adotando-se o mesmo comprimento de onda de corte para ambos os guias de onda.

Para o modo dominante, (TE_{1,1}), no guia de onda circular tem-se

$$\lambda_0 = \frac{2\pi r}{kr} = \frac{2\pi r}{1.84} = 3,41r \quad (\text{II.6})$$

onde r = raio interno do guia de onda

(kr) = solução é obtida como uma função das equações de Bessel (uma tabela relaciona essa constante com os principais modos de propagação).

A área de um círculo com raio r é dada por

$$A_c = \pi r^2 \quad (\text{II.7})$$

No guia de onda retangular, para o modo TE_{1,0}

$$\lambda_0 = \frac{2a}{1} = 2a \quad (\text{II.8})$$

Se os dois comprimentos de onda são os mesmos, então

$$\begin{aligned} 2a &= 3,41r \\ a &= \frac{3,41r}{2} = 1,705r \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

A área de um guia de onda retangular padrão é

$$A_r = ab = a \frac{a}{2} = \frac{a^2}{2} = \frac{(1,705r)^2}{2} = 1,45r^2 \quad (\text{II.10})$$

A razão das áreas será, dessa forma,

$$\frac{A_c}{A_r} = \frac{\pi r^2}{1,45r^2} = 2,17 \quad (\text{II.11})$$

A velocidade de grupo é caracterizada como a velocidade da propagação da energia eletromagnética ao longo do duto. Como exposto anteriormente, a energia de microondas caminha ao longo do duto ricocheteando em ziguezague e devido a este tipo de deslocamento, a velocidade de propagação no duto é menor que a velocidade da luz. A figura II-8 mostra e relaciona as componentes de velocidade de grupo (v_g), velocidade da luz (c) e os comprimentos de onda.

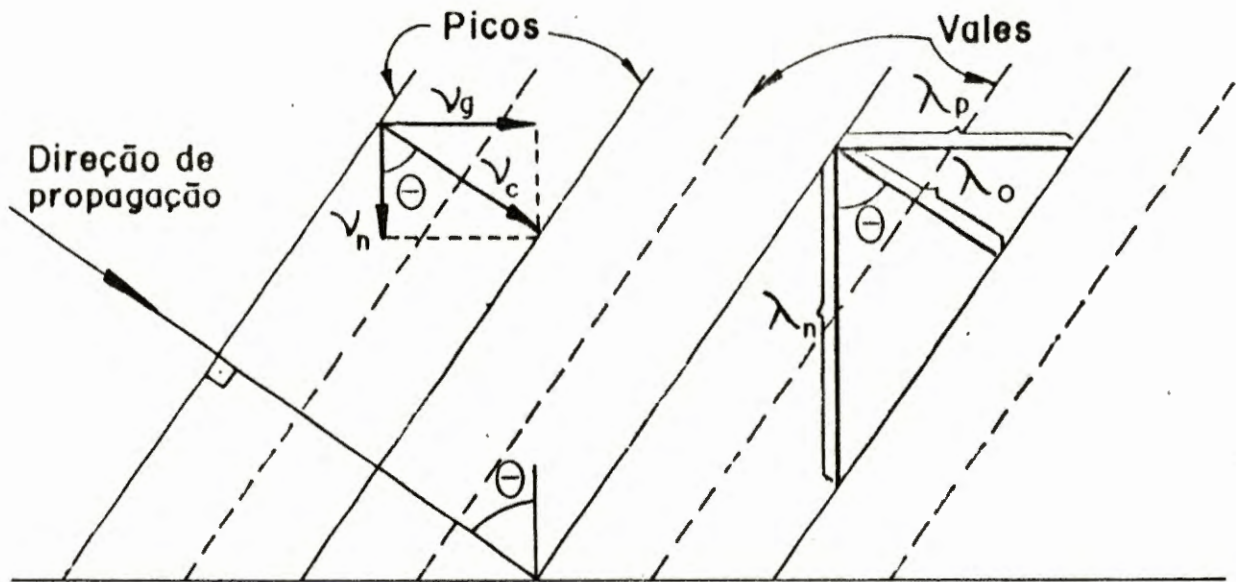


Figura II-8. Ilustração da reflexão em ziguezague da onda eletromagnética e a representação matemática

Abaixo, tem-se o desenvolvimento matemático para a obtenção da velocidade de grupo:

$$\begin{aligned}
 v_g &= v_c \cdot \text{sen} \theta \\
 \text{sen} \theta &= \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \\
 \text{sen} \theta &= \sqrt{1 - \left(\frac{m \lambda_0}{2a} \right)^2} \quad (\text{II.12}) \\
 \text{sabendo-se-que: } \lambda_c &= \frac{2a}{m}
 \end{aligned}$$

$$v_g = v_c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)^2} \quad (\text{II.13})$$

λ_0 é o comprimento de onda na direção de propagação e

λ_c é o comprimento de onda de corte.

A onda eletromagnética se compõe de dois campos, o elétrico e o magnético. A intensidade do campo elétrico (E) é dada em volts por metro e do magnético (H) em amperes por metro. Relacionando as intensidades dos dois campos, resultará:

$$\frac{E(\text{volts / metro})}{H(\text{amperes / metro})} = \frac{\text{volts}}{\text{amperes}}$$

volts/ampère é conhecido na teoria de circuito com o nome de impedância. No caso específico de propagação, de impedância de onda do espaço livre e no vácuo (Z) e é definida como 377Ω . A equação (II-10) relaciona Z com a permeabilidade do

vácuo μ_0 ($1,26 \times 10^{-6}$ H/m) e a permissividade elétrica do vácuo ϵ_0 ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (\text{II.14})$$

O valor de Z aumenta para os materiais magnéticos. Para os materiais dielétricos e condutores, o seu valor é menor.

No caso específico de um guia de onda retangular, ter-se-á uma impedância que é conhecida como impedância de onda, Z_0 , que relaciona os campos elétrico e magnético de tal forma a produzir casamento com a impedância característica da linha de transmissão. Tem-se que Z_0 , para ondas TE,

$$Z_0 = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_0} \quad (\text{II.15})$$

e para ondas TM,

$$Z_0 = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_p} \quad (\text{II.16})$$

onde λ_p é o comprimento de onda no guia de onda, sendo:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (\text{II.17})$$

2.4 - DETECÇÃO DE POTÊNCIA DE MICROONDAS

Em termos matemáticos, pode-se demonstrar que a densidade de potência é dada pelo módulo do produto vetorial:

$$|P| = |E \times H| \quad (\text{II.18})$$

Para calcular a potência total sendo transferida através de uma determinada área A, o componente de P normal a A é integrado sobre a área. Geralmente E e H não estão em fase no tempo e o fluxo de potência, nesse caso, está associado à parte real do vetor complexo ($E \times H^*$). Como já exposto, para uma onda plana no espaço livre, o módulo de E e o módulo de H se relacionam por $E=Z H$, onde Z é a impedância do espaço livre. Conseqüentemente, $|P| = |E|^2 / Z$ para uma onda plana. Essa simples relação entre densidade de potência e intensidade de campo elétrico se aplica somente para ondas que são essencialmente planas

Na grande maioria dos experimentos com microondas, a detecção da potência do sinal de rf é um dos pontos mais importantes..

Para o sinal detectado de microondas, ser amostrado, é necessário a conversão da potência do sinal, direta ou indiretamente, em alguma outra forma de sinal elétrico, mecânico ou óptico.

Alguns dos sistemas utilizados para detecção estão abaixo enunciados:

- 1) Dispositivos Mecânicos - a indicação se faz através da medida de uma força, por intermédio de um eletroscópio construído com uma folha laminar de ouro e utilizada para medir, de forma direta, a pressão exercida pela radiação.
- 2) Indicadores Visuais - tubo de neon e lâmpadas.

3) Indicadores Termoelétricos - várias formas de dispositivos termométricos são utilizados, tais como: termopares, termistores e bolômetros.

4) Retificadores Elétricos - alguns tipos de elementos não lineares, tais como diodos retificadores a cristal, triodos, Klystron entre outros, são utilizados.

Dos dispositivos acima citados, os dois primeiros não são geralmente utilizados para medidas práticas e são apenas mencionados como método.

Já os dispositivos termoelétricos, por outro lado, são mais comumente utilizados no processo de interação da onda eletromagnética e são úteis para medidas absolutas.

Um sistema normalmente utilizado para detecção é o bolômetro, que é também um detector termoelétrico para as ondas na faixa de microondas. O dispositivo é constituído de um fio condutor que, estando sujeito à radiação de microondas, sofrerá aquecimento que resultará na variação da sua resistência. Para seu funcionamento é necessário que esteja polarizado com uma corrente contínua e que a potência do sinal de rf seja muito menor que a potência de polarização. Dessa forma, o sinal de tensão resultante na saída será proporcional à potência de microonda que provocou a mudança de resistência. Tais instrumentos são aptos a medir potências com precisão de $\pm 2\%$ (GINZTON, 1957).

O método elétrico possibilita a conversão de sinais de microondas para *dc* ou para baixas frequências. Obtendo-se a conversão, métodos convencionais podem ser utilizados para realizar a medida. Na utilização dos elementos não-lineares, para sistemas que trabalham com microondas, destacam-se os retificadores e os conversores de frequência. Os diodos retificadores a cristal são os mais utilizados como detectores de radiação de microondas devido à sua simplicidade, versatilidade, sensibilidade e disponibilidade (GINZTON, 1957).

2.5 - PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO

Duas propriedades de transmissão são fundamentais para caracterizar o fenômeno da atenuação da energia no interior do material: a reflexão e a transmissão de energia nas superfícies do material. Os parâmetros envolvidos e que caracterizam tais propriedades são: impedância intrínseca e constante de atenuação

A impedância intrínseca e a constante de atenuação podem ser entendidas através dos conceitos básicos acoplamento energético e absorção energética. Esses conceitos são também bastante utilizados em processos de aquecimento por sistemas de microondas.

2.5.1 - ACOPLAMENTO ENERGÉTICO

A impedância intrínseca do material relativa ao vácuo (ou ao ar) em uma determinada cavidade é da maior importância no acoplamento energético e é dada por (VON HIPPEL, 1954):

$$Z_m = Z \cdot \sqrt{\frac{1}{\epsilon(\omega)}} \quad (\text{II.19})$$

As diferenças existentes entre a impedância do material que compõe a amostra e o vácuo irão determinar as frações da energia transmitida e refletida nas superfícies do material, tal como ilustrado na figura II-10. Isto é, uma onda eletromagnética que se propaga no ar e atinge a superfície do material, a um certo ângulo de incidência, é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. As magnitudes relativas dependerão do grau de discrepância das impedâncias entre o material e o ar. Quanto maior a disparidade, mais a energia incidente será refletida

da interface ar-material e menos será transmitida a amostra. As razões entre as potências refletida e transmitida, em termos da potência incidente, respectivamente, podem ser calculadas, para materiais homogêneos, através da equação de Snell:

$$\text{sen}\psi = \frac{Z_m}{Z} \cdot \text{sen}\phi \quad (\text{II.20})$$

A relação de potência refletida para a onda que choca contra a superfície a um ângulo de incidência é, então:

$$R_n = |Z \cos \psi - Z_m \cos \phi| / |Z \cos \psi + Z_m \cos \phi| \quad (\text{II.21})$$

A relação de potência transmitida é:

$$T_n = |4ZZ_m \cos \psi \cos \phi| / |Z \cos \psi + Z_m \cos \phi|^2 \quad (\text{II.22})$$

Essas relações indicam a grandeza relativa dos níveis de potência refletida e transmitida, respectivamente, para uma onda que se propaga no espaço livre sobre uma superfície refletora. Sua soma é a unidade (SKILLING, 1948). Com reflexão, o campo no espaço livre será a soma de uma onda que se propaga e uma onda estacionária. Caso o coeficiente de reflexão se aproximar do valor unitário, devido a mudanças bruscas das propriedades dielétricas ϵ e da permeabilidade μ na superfície refletora, a onda será quase toda refletida e dessa forma o campo no espaço livre se tornará essencialmente uma onda estacionária. Para pequenas mudanças nas propriedades dielétricas (ϵ) e da permeabilidade (μ) junto à superfície, a onda refletida será muito pequena e o campo no espaço livre se reduz essencialmente a uma onda em propagação.

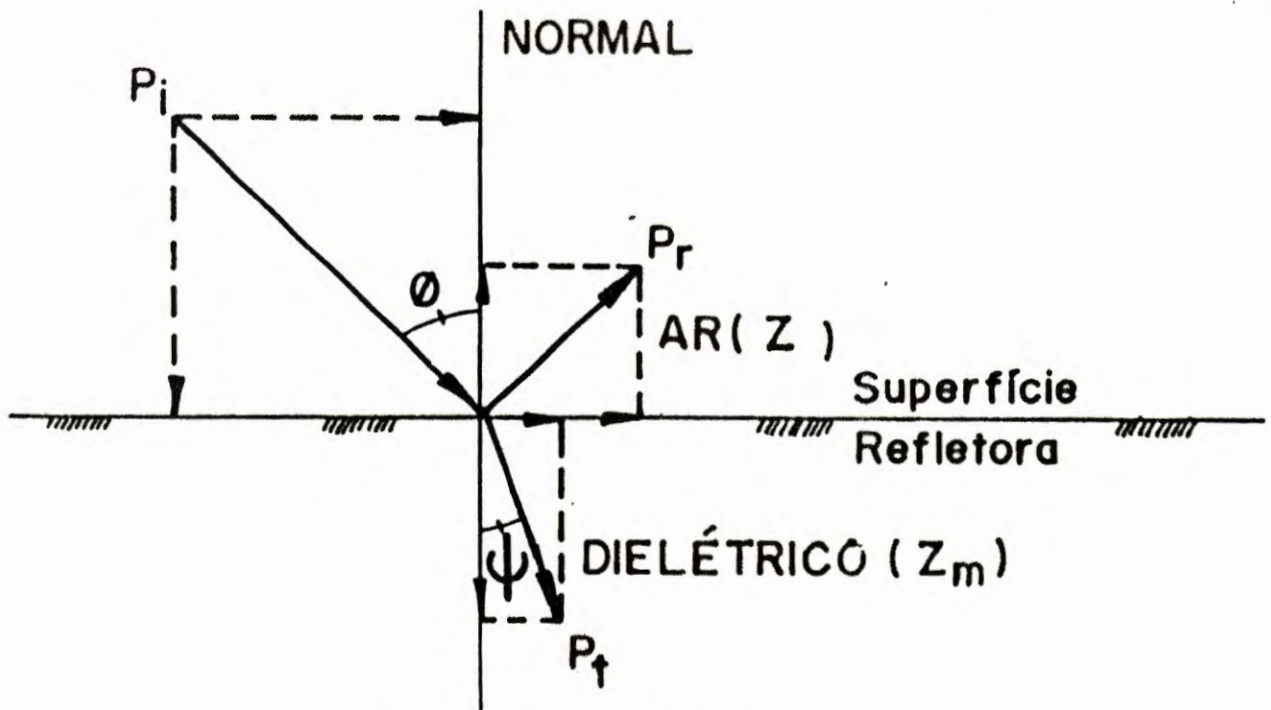


Figura II-10. Reflexão e transmissão da energia de microondas.

Assim podem ser criados modos de ondas estacionárias dentro de amostras homogêneas, que dependerão das características de absorção da amostra e das condições para reflexão junto à interface entre o exterior e o interior do mesmo.

2.5.2 - ABSORÇÃO ENERGÉTICA

A atenuação do sinal de rf em um duto é devido a três fatores básicos:

- a) Ao comprimento da onda quando superior à possibilidade do duto a atenuação é quase imediata.
- b) As perdas provocados por dielétrico no interior do duto.
- c) As perdas nas paredes do duto, ao longo das quais passam correntes comun.

A absorção da energia de microondas no interior de uma amostra pode ser expressa por um fator de atenuação α , que está relacionado com às propriedades

dielétricas do material. A propagação de uma onda plana em um material dielétrico é caracterizado por um fator de atenuação α e por um fator de fase β (constante de fase), de acordo com as relações:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (\text{II.23})$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{\epsilon(\omega) \cdot \mu(\omega)} \quad (\text{II.24})$$

O componente real ou fator de atenuação α está relacionado com a condição do material em atenuar ou absorver a energia elétrica acoplada pelo material de um campo eletromagnético e é o principal determinante da distribuição energética em materiais dielétricos homogêneos. O fator de atenuação governa a capacidade do componente elétrico do campo penetrar o interior do dielétrico. Equivale ao recíproco da profundidade de penetração Z do material, ou seja, à profundidade a partir de uma superfície irradiada onde a intensidade do campo elétrico foi reduzida a $1/e$ do seu valor na superfície. A profundidade de penetração é dada por (VON HIPPEL, 1954):

$$z = \frac{1}{\alpha} = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi}\right) \cdot \left\{ \frac{\epsilon_r'}{2} \cdot \left[(1 + \tan^2 \sigma)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{m}) \quad (\text{II.25})$$

onde:

ϵ_r' - constante (permissividade) dielétrica relativa = $\epsilon_r(\omega)/\epsilon_0$;

ϵ_0 - constante dielétrica do vácuo = $8,854 \times 10^{-12}$, F/m;

$\tan \sigma$ - fator de perda = $\epsilon_i(\omega)/\epsilon_r(\omega)$.

conseqüentemente o fator de atenuação α sera dado por:

$$\alpha \cong 1,482 \times 10^{-8} f_0 \{ \epsilon_r' [(1 + \tan^2 \sigma)^{\frac{1}{2}} - 1] \}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (\text{II-26})$$

f_0 - frequência no vácuo, Hz.

Demonstra-se que a intensidade do campo elétrico que penetra no interior do material cai exponencialmente a partir da superfície, sendo dada, conforme a lei de Lambert, pela equação:

$$E_z = E_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (\text{V/m}) \quad \text{(II.27)}$$

A potência dissipada por unidade de volume (transformada em calor) em um corpo homogêneo é dada por:

$$\text{onde: } P_v = \sigma \cdot \frac{E_m^2}{2} = \omega \cdot \epsilon_i(\omega) \cdot \frac{E_m^2}{2} \quad (\text{W/m}^3) \quad \text{(II.28)}$$

$\sigma = \text{condutividade elétrica (Siemens / m)}$

ou seja

$$P_v = \pi f_0 E_m^2 \epsilon_0 \epsilon_r' \tan \sigma \cong 2,782 \times 10^{-11} f_0 E_m^2 \epsilon_r' \tan \sigma \quad (\text{W/m}^3) \quad \text{(II.29)}$$

Combinando essa expressão à da intensidade do campo, tem-se:

$$P_{vz} \cong 2,782 \times 10^{-11} f_0 E_0^2 \epsilon_r' \tan \sigma \cdot e^{-2\alpha z} \quad (\text{W/m}^3) \quad \text{(II.30)}$$

A potência acoplada do campo, porém não absorvida pelo material a uma certa profundidade da superfície é, então:

$$P_{vz} = P_0 e^{-2\alpha z} \quad \text{(II.31)}$$

O componente imaginário β do fator de propagação γ , ou fator de fase, é a variação de fase, por unidade de comprimento, na direção de propagação da onda. Como para uma distância igual a λ a variação de fase é 2π , então $\beta=2\pi/\lambda$. Assim correspondendo a uma velocidade de fase: $v = \omega/\beta$ da onda em propagação no dielétrico.

O fator de fase β é calculado a partir das propriedades dielétricas do material e é dado por (VON HIPPEL, 1954):

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right) \cdot \left\{ \frac{\epsilon_r'}{2} \cdot \left[(1 + \tan^2 \sigma)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.32})$$

ou seja:

$$\beta \cong 1,482 \times 10^{-8} f_0 \{ \epsilon_r' [(1 + \tan^2 \sigma)^{1/2} + 1] \}^{1/2} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (\text{II.33})$$

O período espacial ou comprimento da onda em propagação no dielétrico é mais curto do que o comprimento de onda no vácuo, portanto, sua velocidade de fase, ou seja, velocidade no dielétrico, será menor do que a velocidade no vácuo.

Capítulo III-CIRCUITOS E DISPOSITIVOS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DE MICROONDAS

3.1 - INTRODUÇÃO

"Das muitas interessantes tendências já desenvolvidas em rádio, talvez nada tenha sido mais espetacular do que a que diz respeito as altas frequências." Esta frase dita por FISK, (1977) em seu artigo Solid-state-microwave rf generators, publicado na revista "Ham Radio Magazine" em 1977 reflete de maneira bem clara a evolução, e porquê não dizer, a revolução pela qual estão passando os sistemas para geração, transmissão e recepção em telecomunicações com microondas.

O desenvolvimento de sistemas para trabalhar em microondas passou por etapas e tipos de construção distintas que, dentro da evolução histórica, marcaram com devida importância o seu tempo.

Existem duas categorias de osciladores de microondas:

3.1.1) Tubo de vácuo de microondas

Podendo ser divididos em três tipos, à categoria de tubo de vácuo de microondas:

3.1.1.1) Oscilador Barkhausen-Kurz (1930)

O mecanismo dos osciladores *Barkhausen-Kurz*. é a base para o primeiro método de obtenção de sinais de radiofrequência (rf) em frequência ultra-alta (uhf).

O princípio de funcionamento se baseia no fato de que uma placa metálica, denominada grade, polarizada positivamente, provoca a aceleração dos elétrons provenientes do filamento. Grande parte desses elétrons se chocam com a grade, dissipando sua energia em calor, mas outros passam através de sua abertura e são repelidos pela chapa carregada negativamente, posicionada ao lado da mesma. Os elétrons passam, então, a ficar orbitando entre a grade e a chapa, em frequência muito alta, até que a tensão que polariza uma das placas cesse. A figura III-1 mostra o esquema do oscilador *Barkhausen-Kurz*. No caso do oscilador em questão, a frequência de oscilação é dependente da tensão aplicada.

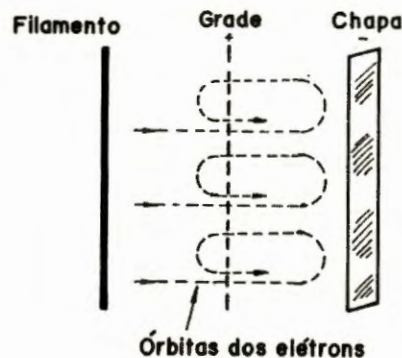


Figura III-1. Princípio de funcionamento do oscilador Barkhausen-Kurz, que se constitui em método simples de obtenção de sinais de rf em uhf.

3.1.1.2) *Magnetron (1930)*

O princípio de funcionamento do magnetron é: os elétrons que são emitidos pelo cátodo não chegam ao ânodo, que se encontra positivamente carregado, se o campo magnético imposto ao sistema for bastante forte. A figura III-2 mostra o diagrama esquemático e o funcionamento do magnetron.

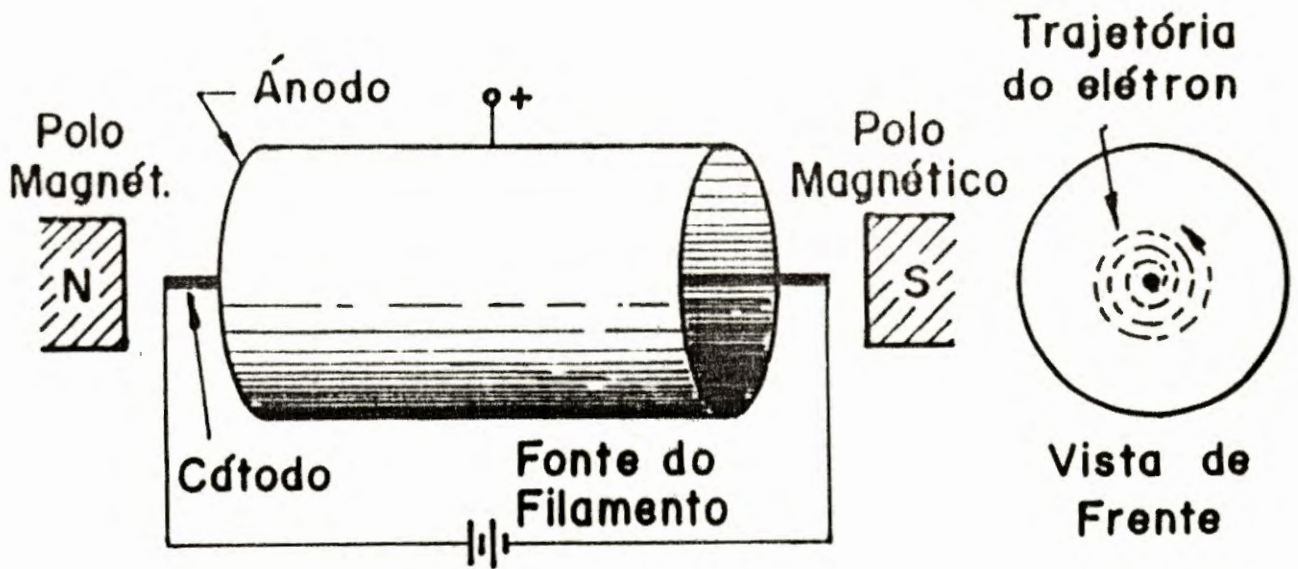


Figura III-2. Diagrama esquemático do magnetron.

Se o campo magnético estiver adequadamente ajustado, os elétrons irão formar uma órbita espiralada ao redor do cátodo, com o número de oscilações determinado por um circuito externo sintonizado. Em 1930, dispositivos como estes foram usados para gerar baixas quantidades de energia de microondas em comprimentos de onda de 3cm (10 GHz).

3.1.1.3) *Klystron* (1937)

Um feixe de elétrons que passa através da fenda de uma cavidade ressonante (A) sofre influência da polaridade de um sinal de radiofrequência (rf) que alimenta a cavidade. Isto é, durante meio período de tempo do sinal de rf, os elétrons são acelerados e durante o outro meio período são retardados. Portanto são formados pacotes de elétrons durante cada meio ciclo do sinal de rf. O tempo de

trânsito do pacote de elétrons e a distância entre as duas cavidades ressonantes são fatores importantes para determinar a frequência de trabalho da válvula Klystron.

O grupo de elétrons, ao atravessar a fenda da cavidade (B), excita-a eletricamente e a mesma passa a ter oscilações cada vez maiores. Parte destas oscilações são devolvidas à cavidade (A) através de realimentação (L), existente normalmente entre as cavidades, enquanto a maior parte do sinal gerado é aproveitado para ser irradiado. A figura III-3 mostra o princípio de funcionamento da válvula. Quando uma realimentação é instalada entre a cavidade ressonante de saída e a cavidade ressonante de entrada, a Klystron se torna um oscilador por si só excitado. Em alguns tipos, as válvulas Klystron possuem cavidades intermediárias, que servem para modular o feixe de elétrons e melhorar o ganho do dispositivo.

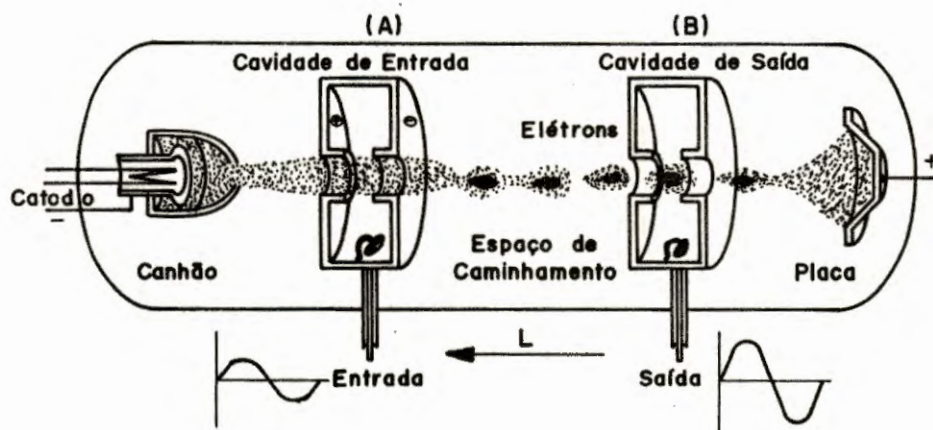


Figura III-3. Princípio de funcionamento da válvula Klystron.

Para obter o melhor rendimento do oscilador, algumas características físicas da construção da válvula são importantes, tais como: a geometria da fenda, a presença ou ausência de grades, o espaçamento entre as duas cavidades ressonantes e a velocidade dos elétrons no feixe.

Em microondas, todavia, o tempo de trânsito é ainda um fator limitante e é nesse caso onde entra a analogia entre o vácuo de microondas e o desenvolvimento de semicondutores. Como o oscilador Barkhausen-Kurz, magnetron, e Klystron que os precederam, a operação de aparelhos Gunn, diodos de avalanche e outras fontes de rf de microondas por estado sólido são também baseados no tempo de trânsito do elétron.

3.1.2) Semicondutores

3.1.2.1) Diodo por efeito avalanche (IMPATT) (1965)

A construção básica de um diodo IMPATT (Impact Avalanche and Transit Time) é idêntica a de qualquer diodo de junção *pn*. e é construído na maioria das vezes, de sílicio, ou germânio e mais recentemente de arseneto de gálio.

Os diodos IMPATT empregam propriedades que são conhecidas do desenvolvimento de semicondutores, tais como a ionização por impacto e o tempo de trânsito, para produzir a resistência negativa em frequências de microondas.

A resistência negativa é considerada um importante fenômeno e também muito explorado no desenvolvimento de circuitos osciladores a semicondutor, sendo que esta condição fornece uma elevação de corrente com uma conseqüente queda de tensão e vice-versa. Dessa forma uma diferença de 180° entre o sinal de tensão e a corrente é obtida.

O surgimento da resistência negativa, no diodo IMPATT (ver figura III-4) é provocado por dois tipos de atraso: um é o atraso que o processo de ionização por impacto propicia e que é conhecido como "atraso causado pelo efeito avalanche", e o outro atraso é causado pelo tempo de trânsito, que é descrito como tempo necessário para que os portadores de carga atravessem a região de

deslocamento, região que possui uma alta resistência e que serve como espaço de deslocamento para os portadores. Essas duas propriedades provocam a relação de defasamento entre a tensão e a corrente. Somando-se esses dois atrasos ao tempo de meio ciclo do sinal de rf fornecido pela fonte, obter-se-á a resistência eletrônica negativa do diodo na frequência correspondente.

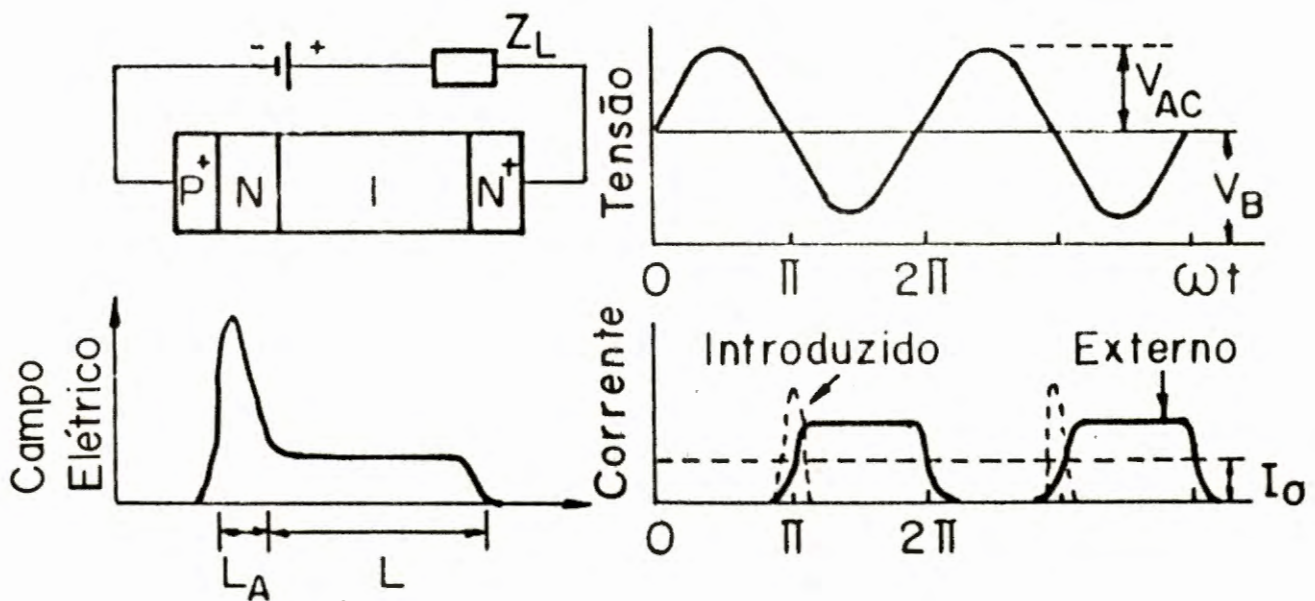


Figura III-4. Podem ser vistos a estrutura do diodo IMPATT, o campo elétrico e formas de onda de tensão e corrente.

O diodo IMPATT é um diodo construído especialmente para suportar a condição de avalanche repetidas vezes, não ocorrendo, portanto, a usual ruptura que ocorre em diodos comuns quando sujeitos a um alto valor de tensão reversa, e que está acima do valor limite característico do diodo.

O pulso gerado pela corrente de avalanche, e que é lançado dentro da zona de deslocamento, dirige-se lentamente para o lado *n* da junção, carregado positivamente. Os elétrons caminham através do material semiconductor a uma

velocidade aproximadamente constante (em torno de 10^7 cm/segundo), tanto que o tempo de passagem dos elétrons através da região de deslocamento é obtido dividindo-se o valor do tamanho da região de deslocamento, W_D , pela velocidade do elétron, v

$$T=W_D/v \quad (III.1)$$

onde T é o tempo de deslocamento. O tempo de deslocamento obtido é relacionado com a frequência de operação do dispositivo. A largura da região de deslocamento é cuidadosamente controlada no processo de fabricação.

3.1.2.2) TRAPATT (1970).

O diodo TRAPATT (TRApped Plasma Triggered Transit) é resultante de estudos exaustivos sobre o diodo IMPATT, já que estes não poderiam operar em baixa frequência, isto é, frequências menores que 1000 MHz.

Pesquisadores conseguiram obter novos modos de operação, com ótimo resultado e eficiência, através de modificações empíricas no diodo IMPATT FISK, (1977).

Para explicar a alta eficiência e o princípio básico de funcionamento, foram realizadas simulações computacionais nos laboratórios da Bell. Com isso, conseguiu-se compreender o princípio de trabalho, que se baseia na formação de um bloqueador por intermédio de um estado plasma de tensão entre sucessivas varreduras no ciclo clássico do IMPATT reduzindo, portanto, o tempo de deslocamento e, conseqüentemente, a frequência.

3.1.2.3) Oscilador Gunn (1963)

O oscilador Gunn possui esse nome em homenagem ao cientista britânico J.B Gunn, que estudou os efeitos de campos elétricos elevados nos semicondutores.

Em 1963, quando John Gunn, da IBM, estava estudando a resistência volumétrica de uma amostra de arseneto de gálio tipo- n descobriu que, quando a tensão aplicada através da amostra era aumentada acima de um certo ponto (ver Figura-III-5-a) a corrente se tornava instável, começando a pulsar ciclicamente nas frequências de microondas(GUNN, 1964). A causa para tal mecanismo não havia ficado clara, mas Gunn suspeitou que a resistência negativa do semicondutor era provavelmente responsável pelo efeito, sugerindo que um decaimento na mobilidade dos elétrons com o incremento da tensão aplicada poderia explicar a resistência negativa. Tal fato foi posteriormente comprovado (FISK, 1977).

Ao contrário de muitos outros materiais, os elétrons no arseneto de gálio (GaAs) podem estar em uma das duas bandas de condução, onde uma das bandas propiciará uma maior velocidade ao elétron do que a outra.

A característica marcante do semicondutor (GaAs) é a relação entre a variação da tensão através do GaAs e a mobilidade de seus elétrons. Dentro da condição de trabalho do semicondutor, existe a tensão limite (V_{th}) a qual é, por definição, a tensão aplicada na qual a resposta da corrente inicial se mostra instável, e esta é geralmente bem definida, (ver figura III-5-b). Para distintas amostras, existem valores diferentes de V_{th} (GUNN, 1964).

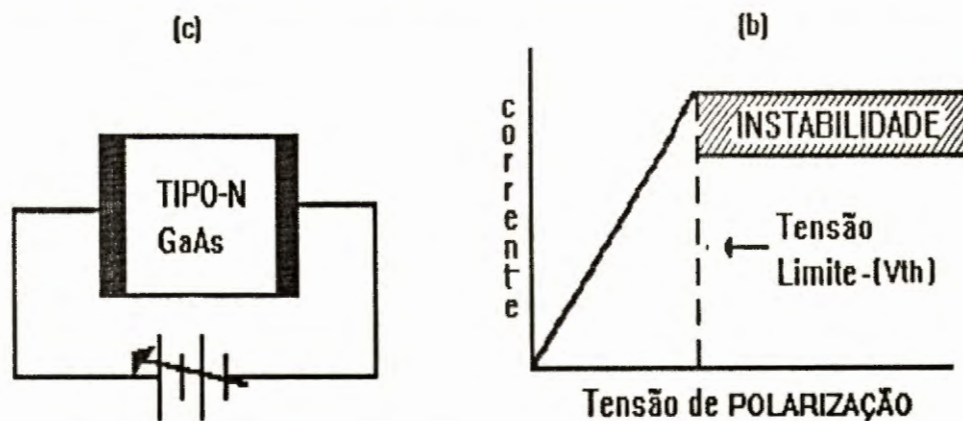


FIGURA III-5-Quando a tensão de polarização aplicada a uma amostra de arseneto de gálio do tipo-n (GaAs) é aumentada acima do ponto limite, a corrente passa a se tornar instável e pulsar de modo cíclico. Este é um resultado da resistência negativa e é denominado efeito GUNN.

Com o aumento gradativo da tensão através do GaAs, mais e mais elétrons se tornam excitados na região de baixa mobilidade. Abaixo do ponto limite, a corrente através do material é proporcional à tensão aplicada, tanto que o mesmo se comporta como um resistor. Quando a tensão é incrementada acima do limite, alguns elétrons são deslocados para a região de alta mobilidade em que a velocidade de propagação dos elétrons através do GaAs, começa a cair. Já que a corrente através do material é proporcional à velocidade do elétron, isso significa que um resistor GaAs (Gunn diode) irá ter uma região de resistência negativa decaindo a corrente com o incremento da tensão (ver Figura III-6). Como a tensão é incrementada além da região de resistência negativa, o fluxo de corrente, uma vez mais, incrementa com a tensão aplicada. Pelo fato desse comportamento ser baseado na transferência de elétrons de uma banda de condução para outra, os osciladores de microondas desse tipo são chamados *Osciladores por Transferência de Elétrons* ou OTEs (FISK, 1977).

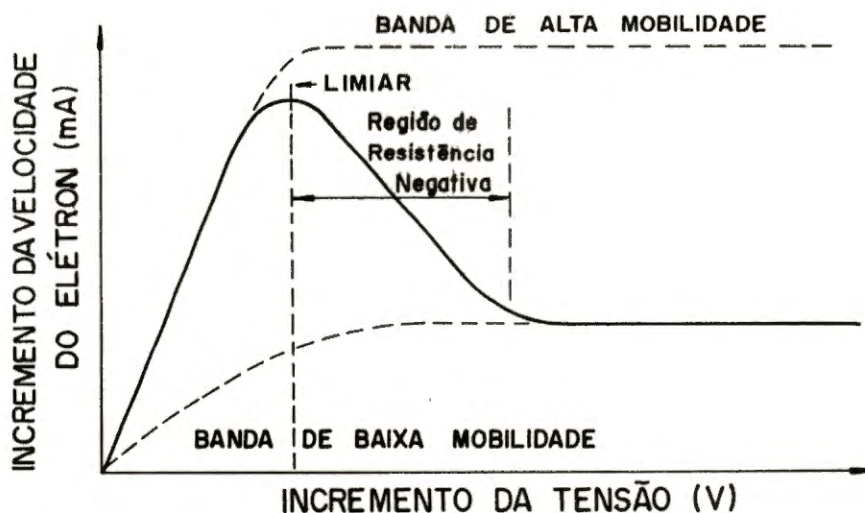


FIGURA III-6. A velocidade do elétron em um GaAs como uma função do campo elétrico aplicado.

O princípio de funcionamento, se baseia no seguinte ponto: uma perturbação no cátodo produz uma região de elevada intensidade de campo que se desloca até o ânodo. Este domínio de campo elevado desaparece quando chega ao ânodo e um novo domínio se forma no cátodo e da mesma forma se desloca até o ânodo, e assim sucessivamente. O tempo de deslocamento desde o cátodo até o ânodo (tempo de trânsito) determina a frequência de oscilação (ver FIGURA III-7). Assim, um cristal construído com tamanho menor oscilará com maior frequência que um cristal de maior dimensão (PHILIPS, s.d.). Como exemplo de construção do oscilador, temos as seguintes características: a velocidade do domínio é em torno de 10^7 cm por segundo dessa forma o "wafer" de GaAs deve ter uma espessura em torno de 10 microns para uma operação em 10 GHz. Dado que a frequência de saída da corrente pulsada é uma função do tempo de deslocamento, este é chamado de modo de operação com tempo de trânsito (FISK, 1977)

Diodo Gunn

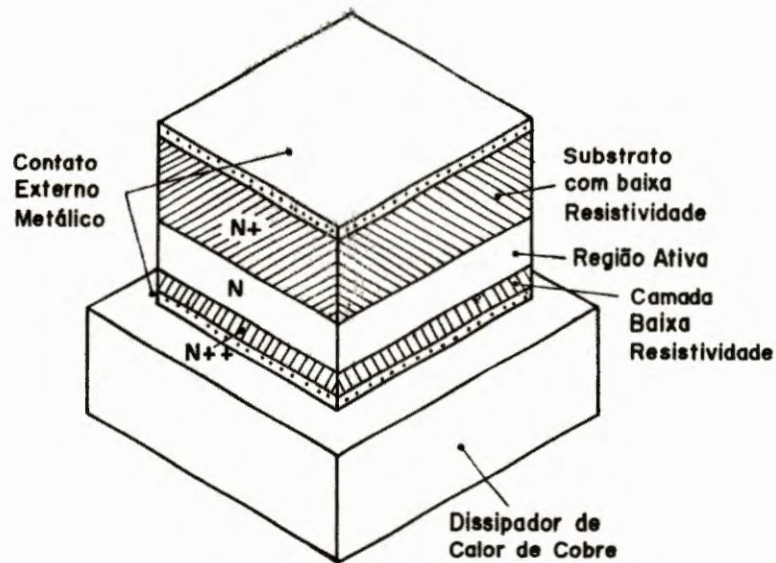


Figura III-7 - Diodo Gunn em sua forma de "wafers", de arseneto de gálio

Características de construção do diodo Gunn:

a-) crescimento epitaxial com três camadas de cristal de GaAs. O fosfeto de índio também é utilizado como semicondutor;

b-) potência de saída varia de 15 mW a 1W;

c-) a camada N é a região ativa, a frequência central de oscilação é determinada pela sua espessura;

d-) o substrato N⁺ possui baixa resistividade e sua espessura pode ser maior que 50 μm .

e-) a camada N⁺⁺ possui resistividade ainda menor que o substrato N⁺, sua espessura varia de 1 a 2 μm .

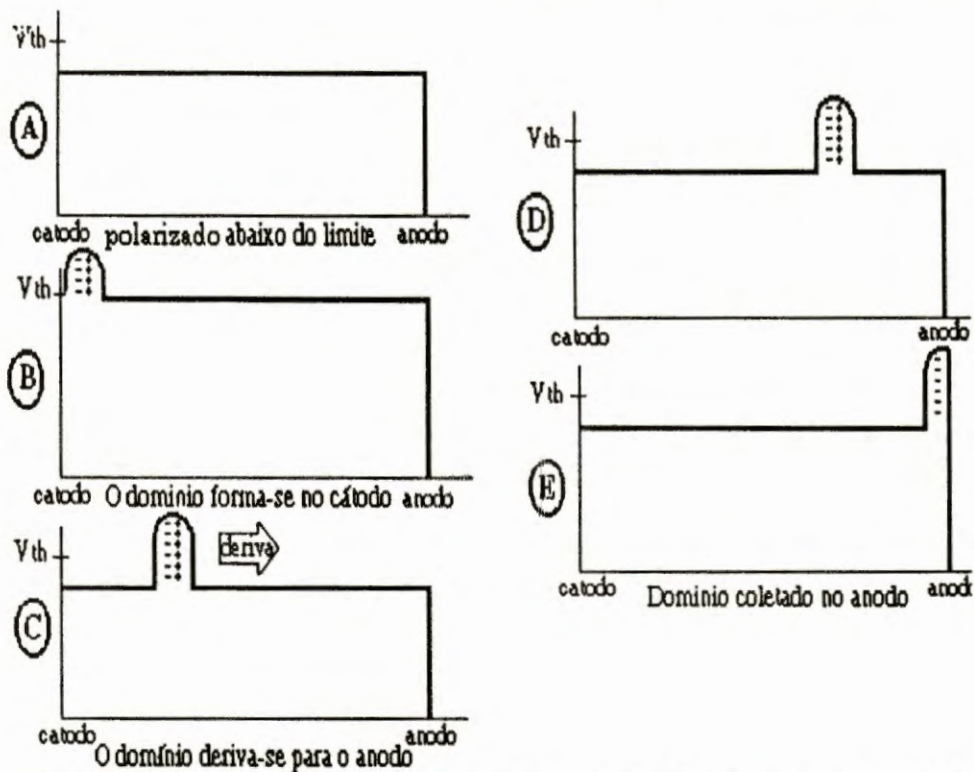


FIGURA III-8. Quando a "wafer" do GaAs é polarizada acima do limite, V_{th} , o material se comporta como uma resistência negativa (A). Uma camada de carga se forma no cátodo quando o material é polarizado acima do limite (B), e a velocidade através do ânodo gira em torno de 10^7 cm por segundo (C) e (D). Nota-se que, quando se forma o domínio do campo, o campo elétrico no resto do material cai abaixo do nível limite. Quando o domínio é coletado no ânodo (E), o campo momentaneamente incrementa acima do limite, um novo domínio se forma no cátodo e o processo é repetido, oscilando.

Em circuitos práticos de microondas, o dispositivo Gunn é montado em um circuito ressonante com um alto Q^1 - o sistema ressonante proporciona uma considerável faixa de ajuste, devido à tensão de rf na cavidade ressonante influenciar a formação do campo dominante no cátodo pela oscilação da tensão aplicada acima e abaixo do nível limite. Podemos dizer que a frequência de oscilação está fortemente relacionada ao acoplamento e construção da cavidade com o diodo.

¹- Figura de mérito para um dispositivo armazenador de energia, o qual pode ser um sistema ressonante ou um circuito sintonizado. Este é igual a reatância dividido pela resistência. Também é chamado de fator Q e fator de qualidade (MARKUS, 1978).

A grande vantagem de um dispositivo Gunn sobre os diodos IMPATT e TRAPATT é sua habilidade de operar sobre uma banda larga, com menos ruído e menor tensão de polarização em frequências equivalentes.

As principais aplicações do diodo oscilador Gunn são, por exemplo, osciladores locais em estações de radar, emisoras de baixa potência. Para as aplicações acima enunciadas, o dispositivo proporciona algumas vantagens, as quais são: pouco peso, dimensões reduzidas, necessitam de baixa tensão de alimentação e durabilidade.

Comparando aos dispositivos valvulares, o Gunn opera em menor temperatura e sem vácuo, fatores que contribuem para aumentar a sua vida de trabalho. Estudos realizados de durabilidade comprovaram que o dispositivo pode chegar a mais de 300.000 horas - no caso, para equipamentos CW. Por outro lado, o diodo Gunn é menos eficiente e possui menor potência de saída que os outros dispositivos de estado sólido para microondas.

A Figura III-9 ilustra de forma simples um circuito oscilador Gunn. O diodo é montado ao final de uma cavidade coaxial de meio comprimento de onda, a qual é ajustada para a frequência de operação desejada com o uso de um parafuso de sintonia.

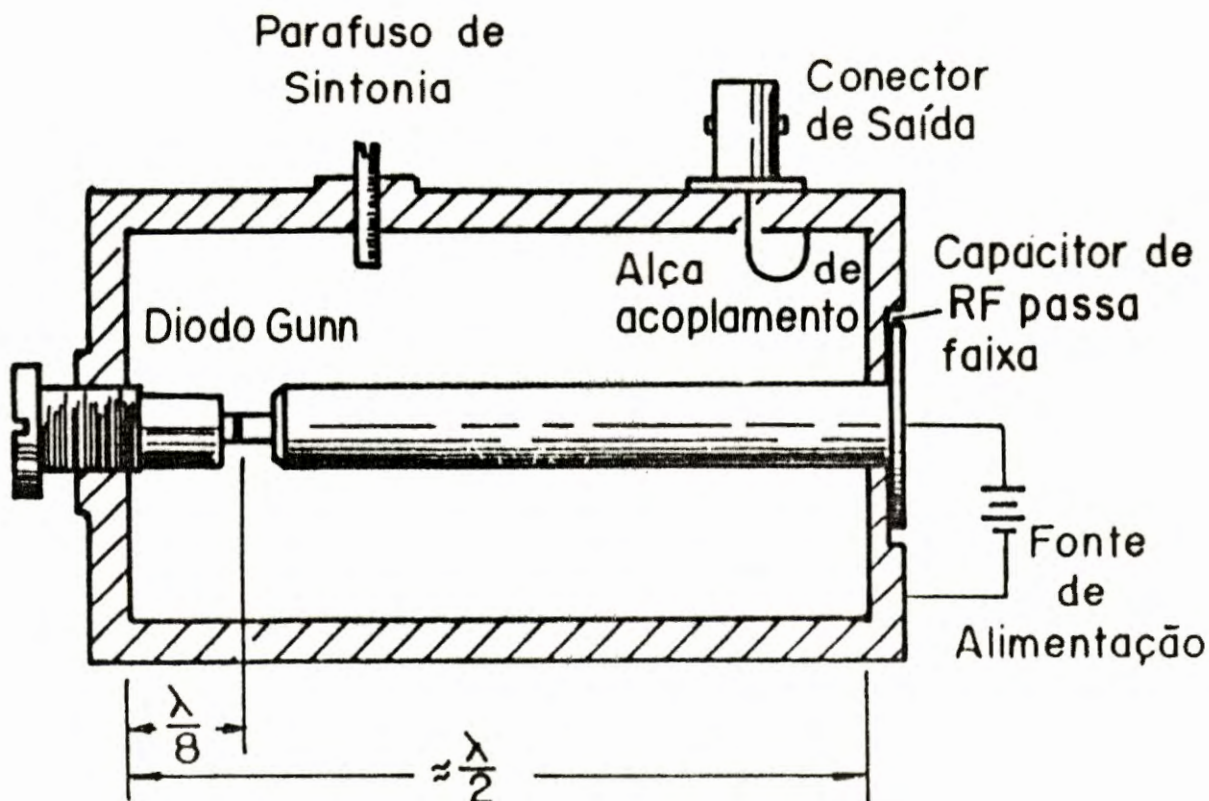


FIGURA III-9. Um simples oscilador à diodo Gunn usado em uma cavidade coaxial de meio comprimento de onda.

A localização da saída do retorno de acoplamento determina a impedância de carga apresentada pelo diodo. Esse tipo de ressonador é de fácil construção e pode ser ajustado sobre um vasto campo da faixa de frequência, tipicamente uma oitava. A simplicidade de construção propicia uma desvantagem, que está relacionada ao fator Q da cavidade, que é relativamente baixo e desta forma o diodo poderá oscilar nas frequências harmônicas, isto é, não caracterizando bem uma frequência central de trabalho, oscilando nos vários modos de propagação. Em comparação com a cavidade guia de onda, o ressonador coaxial é mais sensível à variação de temperatura e ao casamento de impedância.

Para a maior parte das aplicações uma melhor escolha é a da cavidade guia de onda retangular, mostrado na figura III-10, separado pela saída do guia de onda pelo acoplamento de uma íris. O tamanho da abertura da íris (uma placa

condutora colocada no interior de um guia de onda para inserir uma impedância) é determinado experimentalmente, obtendo-se a melhor relação entre a máxima potência de saída e isolamento para as variações na impedância do diodo e a carga.

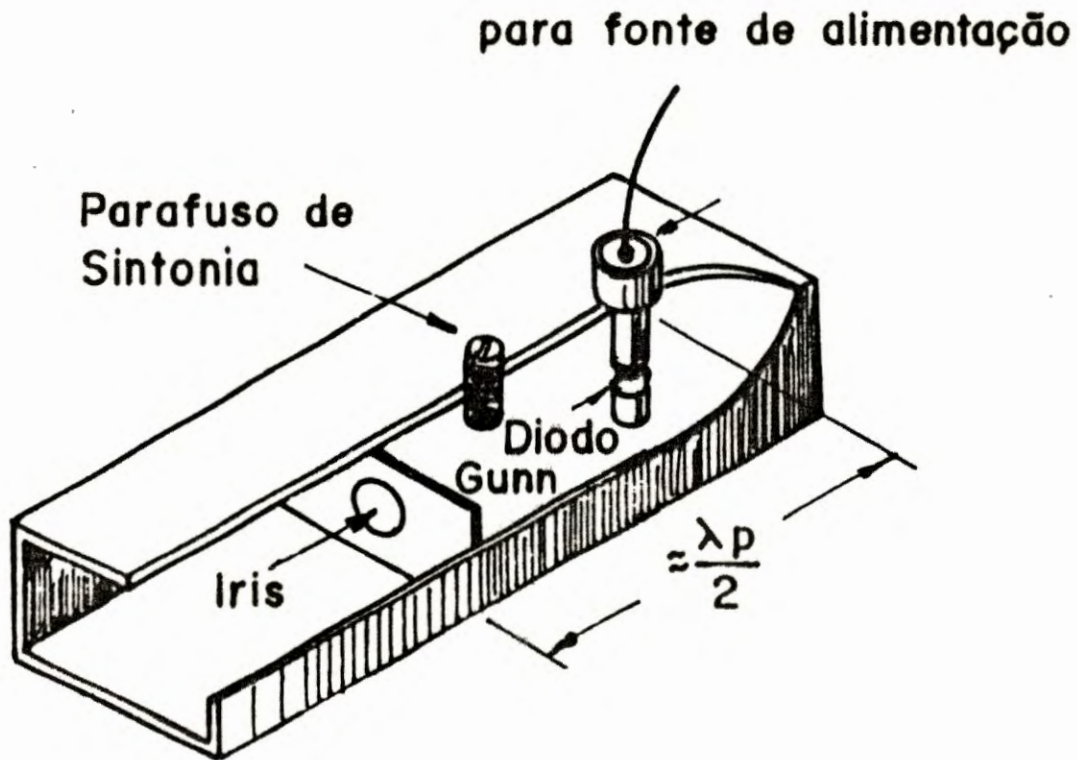


Figura III-10 A construção do guia ressonador se baseia na colocação de um diodo Gunn no interior de uma cavidade, preso por um suporte. A fonte de alimentação é acoplada a esse suporte no intuito de energizar o diodo. Um parafuso de ajuste é também colocado no interior dessa cavidade, onde seu movimento irá propiciar a mudança no fator Q da cavidade e, conseqüentemente, na frequência de oscilação. A íris colocada na saída da cavidade otimiza a máxima potência de saída e serve também como isolamento e casamento de impedância entre a cavidade ressonante e o guia de onda.

CAPITULO IV - ARQUITETURA PROPOSTA DO INSTRUMENTO PARA MEDIDA DA UMIDADE DO SOLO UTILIZANDO TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE MICROONDAS

A grande ênfase no presente momento, em termos de fronteiras para o estudo da ciência do solo, é a incorporação e sedimentação de novas metodologias e desenvolvimento de instrumentação que possibilitem medidas não-destrutivas e com rápido acesso aos resultados.

Com a rápida evolução da instrumentação eletrônica e com o desenvolvimento de novos dispositivos osciladores e detectores, ampliaram-se as possibilidades de aplicação da técnica com microondas como uma nova metodologia para o estudo do comportamento da água no solo.

RASMUSSEM & CAMPBELL (1987) utilizaram em seus experimentos um sistema simples para transmissão de microondas, com um diodo oscilador por efeito Gunn de resposta em 10 GHz e um diodo detector apropriado para microondas. Com este sistema foi possível relacionar umidade volumétrica com atenuação do sinal.

Utilizando-se os efeitos da atenuação dielétrica provocada por frequências na faixa de microondas pode-se caracterizar com muita sensibilidade a água presente no solo.

O objetivo do presente trabalho de dissertação é introduzir a técnica de atenuação dielétrica de microondas como uma ferramenta simples e funcional para medida da umidade do solo em nível de laboratório, através do processo de transmissão da onda eletromagnética por guia de onda.

O princípio de medida se baseia na atenuação do sinal transmitido a amostras de solo, com níveis de conteúdo de água distintos.

Capitulo IV - Arquitetura Proposta

Esse fenômeno propicia obter a relação atenuação do sinal em decibéis (dB) contra a umidade volumétrica em porcentagem, de cada solo.

Abaixo, temos o diagrama de blocos do sistema proposto para o trabalho de medida de umidade do solo:

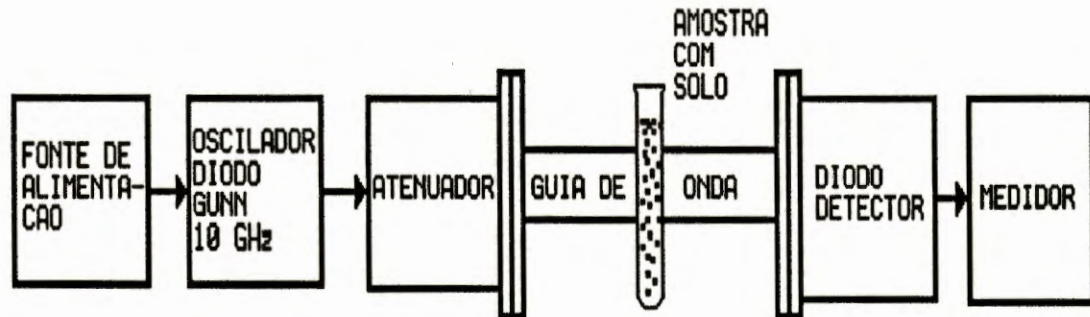


Figura IV-1 - Diagrama de blocos do sistema proposto para o trabalho.

Encontram-se projetados, os seguintes itens:

a-) Fonte alimentação.

A fonte de alimentação utilizada para o funcionamento do sistema possui as seguintes características:

$$V_{dc} = + 8 [V] \pm 0,01 [V]$$

$$I = 650 \text{ mA (máximo).}$$

Capitulo IV - Arquitetura Proposta

b-) Gerador de 10 GHz, do tipo diodo Gunnplexer.

As especificações elétricas, fornecidas pelo fabricante, do sistema Gunn utilizado estão relacionados na tabela 1 abaixo:

| | |
|--|-----------------|
| RF frequência central | 10250MHz |
| RF potência de saída | 25 mW |
| Sintonia: mecânica | ± 100 MHz |
| eletrônica | 60 MHz mínimo |
| Estabilidade em frequência | -350 KHz/ °C |
| Potência de rf vs temperatura e tensão de sintonia | 6 dB máximo |
| Figura de ruído | 12 dB máximo |
| Requisitos de entrada: | |
| Tensão Gunn | + 10 Vdc típico |
| Corrente Gunn | 500 mA máximo |
| Tensão de sintonia | +1 a + 20 volts |
| Temperatura de operação | -30 à +70 °C |

Tabela 1 - Características de operação do sistema Gunn

A escolha da frequência de microondas, 10 GHz, baseia-se em dois principais motivos: primeiro porque essa é uma frequência intermediária, entre a máxima absorção pela água e a máxima penetração da onda eletromagnética no sistema água-solo; segundo porque são comercialmente encontrados osciladores sintonizados nessa frequência.

Em condições normais de temperatura, na faixa de frequência de 1,0 GHz a 30 GHz, a constante dielétrica da água está na faixa de 40 (F/m) a 80 (F/m) e a tangente de perda varia de 0,15 a 1,2. A maioria dos materiais secos, em particular o solo seco, tem uma constante dielétrica da ordem de 1

(F/m) a 5 (F/m) e perdas dielétricas entre 0,001 e 0,05. Diferenças dessa ordem de grandeza significam que as perdas devidas à água são, pelo menos dez vezes maiores que a perda no material (TAYLOR, 1965).

c-) Atenuador de microondas. Os atenuadores servem para dissipar energia em um determinado trecho de uma linha de transmissão, seja ela um cabo coaxial ou um guia de onda, dessa forma atenuando o sinal.

Normalmente os atenuadores consistem de uma lâmina de material resistivo, que pode ser deslocada da região de fraco campo E para a região de forte intensidade de campo E onde, então, as correntes provocadas na lâmina serão intensas e a energia dissipada $W=I^2 \cdot R$ será grande.

O dispositivo que está acoplado ao sistema é o de lâmina resistiva com deslocamento lateral. O mesmo não está sendo utilizado como atenuador apenas, mas também como um isolador das possíveis reflexões causadas devido a ajustes e modificações no guia.

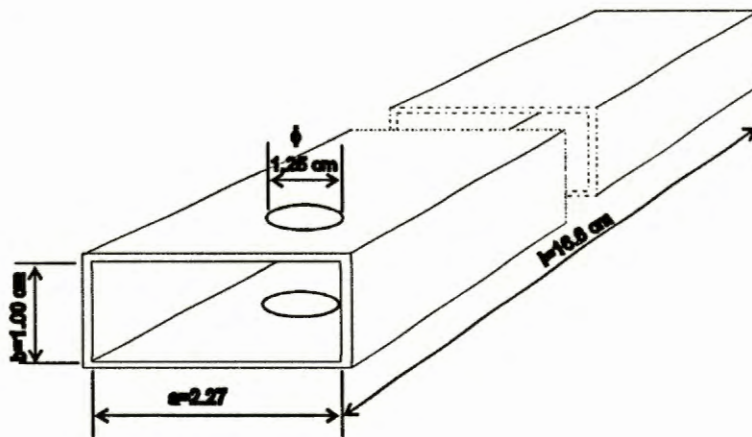
O atenuador utilizado no desenvolvimento do sistema com microondas, atinge o valor mínimo de atenuação de 2,8 dB e o máximo de 50 dB.

d-) Guia de onda com porta-amostra. Para medida do conteúdo de água em amostras de solo foi projetado um guia de onda com características próprias, constituído de uma fenda, vazado nos dois extremos da secção a do guia de onda, com um diâmetro $\varnothing=1,25$ cm, para o acoplamento microondas-solo através do porta-amostra. CASTLE e ROBERTS, (1974) utilizaram um modelo semelhante para o monitoramento contínuo do conteúdo de água em óleo cru.

Capítulo IV - Arquitetura Proposta

O guia de onda foi projetado para operar no modo de propagação TE₁₀.

As medidas físicas características do guia de onda de latão que responde à faixa de frequência de 8,2 GHz à 10 GHz são mostradas na Figura IV-2:



$$a=2,27 \text{ cm}; b= 1,00 \text{ cm}, l= 16,60 \text{ cm e } \phi= 1,25 \text{ cm.}$$

Figura IV-2. Corte e medidas em cm da seção transversal de um guia de onda.

Abaixo tem-se a seqüência dos cálculos que caracterizarão o guia de onda no modo de propagação TE₁₀:

- comprimento de onda no espaço livre:

$$\lambda_0 = \frac{v_c}{f} = \frac{2,998 \cdot 10^8}{9,98 \cdot 10^9} = 3,004 \text{ cm}$$

- comprimento de onda de corte no modo TE₁₀:

$$\lambda_c = \frac{2 \cdot a}{m} = \frac{2 \cdot 2,27 \cdot 10^{-2}}{1} = 4,54 \text{ cm}$$

- velocidade de grupo:

$$v_g = v_c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} = 1,685 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- impedância da onda do guia de onda:

$$Z_0 = 377 \cdot \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{4 \cdot a^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = 670,8 \Omega$$

e-) Diodo detector a cristal, que responde à corrente induzida pelo campo magnético, quadraticamente. Utilizou-se, para um maior nível de sinal, um detector casado.

O diodo detector a cristal é denominado cristal retificador. Os modernos cristais retificadores são bastante sensíveis e simples comparados a outros dispositivos detectores de microondas. A secção transversal de um típico retificador é mostrada na figura IV-3. Este consiste de um fio fino (denominado bigode de gato), tocando sensivelmente um semicondutor, podendo este ser de silício, de germânio ou de galena. Atualmente, os cristais são construídos a base de silício ou germânio. O fio de tungstênio é preparado para ser levemente pontiagudo na extremidade, sendo conduzido para o contato com o semicondutor. A área de contato é ajustada para um valor desejado. Esta área de contato determina a resistência da barreira de contato e sua capacidade, bem como a durabilidade do dispositivo. A área

Capítulo IV - Arquitetura Proposta

pode ser construída tanto grande como pequena, dependendo da intenção de uso do cristal. O volume ao redor do ponto de contato é normalmente preenchido com cera para prevenir a penetração de umidade e ao mesmo tempo propiciar alguma estabilidade mecânica adicional.

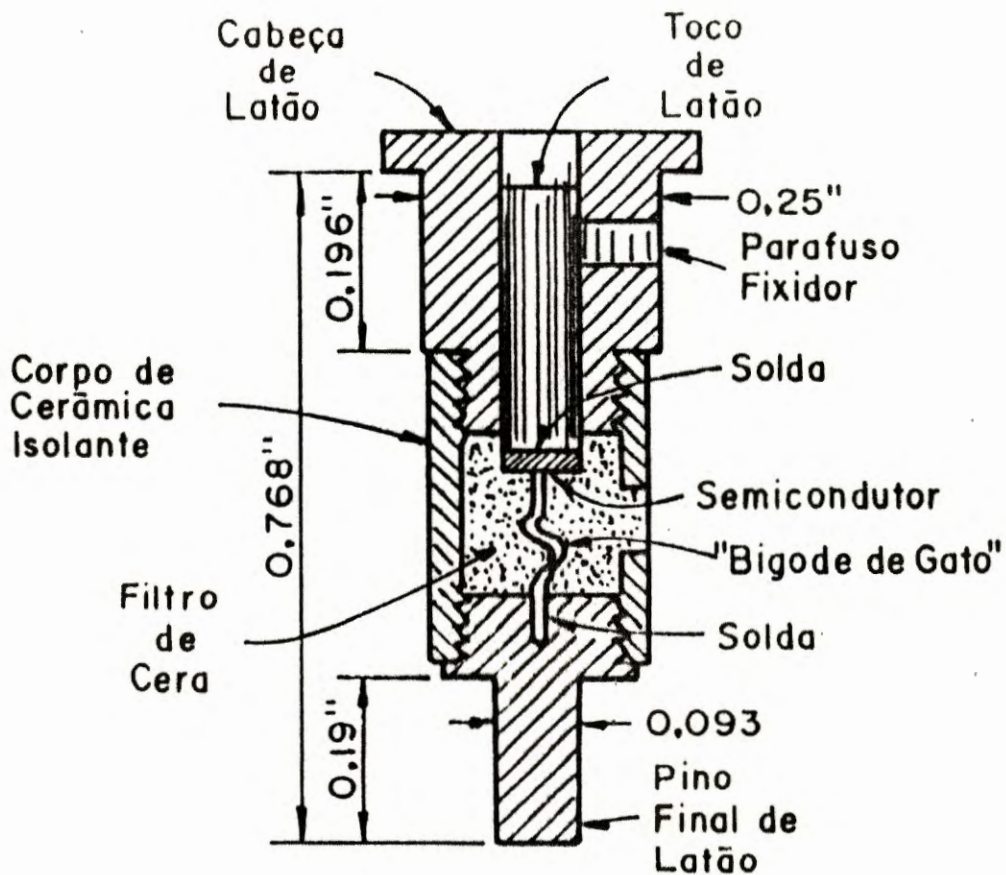


Figura IV-3. Corte seccional de um diodo a cristal, mostrando os elementos de um cristal retificador. Alguns detalhes de construção mudam de um fabricante para outro.

Capitulo IV - Arquitetura Proposta

A característica estática de um detector a cristal representativo é mostrado na figura IV-4. A característica não-linear do dispositivo torna possível o uso do mesmo como um detector de baixo nível ou como um conversor de frequência.

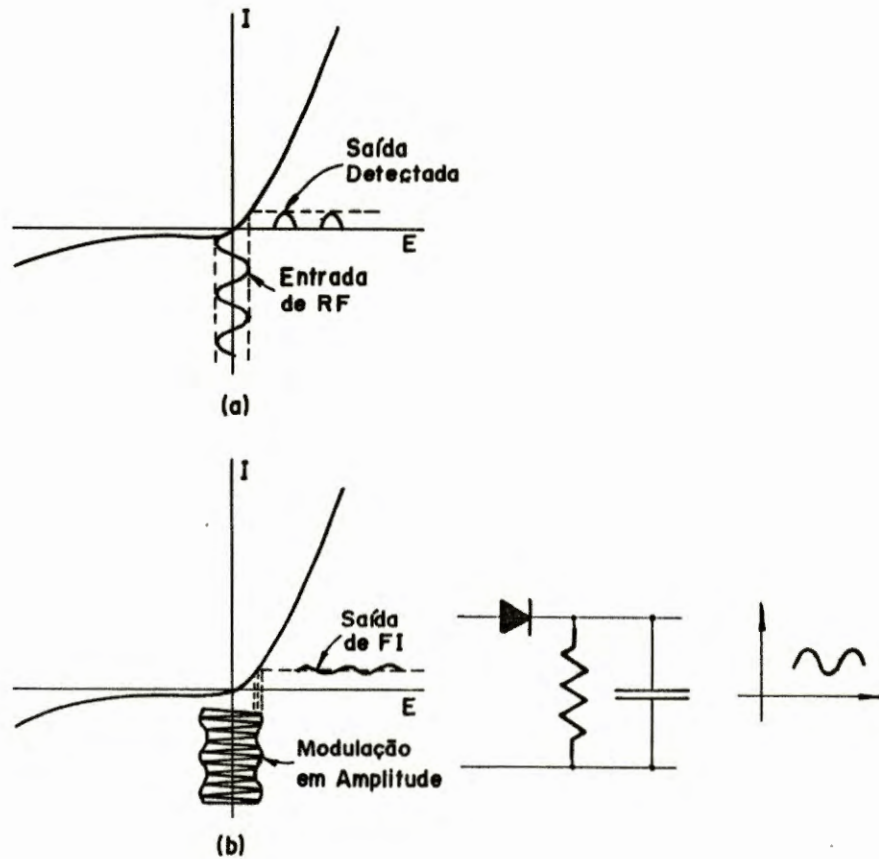


Figura IV-4. Uma característica estática típica de um retificador de cristal à sílica quando usado como um retificador (a), e como um detector de envoltória (b)

Capítulo IV - Arquitetura Proposta

f-) O sinal de saída do detector foi monitorado utilizando-se um voltímetro Fluke modelo 8050 A.

As especificações do equipamento utilizado para quantificação dos resultados estão abaixo descritas:

| FAIXA | RESOLUÇÃO | PRECISÃO |
|--------------|-------------|--------------------------------------|
| ± 200 mV | 10 μ V | $\pm(0,03\%$ de leitura + 2 dígitos) |
| ± 2 V | 100 μ V | |
| ± 20 V | 1 mV | |
| ± 200 V | 10 mV | |
| ± 1000 V | 100 mV | |

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

10 M Ω em paralelo, com capacitância
< 100 pF em toda a faixa

TAXA DE REJEIÇÃO MODO NORMAL

> 60 dB em 60 Hz ou 50 Hz

TAXA DE REJEIÇÃO MODO COMUM

> 90 dB em dc, 50 Hz ou 60 Hz

TENSÃO MODO COMUM (máximo)

500 Vdc ou de pico ac

TEMPO DE RESPOSTA PARA A TAXA DE
PRECISÃO

no máximo 1 segundo

MÁXIMO NÍVEL DE ENTRADA

1000 Vdc ou de pico ac

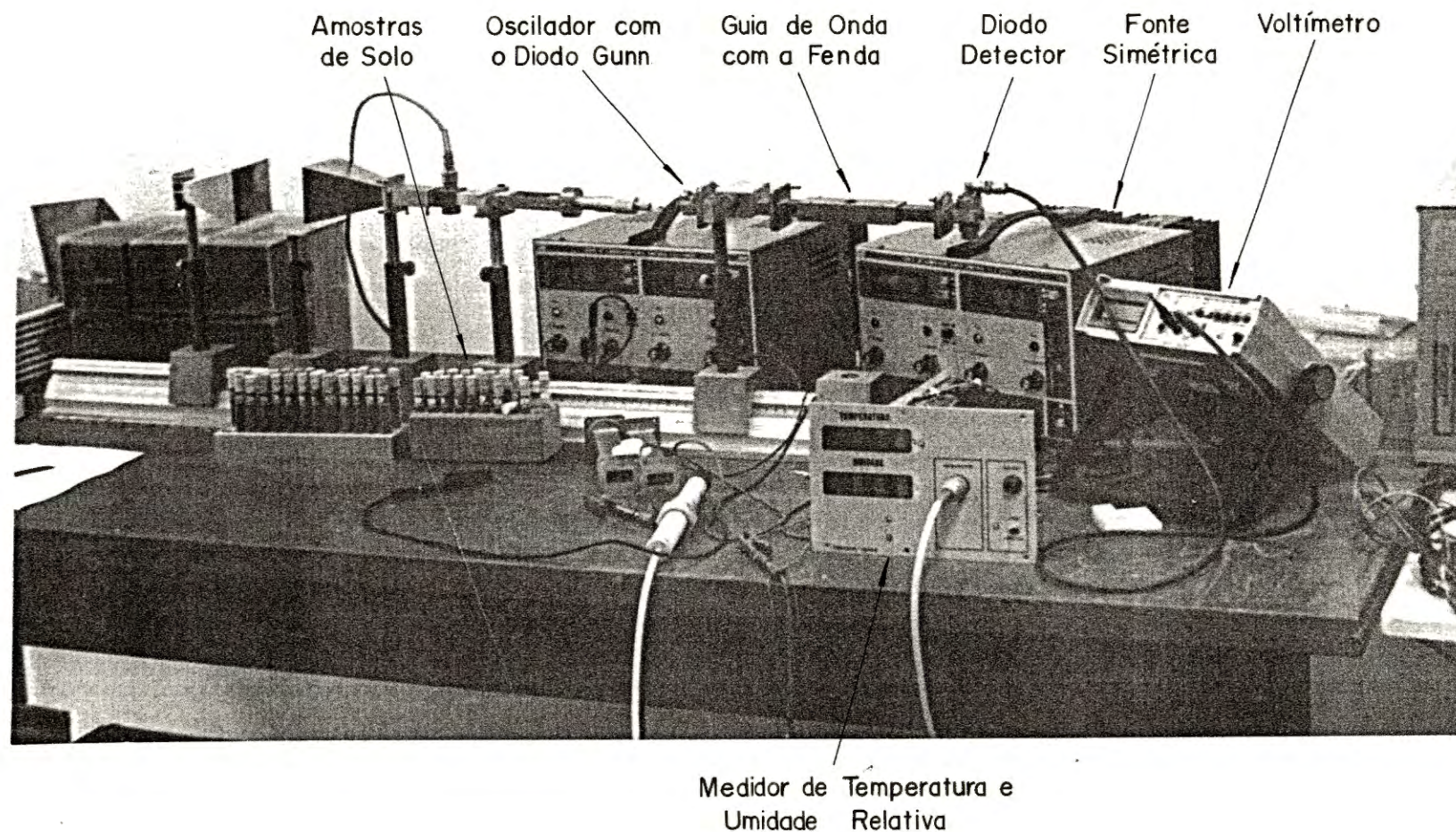


Figura IV-5 - Foto do equipamento desenvolvido para medida de umidade do solo, através de atenuação de microondas

CAPITULO V - RESULTADOS

5.1 - Calibração para a medida de umidade do solo e comparação com o método gravimétrico

O presente capítulo visa apresentar os resultados pertinentes aos processos de calibração para a medida de umidade do solo e comparação com o método gravimétrico.

5.1.1 - Materiais e Métodos.

Os solos utilizados para realizar a calibração foram do tipo argiloso e arenoso, retirados do campo experimental da EMBRAPA-UEPAE (Fazenda Canchim) / São Carlos - S.Paulo.

As análises físicas e químicas dos dois tipos de solo foram feitas nos laboratórios do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo - SNLCS-EMBRAPA, e se encontram abaixo relacionados:

O primeiro solo utilizado possui as seguintes características:

O solo arenoso:

- Classificação: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO ENDOÁLICO A moderado textura média fase cerradão relevo plano.
- Horizonte: Apel - 0 - 23 cm
- Areia grossa: 46%
- Areia Fina: 25%
- Silte: 6%
- Argila: 23%
- Fe₂O₃: 5,3%
- Matéria Orgânica: 1,52%

Capítulo V - Resultados

O segundo solo utilizado é caracterizado como um solo argiloso e suas propriedades estão abaixo enunciadas:

O solo argiloso:

- Classificação: TERRA ROXA ESTRUTURADA EUTRÓFICA A
chernozêmico textura argilosa fase floresta tropical
subcaduciófila relevo suave ondulado.

- Horizonte: Apl - 0 - 12 cm
- Areia grossa: 15%
- Areia Fina: 14%
- Silte: 35%
- Argila: 36%
- Fe₂O₃: 26,9%
- Matéria Orgânica: 4,35%

O material utilizado no preparo das amostras está abaixo relacionado:

- O recipiente escolhido para colocação do solo (porta-amostra) foi um tubo de ensaio - tubo normalmente usado em laboratórios de química, de material *pyrex*, com as seguintes características:

diâmetro externo: 12 mm (*valor médio*);

diâmetro interno: 10 mm (*valor médio*);

peso médio padrão do tubo: 4,89 g

volume utilizado no preparo das amostras: 4,7 ml.

Os instrumentos utilizados para a medida das grandezas acima relacionadas foram:

-diâmetro: *paquímetro, resolução ± 0,1mm;*

-peso: *balança METTLER (PL-300), resolução: ± 10mg;*

-volume: *pipeta, resolução: ± 0,05 ml.*

5.1.2 - Preparação das amostras

A metodologia empregada na preparação de cada amostra seguiu o padrão comumente usada em física de solos (POPI, 1982), com o seguinte procedimento:

- As amostras de solo, tanto arenoso como argiloso, foram secas em estufas a 105°C por 24 horas;
- Utilizou-se uma peneira com diâmetro de 2mm para separação de resíduos, isto porque, segundo a convenção adotada em laboratórios de análise de solo, as partículas que forem maiores que 2mm são consideradas cascalhos, portanto desprezíveis nas análises;
- Pesagem de cada tubo de ensaio, que foram utilizados como porta-amostras, em balança de precisão;
- Caracterização do volume de 4,7 ml em cada porta-amostra, utilizando uma pipeta;
- Acondicionamento de quantidades de solo, arenoso e argiloso, seco em cada porta-amostra em volume de 4,7 ml;
- Pesagem do porta-amostra com solo no seu interior;
- Cálculo da densidade global ρ_g (g/cm³) de cada amostra.

Com a densidade global conhecida, através do seu cálculo, prepararam-se várias amostras para os dois tipos de solos em questão, com distintos conteúdos de água. Para caracterizar a quantidade de água, utilizou-se a equação I.2.

Foram preparados e considerados como padrões dois conjuntos de sete amostras, sendo o primeiro conjunto constituído de solo arenoso e o segundo de

solo argiloso, com umidade controlada e diferenciada cada qual contendo 0,0%, 5,0%, 10,0%, 15,0%, 20,0%, 25,0%, 30,0% de umidade volumétrica nas amostras.

Para amostras com valores acima de 30,0 % não foi possível obter padrões e dessa forma realizar medidas. Isso se deve à saturação ocorrida, não só relacionada com os solos, mas também às dimensões do porta-amostra adotado para realizar tais medidas.

A operação de preparação de amostras úmidas (com umidade precisa) é relativamente delicada e exige bastante atenção. A necessidade de cuidado reside no fato de que a velocidade de introdução de água no solo pode provocar a formação de agregados, de rupturas, de mudança da densidade global etc. Um fenômeno que ocorre de forma mais ou menos intensa é o do "inchamento" do solo e está quase sempre presente no processo de molhamento. Daí a necessidade da colocação da água no solo ser lenta e gradual.

No caso das sete amostras do solo arenoso, as densidades globais calculadas, utilizando-se os materiais já descritos estão abaixo delineadas:

$\rho_{g_1}=1,23$ (g/cm³); $\rho_{g_2}=1,17$ (g/cm³); $\rho_{g_3}=1,19$ (g/cm³); $\rho_{g_4}=1,23$ (g/cm³);
 $\rho_{g_5}=1,15$ (g/cm³); $\rho_{g_6}=1,26$ (g/cm³); $\rho_{g_7}=1,21$ (g/cm³).

Para as amostras com solo argiloso os cálculos relacionados às densidades globais estão mostrados abaixo:

$\rho_{g_a}=0,85$ (g/cm³); $\rho_{g_b}=0,87$ (g/cm³); $\rho_{g_c}=0,83$ (g/cm³); $\rho_{g_d}=0,87$ (g/cm³); $\rho_{g_e}=0,85$
(g/cm³); $\rho_{g_f}=0,89$ (g/cm³); $\rho_{g_g}=0,92$ (g/cm³).

As medidas de atenuação direta de microondas foram realizadas e baseadas na arquitetura proposta no capítulo IV(HERRMANN Jr. et al., 1992). Após energizado o equipamento observou-se empiricamente a necessidade de um processo de termostatização do conjunto (sistema eletrônico, atenuador, guia de onda, diodo detector e medidor), da ordem de 10 minutos, o qual proporciona um melhor regime de trabalho.

Nas realizações dos testes de calibração, algumas considerações se fizeram necessárias, no intuito de verificar o comportamento do sistema proposto de medida. As considerações mais importantes estão expostas abaixo:

- a influência da matéria orgânica (M.O.) do solo passará a causar interferência nas medidas realizadas com microondas, quando a concentração de matéria orgânica exceder a 6,0% de M.O. (O'NEIL & JACKSON, 1990). Portanto, desprezou-se o efeito do M.O., adotando-se solos com teores de matéria orgânica menores que 6,0% na preparação de amostras;

- o efeito da salinidade não foi levado em conta nos estudos, visto que os seus efeitos em frequências maiores que 2 GHz passam a não ser significativos. Utilizou-se frequência de 10 GHz, a qual, conforme ilustra a figura V-1 é conveniente.

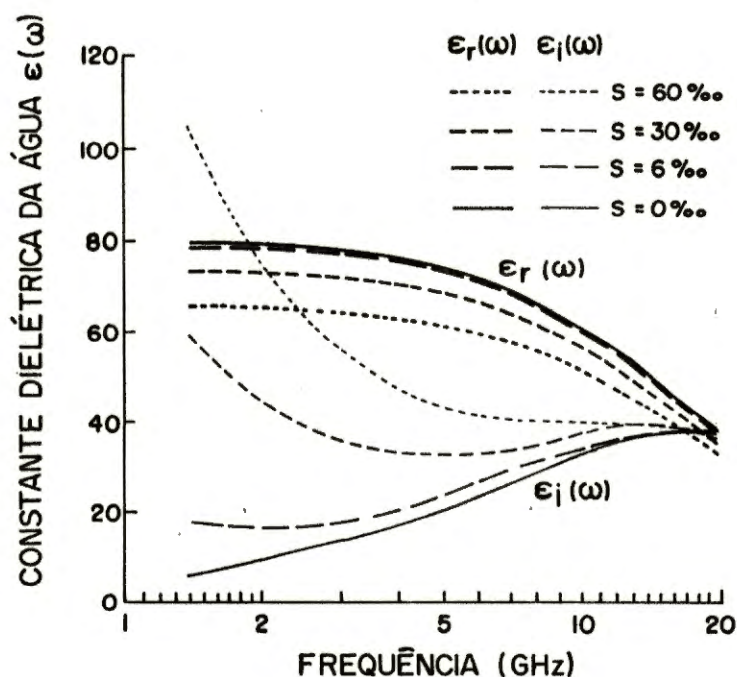


Figura V-1. Efeito da salinidade sobre as propriedades dielétricas de um volume de água a 20° C (STOGRYN, A.; 1971).

- o tamanho das partículas é um outro parâmetro importante nas medidas tendo-se em vista o espalhamento da energia e, por conseguinte, influenciar na atenuação do sinal de microondas. Com o intuito de evitar variações indesejáveis na medida de atenuação, devido à perda causada por espalhamento, o tamanho da partícula deverá ser preferencialmente menor que $\lambda/4$ (TAYLOR, 1965).

Todo o experimento, como também o procedimento, foi realizado nos laboratórios da EMBRAPA-NPDIA.

5.2. Resultados e Discussões

Com o intuito de melhor visualizar e analisar os dados obtidos dividiu-se os resultados e discussões nos seguintes subitens:

- 5.2.1. Análise dos parâmetros S para validar a utilização do guia de onda com a fenda;
- 5.2.2. Análise da instabilidade da fonte de alimentação e sua influência na medida;
- 5.2.3. Cálculo do erro de leitura, feito com o multímetro de Fluke;
- 5.2.4. Cálculo do número de repetições de amostras através da Lei de Tukey;
- 5.2.5. Medida experimental de erro imposto pelo sistema;
- 5.2.6. Relação da umidade volumétrica θV (%) com atenuação do sinal em dB para os dois tipos de solo já citados e as microesferas de vidro;

5.2.7. Validação do método, comparando com medidas do parâmetro S21, perda de inserção, através de um Network analyser Mod. 805 -Hewlett Packard;

5.2.8. Influência da densidade no processo de medida:

5.2.9. Influência da variação da temperatura ambiente nas medidas

5.2.1. Análise dos parâmetros S para validar a utilização do guia de onda com a fenda

Para validar a utilização do guia de onda com a fenda experimentalmente, realizou-se uma série de medidas no laboratório de desenvolvimento de sistemas de microondas do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás (CPqD-TELEBRÁS), com um Network Analyser 8510 HP.

Com o uso desse equipamento, foi possível quantificar os parâmetros de perdas por transmissão e perdas por reflexão, tanto no guia de onda com a fenda quanto sem a fenda, a qual adotou-se como referência.

A tabela 1 sumariza os resultados dos testes realizados com os dois guias de onda.

| PARÂMETRO | GUIA DE ONDA SEM A FENDA | GUIA DE ONDA COM A FENDA |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Frequência central | 10.150 GHz | 10.150 GHz |
| perda de inserção (parâmetro S_{21} (dB)) | -0,35 dB | -0,8 dB |
| perda de retorno (parâmetro S_{11} (dB)) | -38 dB | -33 dB |
| taxa de onda estacionária (SWR) | 1,02 | 1,04 |

Tabela V-1 - Resultados dos testes realizados com o guia de onda com o uso de um Network Analyzer - 8510HP.

Observa-se, através da análise dos resultados proveniente da perda de retorno (parâmetro S_{11} (dB)), que 99,9% da potência de rádio frequência gerada pelo oscilador GUNN é transferida para a amostra.

Os valores da taxa de onda estacionária (SWR) mostrados na tabela demonstram a pequena influência da fenda com relação à propagação do sinal em termos da influência do buraco na impedância do circuito, isto é, quanto mais próximo SWR de 1, menor a influência do coeficiente de reflexão e, por conseguinte, a igualdade das impedâncias do circuito.

O parâmetro perda de inserção quantifica o valor de potência que está chegando até o detector, descrevendo desta forma as perdas que ocorreram no caminho da onda eletromagnética entre o emissor e o detector. O resultado da tabela 1 mostra que as perdas são relativamente baixas, tanto que no guia de onda utilizado no experimento, 80% do sinal transmitido chega ao detector, sem os problemas de reflexão conforme apresentado na análise do parâmetro S_{11} .

As perturbações advindas da perfuração feita no guia de onda foram muito pequenas acarretando um acréscimo menor que 1 dB na perda de inserção, e mantendo a perda de retorno bastante satisfatória.

Pela mesma razão, quase não há variação na intensidade dos campos elétrico e magnético longitudinalmente no guia, devido à baixa taxa de onda estacionária.

5.2.2. Análise da instabilidade da fonte de alimentação e sua influência na medida

No intuito de verificar a influência das oscilações da fonte no comportamento do sinal eletromagnético, em termos da sua geração, desenvolveu-se um experimento que possibilitou observar este efeito.

O método adotado foi o de variar o valor da alimentação dc e realizar a leitura do sinal detectado no multímetro. A faixa analisada foi de 7,4 a 8,3 V com intervalos de 0,1 V.

Na figura V-2 pode-se notar graficamente a influência da flutuação, como também a linearidade dessa relação.

As variações na estabilidade da fonte que alimenta o oscilador podem ocorrer por influência da temperatura, da oscilação da rede de alimentação AC, da umidade relativa, do ajuste correto da corrente fornecida etc.

Os resultados obtidos desse experimento possibilitam fazer correções nas leituras, devido a não estabilidade do sistema de alimentação mostrando também a necessidade de uma fonte com baixo nível de ruído e com estabilidade adequada.

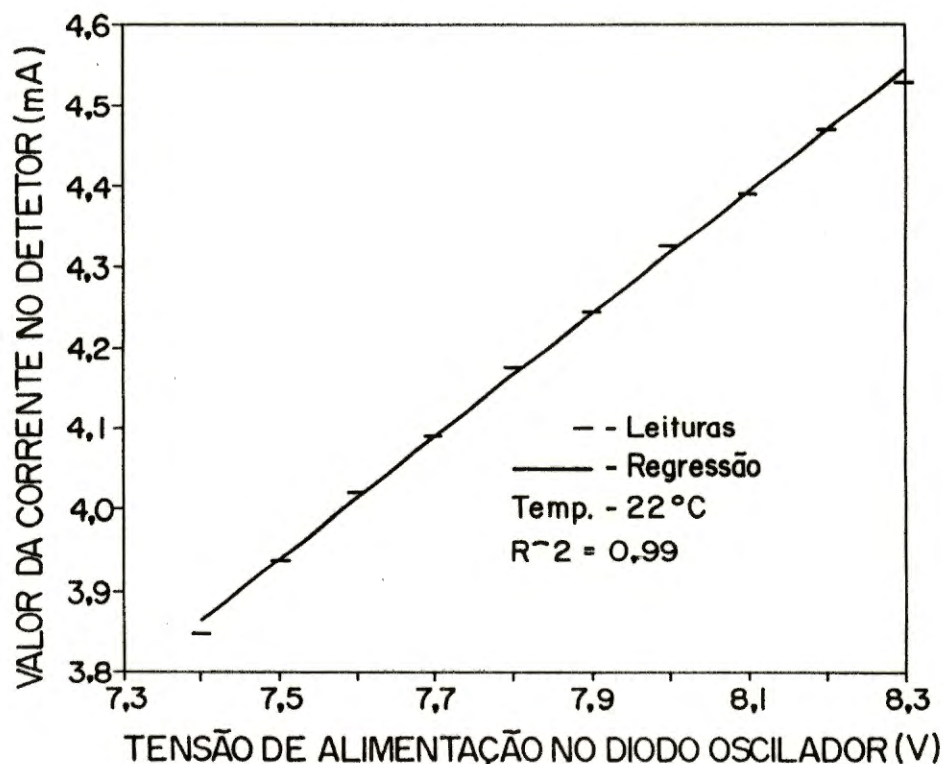


Figura V.2 - Relação da variação da tensão de alimentação e o sinal lido no detector

5.2.3. Cálculo do erro de leitura, feito com o multímetro Fluke

O cálculo desse parâmetro é importante para caracterizar o erro que o instrumento de medida impõe à medida. Nesse sentido, através das equações abaixo descritas, foi possível verificar esse erro.

O erro em tensão (FLUKE, 1984) está relacionado a uma sobrecarga imposta ao sistema devido à colocação de uma resistência "shunt" do amperímetro no circuito.

Es - Fonte de tensão

Capítulo V - Resultados

RI - Resistência de carga mais a resistência da fonte

Im - Corrente medida (leitura do "display")

Eb - Queda de tensão calculada

F.E. - Fundo de Escala utilizado do miliamperímetro

$$Eb = Im [(200/F.E. \text{ em mA}) + 0,35] \quad (\text{V.1})$$

$$\text{Erro em \%} = 100.Eb/(Es - Eb) \quad (\text{V.2})$$

$$\text{Erro em [A]} = (Eb.Im)/(Es - Eb) \quad (\text{V.3})$$

Para efeito de cálculo, considera-se os seguintes resultados, sem a colocação de amostras no local, isto é, transmissão direta:

$$Im = 4,356 \text{ mA}$$

$$Es = 8 \text{ V}$$

$$Eb = 4,356 \cdot 10^{-3} \cdot [(200/20) + 0,35]$$

$$Eb = 45,09 \text{ mV}$$

$$\text{Erro} = 100.45,09.10^{-3} / (8,0 \text{ V} - 45,09.10^{-3})$$

$$\text{Erro} = 0,567\%$$

$$\text{Erro máx. em [A]} = (45,09 \text{ mV} \cdot 4,356 \text{ mA}) / (8 \text{ V} - 45,09 \text{ mV})$$

$$\text{Erro máx.} = 24,7 \mu\text{A}$$

Portanto, a esse erro, calculado em porcentagem devido ao fundo de escala usado, deve ser adicionada a precisão do aparelho caracterizado em suas especificações. Sendo assim, o erro do sistema de medida passa a ser:

$$\text{Erro máx em \%} = 0,6\% \pm (0,2\% \pm 2 \text{ dígitos})$$

5.2.4. Cálculo do número de repetições de amostras através da Lei de Tukey.

Para achar o número de repetições, utilizou-se o modelo matemático estatístico denominado Teste de Tukey.

A fórmula que determina o numero de repetições (r) é:

$$r = \frac{q^2 \cdot (C.V.)^2 \cdot F}{d^2} \quad (V.4)$$

onde: C.V. é o coeficiente de variação, obtido em ensaios anteriores e em condições análogas.

F é o valor da tabela, ao nível α escolhido de probabilidade, com número de graus de liberdade n_1 (do novo experimento) e n_2 (obtido por tabela apropriada).

q é a amplitude total normalizada para o experimento a ser feito (obtido por tabela apropriada)

d é a diferença mínima significativa Δ em porcentagem da média, onde: $\Delta = q \cdot (S / (r))^{1/2}$. Para calcular d, utiliza-se

$$d = q \cdot \frac{C.V.}{\sqrt{r}} \quad (V.5)$$

Para o experimento inicial, adotamos 7 tratamentos cada um repetido 7 vezes. Dessa forma, tem-se que:

| causa da variação | Graus de Liberdade |
|-------------------|--------------------|
| Tratamento | 6 |
| Resíduo ou erro | 42 |
| Total | 48 |

Com os resultados anteriormente descritos, utilizando tabelas apropriadas e as duas equações mencionadas obtem-se o valor de r. No entanto faz-se necessário

conhecer os valores $q=4,23$, $F=1,69$, para o nível de 5% de probabilidade, e $C.V.=7,84$ (PIMENTEL GOMES, 1987).

O valor de r , dessa forma, será: $r= 11,82$

portanto temos que o numero de repetições devem estar entre:

$$7 < X < 11,82$$

Adotamos para o nosso experimento o número de 11 repetições.

5.2.5. Medida experimental do erro imposto pelo sistema

O procedimento que foi utilizado para realização deste experimento é baseado no método para medida de atenuação com raios gama. Utilizou-se a técnica de transmissão direta de microondas e o procedimento para as medidas seguiu a seqüência abaixo enunciada

- a) pesagem do tubo vazio;
- b) medida de transmissão direta com o sistema de microondas utilizando-se o tubo vazio;
- c) colocação do solo, até o nível desejado;
- d) pesagem do conjunto tubo e solo (g);
- e) medida de transmissão direta como sistema de microondas utilizando-se o conjunto tubo e solo;
- f) repetição dos itens a, b, c e d com outro porta amostra e com o mesmo tipo de solo;
- h) cálculo da média, do desvio padrão e do erro.

Para melhor quantificar o erro, repetiu-se a seqüência cinco vezes. A preparação de amostras se baseou no método gravimétrico, com o solo seco a ar,

adotado para que a densidade na preparação ficasse sempre a mesma, no intuito de não somarmos mais possíveis erros. O número mínimo de repetições por amostra adotado com o sistema de microondas foi onze. Abaixo estão relacionados os valores de densidade para cada amostra preparada e as respectivas relações de medidas de voltagem, com o tubo de ensaio vazio e posteriormente com o solo seco, e suas devidas repetições:

I- densidade $\rightarrow \rho = 1,33 \text{ g/cm}^3$

b.I) Medida com tubo vazio

d.I) Medida com o tubo mais o solo seco

cálculo da atenuação em dB:

AI (dB)=0,78 dB

II- densidade $\rightarrow \rho = 1,32 \text{ g/cm}^3$

b.II) medida com o tubo vazio

d.II) medida com o tubo mais o solo seco

AII (dB)=0,85 dB

III- densidade $\rightarrow \rho = 1,35 \text{ g/cm}^3$

b.III) Medida com o tubo vazio

d.III) Medida com o tubo mais o solo seco

AIII (dB)= 0,79 dB

IV- densidade $\rightarrow \rho = 1,33 \text{ g/cm}^3$

b.IV) Medida com o tubo vazio

d.IV) Medida com o tubo mais o solo seco

AIV (dB)= 0.86 dB

V- densidade $\rightarrow \rho = 1,32 \text{ g/cm}^3$

b.V) Medida com o tubo vazio

d.V) Medida com o tubo mais o solo seco

AV (dB) = 0,86 dB

O erro total na medida, utilizando o sistema de atenuação de microondas será de:

$$\overline{\overline{A}}(\text{dB}) = 0,83\text{dB}$$

$$\text{desvio padrão} = 0,039$$

$$A(\text{dB}) = 0,83 \pm 0,039 \text{ dB}$$

$$\text{erro} = 4,7\%$$

5.2.6. Relação da umidade volumétrica θV (%) com atenuação do sinal em dB para os dois tipos de solo (arenoso e argiloso) e as microesferas de vidro

Neste subitem apresenta-se resultados que mostram a influência da água no sistema água-solo, na atenuação do sinal de microondas, através da relação atenuação do sinal em dB pela umidade volumétrica θV (%) em um solo arenoso, argiloso e microesferas de vidro. Todos os testes foram realizados na mesma temperatura ambiente, isto é, a $23,1^\circ\text{C}$. A figura V-3 mostra a relação (dB x θV (%)) de um solo arenoso com a equação polinomial de ordem 3, que representa esses pontos. Abaixo, temos a tabela com os valores obtidos através das repetições e os valores dos cálculos estatísticos, como a média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação e erro padrão da média.

| $\theta V(\%)$ | Média (dB) | Desvio Padrão | Variância | Coef. de Variação (%) | Erro Padrão da Média |
|----------------|------------|---------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2,2 | 0,7 | 0,08 | 0,01 | 0,1 | 0,08 |
| 10,6 | 5,7 | 0,17 | 0,03 | 2,9 | 0,12 |
| 12,8 | 11,7 | 0,3 | 0,09 | 2,5 | 0,16 |
| 19,2 | 22,5 | 0,24 | 0,06 | 1,0 | 0,14 |
| 19,1 | 21,9 | 0,22 | 0,05 | 1,0 | 0,13 |
| 25,5 | 36,7 | 0,77 | 0,6 | 2,1 | 0,25 |

Tabela V-2 - Resultados das medidas realizadas com o sistema de microondas, expresso em dB, para um solo arenoso e os valores dos cálculos estatísticos.

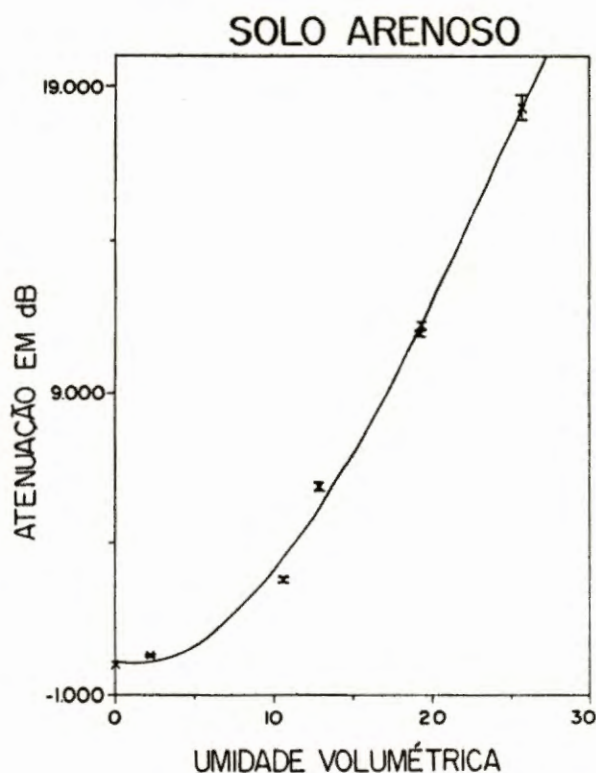


Figura V-3-Curva de calibração da atenuação em dB, em função da umidade volumétrica $\theta V(\%)$ do solo arenoso. A densidade global variou de $1,196 \text{ g/cm}^3$ a $1,255 \text{ g/cm}^3$.

A mesma relação foi obtida para o solo com maior teor de argila considerado, portanto, um solo argiloso. A tabela V-3 mostra os dados referentes às medidas e os valores do cálculo estatístico com os parâmetros já descritos anteriormente. A figura V-3 mostra a curva que relaciona (dB x $\theta V(\%)$) com a barra de desvio padrão para cada amostra de solo argiloso.

| $\theta V(\%)$ | Média (dB) | Desvio Padrão | Variância | Coef. de Variação (%) | Erro Padrão da Média |
|----------------|------------|---------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| 4,3 | 1.1 | 0,03 | 0,00 | 4,4 | 0,05 |
| 8,7 | 2.7 | 0,04 | 0,00 | 2,8 | 0,06 |
| 14,9 | 5.9 | 0,06 | 0,00 | 1,9 | 0,07 |
| 19,2 | 8.5 | 0,04 | 0,00 | 1,0 | 0,06 |
| 23,9 | 17.9 | 0,23 | 0,05 | 2,6 | 0,14 |
| 27,7 | 25.7 | 0,18 | 0,03 | 1,4 | 0,12 |

Tabela V-3 - Resultados das medidas realizadas com o sistema de microondas, expressos em dB, para um solo argiloso.

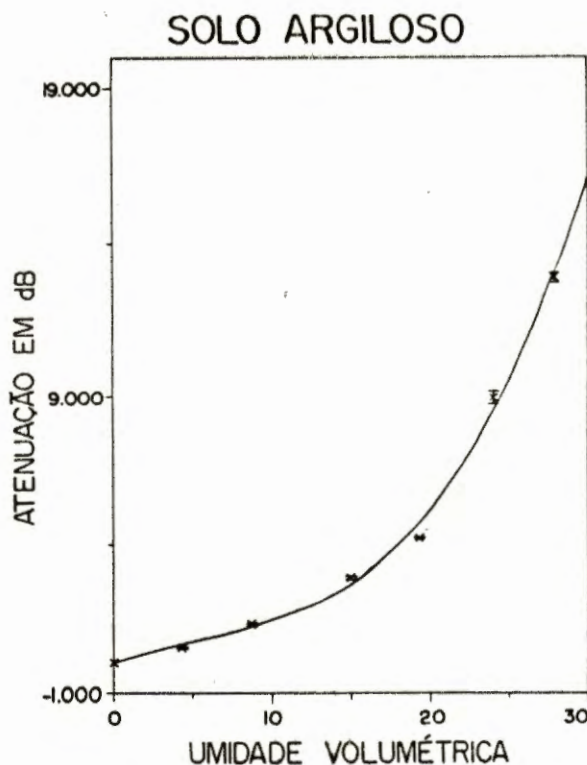


Figura V-4-Curva de calibração da atenuação em dB, em função da umidade volumétrica $\theta V(\%)$ do solo argiloso. A densidade global das amostras variou de 0,826 (g/cm^3) a 0,915 (g/cm^3).

Capítulo V - Resultados

A microesfera de vidro (diâmetro ϕ 100 μm) foi aqui utilizada como um marcador, já que a mesma é considerada um material poroso e não possui propriedades físico-químicas diversificadas, como ocorre em um solo argiloso e arenoso, podendo, dessa forma, observar apenas a influência da água propriamente dita. Abaixo, tem-se a tabela V-4 e figura V-4, que mostram as relações e medidas realizadas com as referidas amostras.

| $\theta V(\%)$ | Média (dB) | Desvio Padrão | Variância | Coef. de Variação (%) | Erro Padrão da Média |
|----------------|------------|---------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 |
| 5,0 | 1,7 | 0,08 | 0,01 | 4,9 | 0,08 |
| 10,0 | 10,4 | 0,21 | 0,04 | 2,0 | 0,13 |
| 15,0 | 15,3 | 0,22 | 0,05 | 1,4 | 0,14 |
| 20,0 | 34,9 | 0,71 | 0,50 | 2,0 | 0,24 |
| 25,0 | 40,7 | 0,49 | 0,24 | 1,2 | 0,2 |

Tabela V-4 - Resultados das medidas realizadas com o sistema, expressos em dB, para a microesfera de vidro.



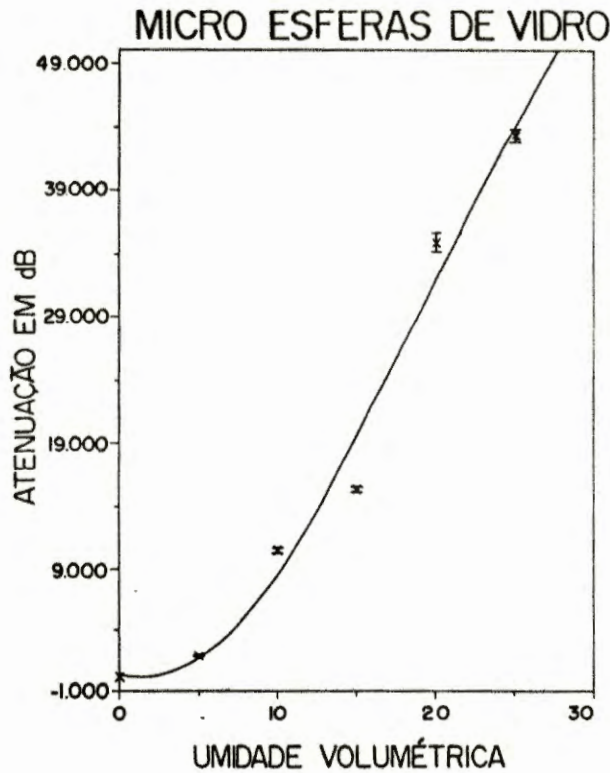


Figura V-5-Curva de calibração da atenuação em dB, em função da umidade volumétrica θV (%) da microesfera de vidro. A densidade global das amostras variou de 1,13 (g/cm^3) a 1,19 (g/cm^3).

A figura V-6 mostra a sobreposição das três curvas acima apresentadas, dos dois diferentes tipos de solos e da microesfera de vidro. É possível observar o comportamento diferenciado, em termos de atenuação do sinal em dB dos três tipos de meios porosos. Isso se deve às propriedades e constituições características de cada solo.

O solo argiloso possui um comportamento bastante distinto quando comparado aos outros dois padrões (solo arenoso e microesfera de vidro). Esse comportamento do solo argiloso se deve aos mecanismos de interação água-argila, que foi estudado por Philip Flow em 1961. Neste caso pode-se notar claramente que

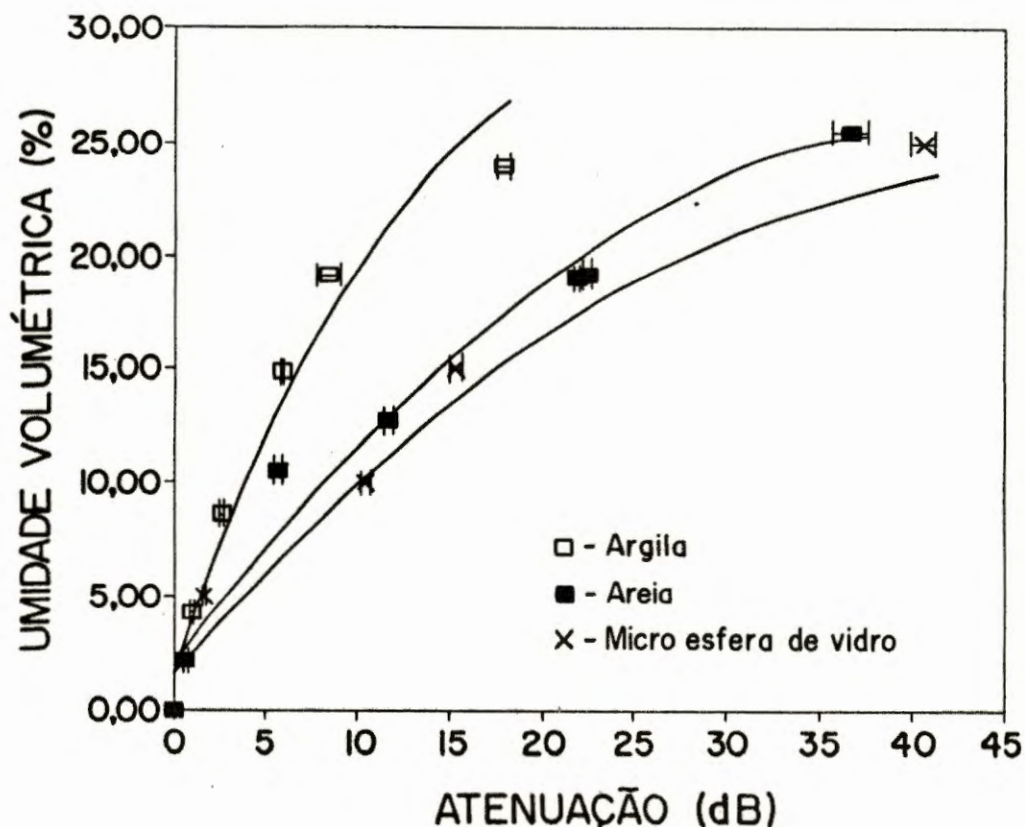


Figura V-6.- Sobreposição das três curvas dos diferentes tipos de solo analisados e microesfera de vidro

| SOLOS | $\theta V(\%) = a + b \cdot A(\text{dB}) + c \cdot A(\text{dB})^2$ | | | r^2 |
|----------------------|--|-------|---------|-------|
| | a | b | c | |
| Arenoso | 1,680 | 2,217 | - 0,052 | 0,989 |
| Argiloso | 1,803 | 4,707 | - 0,216 | 0,980 |
| Microesfera de Vidro | 1,744 | 1,867 | - 0,039 | 0,975 |

Tabela V-5 - Coeficientes da Expansão Polinomial

a textura do solo influencia a medida, isto é, as quantidades relativas de areia, limo e argila, no solo misturado com água, modificam as medidas referentes à atenuação do sinal de microondas. A explicação para o efeito da textura na detecção de umidade do solo por microondas foi descrita por Schmugge (1983): o efeito da textura do solo pode ser entendida examinando o que ocorre à molécula de água quando esta é adicionada ao solo.

O valor da constante dielétrica da água líquida é alto, devido à facilidade que suas moléculas possuem de alinharem o momento de seus dipolos a um campo aplicado. Sendo assim, qualquer coisa que impeça a rotação molecular livre da água, tal como, o congelamento, as frequências muito altas ou a forte ligação à partícula de solo irá provocar a diminuição do valor da constante dielétrica da água. Visto que as primeiras moléculas de água que são adicionadas ao solo se tornam fortemente ligadas à superfície da partícula, devido às suas interações físico-químicas, elas, dessa forma, irão contribuir somente com um pequeno incremento à constante dielétrica do solo seco. Quando mais e mais água é adicionada e passa acima de um determinado nível transicional (W_t), essas moléculas que estão sendo adicionadas vão se afastando da superfície das partículas, tornando-se livres para rotacionar, e conseqüentemente, contribuindo para um maior aumento da constante dielétrica.

Sendo que a área de superfície em um solo depende sobretudo da distribuição do tamanho da partícula ou textura, solos argilosos com uma maior superfície de água terão a capacidade de reter mais água ao seu redor, caracterizando que o solo argiloso possui a propriedade de se ligar mais fortemente à água do que o solo arenoso. Dessa maneira, o ponto de transição ocorre em níveis de maior umidade na argila do que em solo arenoso.

5.2.7. Validação do método comparando com medidas do parâmetro S21 (perda de inserção) através de um Network analyzer modelo 8510 - Hewlett-Packard.

Testes anteriores, tais como, por exemplo, a influência da fenda feita no guia caracterizaram que o sistema está apto a trabalhar na forma como foi desenvolvido. A análise foi feita no itm 5.2.1.

Para certificar-se da validade dos resultados utilizando sistema de atenuação em dB, comparou-se com valores obtidos da perda de inserção S21, tomados de um analisador de rede modelo 8510 HP.

As tabelas abaixo mostram os resultados da perda de inserção (S21) e (S11) para o solo argiloso, para o solo arenoso e para a microesfera de vidro. A tabela V-6 expõe os dados do solo arenoso; a tabela V-7 mostra os dados do solo argiloso. Os valores obtidos para a microesfera de vidro são mostrados na tabela V-8.

| $\theta V(\%)$ | Parâmetro S21 (dB) | Parâmetro S11 (dB) | SWR |
|----------------|-----------------------|-----------------------|------|
| 0,0 | -3,2 | -30,0 | 1,05 |
| 2,2 | -5,0 | -30,0 | 1,05 |
| 10,6 | -4,8 | -30,0 | 1,05 |
| 12,8 | -7,2 | -30,0 | 1,05 |
| 19,2 | -9,7 | -30,0 | 1,05 |
| 25,5 | -17,0 | -35,0 | 1,05 |

Tabela V-6 - Resultado do teste realizado com o analisador de rede 8510 HP para o solo arenoso.

Capítulo V - Resultados

| $\theta V(\%)$ | Parâmetro S21 (dB) | Parâmetro S11 (dB) | SWR |
|----------------|-----------------------|-----------------------|------|
| 0,0 | -3,2 | -29 | 1,05 |
| 4,3 | -4,1 | -31 | 1,05 |
| 8,7 | -4,5 | -31 | 1,05 |
| 14,9 | -5,1 | -30 | 1,05 |
| 19,2 | -5,6 | -30 | 1,05 |
| 23,9 | -8,3 | -30 | 1,05 |
| 27,7 | -14,8 | -33 | 1,05 |

Tabela V-7 -Resultado do teste realizado com o analisador de rede 8510 HP para o solo argiloso.

| $\theta V(\%)$ | Parâmetro S21 (dB) | Parâmetro S11 (dB) | SWR |
|----------------|-----------------------|-----------------------|------|
| 0,0 | -3,2 | -29,7 | 1,05 |
| 5,0 | -3,7 | -30,0 | 1,05 |
| 10,0 | -5,6 | -30,0 | 1,05 |
| 15,0 | -9,2 | -31,0 | 1,05 |
| 20,0 | -13,5 | -33,0 | 1,05 |
| 25,0 | -16,5 | -30,0 | 1,05 |

Tabela V-8 - Resultado do teste realizado com o analisador de rede 8510 HP para a microesfera de vidro.

Objetivando a validação do método, comparou-se os resultados acima descritos com os obtidos nas tabelas V-2, V-3 e V-4, os quais são valores medidos

com o sistema de guia de onda com fenda, com os mesmos solos e microesfera de vidro.

Pode-se ver essa comparação no gráfico mostrado na figura V-6, como também a regressão linear e o desvio padrão. Este resultado valida o método proposto.

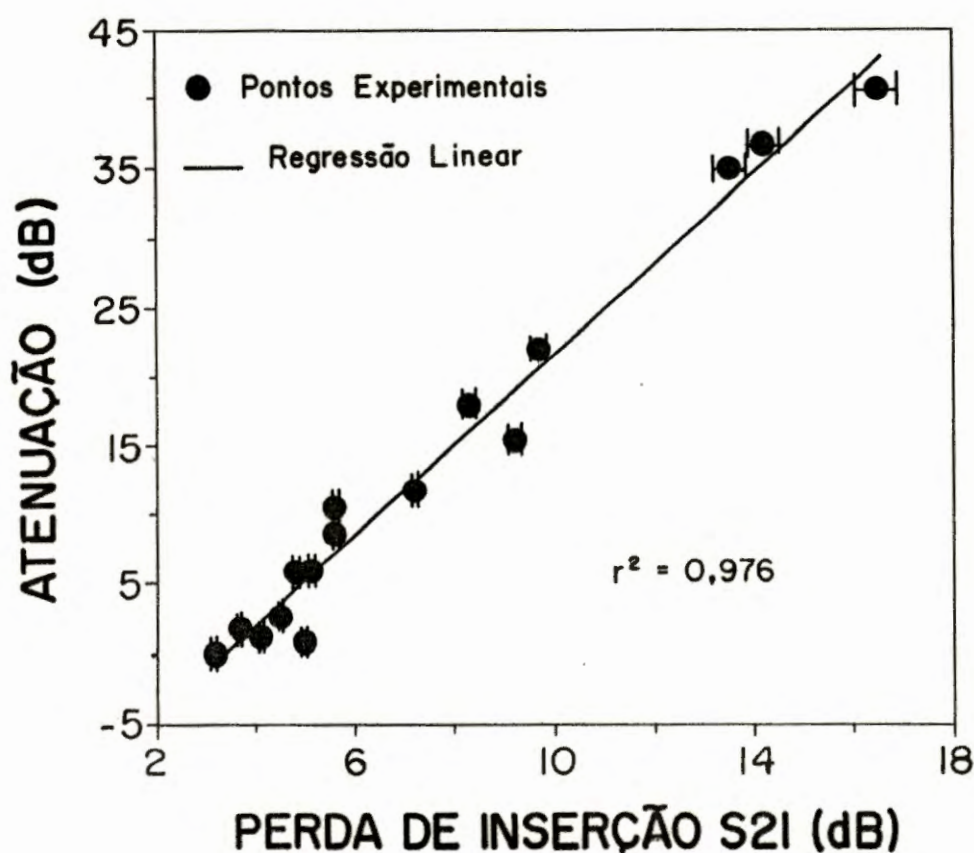


Figura V-7 - Comparação entre os resultados obtidos com o sistema proposto e os obtidos com um analisador de rede 8510 HP.

5.2.8. Influência da densidade na medida da umidade volumétrica.

Devido a limitações no tamanho das amostras e a exigência de materiais e métodos adequados para comparar os resultados, não foi possível efetuar medidas independentes de controle da densidade nas várias umidades. Os resultados apresentados referem-se portanto à variação global do efeito de atenuação de microondas com a umidade volumétrica.

5.2.9. Influência da variação da temperatura ambiente nas medidas.

Para a realização dos estudos do efeito da temperatura sobre o sistema de medida, utilizou-se uma estufa com temperatura controlada por sistema eletrônico e um sensor de platina Pt-100, como sensor da temperatura ambiente. Todo o sistema descrito na figura III-1 como também as amostras de solo foram colocados no interior da estufa. Apenas o voltímetro e a fonte de alimentação foram colocados externamente. O intuito da colocação de todo o conjunto no interior da estufa foi o de verificar o comportamento de todo o sistema sob efeito térmico e não apenas o efeito da influência da temperatura no solo, já que, em termos da medida experimental, a instrumentação e o solo estarão à mesma temperatura ambiente.

Dessa forma objetivou-se analisar o comportamento do sinal, em termos da variação mínima da medida de umidade em três temperaturas distintas, desprezando-se a influência da umidade relativa ambiente, já que no interior de uma estufa ela permanece constante.

Os resultados pertinentes à influência da temperatura na medida de umidade volumétrica θV (%) com o equipamento proposto estão mostrados na figura V-8 (a) e (b). As temperaturas selecionadas nas rotinas de teste foram 31,0°C, 41,0°C e 54,0°C $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

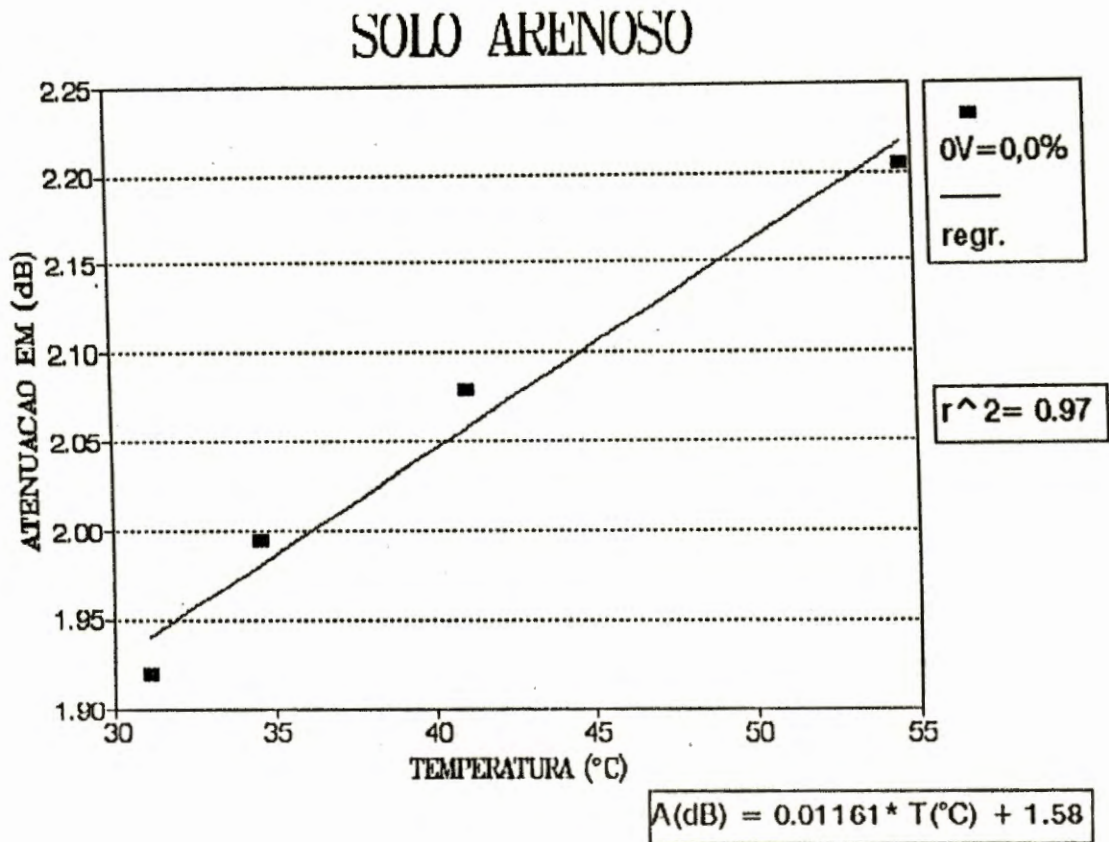


Figura V-8 - Resultado relacionando a influência da variação de temperatura na atenuação do sinal em dB, para o solo arenoso seco ao ar.

Utilizou-se amostra de solo arenoso seco com umidade aproximada de 0,0%, o mesmo foi submetido a uma variação de temperatura de aproximadamente 25,0°C. A alteração na medida da atenuação passou a ser significativa na faixa de temperatura estudada. O erro máximo de leitura passou a ser de 15,1% nestas condições.

CAPITULO VI - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES: CONTRIBUIÇÕES DA RECENTE DISSERTAÇÃO

As principais conclusões e contribuições da presente dissertação são:

a) Foi desenvolvida a instrumentação eletrônica para medida da atenuação com oscilador Gunnplexer mostrando vantagens devido as suas características, as quais são: simplicidade, praticidade, estabilidade, robustez, baixo consumo de corrente (≈ 180 mA) e versatilidade. Permitindo, devido a estes parâmetros, ser acoplada a uma bateria e como consequência a sua portabilidade.

b) Mostrou-se claramente a correlação da atenuação do sinal em dB com a umidade volumétrica, como também a influência da textura do solo. Como já discutido nos capitulos I e V, a textura influencia na capacidade da água de se comportar na forma livre ou ligada ao solo.

A partir dos resultados obtidos e apresentados na figura V-6, observou-se valores de resolução de 1,7% para solo arenoso, de 1,8% para o solo argiloso e de 1,8% para microesfera de vidro. Observou-se também a melhor linearidade de medida na faixa de 14,9% a 27,7% de θ V(%) para solo argiloso com sensibilidade de 0,6 θ V(%) / dB. Para o solo arenoso a faixa com melhor linearidade foi de 10,6 a 25,5% de θ V(%), com sensibilidade de 0,5 θ V(%) / dB.

c) Mostrou-se com resultados apresentados na figura V-6 a correlação das medidas realizadas com o equipamento proposto, quando comparado com as medidas de um analisador de rêdes, próprios para

trabalhos em frequência de microondas. O equipamento utilizado, e que está instalado no CPqD da TELEBRÁS, foi o "Network Analyzer" modelo 8510B da Hewlett Packard. Propiciando desta forma a validação do método proposto com um $r^2 = 0,98$.

d) Mostrou-se que o guia de onda com a fenda, construído para portar as amostras de solo, proposto e objeto destes estudos, mostrou-se eficaz não prejudicando a propagação do sinal através de possíveis e inconvenientes reflexões, que poderiam ocorrer. A tabela V-1 nos dá resultados quantitativos importantes sob este aspecto e de onde se conclui que 99,9% da potência de rádio frequência gerada pelo oscilador Gunn são transferidos para a amostra.

e) Com o método proposto e com as amostras de solo utilizadas, foi possível investigar a influência da textura do solo no processo de medida, isto é, a influência característica de um solo argiloso e arenoso considerado para fins pedológicos um oxissolo, ver figura V-6. Alguns pontos devem ser levantados no que diz respeito as características dos solos utilizados no experimento, principalmente as diferentes concentrações de óxido de ferro (Fe_2O_3) nas amostras, como também efeitos da salinidade e o conteúdo de matéria orgânica no solo. Estas são algumas propriedades que devem ser objetos de criterioso estudo, dado que a literatura internacional referencia bem pouco e a importância da análise destes parâmetros é de suma importância como pode ser vista neste levantamento: - os oxissolos são os que ocupam maior proporção em termos de área (23 %) de todos os solos das regiões tropicais (América Tropical, África Tropical, Ásia Tropical e Austrália Tropical). Só na América Tropical a área é da ordem de $502 \cdot 10^6$ hectare (ha) correspondendo a 60% do total das regiões tropicais (FAGERIA, N.K.; 1989).

Alguns resultados preliminares, utilizando o método proposto nesta dissertação, com diferentes concentrações de óxido de ferro no solo, podem ser visto no apêndice B.

f) A questão da influência da temperatura, nas medidas realizadas com o equipamento, foi estudada e concluiu-se que mudanças significativas de temperatura causam efeito na medida de atenuação de microondas acima de um determinado valor de umidade, no caso 30,0% de umidade volumétrica. Causando erro nas medidas da ordem de 15,1% para solo arenoso e 5,0% para solo argiloso, a partir do valor limite máximo de umidade.

Os resultados indicam pois a necessidade de estabilidade da temperatura para as medidas, numa faixa de $\pm 5^\circ \text{C}$.

CAPITULO VII - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo listamos algumas sugestões para trabalhos futuros, que passamos a enumerar abaixo:

1-) Desenvolvimento de um coletor de dados microcontrolado para o sistema desenvolvido, objetivando sua portabilidade e possíveis medidas no campo.

2-) Utilização da frequência de microondas na banda X, com diodo Gunn, para medida de umidade do solo no campo. A técnica de microondas por transmissão no espaço livre seria a mais adequada, utilizando antenas de microfita.

3-) Utilização de um T-mágico como "probe sensor", para medida de umidade do solo de superfície, objetivando um equipamento portátil de campo.

4-) Utilização de duas frequências diferentes em valores nominais, uma frequência em GHz e outra em MHz, para o estudo do comportamento destas com o sistema água-solo e sua influência.

5-) Utilização do sistema proposto, com dois módulos, transmissor e receptor de microondas, construídos para medir a infiltração vertical de água no solo.

6-) Utilização do sistema proposto para a obtenção de imagem utilizando a técnica de microondas, objetivando o estudo do comportamento da água no solo pixel a pixel.

7-) Utilização do sistema proposto para estudo da influência de materiais ferromagnéticos, no caso específico o óxido de ferro (Fe_2O_3) presente no solo, na atenuação do sinal de microndas.

8-) Investigação da influência de densidade do solo no método de medida com microondas.

- COREY, J. C.; PETERSON, S. F.; WAKAT, M. A. Measurement of attenuation of ^{137}C 's and ^{241}Am gamma rays for soil density and water content determinations, **Soil Science Society of America Procedure**, v. 35, p.215-219, 1971.
- CRESTANA, S. **A tomografia computadorizada como um novo método para estudos da física da água no solo.** São Carlos, 1985.140 p. Tese Doutorado-IFQSC-USP.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCCELLI, R. Static and dynamic 3 dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**. v. 140, n. 5, p. 326-332, 1985.
- CRUVINEL, P.E.; CAVALHEIRO, R.F. Controle Automático de irrigação. **Revista Siemens**, vol. 5, n. 1, p. 34, 1985.
- CRUVINEL, P.E. **Minitomógrafo de raio-x e raio gama computadorizado para aplicações multidisciplinares.** Campinas, 1987. 329 p. Tese Doutorado-UNICAMP.
- CRUVINEL, P.E.;CESAREO, R.;CRESTANA, S.;MASCARENHAS, S. X-ray and γ ray computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements**, New York, v.39, n.5, p.745-50, Oct. 1990.
- DALTON, F.N.; HERKEBRATH, W.N.; RAWLINS, D.S.; RHOADES, J.D. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. **Science**, v. 224, p.989-990.
- DAVIDSON, J. M.; BIGGAR, J. W.; NIELSEN, D. R. Gamma radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous media, **Journal of Geophysical Research**, v. 68, p. 4477-4783, 1963.
- DOUGLASS, J. E. Volumetric calibration of neutron moisture probes. **Soil Science Society of America Procedure**, v. 30, p 541-544, 1966.

- ENGMAN, E. T. Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture. **Remote Sensing and Environment**, v. 35, p. 213-226, 1991.
- FAGERIA, N. K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**, EMBRAPA-DPU, p. xvi + 425, 1989
- FERGUSON, H.; GARDNER, W. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. **Soil Science Society of America Procedure**, v. 26, p. 11-18, 1962.
- FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physical Chemistry**, vol. 3, n. 3, p. 616-623, 1969.
- FLUKE, Washington. **8050A digital multimeter: instruction manual**. Washington, 1984. 1v.
- GARDNER, R. P.; ROBERTS, K. F. Density and moisture content measurement by nuclear methods, **Natl. Coop. Highw. Res. Program Rep.**, v.43, 1967.
- GARDNER, W.; KIRKHAM, D. Determination of soil moisture by neutron scattering, **Soil Science**, v. 73, p. 391-401, 1952.
- GARDNER, W.; CAMPBELL, G. S.; CALISSENDORF, C. Systematic and random errors in dual gamma energy soil bulk density and water content measurements, **Soil Science Society of America Procedure**, v. 36, p. 393-398, 1972.
- GOIT, J. B.; GROENVELT, P. H.; KAY, B. D.; LOCH, J. G. P. The applicability of dual gamma scanning to freezing soils and the problems of stratification, **Soil Science Society of America Procedure**, v. 42, p. 858-863, 1976.
- GINZTON, E.L. **Microwave Measurements**, McGraw-Hill Book Company, New York, New York, 1957.

- GUNN, J. "Instabilities of Current in III-V Semiconductores", **IBM Journal of Research and Development**, v. 8, n. 2, p. 141-159 1964.
- GURR, C. G. Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soil, **Soil Science**, v. 94, p. 224-229, 1962.
- HAINSWORTH, J.M.; AYLMORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Australian Journal of Soil Research**, v. 21, p.435- 443.
- HALLIKAINEN, M.T., ULABY, F.T., DOBSON, M.C., EL-RAYES, M.A. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil. Part I: Empirical Models and Experimental Observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 23, n. 1, p. 25-34, 1985.
- HERRMANN Jr., P. S. de P., MASCARENHAS, S., CRUVINEL, P. E., CRESTANA, S. Medida da umidade em meios porosos utilizando um instrumento dedicado baseado na técnica de microondas.In: XX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, São Carlos-SP, out. 1992. **Anais...** São Carlos: UFSCar/DEQ. p. d3. Resumo.
- IDSO, S. B.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R. J. Detection of soil moisture by remote surveillance, **American Scientist**, v. 63, p. 549-557, 1975a.
- IDSO, S. B. A note on some recently proposed mechanism of genesis of deserts, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, p. 369-370, 1977.
- KACHANOSKY, R.G.; VANWESENBEECK, I.J.; VON BERTOLDI, P.; WARD, A.; HAMLIN, C. Measurement of soil water content during three dimensional axial symmetric water flow. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, p. 645-649, 1990.
- LAL, R. Concentration and size of gravel in relation to neutron moisture and density probe calibration, **Soil Science**, v. 127, p. 41-50, 1979.
- LONG, I. F.; FRENCH, B. K. Measurement of soil moisture in the field by neutron moderation, **Journal of Soil Science**, v. 18, p. 149-166, 1967.

- LOW, P. F. Physical chemistry of clay-water interactions. **Advances in Agronomy**, v.13, p. 269-327, 1961.
- MARKUS, J. **Electronics Dictionary**. 4. ed. New York. McGraw-Hill Book, 1978.
- MANSELL, J.K.; HAMMOND, L. C.; McCURDY, M. Coincidence and interference corrections for dual-energy gamma ray measurements of soil density and water content, **Soil Science Society America Procedure**, v. 3, p. 500-504, 1973.
- MccAULEY, G. N.; STONE, J.F. Source-detector geometry effect on neutron probe calibration, **Soil Science Society America Procedure**, v. 36, p. 246-250, 1972.
- NACE, R. L. Water of the world, **Natural History**, v. 73, p. 10-19, 1964.
- NEWTON, R. W. Microwave remote sensing and its application to soil moisture detection, **Tech. Rep. RSC-81**, 500 pp., Remote Sensing Center, Tex. A&M Univ., College Station, 1977.
- NOFZIGER, D. L. Erros in gamma-ray measurement of water content and bulk density in nonuniform soils, **Soil Science Society America Procedure**, v. 42, p. 845-850, 1978.
- O'NEIL, P.E.; JACKSON, T. J. Observed effects of soil organic matter content on the microwave emissivity of soils. **Remote Sensing Environment**, v. 31, p. 175-182, 1990.
- PALME, U.W. Microwave X-band radiometric characterisation of soils by measurement of the complex permittivity (ϵ^*). In: IGARS '88 Symposium, Edinburgh, Scotland, 1988. **Proceedings... Edinburgh: IEEE, 1988**. Ref. ESA SP-284(IEEE 88CH2497-6).
- PETER CASTLE, G.S. e ROBERTS, J.A. A Microwave Instrument for the Continuous Monitoring of the Water Content of Crude Oil. **Proceedings of IEEE**, v. 62, p. 103-108, Jan 1974.

- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 445-450, 1982.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**, 12° edição. p.1-467, Liv. Nobel, S. Paulo-S.P. 1987.
- PHILIPS, Eindhoven-Holanda. **las hiperfrecuencias: experimentos básicos II**. Amesterdam, s.d. 24 p.
- POPI, O. **Determinação e análise de escoamento unidimensionais e bidimensionais transientes em meios porosos não-saturados**. São Carlos, 1982. Tese de Mestrado. EESC/USP.
- RASMUSSEN, V.P. e CAMPBELL, R.H. A Simple Microwave Method for the Measurement of Soil Moisture. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF SOIL AND PLANT WATER STATUS**, Logan-Utah, 1987. **Proceedings... Logan: Centennial of Utah University** p. 275-277, 1987.
- RAWS, W. J.; ASMUSSEN, L.E. Neutron probe field calibration for soils in the Georgia coastal plain, **Soil Science**, v. 110, p. 262-265, 1973.
- REICHARDT, K. **Processo de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4° ed. rev. e ampliada. Fundação Cargill, Campinas, S.P., p. VII + 466, 1985.
- REGINATO, R.J. Water content and bulk density changes in a soil pedon measured with dual energy gamma-ray transmission. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 118, n.2, p. 61-69, 1974.
- REYNOLDS, S.G., The gravimetric method of soil moisture determination, I, A study of equipment and methodological problems, **Journal of Hydrology**, v. 11, p. 258-273, 1970a.
- REYNOLDS, S.G., The gravimetric method of soil moisture determination, II, An examination of factors influencing soil moisture variability, **Journal of Hydrology**, v. 11, p. 288-300, 1970b.

- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. Electromagnetic Determination in Soil Water Content: Measurements of Coaxial Transmission Lines, **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.
- VACHAUD, G. J.; ROYER, J. M.; COOPER, J. D. Comparison of methods of calibration of a neutron probe by gravimetric on neutron-capture model, **Journal of Hydrology**, v. 34, p. 343-356, 1977.
- van BAVEL, C. H. M.; Calibration and characteristics of two neutron moisture probes, **Soil Science Society of America Procedure**, v. 25, p. 329-334, 1961.
- van BAVEL, C. H. M.; STIRK, G. B. Soil water measurement with an Am²⁴¹-Be neutron source and an application to evaporimetry, **Journal of Hydrology**, v. 5, p. 40-60, 1967.
- van BAVEL, C. H. M.; UNDERWOOD, N.; SWANSON, R. W. Soil moisture measurement by neutron moderation, **Soil Science**, v. 82, p. 29-41, 1956.
- VANKOUGHNETT, A.L. Fundamentals of microwave heating. **Int. Microwave Power Inst.** Short Course and Workshop for users of Microwave Power, 1972.
- VELLIDIS, G.; SMITH, M.C.; THOMAS, D.L.; ASMUSSEN, L.E. Detecting wetting front movement in a sandy soil with ground-penetrating radar. **American Society of Agricultural Engineers**, v.33, n.6, p. 1867-1874, 1990.
- VISVALINGAM, M.; TANDY, J. D. The neutron method for measuring soil moisture content-A review, **Journal of Soil Science**, v. 243, p. 499-511, 1972.
- VON HIPPEL, A.R., ed. **Dielectrics and Waves**. Cambridge: The Technology Press of M.I.T.; New York: J. Wiley, 1954.
- VON HIPPEL, A.R., ed. **Dielectrics Materials and Applications**. Cambridge: The Technology Press of M.I.T.; New York: J. Wiley, 1954.

WARD, A.; KACHANOSKY, R. G.; VON BERTOLDI, P.; VAN WASENBEECK, I. J.; HAMLEN, C. Solute transport during three dimensional unsaturated water flow: axisymmetric measurements using time-domain reflectometry. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY CONFERENCE, Division S-1 Anaheim-CA, 1988. **Proceedings... Anaheim: ASA, 1988.**

WALKER, J.; ROWNTREE, P. R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, p. 29-46, 1977.

APÊNDICE A

Parâmetro S - descreve as condições da onda passando pelo sistema.



à figura acima mostra uma rede de duas portas com as ondas incidentes e refletidas a_1 , b_1 , a_2 e b_2 , onde

$$a_1 = \frac{V_{i1}}{\sqrt{Z_0}} \qquad a_2 = \frac{V_{i2}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$b_1 = \frac{V_{r1}}{\sqrt{Z_0}} \qquad b_2 = \frac{V_{r2}}{\sqrt{Z_0}}$$

$Z_0 \Rightarrow$ impedância característica da linha de transmissão na qual as duas portas estão conectadas.

$V_i \Rightarrow$ tensão incidente.

$V_r \Rightarrow$ tensão (gerada) refletida.

As equações quadri-pólos para o parâmetro S são:

$$b_1 = S_{11} \cdot a_1 + S_{12} \cdot a_2$$

$$b_2 = S_{21} \cdot a_1 + S_{22} \cdot a_2$$

codificando e subscrevendo i para 11, r para 12, f para 21 e o para 22, teremos o seguinte:

$$S_i = S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2 = 0}$$

$$S_r = S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1 = 0}$$

$$S_f = S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2 = 0}$$

$$S_o = S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1 = 0}$$

Os parâmetros - S são definidos da seguinte forma:

$S_i = S_{11}$ = coeficiente de reflexão de entrada. É a razão complexa da onda refletida e a onda incidente na entrada sob as condições $Z_L = Z_0$ e $V_{s2} = 0$.

$S_r = S_{12}$ = coeficiente de transmissão reversa. É a razão complexa da onda gerada na entrada e a onda incidente na saída sob as condições $Z_s = Z_0$ e $V_{s1} = 0$.

$S_f = S_{21}$ = coeficiente de transmissão direta. É a razão complexa da onda gerada na saída e a onda incidente na entrada sob as condições $Z_L = Z_0$ e $V_{s2} = 0$.

$S_o = S_{22}$ = coeficiente de reflexão na saída. É a razão complexa da onda refletida e a onda incidente na saída sob as condições $Z_s = Z_0$ e $V_{s1} = 0$.