

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANDERSON BASSANI**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**ONDAS ELETROMAGNÉTICAS: UMA ABORDAGEM  
TEÓRICO-PRÁTICA PARA ENSINO, PESQUISA E  
EXTENSÃO**

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ONDAS ELETROMAGNÉTICAS: UMA ABORDAGEM  
TEÓRICO-PRÁTICA PARA ENSINO, PESQUISA E  
EXTENSÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roger Pierre Fabris Hoefel

Porto Alegre  
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDERSON BASSANI

**ONDAS ELETROMAGNÉTICAS: UMA ABORDAGEM  
TEÓRICO-PRÁTICA PARA ENSINO, PESQUISA E  
EXTENSÃO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Roger Pierre Fabris Hoefel, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica (UNICAMP, Campinas, Brasil)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roger Pierre Fabris Hoefel, UFRGS

Doutor pela UNICAMP – Campinas, Brasil.

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS

Doutor pela UNIVERSITY OF LONDON – Londres, Inglaterra.

Prof. Dr<sup>a</sup>. Liane Ludwig Loder, UFRGS

Doutora pela UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Porto Alegre, Dezembro de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditaram em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a UFRGS pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

A todos os professores que me auxiliaram na realização deste trabalho, em especial meu professor orientador.

## **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo a realização de uma série de experimentos sobre Ondas Eletromagnéticas utilizando um conjunto de equipamentos da empresa Minipa adquiridos pela universidade. Para cada uma das práticas experimentais será realizada uma análise qualitativa e quantitativa para descrever os fenômenos observados. Há um total de seis experimentos descritos neste trabalho: medidas de frequência, potência, relação de onda estacionária, Diodo Gunn, comprimento de onda e cavidade ressonante.

**Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Ondas Eletromagnéticas. Micro-ondas. Medição de Micro-ondas.**

## **ABSTRACT**

This work aims to carry out a series of experiments on Electromagnetic Waves using a set of equipment purchased by university through the company Minipa. For each of this experimental practices will be performed a qualitative and quantitative analysis to describe phenomena observed. There are a total of six experiments described in this work: measurements for frequency, power, standing wave ratio, Gunn Diode, wavelength and cavity resonator.

**Keywords: Electrical Engineering. Electromagnetic Waves. Microwaves. Microwave Measurement.**

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Motivação e objetivos .....	14
1.2	Estrutura do trabalho.....	15
2	CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES E INSTRUMENTOS.....	17
2.1	Descrição dos componentes do kit técnico.....	17
2.1.1	Guia Fendido (Slotted Line).....	17
2.1.2	Atenuador Variável ( <i>Variable Attenuator</i> ).....	21
2.1.3	Medidor de Onda ( <i>Wavemeter</i> ).....	24
2.1.4	Isolador ( <i>Isolator</i> ) .....	25
2.1.5	Curto Sintonizável ( <i>Tunable Short</i> ) .....	26
2.1.6	Ajustador de Reflexões ( <i>Sliding Screw Tuner</i> ) .....	29
2.1.7	Carga Casada ( <i>Matched Load</i> ) .....	31
2.1.8	Guia de Onda Reto ( <i>Straight Waveguide</i> ).....	33
2.1.9	Detector a Cristal ( <i>Crystal Detector</i> ) .....	33
2.1.10	Circulador ( <i>Circulator</i> ).....	35
2.1.11	Cavidade Ressonante ( <i>Cavity Resonator</i> ).....	38
2.1.12	Adaptador Guia de Onda a Coaxial ( <i>Waveguide to Coaxial Adaptor</i> ) .....	40
2.1.13	Lâmina Acopladora e Placa de curto-circuito .....	41
2.1.14	Dielétricos (baquelite, vidro orgânico e politetrafluoretileno) .....	43
2.1.15	T Mágico ( <i>Magic T</i> ) .....	44
2.1.16	Acopladores Direcionais ( <i>Directional Couplers</i> ) .....	46
2.2	Descrição dos Instrumentos utilizados.....	50
2.2.1	Indicador Detector de Onda ( <i>Wave Detector Indicator</i> ) .....	50
2.2.2	Amplificador Seletivo ( <i>Selective Amplifier</i> ) .....	52
2.2.3	Fonte de Sinal de Micro-ondas ( <i>Microwave Signal Source</i> ).....	55
2.2.4	Medidor de Potência ( <i>Microwave Power Meter</i> ).....	59
3	EXPERIMENTO 1 – MEDIDA DE FREQUÊNCIA DE MICRO-ONDAS.....	61
3.1	Objetivo da experiência .....	61
3.2	Fundamentação teórica.....	61
3.3	Procedimento experimental.....	66
3.4	Resultados obtidos .....	68
4	EXPERIMENTO 2 – MEDIDA DE POTÊNCIA DE MICRO-ONDAS .....	71
4.1	Objetivo da experiência .....	71
4.2	Fundamentação teórica.....	71
4.3	Procedimento experimental.....	72
4.4	Resultados obtidos .....	74
5	EXPERIMENTO 3 – CARACTERÍSTICAS DO OSCILADOR DA FONTE DE SINAL DE MICRO-ONDAS .....	78
5.1	Objetivo da experiência .....	78
5.2	Fundamentação teórica.....	78
5.3	Procedimento experimental.....	80
5.4	Resultados obtidos .....	85

<b>6</b>	<b>EXPERIMENTO 4 – MEDIDA DE COMPRIMENTO DE ONDA NUMA ONDA ELETROMAGNÉTICA ESTACIONÁRIA .....</b>	<b>90</b>
<b>6.1</b>	<b>Objetivo da experiência .....</b>	<b>90</b>
<b>6.2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>90</b>
<b>6.3</b>	<b>Procedimento experimental .....</b>	<b>91</b>
<b>6.4</b>	<b>Resultados obtidos .....</b>	<b>96</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTO 5 – MEDIDA DA RELAÇÃO DE ONDA ESTACIONÁRIA .....</b>	<b>99</b>
<b>7.1</b>	<b>Objetivo da experiência .....</b>	<b>99</b>
<b>7.2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>99</b>
<b>7.3</b>	<b>Procedimento experimental .....</b>	<b>101</b>
<b>7.4</b>	<b>Resultados obtidos .....</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTO 6 – FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E FATOR DE QUALIDADE DE UMA CAVIDADE RESSONANTE RETANGULAR COM DIVERSOS MEIOS DIELÉTRICOS.....</b>	<b>108</b>
<b>8.1</b>	<b>Objetivo da experiência .....</b>	<b>108</b>
<b>8.2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>108</b>
<b>8.3</b>	<b>Procedimento experimental .....</b>	<b>111</b>
<b>8.4</b>	<b>Resultados obtidos .....</b>	<b>117</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>118</b>
<b>10</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>119</b>
	<b>ANEXO A - TABELA DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE ONDA (WAVEMETER)</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXO B - TABELA DE CALIBRAÇÃO DO ATENUADOR VARIÁVEL (VARIABLE ATTENUATOR).....</b>	<b>122</b>
	<b>ANEXO C – DESCRIÇÃO DO GUIA DE ONDA RETANGULAR.....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Guia Fendido.....	19
Figura 2. Detalhe das duas réguas do Guia Fendido. ....	19
Figura 3. Detalhe do Relógio Comparador montado no Guia Fendido.....	20
Figura 4. Atenuador Variável.....	23
Figura 5. Corte longitudinal do Atenuador Variável.....	23
Figura 6. Medidor de Onda.....	24
Figura 7. Isolador.....	26
Figura 8. Curto Sintonizável.....	27
Figura 9. Esquemático de um Curto Sintonizável simples [3]. ....	27
Figura 10. Esquemático de um Curto Sintonizável do tipo <i>Choke</i> [3]. ....	28
Figura 11. Transformador de quarto de onda com duas seções.....	29
Figura 12. Ajustador de Reflexões. ....	30
Figura 13. Carga Casada.....	32
Figura 14. Corte longitudinal da carga casada. ....	32
Figura 15. Guia de Onda Reto.....	33
Figura 16. Detector a Cristal. ....	34
Figura 17. Circulador (a) e símbolo elétrico do circulador (b).....	36
Figura 18. Circuito de micro-ondas arbitrário de "N" portas. ....	37
Figura 19. Corte horizontal do Circulador. ....	38
Figura 20. Cavidade Ressonante. ....	39
Figura 21. Adaptador Guia de Onda para Cabo Coaxial (a) e esquemático mostrando a sonda (b). ....	40
Figura 22. Lâmina Acopladora (na esquerda) e Placa de curto-circuito (na direita).....	42
Figura 23. Circuito equivalente para a Lâmina Acopladora [2]. ....	42
Figura 24. Amostras de dielétricos.....	44
Figura 25. T Mágico. ....	46
Figura 26. Esquemático de uma junção híbrida de guia de onda, ou T mágico.....	46
Figura 27. Acoplador Direcional de Multifuro - 10 dB ( <i>Multi-Hole Directional Coupler – 10 dB</i> ). ....	47
Figura 28. Acoplador Direcional de Guia Cruzado ( <i>Cross Guide Directional Coupler</i> ).....	47
Figura 29. Acoplador Direcional de Multifuro ( <i>Multi-Hole Directional Coupler</i> ).....	47
Figura 30. Símbolo de um Acoplador Direcional com quatro portas.....	48
Figura 31. Esquemático de um Acoplador Direcional com guias de onda.....	49
Figura 32. Indicador Detector de Onda. ....	51
Figura 33. Circuito simplificado do instrumento Indicador Detector. ....	52
Figura 34. Amplificador Seletivo. ....	53
Figura 35. Fonte de Sinal de Micro-ondas. ....	56
Figura 36. Medidor de Potência. ....	60
Figura 37. Esquemático do Medidor de Potência.....	60
Figura 38. Representação esquemática de uma cavidade cilíndrica com parede móvel. ....	63
Figura 39. Configuração do Experimento 1. ....	66
Figura 40. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 1. ....	66
Figura 41. Configuração do Experimento 2. ....	73

Figura 42. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 2. ....	73
Figura 43. Gráfico dos resultados da Série 1.....	76
Figura 44. Gráfico dos resultados da Série 2.....	77
Figura 45. Gráfico dos resultados da Série 2 (Potência em dBm).....	77
Figura 46. Banda de condução dupla para um diodo Gunn de GaAS [3]. ....	79
Figura 47. Configuração do Experimento 3. ....	82
Figura 48. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 3 (Corrente versus Tensão)...	82
Figura 49. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 3 (Frequência versus Tensão). .....	83
Figura 50. Corrente versus tensão elétrica no diodo Gunn.....	87
Figura 51. Potência versus tensão elétrica no diodo Gunn.....	88
Figura 52. Gráfico típico de potência versus tensão para diodo Gunn com variação de temperatura [4]. ....	88
Figura 53. Frequência versus tensão elétrica no diodo Gunn.....	89
Figura 54. Gráfico corrente versus distância L num guia de onda para uma onda estacionária [9]. ....	91
Figura 55. Configuração do Experimento 4. ....	93
Figura 56. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 4 (com placa de curto). ....	94
Figura 57. Montagem do Experimento 4 (com curto sintonizável e relógio comparador). ....	95
Figura 58. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 4 (com curto sintonizável). ...	96
Figura 59. Configuração do Experimento 5. ....	104
Figura 60. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 5. ....	104
Figura 61. Gráfico potência versus frequência em cavidades ressonantes.....	111
Figura 62. Configuração do Experimento 6. ....	114
Figura 63. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 6. ....	114
Figura 64. Imagem inicial no osciloscópio indicando os pulsos de varredura da fonte de sinal. .....	115
Figura 65. Imagem do osciloscópio indicando o ponto de ressonância da Cavidade Ressonante. ....	115
Figura 66. Imagem do osciloscópio indicando os pontos de ressonância da Cavidade Ressonante e do Medidor de Onda no ponto de -3dB (se aproximando pela direita). ...	116
Figura 67. Imagem do osciloscópio indicando os pontos de ressonância da Cavidade Ressonante e do Medidor de Onda no ponto de -3dB (se aproximando pela esquerda). .....	116
Figura 68. Imagem da seção reta do guia de onda.....	123
Figura 69. Geometria do guia retangular.....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas obtidas após os 30 minutos de <i>power-on</i> . .....	68
Tabela 2 – Medidas obtidas após 5 minutos de <i>power-on</i> . .....	69
Tabela 3 – Diferença obtida devido ao tempo de aquecimento da fonte de sinal. ....	69
Tabela 4 – Medições de potência variando frequência da fonte de sinal. ....	75
Tabela 5 – Resultados para o Experimento 3. ....	85
Tabela 6 – Medidas do experimento 4 (pontos de máximo, sem relógio comparador). ....	96
Tabela 7 – Medidas do experimento 4 (pontos de mínimo, sem relógio comparador). ....	97
Tabela 8 – Medidas do experimento 4 (referência $V_1 = 30\mu V$ ) .....	97
Tabela 9 – Resultados do experimento 4 com curto sintonizável. ....	98
Tabela 10 – Resultados para posição do pino em 5,0 mm. ....	105
Tabela 11 – Resultados para posição do pino em 10,0 mm. ....	105
Tabela 12 – Resultados para posição do pino em 30,0 mm. ....	106
Tabela 13 – Resultados para posição do pino em 60,0 mm. ....	106
Tabela 14 – Resultados do Experimento 6. ....	117
Tabela 15 – Valores utilizados para cálculo dos modos de propagação. ....	125
Tabela 16 – Resultados do cálculo para os modos de propagação. ....	125

## LISTA DE ABREVIATURAS

AC: Corrente Alternada (*Alternating current*).

BNC: Tipo de conector de cabo coaxial (British Naval Connector ou Bayonet Neil Concelman ou Bayonet Nut Connector).

DC: Corrent contínua (direct current).

FM: Modulação em Frequência (*Frequency Modulation*).

GHz: Giga Hertz ( $10^9$  ou 1.000.000.000 Hertz).

RF: Frequência de Rádio (*Radio Frequency*).

ROE: Relação de Onda Estacionária.

SWR: Relação de Onda Estacionária (*Standing Wave Ratio*).

TE: Ondas Transverso Elétricas.

TEM: Ondas Transverso Eletromagnéticas.

THz: Tera Hertz ( $10^{12}$  ou 1.000.000.000.000 Hertz).

TM: Ondas Transverso Magnéticas.

TOE: Taxa de Onda Estacionária ou VSWR.

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UHF: Frequência Ultra Alta (*Ultra High Frequency*).

VSWR: *Voltage Standing Wave Ratio*.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo descrever uma série de experimentos práticos utilizando equipamentos didáticos da empresa Minipa, para que possam ser utilizados como ferramenta de apoio didático para o ensino de ondas eletromagnéticas. Faz parte deste aprendizado o conhecimento dos diversos componentes e instrumentos para medição de ondas eletromagnéticas na frequência de micro-ondas, já que amperímetro e voltímetro tradicionais não são utilizados nesta faixa de frequência. Na análise tradicional de circuitos, assume-se que as dimensões físicas dos componentes do circuito são muito menores do que o seu comprimento de onda, o que não ocorre na operação de circuitos de altas frequências. Por este motivo nos circuitos de micro-ondas, deve-se recorrer aos princípios mais fundamentais das características das ondas eletromagnéticas. O problema neste caso consiste em achar soluções das Equações de Maxwell para a onda eletromagnética aplicada as condições de contorno especificadas.

Como em qualquer campo da Engenharia, medidas de laboratório são de grande importância em fornecer a conexão entre a teoria e a prática em frequências de micro-ondas.

Este trabalho não tem como foco a explicação totalmente detalhada nem a demonstração de fórmulas ou da teoria, por isso é apoiado nos livros textos de referência. Contudo, os tópicos importantes serão citados destas fontes quando necessário para as explicações.

Pode-se falar ainda da importância do estudo no campo de micro-ondas já que o seu uso tem tido grande expansão com o avanço das telecomunicações. Como exemplos, citam-se: telecomunicações via satélites, rádio astronomia, exame do solo, radar, meteorologia, televisão em UHF, enlaces terrestres de micro-ondas, dispositivos de estado sólido,

aquecimento, Medicina e sistemas de identificação [1]. Outro campo de estudo atualmente é na faixa de frequências de Terahertz, que são as ondas eletromagnéticas com frequências que vão desde 0,1 THz até 10 THz. Por possuírem comprimentos de onda da ordem de 3 mm até 30  $\mu\text{m}$ , requerem componentes cada vez menores e sistemas eletrônicos mais compactos.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Cap. 2 descreve os componentes e instrumentos do kit técnico Minipa.

Os capítulos subsequentes apresentam um conjunto de experiências propostas, sendo estruturados da seguinte maneira: descrição dos objetivos, fundamentação teórica, descrição do procedimento experimental adotado e os resultados alcançados.

Isto posto, o Cap. 3 descreve uma experiência para a medição da frequência da onda eletromagnética guiada.

O Cap. 4 descreve uma experiência para a medição direta da potência recebida.

O Cap. 5 descreve uma prática para a medição das características do oscilador da fonte de sinal de micro-ondas.

O Cap. 6 descreve um procedimento prático para a medição do comprimento de onda estacionária.

O Cap. 7 descreve uma experiência de medição da relação de onda estacionária ou SWR (*Standing Wave Ratio*).

Finalmente o Cap. 8 descreve a última experiência realizada: medição da frequência de ressonância e fator de qualidade de uma cavidade ressonante retangular com diversos dielétricos.

Este trabalho é complementado por três Anexos. O Anexo A apresenta a tabela de calibração do Medidor de Onda. O Anexo B mostra a tabela de calibração do Atenuador Variável. O Anexo C descreve algumas características básicas do Guia de Onda utilizado.

## **2 CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES E INSTRUMENTOS**

O kit técnico da Minipa é composto de vários componentes e alguns instrumentos, através dos quais é montado um determinado experimento.

Na Seção 2.1 são descritos os 19 componentes do kit técnico, que são: Guia Fendido, Atenuador Variável, Medidor de Onda, Isolador, Curto Sintonizável, Ajustador de Reflexões, Carga Casada, Guia de Onda Reto, Detector a Cristal, Circulador, Cavidade Ressonante, Adaptador Guia de Onda para Cabo Coaxial, Lâmina Acopladora, Placa de curto-circuito, Dielétricos, T Mágico, e Acopladores Direcionais.

Na Seção 2.2. são descritos os 4 instrumentos de medição do kit técnico: Indicador Detector de Onda, Amplificador Seletivo, Fonte de Sinal de Micro-ondas e o Medidor de Potência.

### **2.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO KIT TÉCNICO**

#### **2.1.1 GUIA FENDIDO (SLOTTED LINE)**

- Função.

Um guia fendido é um trecho de guia de onda que permite a amostragem da amplitude do campo elétrico de uma onda estacionária. Em frequências de micro-ondas é difícil construir instrumentos para medir tensão e corrente absolutas. Neste sentido, o guia de onda fendido é utilizado para medição de tensão e corrente relativas, ou seja, fixa-se o valor da medida no ponto de máximo e move-se a sonda até outro ponto para medição relativa ao ponto de máximo. Movendo a sonda ao longo do guia, a taxa de onda estacionária pode ser calculada através das medições de máximos e mínimos de tensão, cf. Exp. 5. A taxa de onda estacionária é definida por [2]:

$$SWR = s = \frac{|E|_{max}}{|E|_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad (1)$$

onde:

- $|E|_{max}$  denota a magnitude do campo elétrico máximo;
- $|E|_{min}$  denota a magnitude do campo elétrico mínimo;
- $|\Gamma|$  denota o módulo do coeficiente de reflexão.

Com este dispositivo o SWR e a distância entre mínimos e máximos de tensão ou corrente podem ser medidos. A partir destas informações pode-se, por exemplo, determinar a impedância da carga.

Embora o guia fendido possa também ser utilizado para medir uma impedância desconhecida na faixa de micro-ondas, atualmente utiliza-se o Analisador de Rede Vetorial (*Vector Network Analyser*) pois este apresenta vantagens em termos de precisão. Infelizmente não temos este instrumento disponível, o qual teria a capacidade para medir magnitude e fase de um sinal.

Uma razão para o uso e estudo do guia fendido é que este componente provê uma excelente ferramenta para aprender os conceitos básicos de ondas estacionárias e cargas não casadas.

- Descrição.

O guia de onda utilizado é um trecho de guia retangular e possui uma fenda na sua parte superior, na direção longitudinal, por onde uma sonda é inserida. Esta sonda possui uma conexão para acoplamento de um cabo coaxial, que por sua vez se conecta ao instrumento Amplificador Seletivo, como descrito no experimento do Cap. 6. O Amplificador Seletivo será explicado posteriormente.

O Guia Fendido utilizado pode ser visualizado na Fig. 1. Possui um botão na parte frontal com o qual podemos girar e com isso mover internamente a posição da sonda.



Figura 1. Guia Fendido.

Possui uma régua graduada em milímetros com valores que variam de 180 na parte mais a esquerda até 70 na sua posição mais a direita. Esta régua está fixada na estrutura maior do guia fendido. Uma segunda régua na sua parte móvel serve para indicar a posição da sonda nos experimentos. Estas medidas de distância são realizadas de maneira relativa considerando-se a posição da sonda no valor 5 mm da régua móvel. Esta segunda régua possui também divisões em milímetros e seus valores vão de 0 até 10. Os detalhes das régua podem ser vistos na Fig. 2.



Figura 2. Detalhe das duas régua do Guia Fendido.

O Guia Fendido também possui um acoplamento mecânico na sua parte de trás para fixação de um Relógio Comparador. Este Relógio é mostrado na Fig. 3. O Relógio comparador foi desenvolvido para aumentar a precisão das medidas no Guia Fendido, pois a sua resolução é de 0,01 mm, ou seja, 100 partes em 1 mm. O Relógio Comparador possui dois ponteiros. O ponteiro maior e principal indica uma leitura de 1 mm para cada 360° com um total de 100 divisões. O ponteiro menor e secundário é um contador de voltas do ponteiro principal. O princípio de funcionamento consiste num mecanismo que transforma o deslocamento do seu eixo ou haste num movimento transmitido ao mostrador.



Figura 3. Detalhe do Relógio Comparador montado no Guia Fendido.

- Operação.

Para medição de máximos e mínimos de tensão, são feitas as medições conforme descrição a seguir (procedimento experimental completo no Cap. 6). Considerou-se a posição central da régua móvel (isto é, o valor 5), como sendo a posição da sonda no guia de onda. A partir dela, anota-se a leitura da régua fixa, por exemplo, 106 mm. Ao mover a posição da sonda para a esquerda, observa-se um mínimo ou máximo de tensão e anota-se novamente o valor indicado pela posição central na régua fixa, por exemplo, 130 mm. O dobro da diferença entre as leituras é que fornecerá o valor do comprimento de onda no guia, conforme descrito no Cap. 6.

A utilização do Relógio Comparador requer um pouco mais trabalho para realização das medidas. Primeiramente alinha-se visualmente a posição 5 da régua móvel em alguma leitura da régua fixa. Neste ponto devemos fixar o Relógio Comparador, que precisa ficar zerado. Para realizar o zeramento deve-se ainda fixar uma peça móvel com parafuso no eixo do Relógio Comparador, como visto na Fig. 3. Após isso, deve-se observar que a leitura realizada precisa estar no máximo 10 mm à esquerda, pois este é o máximo que o Relógio Comparador pode excursionar.

### **2.1.2 Atenuador Variável (*Variable Attenuator*)**

- Função.

Este é um instrumento cuja função é atenuar a potência da onda eletromagnética transmitida. É um trecho de guia de onda retangular onde internamente há uma lâmina de material resistivo, por exemplo ferrite, que pode ser movimentada através de um eixo móvel. Esta lâmina é que tem a função de dissipação de energia através do efeito Joule.

- Descrição.

A atenuação depende da posição da lâmina. A profundidade da lâmina pode ser alterada a medida que se gira o eixo móvel, que está graduado em milímetros. O Atenuador Variável utilizado é mostrado na Fig. 4. Quando a posição indicada no eixo for zero, a lâmina resistiva está na parede do guia e não há atenuação na onda. A posição 5 mm indica a máxima profundidade da lâmina para dentro do guia de onda e corresponde a máxima atenuação da onda. A lâmina do Atenuador Variável possui espessura aproximada de 1 mm. O Atenuador Variável é um instrumento calibrado de fábrica que indica o nível de atenuação de potência em decibel (dB) em função da frequência da onda eletromagnética. A tabela de calibração deste instrumento pode ser vista no Anexo B. A atenuação ou ganho em decibel é dado por:

$$\text{Atenuação ou Ganho em dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}, \quad (2)$$

onde:

- $P_{saída}$  denota a potência de saída;
- $P_{entrada}$  denota a potência de entrada em um circuito.

A lâmina resistiva possui seus cantos em formato de seta, projetada desta forma para diminuir os efeitos da reflexão de onda. Isto é mostrado no corte longitudinal na Fig. 5.



Figura 4. Atenuador Variável.

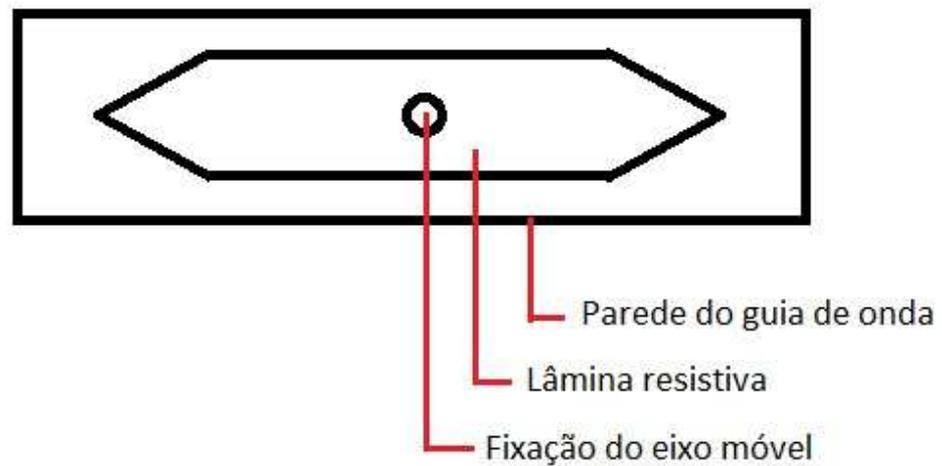


Figura 5. Corte longitudinal do Atenuador Variável.

- Operação.

Basicamente, gira-se o eixo móvel para alterar a distância da lâmina de ferrite. Atenuação zero significa que a lâmina resistiva está na parede do guia de onda e, portanto, o eixo móvel indica o valor zero. Atenuação máxima significa que a lâmina resistiva está no centro do guia, e o eixo móvel indica o valor 5 mm. A lâmina não excursiona de uma parede a outra do guia de onda, pois a largura do guia é de 23 mm. Para atenuação máxima deve-se girar o eixo no sentido horário.

### 2.1.3 Medidor de Onda (*Wavemeter*)

- Função.

O Medidor de Onda é uma cavidade ressonante circular. O eixo central possui um micrômetro para registrarmos a distância de movimento interno de uma de suas paredes metálicas. O Medidor de Onda tem a função de reflexão e confinamento da onda eletromagnética na estrutura. Quando a distâncias entre as paredes metálicas for múltiplo de  $\lambda_g/2$  (onde  $\lambda_g$  é o comprimento da onda eletromagnética guiada), dizemos que a cavidade está sintonizada e uma onda estacionária está presente na estrutura.

- Descrição.

O Medidor de Onda utilizado é mostrado na Fig. 6. A escala do micrômetro vai desde 0 até 15,78 mm. Assim como o restante dos componentes do kit, este instrumento é construído com mecânica de precisão. Exemplificando, para cada revolução completa no seu eixo a escala do micrômetro varia apenas 0,5 mm, isto mostra que temos uma boa precisão na leitura. A tabela de calibração deste instrumento pode ser vista no Anexo A.



Figura 6. Medidor de Onda.

- Operação.

O Medidor de Onda se conecta no sistema por um trecho de guia de onda retangular, conforme se pode observar na parte esquerda da Fig. 6. Uma pequena fenda ou furo na parede metálica do guia retangular faz com que parte da energia da onda eletromagnética entre na cavidade do medidor de onda.

Após a utilização do Medidor de Onda, deve-se dessintonizá-lo, ou seja, colocar o eixo móvel na posição 0 mm do micrômetro para evitar flutuações da medida de amplitude da onda eletromagnética nos demais experimentos.

#### **2.1.4 Isolador (*Isolator*)**

- Função.

O Isolador é um trecho de guia de onda retangular que permite a passagem da onda eletromagnética numa direção e atenua fortemente na direção oposta.

Como será visto nos experimentos, o isolador é montado sempre no início do guia de onda, ou seja, após o adaptador cabo coaxial para guia de onda, que por sua vez conecta a fonte de sinal de micro-ondas. Neste tipo de montagem, o Isolador tem a função principal de evitar que ondas eletromagnéticas refletidas no guia de onda acabem voltando para o circuito da fonte de sinal, evitando que a fonte de sinal de micro-ondas seja danificada.

- Descrição.

O Isolador utilizado é mostrado na Fig. 7. O princípio de funcionamento é baseado no uso de ferrite como material dissipador de energia. Possui uma lâmina deste material no centro de sua estrutura juntamente com um campo magnético (ímã). Esta interação da lâmina

e do campo permite a onda incidente se propagar sem modificação e a onda na direção contrária seja fortemente atenuada.

Deve-se observar que o isolador mesmo colocado após a fonte de sinal de micro-ondas não afeta a frequência da onda eletromagnética por ser um dispositivo linear. O Isolador possui isolação mínima 20 dB [13].



Figura 7. Isolador.

- Operação.

Para uma operação correta do Isolador deve ser observada a direção de montagem. A referência é a sua etiqueta frontal que apresenta uma seta que indica a direção de propagação da onda eletromagnética.

### 2.1.5 Curto Sintonizável (*Tunable Short*)

- Função.

O Curto Sintonizável permite a variação da distância de uma impedância de curto circuito como terminação do guia de onda.

- Descrição.

O Curto Sintonizável utilizado nos experimentos é mostrado na Fig. 8. Gira-se o micrômetro para alterar a impedância de curto circuito. O eixo móvel possui escala milimétrica desde zero (posição do êmbolo metálico na direção do guia de onda) até 40 mm (posição do êmbolo mais interna ao guia de onda).



Figura 8. Curto Sintonizável.

A forma mais simples de um curto circuito ajustável ou Curto Sintonizável pode ser vista na Fig. 9, que é formada apenas por um êmbolo de um bom condutor. Contudo, esta forma simples não é satisfatória em termos de desempenho elétrico, pois faz com que o coeficiente de reflexão seja menor que a unidade [3].

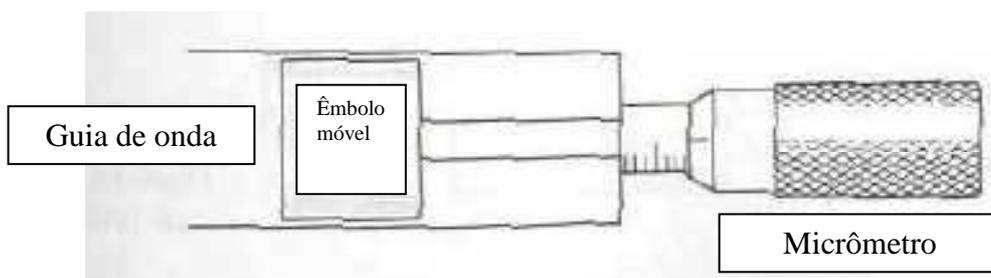


Figura 9. Esquemático de um Curto Sintonizável simples [3].

Pode-se verificar que o Curto Sintonizável utilizado nos experimentos é com êmbolo do tipo *Choke*, e o seu esquemático é mostrado na Fig. 10. Este tipo de êmbolo é um exemplo do uso da propriedade do transformador de quarto de onda para transformação de impedância.

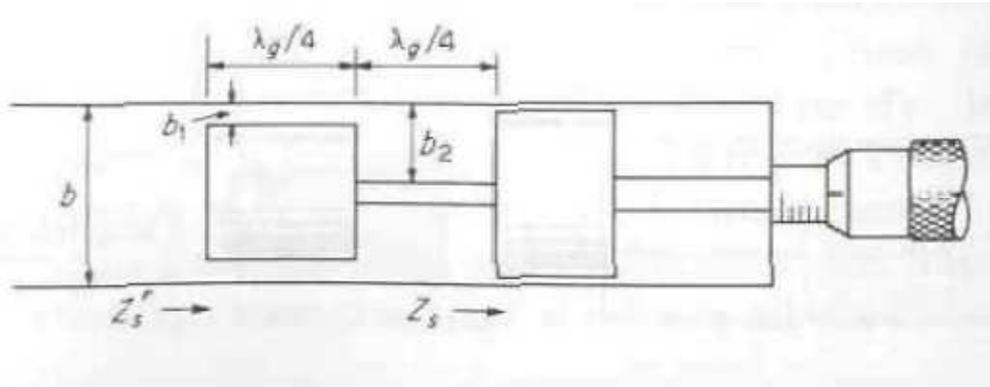


Figura 10. Esquemático de um Curto Sintonizável do tipo *Choke* [3].

Podemos compreender o princípio do transformador de quarto de onda visualizando o circuito da Fig. 11. Considere que  $Z_s$  é aproximadamente zero, e a impedância  $Z_s'$  vista da entrada é dada por [3]:

$$Z_s' = \left( \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 Z_s,$$

(3)

onde:

- $Z_s'$  denota a impedância vista da entrada;
- $Z_s$  denota a impedância de curto circuito;
- $Z_1$  denota a impedância da primeira seção de comprimento  $\lambda/4$ ;
- $Z_2$  denota a impedância da segunda seção de comprimento  $\lambda/4$ .

Se  $Z_2$  for escolhido muito maior do que  $Z_1$ , a nova impedância  $Z_s'$  irá se aproximar de um curto circuito pelo fator  $(Z_1/Z_2)^2$  melhor do que  $Z_s$ .

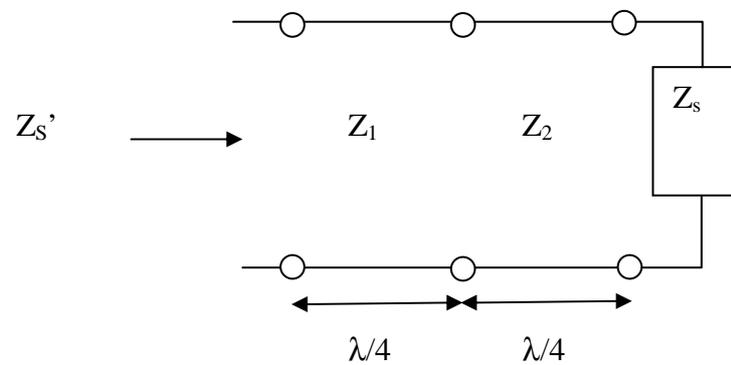


Figura 11. Transformador de quarto de onda com duas seções.

- Operação.

Monta-se o Curto Sintonizável como terminação no guia de onda. A operação consiste em alterar-se a distância do êmbolo metálico, girando-se o eixo móvel.

Para cada revolução no seu eixo, move-se o equivalente a somente 0,5 mm na posição do êmbolo. Para mover-se 1 mm gira-se um total de 2 voltas.

### 2.1.6 AJUSTADOR DE REFLEXÕES (*SLIDING SCREW TUNER*)

- Função.

O Ajustador de Reflexões pode ser utilizado para inserir um pino metálico no guia de onda de uma maneira controlada. Isto permite o ajuste da quantidade e posição do desacordo de impedâncias no guia de onda e deste modo variar o SWR devido ao pino. O Ajustador de Reflexões serve também para operações de casamento de impedâncias.

- Descrição.

O Ajustador de Reflexões é mostrado na Fig. 12. Possui uma fenda longitudinal na qual é inserido um pino metálico. Por esta mesma fenda é possível variar a distância do pino ao longo do guia de onda.

O Ajustador de Reflexões possui uma régua graduada que vai da posição zero (no máximo à esquerda) até 60 mm (no máximo à direita). Por limitantes construtivos a posição da sonda varia de 5 mm até 60 mm. O Ajustador de Reflexões também possui um eixo móvel para alterar da profundidade do pino, o qual varia desde zero até 14 mm. Novamente cada revolução completa do eixo varia apenas 0,5 mm na profundidade do pino. Com o eixo na graduação 10 mm, o pino está no plano superior do guia, mas não há nenhuma penetração. Para a posição 9 mm, o pino já está com 1 mm para dentro do guia de onda, e assim sucessivamente.

A posição vertical do pino metálico controla a amplitude e a posição horizontal a fase do fator de reflexão da onda eletromagnética.



Figura 12. Ajustador de Reflexões.

- Operação.

Pode-se ajustar tanto a profundidade de penetração do pino bem como a distância ao longo do guia. O eixo móvel superior serve para alterar a profundidade de penetração e varia desde 10 mm (não há pino dentro do guia de onda) até 0 mm (pino com profundidade máxima). O botão frontal serve para mover o pino ao longo do guia para esquerda ou para a direita.

### 2.1.7 Carga Casada (*Matched Load*)

- Função.

Terminação do tipo carga casada é por definição uma carga em que o coeficiente de reflexão é nulo e portanto não há reflexão de onda eletromagnética.

O coeficiente de reflexão é definido por [1]:

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i},$$

(4)

onde:

- $\Gamma$  denota o coeficiente de reflexão;
- $E_r$  denota o campo elétrico refletido;
- $E_i$  denota o campo elétrico incidente.

- Descrição.

A carga casada é basicamente um trecho de guia de onda retangular utilizado como terminação. O componente utilizado é mostrado na Fig. 13.

A carga casada absorve a energia sem provocar reflexões através de uma placa recoberta com grafite. A onda incidente induz corrente na sua superfície de grafite,

provocando dissipação de energia pelo Efeito Joule. A placa possui aproximadamente 1,0 mm de espessura e é posicionada ao longo do eixo longitudinal da carga casada, como é mostrado no esquemático da Fig. 14.



Figura 13. Carga Casada.

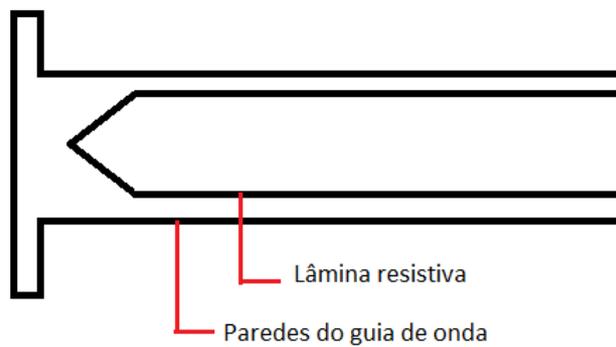


Figura 14. Corte longitudinal da carga casada.

- Operação.

Este componente é conectado como último elemento no final dos circuitos montados.

### 2.1.8 Guia de Onda Reto (*Straight Waveguide*)

- Função.

O Guia de Onda Reto serve como elemento para facilitar a conexão física entre o Guia Fendido e outros componentes no circuito de micro-ondas. Sendo um guia de onda, tem a função de transmissão da onda eletromagnética com baixas perdas.

- Descrição.

O trecho de guia de onda utilizado pode ser visto na Fig. 15.



Figura 15. Guia de Onda Reto.

- Operação.

É um elemento que facilita a montagem e interligação de outros componentes.

### 2.1.9 Detector a Cristal (*Crystal Detector*)

- Função.

É utilizado para detecção de sinais na frequência de micro-ondas.

- Descrição.

O Detector a Cristal é utilizado no final do guia de onda para medição da onda eletromagnética. O Detector a Cristal possui um conector BNC fêmea no qual um cabo coaxial pode ser conectado a outro instrumento como um osciloscópio ou o instrumento Indicador Detector de Onda. O Detector a Cristal possui também um eixo móvel em que se pode alterar a posição de uma placa metálica. Com isso altera-se a amplitude da onda eletromagnética medida. O Detector a Cristal utilizado nos experimentos é mostrado na Fig. 16.



Figura 16. Detector a Cristal.

- Operação.

A operação consiste na conexão deste componente no circuito e posterior interligação com um cabo coaxial. A placa metálica móvel não deve ser alterada dentro de uma mesma experiência para não influenciar nos resultados.

### 2.1.10 Circulador (*Circulator*)

- Função.

Um Circulador é um dispositivo com múltiplas portas que tem a propriedade de que uma onda incidente na porta 1 é acoplada somente para a porta 2, e uma onda incidente na porta 2 é acoplada somente para a porta 3 e assim por diante. Um circulador perfeito é definido como sem perdas, casado (*matched*) e não-recíproco (significando que seu comportamento em uma direção é muito diferente daquela na outra direção). Assim, num circulador perfeito existe transmissão perfeita da porta 1 para porta 2, da porta 2 para 3 e da porta 3 para porta 1. Em qualquer outra direção a transmissão é nula [3].

Podem-se citar exemplos de uso de circuladores para separar as portas de entrada e saída de amplificadores com resistência negativa. Circuladores também são usados para acoplar um transmissor e um receptor para uma antena em comum [3].

- Descrição.

O Circulador utilizado é mostrado na Fig. 17. É um elemento passivo de micro-ondas e possui 3 portas. O circulador utilizado possuiu formato “T” e direção horária para transferência de potência. A etiqueta na parte superior do circulador indica a ordem de transferência de potência entre suas portas.

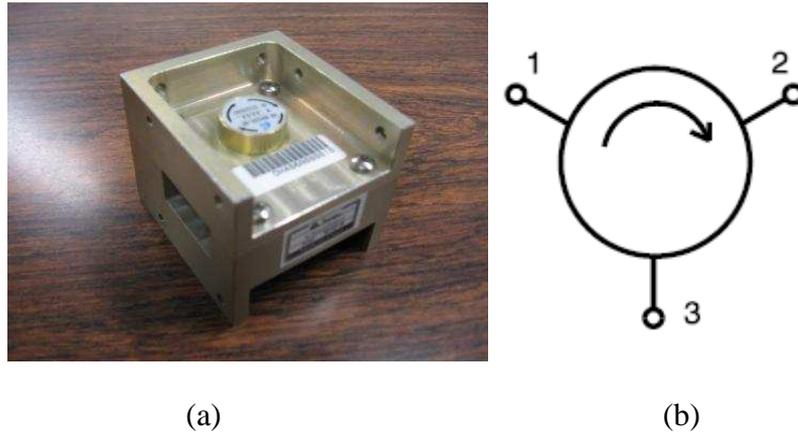


Figura 17. Circulador (a) e símbolo elétrico do circulador (b).

Para a descrição de componentes na frequência de micro-ondas utiliza-se muitas vezes a matriz espalhamento [S]. É uma matriz que descreve as relações lineares entre a onda incidente e as ondas refletidas ou espalhadas.

Para um circuito arbitrário de “N” portas, como mostrado na Fig. 18, se observa que [3]:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \dots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{N1} & S_{N2} & S_{N3} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \dots \\ V_N^+ \end{bmatrix}, \quad (5)$$

onde:

- $V_N^-$  denota a onda refletida na porta N;
- $V_N^+$  denota a onda incidente na porta N;
- $S_{NN}$ , são os termos da diagonal principal, denotam o coeficiente de reflexão da porta N;
- Os demais termos representam os coeficientes de transmissão:  $S_{N1}$  é, por exemplo, o coeficiente de transmissão na porta N pela onda incidente na porta 1.

A matriz com os elementos “S” é chamada matriz espalhamento.

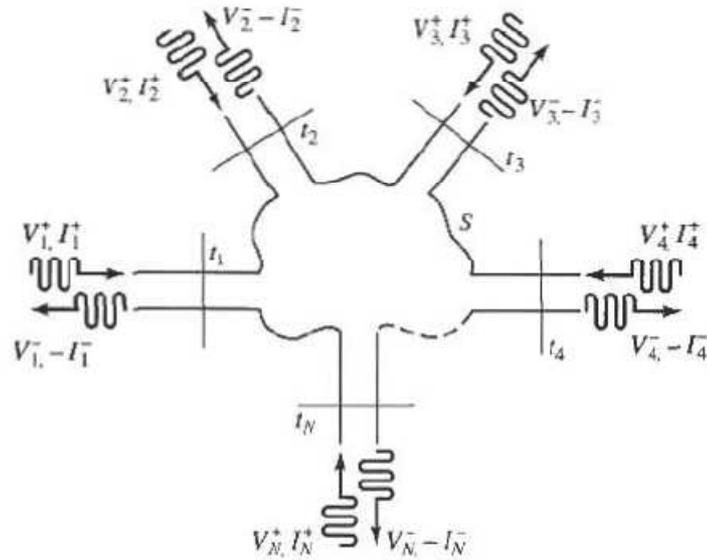


Figura 18. Circuito de micro-ondas arbitrário de "N" portas.

Para uma junção de três portas perfeitamente casada, temos uma matriz espalhamento da forma [3]:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para uma junção de três portas, como é o caso do circulator utilizado, considerando sem perdas, casado e não-recíproco, a matriz espalhamento é definida como [3]:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} \\ S_{21} & 0 & 0 \\ 0 & S_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Esta matriz espalhamento demonstra a função do circulator que é permitir a transmissão de potência da onda em uma determinada direção, neste caso da porta 3 para a porta 1 (parâmetro  $S_{13}$ ), da porta 1 para a porta 2 ( $S_{21}$ ) e da porta 2 para a porta 3 ( $S_{32}$ ).

O funcionamento de circuladores e isoladores é baseado nas propriedades dos ferrites. Ferrites são materiais magnéticos que possuem alta resistência elétrica. O Circulador utilizado possui em seu centro lâminas de ferrite em formato triangular. Um esquemático do corte horizontal do circulador na Fig. 19 ajuda a exemplificar o posicionamento do ferrite na parte interna do componente.

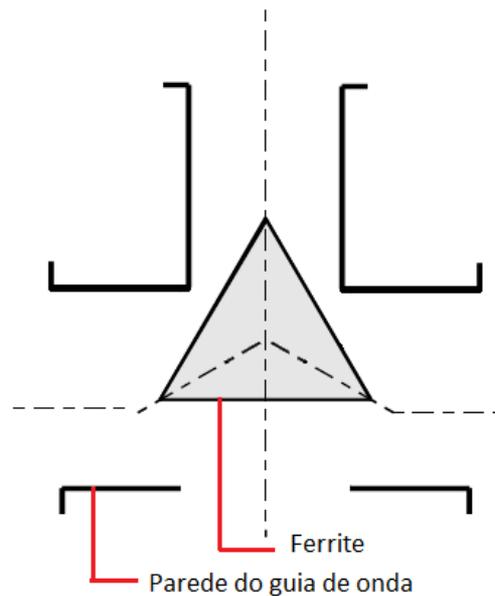


Figura 19. Corte horizontal do Circulador.

- Operação.

Para uma operação correta deve-se apenas observar no momento da montagem a direção do fluxo de potência, através da etiqueta do componente.

### 2.1.11 Cavity Ressonante (*Cavity Resonator*)

- Função.

Uma Cavity Ressonante tem a função de confinar a onda eletromagnética dentro de sua estrutura, através da reflexão da onda em suas paredes metálicas. Função similar já descrita para o componente Medidor de Onda, descrito na Subseção 2.1.3.

- Descrição.

É um trecho de guia de onda retangular que é terminado com paredes metálicas, fazendo com que a onda seja totalmente refletida.

Possui na sua etiqueta lateral a informação de que a frequência de ressonância é de 9,26 GHz.

Possui um pequeno furo de 1,0 mm de diâmetro na qual pode ser inserido um pino de material dielétrico. A Cavidade Ressonante utilizada pode ser vista na Fig. 20.



Figura 20. Cavidade Ressonante.

- Operação.

Conforme descrito nos experimentos, a Cavidade Ressonante pode ser conectada a uma das portas do Circulador ou após o Guia Fendido, por exemplo. Na experiência de determinação do fator de qualidade, no Cap. 8, pinos de material dielétrico são inseridos dentro do guia de onda, através do pequeno furo em suas paredes.

### 2.1.12 Adaptador Guia de Onda a Coaxial (*Waveguide to Coaxial Adaptor*)

- Função.

O Adaptador Guia de Onda para Cabo Coaxial é um elemento de ligação, utilizado tanto no início do circuito como no final do guia de onda. No início do guia, age recebendo o cabo coaxial vindo da fonte de sinal de micro-ondas e por sua vez irradiando a onda eletromagnética para dentro do guia de onda. No final do circuito, atua conectando-se a um cabo coaxial e transmitindo a onda eletromagnética para o instrumento Medidor de Potência, por exemplo. Em ambos os casos, o pino metálico central do adaptador age como uma antena, ora transmitindo ora recebendo a onda eletromagnética.

- Descrição.

Possui uma conexão do tipo rosca na sua parte superior para conexão de cabo coaxial. O pino central do cabo coaxial entra em contato com o pino metálico fixo que segue até a parte interna do guia de onda. O adaptador utilizado e um esquemático do acoplamento da sonda é mostrado na Fig. 21.

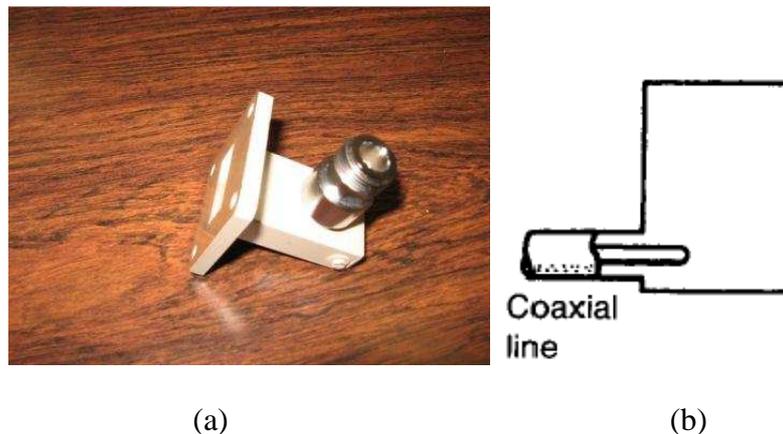


Figura 21. Adaptador Guia de Onda para Cabo Coaxial (a) e esquemático mostrando a sonda (b).

- Operação.

É somente um elemento de interligação. O cabo coaxial da fonte de sinal de micro-ondas ou a sonda do Medidor de Potência devem ser fixados de maneira adequada para transmissão ou absorção da onda eletromagnética.

### **2.1.13 Lâmina Acopladora e Placa de curto-circuito**

- Função.

A Lâmina Acopladora também é conhecida no termo inglês *waveguide iris*. Este componente é colocado na seção do guia de onda para produzir uma ressonância para o circuito [2].

A Placa de curto-circuito é utilizada para reflexão total da onda eletromagnética.

- Descrição.

A Lâmina Acopladora pode ser vista na Fig. 22 no lado esquerdo. É uma placa metálica de cobre com um furo no centro. A Lâmina Acopladora é um tipo de descontinuidade de guia de onda. O circuito equivalente da Lâmina Acopladora é mostrado na Fig. 23, que é representado por um indutor e um capacitor em paralelo [2].

A Placa de curto-circuito é uma placa de cobre fechada e aparece na Fig. 22 no lado direito.



Figura 22. Lâmina Acopladora (na esquerda) e Placa de curto-circuito (na direita).

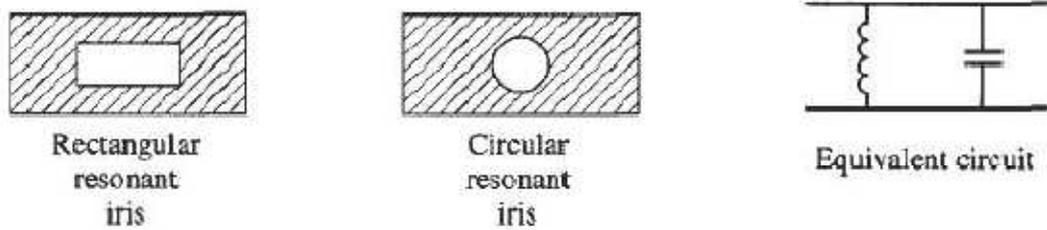


Figura 23. Circuito equivalente para a Lâmina Acopladora [2].

- Operação.

A Lâmina Acopladora será utilizada na entrada da Cavidade Ressonante para determinação do fator de qualidade da cavidade. A Placa de curto-circuito é conectada ao circuito para causar reflexão total da onda, gerando uma onda estacionária no guia de onda.

#### 2.1.14 Dielétricos (baquelite, vidro orgânico e politetrafluoretileno)

- Função.

Serão utilizados no experimento descrito no Cap. 8, para alteração da característica do meio de propagação da onda eletromagnética na Cavidade Ressonante.

- Descrição.

São pequenas amostras de dielétricos com aproximadamente 1,8 cm de comprimento e 1 mm de diâmetro. O kit didático fornece no mínimo três amostras de cada tipo. São peças bastante frágeis, por isso temos que tomar cuidado ao manuseá-las. Os três tipos de dielétricos fornecidos podem ser vistos na Fig. 24. Cada tipo possui uma cor diferente para que se possa identificar: o dielétrico branco é o politetrafluoretileno (conhecido comercialmente como Teflon), o dielétrico cinza ou transparente é o vidro orgânico e o dielétrico na cor marrom é baquelite. Os dielétricos podem ser caracterizados em função do valor de sua constante dielétrica ou permissividade relativa  $\epsilon_r$ , que é a razão entre a permissividade do dielétrico e a do espaço livre ( $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  farads/metro). Alguns valores típicos de  $\epsilon_r$  para os dielétricos utilizados são:

- $\epsilon_r = 5$  para o baquelite [1];
- $\epsilon_r$  entre 5 e 10 para o vidro [1];
- $\epsilon_r = 2,08$  para o politetrafluoretileno [2].

Deve-se observar que estes valores podem se alterar quando o material é submetido a campos elétricos de altas frequências.



Figura 24. Amostras de dielétricos.

- Operação.

Os pinos de dielétricos são inseridos no furo da Cavidade Ressonante para alteração das características do meio de propagação da onda. Originalmente a Cavidade Ressonante possui apenas ar como dielétrico.

### 2.1.15 T Mágico (*Magic T*)

- Função.

Pode ser utilizado como divisor ou combinador de potência. Idealmente é um componente sem perdas, onde toda a potência que entra em uma porta sai pelas demais portas.

- Descrição.

É uma junção híbrida de  $180^\circ$  e possui quatro portas. O T Mágico que compõe o kit educacional é mostrado na Fig. 25. Uma junção híbrida é um caso específico de um acoplador direcional (explicado no item 2.1.16) onde o fator de acoplamento é 3 dB (divisão iguais de potência) e a relação de fase das portas é  $90^\circ$  (para híbridos em quadratura) ou  $180^\circ$  (para o caso do T mágico).

Na Fig. 26 vemos uma convenção para as portas do T Mágico utilizado em [2]. A porta 1 possui o símbolo  $\Sigma$  e é denominada porta soma, pois um sinal incidente na porta 2 e porta 3 são somados na porta 1. Da mesma forma, um sinal incidente na porta 1 igualmente se divide entre as portas 2 e 3 e o sinal resultante está em fase. Neste caso específico, a porta 4 está isolada.

A porta 4 possui o símbolo  $\Delta$ , denominada porta delta ou porta diferença. Um sinal incidente na porta 4 se divide igualmente entre as portas 2 e 3, mas os sinais resultantes estão 180 graus fora de fase. Neste caso descrito, a porta 1 está isolada [2].

A matriz espalhamento para uma junção de 180° híbrida, ideal e de 3 dB entre suas portas, tem a seguinte forma [2]:

$$[S] = -\frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

(8)

No caso do T mágico que acompanha o kit didático, não há indicação de quais portas são a porta soma e porta diferença. Deverá ser realizada uma experiência este componente para definir a função de cada porta.

- Operação.

Este componente é usado em guias de onda como misturador balanceado ou em circuitos de ponte.

Devem-se conhecer as portas 1 e 4 para um correto funcionamento, pois nem sempre os fabricantes observam o padrão teórico da Fig. 26 para a construção do dispositivo.



Figura 25. T Mágico.

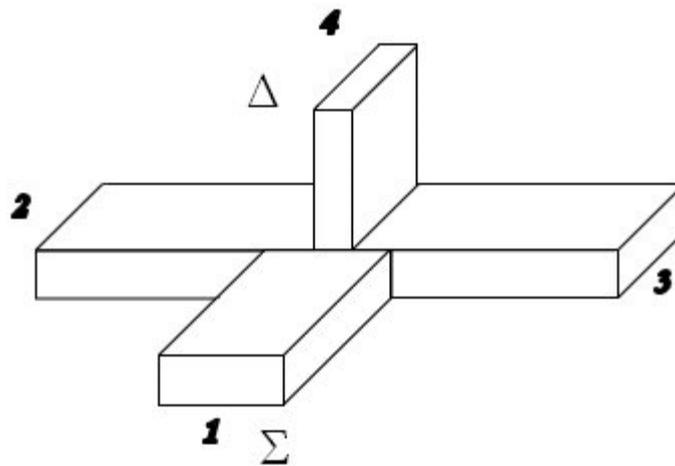


Figura 26. Esquemático de uma junção híbrida de guia de onda, ou T mágico.

#### 2.1.16 Acopladores Direcionais (*Directional Couplers*)

- Função.

Acopladores Direcionais são largamente utilizados em pontes de impedância para medidas de micro-ondas e para monitoração de potência [3].

- Descrição.

Um Acoplador Direcional é uma junção de quatro portas. As Figs. 27, 28 e 29 mostram três tipos diferentes de Acopladores Direcionais que compõem o kit. A Fig. 30 mostra um esquemático de um Acoplador Direcional.



Figura 27. Acoplador Direcional de Multifuro - 10 dB (*Multi-Hole Directional Coupler – 10 dB*).



Figura 28. Acoplador Direcional de Guia Cruzado (*Cross Guide Directional Coupler*).



Figura 29. Acoplador Direcional de Multifuro (*Multo-Hole Directional Coupler*).

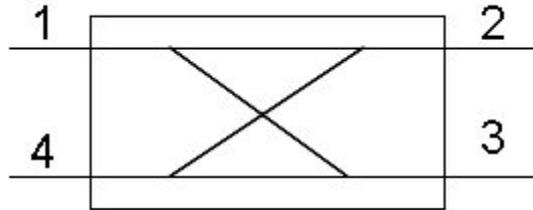


Figura 30. Símbolo de um Acoplador Direcional com quatro portas.

Um Acoplador Direcional ideal tem a propriedade de que a onda incidente na porta 1 transmite potência para as portas 2 e 3, mas não para a porta 4. De maneira similar, potência incidente na porta 4 transmite potência nas portas 2 e 3 mas não na porta 1. Deste modo as portas 1 e 4 estão desacopladas. Para uma onda incidente nas portas 2 ou 3, a potência é transmitida para as portas 1 e 4 apenas, desta forma as portas 2 e 3 estão desacopladas. Além disso, as quatro portas estão casadas, ou seja, se três portas estão terminadas com cargas casadas, a quarta porta aparenta estar terminada também com uma carga casada e uma onda incidente nesta porta não sofre reflexão [3].

Um Acoplador Direcional é especificado muitas vezes pelo valor do seu acoplamento em dB. Ou seja, se o acoplador possui um acoplamento de 3 dB, a potência incidente na porta é igualmente dividida entre as portas 3 e 4.

Acopladores Direcionais usando guias de onda consistem de dois guias de onda com aberturas de acoplamento localizados numa parede comum. Isto está ilustrado na Fig. 31, onde  $P_i$  denota a potência incidente (*incident*),  $P_f$  denota a potência acoplada (*forward*),  $P_t$  denota a potência direta (*through*) e  $P_b$  denota a potência inversa (*backward*) [3].

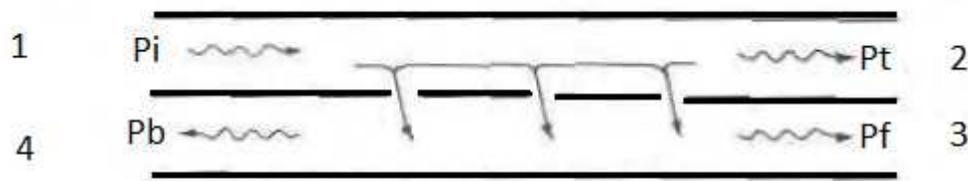


Figura 31. Esquemático de um Acoplador Direcional com guias de onda.

O desempenho de um Acoplador Direcional é medido por dois parâmetros, o acoplamento e a diretividade.

O Acoplamento em decibel é dado por [3]:

$$C = 10 \log \frac{P_i}{P_f}, \quad (9)$$

onde:

- C denota o acoplamento em dB;
- $P_i$  denota a potência incidente na porta 1;
- $P_f$  denota a potência de acoplamento (forward) na porta 3.

Os Acopladores Direcionais de Multifuro possuem acoplamento de 10 dB. O Acoplador Direcional de Guia Cruzado possui acoplamento de 20 dB.

A diretividade é definida como [3]:

$$D = 10 \log \frac{P_f}{P_b}, \quad (10)$$

onde:

- D denota a diretividade em decibel;
- $P_f$  denota a potência de acoplamento (forward) na porta 3;
- $P_b$  denota a potência inversa (backward) na porta 4.

A diretividade é a medida de quão bem a potência pode ser acoplada na direção desejada no segundo guia de onda.

- Operação.

Neste trabalho não foram realizadas experiências para medição de Acoplamento nem Diretividade nos Acopladores Direcionais do kit técnico.

Contudo, pode-se citar um exemplo de medida de acoplamento, no qual basta conectar uma carga casada na porta 2 (*through*) e medir a potência na porta acoplada (*forward*). Aplica-se então a Eq. 9 para descobrir C (acoplamento). Neste exemplo, é necessário conhecer a potência incidente na porta 1.

## 2.2 DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Nesta seção serão descritos os quatro instrumentos que compõem o kit técnico: o instrumento Indicador Detector de Onda, o Amplificador Seletivo, a Fonte de Sinal de Micro-ondas e o Medidor de Potência.

### 2.2.1 INDICADOR DETECTOR DE ONDA (*WAVE DETECTOR INDICATOR*)

- Função.

Tem como função principal a detecção de uma onda eletromagnética no guia de onda.

- Descrição.

O instrumento Indicador Detector é mostrado na Fig. 32. É um instrumento que não precisa ser energizado. Possui escala de leitura de 0  $\mu\text{A}$  até 100  $\mu\text{A}$  e somente um botão de sensibilidade. O cabo coaxial é conectado na estrutura do guia de onda através do Detector a

Cristal, que age como uma antena absorvendo parte do sinal (vide Subseção 2.1.9). O cabo coaxial por sua vez possui um diodo que retifica o sinal RF absorvido e gera uma tensão DC num resistor. A tensão gerada é em nível DC devido as capacitâncias do cabo coaxial. O circuito simplificado do instrumento Indicador Detector de Onda é mostrado na Fig. 33, onde R representa um resistor e C representa um capacitor. O botão chamado sensibilidade é na verdade um potenciômetro através do qual se pode ajustar a corrente na escala de  $\mu\text{A}$  (microampere) que lemos no instrumento.



Figura 32. Indicador Detector de Onda.

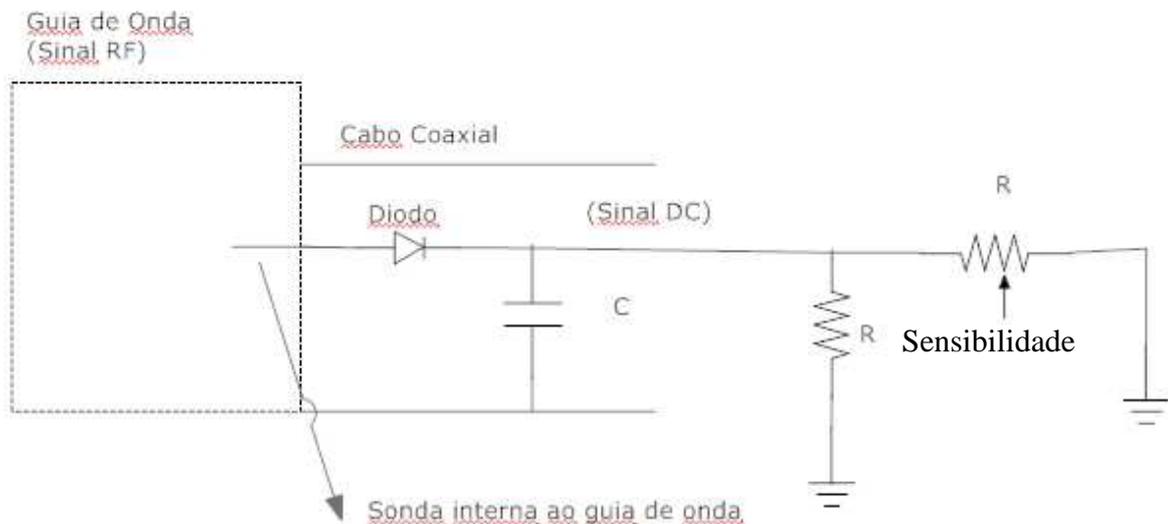


Figura 33. Circuito simplificado do instrumento Indicador Detector.

- Operação.

A operação consiste basicamente da conexão do cabo coaxial do instrumento Indicador Detector no guia de onda. Gira-se o botão de sensibilidade para obter-se a leitura da corrente no valor desejado.

### 2.2.2 Amplificador Seletivo (*Selective Amplifier*)

- Função.

Este instrumento é utilizado para amplificar pequenos sinais AC. A utilização deste instrumento juntamente com o Guia Fendido (vide Subseção 2.2.1), permite a medição da taxa de onda estacionária, conforme descrito no Cap. 7.

- Descrição.

É um instrumento com diversos botões e chaves seletoras todas posicionadas no seu painel frontal, como é mostrado na Fig. 34.



Figura 34. Amplificador Seletivo.

Possui um painel com um ponteiro analógico que indica valores de tensão elétrica relativa em Volts. A escala para medições da tensão vai de 0 até 100 com um total de 100 divisões. Quando usado para medir VSWR, o valor máximo é 1 na direita, e na esquerda o valor indicado é infinito.

Possui além do encaixe para entrada do cabo coaxial (denominado “Input” no instrumento) e da entrada para aterramento, os seguintes botões: “Power”, “Zero Adj.”, “Input Voltage”, “Frequency” e “Gain”. Também existem as seguintes chaves seletoras: “Attenuation”, “Bandwidth” e “Range”.

O botão “Power” serve para ligar e desligar o instrumento. Os componentes do instrumento necessitam 15 minutos após o *power-on* para estabilidade térmica [10].

O botão “Zero Adj.” serve para zerar a leitura do instrumento quando nenhum sinal está presente após o *power-on*.

Existem três ajustes neste instrumento: ajuste de tensão de entrada, ajuste da seleção da frequência e ajuste do ganho.

Para ajuste da tensão de entrada utiliza-se a chave seletora “Attenuation” e o ajuste fino no botão “Input Voltage”. A chave seletora de atenuação pode ser selecionada como um múltiplo do sinal de entrada: x1, x10, x100 e x1000. A sensibilidade é maior com o botão selecionado em x1 e não há atenuação do sinal. Quando em x10, x100 e x1000, o sinal de entrada é atenuado 10 vezes, 100 vezes e 1000 vezes, respectivamente. O ajuste fino através do botão “Input Voltage” faz a tensão ser atenuada desde x1 (máximo giro anti-horário) até x10 (máximo giro horário) dentro da escala selecionada.

Para ajuste da faixa de frequência utilizam-se o botão para ajuste fino “Frequency” e a chave seletora “Bandwidth”. A chave seletora permite somente uma de quatro opções (com unidade de kHz) [10]:

- “Wideband”: para frequências desde 400 Hz até 10 kHz;
- “1”: para frequências desde 500 Hz até 1100 Hz;
- “2”: para frequências desde 900 Hz até 2,2 kHz;
- “5”: para frequências desde 1,8 kHz até 5,2 kHz;

Com a chave na posição “Wideband” não se pode utilizar o ajuste fino através do botão “Frequency”.

Como será descrito no procedimento experimental no Cap. 6, o sinal da fonte de sinal de micro-ondas será modulado por uma onda quadrada de 1,0 kHz de frequência (botão “Square” da fonte de sinal). Por isso na chave seletora “Bandwidth” se seleciona a opção “1” para permitir uma maior sensibilidade e após gira-se o botão “Frequency” para selecionar uma amplitude da tensão máxima dentro da escala. A modulação do sinal (independente se realizada em 1 kHz, 2 kHz, etc.) é importante pois na detecção do Amplificador Seletivo é eliminado o ruído.

Para ajuste do Ganho de tensão utiliza-se o botão “Gain” para ajuste fino e a chave seletora “Range”. A chave seletora permite os seguintes valores x10, x1 e x0.1, indicando que a tensão de entrada será multiplicada respectivamente por 10 vezes, 1 vez e 0,1 vez.

Algumas especificações adicionais do Amplificador Seletivo [10]:

- Faixa de frequências: 400 Hz até 10 kHz.
- Amplitude do sinal de tensão de entrada: 2  $\mu$ V até 2 V.
- Impedância de entrada: 2 k $\Omega$  (para frequência de 1,0 kHz).
- Operação.

O Amplificador Seletivo é um instrumento utilizado nos Experimentos 4 e 5. Foi explicado logo acima o porquê da chave seletora de frequência ficar na opção “1”. O ajuste de “Gain” e “Input Voltage” é necessário para medir valores máximos e os valores mínimos de tensão, conforme descrito nos procedimentos experimentais.

### **2.2.3 Fonte de Sinal de Micro-ondas (*Microwave Signal Source*)**

- Função.

É o instrumento que fornece a onda eletromagnética na frequência de micro-ondas necessária para a realização dos experimentos práticos.

- Descrição.

Pode-se considerar o instrumento mais importante, pois fornece a onda eletromagnética para a realização dos experimentos. A fonte de sinal utilizada pode ser vista na Fig. 35.



Figura 35. Fonte de Sinal de Micro-ondas.

A fonte de sinal da Fig. 35 possui os seguintes blocos construtivos: circuito oscilador, atenuador, modulador, um circuito de potência e o circuito da fonte de alimentação. Além disso, este instrumento possui na sua parte frontal:

- Três displays com 4 casas que indicam: medida de frequência (valores em GHz), tensão (Volts) e corrente (Miliampères);
- As seguintes chaves seletoras: “Sweep”, “Continuous”, “Square”, “+ Ext Mode”, “- Ext Mode” e “Teaching”;

- Os seguintes botões: “Power”, “Frequency”, “Sweep Width”, “RF Level”, “Voltage”;
- E três conexões: “RF Output”, “Scan Output” e “Ext Input”.

Na parte traseira existem as conexões de alimentação, seleção de tensão elétrica da fonte de alimentação e aterramento.

Na conexão “RF Output” conecta-se o cabo coaxial especial que acompanha o equipamento e este por sua vez conecta-se ao adaptador para guia de onda. É esta conexão que fornece a saída da onda eletromagnética que será utilizada no circuito.

A conexão “Scan Output” serve para exportar o sinal para ser utilizado como varredura horizontal no osciloscópio.

A última conexão “Ext Input” é utilizada para modular o sinal de micro-ondas através de um sinal externo. Utilizam-se também as chaves seletoras “+ Ext Mode” e “- Ext Mode” para indicar a polaridade da onda que está modulando.

A fonte de sinal de micro-ondas fornece uma onda contínua na saída quando a chave seletora “Continuous” está acionada. Utiliza-se neste caso o botão “Frequency” para ajustar o valor da frequência do sinal, que varia no instrumento de 8542 MHz até o valor máximo de 9655 MHz, numa diferença total de 1113 MHz ou 1,11 GHz. Neste modo de operação os displays da tensão e da corrente indicam os valores sobre o diodo Gunn (as características do diodo são medidas no Experimento 3) do circuito oscilador da fonte. Neste modo de operação, o display de tensão indica  $12 \pm 0,5$  volts e o display de corrente indica normalmente uma corrente menor do que 500 mA.

Um outro modo de operação da fonte de sinal é quando a chave seletora está com o botão “Teaching” acionado. Neste caso o display “Frequency” fica desligado e se pode controlar diretamente a tensão e a corrente do diodo Gunn, através do botão “Voltage”. Com

o botão “Teaching” acionado, a onda de saída admite saída contínua (botão “Continuous” acionado) ou modulada por uma onda quadrada (botão “Square” acionado).

Quando a chave seletora “Sweep” está ativada (posição “On”), a fonte de sinal se comporta como uma fonte de varredura, ou seja, ao invés de injetar apenas um sinal numa determinada frequência, a fonte injeta a onda eletromagnética variando em toda a frequência de funcionamento do equipamento, ou seja, variando de 8,6 até 9,6 GHz. O botão “Sweep Width” controla o tamanho da largura do pulso de varredura.

O botão “RF Output” serve para controlar a potência de saída do sinal. Normalmente utiliza-se o valor máximo de potência nos experimentos.

A seguir, um resumo das principais características técnicas do instrumento [12]:

- Limites de frequência: 8,6 GHz até 9,6 GHz;
- Erro no display de frequência:  $\pm 40$  MHz;
- Potência de saída maior do que 20 mW;
- Para chave seletora na posição “Square”, produz onda quadrada com frequência de 1 kHz, precisão de  $\pm 15$  % e assimetria de  $\pm 20$  %;
- Utilizando modulação externa: amplitude máxima de 5 V até 40 V pico a pico e frequência de 300 Hz até 3 kHz;
- Porta “RF Output” como cabo coaxial modelo N e 50  $\Omega$ .

Assim como os demais instrumentos que compõe o kit, a fonte de sinal necessita um tempo para estabilização térmica, que é cerca de 30 minutos.

- Operação.

O modo de operação e ajuste da fonte é descrito detalhadamente nos procedimentos práticos de cada Experimento.

#### 2.2.4 Medidor de Potência (*Microwave Power Meter*)

- Função.

O Medidor de Potência se utiliza de um termoacoplador ou termopar para uma medida direta de potência, conforme será descrito no Cap. 4 deste trabalho.

- Descrição.

O termoacoplador ou termopar funciona através do efeito *Seebeck*, ou seja, quando dois fios de materiais diferentes são conectados a um circuito e existe uma diferença de temperatura entre as junções, então um voltímetro detecta uma força eletromotriz entre estas junções. A magnitude desta tensão depende dos materiais utilizados e da diferença de temperatura.

Este instrumento é capaz de medir potências desde 100  $\mu\text{W}$  até 100 mW [14]. Potências acima de 150 mW podem danificar o aparelho, portanto deve-se observar este valor durante os experimentos. Possui dois botões para mudança da escala de medida denominados 20 mW e 100 mW, como é mostrado na Fig. 36 e no esquemático da Fig. 37. A frequência de trabalho do instrumento é de 8,6 GHz até 9,6 GHz, a mesma faixa de frequência da fonte de sinal utilizada.

Os materiais utilizados para o termoacoplador são Bismuto e Antimônio.

Pode-se utilizar o aparelho após 5 minutos depois de ligá-lo e para medidas mais precisas deve-se aguardar 30 minutos de aquecimento [14].

O medidor indica a potência somente na escala de mW (mili-Watt) e não em dBm.



Figura 36. Medidor de Potência.

- Operação.

A operação do Medidor de Potência é descrita em detalhes no Cap. 4. Este instrumento é conectado ao final do guia de onda para medição da potência. Utiliza-se o botão “Zero Adj.” para que o instrumento indique o valor zero na ausência de qualquer sinal externo. Deve-se alterar a chave seletora de potência para obtermos uma medida mais precisa.

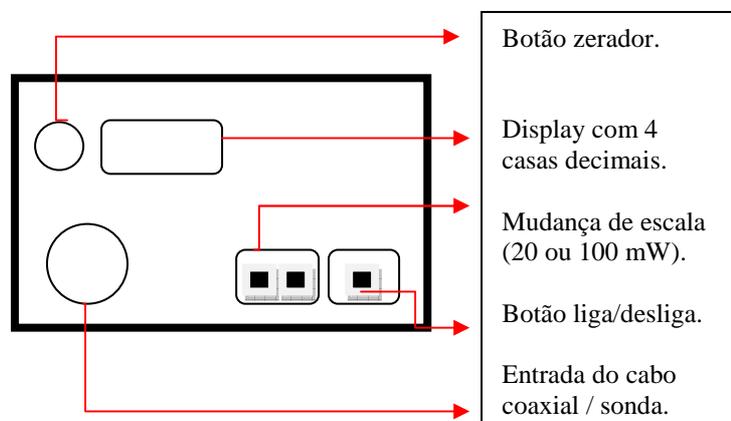


Figura 37. Esquemático do Medidor de Potência.

### 3 EXPERIMENTO 1 – MEDIDA DE FREQUÊNCIA DE MICRO-ONDAS

#### 3.1 OBJETIVO DA EXPERIÊNCIA

O objetivo desta experiência é obter a frequência da onda eletromagnética no guia de onda através do componente denominado Medidor de Onda. Este componente descrito na Subseção 2.1.3, é uma cavidade cilíndrica sintonizável que é normalmente utilizada para este tipo de medição [2, 3].

Esta experiência também tem como objetivo obter a familiarização com os componentes e instrumentos do kit técnico da Minipa.

#### 3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Descreve-se abaixo o fenômeno da ressonância bem como as características de uma cavidade cilíndrica.

Circuitos ressonantes são utilizados em uma variedade de aplicações, incluindo filtros, osciladores, medidores de frequência e amplificadores sintonizáveis, desde frequência de poucos Hertz até frequências ópticas [3].

A referência [3] apresenta um paralelo entre um circuito RLC e o teorema de Poynting. A impedância de um circuito RLC série é dada por:

$$Z = \frac{P_l + 2j\omega(W_m - W_e)}{\frac{1}{2}(I)(I^*)},$$

(11)

onde:

- $P_l$  denota a perda de potência no resistor (*power loss*);
- $W_m$  denota a energia do campo magnético associado ao indutor;

- $W_e$  denota a energia do campo elétrico associado ao capacitor;
- $I$  denota a corrente e  $I^*$  denota o conjugado da corrente. O termo do denominador serve como fator de normalização, tornando  $Z$  independente da magnitude da corrente de entrada do circuito.

A Eq. 11 fornece uma definição geral da impedância de um circuito RLC Série em termos das perdas de potência associadas e energia reativa armazenada. Quando ocorre ressonância a impedância é puramente real e igual a  $R$ , isto implica que a energia média armazenada no campo magnético é igual a energia média armazenada no campo elétrico. Portanto ressonância sempre ocorre quando:

$$W_m = W_e . \tag{12}$$

O teorema de Poynting estabelece que: “a potência líquida que flui para fora de um volume  $V$  é igual à taxa temporal de decréscimo da energia armazenada no volume  $V$  menos as perdas por condução” [1]. Tanto as equações para o circuito RLC série e o Teorema de Poynting tem uma base comum que é o balanço de energia.

O Teorema de Poynting é dado por [1, 3]:

$$\oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \left[ \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right] dv - \int_V \sigma E^2 dv , \tag{13}$$

onde:

- $\mathbf{E}$  denota o vetor campo elétrico em V/m;
- $\mathbf{H}$  denota o vetor intensidade de campo magnético em A/m;
- $\epsilon$  denota permissividade elétrica em F/m;
- $\mu$  denota permeabilidade magnética em H/m.

O lado esquerdo da Eq. 13 estabelece a potência total que deixa o volume, o primeiro termo após a igualdade é a taxa de decréscimo da energia armazenada nos campos elétrico e magnético e o último termo é a potência ôhmica dissipada.

O medidor de onda utilizado é preenchido internamente com ar e pode ser descrito como uma cavidade cilíndrica de comprimento  $D$  e raio  $a$ , com placas de curto circuito, ou seja, placas condutoras em ambos os terminais. Um esquemático é mostrado na Fig. 38.

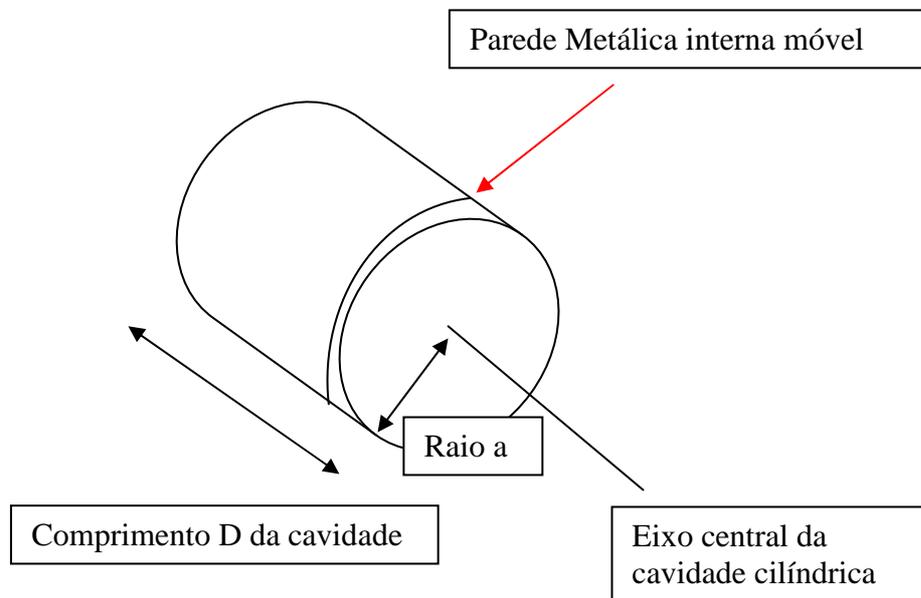


Figura 38. Representação esquemática de uma cavidade cilíndrica com parede móvel.

Um importante parâmetro para desempenho de um circuito ressonante é o fator de qualidade  $Q$ . Uma definição geral de  $Q$  que é aplicável a todos os sistemas ressonantes é dado por [1]:

$$Q = \frac{2\pi(\text{média temporal da energia armazenada})}{\text{perda de energia por ciclo de oscilação}} = \frac{2\pi W}{P_L T} = \omega \frac{W}{P_L},$$

(14)

onde:

- $T$  denota o período de oscilação;
- $\omega$  denota a frequência de ressonância em rad/s;
- $P_L$  denota média temporal da perda de potência na cavidade;
- $W$  denota a média temporal da energia total armazenada nos campos elétrico e magnético da cavidade.

O projeto de um medidor de frequência tem que fornecer um alto valor de  $Q$  e grande largura de frequência de operação [2].

Um alto valor de  $Q$  é necessário para se obter uma resolução ou precisão na medida da frequência desconhecida. Quando a cavidade está sintonizada na frequência da onda guiada, esta absorve um máximo de potência do guia de onda.

Nesta experiência usaremos o instrumento Indicador Detector, já descrito na seção 2.2.1, ou seja, quando a onda eletromagnética entrar em ressonância na cavidade o instrumento indicará uma queda significativa no valor indicado. Neste experimento, manteve-se o ponteiro na posição de  $80 \mu\text{A}$  quando o Medidor de Onda estava na posição inicial  $0 \text{ mm}$ , e registrou-se uma queda entre  $40 \mu\text{A}$  e  $56 \mu\text{A}$  no momento da ressonância.

O funcionamento do Medidor de Onda, já descrito na Subseção 2.1.3, se dá pela reflexão da onda eletromagnética quando o comprimento entre as duas paredes condutores da seção circular tiver o tamanho de um múltiplo inteiro de  $\lambda_g/2$ , onde  $\lambda_g$  corresponde ao comprimento de onda guiado. Quando isto ocorre, diz-se que o Medidor de Onda está sintonizado na frequência da onda e existe uma onda estacionária confinada nesta cavidade.

No experimento realizado, não se utilizou a geometria do medidor de onda para cálculo do valor da frequência. Para tanto se utilizou uma tabela de calibração de fábrica (cf. Anexo A). Neste caso, faz-se a leitura do micrômetro, e após entra-se na tabela para descobrir a frequência correspondente.

A Fig. 39 abaixo mostra a montagem realizada para o experimento 1.

A Fig. 40 mostra um diagrama de blocos relativo ao experimento 1. A fonte de sinal de micro-ondas é o primeiro elemento do circuito e utiliza um cabo coaxial especial para transportar a onda eletromagnética até o guia de onda. O adaptador tem a função de conexão do cabo coaxial que sai da fonte de sinal até o guia de onda. Este mesmo cabo age como uma antena, irradiando a onda eletromagnética para dentro do guia de onda. O isolador tem a função de evitar que ondas refletidas incidam para dentro da fonte de sinal, evitando com isso que a fonte se danifique. O Atenuador Variável tem a função de regular a potência da onda que está sendo guiada. O Medidor de Onda, que é utilizado em vários experimentos, deve permanecer na posição inicial 0 mm do micrômetro quando não utilizado, a fim de não interferir em outros experimentos. O Guia Fendido é utilizado em alguns experimentos e apesar de possuir uma fenda longitudinal, não interfere nas demais medições. O próximo elemento é um pequeno trecho de guia de onda, serve somente como elemento para facilitar as conexões físicas através de parafusos do Guia Fendido e outro elemento. O isolador no final do circuito tem a função de confinar a onda e evitar onda refletida de volta ao guia. O Detector a Cristal tem a função inversa do adaptador na entrada, absorvendo a onda eletromagnética que é transportada pelo cabo coaxial para o instrumento Indicador Detector, que por sua vez é um ponteiro que indica a presença de uma onda eletromagnética.



Figura 39. Configuração do Experimento 1.

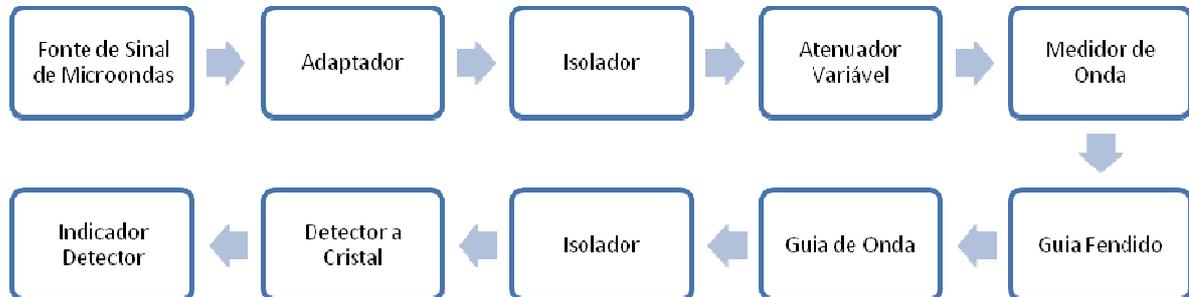


Figura 40. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 1.

### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Descreve-se a seguir o procedimento adotado para a realização do Experimento 1.

1. Ajustar o Atenuador Variável para máxima atenuação (posição 5 mm no micrômetro);
2. Ligar a fonte de sinal de micro-ondas e ajustar:

- a potência da onda de saída para o valor máximo, por meio do botão “RF Level” girando-o no sentido horário;
  - o botão “Sweep” deve permanecer na posição “Off”;
  - pressionar o botão “Continuous”;
  - ajustar uma determinada frequência por meio do botão “Frequency”;
3. Diminuir a atenuação do Atenuador Variável até o valor mínimo (posição 0 mm do micrômetro). Controlar agora com o botão de sensibilidade do Indicador Detector de Onda para que marque por volta de  $80 \mu\text{A}$ . O motivo de manter o instrumento em  $80 \mu\text{A}$  é para que se utilize toda a sua escala e no momento da ressonância o ponteiro mostre um decaimento acentuado do seu valor. Poderíamos manter o instrumento em  $90 \mu\text{A}$ , por exemplo, mas não poderíamos mantê-lo em  $40 \mu\text{A}$  pois neste caso não teríamos resolução suficiente.
  4. Ajustar lentamente o Medidor de onda, no sentido anti-horário (começando na posição 0 do micrômetro), até verificar uma queda acentuada na leitura do valor do Indicador Detector, anotando o valor do micrômetro, isto é, o ponto de ressonância;
  5. Com os valores obtidos do Medidor de Onda, consultar a tabela de calibração do instrumento no Anexo A.
  6. Repetir os passos 4 e 5 para toda a faixa de frequências da fonte de sinal;
  7. Após todas as medições realizadas, ajustar o Atenuador Variável para a máxima atenuação;
  8. Desligar a Fonte de sinal de micro-ondas.

### 3.4 RESULTADOS OBTIDOS

Apresenta-se a seguir os resultados que foram obtidos. A Tab. 1 mostra medidas obtidas após 30 minutos de *power-on* da fonte de sinal de micro-ondas. A Tab. 2 mostra medidas obtidas após 5 minutos de *power-on* da fonte de sinal. Na Tab. 3 se calculou a diferença entre as medidas devido ao tempo de aquecimento da fonte de sinal.

Observa-se dos resultados obtidos que desde a frequência mínima da fonte (8542 MHz) até por volta da frequência de 9200 MHz a frequência de ressonância na cavidade não se altera, permanecendo por volta de 9184 MHz nas medidas da Tab. 1 e 9194 MHz nas medidas da Tab. 2.

**Tabela 1 – Medidas obtidas após os 30 minutos de *power-on*.**

Frequência no display do gerador (MHz)	Valor indicado no micrômetro da cavidade (mm)	Frequência na cavidade (MHz, obtida através da tabela de calibração – cf. Anexo A)	Módulo da diferença entre display e medida da cavidade (MHz e % com relação a cavidade)
8542	5,95	9183	641 / 6,98 %
9150	5,945	9184	34 / 0,37 %
9200	5,94	9184	16 / 0,17 %
9215	5,89	9190	25 / 0,27 %
9225	5,83	9197	28 / 0,30 %
9235	5,78	9203	32 / 0,35 %
9245	5,72	9211	34 / 0,37 %
9250	5,66	9218	32 / 0,35 %
9270	5,5	9238	32 / 0,35 %
9290	5,32	9261	29 / 0,31 %
9310	5,16	9281	29 / 0,31 %
9330	4,998	9302	28 / 0,30 %
9350	4,855	9321	29 / 0,31 %
9400	4,47	9373	27 / 0,29 %
9450	4,12	9423	27 / 0,29 %
9500	3,795	9470	30 / 0,32 %
9550	3,5	9508	42 / 0,44 %
9600	3,145	9570	30 / 0,31 %
9655	2,915	9608	47 / 0,49 %

**Tabela 2 – Medidas obtidas após 5 minutos de *power-on*.**

Frequência no display do gerador (MHz)	Valor indicado no micrômetro da cavidade (mm)	Frequência na cavidade (MHz, obtida através da tabela de calibração – Anexo A)	Módulo da diferença entre display e medida da cavidade (MHz)
8542	5,86	9194	652 / 7,09 %
9150	5,86	9194	44 / 0,48 %
9200	5,86	9194	6 / 0,07 %
9215	5,85	9195	20 / 0,22 %
9225	5,79	9202	23 / 0,25 %
9235	5,72	9211	24 / 0,26 %
9245	5,64	9221	24 / 0,26 %
9250	5,59	9227	23 / 0,25 %
9270	5,43	9247	23 / 0,25 %
9290	5,27	9267	23 / 0,25 %
9310	5,12	9286	24 / 0,26 %
9330	4,95	9308	22 / 0,24 %
9350	4,82	9326	24 / 0,26 %
9400	4,43	9379	21 / 0,22 %
9450	4,07	9430	20 / 0,21 %
9500	3,76	9476	24 / 0,25 %
9550	3,47	9520	30 / 0,32 %
9600	3,07	9582	18 / 0,19 %
9655	2,79	9628	27 / 0,28 %

A Tab. 3 mostra qual foi a diferença das leituras com relação ao tempo de estabilização da fonte de sinal.

**Tabela 3 – Diferença obtida devido ao tempo de aquecimento da fonte de sinal.**

Frequência no display do Gerador (MHz)	Diferença entre Leitura do Medidor de Onda (Tab.3 – Tab. 2) (MHz)	Erro em % com relação Tab. 2
8542	11	0,12%
9150	10	0,11%
9200	10	0,11%
9215	5	0,05%
9225	5	0,05%
9235	8	0,09%
9245	10	0,11%
9250	9	0,10%
9270	9	0,10%
9290	6	0,06%
9310	5	0,05%
9330	6	0,06%
9350	5	0,05%
9400	6	0,06%
9450	7	0,07%
9500	6	0,06%
9550	12	0,13%
9600	12	0,13%
9655	20	0,21%

Analisando-se a Tab. 3, verifica-se uma pequena diferença na leitura, menor do que 0,21%, ou ainda um erro de 8,52 MHz na média, que está abaixo do erro no display da fonte de sinal de micro-ondas que é de  $\pm 40$  MHz.

Assim, pode-se concluir que laboratório não fica prejudicado caso seja realizado antes de 30 minutos de estabilização. Deve-se analisar o que é mais importante na realização do experimento, o conceito e o contato com a instrumentação ou a precisão da medida.

Uma segunda conclusão é que o display da fonte de sinal não é uma informação confiável para frequências abaixo de 9200 MHz. Abaixo desta frequência, temos apenas uma onda guiada em uma frequência fixa. Acreditamos que isso possa ser uma limitação da própria fonte de sinal adquirida e de seus componentes, pois ao invés de estar gerando uma onda eletromagnética de 8,6 GHz até 9,6 GHz, a fonte de sinal está gerando somente uma onda de 9184 MHz até 9608 MHz uma variação de 424 MHz e não de 1,1 GHz como poderíamos esperar segundo informações do manual do equipamento.

Admitimos que estes resultados estão corretos, pois o Medidor de Onda é um componente calibrado de fábrica e suas medidas são baseadas em propriedades físicas, sendo por isso mais preciso que o display da fonte de sinal de micro-ondas.

## **4 EXPERIMENTO 2 – MEDIDA DE POTÊNCIA DE MICRO-ONDAS**

### **4.1 OBJETIVO DA EXPERIÊNCIA**

Obter uma relação entre a variação de potência em função da frequência da fonte de sinal, utilizando o instrumento Medidor de Potência de Micro-ondas (descrito na Subseção 2.2.4).

### **4.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Para medidas de potência em baixas frequências utilizam-se as medidas de tensão e a corrente instantâneas do dispositivo em teste e então se calcula a potência através deste conjunto de valores. Contudo, para frequências de micro-ondas há um aumento significativo da dificuldade de medida devido a natureza dos elementos de circuitos de altas frequências.

Uma forma de medir a potência de micro-ondas é por meio de termocoplador. A principal vantagem de utilizar-se um termocoplador é a possibilidade de medir a potência medindo a tensão DC desenvolvida no termocoplador. O princípio físico do termocoplador ou termopar consiste de dois contatos de metais diferentes que quando submetidos a uma onda eletromagnética de alta frequência, o contato aquece e gera tensão DC que é aplicada a um indicador de tensão que estará calibrado para potência.

Como se pode observar na Fig. 41 e no diagrama de blocos da Fig. 42, na parte final do guia de onda é conectado um isolador, e após este componente a sonda do Medidor de Potência é encaixada no guia. Utilizou-se um adaptador para encaixar a sonda do Medidor de Potência ao final do guia de onda. A sonda que existe no adaptador age como uma antena capturando a energia da onda eletromagnética no guia de onda. O instrumento Medidor de Potência é “zerado” no início da experiência, conforme instruções do procedimento experimental. Portanto, a onda captada aquece o termocoplador gerando uma força

eletromotriz entre os dois metais. O instrumento Medidor de Potência está calibrado para mapear força eletromotriz em potência, na escala de miliwatts.

### 4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A experiência deve ser montada conforme mostra a Fig. 41 e o diagrama de blocos da Fig. 42.

Descreve-se a seguir o procedimento adotado para a realização do Experimento 2:

1. Ajustar o Atenuador Variável para a máxima atenuação (posição 5 mm no micrômetro);
2. Ligar a Fonte de Sinal de Micro-ondas e ajustar:
  - a potência da onda de saída para o valor máximo, por meio do botão “RF Level” girando-o no sentido horário;
  - o botão “Sweep” deve permanecer na posição Off;
  - pressionar o botão “Continuous”;
  - ajustar uma determinada frequência por meio do botão “Frequency”;
3. Ligar o Medidor de Potência;
4. No Medidor de Potência, acionar o botão “Range” para 100 mW;
5. No Medidor de Potência, ajustar com o botão “Zero Adj.” o nível de potência para 0 mW;
6. Ajustar o Atenuador Variável para atenuação zero (posição 0 mm do micrômetro).  
Observar se o nível de potência permanece abaixo de 150 mW para não danificar o Medidor de Potência;
7. Na fonte de sinal, ajustar uma determinada frequência por meio do botão “Frequency”, por exemplo, 8600 MHz e anotar o valor da Potência;

8. Repetir o item anterior para toda a faixa de frequências da fonte de sinal;
9. Após todas as medições realizadas, ajustar o Atenuador Variável para a máxima atenuação;
10. Desligar a Fonte de sinal de micro-ondas e o Medidor de Potência.



Figura 41. Configuração do Experimento 2.

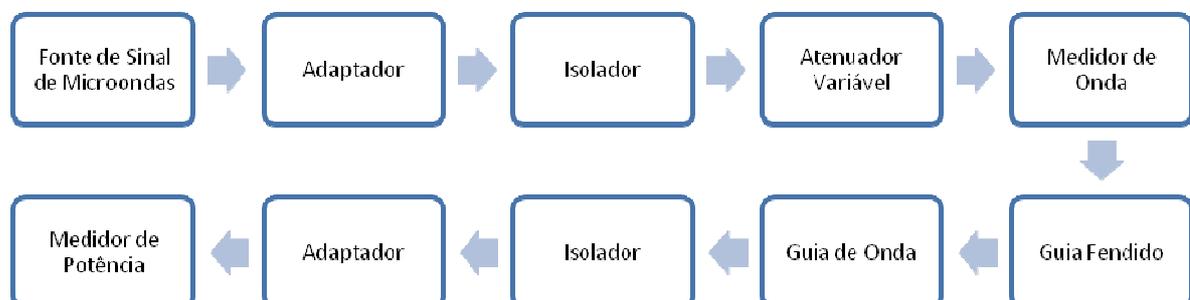


Figura 42. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 2.

#### 4.4 RESULTADOS OBTIDOS

A Tab. 4 mostra os resultados que foram obtidos, variando-se a frequência da fonte de sinal de micro-ondas por toda a faixa (8542 MHz até 9653 MHz). Na mesma tabela, apresentamos duas séries de resultados que foram realizados em dias diferentes, denominadas Série 1 e Série 2. Em ambas as séries apresentamos os resultados para tempo de estabilização da fonte de sinal e Medidor de Potência após 30 minutos de *power-on* e após 5 minutos de *power-on* destes instrumentos. Também se calculou a diferença percentual com relação ao tempo de estabilização de 30 minutos.

Analisando os dados da verifica que a fonte mantém uma potência constante desde a frequência de 8542 MHz até a frequência de 9222 MHz. Para valores de frequência maiores, o valor da potência começa a diminuir, atingindo na frequência máxima de 9653 MHz cerca de 55 % do valor da potência inicial.

Comparando os resultados obtidos com o Experimento 1, nota-se que apesar de variar a frequência do display da fonte de sinal de 8542 até 9200 MHz, a frequência e a potência da onda eletromagnética permanecem constantes nesta mesma faixa, ou seja, externamente é como se nada tivesse sido variado na fonte de sinal de micro-ondas.

O botão “Frequency” da fonte de sinal de micro-ondas ajusta mecanicamente o tamanho de uma cavidade ressonante que contém o oscilador (diodo Gunn). Para tentar explicar a limitação da fonte pode-se suspeitar de uma limitação da própria cavidade ressonante, do diodo utilizado ou algum problema com o botão de ajuste.

**Tabela 4 – Medições de potência variando frequência da fonte de sinal.**

Frequência no display do gerador de sinal de micro-ondas (MHz)	Leitura do display do Medidor de Potência (mW)					
	Medidas - Série 1			Medidas - Série 2		
	Após 30 minutos de power-on	Após 5 minutos de power-on	Diferença com relação a 30 minutos de estabilização (%)	Após 30 minutos de power-on	Após 5 minutos de power-on	Diferença com relação a 30 minutos de estabilização (%)
8542,00	22,50	22,70	0,9%	23,50	24,60	4,7%
9200,00	22,50	22,70	0,9%	23,50	24,60	4,7%
9222,00	22,50	22,70	0,9%	23,30	24,50	5,2%
9248,00	22,40	22,70	1,3%	23,20	24,40	5,2%
9255,00	22,20	22,70	2,3%	22,50	23,40	4,0%
9280,00	21,40	21,90	2,3%	21,60	22,40	3,7%
9305,00	20,30	20,80	2,5%	20,60	21,60	4,9%
9330,00	18,99	19,80	4,3%	19,42	20,80	7,1%
9355,00	18,22	18,70	2,6%	18,74	20,10	7,3%
9380,00	17,52	17,57	0,3%	18,12	19,32	6,6%
9405,00	16,86	17,01	0,9%	17,63	18,95	7,5%
9430,00	16,43	16,64	1,3%	17,29	18,65	7,9%
9455,00	16,13	16,35	1,4%	17,06	18,42	8,0%
9480,00	15,87	16,13	1,6%	16,87	18,22	8,0%
9505,00	15,72	15,93	1,3%	16,66	17,73	6,4%
9530,00	15,45	15,54	0,6%	16,15	16,88	4,5%
9555,00	14,81	14,80	0,1%	15,25	15,54	1,9%
9580,00	14,31	13,95	2,5%	14,22	14,62	2,8%
9605,00	13,43	13,01	3,1%	13,35	13,88	4,0%
9630,00	12,62	12,32	2,4%	12,95	13,37	3,2%
9653,00	12,34	12,10	1,9%	12,71	12,92	1,7%

As Figs. 43 e 44 foram geradas através do software ORIGIN utilizando-se os dados da Tab 4.

Nas Figs. 43 e 44 a origem do gráfico é o ponto 8542 MHz no eixo da abscissa e 11 mW no eixo da coordenada. O gráfico preto tracejado representa os pontos com tempo de estabilização maiores do que 5 minutos mas menores do que 30 minutos. O gráfico vermelho com traço contínuo representa os pontos com tempo de estabilização maiores do que 30 minutos.

Pode-se verificar que antes da estabilização dos instrumentos (considerando 30 minutos), as leituras tendem a ser maiores, porém não influenciando no formato da curva.

Para uma medida mais precisa deve-se aguardar cerca de 30 minutos para início das leituras [9]. Encontraram-se erros máximos da ordem de até 8 %.

Já que o manual da fonte de sinal especifica que a potência de saída é sempre maior do que 20 mW, concluímos que a partir da faixa de frequências entre 9305 e 9330 MHz, onde a potência fica menor que 20 mW, a fonte de sinal já não apresenta um funcionamento adequado.

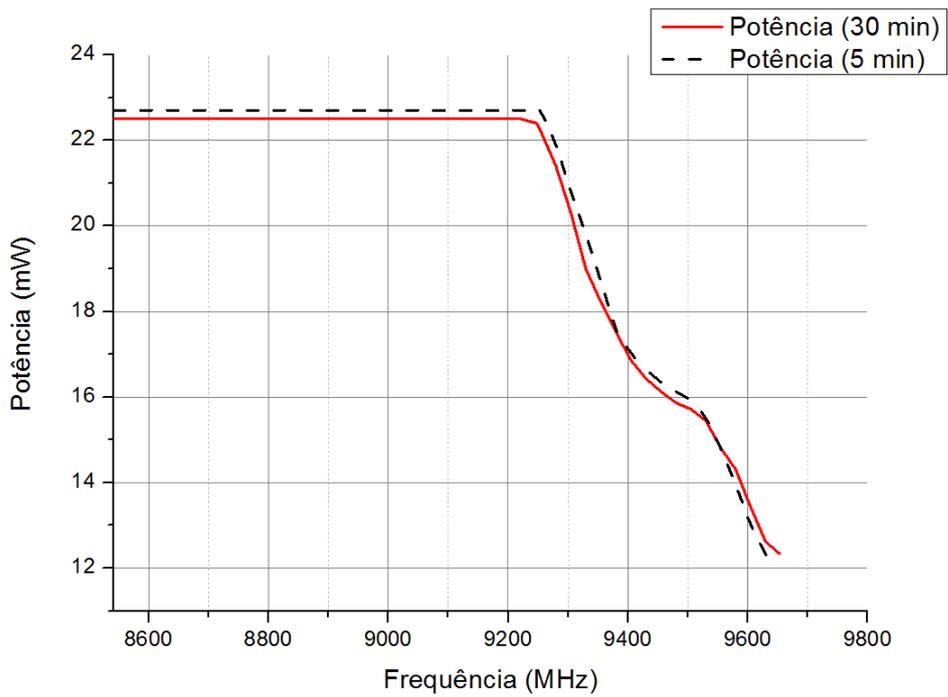


Figura 43. Gráfico dos resultados da Série 1.

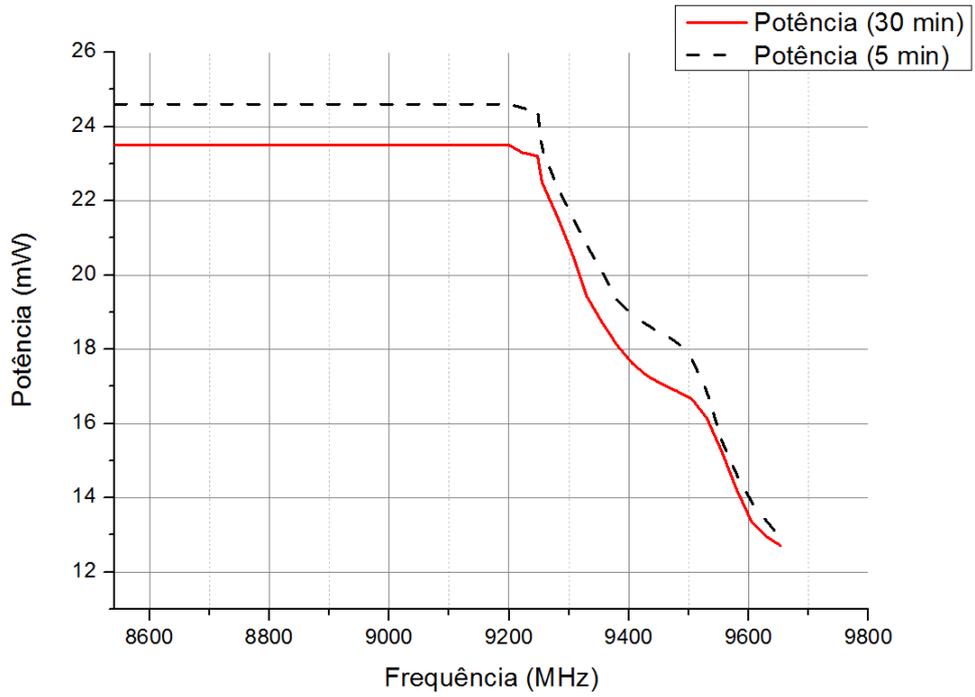


Figura 44. Gráfico dos resultados da Série 2.

Na Fig. 45 está representado o gráfico da Série 2 com a potência na escala de dBm. O valor máximo de potência foi definido como ponto de valor 0 dBm.

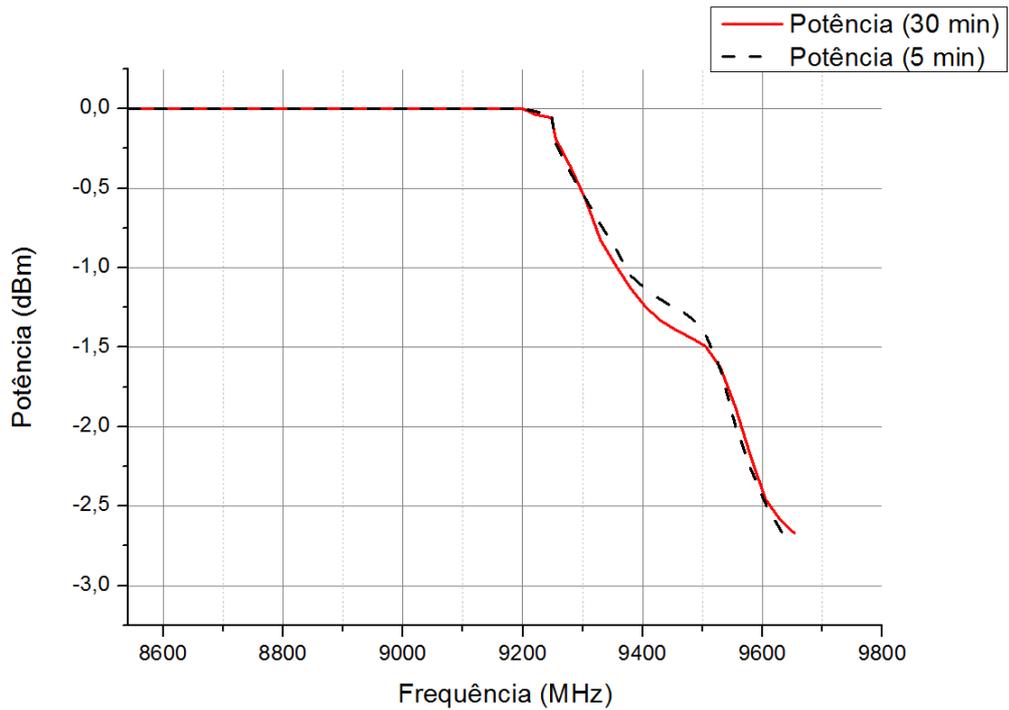


Figura 45. Gráfico dos resultados da Série 2 (Potência em dBm).

## 5 EXPERIMENTO 3 – CARACTERÍSTICAS DO OSCILADOR DA FONTE DE SINAL DE MICRO-ONDAS

### 5.1 OBJETIVO DA EXPERIÊNCIA

Estudar as características do diodo Gunn, componente utilizado na fabricação do oscilador da fonte de sinal de micro-ondas. Para tanto, será realizado um experimento para verificar a relação entre corrente versus tensão elétrica, a relação entre potência versus tensão e por último a relação entre frequência versus tensão.

### 5.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O diodo Gunn tem uma característica I-V que exhibe uma resistência negativa diferencial que pode ser usada para gerar potência RF a partir de uma polarização DC. Sua operação é baseada no efeito de transferência de elétrons (*transferred electron effect* ou efeito Gunn), que foi descoberto por John Battiscombe Gunn em 1963 [3]. Diodos Gunn práticos normalmente utilizam GaAs (Arseneto de Gálio) ou InP (Fosfato de Índio) como materiais. Diodos Gunn podem produzir potência contínua de até algumas centenas de miliwatts, para frequências de 1 até 100 GHz, com eficiência de 5 % até 15 %. Circuitos osciladores usando diodos Gunn requerem um circuito ressonante ou uma cavidade com alto fator de qualidade Q, que é normalmente ajustado mecanicamente. Os diodos Gunn por serem componentes baratos são usados em muitas aplicações de baixo custo como radares de tráfego, detectores de movimento para abertura de portas, alarmes de segurança e sistema de teste e medidas [2].

Algumas vantagens dos diodos Gunn são o baixo ruído e a grande faixa de frequência de operação. Porém, os diodos Impatt possuem maiores eficiências e melhor estabilidade com a variação de temperatura quando comparados com os diodos Gunn. Os diodos Impatt utilizam o efeito avalanche e também produzem um efeito de resistência negativa.

Materiais semicondutores como GaAs e InP possuem duas bandas de condução próximas, como é mostrado na Fig. 46. No gráfico da Fig. 46 o eixo das ordenadas representa a energia do elétron (unidade de elétron-volt), o eixo das abscissas representa o Momento que é diretamente proporcional a massa efetiva do elétron. “*Valence band*” representa a banda de valência; “*band gap*” de 1,4 elétron-volt representa a diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução; na banda de condução podem-se verificar as bandas de baixa energia e alta energia.

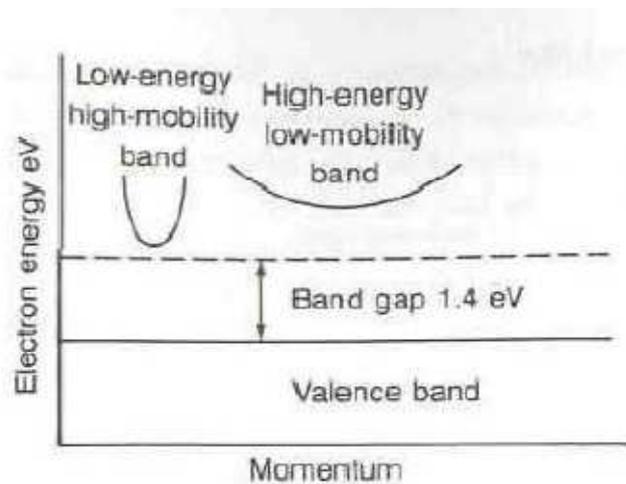


Figura 46. Banda de condução dupla para um diodo Gunn de GaAs [3].

Com pouco campo elétrico aplicado ao material, a maioria dos elétrons permanece na banda de condução de baixa energia. Com um campo elétrico maior, a maioria dos elétrons é então transferida para a banda de condução de alta energia. Neste estado, a massa efetiva do elétron é maior e por isso sua mobilidade é menor, quando comparado a banda de condução de baixa energia. Como a condutividade é diretamente proporcional a mobilidade, existe uma faixa de campo elétrico aplicado na qual uma fração dos elétrons que são transferidos para a banda de condução de alta energia e tal que a mobilidade média e por isso a condutividade, decai com o aumento do campo elétrico. Portanto, existe uma faixa de tensão elétrica aplicada

na qual a corrente diminui com o aumento da tensão e uma resistência negativa incremental aparece no dispositivo. A característica corrente versus tensão no diodo Gunn do circuito do oscilador da fonte de sinal é mostrada na Seção 5.4. O diodo Gunn é chamado de dispositivo de transferência de elétrons pois sua resistência negativa origina-se da transferência de elétrons da banda de baixa energia para a banda de energia maior.

A oscilação ocorre na região em que o diodo apresenta resistência negativa. A cavidade ressonante que contém o diodo pode ser modelada como um circuito RLC série ou paralelo, onde R representa as perdas nas paredes condutoras e no dielétrico, L representa a energia armazenada no campo magnético e C representa a energia armazenada no campo elétrico. Desta forma a combinação entre a resistência do diodo e do circuito ressonante se anulam na região de ressonância, permanecendo apenas um circuito LC, com oscilação sem amortecimento.

### **5.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Para se medir as relações de  $I \times V$ ,  $P \times V$  e  $f \times V$ , foram realizadas duas práticas distintas. Na primeira montagem descrita no diagrama de blocos da Fig. 48 é possível medir as duas primeiras relações,  $I \times V$  e  $P \times V$ , já que tensão e corrente elétrica do diodo Gunn são medidos diretamente na fonte de sinal de micro-ondas e o Medidor de Potência conectado no final do circuito fornece a potência. Para medirmos a relação entre  $f \times V$ , precisamos modificar a montagem, conforme diagrama de blocos da Fig. 49. A montagem é exatamente a mesma do Experimento 1, porém a diferença se encontra nos ajustes da fonte de sinal de micro-ondas descritos abaixo.

A primeira montagem do experimento é mostrada na Fig. 47 e diagrama de blocos da Fig. 48. Descreve-se a seguir o procedimento adotado para a realização do Experimento 3:

1. Ajustar o Atenuador para a máxima atenuação (posição 5 mm do micrômetro);
2. Ligar a Fonte de Sinal de Micro-ondas;
3. Na fonte de sinal, ajustar a potência da onda de saída para o valor máximo, por meio do botão “RF Level” girando-o no sentido horário;
4. Na fonte de sinal, o botão “Sweep” deve permanecer na posição “Off”;
5. Na fonte de sinal, pressionar os botões “Continuous” e "Teaching". O acionamento do botão "Teaching" desliga o display de frequência e habilita o botão de controle de tensão ("Voltage"), com o qual se pode ajustar a tensão do oscilador da Fonte de Sinal de micro-ondas. Ajusta-se a tensão para o valor mínimo (cerca de 0,05 V);
6. Ligar o Medidor de Potência;
7. No Medidor de Potência, acionar o botão “Range” para 100 mW;
8. No Medidor de Potência, ajustar com o botão “Zero Adj.” o nível de potência para 0 mW;
9. Ajustar o Atenuador Variável para atenuação zero (posição 0 mm do micrômetro). Observar se o nível de potência permanece abaixo de 150 mW para não danificar o Medidor de Potência;
10. Para os diversos valores de tensão: (a) medir e anotar a potência no Medidor de Potência; (b) medir e anotar a corrente do display da Fonte de sinal de micro-ondas;
11. Na fonte de sinal, através do botão "Voltage", aumentar o valor da tensão em 0,5 V e repetir o item anterior;
12. Repetir o item anterior até a tensão de 12,0 V e anotar os valores;
13. Após serem realizadas as medições realizadas, ajustar o Atenuador Variável para a máxima atenuação;
14. Desligar a Fonte de sinal de micro-ondas e o Medidor de Potência.



Figura 47. Configuração do Experimento 3.

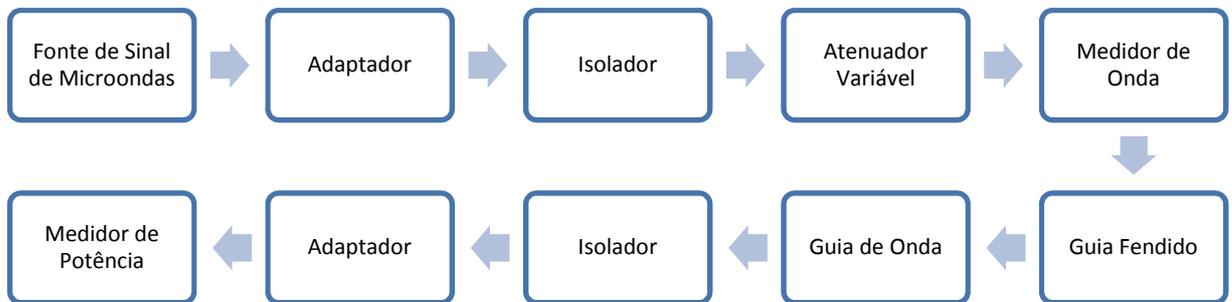


Figura 48. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 3 (Corrente versus Tensão).

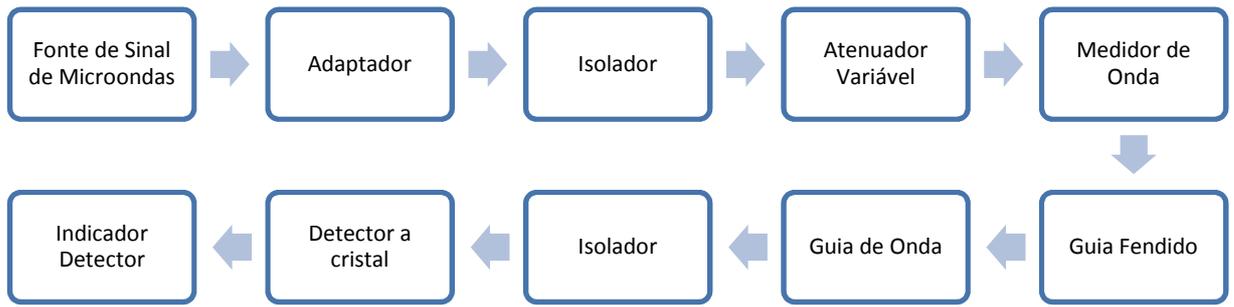


Figura 49. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 3 (Frequência versus Tensão).

Para medirmos a relação entre  $f \times V$ , montou-se os componentes conforme diagrama de blocos da Fig. 49 e seguiu-se o procedimento:

1. Ajustar o Atenuador para a máxima atenuação (posição 5 mm no micrômetro);
2. Ligar a Fonte de Sinal de Micro-ondas;
3. Repetir os passos anteriores 3, 4 e 5 para os ajustes na fonte de sinal de micro-ondas;
4. Na fonte de sinal, através do botão "Voltage", ajustar a tensão do oscilador de forma que o display indique 8,0 V;
5. Diminuir a atenuação do Atenuador Variável até o valor mínimo (posição 0 mm do micrômetro). Controlar agora com o botão de sensibilidade do Indicador Detector de Onda para que marque por volta de 80  $\mu\text{A}$ ;
6. Ajustar lentamente o Medidor de onda, no sentido anti-horário (começando na posição 0 do micrômetro), até verificar uma queda acentuada na leitura do valor do Indicador Detector, anotando o valor do micrômetro, isto é, o ponto de ressonância. Associar o valor do micrômetro com a frequência da onda no guia de onda, consultando a tabela de calibração no Anexo A. Anotar estes valores numa tabela;
7. Na fonte de sinal, através do botão "Voltage", aumentar a tensão em 0,5 V e repetir o item anterior até a tensão de 12,0 V;
8. Após todas as medições realizadas, ajustar o Atenuador Variável para a máxima atenuação;
9. Desligar a Fonte de sinal de micro-ondas.

## 5.4 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados do Experimento 3 foram tabelados e podem ser vistos na Tab. 5. Para a primeira parte da experiência, fez-se medições após 5 minutos de *power-on* e após 30 minutos de *power-on* dos instrumentos.

**Tabela 5 – Resultados para o Experimento 3.**

Tensão (V)	Corrente medida antes de 30 minutos (mA)	Corrente medida após 30 minutos (mA)	Potência medida antes de 30 minutos (mW)	Potência medida após 30 minutos (mW)	Frequência (após 30 minutos) (MHz)	Micrômetro do Medidor de Onda (mm)
0	0	0	0	0		
0,05	0,09	0,09	0	0		
0,5	104	103	0	0		
1	202	197	0	0		
1,5	286	280	0	0		
2	359	354	0	0		
2,5	420	415	0	0		
3	469	462	0	0		
3,5	500	493	0	0		
4	514	508	0	0		
4,5	505	502	0	0		
5	498	496	0	0		
5,5	490	488	0	0		
6	487	485	0	0		
6,5	484	482	0,01	0,32		
7,0	479	475	0,15	1,06		
7,1	478	472	0,23	3,68		
7,2	474	469	3,05	5,87		
7,3	471	465	5,41	8,54		
7,4	467	462	7,78	10,26		
7,5	464	461	10,17	10,75		
7,6	463	460	10,81	11,28		
7,7	461	458	11,43	11,74		
7,8	460	457	11,98	12,23		
7,9	459	456	12,42	12,65		
8,0	458	456	12,94	13,05	Não detectado	-
8,1	457	455	13,39	13,5	Não detectado	-
8,2	456	454	13,82	13,9	Não detectado	-
8,3	455	453	14,21	14,28	Não detectado	-
8,4	454	452	14,6	14,68	Não detectado	-
8,5	453	451	14,97	15,05	Não detectado	-
8,6	453	450	15,31	15,43	Não detectado	-
8,7	452	449	15,71	15,83	Não detectado	-
8,8	451	448	16,12	16,17	Não detectado	-
8,9	450	447	16,48	16,47	9269	5,255
9,0	449	447	16,82	16,81	9266	5,28
9,1	448	446	17,16	17,12	9262	5,31
9,2	447	445	17,48	17,44	9259	5,335
9,3	446	444	17,74	17,72	9255	5,365
9,4	445	443	17,93	17,86	9252	5,39
9,5	444	442	18,23	18,28	9248	5,42
10,0	438	435	20,2	19,82	9234	5,535
10,5	428	425	25	24,8	9219	5,65
11,0	425	423	26,1	25,6	9207	5,755
11,5	423	421	26,2	25,5	9195	5,85
12,0	422	420	25,5	24,5	9184	5,94
13,0	420	418	21,8	20,7	-	-
14,1	418	416	16,8	16,2	-	-

Para a segunda montagem da experimento 3, os resultados também são mostrados na Tab. 5. Para a tensão de 8,0 V por exemplo, o instrumento Indicador Detector não apresentou queda para qualquer valor posição do Medidor de Onda. Portanto, não houve detecção de onda e está indicado como “Não detectado” na coluna Frequência. Ressalta-se ainda que as medições para a segunda parte do experimento foram todas realizadas após 30 minutos de *power-on* dos instrumento, para maior precisão.

Os gráficos das Figs. 50, 51 e 52 apresentam o seguinte legenda: na cor preta com linha tracejada estão os dados obtidos com tempo de estabilização menor do que 30 minutos e na cor vermelha com linha contínua os dados obtidos após 30 minutos de estabilização.

A Fig. 50. apresenta o gráfico da corrente versus a tensão no diodo Gunn. Podemos observar que a região de resistência negativa começa por volta da tensão de 4,0 V em diante e segue até os 12 V. Um aumento da tensão no diodo nessa região produziu uma diminuição no valor da corrente medida no amperímetro da fonte de sinal. Observa-se também que os valores obtidos com diferentes tempos de estabilização apresentam diferenças mínimas.

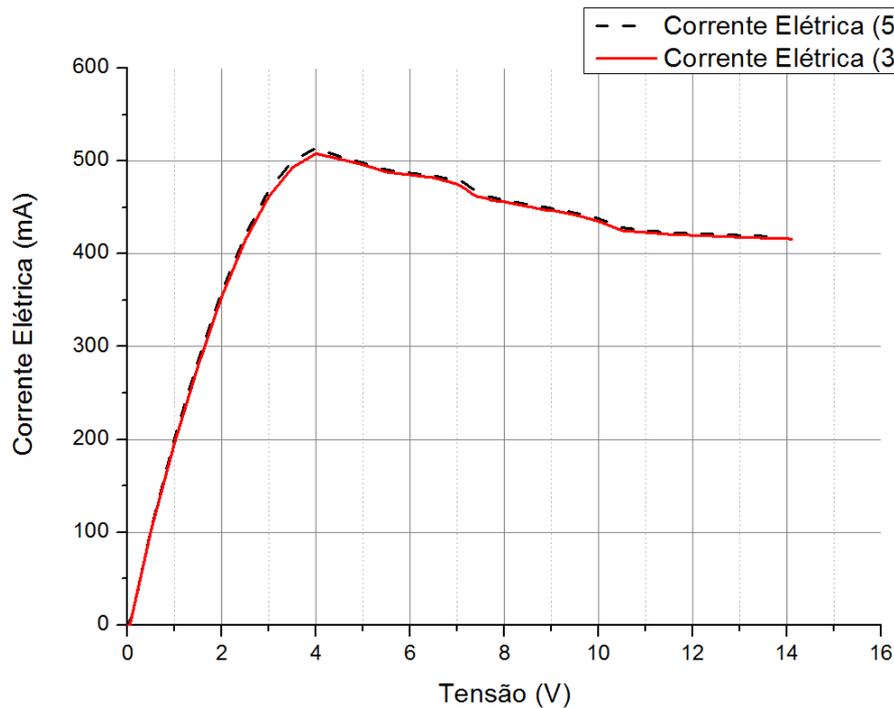


Figura 50. Corrente versus tensão elétrica no diodo Gunn.

A Fig. 51 apresenta o gráfico da potência medida no final do circuito versus a tensão aplicada no diodo Gunn. Observamos que a potência permanece nula até por volta de 7,0 V, atinge seu máximo de potência de 22,5 mW com 11,5 V e a partir deste valor de tensão a potência começa a cair.

Comparando os resultados do gráfico da Fig. 51 com o mesmo gráfico obtido de um *data-sheet* de diodo Gunn na Fig. 52, observa-se resultado parecido. Conforme a temperatura aumenta, observa-se que a tensão de operação e a potência máxima diminuem.

Concluiu-se que quando uma tensão é aplicada sobre o diodo, é necessário uma certa tensão mínima inicial para que o dispositivo possa produzir potência na saída. Essa tensão mínima é chamada de *turn-on* nos *data-sheets* de componentes [4].

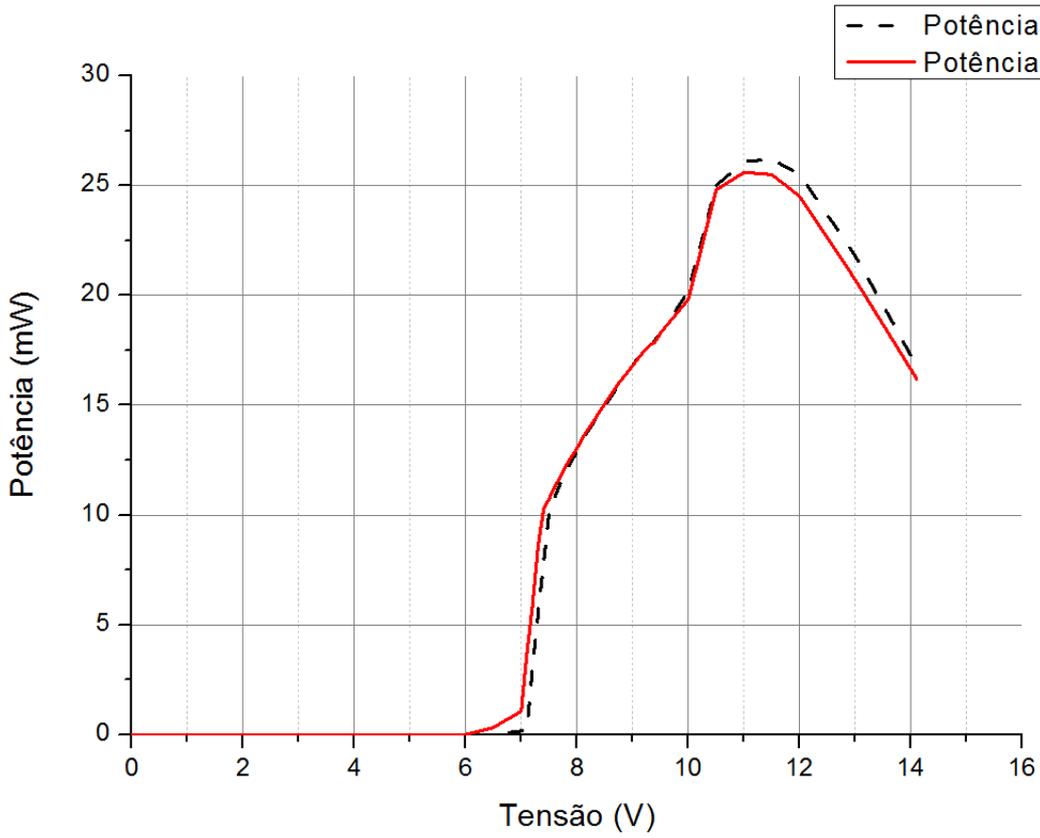


Figura 51. Potência versus tensão elétrica no diodo Gunn.

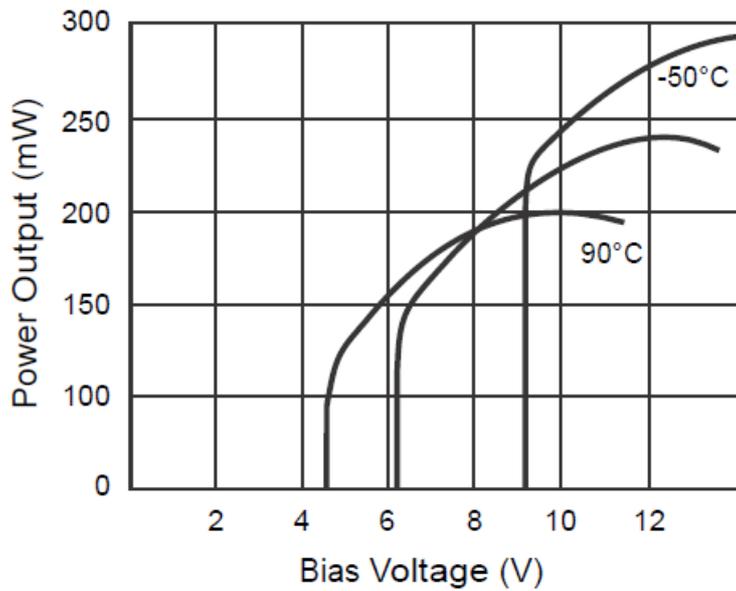


Figura 52. Gráfico típico de potência versus tensão para diodo Gunn com variação de temperatura [4].

Finalmente, a Fig. 53 mostra a frequência versus tensão do diodo Gunn. Observamos que existe apenas uma faixa de tensão na qual a frequência da onda guiada é detectada. Essa faixa é entre 8,9 V até 12 V de tensão e são geradas frequências no guia de onda entre 9184 e 9269 MHz. Observa-se que mesmo com a tensão de *turn-on* de 7,0 V aplicada no diodo, o dispositivo ainda assim não gera uma onda detectável. O diodo começa a operar dentro de uma faixa próxima a tensão de máxima potência, ou seja 11,5 V. Para valores de tensão próximos do ponto de máxima potência foi possível a detecção da onda. A faixa de tensão no qual foi possível detectar uma onda, vai de uma tensão 30 % menor (8,9 V) até 4 % maior (12 V) que a tensão de máxima potência (11,5 V).

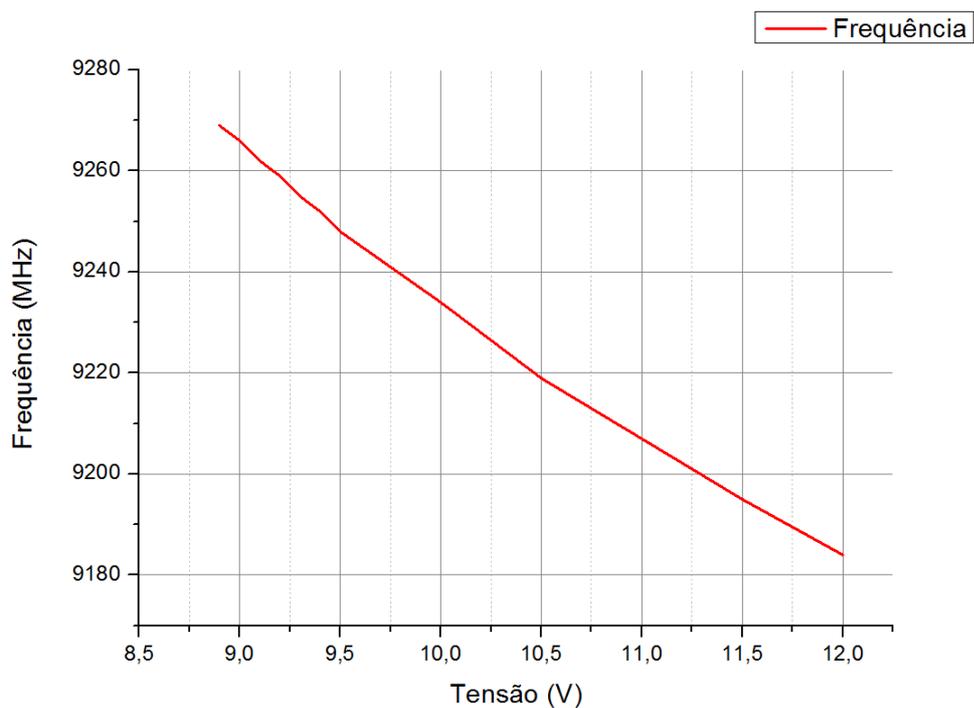


Figura 53. Frequência versus tensão elétrica no diodo Gunn.

## 6 EXPERIMENTO 4 – MEDIDA DE COMPRIMENTO DE ONDA NUMA ONDA ELETROMAGNÉTICA ESTACIONÁRIA

### 6.1 OBJETIVO DA EXPERIÊNCIA

O objetivo da experiência é medir o comprimento de onda ( $\lambda_g$ ) de uma onda estacionária num guia de onda retangular operando no modo  $TE_{10}$ . Para este fim usaremos o Guia Fendido conectado ao Amplificador seletivo. O Anexo C contém o cálculo mostrando que o modo  $TE_{10}$  é o modo de propagação dominante.

### 6.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Quando ocorrem mudanças nas dimensões do guia de onda, junções mal alinhadas ou a presença de peças refletoras como uma placa de cobre no final do guia de onda, a onda eletromagnética incidente sofrerá reflexão. Neste caso há duas ondas eletromagnéticas dentro do guia de onda, a onda incidente e a onda refletida. Ao longo do guia de onda, estas ondas somam-se e subtraem-se gerando a denominada onda estacionária. O campo eletromagnético ou a corrente desta onda variam periodicamente com a distância, conforme pode ser visualizado na Fig. 54. O campo elétrico máximo  $E_{\max}$  ou a corrente máxima  $I_{\max}$  são encontrados onde as duas ondas estão em fase e o campo elétrico mínimo  $E_{\min}$  ou a corrente mínima  $I_{\min}$  são localizados onde as ondas estão em oposição de fase (isto é, defasados de  $180^\circ$ ).

A distância entre máximos ou mínimos de tensão nesta onda possui uma distância de  $\lambda_g/2$ , onde  $\lambda_g$  é o comprimento de onda sendo guiado. Portanto, observando-se a Fig. 54, se conclui que:

$$\text{Distância entre dois máximos ou mínimos consecutivos} = \frac{\lambda_g}{2} = L_2 - L_1 .$$

(15)

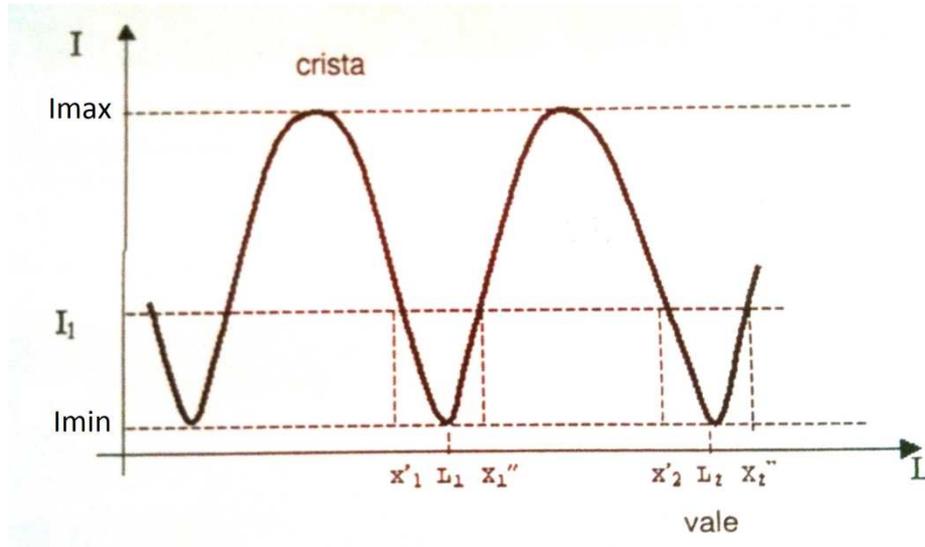


Figura 54. Gráfico corrente versus distância  $L$  num guia de onda para uma onda estacionária [9].

Neste experimento utiliza-se o Guia Fendido para amostrar o sinal e o Amplificador Seletivo para indicar os valores dos mínimos de tensão.

O Relógio Comparador é utilizado em conjunto com o Guia Fendido para obtermos uma resolução maior do que o ajuste obtido só observando a graduação das duas réguas do Guia Fendido, conforme mostra a Fig. 3.

Num terceiro momento, troca-se a placa de curto circuito pelo componente Curto Sintonizável e observa-se como se comporta as posições dos mínimos de tensão.

### 6.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A experiência deve ser montada conforme mostra a Fig. 55 e diagrama de blocos correspondente da Fig. 56.

Descreve-se a seguir o procedimento adotado para a primeira parte do Experimento 4:

1. Ajustar o Atenuador para a máxima atenuação (posição 5 mm do micrômetro);
2. Ligar a Fonte de Sinal de Micro-ondas;
3. Na fonte de sinal, ajustar a potência da onda de saída para o valor máximo, por meio do botão "RF Level" girando-o no sentido horário;
4. Na fonte de sinal, através do botão "Frequency", ajustar a frequência para o valor de 9.250 MHz;
5. Na fonte de sinal, o botão "Sweep" deve permanecer na posição off;
6. Na fonte de sinal, acionar o botão "Square";
7. Ligar o Amplificador Seletivo;
8. No Amplificador Seletivo ajustar:
  - o ponto zero por meio do botão "Zero adj.";
  - a atenuação pressionando o botão "Attenuation" na opção "x1";
  - a frequência pressionando o botão "Bandwidth" na opção 1 kHz e ;
  - o ganho pressionando o botão "Range" na opção x1;
9. No Guia Fendido, posicionar a carruagem para a extrema direita;
10. No Atenuador Variável, diminuir gradativamente a atenuação até o valor mínimo (posição 0 mm do micrômetro). Talvez seja necessário ajuste da atenuação ou ganho no Amplificador Seletivo para que o ponteiro permaneça dentro da escala;
11. Movimentar lentamente a carruagem do Guia Fendido (ou detector de onda estacionária) para esquerda até encontrar a máxima deflexão do ponteiro (para a direita) do Amplificador Seletivo. No Amplificador Seletivo, caso o ponteiro fique no limite da escala, mudar a faixa de atenuação através da chave seletora "Attenuation";
12. No Amplificador Seletivo, girar o botão "Frequency" até encontrar a máxima deflexão do ponteiro à direita;

13. No Amplificador Seletivo, ajustar conjuntamente os botões de ajuste fino "Input Voltage" e "Gain" para indicar o maior valor dentro da escala (por exemplo  $100 \mu\text{V}$ );
14. No Guia Fendido, movimentar a carruagem até encontrar a mínima deflexão do ponteiro para a esquerda. Anotar a posição da carruagem indicada na régua fixa do Guia Fendido;
15. No Guia Fendido, continuar o movimento para esquerda até encontrar outra vez a máxima deflexão, e posteriormente a mínima deflexão. Anotar a posição da carruagem neste segundo mínimo de tensão.
16. O valor de  $\lambda_g$  é calculado como o dobro da diferença entre dois mínimos consecutivos.



Figura 55. Configuração do Experimento 4.

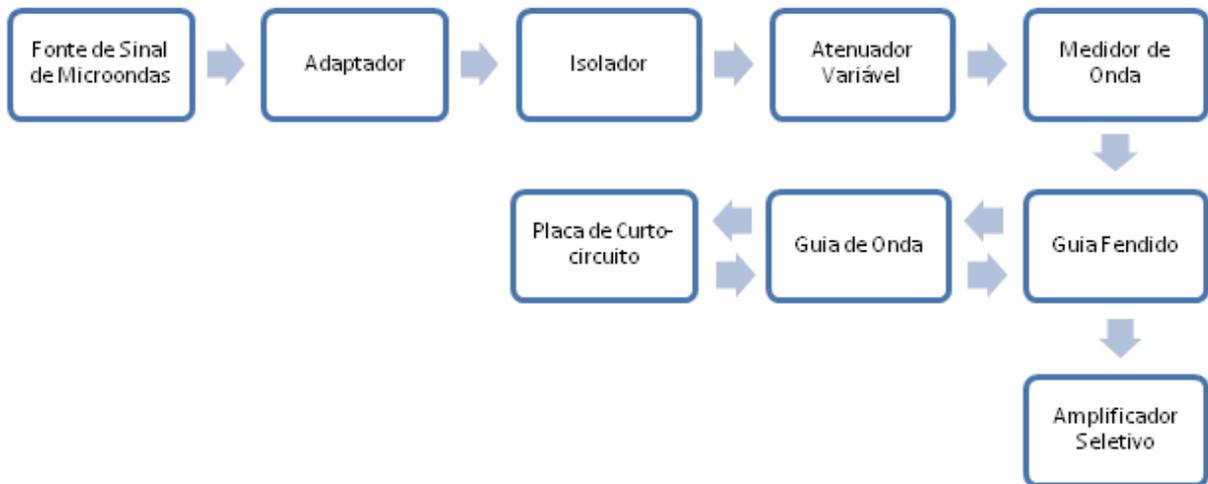


Figura 56. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 4 (com placa de curto).

Na segunda parte do experimento, para se conseguir uma melhor exatidão, seguiu-se o mesmo procedimento operacional acima, porém ao invés de anotar os valores de mínimos e máximos, estabeleceu-se uma tensão de referência  $V_1$  de  $30 \mu\text{V}$  e anotaram-se as posições na régua  $x_1'$ ,  $x_1''$ ,  $x_2'$ ,  $x_2''$  e calculou-se os valores de  $L_1$  e  $L_2$  da seguinte forma:

$$L_1 = \frac{x_1' + x_1''}{2}, \quad (16)$$

$$L_2 = \frac{x_2' + x_2''}{2}, \quad (17)$$

onde:

- $L_1$  e  $L_2$  são as posições de dois mínimos consecutivos;
- $x_1'$  e  $x_1''$  são as posições da tensão de referência de  $30 \mu\text{V}$  à esquerda e à direita, mais próximas a posição da tensão mínima  $L_1$ ;
- $x_2'$  e  $x_2''$  são as posições da tensão de referência de  $30 \mu\text{V}$  à esquerda e à direita, mais próximas a posição da tensão mínima  $L_2$ .

A Fig. 54 exemplifica graficamente estas posições calculadas. Além disso, utilizou-se o Relógio Comparador para se obter valores das posições com uma maior precisão.

Na terceira parte do experimento, os equipamentos são montados conforme Fig. 57 e o correspondente diagrama de blocos da Fig. 58. A alteração em comparação com a montagem anterior foi a troca da placa de curto pelo Curto Sintonizável. Utilizou-se também o Relógio Comparador. O procedimento experimental foi exatamente o mesmo acima descrito, repetido para várias posições diferentes do Curto Sintonizável.

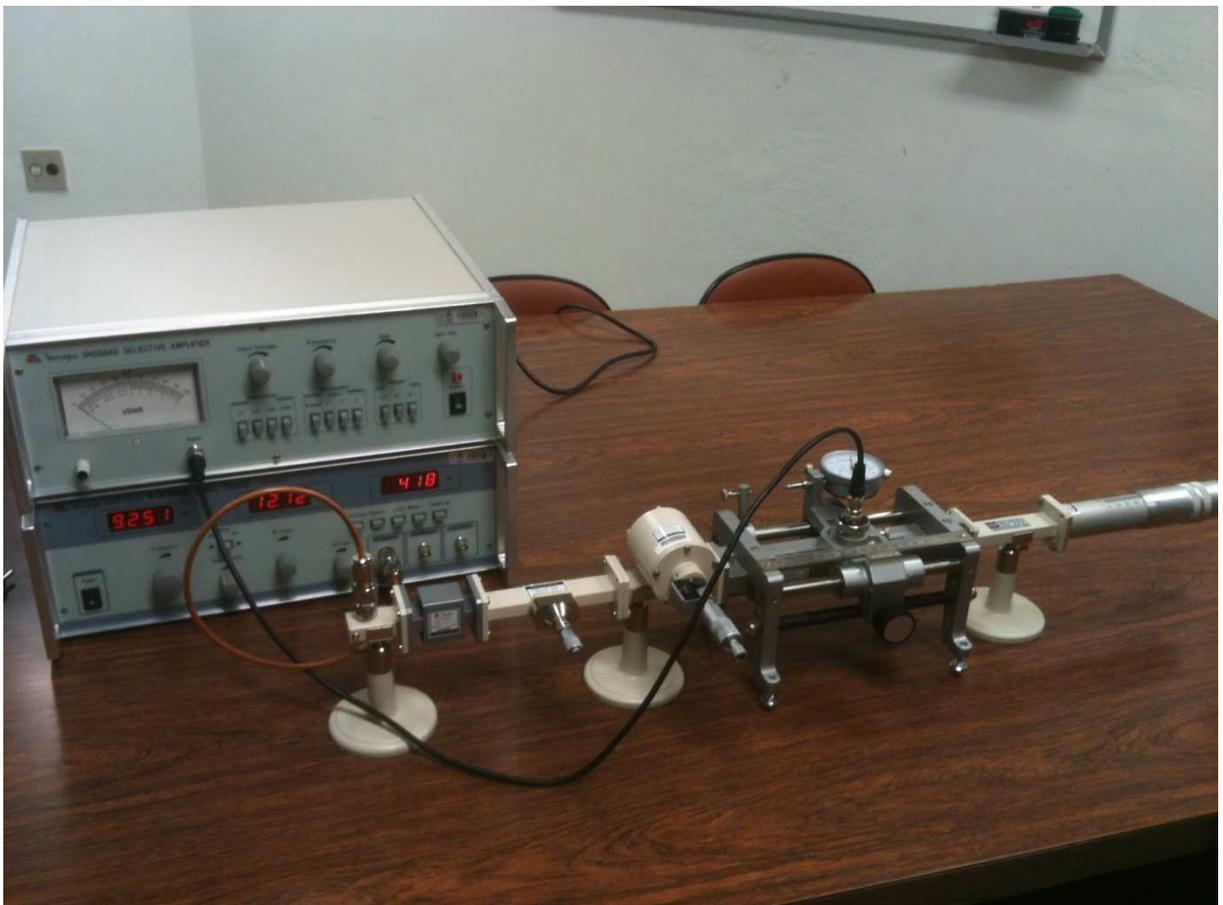


Figura 57. Montagem do Experimento 4 (com curto sintonizável e relógio comparador).

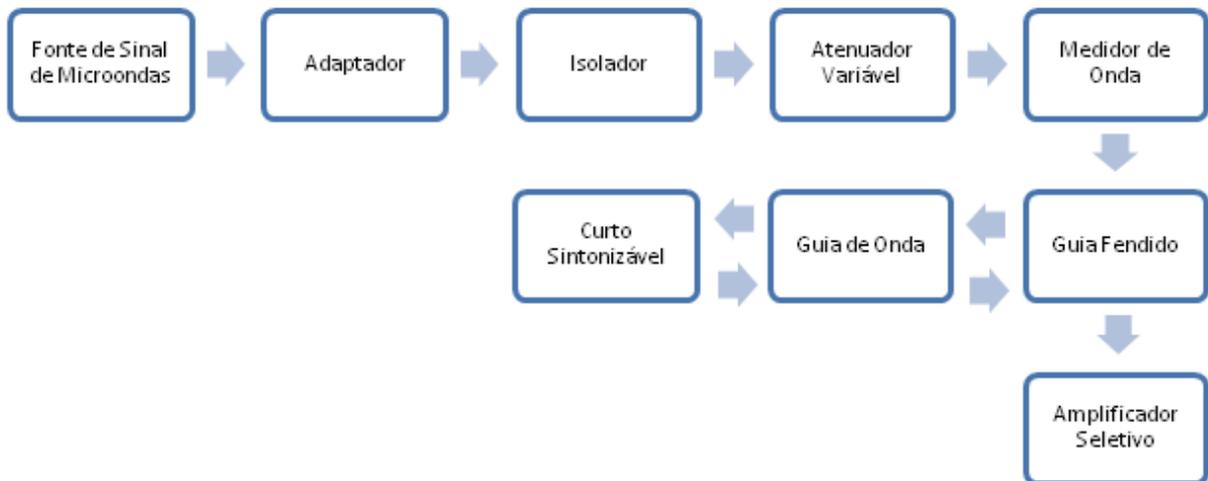


Figura 58. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 4 (com curto sintonizável).

#### 6.4 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos para a primeira parte do experimento, sem a utilização do Relógio Comparador estão nas Tabs. 6 e 7. Anotaram-se todas as posições conforme Procedimento Experimental passos 14 e 15. Para calcular o comprimento de onda  $\lambda_g$ , utilizou-se a Eq. 15, portanto:

$$\lambda_g = 46,50 \text{ mm (média dos máximos) ou } 46,32 \text{ mm (média dos mínimos)} .$$

(18)

**Tabela 6 – Medidas do experimento 4 (pontos de máximo, sem relógio comparador).**

Medida da tensão no Amplificador Seletivo ( $\mu\text{A}$ )	Leitura da régua de referência no Guia Fendido (mm)	Distância entre máximos ou mínimos consecutivos (mm)
90	79	Primeiro máximo
87	102,5	23,5 (102,5 – 79)
91	125,5	23
89	149	23,5
88	172	23
Média das distâncias (mm)		23,25 mm
$\lambda_g$		46,50 mm

**Tabela 7 – Medidas do experimento 4 (pontos de mínimo, sem relógio comparador).**

Medida da tensão no Amplificador Seletivo ( $\mu\text{A}$ )	Leitura da régua de referência no Guia Fendido (mm)	Distância entre máximos ou mínimos consecutivos (mm)
0	91	Primeiro mínimo
0	114	23 (114 – 91)
0	137	23
0	160,5	23,5
Média das distâncias (mm)		23,16 mm
$\lambda_g$		46,32 mm

Os resultados da segunda parte do experimento, utilizando o Relógio Comparador e uma tensão de referência de  $30 \mu\text{V}$ , estão na Tab. 8 abaixo. Os valores de  $\lambda_g$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  e foram calculados utilizando-se as Eq. 15, 16 e 17, respectivamente.

**Tabela 8 – Medidas do experimento 4 (referência  $V_1 = 30\mu\text{V}$ )**

Posição	Posição $x_1'$ medida (mm)	Posição $x_1''$ medida (mm)	Posição $x_2'$ medida (mm)	Posição $x_2''$ medida (mm)	Posição L1 calculada (mm)	Posição L2 calculada (mm)	$\lambda_g$ calculado (mm)
Valores obtidos sem auxílio do Relógio Comparador	87	94,5	110	118	90,75	114	46,5
Valores obtidos com auxílio do Relógio Comparador	86,9	94,63	110,29	118,21	90,765	114,25	46,97

Nos primeiros resultados obtidos  $\lambda_g$  estava dentro de uma faixa de 46,32 mm até 46,5 mm. Com o uso da tensão de referência obteve-se  $\lambda_g$  de 46,5 mm e com o uso da tensão de referência mais o Relógio Comparador obteve-se  $\lambda_g$  de 46,97 mm que é o resultado mais preciso.

Os resultados da terceira parte do experimento, utilizando o Curto Sintonizável, a tensão de referência de  $30 \mu\text{V}$  e o Relógio Comparador, estão na Tab. 9.

**Tabela 9 – Resultados do experimento 4 com curto sintonizável.**

Posição do curto sintonizável (mm)	Posição $x_1'$ medida (mm)	Posição $x_1''$ medida (mm)	Posição $x_2'$ medida (mm)	Posição $x_2''$ medida (mm)	Posição L1 calculada (mm)	Posição L2 calculada (mm)	$\lambda_g$ calculado (mm)
40	93,34	101,68	116,65	124,07	97,51	120,36	45,70
35	98,31	105,89	121,74	129,21	102,10	125,48	46,75
30	78,23	86,26	101,88	109,79	82,25	105,84	47,18
20	88,79	96,68	112,05	119,84	92,74	115,95	46,42
10	99,17	106,95	122,40	130,17	103,06	126,29	46,45
5	80,91	88,89	104,18	112,16	84,90	108,17	46,54
0	85,87	93,85	109,16	117,15	89,86	113,16	46,59

Conclusões:

- $\lambda_g$  é praticamente igual entre as várias posições obtidas para o curto sintonizável. Existe uma diferença de cerca de 1,48 mm entre a menor e a maior medida do valor de  $\lambda_g$  (47,18 mm – 45,70 mm) , possivelmente um erro por causa de a medida ser realizada manualmente;
- A variação da posição do curto altera a posição dos mínimos de tensão. Por exemplo, quando se move o Curto Sintonizável da posição 0 para a posição 5, temos uma diferença entre as posições dos mínimos de tensão de cerca de 5 mm. A mesma variação se observa quando se move o curto sintonizável da posição 0 para a posição 35 mm. Neste caso, tem-se uma diferença média de 12,36 mm, que é aproximadamente a distância de 35 mm menos a distância de meio comprimento de onda ( $47,18 \div 2 = 23,59$  mm).

## 7 EXPERIMENTO 5 – MEDIDA DA RELAÇÃO DE ONDA ESTACIONÁRIA

### 7.1 OBJETIVO DA EXPERIÊNCIA

Medir a relação de onda estacionária para um guia de onda com carga casada. Repetir a medição da relação de onda estacionária para várias posições e profundidades do pino metálico do Ajustador de Reflexões (vide Subseção 2.1.6).

### 7.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O campo eletromagnético em qualquer ponto do guia de onda pode ser considerado como a soma de duas ondas viajantes: a onda incidente que se propaga da fonte de sinal de micro-ondas para a carga e a onda refletida que se propaga da carga em direção a fonte. A onda refletida surge de reflexões da onda incidente devido a descontinuidades ou devido ao descasamento da impedância de carga. A presença de duas ondas, uma incidente e outra refletida, dão origem a uma onda estacionária no guia de onda. O campo é máximo onde as ondas estão em fase e o campo é mínimo quando as ondas estão em fases opostas.

A distância entre dois mínimos consecutivos (ou máximos) é metade do comprimento de onda, conforme visto na Seção 6.2.

A taxa de onda estacionária SWR é definida como a razão entre os campos máximos e mínimos, ou seja:

$$SWR = \frac{|E|_{max}}{|E|_{min}} = \frac{|E_i| + |E_r|}{|E_i| - |E_r|}, \quad (19)$$

onde:

- $|E|_{max}$  denota a magnitude do campo elétrico máximo;

- $|\mathbf{E}|_{\min}$  denota a magnitude do campo elétrico mínimo;
- $|\mathbf{E}_i|$  denota a magnitude da onda eletromagnética incidente;
- $|\mathbf{E}_r|$  denota a magnitude da onda eletromagnética refletida.

A taxa de onda estacionária é muitas vezes expressa em decibel, ou seja:

$$SWR \text{ (em dB)} = 20 \log_{10} SWR = 20 \log_{10} \frac{|\mathbf{E}|_{\max}}{|\mathbf{E}|_{\min}}. \quad (20)$$

Além disso a razão entre o campo elétrico da onda refletida pelo campo elétrico da onda incidente é definida como coeficiente de reflexão:

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (21)$$

onde:

- $E_r$  denota o campo elétrico refletido;
- $E_i$  denota o campo elétrico incidente;
- $Z_L$  denota a impedância da carga;
- $Z_0$  denota a impedância característica.

Existe também uma relação entre a taxa de onda estacionária em termos do coeficiente de reflexão, conforme está definido na Eq. 1.

Quando  $|\mathbf{E}|_{\max} = |\mathbf{E}|_{\min}$ , isto é, quando não há reflexão ( $E_r = 0$ ), o valor de SWR é 1 e é necessário um circuito casado. Em outras palavras, sob condições ideais a taxa de onda estacionária de uma carga casada é 1. O extremo oposto ocorre quando  $|\mathbf{E}|_{\min} = 0$ , isto é, reflexão total ( $E_r = E_i$ ), resultando num valor de SWR igual a infinito. Contudo, na maioria

dos casos o valor de SWR é maior do que 1. Não é raro obter valores de SWR menores do que 1,02 em circuitos bem projetados com componentes casados.

O campo elétrico no guia de onda é amostrado com a sonda do Guia Fendido, que é constituído por um diodo detector. Neste caso, o diodo obedece a lei quadrática, de tal forma que a corrente ou tensão medida no diodo é proporcional ao quadrado do campo elétrico sendo amostrado. Portanto:

$$I = k(E^2) , \quad (22)$$

onde:

- k denota uma constante de proporcionalidade, dado em  $\frac{A.m^2}{V^2}$ ;
- E denota a magnitude do campo elétrico amostrado.

Dessa forma:

$$SWR = \frac{|E|_{max}}{|E|_{min}} = \frac{\sqrt{(I_{max})/k}}{\sqrt{(I_{min})/k}} = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}} = \sqrt{\frac{V_{max}}{V_{min}}} . \quad (23)$$

### 7.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A experiência é montada conforme mostra a Fig. 59 e o correspondente diagrama de blocos da Fig. 60.

Descreve-se a seguir o procedimento adotado para a realização do Experimento 5:

1. Ajustar o Atenuador para a máxima atenuação (posição 5 mm no micrômetro);
2. Ligar a Fonte de Sinal de Micro-ondas e ajustar:

- a potência da onda de saída para o valor máximo, por meio do botão “RF Level” girando-o no sentido horário;
- a frequência para o valor de 9.250 MHz, através do botão "Frequency";
- o botão "Sweep" deve permanecer na posição off;
- acionar o botão "Square";

3. No Ajustador de Reflexões, ajustar o pino metálico para que fique fora do guia de onda: o eixo indicará a posição 10 mm e deve ser girado no sentido anti-horário. Lembrando que no momento do ajuste da profundidade do pino, deve ocorrer o alinhamento do valor 0 mm do eixo móvel com o valor em milímetros desejado da profundidade. Lembrar também que uma profundidade de 1 mm corresponde ao valor de 9 mm no eixo móvel, 2 mm de profundidade corresponde ao valor de 8 mm no eixo móvel e assim sucessivamente;

4. Ligar o Amplificador Seletivo;

5. No Amplificador Seletivo ajustar:

- a atenuação pressionando o botão "Attenuation" na opção "x1";
- a frequência pressionando o botão "Bandwidth" na opção 1 kHz;
- o ganho pressionando o botão "Range" na opção x1;
- o ponto zero por meio do botão "Zero adj.";

6. No Guia Fendido, posicionar a carruagem para a extrema direita;

7. No Atenuador Variável, diminuir gradativamente a atenuação até o valor mínimo (posição 0 mm do micrômetro). Neste momento o ponteiro do Amplificador Seletivo indicará um determinado valor. Caso o ponteiro fique no limite da escala, mudar a faixa de atenuação através da chave seletora “Attenuation”, trocando de “x1” para “x10”, por exemplo;

8. Movimentar lentamente a carruagem do Guia Fendido para esquerda até encontrar a máxima deflexão do ponteiro (para a direita) do Amplificador Seletivo. Observar

que quando se utiliza uma Carga Casada os valores dos mínimos e máximos de tensão devem ser semelhantes;

9. No Amplificador Seletivo, girar o botão "Frequency" até encontrar a máxima deflexão do ponteiro à direita. Caso o ponteiro fique no limite da escala, mudar a faixa de atenuação ou ganho, através da chave seletora "Attenuation" ou "Range", respectivamente;

10. No Amplificador Seletivo, ajustar conjuntamente os botões de ajuste fino "Input Voltage" e "Gain" para indicar o maior valor dentro da escala (por exemplo 100  $\mu\text{V}$ ) e anotar o valor da tensão;

11. No Guia Fendido, movimentar a carruagem para a esquerda até encontrar a mínima deflexão do ponteiro (à esquerda) e anotar o valor da tensão.

12. Calcular o valor de SWR para o circuito terminado com carga casada, utilizando-se a Eq. 23.

Num segundo procedimento, anotar os diversos valores do Amplificador Seletivo em função da profundidade e posição do pino do Ajustador de Reflexões. Por exemplo:

1. Manter os mesmos ajustes da Fonte de sinal de Micro-ondas e da Amplificador Seletivo;

2. Mover a carruagem do Ajustador de Reflexões para a posição 30 mm da régua fixa e fixar uma profundidade, por exemplo, 5 mm;

3. Com a carruagem do Guia Fendido, procurar o valor do máximo de tensão e anotar;

4. Mover a carruagem até encontrar o valor do mínimo de tensão e anotar;

5. Com estes valores de tensão, calcular a taxa de onda estacionária correspondente para cada posição e profundidade do pino metálico, utilizando a Eq. 23.



Figura 59. Configuração do Experimento 5.

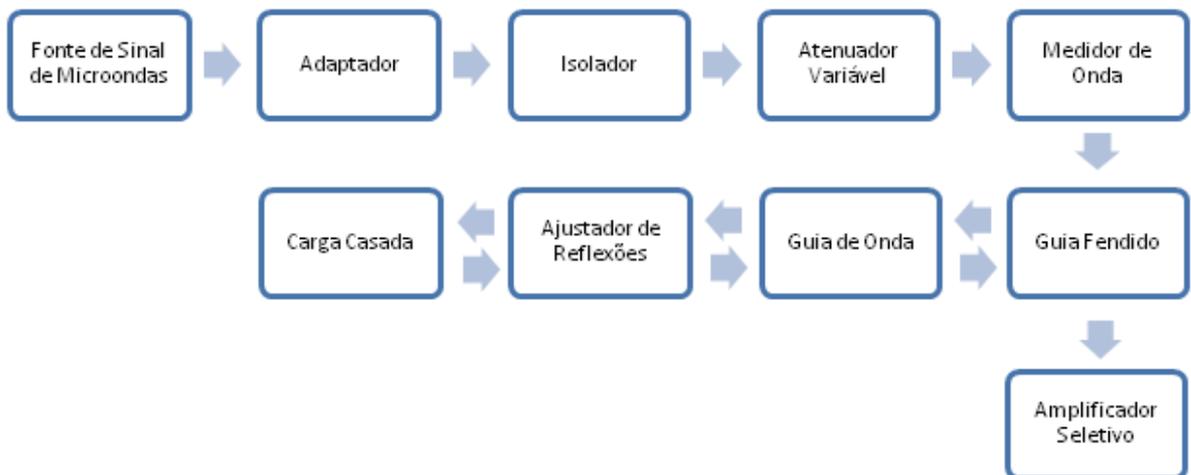


Figura 60. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 5.

#### 7.4 RESULTADOS OBTIDOS

Na primeira parte do experimento, fixou-se o valor máximo para  $V_{\max}$  em 100  $\mu\text{V}$ , através dos ajustes do Amplificador Seletivo. Movimentando a sonda do Guia Fendido, mediu-se o valor de  $V_{\min}$  em 97  $\mu\text{V}$ . O valor da taxa de onda estacionária foi calculada com a Eq. 23, obtendo-se:

$$s = \sqrt{\frac{V_{\max}}{V_{\min}}} = \sqrt{\frac{100}{97}} = 1,015.$$

(24)

O valor obtido é um valor coerente para um circuito bem projetado e terminado com carga casada.

As Tabs. 10, 11, 12 e 13 mostram os resultados obtidos para diversos valores de posição e profundidade do pino do Ajustador de Reflexões.

**Tabela 10 – Resultados para posição do pino em 5,0 mm.**

Profundidade do pino (mm)	$V_{\max}$	$V_{\min}$	SWR
0	100	96	1,021
2	130 (13 x 10)	88	1,22
4	180 (18 x 10)	49,5	1,91
6	270 (27 x 10)	6,7 (67 x 0,1)	6,35
8	310 (31 x 10)	0,6 (6 x 0,1)	22,73
10	320 (32 x 10)	0,15 (1,5 x 0,1)	46,19

**Tabela 11 – Resultados para posição do pino em 10,0 mm.**

Profundidade do pino (mm)	$V_{\max}$	$V_{\min}$	SWR
0	100	96,5	1,018
2	130 (13 x 10)	90	1,2
4	180 (18 x 10)	55	1,81
6	290 (29 x 10)	7,2 (72 x 0,1)	6,35
8	335 (33,5 x 10)	0,8 (8 x 0,1)	20,46
10	350 (35 x 10)	0,3 (3 x 0,1)	34,16

**Tabela 12 – Resultados para posição do pino em 30,0 mm.**

Profundidade do pino (mm)	$V_{\max}$	$V_{\min}$	SWR
0	100	96	1,018
2	130 (13 x 10)	88	1,2
4	180 (18 x 10)	51	1,81
6	280 (28 x 10)	7,2 (72 x 0,1)	6,24
8	330 (33 x 10)	0,4 (4 x 0,1)	20,31
10	330 (33 x 10)	0,2 (2 x 0,1)	33,17

**Tabela 13 – Resultados para posição do pino em 60,0 mm.**

Profundidade do pino (mm)	$V_{\max}$	$V_{\min}$	SWR
0	100	97	1,015
2	130 (13 x 10)	87,5	1,22
4	180 (18 x 10)	54	1,83
6	280 (28 x 10)	8,3 (83 x 0,1)	5,81
8	320 (32 x 10)	0,8 (8 x 0,1)	20,00
10	320 (32 x 10)	0,5 (5 x 0,1)	25,30

Observa-se que o valor da taxa de onda estacionária praticamente independe da localização do pino. O fator determinante é a profundidade do pino metálico, sendo que quanto maior sua profundidade, maior é a reflexão que o pino provoca e portanto maior o valor da taxa de onda estacionária.

Conclusões:

- O pino metálico gera reflexão da onda eletromagnética, gerando um descasamento de impedância. Como sugestão de experiência, o valor desta impedância  $Z_L$  poderia ser calculada através das equações 1 e 21;
- A posição do pino metálico altera a fase da onda estacionária;
- A profundidade do pino metálico altera o valor de SWR, ou seja, quanto maior a profundidade, maior o valor de SWR.

A profundidade de uma sonda de detecção (pino metálico) para amostragem de sinais em guias de onda é um detalhe essencial em projetos, já que este deforma a onda sendo

amostrada. Como regra geral, deve-se utilizar em medidas de guias de onda a mínima penetração possível para a sonda de amostragem.

## **8 EXPERIMENTO 6 – FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E FATOR DE QUALIDADE DE UMA CAVIDADE RESSONANTE RETANGULAR COM DIVERSOS MEIOS DIELÉTRICOS**

### **8.1 OBJETIVO DA EXPERIÊNCIA**

Medida da frequência de ressonância e do fator de qualidade de uma cavidade ressonante retangular operando no modo dominante  $TE_{10}$ , com diversos meios dielétricos.

### **8.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A frequência de ressonância  $f_0$  e o fator de qualidade  $Q$  da cavidade ressonante dependem da sua geometria (circular, retangular, etc.), do modo ressonante e das características do material dielétrico que a preenche (ar, dielétrico, etc.). A energia elétrica e magnética é armazenada no interior da cavidade, ocorrendo dissipação de potência nas paredes metálicas e no dielétrico que preenche a cavidade ressonante.

No primeiro momento, determinam-se as características da cavidade sem amostra de dielétrico, sendo que neste caso as perdas são devidas apenas às paredes condutoras da cavidade. As perdas adicionais de radiação que podem ocorrer junto dos planos terminais da cavidade devem ser minimizadas garantindo um bom contato entre o trecho de guia de onda que forma a cavidade e as íris que acopla a Cavidade Ressonante com o Circulador.

Quando se preenche a cavidade com a amostra dielétrica os valores de  $f_0$  e  $Q$  sofrem desvios, que dependem das propriedades dielétricas do material em estudo.

A frequência de ressonância do modo  $TE_{mnl}$  ou  $TM_{mnl}$  é dado por [2]:

$$f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2},$$
(25)

onde:

- Os índices m, n e l referem-se a variações da onda estacionária nas direções x, y e z, respectivamente;
- c é a velocidade da luz;
- $\mu_r$  e  $\epsilon_r$  denotam, respectivamente, a permeabilidade e a permissividade relativa do meio que compõe a cavidade ressonante;
- “a”, “b” e “d” são as dimensões da cavidade ressonante retangular, de forma que  $b < a < d$ .

A Cavidade Ressonante propaga apenas o modo  $TE_{10}$  (cf. Anexo C). Deste modo, a menor frequência de ressonância da cavidade é dada pelo modo  $TE_{101}$ . Utilizando a Eq. 25 para este caso teremos que:

$$f_{101} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2}.$$
(26)

O fator de qualidade de uma cavidade ressonante retangular preenchida com ar, dielétrico sem perdas e paredes condutoras com perdas, é dado por [2]:

$$Q_c = \frac{(k_0 ad)^3 b \eta_0}{2\pi^2 R_s} \frac{1}{(2l^2 a^3 b + 2bd^3 + l^2 a^3 d + ad^3)},$$
(27)

onde:

- $k_0$  denota a constante de propagação no ar;
- $l$  é um inteiro ( $l = 1, 2, 3 \dots$ );
- $\eta_0$  denota a impedância intrínseca do espaço livre;
- $R_s$  denota a resistência superficial das paredes metálicas;
- “a”, “b” e “d” são as dimensões da cavidade ressonante de forma que  $b < a < d$ .

O fator de qualidade para uma cavidade preenchida com dielétrico com perdas, mas com paredes perfeitamente condutoras, é dado por:

$$Q_d = \frac{2\omega W_e}{P_d} = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \frac{1}{\tan \delta}, \quad (28)$$

onde:

- $W_e$  denota a energia armazenada no campo elétrico;
- $P_d$  denota a potência dissipada no dielétrico;
- $\tan \delta$  é a tangente de perdas do material dielétrico.

Quando ambas as perdas estão presentes em uma cavidade ressonante, o fator de qualidade total é dado por:

$$Q = \left( \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \right)^{-1}. \quad (29)$$

O fator de qualidade é também uma medida de quão seletiva é a cavidade em relação às frequências do sinal de excitação. Para uma tensão de excitação fixa, a potência absorvida pela cavidade varia com a frequência do sinal de entrada segundo a curva de ressonância da

Fig. 61, onde  $f_0$  é a frequência de ressonância e  $f_1$  e  $f_2$  as frequências laterais onde a potência cai a metade do valor central (ponto de -3 dB).

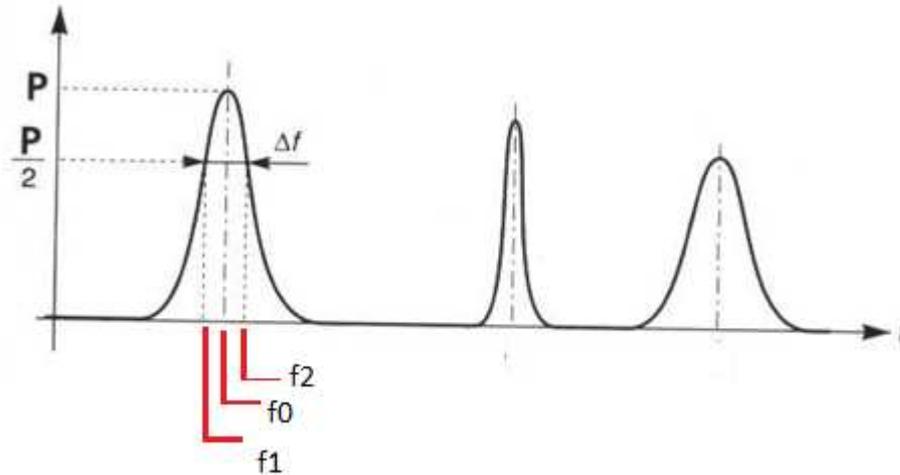


Figura 61. Gráfico potência versus frequência em cavidades ressonantes.

Para uma dada frequência de ressonância, a largura de banda correspondente (faixa de frequências na qual a potência absorvida não cai abaixo da metade da potência máxima) é dada por:

$$B = |f_2 - f_1| = \frac{f_0}{Q}.$$

(30)

Assim, quanto maior for o fator de qualidade, menor será a largura de banda correspondente e, conseqüentemente, mais seletiva a cavidade será em relação a frequência de excitação.

### 8.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A experiência deve ser montada conforme mostra a Fig. 62 e o correspondente diagrama de blocos da Fig. 63.

Descreve-se a seguir o procedimento adotado para a realização do Experimento 6:

1. Ajustar o Atenuador para a máxima atenuação (posição 5 mm no micrômetro);
2. Ligar a Fonte de Sinal de Micro-ondas e ajustar:
  - a potência da onda de saída para o valor máximo, por meio do botão “RF Level” girando-o no sentido horário;
  - a frequência para o valor de 9.250 MHz, através do botão "Frequency";
  - colocar o botão "Sweep" na posição "ON";
  - acionar o botão "Continuous";
3. No Ajustador de Reflexões, ajustar a profundidade para 5 mm e localização em 60 mm;
4. No osciloscópio, ajustar a escala de tempo para 0,5 ms por divisão e a escala de tensão para 0,5 V por divisão;
5. Na fonte de sinal, a largura do pulso de varredura pode ser alterado através do botão "Sweep Width". Neste caso, girou-se o botão no sentido horário para o valor máximo;
6. No Atenuador Variável, diminuir gradativamente a atenuação até o valor mínimo (posição 0 mm do micrômetro). Neste momento o osciloscópio indica um sinal como o da Fig. 64;
7. Na fonte de sinal de micro-ondas, variar a frequência através do botão “Frequency” até o valor de 9278 MHz, onde se obterá a forma de onda da ressonância da cavidade ressonante no osciloscópio, como mostra a Fig. 65. Com a inserção dos pinos de material diétrico talvez seja necessário a alteração do valor de frequência para a forma de onda apareça no osciloscópio;
8. Ajustar o Medidor de Onda até que o seu ponto de ressonância coincida com metade da potência (-3 dB) próximos ao ponto de ressonância da Cavidade Ressonante. Isto é mostrado nas Figs. 66 e 67. Os pontos de -3dB foram considerados pontos de 1,0 Volt, pois

em frequências fora da ressonância, por exemplo 9000 MHz, o os ciloscópio apresenta um valor máximo de 2,0 Volts.

9. Anotar os dois valores indicados na escala do Medidor de Onda nas condições da metade da potência (tanto no lado direito, quanto no lado esquerdo do pulso de oscilação da cavidade ressonante);

10. Consultar a tabela de calibração do Medidor de Onda para os respectivos valores anotados no passo 8;

11. Calcular o valor da frequência de ressonância da cavidade através da média simples dos dois valores obtidos;

12. Calcular o valor do fator de qualidade da Cavidade Ressonante através da Eq. 30;

13. Repetir os passos 7 até 12 colocando uma amostra de dielétrico na fenda da Cavidade Ressonante.



Figura 62. Configuração do Experimento 6.

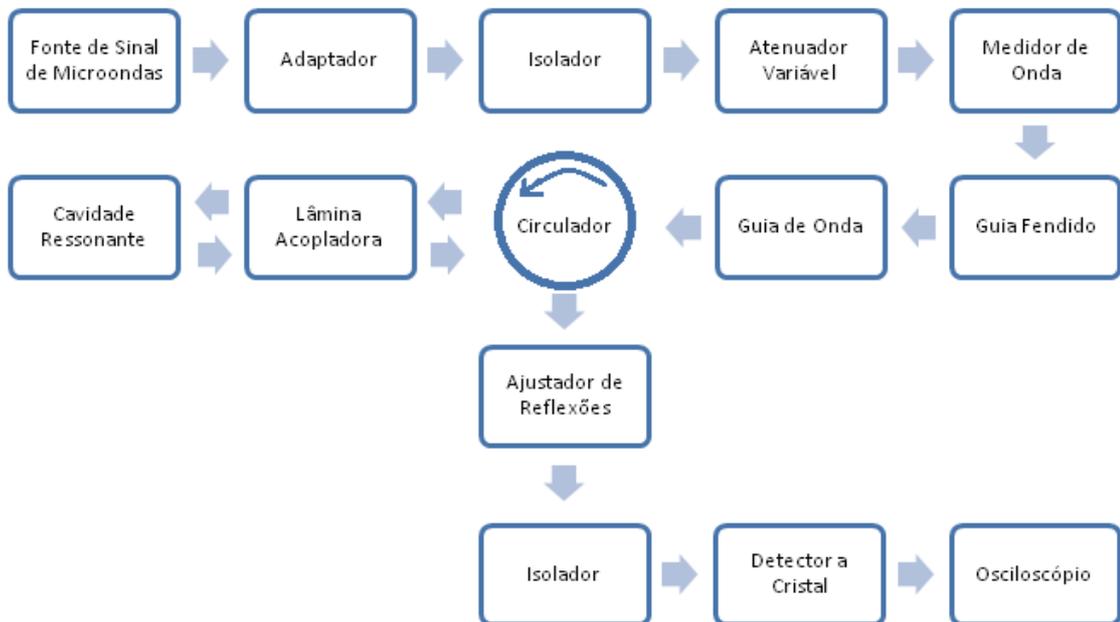


Figura 63. Diagrama de blocos da montagem do Experimento 6.

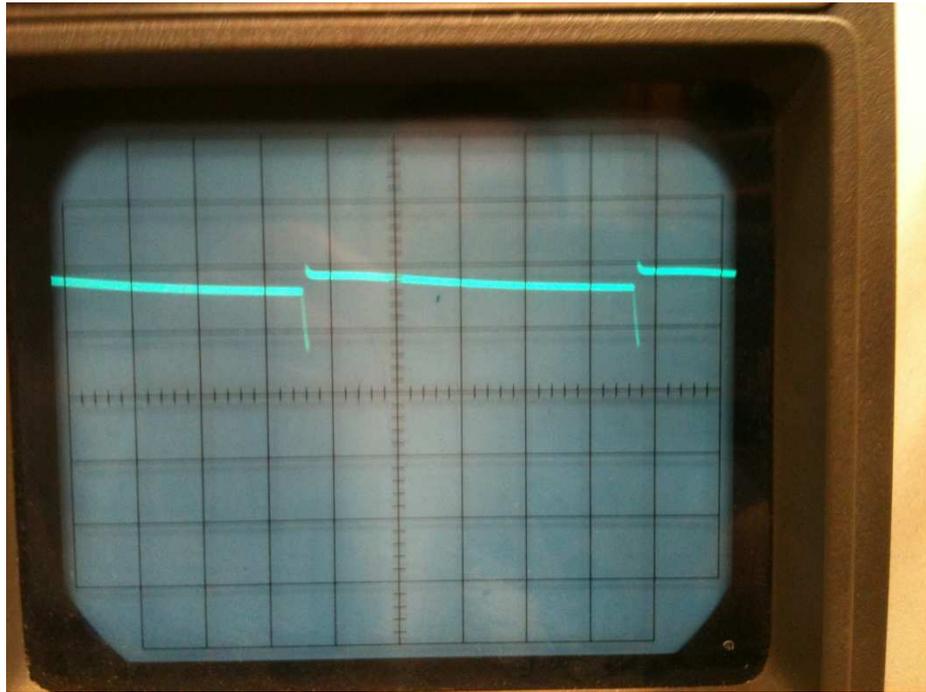


Figura 64. Imagem inicial no osciloscópio indicando os pulsos de varredura da fonte de sinal.

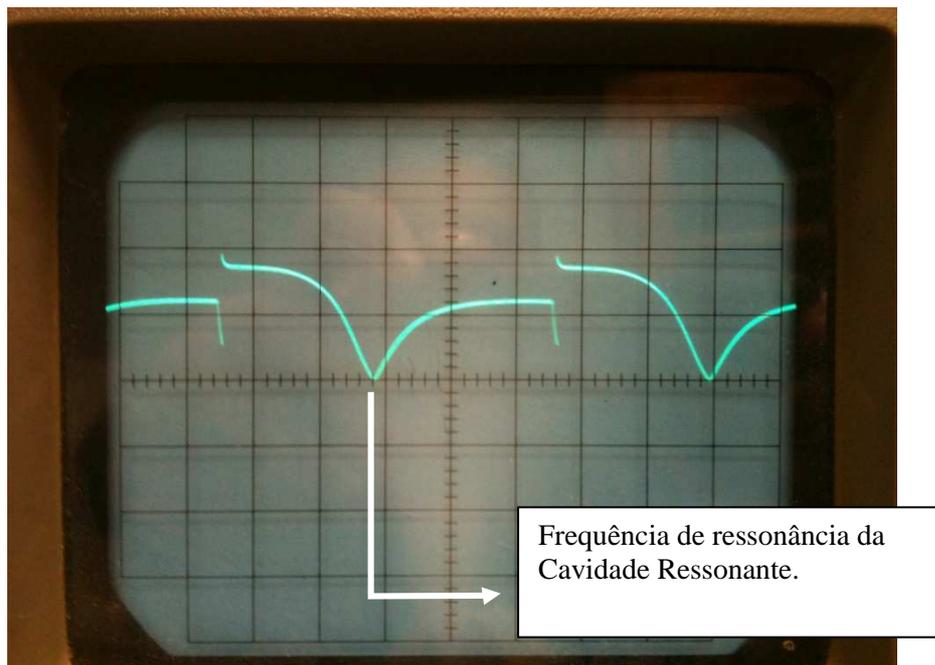


Figura 65. Imagem do osciloscópio indicando o ponto de ressonância da Cavidade Ressonante.

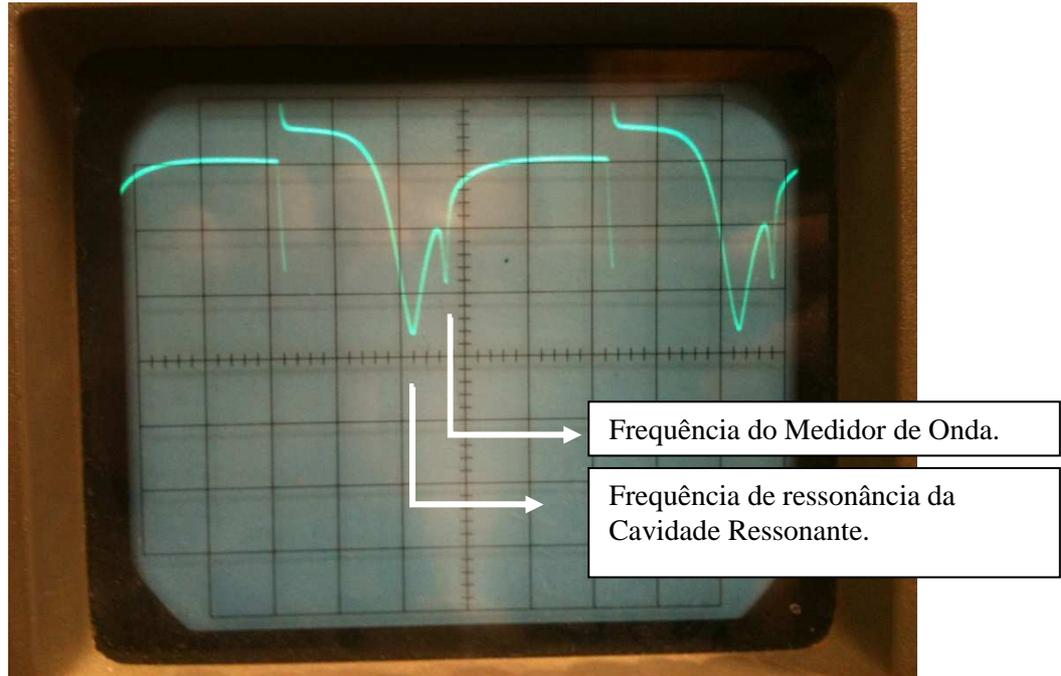


Figura 66. Imagem do osciloscópio indicando os pontos de ressonância da Cavidade Ressonante e do Medidor de Onda no ponto de -3dB (se aproximando pela direita).

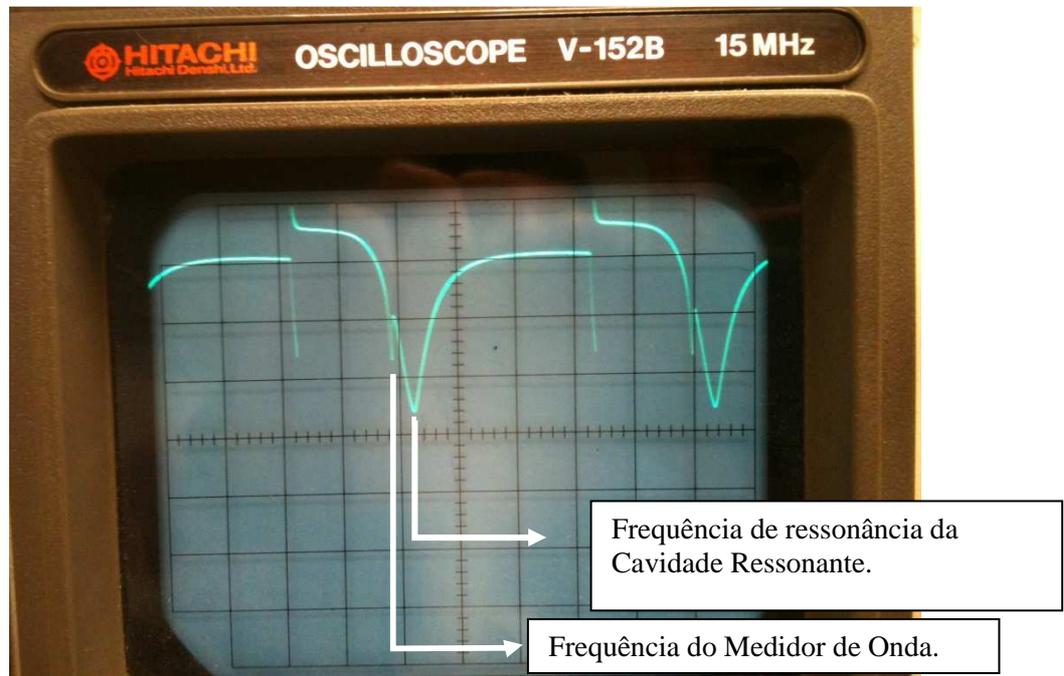


Figura 67. Imagem do osciloscópio indicando os pontos de ressonância da Cavidade Ressonante e do Medidor de Onda no ponto de -3dB (se aproximando pela esquerda).

#### 8.4 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos estão na Tab. 14. O valor da frequência de ressonância da cavidade  $f_0$  é a média entre  $f_1$  e  $f_2$ . O valor do fator de qualidade  $Q$  foi calculado conforme a Eq. 30.

**Tabela 14 – Resultados do Experimento 6.**

	Cavidade Ressonante ( $f_{\text{display}}$ em 9278 MHz)	Cavidade Ressonante + Baquelite ( $f_{\text{display}}$ em 9268 MHz)	Cavidade Ressonante + Vidro Orgânico ( $f_{\text{display}}$ em 9260 MHz)	Cavidade Ressonante + Politetrafluoretileno ( $f_{\text{display}}$ em 9285 MHz)
Leitura do Micrômetro do Medidor de Onda (posição $f_2$ ) (mm)	5,38	5,70	5,64	5,53
Leitura do Micrômetro do Medidor de Onda (posição $f_1$ ) (mm)	5,32	5,63	5,57	5,47
$f_2$ (MHz, cf. Anexo A)	9253	9213	9221	9234
$f_1$ (MHz, cf. Anexo A)	9261	9222	9229	9242
$f_0$ (MHz)	9257	9217	9225	9238
$ f_2 - f_1 $ (MHz)	8	9	8	8
$Q$	1157	1024	1153	1154

Conclusão:

Observa-se que o valor do fator de qualidade  $Q$  da cavidade ressonante permanece praticamente inalterada com a adição do material dielétrico.

Outra conclusão é que o material dielétrico altera o valor da frequência de ressonância  $f_0$  da cavidade ressonante.

## 9 CONCLUSÃO

Um laboratório para experimentos em ondas eletromagnéticas faz parte de um conjunto de ferramentas para o ensino, juntamente com aulas expositivas e simulações computacionais. Equipamentos na faixa de micro-ondas não são baratos de adquirir, mas permitem que estudantes desenvolvam a intuição e interpretação dos fenômenos físicos envolvidos.

O tópico de estudo de micro-ondas está em contínua evolução assim como os demais campos na Engenharia. Pode-se citar, por exemplo, a evolução de sistemas de comunicação sem fio com frequências cada vez maiores. As recentes descobertas na área de nanomateriais e nanoeletrônica também está introduzindo novos desafios, precisando que novos conceitos sejam estudados e que a fundamentação teórica seja gerada, já que em nanoescala os dispositivos e materiais apresentam propriedades interessantes. Está mudança de paradigma no campo de micro-ondas é similar a mudança dos tubos de vácuo para a tecnologia do semicondutor [5].

Apesar do trabalho ter sido desenvolvido em apenas quatro meses, foi possível a familiarização e aprendizado de conceitos básicos e contato com a instrumentação.

Como perspectivas futuras para a evolução deste trabalho, pode-se sugerir a realização de novos experimentos, tais como:

- Medidas de impedância para diversas cargas;
- Medida de atenuação utilizando acoplador direcional;
- Medida de perda de retorno utilizando acoplador direcional;
- Estudo do guia de onda T-híbrido (T mágico).

Também poderia ser acrescentado uma seção referente a segurança ou risco de operação destes equipamentos e o nível de potência de exposição ao qual se está submetido ao se utilizar os equipamentos.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SADIKU, Matther N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. Terceira Edição. Porto Alegre: Bookmann, 2004. ISBN 85-363-0275-5.
- [2] POZAR, David M. **Microwave Engineering**. Third Edition. United States: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 0-471-44878-8.
- [3] COLLIN, Robert E. **Foundations for Microwave Engineering**. Second Edition. New York: IEEE. New Jersey: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0-7803-6031-1.
- [4] Microsemi Gunn Diodes. Disponível em: <[http://www.microsemi.com/datasheets/MS\\_Cath\\_HS.pdf](http://www.microsemi.com/datasheets/MS_Cath_HS.pdf)>. Acesso em: 27/11/2010.
- [5] PIERANTONI, Luca; Coccetti, Fabio; RUSSER, Peter. Nanoelectronics: The Paradigm Shift. **IEEE Microwave Magazine**, New York, v. 11, n. 7, p.8-9, dez. 2010.
- [6] Treinamento em Micro-ondas modelo DH-406A. In: Minipa Kits Educacionais. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/produtos/DetailsProduct.aspx?id=417>>. Acesso em: 17/08/2010.
- [7] CHEN, L.F; ONG, K.; NEO, C.P.; VARANDAN, V.V; VARANDAN, V.K. **Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization**. England: John Wiley & Sons, 2004. ISBN 0-470-84492-2.
- [8] BAHL, Inder; BHARTIA, Prakash. **Microwave Solid State Circuit Design**. Second Edition. Canada: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0-471-20755-1.
- [9] SISTEMA de treinamento em micro-ondas: Manual de Experimentos. Minipa. 34 p.
- [10] FREQUENCY-selecting amplifier: technical description. Beijing Dahua Radio Instrument Factory. 7 p.
- [11] 3CM waveguide measuring line: technical description. Beijing Dahua Radio Instrument Factory. 8 p.
- [12] 3CM solid state signal source. Beijing Dahua Radio Instrument Factory. 8 p.
- [13] 3CM waveguide isolator. Beijing Dahua Radio Instrument Factory. 1 p.
- [14] CENTIMETER wave power meter: operation instruction. Beijing Dahua Radio Instrument Factory. 7 p.

## ANEXO A - TABELA DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE ONDA (WAVEMETER)

BD1/035A cavity wave meter										
Frequency vs Scale calibrating table (1/2) No:20071133										
F [MHz]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8580	12.707	12.692	12.677	12.662	12.646	12.631	12.616	12.601	12.586	12.571
8590	12.556	12.541	12.526	12.511	12.496	12.481	12.466	12.451	12.436	12.421
8600	12.406	12.391	12.377	12.362	12.347	12.332	12.317	12.303	12.288	12.273
8610	12.259	12.244	12.229	12.215	12.200	12.185	12.171	12.156	12.142	12.127
8620	12.113	12.098	12.084	12.069	12.055	12.040	12.026	12.012	11.997	11.983
8630	11.969	11.954	11.940	11.926	11.911	11.897	11.883	11.869	11.855	11.840
8640	11.826	11.812	11.798	11.784	11.770	11.756	11.742	11.728	11.714	11.700
8650	11.686	11.672	11.658	11.644	11.630	11.616	11.602	11.588	11.574	11.561
8660	11.547	11.533	11.519	11.505	11.492	11.478	11.464	11.450	11.437	11.423
8670	11.409	11.396	11.382	11.369	11.355	11.341	11.328	11.314	11.301	11.287
8680	11.274	11.260	11.247	11.233	11.220	11.206	11.193	11.180	11.166	11.153
8690	11.140	11.126	11.113	11.100	11.086	11.073	11.060	11.047	11.033	11.020
8700	11.007	10.994	10.981	10.968	10.954	10.941	10.928	10.915	10.902	10.889
8710	10.876	10.863	10.850	10.837	10.824	10.811	10.798	10.785	10.772	10.759
8720	10.746	10.734	10.721	10.708	10.695	10.682	10.669	10.657	10.644	10.631
8730	10.618	10.606	10.593	10.580	10.568	10.555	10.542	10.530	10.517	10.504
8740	10.492	10.479	10.467	10.454	10.441	10.429	10.416	10.404	10.391	10.379
8750	10.367	10.354	10.342	10.329	10.317	10.304	10.292	10.280	10.267	10.255
8760	10.243	10.230	10.218	10.206	10.194	10.181	10.169	10.157	10.145	10.132
8770	10.120	10.108	10.096	10.084	10.072	10.059	10.047	10.035	10.023	10.011
8780	9.999	9.987	9.975	9.963	9.951	9.939	9.927	9.915	9.903	9.891
8790	9.879	9.867	9.855	9.843	9.832	9.820	9.808	9.796	9.784	9.772
8800	9.761	9.749	9.737	9.725	9.714	9.702	9.690	9.678	9.667	9.655
8810	9.643	9.632	9.620	9.608	9.597	9.585	9.574	9.562	9.550	9.539
8820	9.527	9.516	9.504	9.493	9.481	9.470	9.458	9.447	9.435	9.424
8830	9.413	9.401	9.390	9.378	9.367	9.356	9.344	9.333	9.322	9.310
8840	9.299	9.288	9.276	9.265	9.254	9.243	9.231	9.220	9.209	9.198
8850	9.187	9.175	9.164	9.153	9.142	9.131	9.120	9.109	9.097	9.086
8860	9.075	9.064	9.053	9.042	9.031	9.020	9.009	8.998	8.987	8.976
8870	8.965	8.954	8.943	8.932	8.921	8.910	8.900	8.889	8.878	8.867
8880	8.856	8.845	8.834	8.824	8.813	8.802	8.791	8.780	8.770	8.759
8890	8.748	8.738	8.727	8.716	8.705	8.695	8.684	8.673	8.663	8.652
8900	8.641	8.631	8.620	8.610	8.599	8.588	8.578	8.567	8.557	8.546
8910	8.536	8.525	8.515	8.504	8.494	8.483	8.473	8.462	8.452	8.441
8920	8.431	8.421	8.410	8.400	8.389	8.379	8.369	8.358	8.348	8.338
8930	8.327	8.317	8.307	8.296	8.286	8.276	8.266	8.255	8.245	8.235
8940	8.225	8.215	8.204	8.194	8.184	8.174	8.164	8.153	8.143	8.133
8950	8.123	8.113	8.103	8.093	8.083	8.073	8.063	8.053	8.043	8.032
8960	8.022	8.012	8.002	7.992	7.982	7.973	7.963	7.953	7.943	7.933
8970	7.923	7.913	7.903	7.893	7.883	7.873	7.863	7.854	7.844	7.834
8980	7.824	7.814	7.804	7.795	7.785	7.775	7.765	7.756	7.746	7.736
8990	7.726	7.717	7.707	7.697	7.687	7.678	7.668	7.658	7.649	7.639
9000	7.629	7.604	7.594	7.584	7.574	7.564	7.555	7.545	7.535	7.525
9010	7.515	7.506	7.496	7.486	7.476	7.467	7.457	7.447	7.438	7.428
9020	7.418	7.409	7.399	7.389	7.380	7.370	7.360	7.351	7.341	7.332
9030	7.322	7.312	7.303	7.293	7.284	7.274	7.265	7.255	7.246	7.236
9040	7.227	7.217	7.208	7.198	7.189	7.179	7.170	7.160	7.151	7.142
9050	7.132	7.123	7.113	7.104	7.095	7.085	7.076	7.066	7.057	7.048
9060	7.038	7.029	7.020	7.010	7.001	6.992	6.983	6.973	6.964	6.955
9070	6.946	6.936	6.927	6.918	6.909	6.899	6.890	6.881	6.872	6.863
9080	6.854	6.844	6.835	6.826	6.817	6.808	6.799	6.790	6.780	6.771
9090	6.762	6.753	6.744	6.735	6.726	6.717	6.708	6.699	6.690	6.681
9100	6.672	6.663	6.654	6.645	6.636	6.627	6.618	6.609	6.600	6.591
F [MHz]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

BD1/035A cavity wave meter  
 Frequency vs Scale calibrating table (2/2) No:20071133

F[MHz]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9100	6.672	6.663	6.654	6.645	6.636	6.627	6.618	6.609	6.600	6.591
9110	6.582	6.573	6.564	6.555	6.547	6.538	6.529	6.520	6.511	6.502
9120	6.493	6.485	6.476	6.467	6.458	6.449	6.440	6.432	6.423	6.414
9130	6.405	6.396	6.388	6.379	6.370	6.361	6.353	6.344	6.335	6.327
9140	6.318	6.309	6.301	6.292	6.283	6.275	6.266	6.257	6.249	6.240
9150	6.231	6.223	6.214	6.205	6.197	6.188	6.180	6.171	6.163	6.154
9160	6.145	6.137	6.128	6.120	6.111	6.103	6.094	6.086	6.077	6.069
9170	6.060	6.052	6.043	6.035	6.026	6.018	6.010	6.001	5.993	5.984
9180	5.976	5.967	5.959	5.951	5.942	5.934	5.925	5.917	5.909	5.900
9190	5.892	5.884	5.875	5.867	5.859	5.850	5.842	5.834	5.826	5.817
9200	5.809	5.801	5.792	5.784	5.776	5.768	5.759	5.751	5.743	5.735
9210	5.727	5.718	5.710	5.702	5.694	5.686	5.678	5.669	5.661	5.653
9220	5.645	5.637	5.629	5.621	5.612	5.604	5.596	5.588	5.580	5.572
9230	5.564	5.556	5.548	5.540	5.532	5.524	5.516	5.508	5.500	5.492
9240	5.483	5.475	5.467	5.460	5.452	5.444	5.436	5.428	5.420	5.412
9250	5.404	5.396	5.388	5.380	5.372	5.364	5.356	5.348	5.340	5.333
9260	5.325	5.317	5.309	5.301	5.293	5.285	5.277	5.270	5.262	5.254
9270	5.246	5.238	5.231	5.223	5.215	5.207	5.199	5.192	5.184	5.176
9280	5.168	5.161	5.153	5.145	5.137	5.130	5.122	5.114	5.106	5.099
9290	5.091	5.083	5.076	5.068	5.060	5.053	5.045	5.037	5.030	5.022
9300	5.014	5.007	4.999	4.992	4.984	4.976	4.969	4.961	4.954	4.946
9310	4.938	4.931	4.923	4.916	4.908	4.901	4.893	4.886	4.878	4.870
9320	4.863	4.855	4.848	4.840	4.833	4.825	4.818	4.810	4.803	4.796
9330	4.788	4.781	4.773	4.766	4.758	4.751	4.743	4.736	4.729	4.721
9340	4.714	4.706	4.699	4.692	4.684	4.677	4.669	4.662	4.655	4.647
9350	4.640	4.633	4.625	4.618	4.611	4.603	4.596	4.589	4.581	4.574
9360	4.567	4.560	4.552	4.545	4.538	4.531	4.523	4.516	4.509	4.502
9370	4.494	4.487	4.480	4.473	4.465	4.458	4.451	4.444	4.437	4.429
9380	4.422	4.415	4.408	4.401	4.394	4.386	4.379	4.372	4.365	4.358
9390	4.351	4.344	4.336	4.329	4.322	4.315	4.308	4.301	4.294	4.287
9400	4.280	4.273	4.266	4.258	4.251	4.244	4.237	4.230	4.223	4.216
9410	4.209	4.202	4.195	4.188	4.181	4.174	4.167	4.160	4.153	4.146
9420	4.139	4.132	4.125	4.118	4.111	4.104	4.098	4.091	4.084	4.077
9430	4.070	4.063	4.056	4.049	4.042	4.035	4.028	4.022	4.015	4.008
9440	4.001	3.994	3.987	3.980	3.973	3.967	3.960	3.953	3.946	3.939
9450	3.932	3.926	3.919	3.912	3.905	3.898	3.892	3.885	3.878	3.871
9460	3.865	3.858	3.851	3.844	3.837	3.831	3.824	3.817	3.811	3.804
9470	3.797	3.790	3.784	3.777	3.770	3.764	3.757	3.750	3.743	3.737
9480	3.730	3.723	3.717	3.710	3.703	3.697	3.690	3.684	3.677	3.670
9490	3.664	3.657	3.650	3.644	3.637	3.631	3.624	3.617	3.611	3.604
9500	3.598	3.591	3.584	3.578	3.571	3.565	3.558	3.552	3.545	3.539
9510	3.532	3.526	3.519	3.513	3.506	3.499	3.493	3.486	3.480	3.473
9520	3.467	3.461	3.454	3.448	3.441	3.435	3.428	3.422	3.415	3.409
9530	3.402	3.396	3.389	3.383	3.377	3.370	3.364	3.357	3.351	3.345
9540	3.338	3.332	3.325	3.319	3.313	3.306	3.300	3.294	3.287	3.281
9550	3.274	3.268	3.262	3.255	3.249	3.243	3.236	3.230	3.224	3.217
9560	3.211	3.205	3.199	3.192	3.186	3.180	3.173	3.167	3.161	3.155
9570	3.148	3.142	3.136	3.130	3.123	3.117	3.111	3.105	3.098	3.092
9580	3.086	3.080	3.073	3.067	3.061	3.055	3.049	3.042	3.036	3.030
9590	3.024	3.018	3.011	3.005	2.999	2.993	2.987	2.981	2.975	2.968
9600	2.962	2.956	2.950	2.944	2.938	2.932	2.926	2.919	2.913	2.907
9610	2.901	2.895	2.889	2.883	2.877	2.871	2.865	2.859	2.852	2.846
9620	2.840	2.834	2.828	2.822	2.816	2.810	2.804	2.798	2.792	2.786
F[MHz]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

calibrating date: 2007.12

**ANEXO B - TABELA DE CALIBRAÇÃO DO ATENUADOR VARIÁVEL (VARIABLE ATTENUATOR)**

## DH13502B Variable Attenuator

Attenuation vs Scale calibrating table

No. 20070916

Attenuation (dB)	Frequency (MHz)		
	8600	9370	9600
0	0.079	0.079	0.079
2	1.117	1.119	1.121
4	1.526	1.531	1.535
6	1.831	1.842	1.850
8	2.091	2.105	2.119
10	2.318	2.344	2.362
12	2.526	2.561	2.589
14	2.722	2.770	2.797
16	2.905	2.962	2.994
18	3.076	3.134	3.169
20	3.238	3.299	3.331
22	3.410	3.450	3.489
24	3.551	3.589	3.630
26	3.697	3.720	3.760
28	3.841	3.842	3.883
30	3.984	3.954	3.996

Calibrating date 2007.9.10

## ANEXO C – DESCRIÇÃO DO GUIA DE ONDA RETANGULAR

O guia de onda utilizado nas experiências práticas possui seção reta retangular, conforme mostram as Figs. 68 e 69. As medidas principais são: largura “a” igual a 0,023 m e altura “b” igual a 0,010 m. As medidas do guia de onda são importantes pois influenciam nos modos que podem se propagar no guia de onda. O guia de onda é preenchido com ar, exceto quando especificado em contrário, como no Experimento 6 em que é colocado um dielétrico numa fenda do guia. O eixo z é tomado como referência para a direção de propagação.



Figura 68. Imagem da seção reta do guia de onda.

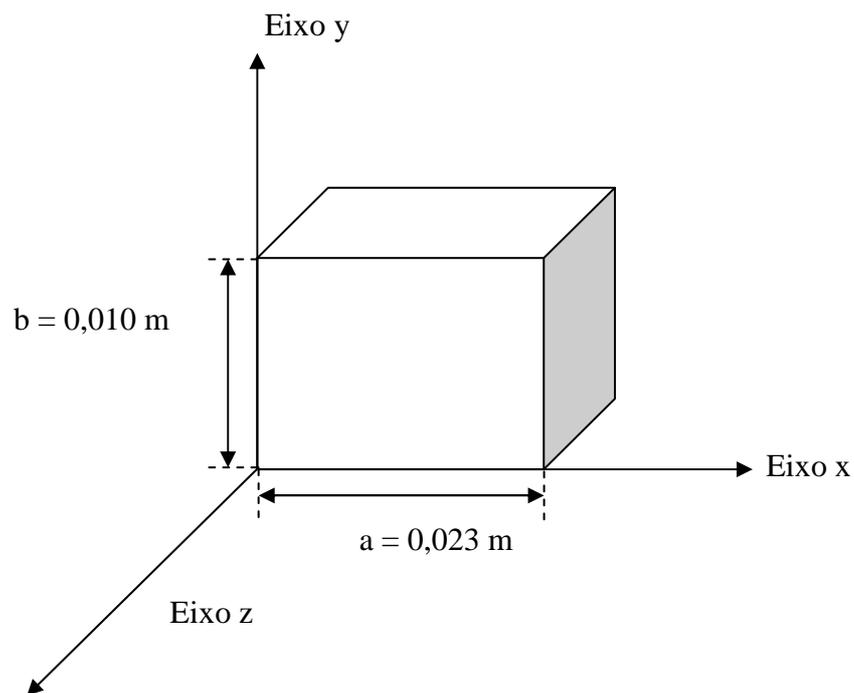


Figura 69. Geometria do guia retangular.

Num guia de onda somente os modos Transverso Elétrico (TE) e Transverso Magnético (TM) podem se propagar. Logo, nos guias de onda os modos Transverso Eletromagnético (TEM) não se propagam [3].

Com a informação da geometria do guia de onda, podem-se calcular os modos que serão propagados e os modos que serão atenuados.

Para propagação da onda eletromagnética a constante de propagação  $\beta$  deve ser real [2], de tal forma que a seguinte desigualdade dada deve ser satisfeita:

$$\left(\frac{m}{2 * a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2 * b}\right)^2 < \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2, \quad (31)$$

onde:

- m e n são números inteiros para os quais existe uma solução das equações de Maxwell aplicada as condições de contorno, caracterizando um determinado modo de propagação da onda. Os modos TE ou TM são descritos por  $TE_{m,n}$  e  $TM_{m,n}$ , respectivamente;
- a e b são as medidas do guia retangular, onde  $a > b$ ;
- $\lambda$  é o comprimento de onda no espaço livre, já que o guia está preenchido com ar.

Utilizando-se os valores mostrados na Tab. 15, podem-se calcular os modos de propagação. Os resultados da Tab. 16 mostram que o guia de onda da Fig. 69 foi projetado para que o modo  $TE_{10}$  seja o modo de propagação dominante.

**Tabela 15 – Valores utilizados para cálculo dos modos de propagação.**

Símbolo	Valor	Definição
c	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$	Velocidade da luz.
f <sub>1</sub>	8600 MHz	Frequência mais baixa da fonte de sinal utilizada.
f <sub>2</sub>	9600 MHz	Frequência mais elevada da fonte de sinal utilizada.
$\lambda_1 = c/f_1$	0,03488 m	Comprimento de onda na f <sub>1</sub> .
$\lambda_2 = c/f_2$	0,03125 m	Comprimento de onda na f <sub>2</sub> .
$\left(\frac{1}{\lambda_1}\right)^2$	821,778 m <sup>-2</sup>	Utilizado no lado direito do cálculo da desigualdade (Eq. 31).
$\left(\frac{1}{\lambda_2}\right)^2$	1024 m <sup>-2</sup>	Utilizado no lado direito do cálculo da desigualdade (Eq. 31).
a	0,023 m	Largura do guia, dimensão horizontal.
B	0,010 m	Altura do guia, dimensão vertical.

**Tabela 16 – Resultados do cálculo para os modos de propagação.**

	m	n	$\beta$	Para f1	Para f2
TE	1	0	472,59	Propaga	Propaga
	0	1	2500,00	Não Propaga	Não Propaga
	1	1	2972,59	Não Propaga	Não Propaga
	2	0	1890,36	Não Propaga	Não Propaga
TM	1	1	2972,59	Não Propaga	Não Propaga

A faixa de frequência na qual somente o modo dominante se propaga é dado por:

$$\frac{c}{2a} < f_c < \frac{c}{a},$$

(32)

$$\frac{3 \times 10^8}{2(0,023)} < f_c < \frac{3 \times 10^8}{0,023},$$

(33)

$$6,52 \text{ GHz} < f_c < 13,04 \text{ GHz} ,$$

(34)

onde:

- $f_c$  é denominada frequência de corte;
- $c$  é a velocidade da luz em metros por segundo;
- $a$  é a largura do guia de onda dada em metros, para  $a > b$ .

Dessa maneira, verifica-se que para o modo  $TE_{10}$ , isto é, o modo dominante, haverá propagação na faixa de frequências que opera a fonte de sinal de micro-ondas (de 8,6 GHz até 9,6 GHz).