

2 Transdutores de Potência

2.1 Medição de potência de sinais de rádio-frequência

O diagrama esquemático ilustrado na Figura 9 apresenta o método tradicionalmente usado para medição da potência de sinais de rádio-frequência (RF – frequências entre 9KHz e 110GHz).

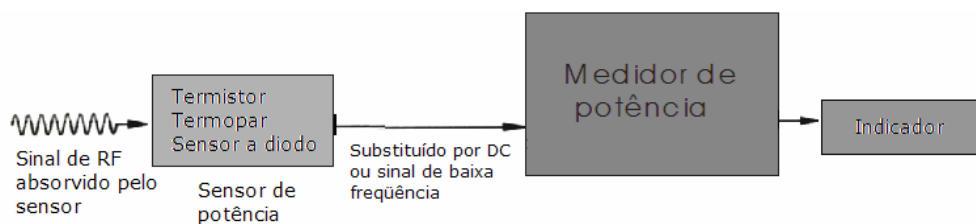


Figura 9- Diagrama Esquemático de um Sistema de Medição de Potência.

O sensor de potência converte o sinal de alta frequência e alta potência para um sinal DC ou de baixa frequência, de modo a permitir que o medidor de potência possa medir e registrar o nível do sinal de potência em RF. Três são os tipos de sensores de potência: termistores, termopares e diodos detectores. Os dois primeiros se baseiam no princípio de que a potência incidente em um corpo se transforma em calor, de forma diretamente proporcional. Assim, medindo-se a temperatura, pode-se estimar indiretamente a potência incidente.

O diodo detector, foco dessa dissertação e descrito em mais detalhes na seção 2.1.3, é baseado em um circuito de retificação, que gera um sinal DC diretamente proporcional à amplitude do sinal de alta frequência.

Os benefícios e limitações associadas com cada tipo de sensor são descritos a seguir.

2.1.1 Termistores

Termistores, como o próprio nome indica, são resistores cuja resistência varia com a temperatura, seguindo uma curva característica típica como a mostrada na Figura 10.

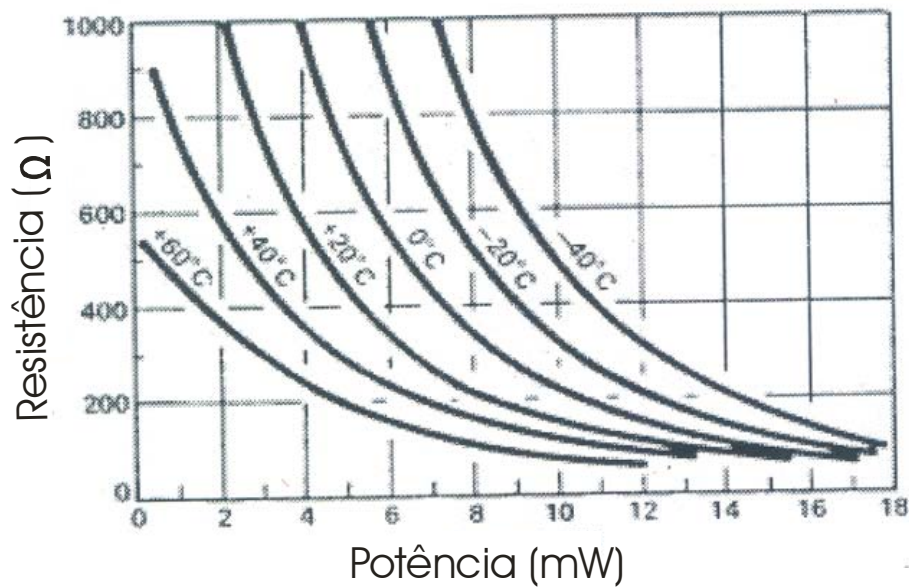


Figura 10 – Curva Característica de um Termistor Típico.

Os termistores são usados acoplados a cabos coaxiais ou a guias de onda, de modo que tenham um ponto em comum com a linha de transmissão usada em microondas e frequências de RF. O termistor e o esquema de sua montagem devem ser especificados para satisfazer vários requisitos técnicos importantes, de modo que o sensor absorva tanta potência incidente quanto possível.

Inicialmente, o sensor deve apresentar um bom casamento (acoplamento) de impedância com a linha de transmissão, de acordo com a faixa de frequência. O sensor deve também ter baixa resistência e baixas perdas no dielétrico dentro da estrutura e montagem, pois somente a potência dissipada no elemento termistor pode ser registrada no medidor. Além disso, sua colocação deve prover isolamento contra variações de temperatura e vibração, evitando vazamento da potência de microondas. Proteções são também importantes para prevenir RF indesejáveis, usualmente captadas pelo termistor.

Nas montagens mais modernas, há um segundo estágio para compensar e corrigir as variações de temperatura. Essas compensações são feitas de acordo com a característica resistência-temperatura do termistor.

2.1.2 Termopares

Quando dois metais ou semicondutores dissimilares são conectados e as junções mantidas a temperaturas distintas, quatro fenômenos ocorrem simultaneamente: o efeito Seebeck, o efeito Peltier, o efeito Thomson e o efeito Volta. Para os termopares, o mais relevante é o efeito Seebeck, que se produz pelo fato de que os elétrons livres de um metal diferem de um condutor para outro, e depende da temperatura.

2.1.2.1 Utilização dos Termopares

O dispositivo é formado por dois fios metálicos conectados na forma indicada na Figura 11, observando-se por meio de um milivoltímetro o aparecimento de uma tensão (f.e.m), que depende da temperatura.

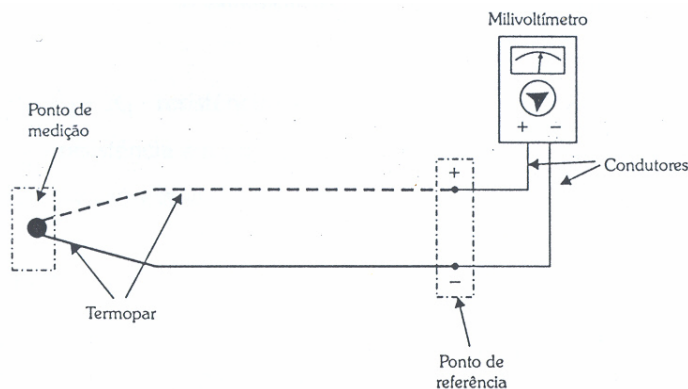


Figura 11 – Tensão medida, relacionada com a diferença de temperatura.

Na prática, para medição de temperaturas, o efeito termoelétrico é utilizado da seguinte forma: Interligam-se os fios em um dos extremos (ponto de medição), submetem-se os outros dois extremos a uma temperatura constante (ponto de referência) e fecha-se o circuito por meio de um aparelho indicador. A tensão medida é relacionada com a diferença de temperatura entre o ponto de medição e o de referência.

O ponto de referência situa-se geralmente em um local com temperatura constante conhecida, e ligada no ponto de medição por meio de um fio de compensação.

2.1.2.2 Características dos Termopares

A tecnologia atualmente empregada na fabricação de termopares utiliza filmes finos e semicondutores, de modo a proporcionar melhor exatidão, robustez e reprodutibilidade aos sensores de potência.

O termopar tem sido a tecnologia de detecção escolhida para medição de potências de RF e microondas desde sua introdução em 1974. Pelo menos dois motivos justificam a sua aplicação: 1) Exibe sensibilidade mais alta que os termistores; e 2) Possui uma característica de detecção inerente à lei do quadrado (a potência de RF de entrada é proporcional à tensão DC de saída).

Termopares e termistores respondem com um valor proporcional ao sinal de potência, sendo com isso ideais para todos os tipos de formatos notáveis de CW, para modulações de fase digitais complexas.

Cabe notar que os termopares conseguem medir potências mais baixas (até -30dBm), e têm incerteza mais baixa, devido a um mais baixo SWR (*Standing Wave Ratio*) - Taxa de Onda Estacionária.

Considerando que a tensão produzida em um termopar está na ordem de microvolts, normalmente muitos pares de junções ou termopares são conectados em série, em estruturas chamadas termopilhas, fazendo com que a tensão produzida por um termopar seja acrescida pelo próximo e assim por diante, gerando uma tensão termoelétrica de saída maior.

2.1.3 Detector a Diodo

Diodos retificadores têm sido usados há muito tempo como detectores para medição de potência relativa de frequências de microonda. Diodos convertem energia de alta frequência em DC, usando propriedades de retificação.

A vantagem do diodo é que este pode ser usado para medição de valores baixíssimos de potência. Como se pode notar na Figura 12, a região da lei do quadrado (na qual a tensão de saída é diretamente proporcional à potência incidente) é de -70dBm a -20dBm.

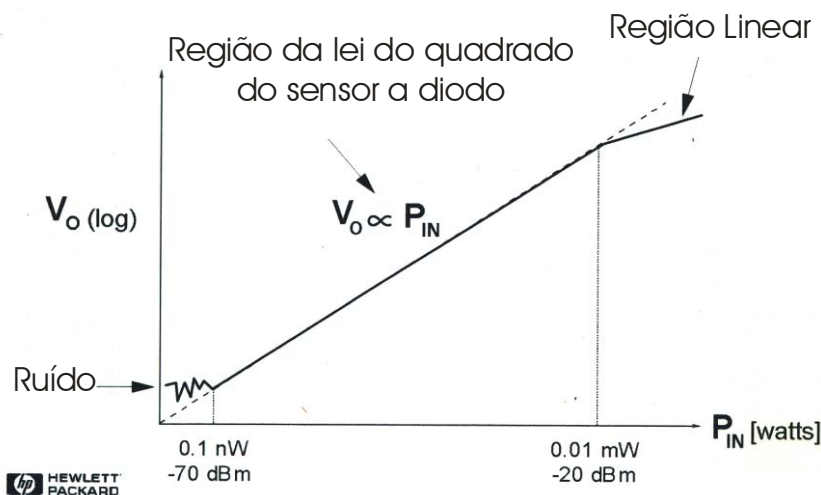


Figura 12 – A região da lei do quadrado do diodo.

Muitos tipos de diodos têm sido usados para medição de potência, sendo o diodo de Schottky normalmente o tipo mais usado. Nesta dissertação, discutir-se-á o diodo usado nos sensores a diodo, denominado PDB (*planar-doped-barrier*). Diodos de PDB têm desempenho melhor que diodos de Schottky em frequências de microondas. Um sensor baseado nesta tecnologia é capaz de detectar e medir potências tão baixas quanto o Schottky (-70dBm), mas com frequências até 18GHz.

O diodo de tecnologia PDB é 3.000 vezes (35dB) mais eficiente na conversão de RF para DC do que o termopar. A tecnologia do sensor de diodo supera o sensor de termopar em sensibilidade, embora este mantenha uma vantagem primária na faixa de -30 a +20dBm.

Nos níveis de detecção de potência de 100pW (-70dBm), o detector a diodo tem saída de aproximadamente 50nV. O baixo nível do sinal requer um amplificador sofisticado e um circuito “chopper” designado para prevenir fuga de sinal e ruídos espúrios.

2.1.3.1 Princípio de funcionamento

A figura 13 mostra um circuito simplificado do detector de diodo. O resistor de casamento (*matching*) tem aproximadamente 50Ω na terminação para o sinal de

RF. A tensão de RF é transformada em tensão DC no diodo, o capacitor C_b tem a função de filtro passa baixa, de modo a remover qualquer sinal de RF que queira passar pelo diodo. A tensão DC (V_o) é transformada em um sinal AC e então enviada para o medidor de potência, que recupera a tensão DC, relatando esta como a potência do sinal de RF.

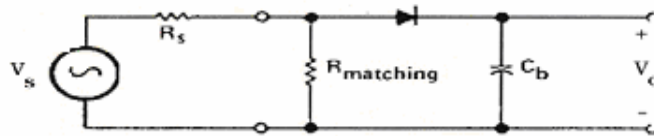


Figura 13 – Esquema básico de utilização de um diodo para medição da potência de sinais de rádio-freqüência.

2.2

Wattímetros

O wattímetro é um instrumento desenvolvido para medição de potência. Há um wattímetro específico para cada faixa de freqüência, desde áudio até rádio-freqüência. Nesta dissertação, dar-se-á destaque ao wattímetro empregado para medidas de RF, ou seja, freqüências entre 450kHz e 2,3GHz. Descrevem-se a seguir os principais tipos de wattímetros empregados em sistemas de rádio-freqüência.

2.2.1

Tipos de Wattímetros

Existem basicamente dois tipos de wattímetros: os THRULINE e os TERMALINE, os quais são classificados de acordo com a posição em que ocupam na linha de transmissão.

2.2.1.1

Wattímetros do Tipo ThruLine

THRULINE, do inglês “*through the line*” (através da linha); refere-se a wattímetro inserido em série com a linha de transmissão, ou seja, entre o transmissor e a antena. Possui característica de não dissipar nenhuma potência

durante o processo de medição, captando por indução uma pequena amostra do sinal transmitido, conforme indicado na Figura 14.

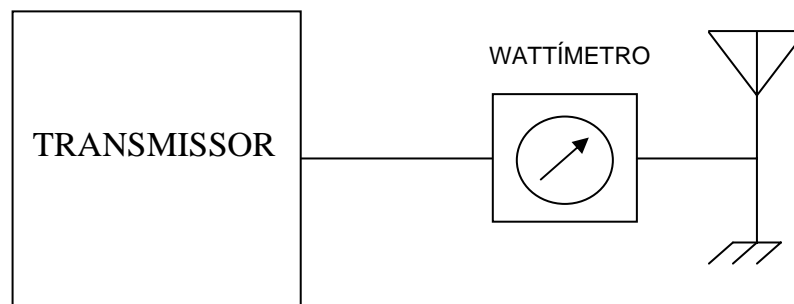


Figura 14 – Wattímetro do tipo thurline.

2.2.1.2 Wattímetros do Tipo Termaline

TERMALINE, do inglês “*terminal*” (terminação da linha) é um wattímetro inserido em paralelo com a linha de transmissão, no lugar da antena, ou seja, a antena é desconectada e em seu lugar é inserido o wattímetro, conforme indicado na Figura 15. Em conseqüência, o wattímetro absorve e dissipa toda a potência do transmissor.

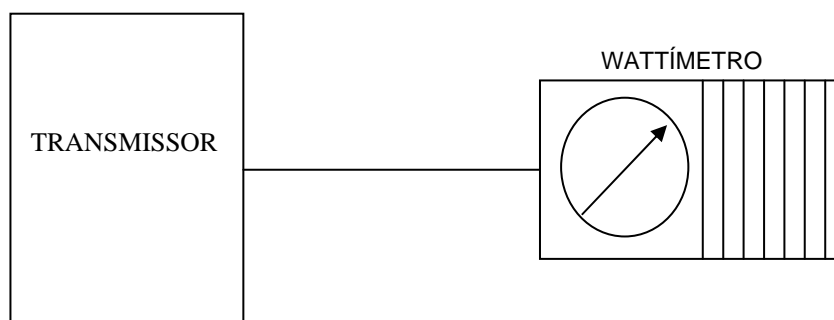


Figura 15 – Wattímetro do tipo Termaline.

2.3 Modelos de wattímetros do tipo thurline

Há no mercado uma grande variedade de wattímetros do tipo Thurline, sendo o mais conhecido e empregado na FAB o modelo 43 e variações, fabricado pela Bird Electronic Corporation, usado em sinais CW com modulações em AM e FM. O modelo analógico 4314B é usado para sinais CW, AM, FM e ainda sinais

modulados por pulso. O modelo 4391M, digital, com teclado seletor para diversos tipos de medidas, mede potência direta, refletida, com modulação por pulso, porcentagem de modulação e etc.

O modelo NAUS-4, fabricado pela empresa alemã Rohde & Schwarz, responde a uma banda de frequência de 25MHz até 1000MHz e mede até 110W com um único sensor de potência.

Em seguida, descreve-se brevemente cada um destes modelos de wattímetro.

2.3.1 Wattímetro Modelo 43

Assim como a maioria dos wattímetros, o modelo 43 da Bird é projetado para trabalhar em uma linha de transmissão coaxial de 50Ω . Faz medições de potência direta e refletida de sinais CW ou sinais modulados em AM, FM ou envelopes de TV, mas não sinais modulados por Pulso. A leitura é diretamente feita em Watts e as escalas são graduadas em 25W, 50W e 100 W. A faixa de frequência e potência é selecionada no wattímetro 43 por meio da inserção de um detector no soquete da seção de linha de RF. A escala de leitura é determinada pelo elemento detector. No detector existem várias informações: a potência de fundo de escala, a faixa de frequência e uma seta que indica o sentido da potência (direta ou refletida).



Figura 16 – Wattímetro modelo 43.

O wattímetro 43 possui inúmeras aplicações, como por exemplo:

- medição de potência de carga (diferença entre a potência direta e a refletida);
- medição da potência de saída de um transmissor;
- teste de linhas de transmissão, atenuadores, filtros;
- medições de casamento de impedâncias e etc.

2.3.2

Wattímetro Modelo 4410

Este wattímetro é bastante semelhante ao modelo 43, também tendo sido desenvolvido para medição de potência em uma linha de transmissão coaxial de 50Ω , com a característica de fazer medidas de sinais CW, AM, FM, SSB, TV e também sinais modulados por PULSO. Emprega o mesmo sistema de seção de linha de RF com a inserção de um elemento detector, que deve ser girado no sentido da medida que se pretende: direta, quando aponta para a antena ou carga; e inversa, quando aponta para o transmissor.

Para se selecionar o tipo de sinal a ser medido, existe uma chave na frente do painel. Na posição CW o wattímetro 4410 funciona exatamente como o wattímetro 43, e a chave conecta os terminais do detector diretamente aos terminais do galvanômetro. Na posição “PEAK” a chave conecta o sinal do detector ao circuito projetado para medidas de Pulso. Este circuito é alimentado por duas baterias alcalinas internas de 9V ou por um adaptador externo de 115/220V ac. Sempre que não se estiver usando a função PEAK, deve-se manter a chave seletora na posição CW, para evitar o desgaste desnecessário das baterias.

Uma grande variedade de detectores de RF está disponível nas frequências de 0,45MHz a 2300Mhz e nas potências de 1W até 10kW. A maioria destes elementos é projetada para leituras de todos os tipos de sinais CW ou PEAK, mas alguns são projetados apenas para sinais de Pulso.



Figura 17 – Wattímetro modelo 4410.

2.3.3 Wattímetro Modelo 4391M

Também fabricado pela Bird, este modelo é um wattímetro Thurline digital de múltiplas funções, desenvolvido com base em um microprocessador. Um extenso programa armazenado em memória permanente controla toda a operação do instrumento, permitindo a detecção e manipulação das informações captadas pelos elementos detectores. Assim, é possível computar funções tais como:

- potência direta e inversa em CW ou sinais modulados em amplitude medidas em Watts ou dBm;
- potência de pulso;
- VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) – Taxa em tensão da onda estacionária;
- porcentagem de modulação, etc.



Figura 18 – Wattímetro modelo 4391M.

A potência e a faixa de frequências dependem do detector empregado, já que este modelo foi desenvolvido para usar os mesmos detectores do wattímetro modelo 43, podendo variar entre 100mW e 10kW e entre 450kHz e 2,3GHz. O detector para a potência refletida deve ter um décimo da capacidade daquele escolhido para a potência direta.

O wattímetro é composto por um teclado de funções, duas chaves seletoras de escalas, por meio das quais se pode optar por leituras em miliwatts, watts ou quilowatts, dependendo do detector em uso, e dois soquetes para encaixe dos elementos detectores para potência direta e refletida.

As chaves de escalas são posicionadas conforme o elemento detector, por isso têm valores de 2,5/5/10, seguidos do multiplicador. Por exemplo: com o detector 25C no soquete Forward, a primeira chave deve indicar 2,5 e a segunda, do multiplicador, deve indicar X10. O 4391M é alimentado por um kit de baterias recarregáveis de níquel-cádmio ou conectado à rede de 115/230V ac.

Os elementos detectores usados no 4391M são os mesmos do wattímetro 43, podendo portanto ser calibrados separadamente. O 4391M, apesar de ser um instrumento digital, apresenta uma incerteza maior, ou seja, pior que a do Wattímetro 43, aconselhando-se portanto efetuar a calibração dos detectores com um modelo 43 previamente calibrado.

2.3.4 Wattímetro Modelo NAUS 4

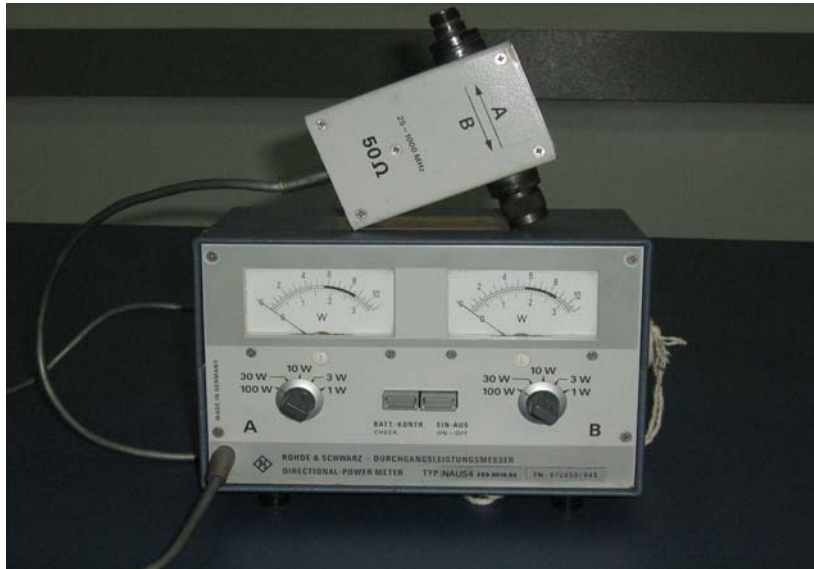


Figura 19 – Wattímetro modelo NAUS 4.

O NAUS 4, produzido pela empresa alemã Rohde & Schwarz, é um wattímetro do tipo Thruline, também especificado para trabalhar em uma linha coaxial de 50Ω. Diferentemente dos wattímetros da Bird, este não utiliza o sistema de detectores para determinação da potência e frequência, possuindo um único sensor capaz de medir frequências de 25MHz até 1000MHz e potência de até 110W, direta e refletida, simultaneamente indicados em dois medidores no painel frontal.

Este wattímetro pertence à série NAUS, cuja diferença básica é a capacidade de medida de potência, com a mesma faixa de frequência, vide abaixo:

- NAUS 3 – até 34W;
- NAUS 4 – até 110W;
- NAUS 5 – até 340W; e
- NAUS 6 – até 1100W.

O sensor é composto por dois acopladores direcionais que captam, retificam, filtram o sinal da linha e enviam este sinal para dois amplificadores distintos, que irão trabalhar este sinal e fazer a medição em dois galvanômetros, um para a potência direta e o outro para a refletida. São capazes de medir sinais de AM, FM,

SSB, TV e outros sinais modulados em amplitude com exceção dos sinais modulados por pulso.

O sensor poderá ser inserido na linha de transmissão em qualquer posição; se a seta A estiver apontando para a antena (carga), o galvanômetro da esquerda medirá a potência direta, e o da direita, a refletida; se ao contrário, a seta B estiver apontando para a antena (carga), o galvanômetro da direita medirá a potência direta, e o da esquerda, a refletida.

2.4

Modelos de wattímetros do tipo termaline

Os wattímetros do tipo Termaline existem em menor quantidade, pois podem ser substituídos, com vantagens, pelos do tipo Thruline.

Um wattímetro Termaline mede a potência dissipada em sua própria terminação (carga fantasma), o que não é uma situação ideal para quem precisa sintonizar uma antena, por exemplo. Além disso, o Termaline pode ser substituído por um Thruline seguido de uma carga. A seguir, apresentam-se dois modelos que dão a idéia de como funciona esta construção: os wattímetros modelos 612 e o 6155, ambos da Bird.

2.4.1

Wattímetro Modelo 612

Este wattímetro da Bird também é projetado para medir potência de RF numa linha coaxial de 50Ω . Por ser do tipo Termaline, ele toma o lugar da antena, tornando-se a carga resistiva do transmissor, proporcionando uma terminação coaxial praticamente sem reflexão até 1000MHz.

A potência é medida em duas escalas, de 20W e 80W, selecionadas pelo encaixe de um diodo cristal 1N79 no soquete correspondente. O resistor de 50Ω , tal qual o modelo 6155, é submerso em um tanque de óleo, que tem a propriedade de transmitir a energia dissipada no resistor para as aletas de refrigeração. Neste modelo o circuito retificador do voltímetro é integrado ao corpo do resistor e não utiliza a técnica do detector.



Figura 20 – Wattímetro modelo 612.

O princípio empregado para a medida é o da tensão ao quadrado dividida pela resistência, ou seja, a potência do transmissor aplicada à carga de 50Ω desenvolve uma tensão equivalente que é convertida em Watts e medida pelo galvanômetro.

2.4.2 Wattímetro Modelo 6155

O wattímetro modelo 6155 mede potências de RF moduladas em amplitude, em uma linha coaxial de 50Ω , em duas escalas: 50W e 150W; responde à faixa de frequências de 2MHz a 30MHz, com uma incerteza de $\pm 5\%$ de Escala Cheia.



Figura 21 – Wattímetro modelo 6155.

É composto por uma terminação resistiva de 50Ω que é submersa em um tanque de óleo, cujas propriedades refrigerantes transportam a energia dissipada (calor) do resistor para as aletas exteriores. Possui uma seção de RF similar à do wattímetro 43, porém fixa a esta terminação. Nesta seção de RF é inserido um detector idêntico ao modelo 50H (50W/2 a 30MHz), que recebe o sinal da linha de transmissão, retifica, filtra e envia uma corrente DC para o galvanômetro. Este é acoplado a uma caixa onde existe a chave seletora das escalas de 50 e 150W. Na posição de 150W, a chave posiciona um resistor em paralelo com o galvanômetro para drenar o excesso de corrente e estender a escala até os 150W. Na posição de 50W, a chave está aberta, desconectando o resistor, e toda a corrente captada pelo detector atravessa o galvanômetro.

O próximo Capítulo apresenta a metodologia de calibração proposta nesta dissertação.