

Faraday Waves

A *Faraday Waves* é um sistema que permite fazer experiências com três tipos de ondas: eletromagnéticas, acústicas e mecânicas. Basicamente são três demonstradores que permitem fazer experiências correlacionadas, mas que são feitas com os três tipos de ondas. A dimensão do espaço de propagação das diferentes ondas é de 1,5 m linear. Este demonstrador foi inspirado nas lições do Prof. John Shive, realizadas nos [Bell Labs](#), em 1959, usando a demonstração de ondas mecânicas na chamada [wave machine](#).

Demonstrador- Onda eletromagnética

Este demonstrador, designado por *Faraday Electric Wave*, é baseado na [linha de Lecher](#), que foi proposta em 1888 por [Ernst Lecher](#) (1856-1926), para medir comprimentos de onda e problemas de adaptação e desadaptação de impedância de linhas de transmissão. Lecher seguiu os [trabalhos de Heinrich Hertz](#), realizados em 1886, nos quais criou várias experiências para provar a existência de ondas eletromagnéticas, ondas que tinham sido previstas por [James Maxwell](#) (1831-1879).

A simplicidade da linha de Lecher e o facto de não precisar de equipamentos de medida muito sofisticados foi, ao longo dos tempos, usada por muitos investigadores. A linha de Lecher foi realizada por vários fabricantes de equipamentos científicos como instrumento pedagógico para realizar medidas em sistemas de radio frequência. Um dos primeiros usos da Linha de Lecher foi feito em 1891, por [René Blondlot](#) (1849-1930) para medir a velocidade das ondas eletromagnéticas [e confirmar que era igual à da luz](#), mas Hertz já tinha feito medidas parecidas. Blondlot concluiu, assim, que estas ondas eram luz embora com uma natureza diferente. Em 1946, a revista [Radio News, nº 3](#), publicou uma aplicação da linha de Lecher para medir a frequência e a absorção de energia de rádio frequência¹.

A Faraday Electric Wave

A Faraday Electric Wave é um sistema constituído por um gerador de radiofrequência, e uma linha bifilar de Lecher, onde é possível fazer um certo número de experiências (curtos circuitos, circuitos abertos, carregar com uma dada impedância, etc.). Como a linha de Lecher é simétrica (equilibrada em relação a um potencial de referência, que designaremos por massa, é necessário dispor de um conversor de linha não balanceada típica da saída coaxial dos geradores de rádio frequência, RF, com impedância de saída de 50 Ω para a linha balanceada de Lecher cuja impedância vai variar, segundo veremos mais adiante, entre 188 Ω e 275 Ω .

A potência de saída do gerador de radiofrequência é amplificada por um amplificador de potência, PA, com saída coaxial, a que se segue um medidor de onda estacionária, SWR meter, um adaptador de impedâncias de linha não balanceada para balanceada, [BalUn](#), ver Fig. 1.

A linha de transmissão bifilar é acompanhada da escala **E**, graduada em mm. A carga **L** é constituída por um varão prismático de material isolador, com secção quadrada em que em cada face está ou uma carga resistiva, ou um circuito aberto ou um curto circuito. A carga **L** pode ser colocada em qualquer distância da linha bifilar e o contacto elétrico é feito apenas com o seu peso. Os medidores **M1** e **M2** são

¹ - Robert Endall, "Frequency measurements at UHF", "[Radio News](#)" New York, Vol. 36, No. 3, September 1946 pp 50-52 e 94-100.

configuráveis para medir tensão e/ou corrente e são suportados por um dispositivo apoiado sobre a linha que está dotado dos sensores de I e de V, que detalharemos mais adiante.

A linha de Lecher será realizada com varões de alumínio com 1 cm de diâmetro 1,5 m de comprimento. A linha dispõe de suportes de modo a que o afastamento do centro dos condutores é ajustável entre 25 mm e 50 mm. Esta possibilidade permite variar a impedância da linha de transmissão, quando o ajustamento mantém os dois condutores paralelos, mas, também, permite fazer uma linha de transmissão com impedância variável ao longo da linha quando os condutores não são paralelos.

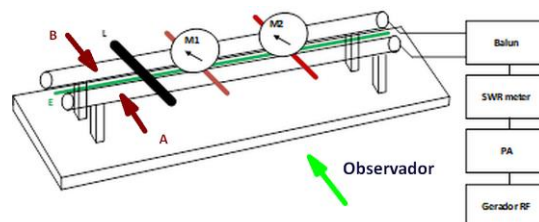


Fig1 - Sistema Faraday Electric Wave.
E- escala graduada em mm; L- carga; M1 e M2 - medidores de tensão e/ou corrente.

Os condutores da linha são excitados simetricamente (modo diferencial) com um sinal de RF, mas, em tensão contínua são assimétricos, pois têm tensões contínuas diferentes (modo comum). Por este motivo, são identificados pelas letras **A** e **B**. A letra A corresponde ao condutor mais próximo do utilizador (observador) e a letra B refere-se ao condutor mais afastado.

A linha será excitada por uma tensão contínua de 5 V do condutor B relativamente ao condutor A, correspondente a uma tensão de modo comum de 5 V. Esta tensão contínua pode ser necessária para alimentar os medidores M1 e M2.

Do ponto de vista de radio frequência a linha será excitada por um amplificador de potência de RF com cerca de 1 W, seguido de um medidor de energia transmitida e energia refletida (SWR), acoplado a um transformador de impedâncias Balun (**balanced** / **unbalanced**). O circuito é excitado por um gerador programável de RF. A frequência de excitação da linha cobrirá a banda de 150 MHz a 1,5 GHz, correspondente aos comprimentos de onda em espaço livre de 2 m e de 0,2 m. É provável que para as frequências mais altas se tenha de optar por um espaçamento menor entre os condutores da linha, pois já não é muito menor (só cerca de 10 vezes) que o comprimento de onda.

Para diferentes espaçamentos, d, obter-se-á uma impedância característica da linha diferente, ver Tab. 1.

Se pensarmos num afastamento de 30 mm, a impedância da linha será de cerca de 211 Ω e poder-se-á usar um Balun *standard* para adaptar o amplificador de potência à linha.

Na outra terminação da linha pode ficar em aberto, em curto circuito, com um valor ajustável de resistência de terminação, ou com uma antena radiante, ver Fig. 2.

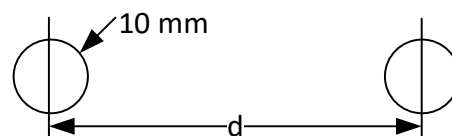


Fig. 2 - d - distância ajustável entre centro dos

d (mm)	Impedância (Ω)
20	158
25	188
30	211
40	247
50	275
60	297

Tab. 1- espaçamento das linhas versus impedância.

Os condutores da linha são amovíveis e apenas são seguros pelo seu peso nos suportes. Um dos condutores da linha, que designaremos por referência, ou massa, condutor **A**, será suportado por uma peça isoladora fixada à base de madeira. O outro condutor, B, que designaremos por vivo, terá um suporte deslizante cuja posição é ajustável relativamente ao suporte, ver Fig. 3. Os termos massa e vivo são relativos à tensão de corrente contínua presente na

linha de transmissão e, obviamente, não têm nada a ver com RF, em que a linha está flutuante relativamente à referência.

A observação, ou não, da existência de ondas estacionárias, numa dada posição, x , da linha, far-se-á com cursores sobre a linha, dotados de medidores M1 e M2. Estes medidores são dotados de detetores passivos de corrente ou de tensão na linha, (uma pequena sonda detetora do campo elétrico ou uma pequena espira). Um díodo Shottky de alta frequência retificará a força eletromotriz desenvolvida pelas sondas e um micro amperímetro de quadro móvel indicará um valor proporcional ao campo elétrico ou à corrente naquela posição na linha, ver Fig. 1. As linhas L1 e L2, além do sinal de RF, transportam uma tensão de 5 V DC, que pode ser necessária para amplificar os sinais da linha fornecidos aos medidores M1 e M2.

A Realização Prática

Os suportes da linha foram realizados em madeira de mogno e de mutene. Permitem ajustar a separação entre centros dos dois condutores da linha de transmissão entre 25 mm e 50 mm, que, de acordo com a Tab. 1 corresponde à impedância característica da linha variar entre 188 Ω e 275 Ω .

A linha foi construída sobre uma tábua de madeira com 19 mm de espessura, e 160 cm de comprimento, ver Fig-4. Na Fig. 5 pode observar-se a linha ajustada para duas separações de condutores, de 25 mm e de 50 mm. Esta distância pode ser ajustada com a ajuda de uma escala milimétrica existente na base dos medidores M1 e M2.

Componentes elétricos da *Faraday Electric Wave*

Na realização prática, a banda de frequências a usar influencia alguns componentes elétricos. Numa primeira realização vamos dimensionar os componentes elétricos, para cobrirem a banda de 200 MHz a 750 MHz, que correspondem aos comprimentos de onda de 1,5 m e de 0,4 m, respetivamente. Tanto quanto seja possível vamos usar módulos funcionais disponíveis comercialmente.

Na Fig. 6 pode observar-se a estrutura prática da linha Lecher da Faraday Wave.

Os condutores da linha são amovíveis e estão identificados pelas letras A e B. A é o condutor de referência da tensão contínua de 0 V e B é o condutor de 5V.

O suporte do condutor A, S1, está fixado à base de madeira e o suporte do condutor B, S2, é deslizante; a sua posição pode ser ajustada pelo botão BS, que controla a separação dos condutores.

Na Fig. 6 está ainda representado o suporte, SM, dos medidores M1 e M2, que faz dois contactos elétricos deslizantes com os condutores A e B, de onde recolhe a tensão de RF e a



Fig. 3- Realização do suporte da linha, com ajustador de posição.



Fig. 4- Linha alinhavada.



Fig. 5 - Linha configurada com a distância de 25 mm e de 50 mm entre centros dos condutores.

tensão contínua de 5 V. O suporte SM tem implantado dois sensores, um sensor de corrente e outro da tensão existente na linha. Na Fig. 6 pode ainda observar o suporte do Balun, **SB**, que vais ser discutido mais adiante

O Gerador de Sinais.

Vamos usar como gerador de sinais um módulo baseado no sintetizador digital de frequências, [ADF 4351](#), da empresa Analog Devices, dotado de uma tela digital de controlo (touch), com visor ótico do tipo LCD a cores, ver Fig. 7. Este gerador de sinal tem uma saída com conector SMA fêmea onde pode disponibilizar as potências máximas configuráveis de -4 dBm, -1 dBm, 2 dBm e 5 dBm, que correspondem às tensões de 0,14 V; de 0,2 V; 0,28 V e 0,4 V, respetivamente. Estas tensões, e as correspondentes potências, são insuficientes para excitar a linha de transmissão e permitir realizar medições com interesse prático, pelo que vai ser adicionado um amplificador de potência de RF.

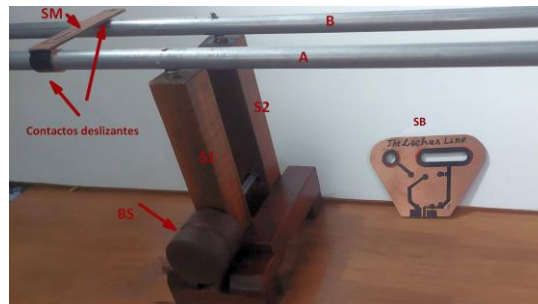


Fig. 6- Linha Lecher da Faraday Wave.



Fig. 7 - Gerador de sinal sintetizado.

O Amplificador de Potência de RF.

O amplificador de potência pode proporcionar 2 W de potência de saída máxima, ver Fig. 8.

O amplificador é alimentado à tensão máxima de 12 V e consome cerca de 0,4 A e é um amplificador linear.

A potência máxima de saída, na faixa de frequência que vamos trabalhar é de cerca de 1 W (30 dBm); como tem um ganho de potência de 40 dB, precisará de cerca de -8 dBm de potência de entrada, valor que está dentro da gama de disponibilidade do gerador de sinal. O porto de saída com 50 Ω de impedância tem acoplamento capacitivo pelo que permite introduzir um circuito de polarização, com 5 V DC, que pode ser necessário para os sistemas que se seguem. O amplificador de potência precisa de uma proteção do andar de saída caso ocorra um curto circuito ou circuito aberto na linha de transmissão que vai atacar, pelo que é necessário um medidor de ondas estacionárias SWR na sua saída para poder reduzir automaticamente a potência de saída caso estas situações ocorram e, assim, proteger o amplificador.

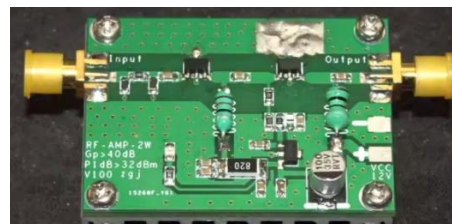


Fig. 8 – Amplificador de potência de 2 W.

O medidor de ondas estacionárias.

Vamos realizar o medidor de ondas estacionárias baseando-nos em *micro striplines* acopladas, ver Fig. 9. O comprimento destas linhas determina o valor da força eletromotriz gerada na linha acoplada, mas o ângulo de desvio de fase ao longo das linhas do medidor deve ser pequeno dentro da banda de frequências.

Admitiremos um desvio máximo de 45° . A impedância das linhas devem ser $50\ \Omega$ para facilitar a interface com o amplificador de potência.

Os acopladores feitos com linhas de transmissão têm uma banda de frequências que não pode ser muito grande, o que parece ser o nosso caso: 200 MHz a 750 MHz. Vamos projetar um acoplador de teste para a frequência que é a média geométrica desta banda, isto é: para 387 MHz. Veremos como se comporta nos extremos da banda que usaremos.

A impedância característica da linha, Z_0 , depende da largura W , da espessura H_t do condutor, da espessura H do dielétrico e da sua constante dielétrica ϵ_r relativa ao vácuo. O espaçamento entre a linha principal e a linha de amostragem das ondas incidente e refletida entre os portos 3 e 4 depende do fator de acoplamento C pretendido.

Vamos escolher $C = 0,2$ o que dá uma atenuação entre o porto 1 de excitação da linha principal e o porto 3 de -14 dB , ou seja uma potência disponível de $25,1\ \mu\text{W}$ ($35,4\text{ mV}$ sobre $50\ \Omega$) obtida a partir da entrada de 1 W no porto 1. A potência disponível no porto 3 deve ser suficiente para excitar o detetor de sinal e o medidor.

Nos anos 80 foi feita modelação muito rigorosa do comportamento das *microstriplines* acopladas. Os modelos obtidos são muito complicados, mas permitem obter resultados experimentais muito corretos. Estes modelos estão incluídos no programa [QUCS](#) que é de utilização livre. Na seção de ajuda deste programa pode ver os modelos e como o programa QUCS os usa. Pode também seguir o vídeo do engenheiro especialista em RF [Hans Rosenberg](#), no seu canal no Youtube.

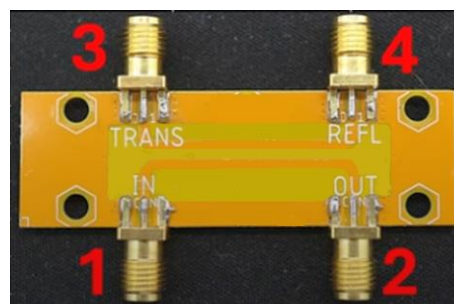


Fig. 9 - Acoplador de teste.

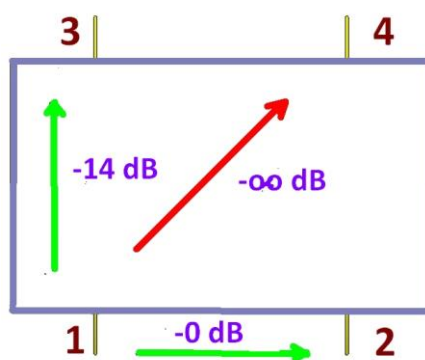


Fig. 10 - Acoplador direcional de teste.

O campo eletromagnético destas linhas tem duas componentes: a componente comum (even) e a componente diferencial (odd), resultando daqui que as impedâncias características das linhas acopladas têm duas componentes Z_{0e} (even) e Z_{0o} (odd), cuja média geométrica é Z_0 , [ver](#). Estas impedâncias dependem do fator de acoplamento C entre as linhas.

O fator C é normalmente um dado de projeto importante num acoplador.

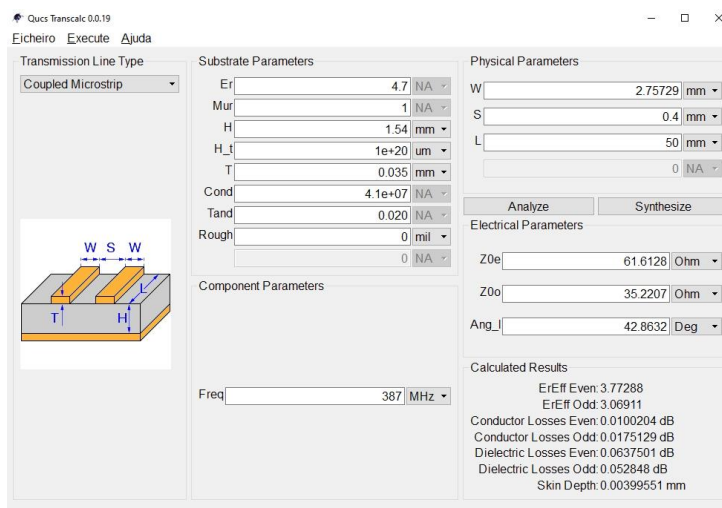


Fig. 11 – Cálculos do programa QUCS para linhas *microstripline* acopladas.

As impedâncias são: $Z_{0e} = Z_0 \frac{\sqrt{1+C}}{\sqrt{1-C}}$ e $Z_{0o} = Z_0 \frac{\sqrt{1-C}}{\sqrt{1+C}}$, cujo cálculo conduz a: $Z_{0e}=61,6 \, \Omega$ e $Z_{0o}= 35 \, \Omega$. Estes valores, juntamente com a desfasagem de $42,8^\circ$ (cerca de $1/8$ de comprimento de onda), depois de serem introduzidos no simulador [QUCS](#) de acesso livre, pudemos configurar o seguinte projeto (ver Fig.10). O resultado final são as dimensões das duas linhas de transmissão $W= 2,76 \, \text{mm}$, $S = 0,4 \, \text{mm}$ e $L= 50 \, \text{mm}$.

A transmissão far-se-á quase sem perdas entre o porto 1 e o porto 2, através da linha de transmissão principal e a determinação da onda transmitida/refletida far-se-á nos portos 3 e 4, dependendo da terminação que se fizer em cada um destes portos (terminação e detetor). O acoplamento projetado entre o porto 1 e o porto 3 é de $-14 \, \text{dB}$ ($0,2$ em unidades lineares).



Fig. 12 – Estrutura das linhas para o sensor de SWR.

As simulações numéricas com o QUCS confirmaram as atenuações e isolamentos pretendidos.

O projeto do medidor de SWR

Com base no projeto e nas simulações do QUCS fez-se o desenho do sensor de SWR que é constituído pelo circuito impresso representado na Fig. 12. A dimensão do circuito é de $63 \, \text{mm} \times 34 \, \text{mm}$ realizado em placa de circuito impresso com as duas faces cobreadas e com substrato FR4. Os portos 1 e 2 estão ligados pela linha L1.

O porto 1, de entrada, terá um conector SMA macho e o porto 2, de saída, terá um conector SMA fêmea, permitindo que o medidor seja inserido entre dois dispositivos previamente ligados, através da linha L1, que permite ser percorrida pela tensão de polarização de $5 \, \text{V}$.

As linhas acopladas L2 e L3 são as linhas sensores de ondas estacionárias e serão terminadas de forma diferente, como se mostra na Fig. 13. Foram criadas duas pequenas ilhas junto ao porto 3' e 4 para poder fazer ligações com componentes de montagem superficial.

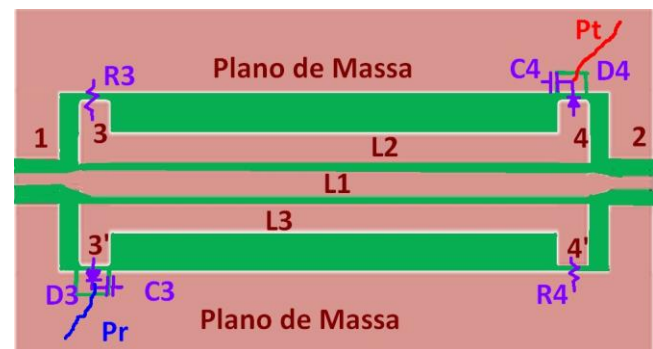


Fig. 13 – Estrutura das linhas para a medição de SWR.

O porto 3 é terminado pela resistência R3 e o porto 4' é terminado pela resistência R4. Idealmente estas resistências deveriam ser de $50 \, \text{ohms}$ pois este será o valor que otimiza o acoplamento e a separação das ondas refletidas e transmitidas, mas, na prática, estes valores podem ser diferentes para adaptar a sensibilidade do instrumento e corrigir algumas assimetrias. Os diodos Shottky D3 e D4 retificam as tensões desenvolvidas nas linhas sensores e os condensadores C3 e C4 permitem reter a componente contínua do sinal retificado que irá atuar o medidor de SWR, o qual pode ser conectado a D3 ou D4 para medir a potencia refletida, P_r , ou a potência transmitida, P_t . Eventualmente, podemos usar dois medidores para não estarmos a comutar estas ligações.

O BALUN

O Balun terá a dupla função de converter o modo assimétrico (cabo coaxial) para o modo simétrico do campo eletromagnético e transformar a impedância de saída do amplificador de potência na impedância da linha bifilar. Será usado o [Balun Guanella](#), proposto em 1944 por [Gustav Guanella](#) (1902-1982), ver Fig. 11. Este Balun é dotado de uma largura de banda relativamente grande e cumpre as funções de transformador de impedância de 1:4. Será realizado com 2 ou 4 núcleos de ferrite para UHF dotados de orifícios do tipo nariz de porco.

Para usar os pequenos Baluns usados nos televisores para converter 300 ohms das antenas dipolo para 75 ohms do cabo TV, cuja potência está limitada a 0,25 W, para a potência de 1 W teremos de usar quatro transformadores em paralelo.

Para a linha bifilar cuja separação de condutores é ajustada entre 25 mm e 50 mm, a impedância de transmissão variará entre 188 Ω e 275 Ω , cuja média geométrica é de 228 Ω . A impedância correspondente vista do lado do amplificador de potência será de 57 Ω . E variará entre 47 Ω e 69 Ω . A relação de ondas estacionárias para o amplificador de potência será de S (VSWR) de 1,4, no primeiro caso e de 2,3 no segundo. Para o amplificador de potência a relação entre a potência refletida e a potência transmitida será de 2,7% e de 15,5 %, que, nestes casos mais desfavoráveis poderá ser suportável pelo amplificador de potência que vamos usar, mas poderemos usar a informação obtida pelo medidor de ondas estacionárias para reduzir a potência de saída do amplificador.

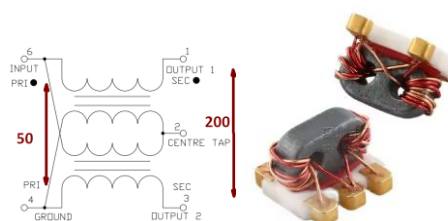


Fig. 14 - Transformador de Guanella de 1:4

Os quatro Baluns serão montados numa placa de PCB de FR4 com 1,5 mm de espessura, de dupla face cobreada, que será eletricamente ligada a uma das linhas de Lecher. A outra linha será terminada num parafuso M4 que deslizará num rasgo aberto na placa de PCB, mantendo contacto elétrico a partir das zonas de cobre da frente e de trás, através de duas anilhas condutoras sujeitas à pressão de uma mola. Ver Fig 15. A alimentação dos 4 Balun será feita a través de uma ficha SMA macho.

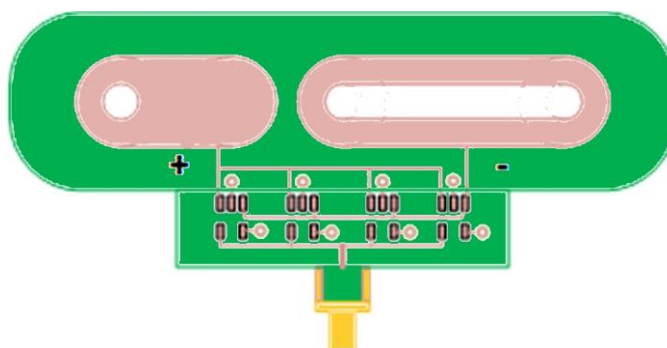


Fig. 15 – Transformadores de Guanella e ligação às linhas bifilar; Interface assimétrica para simétrica.

O Balun tem de dar passagem à corrente DC de alimentação dos amplificadores dos medidores M1 e M2.

A componente DC é introduzida à saída do amplificador de potência é transportada pelo cabo coaxial juntamente com o sinal de RF. Estas componentes atravessam a ponte de medida de SWR e são fornecidas

ao Balun. Na Fig. 16 pode observar-se com o sinal de RF e a tensão DC são separadas e seguem caminhos alternativos até atingirem as linhas A e B. A corrente DC está representada pela seta vermelha e a corrente de RF pela seta verde. A indutância de choque Ch1 bloqueia o sinal de RF e deixa passar a corrente contínua. Os condensadores CR1 e CR2 deixam passar o sinal de RF e impedem que a corrente contínua passe através do Balun.

A massa M (0 V) é ligada ao ponto médio do secundário do Balun e é transferida para a linha A. A linha B terá a tensão de 5 V DC e o sinal de RF.

Os Medidores M1 e M2

Estes medidores de tensão e corrente num dado ponto da linha têm sensores de tensão e de corrente e são montados sobre um suporte deslizante, SM, ver Fig. 6.

O sensor de corrente é baseado numa espira colocada na parte de cima do suporte SM e que capta o campo magnético gerado pela linha w transforma-o numa força eletromotriz que é retificada e produz uma tensão contínua que excita um amperímetro de quadro móvel, ver Fig. 17.

O sensor de tensão de RF da linha funciona diretamente com a tensão RF da linha e a massa MDC que está a um potencial fixo (de modo comum) igual ao potencial da massa M, do ponto de vista DC.

Os sensores de tensão e de corrente serão os representados na figura 17. Estes sensores proporcionam uma força eletromotriz que vai ser retificada para produzir a corrente contínua de excitação dos micro amperímetros, ver Fig.-18.

Os medidores de sinal

Na experiência *Faraday Electric Wave* vamos usar como detetores de sinal díodos Shottky para retificar a tensão ou a corrente contínua de 150 μ A, 100 mV, para obter o desvio máximo do ponteiro (fim de escala), consumindo cerca de 15,4 μ W. O valor da grandeza medida (I ou V) será afixado no quadrante de micro amperímetros analógicos de corrente contínua com fim de escala de 50 μ A, ver Fig. 19.

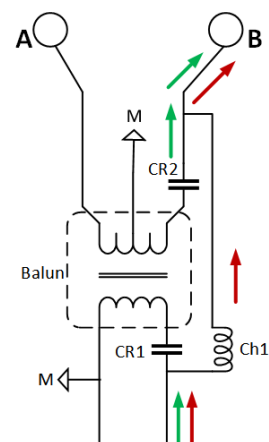


Fig. 16- Caminhos de DC e de RF para contornarem o Balun.

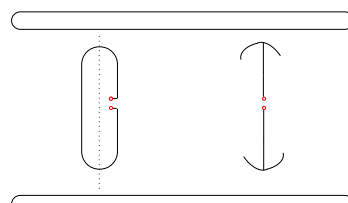


Fig. 17 - Espira sensor de corrente e elétrodos sensores de tensão.

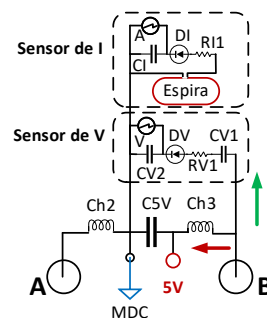


Fig. 18 - Recuperação tensão DC de 5 V e sensores de I e de V.



Fig.19 – Medidor usado.