

O ensino de ressonância eletromagnética por um sistema emissor e receptor com rádio antena de quadro: Descrição e análise usando osciloscópio

.....
André Luiz Alves

Departamento de Ciências Naturais,
Universidade Federal do Espírito Santo,
ES, Brasil
E-mail: andre.alves@ufes.br

Daniel José Custódio Coura

Departamento de Computação e
Eletrônica, Universidade Federal do
Espírito Santo, ES, Brasil

Márcio Solino Pessoa

Departamento de Ciências Naturais,
Universidade Federal do Espírito Santo,
ES, Brasil

Sérgio Sousa Bento

Departamento de Matemática
Aplicada, Universidade Federal do
Espírito Santo, ES, Brasil

Paulo Sérgio Moscon

Departamento de Ciências Naturais,
Universidade Federal do Espírito Santo,
ES, Brasil
.....

Neste trabalho foi montado um sistema de comunicação via ondas eletromagnéticas, que inclui um transmissor de ondas AM e um sistema de captação de ondas: o rádio antena de quadro. O sistema do rádio foi baseado em um circuito RLC simples onde a ressonância foi investigada com o uso de um osciloscópio. Foi possível identificar que quando a frequência de oscilação natural do rádio, variada através de um capacitor regulável, coincide com a frequência da onda proveniente do transmissor, o sistema composto pelo rádio submetido à onda entra em ressonância. Esse sistema possui fins puramente didáticos para o ensino prático da lei de Faraday, fenômeno da ressonância e sintonia de rádio.

Introdução

Novos métodos para o ensino de física tornam-se cada vez mais necessários, visto que os jovens estão inseridos em um mundo mais tecnológico e com maior acessibilidade. As aulas de física despertam cada vez menos o interesse dos alunos, pois ocupam-se de assuntos tradicionais fora do foco e com situações que não fazem sentido prático para o aluno [1]. Nesse contexto, o ensino da ressonância em circuitos elétricos consiste na abordagem de circuitos simples apresentados em livros, tendo pouca ênfase na contextualização de suas aplicações práticas. Geralmente, um resistor, um capacitor e um indutor são ligados em série e alimentados por um gerador de sinais, sendo discutidas questões como defasagens entre tensões nos elementos do circuito, corrente elétrica e a ressonância eletromagnética. Nesses experimentos tradicionais coleta-se um conjunto de dados visando verificar a validade das equações – percebidas como fórmulas por grande parte dos estudantes – relacionadas ao assunto [2,3]. Nenhum modelo para aplicação tecnológica é abordado nesses experimentos.

A motivação deste trabalho é implementar no ensino prático de circuitos ressonantes o rádio com antena de quadro. Ao contrário dos rádios comerciais, a montagem deste, assim como a do rádio de galena com antena varal, é de baixíssima complexidade, consistindo de apenas quatro componentes elétricos, não necessitando ligá-lo a fonte de tensão para seu funcionamento [4,5]. A simplicidade desse sistema instiga a curiosidade no aprendizado por parte dos alunos, pois rádio é um instrumento de comunicação

Os jovens estão inseridos em um mundo cada vez mais tecnológico e com maior acessibilidade, portanto novos métodos para o ensino de física tornam-se cada vez mais necessários para atrair o interesse dos alunos

global que faz parte do desenvolvimento tecnológico e tem grande importância na difusão do ensino de física e engenharia. Por exemplo, a questão da transmissão por milhares de quilômetros, sem conexão com fios elétricos, de informação que viaja a velocidade da luz geralmente atrai a atenção de muitos estudantes nas áreas de física e engenharias, tanto pelo rico contexto histórico como pela física deslumbrante envolvida.

Neste trabalho, um fio de cobre esmaltado, enrolado a um suporte de madeira, acoplado a um capacitor, forma um sistema ressonante capaz de captar ondas eletromagnéticas de um transmissor de ondas moduladas. Um diodo é usado como filtro, evitando a sobreposição de sinais elétricos. Foi explorado o fenômeno de ressonância por meio de um osciloscópio digital, ligado em paralelo a um fone de ouvido de alta impedância. Para isso, foram estudadas as amplitudes dos sinais de três frequências das ondas emitidas no transmissor. O valor eficaz, medido no osciloscópio, também foi verificado para

várias frequências das ondas emitidas pelo transmissor.

Nas seções iniciais, será apresentada uma breve discussão sobre sistemas de comunicação via ondas de rádio e o fenômeno de ressonância. Posteriormente

será feita uma descrição, por meio de simulação computacional, da onda eletromagnética captada pelo rádio. Esse sistema simples pode ser implementado tanto no ensino de eletromagnetismo no nível do Ensino Médio quanto no nível superior. Os autores deste trabalho estão à disposição para o apoio a quaisquer professores e/ou estudantes que almejem montar um sistema similar, bastando entrar em contato pelo seguinte endereço

Noções de comunicação via Rádio

A comunicação via rádio se dá através de ondas eletromagnéticas provenientes de uma estação emissora, emitidas tridimensionalmente, podendo ser captadas em estações receptoras (Fig. 1). A estação transmissora geralmente é composta por um circuito transmissor, integrado por um transdutor, um modulador, uma linha de transmissão e uma antena transmissora [6]. Por outro lado, a estação receptora é composta por uma antena receptora, uma linha de transmissão e um circuito receptor, integrado por um demodulador e um transdutor de áudio. A linha de transmissão serve para conduzir um sinal elétrico a uma antena, onde são geradas ondas eletromagnéticas que transmitem as informações desejadas [7]. A finalidade da antena receptora é converter uma parte da energia da onda eletromagnética em um sinal elétrico que, conduzido através da linha de transmissão até o receptor, é processada visando sua conversão final em ondas sonoras por um sistema de alto-falantes. No demodulador, é feito um tipo de filtragem na forma da onda recebida na antena, por meio de dispositivos como diodos e capacitores [4,8].

No sistema de transmissão o transdutor, que pode ser um microfone, converte a onda sonora em sinais elétricos de mesma frequência. Essa conversão pode ocorrer por meio de dispositivos diferentes que usam bobinas móveis acopladas a ímãs permanentes, ou que empregam condensadores ou mate-

riais piezoelétricos [9]. Entretanto, para tornar possível a transmissão de sinais eletromagnéticos, faz-se necessário, no modulador, “multiplicar” o sinal que se deseja transmitir, em um sinal denominado portador, de frequência maior (de 530 kHz a 108 MHz) [10]. O dispositivo eletrônico que realiza a multiplicação desses sinais denomina-se *mixer*. O sinal que se deseja transmitir carrega todas as informações que compreendem as frequências de sons audíveis e é chamado de modulante, pois no sistema do *mixer* a amplitude da onda portadora é modulada de acordo com a forma desse sinal. Esse tipo de modulação é chamado de Amplitude Modulada (AM) [6,10]. Existem outros tipos de modulações, como por exemplo a Frequência Modulada (FM), que não serão abordados neste trabalho, visto que o sistema usado emprega um transmissor de ondas AM que apresenta boa eficiência para um aparato didático.

A modulação no sinal da onda transmissora se faz necessário pelo menos por:

- (i) permitir antenas viáveis, já que no caso de uma antena direcional do tipo varal ou do tipo dipolo, o comprimento da antena deve ser da ordem do comprimento de onda da onda modulante, o que exigiria antenas com quilômetros de extensão; (ii) redução de ruídos; (iii) permitir a seleção em frequências de uma das diferentes estações existentes [8].

Na antena, o movimento acelerado nas cargas elétricas produz “perturbações” nos campos elétricos e magnéticos por elas produzidos, gerando ondas eletromagnéticas que carregam todas as informações

que se deseja transmitir. As ondas eletromagnéticas geradas possuem a propriedade de irradiar, ou seja, transmitir energia a distâncias infinitamente longas da fonte [7]. Para ondas AM, as antenas de rádio, dos tipos sensíveis à componente elétrica da onda, podem ser simplesmente um condutor esticado ligado ao transmissor. Para conseguir boa eficiência na antena transmissora, esta deve ser de pelo menos um quarto do comprimento da onda emissora (1/4λ). Tamanhos menores também são usados, com resultados satisfatórios [11]. As antenas receptoras para as ondas AM também podem ser do tipo bobina de ferrite e de *loop* magnético pequeno como, por exemplo, a antena de quadro. Esta última é sensível à componente magnética do campo eletromagnético da onda e apresenta algumas vantagens com relação às antenas sensíveis ao campo elétrico [5,12]. Esse é o tipo de antena abordado neste trabalho.

Na descrição física para captação de sinais pela antena de quadro, a variação do fluxo magnético, devido a componente magnética da onda eletromagnética no plano da antena, produz um campo elétrico induzido (lei de Faraday), fazendo as cargas elétricas oscilarem com a mesma frequência da onda e, portanto, do sinal elétrico do transmissor [5]. Entretanto a amplitude das oscilações pode ser maximizada por meio de um capacitor colocado em paralelo com a antena de *loop*, onde entra em foco o fenômeno da ressonância eletromagnética.

Ressonância no circuito LC do rádio

A ressonância é o estado de um sistema que vibra com amplitude acentuada, como resultado de estímulos externos que possuam a mesma frequência de vibração natural do sistema. Um circuito contendo um capacitor de capacitância C , um indutor de indutância L e um resistor de resistência R , ligados em série, produzem oscilações de cargas elétricas de frequência natural, similares a um oscilador harmônico [12]. Essa frequência é dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (1)$$

Na antena receptora do rádio, as cargas elétricas vibram com a mesma frequência da onda emitida no transmissor. Entretanto, a amplitude do sinal elétrico não é suficiente para produzir, no transdutor de áudio, oscilações que produzam ondas sonoras perceptíveis. Portanto, para um rádio com antena de quadro a amplitude das cargas elétricas será máxima quando a frequência da onda eletromag-

A corrente induzida na antena de quadro (indutor), por um sinal eletromagnético, é oscilatória quando um capacitor é acoplado na antena. Sintonizar o rádio significa colocar o sistema em ressonância: variar a capacitância ou a indutância do rádio, até que sua frequência de oscilação natural se iguale ao do sinal eletromagnético, produzindo correntes oscilantes com amplitudes máximas

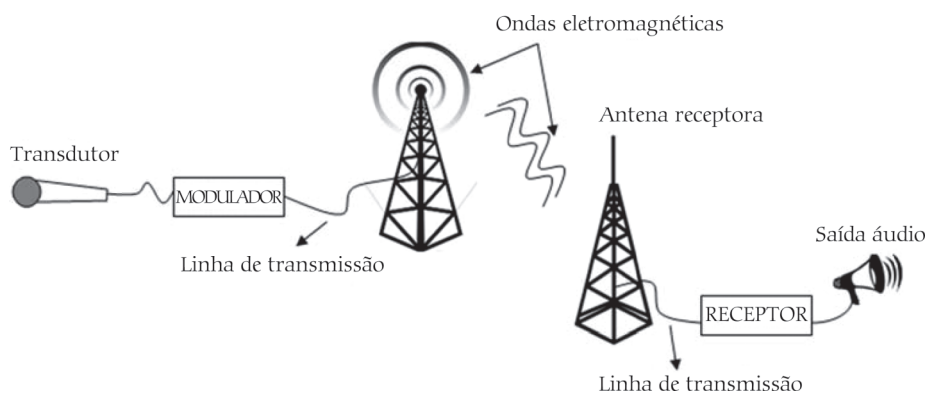


Figura 1: Ilustração de um sistema de comunicação via rádio. Ondas eletromagnéticas emitidas na antena da estação de transmissão (a) propagam-se até a antena da estação receptora, onde seu sinal é demodulado no sistema do receptor.

nética coincidir com a frequência natural do sistema (condição de ressonância). Nesse caso, essa frequência pode ser modificada, variando ou a capacitância C no capacitor ou a indutância L no indutor [Eq. (1)], até que coincida com a frequência de uma determinada estação. Capacitores variáveis são comumente utilizados para a sintonia do receptor. O termo sintonia é usado como sinônimo de “casar” a frequência da onda com a do circuito LC do rádio.

Usando o Matlab na simulação de uma onda portadora do tipo AM

Para a compreensão intuitiva da comunicação via ondas de rádio, é de grande importância a interpretação da modulação AM segundo sua formulação teórica/matemática. Para isso, o programa Matlab 7.0 [13] foi utilizado para simular a forma de onda de um sinal do tipo AM. Uma descrição mais detalhada sobre as diferentes formas de se modular a amplitude de uma onda é descrita por Menezes e cols. (2014) [14].

Matematicamente, a modulação AM consiste em adicionar à amplitude da tensão (V_p) da onda portadora o termo da onda modulante, dado por $e_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$, em que V_m e ω_m são as amplitudes e a frequência angular da modulante, que carrega a mensagem que se deseja transmitir [14]. A relação entre

frequência da modulante (f_m) e ω_m , é dada por $\omega_m = 2\pi f_m$. Por simplicidade matemática, supõe-se que a modulante é dada apenas por um termo, de frequência ω_m bem definida. Então:

$$e_m(t) = [V_p + V_m \cos(\omega_m t)] \cdot \cos(\omega_p t) \quad (2)$$

onde $\omega_p = 2\pi f_p$, e ω_p e f_p são a frequência angular e a frequência da portadora, respectivamente. Desenvolvendo os termos na Eq. (2) e realizando manipulações trigonométricas adequadas, obtém-se:

$$e_m(t) = V_p \cos(\omega_p t) + \frac{V_m}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t + \frac{V_m}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t \quad (3)$$

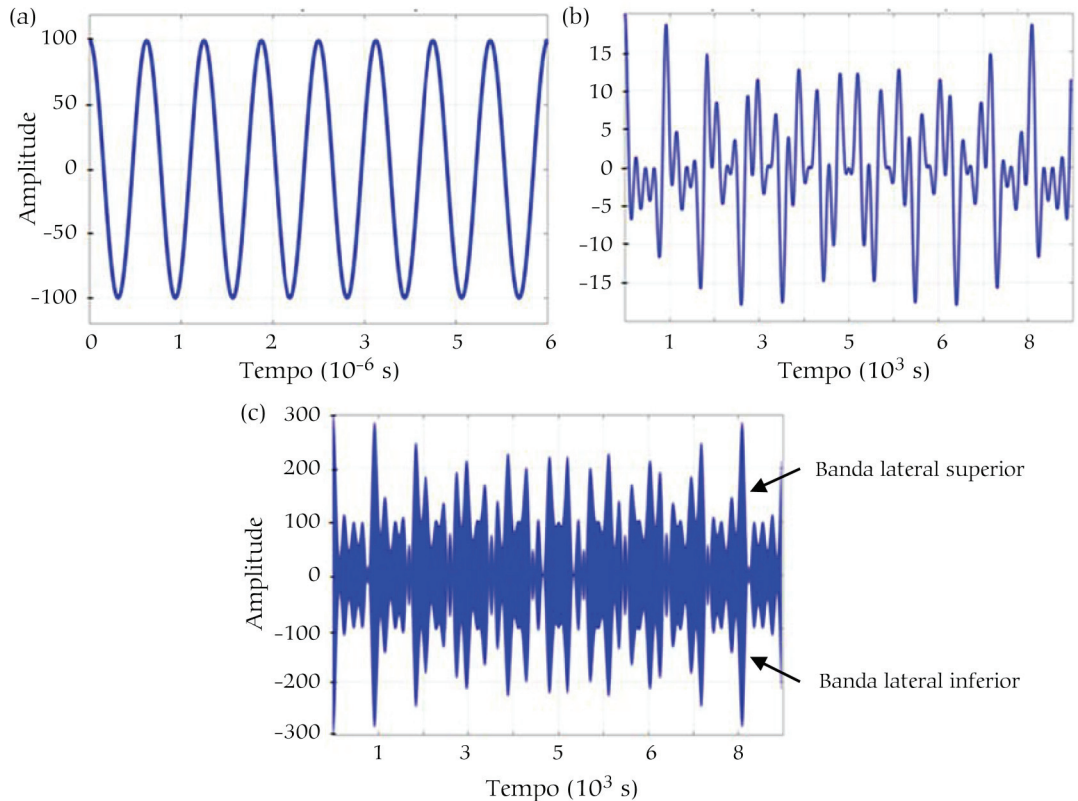
Observa-se na Eq. (3) que a forma da onda modulada consiste da onda portadora pura (primeiro termo) somada a dois outros termos, que caracterizam a banda lateral superior (segundo termo) e a banda lateral inferior (terceiro termo). Essas bandas contêm todas as informações que se deseja transmitir [14].

A forma de onda de um sinal de modulação de áudio pode possuir um espectro de frequências que começa no subgrave (16 Hz) indo até o agudo (16 kHz) [15]. Portanto, para um exemplo mais didático, de simulação de uma modulação AM, um sinal de onda portadora com 1600 kHz foi utilizado e quatro

sinais de frequências $f_1 = 1000$ Hz, $f_2 = 2100$ Hz, $f_3 = 3300$ Hz e $f_4 = 4400$ Hz foram utilizados como a forma da onda modulante. As formas de onda da portadora e da modulante, obtidas na simulação, estão apresentadas nas Figs. 2a e 2b, respectivamente. Para estas, foram usadas amplitudes de modulação de 100 ua e 20 ua respectivamente. Para melhor visualização, o intervalo de tempo da portadora foi reduzido comparativamente com o da modulante. A onda modulada está apresentada na Fig. 2c e, devido à elevada frequência da portadora, não é possível visualizar as oscilações desta, nessa figura.

Observa-se na Fig. 2c que a informação que se deseja transmitir pela modulante é duplicada, devido às bandas laterais, sendo necessário realizar uma filtragem. Nos demoduladores de onda AM, é comum o uso do diodo. Esse dispositivo é constituído por dois semicondutores, sendo construído de tal forma que permite a passagem da corrente elétrica apenas em um sentido, no circuito receptor do rádio [4]. O efeito é barrar uma das bandas laterais da onda transmitida, evitando a sobreposição de sinais e tornando clara a informação que se deseja transmitir. Para deixar apenas o sinal da moduladora, um capacitor da ordem de nano Farad (nF) é colocado em paralelo a esse circuito, formando um filtro passa-

Figura 2: Simulação no programa Matlab 7.0 da amplitude (u.a) da (a) onda portadora, (b) da modulante e (c) da onda transmitida em função do tempo. A onda transmitida constitui-se da portadora com amplitude modulada de acordo com a forma da onda da modulante.



baixa, eliminando a amplitude da tensão de alta frequência (portadora) [16]. Como neste trabalho foi possível distinguir, com certa clareza, o ruído proveniente da portadora da informação transmitida pela modulante, não foi utilizado o filtro passa-baixa. Adicionalmente, houve a intenção de tornar o rádio o mais simples e didático possível, para alunos e professores iniciantes no tema e aqueles interessados em montar um sistema semelhante em laboratório.

Modelo aproximado para a tensão induzida na antena de quadro

O objetivo de qualquer antena receptora é converter uma onda eletromagnética em uma tensão. Para pontos próximos da antena, as disposições das linhas de campo elétrico e magnético da onda eletromagnética são complexas; entretanto, para distâncias consideravelmente afastadas da antena, elas podem ser consideradas planas: os campos elétricos e magnéticos oscilam em fase em um mesmo plano [7, 17]. O modelo aqui descrito considera uma onda plana que penetra na área da antena, provocando variações no fluxo do campo magnético e induzindo uma força eletromotriz. Além disso, considera em primeira aproximação que o fluxo do campo magnético da onda que atravessa a antena é composto apenas pela onda portadora. Assim, a modulante é tratada como uma perturbação na amplitude da onda portadora.

A lei de indução de Faraday afirma que a força eletromotriz induzida $\varepsilon(t)$ nos terminais de uma bobina é diretamente proporcional à variação do fluxo magnético $\phi(t)$ com o tempo,

$$\varepsilon(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

O campo magnético é escrito como $\mathbf{B}(t) = B_p(t)\mathbf{u}$ onde $B_p(t)$ é uma função oscilante do tipo $B_p \cos(\omega_p t)$, em que B_p é a amplitude da componente magnética da onda portadora e \mathbf{u} é o vetor unitário que define um eixo paralelo à direção de oscilação de $\mathbf{B}(t)$. Seja \mathbf{S} o vetor área da superfície plana da antena de quadro dado por $\mathbf{S} = NA\mathbf{n}$ em que N é o número de espiras na antena e \mathbf{n} é a normal ao plano de área, A . Então,

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{S} \\ \phi(t) &= B_p \cos(\omega_p t) NA \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \\ \phi(t) &= B_p \cos(\omega_p t) NA \cos\theta \end{aligned} \quad (5)$$

onde $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = \cos\theta$, sendo θ o ângulo entre os vetores unitários \mathbf{u} e \mathbf{n} . Substituindo a Eq. (5) na Eq. (4) e fazendo $\omega_p = 2\pi f_p$

obtem-se

$$\varepsilon(t) = 2\pi f_p NAB_p \sin(2\pi f_p t) \cos\theta \quad (6)$$

Aplicando a definição do valor médio quadrático (V_{RMS}) para $\varepsilon(t)$, também conhecido como tensão eficaz, e realizando as operações matemáticas devidas, obtém-se:

$$V_{RMS} = \frac{2\pi f_p NAB_p |\cos(\theta)|}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

A Eq. (7) fornece um modelo idealizado para a tensão eficaz de saída na antena de quadro. De acordo com essa equação, esse tipo de antena fornece uma tensão proporcional à frequência do sinal emitido pela antena emissora. O desempenho da antena é influenciado pelo número de voltas e pela área da antena. Além disso, observa-se que essa antena é do tipo direcional, ou seja, o sinal máximo é obtido quando $\theta = 0$ (\mathbf{B} é perpendicular ao plano da área) e mínimo para $\theta = 90^\circ$ (\mathbf{B} é paralelo ao plano da área).

Materiais e métodos

Na Fig. 3 estão representados todos os componentes usados na montagem do circuito do rádio. A antena (moldura branca) possui arestas de 40 cm com 10 voltas de fio de cobre 28 awg. Na Fig. 4(a), um multímetro do tipo LCR foi conectado em paralelo com a antena, medindo uma indutância de $(151,7 \pm 0,4) \mu\text{H}$, conforme especificações do aparelho. Um capacitor de placas paralelas, retirado de um rádio antigo, foi conectado em paralelo com o indutor.

A capacitância é variada por um botão de giro (botão de sintonia). Uma curva de calibração, utilizando um transferidor acoplado, é obtida visando-se associar as marcações da escala do transferidor às respectivas frequências de oscilação naturais. Um diodo de Germânio tipo 1N34 é então conectado em série com um fone de alta impedância. Esses dois componentes são conectados em paralelo com o capacitor. Uma ilustração da conexão de todos os componentes pode ser observada na Fig. 4b. Na ilustração da Fig. 4c o sinal modulado, com as bandas laterais, fornece uma mensagem sobreposta e o diodo realiza a filtragem, permitindo a passagem de apenas uma banda.

Para a observação da onda transmitida, foi utilizado um osciloscópio de marca Minipa, modelo MO 2100. O fio do cabo do osciloscópio que mede o sinal (positivo) foi conectado no pino vermelho, na saída do diodo, enquanto o cabo referencial (negativo) foi conectado ao pino preto, na saída do capacitor.

Para a “estação emissora” foi usado um transmissor de ondas médias AM de 1 W de potência e seleção de frequências de 600 a 1500 kHz [18]. A antena transmissora consistiu de um fio de 30 m de comprimento, esticado na horizontal, a 3 m de altura. O som emitido do fone foi perceptível até aproximadamente 30 m do ponto central da antena. Todas as medidas foram realizadas a uma distância de cerca de 8 m da antena, o que é suficiente para conduzir uma aula em laboratório.

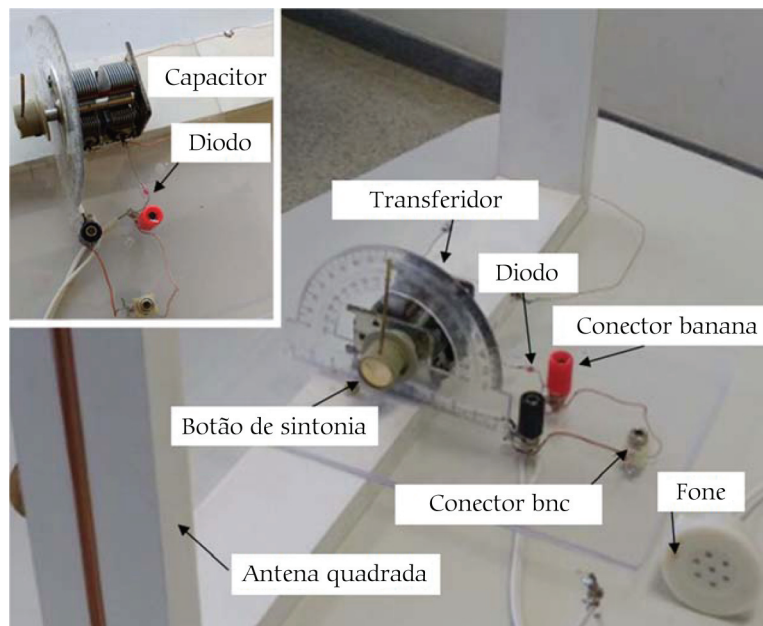


Figura 3: Montagem do rádio com antena de quadro e todos os seus componentes.

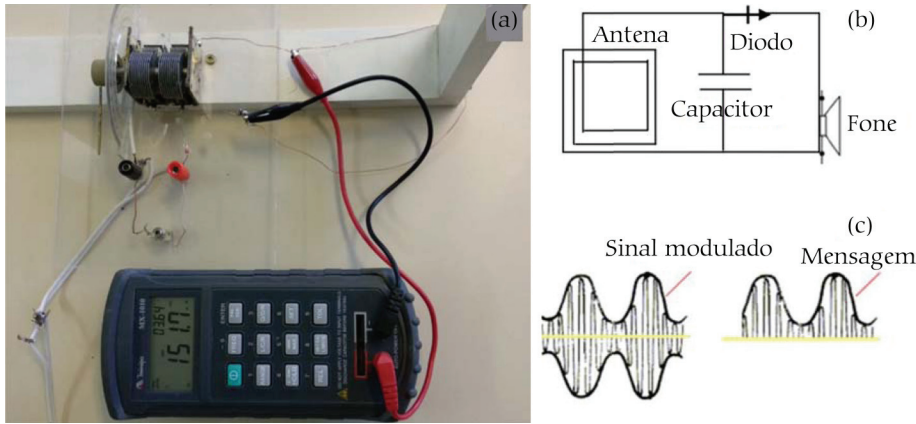


Figura 4: (a) Conexões com o multímetro LCR para obtenção da indutância (em μH) da antena de quadro. (b) Diagrama da ligação dos componentes do rádio. (c) À esquerda, ilustração do sinal da onda portadora com a modulação, que seria observado com um osciloscópio ligado aos terminais do capacitor. À direita, a filtragem realizada pelo diodo permite a passagem de apenas uma banda do sinal modulado, transmitindo a mensagem.

Resultados e discussões

Ressonância no circuito LC do rádio

Nas Figs. 5a-c, está representado um sinal obtido do transmissor, na frequência de 1600 kHz, após filtro pelo diodo no rádio, para diferentes escalas de tempo. Esse sinal foi obtido de um transmissor que, ligado a um computador, transmitiu sinais de áudio de músicas. Conforme pode ser observado na Fig. 5a, a modulação do sinal (que carrega a mensagem) está sobreposta a fontes aleatórias de ruídos. Adicionalmente, a forma da modulação não segue um padrão bem definido, como o de uma onda senoidal, devido ao conjunto de diversas frequências da mensagem transmitida (músicas) que compõe o sinal. Esses fatores impossibilitam a investigação da forma da onda modulada, diferentemente daquela simulada computacionalmente (Fig. 2). Por outro lado, as oscilações da onda portadora, de alta frequência, ficam mais perceptíveis quando se diminui gradualmente a escala no tempo [veja as Figs. 5b-c]. Na Fig. 5c, foi realizada uma ampliação da ordem de mil vezes, tornando possível medir a frequência da portadora diretamente da tela do osciloscópio, por meio da leitura do período da mesma e cálculo de seu inverso.

Na Fig. 6a, está representada a curva de calibração do capacitor, que consiste da capacitância (C) em nF, em função do ângulo (θ) do transferidor, em graus. As barras em forma de cruz representam as incertezas nos valores de C e θ . A função de calibração polinomial foi:

$$C(\text{nF}) = 0,646 - 4,6 \times 10^{-3}\theta - 8,8 \times 10^{-6}\theta^2 + 8,9 \times 10^{-8}\theta^3 \quad (8)$$

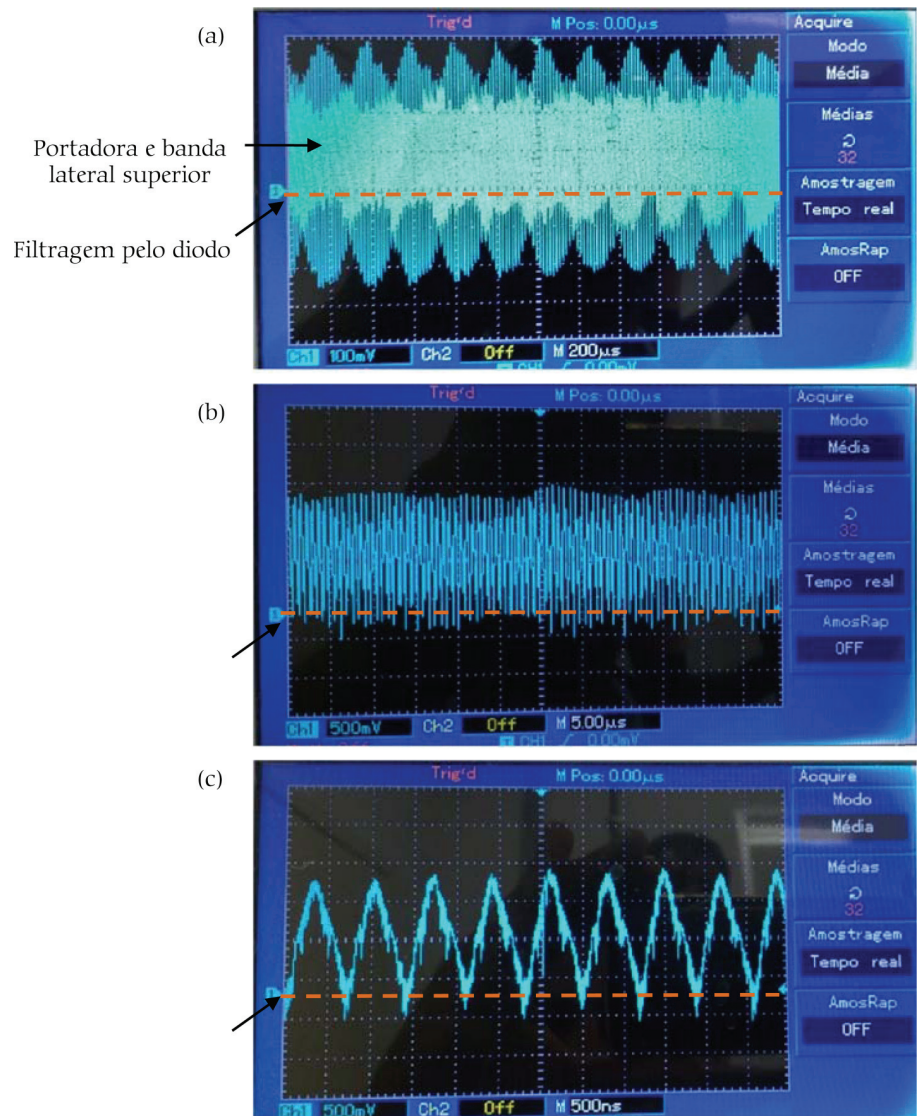


Figura 5: Sinal da onda transmitida (portadora com modulante) no osciloscópio, em unidades de mV, para as escalas temporais (horizontal) de (a) 200 μs , (b) 500 μs e (c) 500 ns. Para melhor percepção do sinal, a frequência foi variada, até se atingir a condição de ressonância.

O ajuste computacional para a obtenção da função foi obtido com o uso do programa *Origin* [19]. A quantidade de algarismos significativos de cada termo da potência, em θ , está de acordo com o primeiro algarismo significativo da incerteza obtido do ajuste dessa função. Portanto, os valores de capacitância obtidos para um determinado ângulo θ , juntamente com o valor de indutância da antena, foram usados na Eq. (1) para a obtenção das frequências naturais de oscilação do circuito LC do rádio, com suas respectivas incertezas.

Nas Figs. 6b-d estão representadas as amplitudes das oscilações da onda portadora, em função das frequências naturais do circuito LC do rádio. Na parte superior à direita de cada uma delas, estão inseridas as oscilações de tensão, provenientes da

portadora, com seus respectivos Período (T), na faixa de frequências correspondentes à ressonância. Os valores de T das oscilações estão impressos nessa figura em um fundo branco e simbolizados por uma seta dupla branca. Por uma questão visual e de comparação, os valores de frequência, depois de calculados, foram inseridos no gráfico por meio de uma linha pontilhada vertical, seguida de uma barra vertical que representa as mínimas e máximas variações em seus valores calculados.

Em cada caso, foi observado que as amplitudes das oscilações das tensões (pontos com “cruzes”) atingem valores máximos em frequências naturais de oscilação coincidentes, dentro das faixas de incerteza, com as frequências (f) das ondas eletromag-

néticas, calculadas por $f = 1/T$. Isso evidencia a ressonância eletromagnética observada neste estudo. Esse sistema então pode ser usado em laboratório, para o ensino da ressonância eletromagnética em circuitos, implementando os kits tradicionais utilizados corriqueiramente.

Relação entre a tensão eficaz e a frequência

De acordo com a Eq. (7) é possível prever que a dependência da tensão eficaz com a frequência da onda emitida pelo transmissor é linear. Para a verificação dessa dependência, foi medido como a tensão eficaz, obtida com o osciloscópio, varia com a frequência, na condição de ressonância. Os dados coletados estão representados por meio da Fig. 7, onde é possí-

vel observar a dependência linear prevista. Considerando as aproximações de que a onda eletromagnética que atravessa a antena é plana e que a onda modulada é apenas uma perturbação na portadora, os resultados estão em boa concordância com a previsão teórica.

Por outro lado, o estudo para a verificação da polarização da antena de quadro não pode ser realizado com precisão, usando o osciloscópio, devido às variações de amplitude estarem dentro da faixa de incerteza da onda observada, quando se gira a antena. Para contornar essa situação, foi realizado um estudo de percepção audível, com a colaboração de três estudantes, onde se analisou a percepção em uma faixa de ângulos. As percepções foram definidas como nenhuma, razoável,

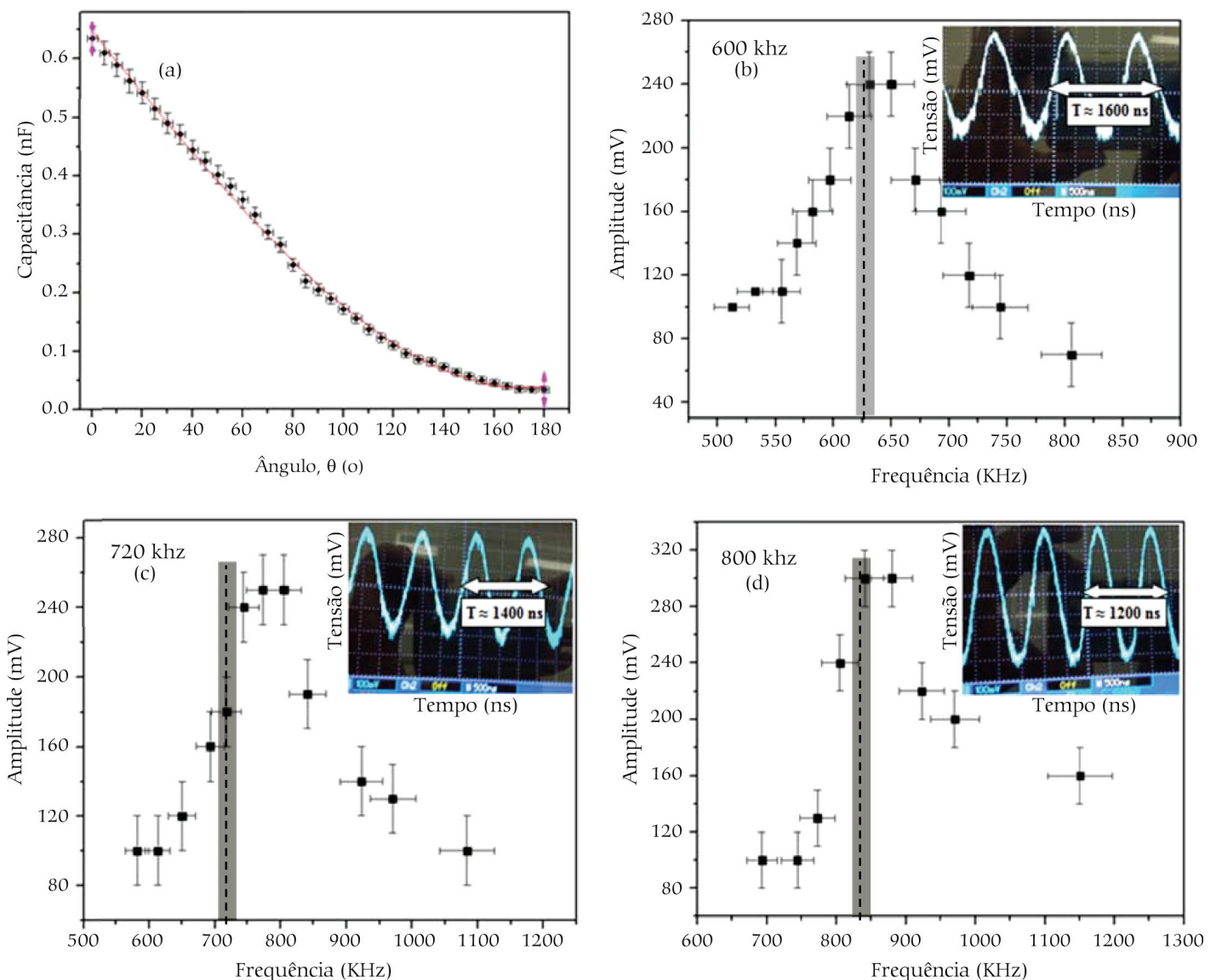
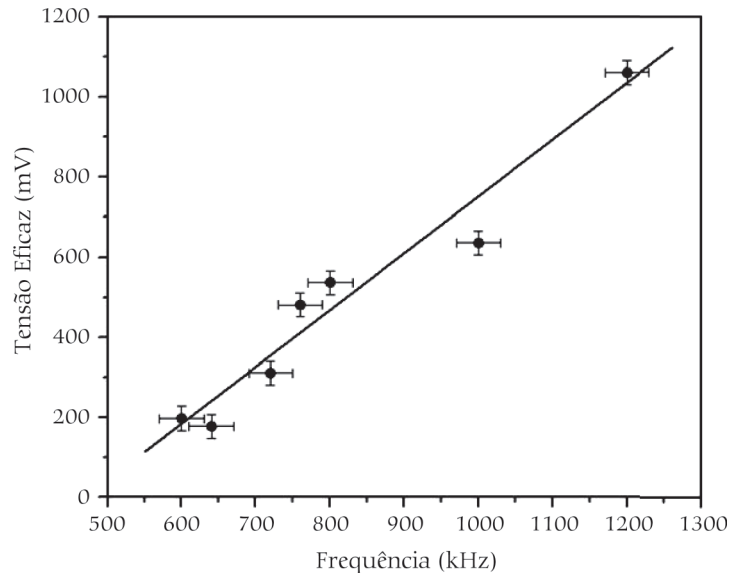


Figura 6: (a) Curva de calibração para o capacitor. Nas frequências de (b) 600 kHz, (c) 720 kHz e (d) 800 kHz estão as dependências da amplitude do sinal da onda captada com a frequência natural do circuito LC do rádio. Na parte superior à direita estão as oscilações de tensão de máxima amplitude. Foram usadas escalas de tensão de 100 mV e tempo de 500 ns. As barras verticais representam os valores de frequência média (linha vertical) com as incertezas (largura da barra), calculadas como o inverso do período.

Figura 7: Dependência da tensão eficaz (V_{RMS}) com a frequência da onda portadora emitida pelo transmissor.



boa e muito boa. Inicialmente a antena foi girada até que não houvesse percepção de nenhum som vindo do fone de alta impedância. Foi colocado sob a antena um transferidor no qual foi marcado um ângulo igual a 90° , como referência apenas. A antena então foi girada de $+90^\circ$ até -90° e a percepção do sinal emitido pelo fone foi anotada em função do ângulo. Então os estudantes definiram faixas de ângulos correspondentes a cada uma das percepções definidas, obtendo médias. Os dados obtidos estão mostrados na Tabela 1.

De acordo com essa tabela, é possível analisar qualitativamente a polarização da antena, considerando que percepção nula de sinal audível corresponde ao fluxo nulo da onda eletromagnética na antena e que o sinal muito bom corresponde ao fluxo máximo através da antena. Além disso, os dados apresentados nessa tabela são

condizentes com o esperado pela Eq. (7). De acordo com essa equação, espera-se que os maiores valores de tensão eficaz devem corresponder às melhores percepções audíveis. Sendo assim, espera-se que a percepção audível varie com o cosseno do ângulo. Embora os dados coletados na Tabela 1 não forneçam com precisão a questão da polarização, esse experimento permite ao estudante uma noção sobre a

Tabela 1: Percepção sonora para a faixa de ângulos em que a antena de quadro foi rotacionada.

Percepção do som	Faixa de ângulos ($^\circ$)	
Nenhuma	90 a 60	0 a -10
Razoável	60 a 30	-10 a -30
Boa	30 a 10	-30 a -50
Muito boa	10 a 0	-50 a -90

polarização da antena de quadro, associando teoria e prática.

Conclusão

Neste trabalho, verificou-se a teoria e o funcionamento básico dos rádios, usando como modelo o rádio com antena de quadro. Foi possível estudar e coletar dados para a verificação do fenômeno da ressonância. Na parte prática, observou-se que, possivelmente, o cabo coaxial do osciloscópio contribuía com uma pequena capacitância, tendo uma leve interferência no sistema estudado. Mesmo assim, o fenômeno de ressonância eletromagnética pode ser verificado experimentalmente e graficamente, pela coleta de dados, tornando esse sistema útil no ensino das oscilações eletromagnéticas em circuitos RLC.

Na região de ressonância, ocorreu a melhor percepção audível com maior potência sonora; entretanto, os sinais eram acompanhados de um leve ruído que não afetou a investigação do sistema do rádio. Quanto maior a frequência da onda emitida no transmissor, maior foi o valor eficaz, medido no osciloscópio. Verificaram-se também os fenômenos de polarização associada com a disposição geométrica da antena receptora relativamente à antena emissora, bem como as dependências da intensidade do sinal detectado com a frequência de ressonância. Assim, considera-se que o experimento pode ser aplicado para o ensino de oscilações eletromagnéticas por meio da emissão e da recepção de dados.

Professores de física podem contar com essa opção experimental para o ensino do fenômeno da ressonância eletromagnética, juntamente com uma de suas mais populares e importantes aplicações práticas.

Referências

- [1] M.A. Moreira. Revista do Professor de Física **1**, n.1 (2017).
- [2] G.C Bruscato e P.M. Mors, Rev. Bras. Ens. Fis. **36**, 1506 (2014).
- [3] A. L. Alves e Cols., in: *Atas do XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, São Carlos, 2017, 1 CD.
- [4] A. Figueiredo e E. Terrazan, Rev. Ens. de Ciênc. **17**, 32 (1987).
- [5] L. Loudet. Disponível em <https://sidstationloudet.org/antenna-theory-en.xhtml>, acesso em 03 de março de 2018.
- [6] L.F. Netto. Disponível em http://www.feiradeciencias.com.br/sala15/15_3_3e.asp, acesso em 28 de fevereiro de 2018.
- [7] D.J. Griffiths, *Eletrodinâmica* (Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2011), v. 1, p. 309.
- [8] C.A. Balanis, *Teoria de Antenas - Análise e Síntese* (LTC, Rio de Janeiro, 2014), v. 2, p. 19.
- [9] N.C. Braga, *Fundamentos de Som e Acústica* (Newton C. Braga, São Paulo, 2015a), v. 8, p. 48.
- [10] D. Gonçalves. Disponível em <https://jornalismou.wordpress.com/2015/04/18/entenda-a-diferenca-entre-as-faixas-am-e-fm/>, acesso em 3 de março de 2018.
- [11] Ondas Médias. Disponível em <http://www.amantesdoradiocom.br/novo/mw.htm>, acesso em 28/4/2018.
- [12] H.D. Young e R.A. Freedman, *Física III: Eletromagnetismo* (São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009a), v. 3, p. 377.
- [13] MathWorks, Inc. Matlab: *The Language of Technical Computing. Desktop Tools and Development Environment, ver. 7, v. 9* (MathWorks, Natick, 2005).
- [14] A.B Menezes e F.F Lima, Rev. Ciênc. Exat. e Tecnol. **6**, 95 (2014).
- [15] N.C. Braga, *Fundamentos de Som e Acústica* (Newton C. Braga, São Paulo, 2015b), v. 8, p. 48.
- [16] J.W. Nilson e S.A Riedel, *Circuitos Elétricos* (Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2009), v. 1, p. 417.
- [17] H.D. Young e R.A. Freedman, *Física III: Eletromagnetismo* (São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009b), v. 3, p. 362.
- [18] Eletrônica Elementar. Disponível em <https://www.youtube.com/channel/UCNjRgX9A7hK4q4QDQFAZPVQ>, acesso em 01 de março de 2017.
- [19] ORIGIN 8, *Getting Started Booklet* (OriginLab, Northampton, 2009).