



# UMA ABORDAGEM FASORIAL E EXPERIMENTAL PARA TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

## A PHASOR AND EXPERIMENTAL APPROACH TO THE TRANSMISSION AND RECEPTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES

Rodrigo Teixeira Rossini<sup>1</sup>, Monica de Mesquita Lacerda<sup>2</sup>,  
Alexandre Carlos Tort<sup>3</sup>

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p202-226.2026

**RESUMO:** A partir das descobertas de Hertz, abriu-se um novo horizonte de possibilidades, em que a comunicação por meio de ondas eletromagnéticas encurtou distâncias e transformou profundamente a maneira como a sociedade se comunica. Com essa revolução, diversas tecnologias surgiram, e siglas como AM, FM, Wi-Fi e 5G passaram a fazer parte do nosso cotidiano, amplamente utilizadas, mas pouco exploradas no ambiente educacional. Este trabalho tem como proposta apresentar uma nova perspectiva sobre a transmissão de ondas eletromagnéticas, utilizando representações das técnicas de modulação por meio de uma abordagem fasorial e acompanhada de experimentos didáticos e de baixo custo. Essa abordagem pode ser aplicada em sala de aula, contribuindo para a aprendizagem dos estudantes em um tema atual e conectado ao cotidiano. Muitos discentes demonstram grande interesse pelo assunto, mas acabam se desmotivando diante dos complexos formalismos teóricos e matemáticos geralmente associados ao tema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transmissão de Ondas Eletromagnéticas; Fasores; Experimentos de Baixo Custo; Modulação AM e FM; Eletromagnetismo.

**ABSTRACT:** Hertz's discoveries opened a new horizon of possibilities, where communication through electromagnetic waves bridged distances and profoundly transformed the way society communicates. With this revolution, several technologies emerged and acronyms such as AM, FM, Wi-Fi and 5G became part of our daily lives, widely used, but little explored in the school environment. This work aims to present a new perspective on the transmission of electromagnetic waves, using representations of modulation techniques through a phasor approach and accompanied by low-cost educational experiments. This approach can be applied in the classroom, contributing to students' learning on a current topic connected to everyday life. Many students show great interest in the topic, but end up becoming discouraged by the complex theoretical and mathematical formalisms generally associated with the subject.

**KEYWORDS:** Transmission of Electromagnetic Waves; Phasors; Low-Cost Experiments; AM and FM Modulation; Electromagnetism.

<sup>1</sup> Doutorando em Ensino e História da Matemática e da Física - PEMAT, Mestre, Docente de Física – Colégio Técnico (CTUR), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, rossinirtr@ufrj.br

<sup>2</sup> Doutorado em Física, Docente de Física – Campus Duque de Caxias, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, monicad.mlacerda@gmail.com

<sup>3</sup> Doutorado em Física, Docente de Física – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ



## INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se que a escola é uma das instituições que menos acompanhou as transformações ao longo do tempo. Mesmo sendo considerada essencial para a formação do indivíduo, ela ainda opera, em muitos casos, com estruturas antiquadas que não dialogam com as demandas da sociedade moderna (Lima *et al.*, 2024). Isso se reflete diretamente nos currículos, que permanecem desatualizados e organizados de maneira descontextualizada para os estudantes de hoje. Nesse contexto, explorar a transmissão de ondas eletromagnéticas (OEM) abre caminho para um novo entendimento sobre como se dá a propagação de informações em vários segmentos de nossas vidas.

Desde as primeiras descobertas de Hertz, a maneira como nos comunicamos sofreu mudanças profundas, uma vez que tecnologias surgidas a partir desses estudos tornaram obsoletos meios de comunicação como o envio de cartas por navios ou por mensagens em redes telegráficas, permitindo que, atualmente, as informações sejam trocadas de maneira praticamente instantânea. O estudante contemporâneo, imerso em Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), convive diariamente com termos, siglas e modos de interação amplamente utilizados, mas raramente tem acesso aos fundamentos científicos que sustentam seu funcionamento.

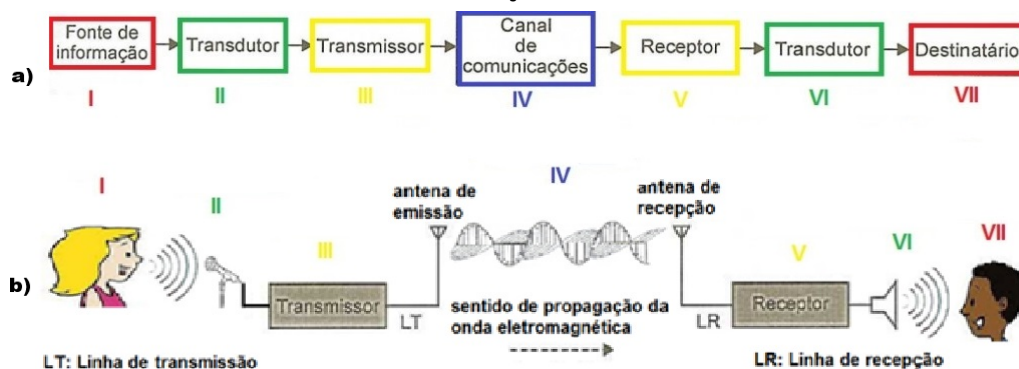
Este trabalho tem o objetivo de explorar algumas técnicas de transmissão e recepção de uma OEM e sua importância no processo de propagação da informação. Inicialmente, é feita uma breve apresentação sobre a propagação de uma OEM e seus aspectos básicos. Em seguida, analisa-se a transmissão de uma OEM e a utilização de técnicas bem difundidas de modulação como a Modulação em Amplitude (AM) e a Modulação em Frequência (FM) para melhor eficiência na transmissão, ancorando-se no conceito de fasores para representação do sinal modulado. Aborda-se o tema de uma maneira visual por meio de representações gráficas e animações que são uma alternativa aos tradicionais entraves matemáticos na formalização do conceito. Por fim, aplica-se a abordagem fasorial em um contexto de experimentos de baixo custo, nos quais os discentes poderão reproduzir transmissões em AM e FM em sala de aula ou laboratório, verificando os parâmetros, a eficiência e a natureza do sinal transmitido. Múltiplas atividades podem ser realizadas no contexto do ensino de Engenharia e Física, abrangendo disciplinas de graduação, como Física III e IV, com suas práticas experimentais, Eletrônica e outras correlatas. Atividades que abordam conceitos importantes que permeiam desde a montagem do experimento até sua utilização no ambiente de

ensino são apresentadas a fim de contribuir para a relação ensino-aprendizagem na área interdisciplinar de transmissão de ondas eletromagnéticas.

## TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA

Com as equações de Maxwell para o eletromagnetismo e seus desdobramentos teóricos, estabeleceram-se as bases para a compreensão da propagação das ondas eletromagnéticas. Algumas de suas aplicações serão discutidas como base para este trabalho. Para um estudo formal e completo da transmissão de uma OEM por meio de um elemento irradiante, é necessário um bom domínio de cálculo vetorial e do entendimento de inúmeras passagens matemáticas até chegar a um resultado que é válido apenas para um tipo de elemento irradiante, pois sua geometria modifica alguns parâmetros de propagação da onda irradiada. Por isso, serão discutidos neste tópico apenas alguns aspectos e resultados da transmissão de ondas eletromagnéticas relevantes a esta obra, baseados nos trabalhos de Montenegro (2023), Martins (2016), Waldman (1997) e Medeiros (2007). Inicialmente, será discutido um sistema de comunicação básica, no qual a presença de alguns elementos é indispensável e está representada no diagrama da Figura 1.

**Figura 1 – Diagrama em blocos de uma comunicação analógica e esquema básico de comunicação via rádio**



Fonte: elaborada pelos autores.

Para um sistema de comunicação baseado em ondas eletromagnéticas (Figura 1b), o canal de comunicação será o meio em que essa onda se propaga, geralmente o ar ou o vácuo. Como neste caso o canal de comunicação é um meio sobre o qual geralmente não temos muito controle, a responsabilidade pela



qualidade da comunicação recai sobre os sistemas e técnicas de transmissão e recepção dessas ondas. Dessa forma, a construção de elementos irradiantes que tenham uma boa eficiência se torna indispensável. Estes transdutores, comumente chamados de antenas, são alvos de estudos até hoje, pois sua boa construção e posicionamento garantirão a máxima eficiência na comunicação. Essas antenas podem assumir diversos tipos e formas como por exemplo: antenas filamentosas, antenas de abertura, antenas de microfita, antenas refletoras e antenas-lente, cada uma com vantagens e desvantagens em seu emprego (Balanis, 2009). Nos condutores da antena, as densidades de cargas variáveis no tempo (e suas correntes associadas) serão responsáveis pela criação da onda eletromagnética, mas não por sua propagação. Se nos condutores da antena tivermos um sinal harmônico e periódico, a onda eletromagnética, agora periódica, será propagada pela linha de transmissão, pela antena de emissão e atingirá o espaço livre. As cargas elétricas são necessárias para excitar o campo, mas não são responsáveis pela manutenção dele na propagação da onda, que neste caso dependerá de parâmetros do meio. Cada formato de antena gera um tipo de propagação que pode ser mais ou menos eficiente. Para não analisarmos uma infinidade de tipos de antenas, concentraremos nossa análise na antena de dipolo, seja por sua simplicidade de confecção, sua boa eficiência, sua ampla aplicação, por ter uma análise matemática mais simples ou por ter uma boa impedância. Para essa antena, pode-se deduzir a Equação 1, que constitui um resultado importante para a presente discussão. Para mais detalhes sobre o funcionamento desse tipo de antena, recomenda-se consultar Trore (2016).

$$P_{rad} = \frac{z_0 \pi}{3} (d/\lambda)^2 |i|^2 \quad \text{Eq. [1]}$$

em que  $z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  e  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  são respectivamente as constantes de permeabilidade magnética e permissividade elétrica do vácuo.

Essa equação evidencia que a potência média irradiada ( $P_{rad}$ ) depende do quadrado da amplitude da corrente elétrica ( $i$ ) e do quadrado da razão entre o comprimento da antena  $d$  e o comprimento de onda  $\lambda$  da radiação. Em outras palavras, quanto maior essa razão, maior será a potência irradiada, mantido constantes os demais parâmetros. Para que uma antena de dipolo infinitesimal opere com boa eficiência, seu comprimento deve ser comparável à ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal que emite. Isso justifica a importância do desenvolvimento de técnicas destinadas a otimizar essa eficiência. Embora a



equação apresentada se aplique especificamente ao dipolo infinitesimal, o mesmo princípio se verifica em antenas com diferentes geometrias. Também devemos considerar que os elementos irradiantes (antenas) possuem outros parâmetros como ganho, diretividade, impedância de entrada etc. Esses parâmetros, apesar de contribuírem também para a eficiência da antena, não serão abordados neste trabalho, sendo oportunos a um curso formal de antenas (Balanis, 2009). Como exemplo, sabemos que o ser humano consegue ouvir sinais sonoros de frequências entre 20 Hz e 20 KHz aproximadamente. Tomando-se como referência a maior frequência dessa faixa e supondo que um transdutor transformasse esse sinal sonoro diretamente em uma onda eletromagnética, teríamos uma onda com os seguintes parâmetros:

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{Eq. [2]}$$

Substituindo os valores na equação 2 e supondo que essa onda eletromagnética possua praticamente a mesma velocidade que teria no vácuo, obtém-se  $3 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 2 \cdot 10^4$ , resultando em um comprimento de onda de aproximadamente  $\lambda \cong 1,5 \cdot 10^4 \text{ m}$ . Esse resultado evidencia a inviabilidade de construir uma antena dipolo cujo comprimento seja da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda mencionado. Por isso, a necessidade de transmitir a voz ou a informação por meio de ondas de frequências significativamente altas para tornar o tamanho de antenas tecnicamente viável foi um dos fatores que impulsionaram o desenvolvimento das técnicas de modulação empregadas até os dias atuais.

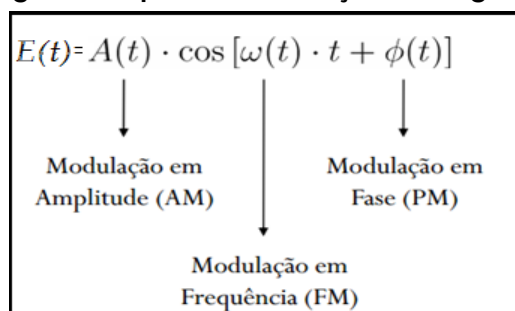
## TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DE SINAIS

O exemplo anterior, apesar de importante, não representa a única motivação para a modulação de sinais, culminando em uma enumeração de outros aspectos positivos, como a redução de ruído e interferência, designação de frequências para transmissões feitas por estações de rádio e TV e multiplexação. De posse dessas informações, a modulação é definida por Haykin e Moher (2011) como: "O processo pelo qual alguma característica de uma portadora varia de acordo com uma onda modulante (sinal)" (Haykin e Moher, 2011, p. 99).



Então, em uma representação simplificada do campo elétrico  $E(t)$  de uma OEM como sendo da forma  $E(t) = A(t) \cdot \cos[\omega(t) \cdot t + \phi(t)]$ , pode-se embutir o sinal desejado em alguns de seus parâmetros conforme Figura 2.

**Figura 2 – Tipos de modulação analógica.**



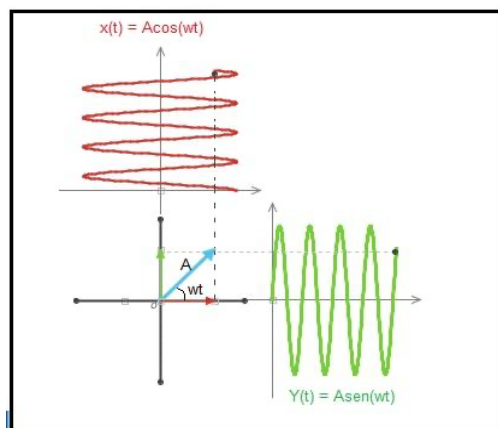
Fonte: elaborada pelos autores.

A onda de maior frequência em que o sinal será embutido é chamada de portadora, o sinal que será embutido é chamado de modulante (ou onda modulante) e o sinal resultante já com o sinal embutido é chamado de modulado (ou onda modulada).

Hoje, existem inúmeras técnicas de modulação analógica e digital, representadas por siglas como AM, FM e PM, já mencionadas, além de outras, como *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK) e *Pulse Width Modulation* (PWM), entre outras (Lathi e Ding, 2019). Cada uma apresenta vantagens e limitações em sua aplicação. Não é objetivo deste trabalho discutir detalhadamente todos os aspectos relevantes de cada técnica. O foco principal é apresentar os fundamentos de como e por que um sinal deve ser modulado para permitir a transmissão de informações por meio de ondas eletromagnéticas, utilizando, para isso, exemplos de técnicas tradicionais de modulação, introduzidas há várias décadas e ainda empregadas atualmente, como a modulação AM e a modulação FM.

Como se trata de ondas eletromagnéticas (OEM), uma maneira de representá-las é por meio da técnica fasorial. Amplamente utilizada em publicações de engenharia e de circuitos elétricos, principalmente na análise de circuitos de corrente alternada, essa técnica permite representar uma onda ou um sinal elétrico por meio da projeção gráfica de um vetor girante sobre um dos eixos cartesianos. Essa representação visual, associada a um tratamento matemático mais simples, será fundamental para a discussão dos próximos tópicos deste trabalho. A Figura 3 representa um vetor que gira em torno da origem de um sistema de coordenadas cartesianas, cujo módulo é igual a  $A$  e cuja frequência angular é igual a  $\omega$ .

Figura 3 – Representação fasorial de um sinal sinusoidal



Fonte: elaborada pelos autores com base na animação A1 disponível nos anexos.

As projeções desse vetor girante nos eixos cartesianos geram funções senoidais ou cossenoidais, cuja amplitude máxima corresponde ao módulo do vetor. Essa forma de representar tais funções facilita o tratamento matemático da superposição de ondas, principalmente quando elas são harmônicas. Desse modo, as operações de soma e subtração de funções senoidais podem ser tratadas como somas vetoriais simples, exigindo apenas conhecimentos básicos de vetores e geometria para sua aplicação. Com essa ferramenta, torna-se possível explorar fenômenos elétricos e ondulatórios de maneira gráfica, com base em conhecimentos vetoriais que um aluno do ensino médio pode adquirir por meio do estudo de temas como as leis de Newton.

### Utilizando a noção fasorial na modulação AM

Uma forma simples de realizar uma modulação AM consiste em inserir um sinal sinusoidal  $m(t)$  em uma onda portadora  $X_p(t)$  de maior frequência. Tipicamente, a mensagem a ser transmitida ocupa uma faixa de frequência inferior à frequência da portadora. Na prática, são necessários alguns componentes e equipamentos eletrônicos que realizem tal feito, transformando o sinal de voz em sinal elétrico, amplificando-o, inserindo-o em uma portadora e transmitindo por meio de uma antena emissora. Na chegada da OEM na antena receptora, o processo inverso é realizado e o sinal chega no seu destino final na forma de som emitido pelo alto-falante. Um exemplo simplificado de transmissão desse sinal é representado na Figura 4.



Supondo-se que o sinal da portadora também seja sinusoidal e da forma  $X_p(t) = A_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi)$ , sendo  $\omega_p$  a frequência angular e  $\varphi$  a fase da onda, ao se inserir a mensagem  $m(t)$  no parâmetro da amplitude  $A_p$ , a expressão da portadora ficará da seguinte forma:

$$X_p(t) = [A_p + m(t)] \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi). \quad \text{Eq. [3]}$$

se  $m(t)$  for também um sinal sinusoidal de forma  $m(t) = A_m \cos(\omega_m t + \varphi)$ , em que  $\omega_m$  é a frequência angular da mensagem, a equação 3 fica da seguinte forma:

$$X_p(t) = [A_p + A_m \cos(\omega_m t + \varphi)] \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi) \quad \text{Eq. [4]}$$

OU

$$X_p(t) = A_p \left[ 1 + \frac{A_m}{A_p} \cos(\omega_m t + \varphi) \right] \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi) \quad \text{Eq. [5]}$$

Utilizando algumas relações trigonométricas, chega-se à seguinte expressão:

$$X_p(t) = A_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t + \varphi) + \frac{A_m}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t + \frac{A_m}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t \quad \text{Eq. [6]}$$

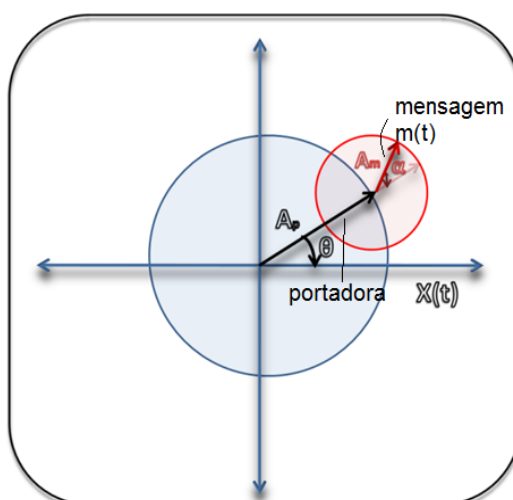
A equação 6 é comumente encontrada em publicações da área de telecomunicações, como em Medeiros (2007), e representa a modulação AM de um sinal cossenoidal no domínio do tempo.

Analisa-se, agora, a técnica de modulação em amplitude por meio da notação fasorial. Conforme visto anteriormente, a mensagem a ser transmitida em AM alterará a amplitude do sinal da portadora. Na notação fasorial, a amplitude máxima da onda portadora pode ser representada pelo módulo  $A_p$  de um vetor girante que faz um ângulo  $\theta = \omega_p \cdot t + \varphi$  em relação ao eixo  $X(t)$ . Podemos imaginar a mensagem  $m(t)$  como a projeção de outro vetor girante de módulo  $A_m$ . Como a mensagem altera a amplitude  $A_p$  do vetor da portadora, a projeção do vetor mensagem se dará ao longo da direção do vetor que representa a portadora e não ao longo do eixo  $X(t)$ . Com isso, a amplitude do vetor associado à onda portadora ficará na forma:

$$A(t) = A_p + A_m \cos \alpha \quad \text{Eq. [7]}$$

em que  $\alpha = \omega_m t + \varphi$ . Graficamente, o vetor da portadora gira simultaneamente ao vetor da mensagem. Entretanto, a frequência angular de rotação do vetor da mensagem é menor que a do vetor da portadora, uma vez que as velocidades angulares desses vetores estão diretamente relacionadas às suas respectivas frequências, conforme ilustrado na Figura 5.

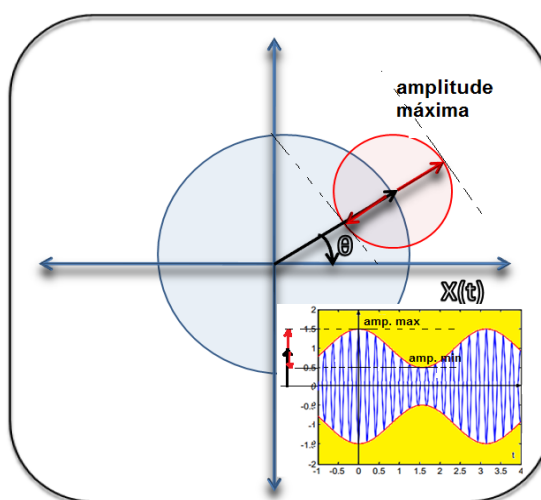
**Figura 5 – Tratamento fasorial da modulação AM**



Fonte: elaborada pelos autores com base na animação A3 disponível nos anexos.

Quando o vetor mensagem estiver paralelo ou antiparalelo à direção do vetor da portadora, a amplitude do sinal modulado será máxima ou mínima, respectivamente (Figura 6).

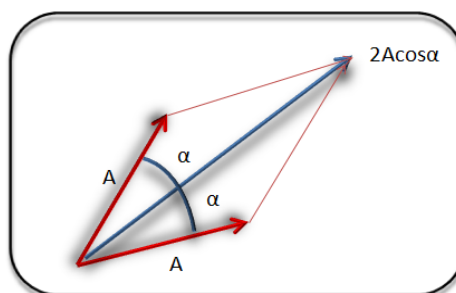
**Figura 6 – Representação fasorial de uma onda modulada**



Fonte: elaborada pelos autores.

Sabe-se que quando ocorre a soma de dois vetores de igual módulo  $A$ , seu vetor resultante passa pela bissetriz do ângulo  $2\alpha$  formado entre eles, cujo módulo é igual a  $2A\cos\alpha$  (Figura 7).

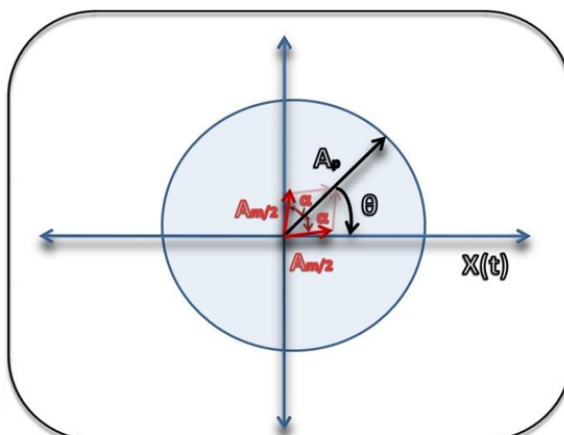
**Figura 7 – Soma de dois vetores de mesmo módulo**



Fonte: elaborado pelos autores.

Se aplicarmos esse resultado vetorial ao nosso problema, podemos utilizar uma estratégia simples. Se o que nos interessa é a projeção do vetor mensagem ao longo da direção do vetor da portadora, podemos supor que essa projeção é a soma de dois vetores simetricamente dispostos em relação ao vetor da portadora (Figura 8).

**Figura 8 – AM como a projeção de uma soma de três vetores**



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como a projeção do vetor mensagem ao longo do vetor portadora é da forma  $A_m\cos\alpha$ , os vetores simétricos deverão ser defasados de um ângulo  $\pm\alpha$  e possuir módulos iguais a  $\frac{A_m}{2}$ . Por fim, sabe-se que o sinal modulado na verdade é a projeção desses vetores ao longo do eixo  $X(t)$ . Logo, o valor para o sinal modulado assume a forma:



$$X(t) = A_p \cos(\theta) + \frac{A_m}{2} \cos(\theta + \alpha) + \frac{A_m}{2} \cos(\theta - \alpha). \quad \text{Eq. [8]}$$

Ao se exprimirem os valores de  $\theta$  e  $\alpha$  em termos de suas frequências angulares, chega-se à equação 6. Nota-se também que a equação 8, oriunda de três vetores girantes, representa a soma de três ondas, nas quais as de amplitude menor estão dispostas simetricamente em torno da frequência da portadora. Ou seja, quando se modula um sinal sinusoidal em amplitude, o espectro de frequências é composto por mais duas ondas simetricamente dispostas em relação à portadora. No caso geral da modulação AM, o sinal a ser modulado não é um sinal sinusoidal simples, existindo realmente duas bandas de frequências simetricamente distribuídas em torno da frequência da portadora, chamadas de banda lateral superior e inferior, utilizadas para modular o sinal.

### Utilizando a noção fasorial na modulação FM

Na modulação FM, o parâmetro da onda portadora que sofre variação é a frequência. Para analisar essa técnica, adota-se a mesma abordagem fasorial, associada a uma analogia com o movimento circular. Inicialmente, considera-se que o sinal da portadora é, novamente, a projeção de um vetor girante de módulo  $A_p$  ao longo do eixo  $X(t)$ . Considerando que a ponta da flecha representativa do vetor da portadora descreve um movimento circular de velocidade tangencial de módulo  $V_p$ , são válidas as relações  $V = \omega R$  e  $\omega = 2\pi f$  para este movimento, em que  $f$  é a frequência linear,  $\omega$  é a frequência angular de rotação e  $R$  é o raio do movimento circular, abrindo caminho para a criação de uma expressão para uma velocidade tangencial que varie em função do tempo na forma:

$$V(t) = 2\pi f(t)A_p \quad \text{Eq. [9]}$$

ou

$$V(t) = C \cdot f(t) \quad \text{Eq. [10]}$$

As equações 9 e 10 mostram que a velocidade tangencial é diretamente proporcional à frequência da onda portadora. Então, se inserirmos um sinal (mensagem)  $m(t)$  no parâmetro da frequência, estaremos também inserindo uma mensagem na velocidade tangencial do vetor da portadora a menos de uma constante  $C$  de proporcionalidade (equação 10), criando a oportunidade de expor essa frequência variável de forma gráfica por meio da variação da velocidade tangencial (Figura 9). Utilizando a mesma metodologia do tópico

anterior, é suposto novamente que a mensagem tem a forma  $m(t) = A_m \cos(\omega_m t + \varphi)$ . Como o parâmetro alterado é a frequência, insere-se agora a mensagem  $m(t)$  no parâmetro da frequência da onda portadora, obtendo-se:

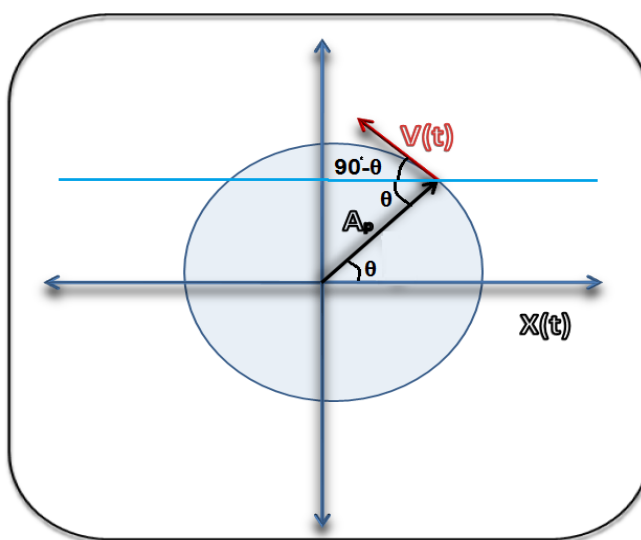
$$f(t) = f_p + k_f m(t) \quad \text{Eq. [11]}$$

que, em termos da velocidade tangencial do vetor girante da portadora (equação 9), ficará:

$$V(t) = 2\pi[f_p + k_f A_m \cos(\omega_m t + \varphi)] A_p \quad \text{Eq. [12]}$$

onde o termo  $k_f A_m$  tem dimensão de frequência.

**Figura 9 – A velocidade tangencial da ponta da flecha representativa do vetor girante é proporcional à frequência**



Fonte: elaborado pelos autores.

Escrevendo a equação 12 em termos das velocidades tangenciais e supondo que  $\omega_m t + \varphi$  gera um ângulo  $\alpha$ , tem-se:

$$V(t) = V_p + V_m \cos \alpha = C \cdot f(t) = \omega(t) A_p \quad \text{Eq. [13]}$$

Assim, a equação 13 indica que a velocidade tangencial da flecha que representa o vetor da portadora é alterada por um fator que pode ser representado como a projeção de um outro vetor girante na direção da

velocidade tangencial (Figura 10). Logo, a expressão para  $\omega(t)$  fica da seguinte forma:

$$\frac{V_p + V_m \cos \alpha}{A_p} = \omega(t) \quad \text{Eq. [14]}$$

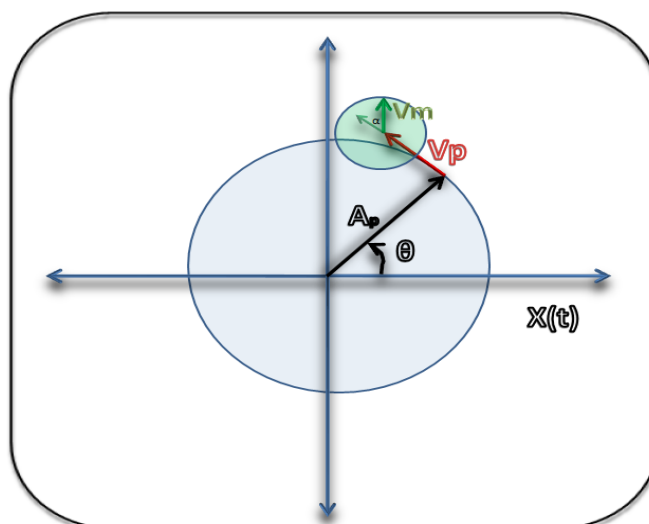
sabendo que  $X(t)$  pode ser escrito da forma  $X(t) = A_p \cos [\theta(t) + \varphi]$ , deduz-se a expressão para  $\theta(t)$  como sendo:

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \frac{V_p}{A_p} t + \frac{V_m \sin(\omega_m t)}{A_p \omega_m} = \frac{1}{A_p} [V_p t + k_v V_m \sin(\omega_m t)]. \quad \text{Eq. [15]}$$

substituindo a equação 15 em  $X(t)$ , obtém-se:

$$x(t) = A_p \cos \left( \frac{1}{A_p} [V_p t + k_v V_m \sin(\omega_m t)] + \varphi_0 \right). \quad \text{Eq. [16]}$$

**Figura 10 – A projeção do sinal altera a velocidade do vetor da portadora FM**



Fonte: elaborada pelos autores com base na animação A4 disponível nos anexos.

Manipulando-se as constantes envolvidas, nota-se que a equação 16 aparece em publicações na área de telecomunicações, sendo esta o equivalente em termo da velocidade tangencial para a modulação FM (Haykin e Moher, 2011, p 135).



## **EXPERIMENTOS DE BAIXO CUSTO PARA O ESTUDO DA TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS**

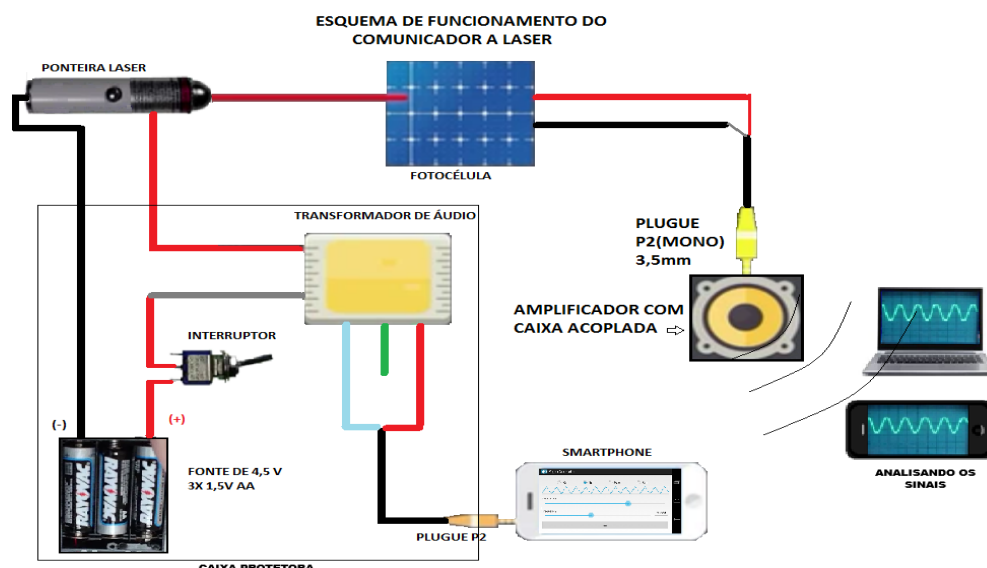
Apesar de estarmos naturalmente inseridos em um meio em que a transmissão de ondas eletromagnéticas é algo corriqueiro, quando falamos em estudo e discussão de suas características básicas, barreiras como a falta de infraestrutura laboratorial, a escassez de tempo e a falta de conhecimentos prévios por parte dos estudantes servem de entraves no ensino desse tema. Muitas são as bibliografias que incentivam o ensino de algo que esteja inserido no cotidiano do aluno. Entretanto, essa transposição para a prática em sala de aula nem sempre acontece. Uma tática viável seria transformar a sala de aula momentaneamente em um laboratório, para que os discentes, em suas carteiras, tenham a oportunidade de manusear itens e investigar fenômenos que acontecem diante deles, coletando e inserindo dados na busca da compreensão do tema. Logo, o uso dessa ferramenta pode auxiliar os educandos a alcançar o objetivo central deste trabalho, que é entender os princípios básicos da transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas.

Com os princípios teóricos já relatados em tópicos anteriores, descreve-se a seguir uma sequência experimental a ser aplicada em sala de aula ou laboratório com o objetivo de consolidar o estudo e a aprendizagem sobre o conteúdo proposto.

### **O transmissor AM**

Para abordar a transmissão e a recepção de informação por meio de uma OEM, utilizaremos um transmissor de AM de baixo custo, mostrado na Figura 11, cujo princípio de funcionamento é relativamente simples. Como nosso objetivo é transmitir informação por meio de uma OEM, uma ideia é atingir esse objetivo com um laser simples, mostrando que a luz visível tem as mesmas propriedades básicas que ondas de outras faixas de frequências como a onda de rádio, por exemplo. Além disso, fenômenos ondulatórios como a reflexão e o bloqueio da onda podem ser abordados, criando uma gama de atividades interessantes.

Figura 11 – Esquema de funcionamento do experimento



Fonte: elaborada pelos autores e com montagem M1 disponível nos anexos.

### Como gerar e transmitir o sinal?

O professor pode ter em mãos qualquer aplicativo gratuito de geração de sinais de áudio, o qual pode ser distribuído aos alunos via Bluetooth, USB ou pesquisado em repositórios como a *Play Store*. Com o aplicativo instalado em um *smartphone*, o aluno terá a oportunidade de alterar os parâmetros do sinal de saída como amplitude, frequência, período e forma da onda. Esse sinal, que será disponibilizado na saída de fones de ouvido do aparelho, é variável no tempo e induzirá uma tensão no secundário do transformador de áudio utilizado no experimento. Como consequência, esse sinal induzido alterará o nível de tensão de alimentação da ponteira laser. Assim, a intensidade luminosa do laser irá variar em função do sinal gerado no celular.

Com a ponteira laser direcionada para uma fotocélula, a variação da intensidade luminosa que atinge o sensor de luz gera sinais proporcionais e semelhantes aos sinais gerados no celular. Nesse momento, lembramos que a intensidade de uma OEM varia com o quadrado da amplitude do campo elétrico da forma (Tipler e Mosca, 2015):

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \quad \text{Eq. [17]}$$

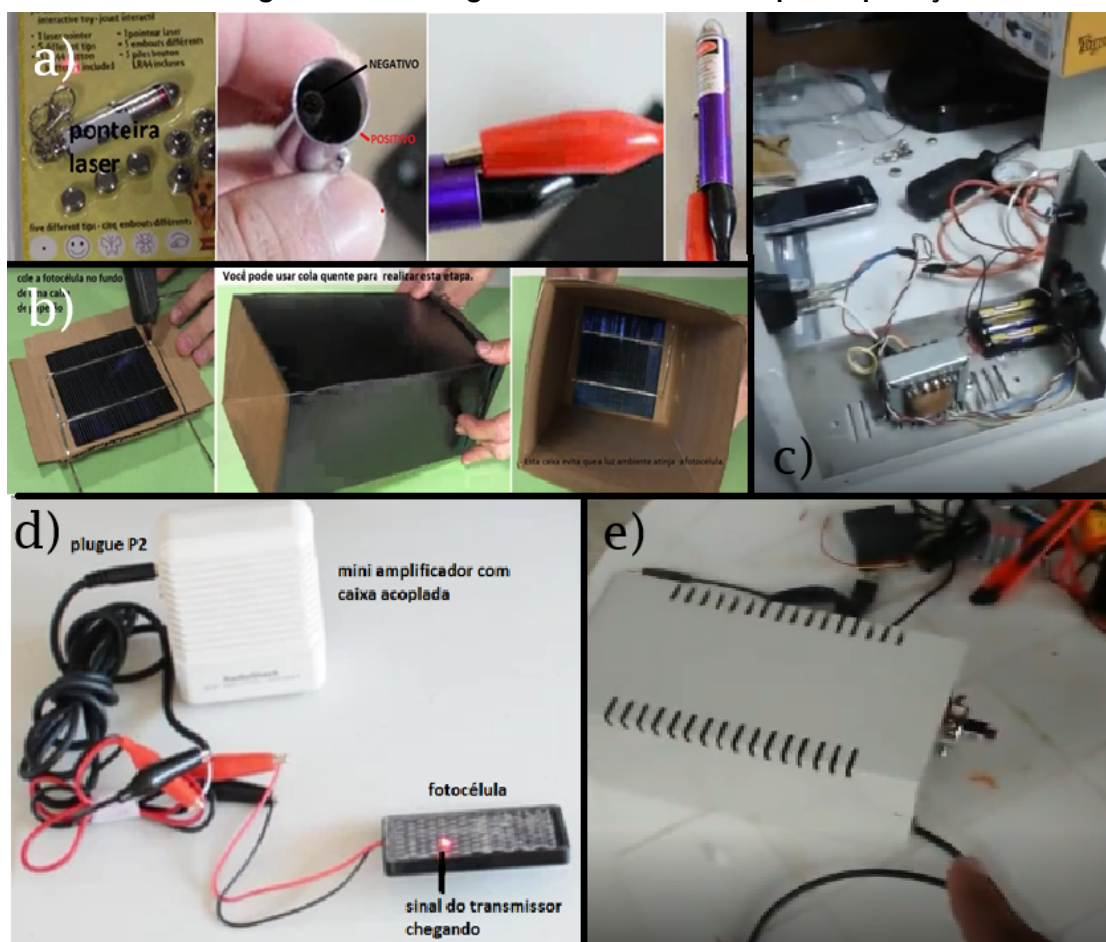


Como  $E_0$  representa a amplitude (valor máximo) do campo elétrico da onda, ao alterarmos a intensidade do laser, também estamos alterando o valor de amplitude dessa onda; logo, transmitindo a informação por meio da variação da amplitude (modulação AM).

Se conectarmos a saída da fotocélula a um plugue P2, o sinal pode ser introduzido em qualquer aparelho que tenha entrada de áudio (caixinhas amplificadas, por exemplo). Pode-se utilizar outro celular para funcionar como um analisador de sinais (osciloscópio). Para isso, basta instalar um aplicativo que permita transformar o *smartphone* em um osciloscópio ou um analisador de áudio. Uma alternativa para analisar os sinais que chegam à fotocélula é conectar o plugue diretamente na entrada de microfone de um *notebook*. Dessa forma, é possível utilizar um *software* analisador de áudio para verificar todos os parâmetros do sinal que chega e verificar se ele é compatível com o sinal gerado antes da transmissão por laser.

A Figura 12 mostra um exemplo de montagem do aparato experimental em que, em (a), observa-se a conexão de cabos tipo “jacaré” à ponteira laser para posterior conexão com o restante do circuito. Em (b), observa-se a montagem da fotocélula no interior de uma caixa, com objetivo de minimizar ruídos causados pela luz ambiente. Em (c), pode-se visualizar a montagem do transformador, da chave de acionamento e da fonte no interior da carcaça de um estabilizador de tensão retirado de sucata, o que aumenta a durabilidade do aparato e fonte de energia e facilita seu transporte e manuseio. Em (d), apresenta-se uma segunda versão de fotocélula ligada à caixinha amplificadora e, por fim, em (e), observa-se a caixa contendo os componentes elétricos montados e com a ponteira laser instalada em sua parte frontal.

Figura 12 – Montagem do transmissor AM para aplicação

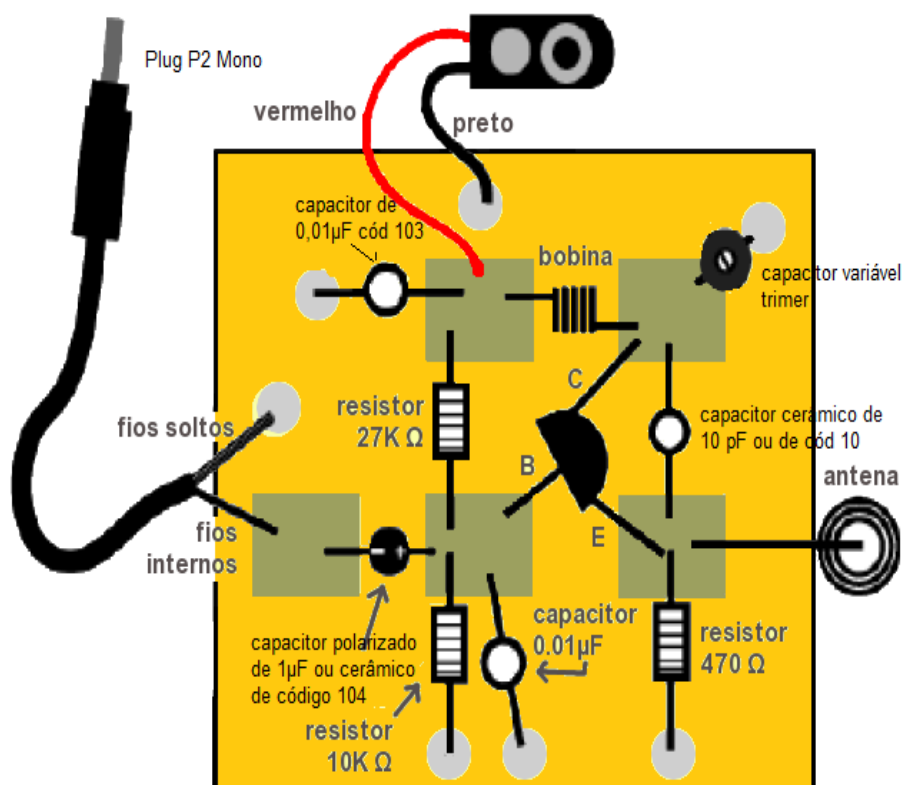


Fonte: elaborada pelos autores.

## O transmissor FM

Será apresentada, agora, uma transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas (OEM) na faixa de FM, compreendida entre 88 e 108 MHz. A Figura 13 apresenta o circuito do minitransmissor de FM, desenvolvido por Rossini (2016) e utilizado neste experimento. A montagem desse transmissor, além de constituir uma atividade prática, possibilita o desenvolvimento de diversas atividades voltadas aos estudantes de engenharia e de cursos técnicos. O princípio de funcionamento e a função de cada componente do circuito favorecem uma ampla discussão sobre aspectos conceituais e tecnológicos, que podem ser explorados pelo professor em sala de aula (Figura 13).

Figura 13 – Esquema final de um mini transmissor em FM

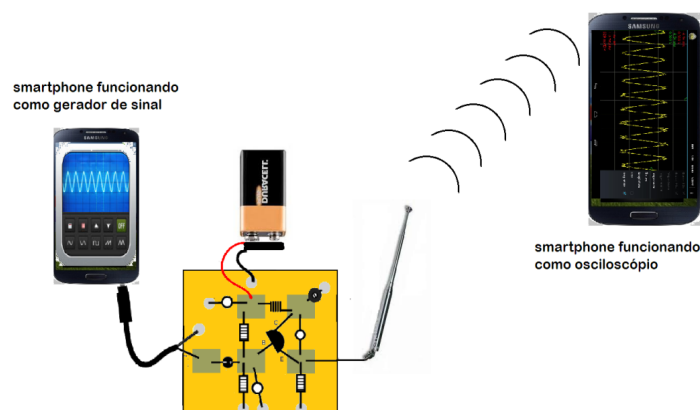


Fonte: elaborada pelos autores e com montagem M2 disponível nos anexos.

### Como gerar e transmitir o sinal de rádio?

Para a geração do sinal, é necessário conectar um *smartphone*, utilizado como gerador de sinais e equipado com um aplicativo de geração de áudio, ao plugue P2 do minitransmissor, por meio da saída de fones de ouvido. Dessa forma, o sinal de áudio gerado é enviado ao circuito transmissor, no qual é amplificado, modulado em FM e transmitido pela antena telescópica. Como muitos *smartphones* possuem receptor de FM, é possível sintonizar outro aparelho, nas proximidades do dispositivo, na frequência de emissão do transmissor, permitindo que ele receba os sinais enviados pelo *smartphone* gerador (Figura 14). Caso o aparelho receptor esteja equipado com um aplicativo analisador de sinais, ele poderá ser utilizado como um osciloscópio, possibilitando o monitoramento dos sinais recebidos e a realização de diversas atividades nas quais parâmetros da onda transmitida, como frequência, amplitude e forma de onda, podem ser modificados (Rossini, 2016; Trore, 2016).

Figura 14 – Diagrama de funcionamento do experimento de transmissão em FM



Fonte: elaborada pelos autores.

A Figura 15 mostra a montagem e operação do mini transmissor de FM. Em (a), observa-se uma montagem em protoboard desse mini transmissor na qual a antena telescópica foi presa em uma trave de rede de tênis de mesa. Em (b), é mostrado o sinal de áudio gerado com certos parâmetros em um celular e o sinal sendo recebido em outro celular na frequência de 90,3 MHz. Já em (c), apresenta-se um segundo modelo de montagem acondicionado em uma caixinha de papelão envolta por papel-alumínio para a diminuição de interferência e com a antena presa a um rolo de fita crepe. Por fim, em (d), vê-se o plugue de áudio conectado ao *smartphone* que irá gerar os sinais e a plaquinha com os componentes soldados para a utilização.

Figura 15 – Montagem e funcionamento do experimento de transmissão em FM



Fonte: elaborada pelos autores.



## BREVE DISCUSSÃO E RESUMO DE ROTEIRO DIDÁTICO

A proposta pode ser aplicada integral ou parcialmente em diversos ambientes, desde turmas de Ensino Médio, Ensino Técnico ou disciplinas do Ensino Superior, como Laboratórios de eletrônica; Física III, Física IV, Física Moderna; Telecomunicações; e Computação. Como o espectro de aplicações é amplo, consideramos oportuno apresentar propostas de roteiros didáticos a fim de aprofundar o conhecimento sobre OEM.

O Quadro 1 resume os dados sobre os experimentos, o nível de ensino, a duração da aula, os conteúdos conceituais, os objetivos didáticos, o desenvolvimento da atividade e os recursos necessários para sua realização. Limitações e aspectos técnicos positivos são inerentes à criação de qualquer proposta experimental. Nesse caso, foram identificadas limitações relacionadas à(ao):

- Dependência de laboratório de informática ou aparato multimídia para demonstração da notação fasorial;

- Estabilidade do mini transmissor de FM e sua suscetibilidade a interferências externas e ruídos;

- Alcance reduzido do mini transmissor de FM devido a sua baixa potência, restringindo a aplicação apenas dentro do perímetro da sala de aula;

- Distorção dos sinais de áudio do transmissor AM em frequências de áudio ou intensidades extremas e sensibilidade à vibração do aparato;

- Imprecisão de sintonia do mini transmissor de FM;

- Vulnerabilidade mecânica dos transmissores.

**Quadro 1 – Resumo de atividades propostas para aplicação**

| Experimento / Abordagem                                  | Nível de Ensino e duração da atividade | Conteúdos Trabalhados                                                 | Objetivos Didáticos                                                                            | Atividades Propostas                                                                                                                                                                       | Recursos Necessários                 |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Representação vetorial com animações para AM e FM</b> | Ensino Médio<br>Duração: 2h-aulas      | Ondas periódicas, frequência, amplitude, som e representação vetorial | Visualizar comportamento das ondas, sua representação gráfica e aplicação nas telecomunicações | -Observar animações e discutir como uma onda periódica pode ser representada graficamente;<br>-Observar animações e discutir, por meio de representações vetoriais, as modulações AM e FM. | Computador, projetor e simuladores   |
| <b>Notação fasorial com animações para AM e FM</b>       | Ensino Superior<br>Duração: 4h-aulas   | Fasores complexos, modulação AM e FM, processamento de sinais         | Compreender representação matemática e física da modulação                                     | -Análise dinâmica da alteração dos parâmetros de amplitude, frequência e fase nas animações envolvendo uma onda periódica;                                                                 | Software de simulação e computadores |



|                                 |                                      |                                                                        |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                 |                                      |                                                                        |                                                                                                  | -Fazer um paralelo entre a demonstração visual e o formalismo matemático.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Transmissor AM via laser</b> | Ensino Médio<br>Duração: 2h-aulas    | Luz, som, ondas eletromagnéticas e comunicação eletromagnética básica. | Demonstrar transmissão de informação por luz e compreender aspectos qualitativos da modulação AM | -Transmissão simples de áudio via laser com bloqueio de sinal com um obstáculo, reflexão do mesmo em espelhos, mudanças na distância de comunicação e alinhamento do aparato;<br>- Geração de áudio com alteração de sua frequência, intensidade e forma da onda (quadrada, triangular ou dente de serra) e sua análise e discussão após a recepção;<br>- Relacionar o experimento aos princípios utilizados em sistemas de comunicação óptica e fibras ópticas. | Conjunto de transmissor laser de baixo custo e celulares com entradas para fone de ouvidos.                                                                                                              |
| <b>Transmissor AM via laser</b> | Ensino Superior<br>Duração: 4h-aulas | Comunicação óptica, modulação analógica, fotodetectores                | Investigar os princípios da transmissão óptica de sinais                                         | -Além das atividades realizadas anteriormente, montar o transmissor e receptor, soldar componentes, organizar e discutir a função de cada um deles é uma atividade interessante;<br>-Observar interferências causadas por luminosidade externa na fotocélula (iluminar com uma lanterna, por exemplo).                                                                                                                                                           | Osciloscópio, multímetro, ferramentas como chaves de fenda Phillips, ferro de solda, etc. Conjunto de transmissor laser de baixo custo e celulares com entrada P2 para áudio ou adaptadores compatíveis. |
| <b>Mini transmissor FM</b>      | Ensino Médio<br>Duração: 2h-aulas    | Rádio difusão, propagação de ondas de rádio                            | Introduzir os conceitos de comunicação sem fio                                                   | Localizar frequência e transmitir áudio para rádio FM dos celulares dos alunos, alterando parâmetros do áudio transmitido como: frequência, intensidade e forma da onda e realizar discussão.                                                                                                                                                                                                                                                                    | Mini transmissor FM, celulares compatíveis                                                                                                                                                               |
| <b>Mini transmissor FM</b>      | Ensino Superior<br>Duração: 4h-aulas | Modulação FM, radiofrequência, telecomunicações                        | Analisar os fundamentos físicos e eletrônicos envolvidos na modulação FM e sua propagação        | - Além das atividades do item anterior, investigar o ruído, interferência e alcance na propagação;<br>-Atividade de montagem e testagem do transmissor, analisando a funcionalidade de cada componente e do circuito como um todo;<br>-Relacionar experimento a tecnologias modernas como rádio comercial, comunicação aeronáutica, Wi-Fi, Bluetooth, telefonia e satélites.                                                                                     | Osciloscópio, multímetro, ferramentas como chaves de fenda, alicates, ferro de solda, protoboard, e componentes para montagem.                                                                           |

Fonte: elaborado pelos autores.

Os pontos positivos identificados estão relacionados à(ao):

- Baixo custo e facilidade de transporte e montagem dos dispositivos;
- Fácil demonstração em sala, visualização da propagação do sinal via laser e aproximação entre teoria e prática;



-Estímulo à montagem, protagonismo e desenvolvimento de habilidades técnicas envolvendo soldagem, identificação de componentes, diagnósticos etc.;

-Baixa complexidade eletrônica dos circuitos;

-Resposta imediata do transmissor, ou seja, o áudio transmitido é percebido praticamente em tempo real.

Dentro das atividades experimentais podemos, também, recorrer ao uso de perguntas investigativas que estimulem a curiosidade, o pensamento crítico e a participação ativa dos estudantes, incentivando-os a formular hipóteses, observar fenômenos, analisar resultados e construir explicações científicas a partir da prática. O Quadro 2 elenca as questões propostas para os experimentos listados no Quadro 1, além de definir os conceitos envolvidos na experimentação.

**Quadro 2 – Lista de perguntas investigativas relacionadas à prática experimental sobre transmissão de OEM**

| Tema da proposta                        | Perguntas investigativas                                                 | Conceitos envolvidos                                        |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Animações fasoriais AM</b>           | O que representa o fasor da onda portadora?                              | Fasores, representação vetorial                             |
|                                         | Como a amplitude varia durante a modulação AM?                           | Modulação em amplitude                                      |
|                                         | Por que o envelope da onda acompanha o áudio?                            | Informação modulante                                        |
|                                         | O que acontece quando aumentamos a amplitude do sinal modulante?         | Índice de modulação                                         |
|                                         | Como identificar supermodulação visualmente?                             | Distorção do sinal AM                                       |
| <b>Animações fasoriais FM</b>           | O que muda no fasor durante a modulação FM?                              | Frequência angular, fase                                    |
|                                         | Por que a amplitude permanece praticamente constante no FM?              | Modulação em frequência                                     |
|                                         | Como a frequência do sinal modulante altera o movimento fasorial?        | Frequência instantânea                                      |
|                                         | Como visualizar a diferença entre desvio de frequência pequeno e grande? | Desvio de frequência                                        |
| <b>Animações fasoriais AM/FM</b>        | Quais diferenças visuais existem entre AM e FM?                          | Comparação entre modulações                                 |
|                                         | Como a informação sonora aparece nas representações fasoriais?           | Sinal modulante                                             |
|                                         | O que o movimento circular do fasor representa fisicamente?              | Oscilações harmônicas                                       |
|                                         | Como a matemática da modulação aparece na animação?                      | Funções senoidais                                           |
|                                         | Como as animações ajudam a compreender as telecomunicações?              | Visualização científica                                     |
| <b>Mini transmissor de AM por laser</b> | Como a luz pode transportar informação sonora?                           | Modulação AM óptica, propagação da luz                      |
|                                         | O que acontece se o laser ficar desalinhado?                             | Propagação retilínea da luz                                 |
|                                         | A iluminação ambiente interfere no sinal recebido?                       | Interferência luminosa                                      |
|                                         | Como o receptor converte luz novamente em som?                           | Conversão fotoelétrica                                      |
|                                         | Qual a relação entre intensidade luminosa e áudio recebido?              | Modulação em amplitude                                      |
|                                         | Como a comunicação óptica é utilizada atualmente?                        | Fibra óptica, telecomunicações                              |
|                                         | Por que o laser é mais eficiente que uma lanterna comum?                 | Direcionalidade da luz, coerência                           |
| <b>Mini transmissor de FM</b>           | Como a voz consegue ser transmitida sem fios até o rádio receptor?       | Ondas eletromagnéticas, transmissão de sinais, radiodifusão |
|                                         | Por que o rádio precisa estar na mesma frequência do transmissor?        | Frequência, sintonia, ressonância                           |
|                                         | O que acontece com o sinal quando aumentamos a distância?                | Atenuação, propagação de ondas                              |
|                                         | Obstáculos interferem na transmissão do sinal?                           | Interferência, absorção de ondas                            |



|  |                                                             |                                                 |
|--|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|  | Qual a função da antena no transmissor?                     | Irradiação eletromagnética, comprimento de onda |
|  | Por que o FM possui menos ruído que o AM?                   | Modulação em frequência, imunidade a ruídos     |
|  | Como ocorre a transformação do som em onda eletromagnética? | Conversão eletroacústica                        |

Fonte: elaborado pelos autores.

Em conjunto, as atividades propostas e as questões investigativas apresentadas constituem um roteiro didático que busca favorecer a participação ativa dos estudantes na construção do conhecimento sobre ondas eletromagnéticas e sistemas de comunicação. Ao explorar experimentalmente os processos de transmissão e recepção de sinais em AM e FM, os alunos são incentivados a formular hipóteses, interpretar resultados e estabelecer relações entre os conceitos teóricos e suas aplicações tecnológicas, contribuindo para uma aprendizagem mais significativa e contextualizada da Engenharia e da Física.

## CONCLUSÃO

A transposição didática necessária para adequar as novas tecnologias ao cotidiano dos alunos nem sempre acontece em sala de aula. O objetivo deste trabalho foi apresentar aspectos básicos de uma tecnologia que, apesar de existir há mais de cem anos, continua em constante evolução e ainda é pouco abordada no ambiente escolar. Considerando esse contexto, a utilização das notações fasoriais no estudo da modulação oferece uma maneira diferente de abordar esses conteúdos, que, por tradicionalmente dependerem de conhecimentos matemáticos mais avançados, como o cálculo diferencial e integral, são frequentemente apresentados, em muitas obras, por meio de fórmulas prontas e de uma abordagem predominantemente mecânica. Por isso, uma metodologia mais visual, associada à utilização de experimentos de baixo custo, pode proporcionar ao aluno uma compreensão mais ampla do conteúdo proposto.

Para a aplicação integral da proposta, sugere-se iniciá-la em turmas de Engenharia, de cursos técnicos em Eletrônica ou de áreas afins, uma vez que se pressupõe que esse público possua a maior parte dos conhecimentos prévios necessários para a compreensão completa do tema. As discussões qualitativas e quantitativas sobre as potencialidades e as limitações pedagógicas da aplicação da proposta deverão ser aprofundadas em trabalhos futuros. Entretanto, observou-se que a maioria dos alunos demonstrou grande curiosidade para compreender o



funcionamento dos experimentos e dos processos de transmissão e recepção de OEM, o que favoreceu o engajamento e o interesse pela atividade. Nesse contexto, as barreiras conceituais, as limitações de infraestrutura e a heterogeneidade dos discentes constituíram alguns obstáculos à articulação entre teoria e prática, sem, contudo, impedir a obtenção de resultados positivos com a aplicação da atividade.

Por fim, o principal objetivo, após a exposição do tema, é promover a enculturação científica dos discentes, inseridos em um mundo no qual essa tecnologia está amplamente presente. Nesse cenário, a transmissão de OEM e suas técnicas integram diversas atividades e sistemas do cotidiano. Televisores, rádios, sistemas de telefonia móvel, satélites e redes de internet são apenas alguns exemplos de tecnologias baseadas na transmissão e recepção de OEM. Desse modo, se, ao final da aplicação desta proposta, o aluno for capaz de interpretar os fenômenos relacionados ao tema de maneira mais consciente e desenvolver uma visão crítica sobre as tecnologias que o cercam, a missão deste trabalho terá sido cumprida.

## RESULTADOS

Como propriedades físicas e geométricas, tem-se que o módulo de elasticidade do aço-carbono utilizado nas treliças é igual a 200 GPa e as áreas de seção transversal das barras AC e BC são, respectivamente, 1000 mm<sup>2</sup> e 2000 mm<sup>2</sup>.

Para a resolução do problema através da utilização das metodologias analíticas (exata e aproximada), faz-se necessária a utilização dos conceitos de Estática de Corpo Rígido, admitindo-se que a estrutura se encontra em equilíbrio estático no espaço, com o somatório de forças nas direções x e y iguais a zero.

## REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A. **Teoria de Antenas** (3 ed.). Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas de Comunicação**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- LATHI, B. P.; DING, Z. **Sistemas de comunicações Analógicos e digitais Modernos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- LIMA, T. R. Q. F. *et al.* A instituição escolar na construção da sociedade inclusiva. **Revista Foco**, Curitiba, v. 17, n. 4, p. 01-21, mar. 2024.
- MARTINS, R. M. **Antenas e Propagação**. IFSC. São José: p. 47. 2016.

MEDEIROS, J. C. O. **Princípios de Telecomunicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2007. 322 p. ISBN 978-85-365-033-1.

MONTENEGRO, E. C. **Ondas Eletromagnéticas**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2023.

ROSSINI, R. T. **Transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas: uma proposta experimental para o ensino médio e técnico**. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física-MPEF) - Instituto de Física, UFRJ. Rio de Janeiro: p. 156. 2016.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 6. ed. [S.l.]: LTC, v. 3, 2015.

TRORE, **Transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas**, 2016. Disponível em: <<https://trore.blogspot.com/p/videos.html>>. Acesso em: 29 nov. 2025.

WALDMAN, H. **Telecomunicações: Princípios e Tendências**. 2. ed. São Paulo: Érica, 1997.

## ANEXOS

A1 – Animação de um fasor girante gerando uma função cossenoidal gerada com o software Modellus. Material digital disponibilizado em Google Drive. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/0By\\_U3e9b3sd2TGhkY2ZMei1IRWM/view?resourcekey=0-feheTZ35e11qhmdh65Qosg](https://drive.google.com/file/d/0By_U3e9b3sd2TGhkY2ZMei1IRWM/view?resourcekey=0-feheTZ35e11qhmdh65Qosg). Acesso em: Jan. 2026.

A2 – Animação da transmissão de uma onda eletromagnética. PHET Colorado, disponível em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulations/radio-waves](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/radio-waves). Acesso em: jan. 2026.

A3 – Animação da modulação AM gerada com o software Modellus. Material digital disponibilizado em Google Drive. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/0By\\_U3e9b3sd2dEpZT0lJcjlXRIE/view?resourcekey=0-U\\_nEnOCWKSdnLn4cwpAbZQ](https://drive.google.com/file/d/0By_U3e9b3sd2dEpZT0lJcjlXRIE/view?resourcekey=0-U_nEnOCWKSdnLn4cwpAbZQ). Acesso em: Jan. 2026.

A4 – Animação da modulação FM gerada com o software Modellus. Material digital disponibilizado em Google Drive. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/0By\\_U3e9b3sd2SUI4YTR6Q3FDaU0/view?resourcekey=0-2ZXubOA8jp-72slkfN3s0g](https://drive.google.com/file/d/0By_U3e9b3sd2SUI4YTR6Q3FDaU0/view?resourcekey=0-2ZXubOA8jp-72slkfN3s0g). Acesso em: Jan. 2026.

M1 - Montagem e funcionamento em AM. Material digital disponibilizado em Google Drive. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/0By\\_U3e9b3sd2RUhuWXJjMmZ3TIU/view?resourcekey=0-ksV7eZzAgjKjVLTBfslYpA](https://drive.google.com/file/d/0By_U3e9b3sd2RUhuWXJjMmZ3TIU/view?resourcekey=0-ksV7eZzAgjKjVLTBfslYpA). Acesso em: Fev. 2026.

M2 - Montagem e funcionamento do transmissor FM. Material digital disponibilizado em Google Drive. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/0By\\_U3e9b3sd2RUhuWXJjMmZ3TIU/view?resourcekey=0-ksV7eZzAgjKjVLTBfslYpA](https://drive.google.com/file/d/0By_U3e9b3sd2RUhuWXJjMmZ3TIU/view?resourcekey=0-ksV7eZzAgjKjVLTBfslYpA). Acesso em: fev. 2026.