



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPO VII – ANTONIO MARIZ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

JOSÉ ELITON DA SILVA COSTA

A OLA MEXICANA SIMULADA NO MODELLUS

**PATOS
2018**

JOSÉ ELITON DA SILVA COSTA

A OLA MEXICANA SIMULADA NO MODELLUS

Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física Geral

Orientador: Prof. Dr. Marcelo da Silva Vieira.

**PATOS
2018**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

C837o Costa, José Eliton da Silva.

A ola mexicana simulada no Modellus [manuscrito] / Jose Eliton da Silva Costa. - 2018.

50 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física)

Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas , 2018.

"Orientação : Prof. Dr. Marcelo Vieira da Silva ,
Coordenação do Curso de Física - CCEA."

1. Ola mexicana. 2. Software Modellus. 3.
Movimento Harmônico Simples. I. Título

21. ed. CDD 539

JOSÉ ELITON DA SILVA COSTA

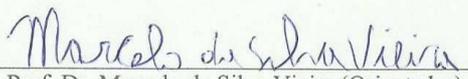
A OLA MEXICANA SIMULADA NO MODELLUS

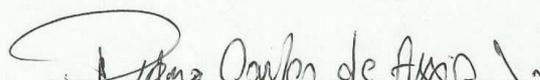
Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito à obtenção do título de Licenciado
em Física.

Área de concentração: Física Geral

Aprovada em: 07/12/2018.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Marcelo da Silva Vieira (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof. Dr. Everton Cavalcante
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus, que sempre me proporcionou grandes vitórias apesar de todas as adversidades nesse percurso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder mais uma vitória em minha vida, por me dar forças e coragem para enfrentar cada obstáculo encontrado.

Agradeço a toda a minha família, ao meu pai José Edinaldo Costa Bastita e especialmente a minha mãe Maria José da Silva que sempre fez de tudo e não mediu esforços para nos proporcionar sempre o melhor.

Agradeço a minha avó Odília Inácia da Silva ao qual passou sempre os valores mais importantes da vida e que com todo amor e carinho me ajudou a ser uma pessoa consciente e de caráter.

Agradeço ao meu irmão Edson da Silva, que sempre me deu forças em todos os momentos, pelas nossas conversas que vão sempre até as madrugadas e ao qual me ajudaram sempre.

Às minhas irmãs Edna da Silva e Erica da Silva por todo carinho e companheirismo.

A minha namorada Thainara Bonifácio Vicente por todo amor, carinho e dedicação e por me ajudar em todos os momentos ao qual passei por dificuldades.

Ao meu amigo e colega de universidade Ademar Nunes dos Santos, que nunca mediu esforços para me ajudar, ao qual vem caminhando junto comigo desde os anos iniciais da escola.

Ao meu amigo de curso Nailton Dutra dos Santos por suas ajudas e orientações durante todo o curso.

Aos meus colegas de classe que caminharam comigo até aqui em especial.

Aos meus colegas e amigos de classe: Jerffeson Ramon, Alan Ronny, Felipe Garcia.

A todos os meus amigos e amigas que, devido sua numerosidade não citarei nomes para não esquecer alguns.

Ao meu orientador Marcelo da Silva Vieira pelas suas orientações, que com toda sua bagagem sempre me foi solícito.

Aos professores da Banca Examinadora, ao Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior e o Prof. Dr. Everton Cavalcante.

A todos os que aqui não foram citados, mas que contribuíram para a realização dessa etapa de minha vida.

*“Não existem métodos fáceis para resolver
problemas difíceis”*

(René Descartes)

RESUMO

Este trabalho traz uma discussão acerca da utilização do software Modellus e de conceitos ondulatórios para simular o comportamento idealizado de uma ola mexicana. Uma onda consiste em uma perturbação que se propaga de um ponto a outro de um determinado meio ou até mesmo o vácuo em que é transportada energia e momento, sendo que tudo isso ocorre com uma velocidade definida. A ola se trata de um fenômeno que ocorre geralmente em jogos esportivos de futebol, por exemplo, quando a multidão levanta os braços e imediatamente senta-se. Neste momento é provocado um deslocamento de uma onda humana onde o trabalho realizado para erguer os braços se transmite com uma velocidade bem definida no meio formado pelos espectadores. Para a realização deste trabalho foram feitos estudos sobre o processo de modelagem através do programa Modellus. Também fizemos uma abordagem sobre as ondas e os conceitos de Movimento Harmônico Simples, destacando o efeito da ola, por fim estimamos alguns parâmetros relativos ao fenômeno, onde pudemos construir simulações para analisar o comportamento ondulatório da ola. Como resultado pode-se calcular características como velocidade, aceleração, frequência e período da ola mexicana. Com esse trabalho foi possível perceber grandes aplicabilidade do software para simular inúmeros fenômenos físicos.

Palavras-Chave: Ola Mexicana, Software Modellus, Movimento harmônico simples.

ABSTRACT

This paper presents a discussion about the use of Modellus software and wave concepts to simulate the idealized behavior of a Mexican wave. A wave consists of a disturbance that propagates from one point to another of a given medium or even the vacuum in which energy and momentum are transported, all of which occur at a definite speed. The wave is a phenomenon that usually occurs in football sports games, for example, when the crowd raises their arms and immediately sits down. At this moment a displacement of a human wave is caused where the work done to raise the arms is transmitted with a well defined speed in the medium formed by the spectators. For the accomplishment of this work, studies were made on the modeling process through the Modellus program. We also made an approach on the waves and the concepts of Simple Harmonic Motion, highlighting the effect of the wave, finally estimating some parameters related to the phenomenon, where we could construct simulations to analyze the wave behavior of the wave. As a result one can calculate characteristics like velocity, acceleration, frequency and period of the Mexican wave. With this work it was possible to perceive the great applicability of the software to simulate numerous physical phenomena.

Keywords: Mexican wave, Modellus Software, Simple harmonic motion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Tela de entrada do Modellus	16
Figura 02 - Interface do programa Modellus versão 4.01	17
Figura 03 - Janela Início	18
Figura 04 - Janela Modelo	18
Figura 05 - Janela Parâmetros	18
Figura 06 - Janela Objetos	19
Figura 07 - Janela Gráfica	19
Figura 08 - Representação de um modelo matemático e seu respectivo gráfico	20
Figura 09 - Onda longitudinal	22
Figura 10- Oscilação longitudinal das partículas de ar	23
Figura 11 - Onda transversal em uma corda	23
Figura 12 - Onda mista	24
Figura 13 - Ondas do tipo P	25
Figura 14 - Ondas do tipo S	26
Figura 15 - Ondas na água	26
Figura 16 - Onda eletromagnética	27
Figura 17 - Ondas gravitacionais	27
Figura 18 - Ondas unidimensionais em uma corda e em uma mola	28
Figura 19 - Onda bidimensional na água	28
Figura 20 - Ondas tridimensionais (sonora e luminosa)	28
Figura 21 - Pulso de onda em uma corda para $t = 0$	29
Figura 22 - Pulso de onda em uma corda para $t \neq 0$	29
Figura 23 - Movimento Circular e Uniforme	31
Figura 24 - Círculo de referência	32
Figura 25 - Sistema massa-mola em equilíbrio	33
Figura 26 - Sistema massa mole alongado	33
Figura 27 - Coreografia da ola	36
Figura 28 - Ilustração de uma ola ideal	38
Figura 29 - Modelo matemático para a ola mexicana	39
Figura 30 - Modelo matemático correto	40
Figura 31 - Parâmetros para a simulação	40

Figura 32 - Variável independente da simulação	41
Figura 33 - Objetos da simulação	41
Figura 34 - Arranjo de objetos da simulação	42
Figura 35 - Janela animação	42
Figura 36 - Animação da ola mexicana	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Grandezas e seus valores	38
Tabela 02 - Resultados da animação da ola mexicana	44

LISTA DE ABREVIATURAS

MRU	Movimento Retilíneo Uniforme
MHS	Movimento Harmônico Simples
MCU	Movimento Circular Uniforme
GPS	Sistema de Posicionamento Global

LISTA DE SÍMBOLOS

ω	Frequência angular
φ_0	Ângulo de fase
K	Constante da mola
k	Número de onda
λ	Comprimento de onda
f	Frequência da onda
T	Período da onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	SOFTWARE MODELLUS.....	15
2.1	Sobre o software.....	15
2.2	Algumas funções do programa.....	17
3	BREVE ABORDAGEM DAS ONDAS.....	21
3.1	Classificação das ondas.....	21
3.2	Matemática das ondas unidimensionais.....	29
3.2.1	Ondas progressivas.....	29
3.2.2	Equação das ondas unidimensionais.....	30
3.3	Movimento MHS e sistema massa-mola.....	31
3.3.1	Alguns parâmetros das ondas.....	34
4	MODELAGEM COMPUTACIONAL DA OLA MEXICANA.....	36
4.1	Compreendendo o fenômeno da ola mexicana.....	36
4.2	Utilizando o modellus para modelar a ola.....	37
4.3	Modelando a ola mexicana.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O ser humano sempre teve uma grande admiração pelas ondulações em superfícies, um bom exemplo disso são as ondas em meios líquidos como a água, também a vibração em membranas, as ondas sísmicas, etc. Uma onda é uma perturbação do meio em que essa perturbação se move de sua origem até determinado ponto, entretanto, esse meio não é transportado. As ondas são capazes de transportar energia e momento através de grandes distâncias, no entanto, quando fazem isto não transportam nenhuma quantidade de matéria.

O termo ola mexicana deriva do espanhol “ola” que significa onda. É um fenômeno que acontece principalmente em estádios de eventos esportivos. Esse fenômeno consiste basicamente em um movimento nas arquibancadas e organizado onde as pessoas se levantam em pequenos conjuntos levantando os braços e se sentam em seguida, isso nos dar a impressão de que existe uma grande onda humana percorrendo toda a arquibancada.

Para compreendermos melhor esse acontecimento utilizamos o software Modellus para fazermos um estudo a cerca desse fenômeno, foi utilizado também alguns conceitos ondulatórios especificamente os conceitos de Movimento Harmônico Simples, já que esse é um movimento que vai se repetindo em volta de todo o estádio.

O uso de simulações oferece uma gama enorme de ferramentas que nos permitem estudar e entender os princípios teóricos dos fenômenos da natureza, sendo bastante difundidos os laboratórios virtuais que trabalham especialmente com a criação e desenvolvimento de softwares que propiciam grandes avanços nos dias atuais.

Além de disso, os softwares vem se tornando uma ótima ferramenta na questão do ensino, pois faz com que sejam criadas condições para processos que não podem ser expostos através de recursos dispostos em sala de aula. Com isso, os alunos podem fazer o manuseio de todo o processo, tornando sua aprendizagem mais significativa e provocando uma maior discussão.

Nesse trabalho foi feito um estudo a respeito do fenômeno da ola mexicana em que foi utilizado o software Modellus para modelar esse movimento e estudar algumas de suas características. Além disso, foram utilizados os conceitos de Movimento Harmônico Simples para caracterizarmos esse processo.

O objetivo dessa simulação é mostrar as relações entre alguns conceitos ondulatórios e o fenômeno da ola mexicana, além disso, poderemos descrever seu movimento, velocidade, aceleração, frequência, frequência angular.

Para o desenvolvimento dessa simulação foram também levados em conta os trabalhos do professor de Física Tamas Vicsek, da Universidade húngara Eotvos, e que foi publicada na revista britânica Nature e que nos dá algumas características desse fenômeno como amplitude, sentido do movimento, assim como sua velocidade (NATURE, 2002).

Esse trabalho foi dividido em quatro partes. A primeira parte trata-se de uma descrição do software Modellus, explicitando todo seu funcionamento e suas finalidades. A segunda parte traz uma abordagem conceitual e matemática das ondas, além de suas principais características. Na terceira parte foi desenvolvida a modelagem da ola mexicana no software Modellus e na última parte foram trazidos os resultados e discussões sobre a simulação e as características encontradas na modelagem desse fenômeno.

2 O SOFTWARE MODELLUS

“A modelagem é mais do que uma ferramenta útil para a resolução de problemas, ela pode contribuir de forma significativa para uma visão de ciência mais adequada, cuja essência está na criação de modelos”.

[Araújo, Brandão e Veit (2008)]

2.1 Sobre o software

No contexto científico contemporâneo, o processo de modelagem assume um papel fundamental na busca por respostas que auxiliam o homem a compreender o mundo em que vive. Sabemos que a Física trabalha com modelos que visam compreender e analisar a realidade através de aproximações e idealizações. Nessa perspectiva muitos softwares e programas foram criados com a intenção de analisar comportamentos de sistemas físicos, dentre eles, destacaremos aqui o programa Modellus.

O software Modellus consiste de um ambiente computacional que permite construir e simular modelos de fenômenos físicos, químicos e matemáticos utilizando-se para isso, de equações matemáticas que representam esses fenômenos. O programa foi desenvolvido para ser utilizado para fins educacionais na área de ensino de ciências e matemática.

Nessa perspectiva, Carvalho Junior (2008) destaca que o Software Modellus possui inúmeras funções, as mais utilizadas são a de desenvolver cálculos numéricos fundamentados em equações e exibir os resultados na forma de gráficos e tabelas.

O programa pode ser baixado gratuitamente em sua página na internet através do endereço www.modellus.com, sendo aceito em diversos sistemas computacionais tais como (Windows, Linux e MAC OS). Sua grande vantagem em relação a demais softwares é a distribuição gratuita, não sendo necessário o usuário estar conectado à internet (CHWIF; MEDINA, 2010). Já “do ponto de vista computacional, o programa pode ser visto como um micromundo no computador para uso tanto dos estudantes quanto dos professores, não sendo baseado numa metáfora de programação [...]” (ARAUJO, 2002, p. 8).

O Software Modellus foi criado por alguns pesquisadores que faziam parte do grupo de pesquisa de Vitor Duarte Teodoro (TEODORO, 1997), Professor da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova Lisboa. De acordo com Teodoro (1997), o programa permite a criação de função em ambientes de aprendizagem. Ele é um software de modelagem computacional que pode ser usado por professores de Ciências. Assim sendo,

O Modellus é uma ferramenta cognitiva para auxiliar a internalização de conhecimento simbólico, preferencialmente em contexto de atividade de grupo e de classe, em que a discussão, a conjectura e o teste de ideias são atividades dominantes, por oposição ao ensino direto por parte do professor (TEODORO, 2002, p. 21).

Desta forma o usuário pode utilizá-lo para descrever num modelo matemático que represente um determinado fenômeno e observar sua simulação computacional. Isso é possível porque o programa cria links entre essas equações com os elementos interativos que o programa oferece, de modo que a situação física possa ser animada.

Nesse sentido, Araujo (2002, p. 20) destaca alguns pontos importantes em que o Modellus se destaca:

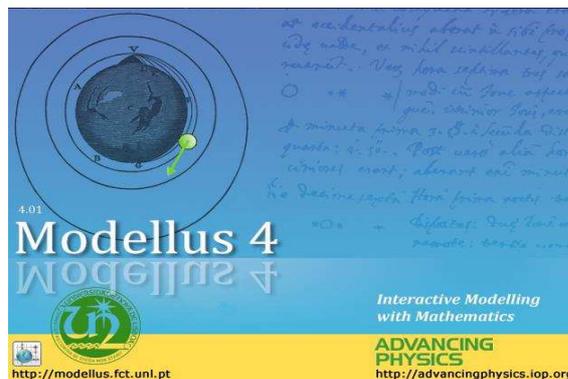
- A construção e a exploração de múltiplas representações de modelos;
- A análise de qualidade dos modelos;
- O reforço do pensamento visual, sem memorização dos aspectos de representação; formal, por meio de equações e outros processos formais;
- A abordagem de forma integrada dos fenômenos naturais ou simplesmente representações formais.

Nessa mesma perspectiva, Ramos (2011) destaca algumas outras ações possíveis de serem realizadas com o software Modellus, tais como:

- Criar e explorar modelos baseados em equações matemáticas (corresponde a retificar conceitos matemáticos, tratando-os como objetos reais);
- Visualizar e manipular gráficos e tabelas;
- Alterar valores de parâmetros e trabalhar com esses “casos” diferentes;
- Gravar os ficheiros para posterior consulta e/ou edição.

Apresentamos na figura a seguir a tela de entrada do programa, onde o usuário pode começar a interagir com a ferramenta.

Figura 01 – Tela de entrada do Modellus



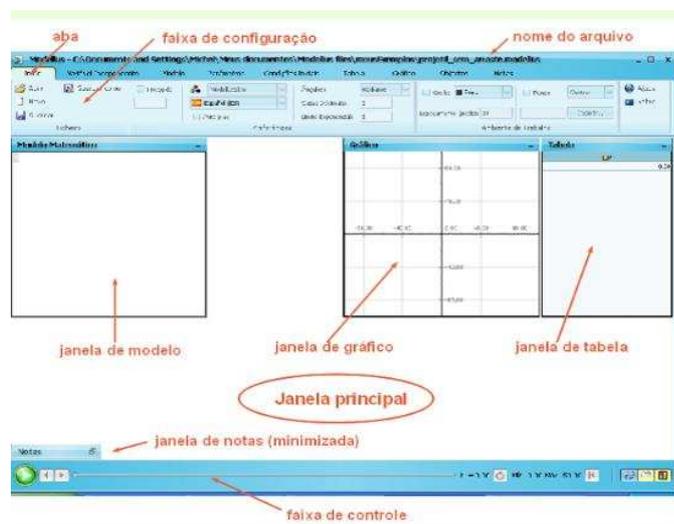
Fonte: Acervo pessoal do autor

Desde que foi desenvolvido, o software já apresentou algumas atualizações em sua versão original. Atualmente, as versões mais utilizadas são a X 4.05 e 4.01 (a última é a versão que foi colocada na figura anterior e que será utilizada ao longo deste trabalho).

2.2 Algumas funções do programa

A interface do programa possui várias janelas que permitem a navegação do usuário e que possibilitam a inserção das ferramentas que o programa disponibiliza. Observe na figura adiante.

Figura 02 – Interface do programa Modellus versão 4.01



Fonte: Adaptado de <http://www.if.ufrgs.br/computador_ensino_fisica/modellus/modellusI_interface.htm>

O software apresenta em sua interface várias janelas com diversas opções de ferramentas para simulações. Na barra superior, temos o nome do arquivo bem como os botões para minimizar, maximizar e fechar a janela principal.

Logo abaixo desta barra, há uma linha contendo 9 abas donde o usuário poderá clicar para executar a ação de seu interesse. Na parte central da interface aparecem 4 janelas, chamadas nomeadas de Modelo Matemático, Gráfico, Tabela e Notas. Estas janelas podem ser minimizadas e as suas posições e tamanhos podem ser modificados por arraste com o mouse.

Destacamos aqui algumas das principais janelas que ficam na parte superior da tela principal do programa:

- 1) **Início:** Nesta janela o usuário tem a opção de começar um novo modelo, abrir um já existente ou salvar um modelo construído.

Figura 03 – Janela de Início

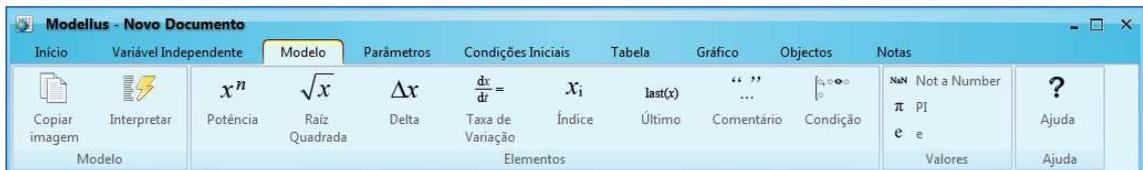


Fonte: Acervo pessoal do autor

Aqui, na seção “preferências” é possível escolher o idioma que o usuário desejar, bem como também há a opção de mudar as medidas angulares entre graus e radiano. Já na seção “ambiente de trabalho”, a função que mais se destaca é a opção de inserir uma imagem de fundo.

- 2) **Modelo:** Aqui temos à disposição algumas opções de funções ou constantes que podem ser utilizadas, tais como: exponenciais, raiz quadrada, derivadas entre outras.

Figura 04 – Janela Modelo

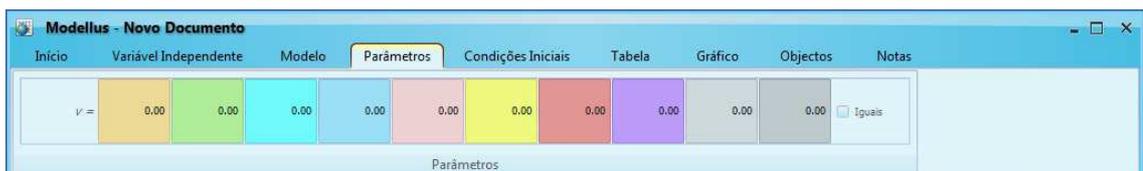


Fonte: Acervo pessoal do autor

Nesta janela ainda há a opção de adicionarmos condições às equações que desejamos analisar. Talvez a função que mais seja apropriada nesta janela seja a opção “interpretar”, pois é clicando nela que podemos interpretar a descrição das equações inseridas.

- 3) **Parâmetros:** Nesta janela o usuário coloca valores numéricos para as grandezas que se pretende estudar.

Figura 05 – Janela Parâmetros

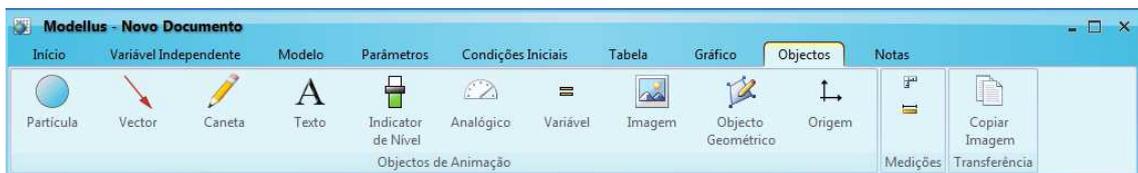


Fonte: Acervo pessoal do autor

Ainda há uma série de colunas onde o usuário pode inserir valores distintos de parâmetros, desta forma, é possível avaliar o comportamento de várias animações com situações parametrizadas ao mesmo tempo.

- 4) **Objetos:** É aqui que o usuário adiciona as ilustrações a seu modelo, pois esta janela possui elementos gráficos como partículas, vetores, imagens entre outras opções.

Figura 06 – Janela Objetos



Fonte: Acervo pessoal do autor

É possível inserir um “indicador de nível”, onde o usuário altera as intensidades relativas a algumas grandezas do movimento. Certamente a opção mais interessante desta janela, é a opção “partícula”, pois clicando nela teremos várias figurinhas animadas que poderão ser anexadas à simulação. Além disso, podemos também ligar vetores a essas figurinhas e observarmos como eles mudam de intensidade conforme o movimento considerado.

- 5) **Gráficos:** Oferece os parâmetros relativos aos gráficos que serão utilizados na construção do modelo.

Figura 07 – Janela Gráfica



Fonte: Acervo pessoal do autor

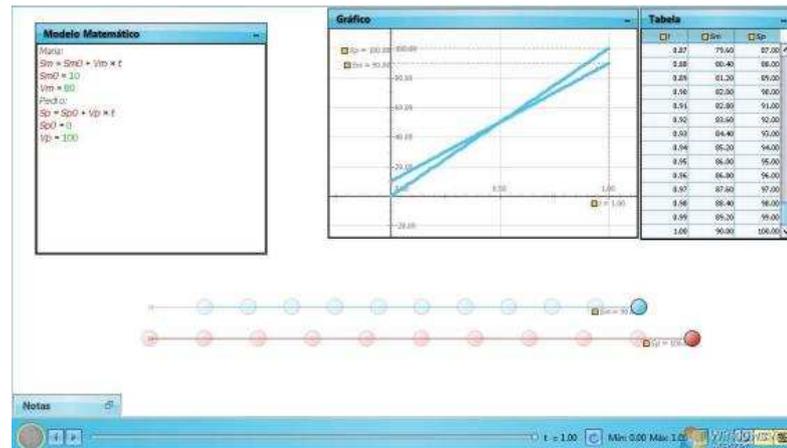
Aqui também é possível escolher as variáveis que farão parte dos eixos (vertical e horizontal) do gráfico, bem como selecionarmos alguns itens como: pontos, projeções e valores, que poderão aparecer no gráfico que será criado.

Além destas janelas apresentadas anteriormente, o programa Modellus também traz outras importantes ferramentas de medição que também contribuem para a aprendizagem

interativa como: cronômetro, medidor de pendências, caixa de velocidade, medidor de ângulos, medidor de distância e outras (SANTOS; ALVES; MORET, 2012).

Há uma ferramenta bastante importante para modelar um problema no software Modellus, esta ferramenta é sem dúvida o coração do programa. Refiro-me ao item “Modelo matemático”, a principal caixa de comando desse programa.

Figura 08 – Representação de um modelo matemático e seu respectivo gráfico



Fonte: Adaptada de (Oliveira; Araújo)

Ela fica localizada bem abaixo da barra de Ferramentas do programa, nela é possível escrever as equações referentes ao fenômeno em análise. Após inserir as equações corretamente e colocar os parâmetros necessários, basta clicar na opção “interpretar” e pronto, automaticamente é gerado um gráfico donde se pode analisar o comportamento da função utilizada, bem como produzir uma animação baseado no modelo inserido.

A construção gráfica mencionada na figura anterior mostra a modelagem computacional de um problema envolvendo MRU. Vale lembrar que as equações devem ser escritas e também justificados os valores de todas as variáveis. Além disso, as operações (soma, subtração, multiplicação e divisão) devem ser inseridas através dos seguintes símbolos, (+, -, * e /).

3 BREVE ABORDAGEM DAS ONDAS

“O homem sempre se fascinou pelas ondulações rítmicas da superfície do mar. As complexas quebra-mares as quais regularmente se aproximam de nossas costas têm sido observadas e estudadas por milhares de anos, e apesar disso nosso conhecimento das ondas oceânicas está longe de ser completo”.

(MCKELVEY, J.P; GROTCHE, H. 1979)

Em nosso meio, estamos rodeados por diversos tipos de ondas sejam: mecânicas, sonoras, luminosas, de rádio, eletromagnéticas, dentre outras. Graças à compreensão desse fenômeno é que existem diversas maravilhas no mundo moderno, como a televisão, o rádio, as telecomunicações via satélite, o radar, o forno de microondas e as mais recentes aplicações bélicas do sistema GPS, Raios-X, telecomunicações e várias outras aplicações.

Uma aplicação muito importante das ondas surgiu no início do século XX as mãos do francês Louis de Broglie. De acordo com sua teoria, hoje amplamente aplicada a mecânica quântica, a dualidade onda-partícula também passa a ser considerada uma propriedade da matéria, e em especial dos elétrons. (Tipler e Llewellyn, 2006).

Esta teoria formulada por De Broglie lhe surgiu como um “lampejo”. Segundo o próprio:

Depois da primeira guerra mundial, pensei muito a respeito da teoria dos quanta e do dualismo onda-partícula... Foi então que tive uma súbita inspiração. O dualismo onda-partícula de Einstein era um fenômeno absolutamente geral, que se estendia a toda natureza.” (Louis de Broglie, apud. Tipler e Llewellyn).

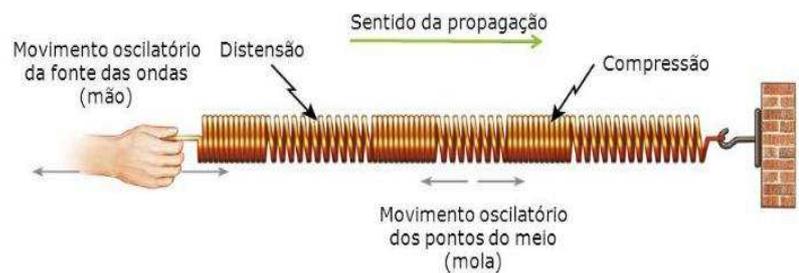
Nesse caso pode-se definir uma onda como sendo um sinal que se propaga de um ponto a outro de determinado meio ou no vácuo, transportando energia e momento, tudo isso com uma velocidade definida, no entanto não há um transporte de matéria. Essa energia que a onda transporta é fornecida pelo agente que provoca a ondulação e a onda tem o papel de transmitir essa energia.

3.1 Classificação das ondas

Numa propagação ondulatória, podemos classificar as ondas de acordo com três critérios: a direção de vibração, a natureza de vibração e o grau de liberdade para a propagação das ondas.

- I. Para a direção da vibração temos que as ondas podem ser: **longitudinais, transversais** e também **mistas**
- **Ondas longitudinais:** Uma onda é dita longitudinal quando a perturbação que está sendo transmitida pela onda, que pode ser compressão ou distensão tem lugar ao longo da direção de propagação desta onda. Para uma melhor compreensão, vamos considerar a figura 09 adiante.

Figura 09 - Onda longitudinal



Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/2915052/>

A figura 09 ilustra a propagação de uma onda de compressão ao longo do comprimento de uma mola, que estava inicialmente em equilíbrio. Note que a mola após ser subitamente comprimida, apresenta, em suas espiras, partes que são ligeiramente “distendidas”, isto é, com espaçamento maior em relação à antiga posição de equilíbrio. Desta forma, é iniciado um movimento em que as ondas de compressão da mola são seguidas alternadamente por outra de distensão.

Se continuarmos acompanhando o movimento de uma certa espira, observamos que a mesma se desloca sucessivamente para direita e depois para esquerda, retornando, desta forma, a sua posição de equilíbrio. Neste exemplo clássico de onda longitudinal podemos perceber que a perturbação é transmitida imediatamente na mesma direção do movimento da mola ao longo do eixo horizontal, daí a sua definição.

Um exemplo de ondas longitudinais no nosso cotidiano é o caso das ondas sonoras. A figura 10 ilustra esse fenômeno, mostrando que, a vibração da membrana de um alto falante, produz zonas onde o ar é comprimido e rarefeito.

Figura 10: Oscilação longitudinal das partículas de ar

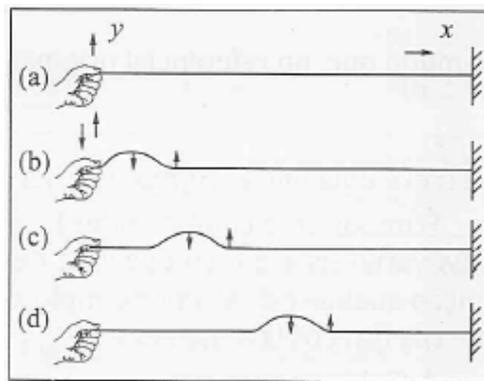


Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas-sonoras.htm>

O alto falante, é capaz de alterar a pressão do ar, e ao fazê-lo, a vibração da membrana é periódica, formando um padrão de compressão e rarefação (distensão) do ar que também é periódico.

- **Ondas transversais:** Elas são assim chamadas pelo fato que os elementos do meio, ao vibrar, oscilam em uma direção perpendicular ao movimento da onda. Para compreender melhor, seguiremos a ilustração da figura 11 logo adiante.

Figura 11 - Onda transversal em uma corda



Fonte: Nussenzweig, M. vol. II

Na figura 11 temos uma corda na qual se aplica um pulso, movimentando a corda no sentido vertical. Cada ponto da corda começa sucessivamente a oscilar para cima e para baixo, produzindo um movimento ao longo do eixo y . Ao mesmo tempo, a onda produzida é propagada ao longo da direção horizontal (eixo x). Desse modo é possível perceber claramente que a direção de propagação da onda é perpendicular (transversal) aos sucessivos deslocamentos da corda.

Polarização de ondas é o fenômeno no qual uma onda transversal, vibrando em várias direções, tem uma de suas direções de vibração selecionada, enquanto as vibrações nas demais direções são impedidas de passar por um dispositivo, denominado polarizador.

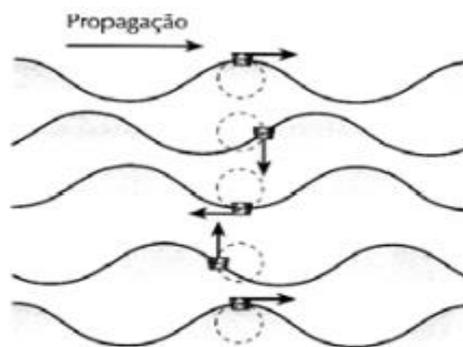
A polarização é um fenômeno exclusivo das ondas transversais, não podendo ocorrer com as ondas longitudinais. Assim, as ondas luminosas, que são transversais, podem ser polarizadas, ao contrário das ondas sonoras, que não se polarizam, por serem longitudinais.

Uma aplicação prática desse tipo de onda são as famosas ondas eletromagnéticas, a exemplo das ondas de rádio, raios-x entre outras. Estas ondas são compostas por um campo elétrico e um magnético, que oscilam perpendicularmente entre si e em relação a sua direção de propagação.

- **Ondas mistas:** Os dois casos anteriormente podem ocorrer de maneira simultânea em uma mesma propagação de ondas. Nesse caso, essas ondas são denominadas de ondas mistas, pois as mesmas executam movimentos transversais e longitudinais ao longo de sua direção de propagação.

A figura 12 a seguir ilustra muito bem esse caso. Nela temos um conjunto de ondas se propagando da esquerda para a direita, no entanto, os elementos da onda não oscilam em uma única direção bem definida.

Figura 12 - Onda mista



Fonte: http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Quantica_anexo_1_Ondas_texto_5_EM.pdf

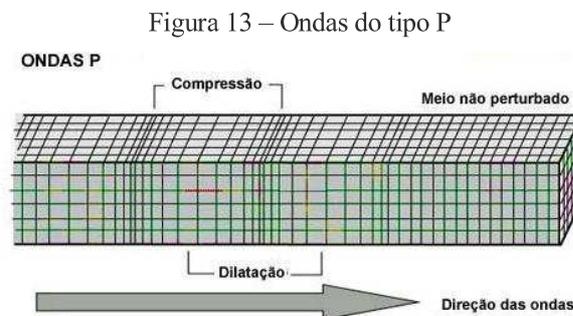
Vemos que as partículas se movimentam, de forma geral, em uma trajetória aproximadamente elíptica, dessa forma, se considerarmos um lago sob efeito dessas ondas, a amplitude da mesma diminui gradativamente conforme o aumento da profundidade. É devido a isso que durante tempestades os mergulhadores não sofrem efeito algum quando estão em altas profundidades.

O exemplo mais comum desse tipo de onda são as que se manifestam na superfície de um líquido. Se um objeto está flutuando sobre a água ele fica sujeito à passagem de ondas que vibrará de maneira transversal e longitudinal ao mesmo tempo.

Outro exemplo muito importante das ondas mistas são as responsáveis pela manifestação dos abalos sísmicos, que são tremores que se desenvolvem no interior da Terra, fruto de alguns fatores naturais, entre eles: movimento das placas tectônicas e atividades vulcânicas, ambos acumulam uma grande quantidade de energia que para ser liberada é expelida pelas fendas das rochas e aberturas de vulcões. Sendo assim:

As ondas geradas por um terremoto são ondas mecânicas. Basicamente, são deformações elásticas que se propagam pelo interior da Terra transportando energia. Não há, porém, um deslocamento efetivo do meio que é atravessado pela onda, ou seja, não há transporte de massa. Durante a passagem de uma onda cada partícula do meio efetua um movimento oscilatório em torno da sua posição de equilíbrio (SANTOS; AGUIAR, 2012, pág. 2).

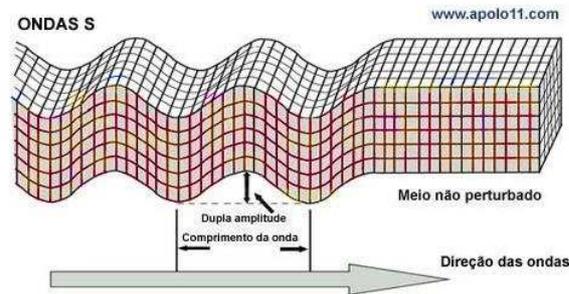
Durante um terremoto vários tipos de ondas são formados, sendo que duas delas se destacam: As ondas **P** e ondas **S**. Também chamadas de ondas primárias de compressão, as ondas **P** são muito velozes e se propagam através dos sólidos e dos líquidos, comprimindo o meio pelo qual trafegam. Conforme a figura 13.



Fonte: https://www.apolo11.com/terremotos_wave.php

Temos também as ondas **S** ou secundárias, responsável por fazer o solo se deslocar no sentido perpendicular em relação à direção de propagação. Veja a figura 14.

Figura 14 – Ondas do tipo S



Fonte: https://www.apolo11.com/terremotos_wave.php

Diferente das ondas P, que se propagam tanto nos sólidos como nos líquidos, as ondas S propagam-se apenas através dos sólidos, já que os fluidos não suportam as forças de cisalhamento.

II. Para a natureza de propagação podemos classificá-las em: **mecânicas, eletromagnéticas, ondas de matéria** e também **ondas gravitacionais**

- **Ondas mecânicas:** São oscilações mecânicas que necessitam de um meio elástico seja sólido, líquido ou gasoso para se propagarem. As partículas do meio oscilam em torno de um ponto fixo, razão pela qual não existe o transporte de matéria através do meio. São exemplos de ondas mecânicas: ondas na água, ondas em uma corda, ondas sonoras.

Figura 15 – Ondas na água

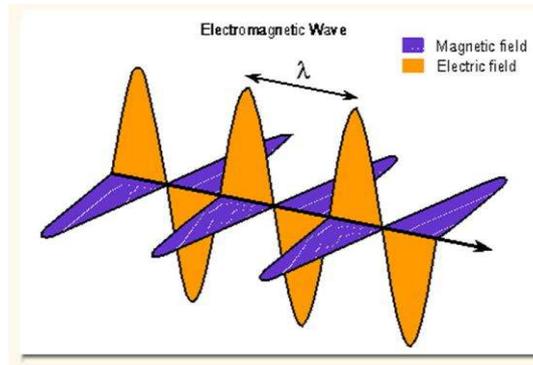


Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2652>

- **Ondas eletromagnéticas:** É a junção das oscilações de campos elétricos e magnéticos. Essas ondas não precisam de um meio de propagação e se propagam no

vácuo a mesma velocidade 299 792 458 m/s. Essas ondas são produzidas quando cargas elétricas livres aceleram ou quando elétrons ligados a átomos e as moléculas sofrem uma transição para estados mais baixos de energias. Exemplos de ondas eletromagnéticas é a luz, ondas de rádio, raios X, raios gamas, etc.

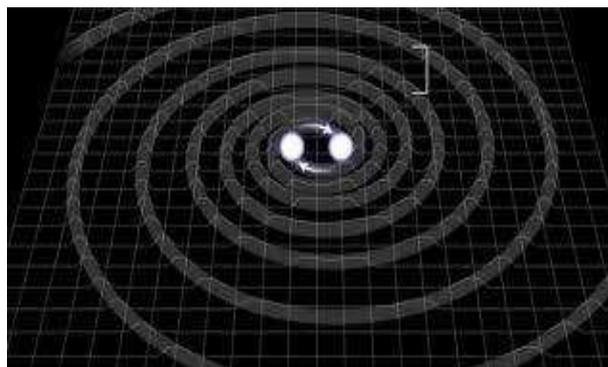
Figura 16 – Onda eletromagnética



Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2652>

- **Ondas de matéria:** Em mecânica quântica ou onda de De Broglie é uma onda (dualidade onda-partícula) de matéria. Em sua tese de doutorado De Broglie formulou a hipótese de que toda a matéria apresenta características tanto ondulatórias como corpusculares comportando-se de um ou outro modo dependendo do experimento específico.
- **Ondas gravitacionais:** São oscilações na geometria do espaço-tempo, que se propagam no espaço. Essas ondas foram propostas inicialmente por Einstein há mais de um século.

Figura 17 – Ondas gravitacionais

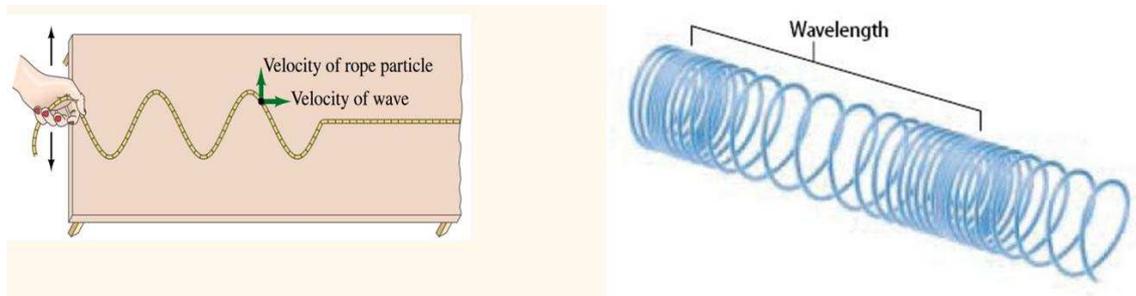


Fonte: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/espaco/2017/10/ondas-gravitacionais-o-que-sao-de-onde-vem-e-o-que-tem-de-importante>

III. Para o grau de liberdade temos ondas: **unidimensionais**, **bidimensionais** e **tridimensionais**.

- **Unidimensionais:** São as ondas que se propagam apenas em uma direção. Como as ondas em uma corda, em uma mola.

Figura 18 – Ondas unidimensionais em uma corda e em uma mola



Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2652>

- **Bidimensionais:** São aquelas que se propagam por uma superfície, como a água.

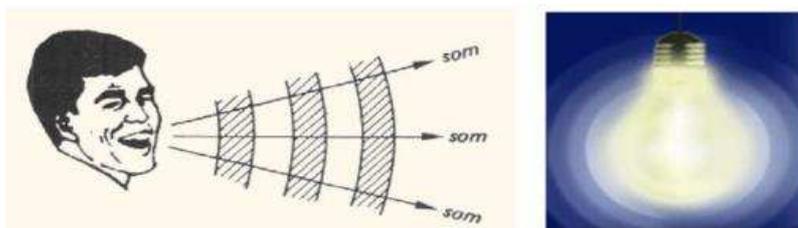
Figura 19 – Onda bidimensional na água



Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2652>

- **Tridimensionais:** São as que se propagam em todas as direções, como a luz e o som.

Figura 20 – Ondas tridimensionais (sonora e luminosa)



Fonte: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2652>

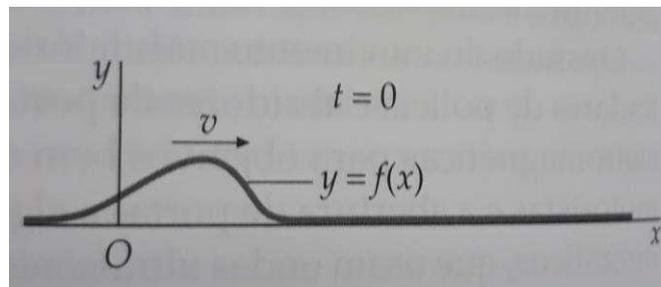
3.2 MATEMÁTICA DAS ONDAS UNIDIMENSIONAIS

3.2.1 Ondas progressivas

Para descrevermos matematicamente uma onda unidimensional deve-se levar em conta duas considerações. De início é que a velocidade escalar de propagação é constante, a outra é que a manutenção original da perturbação é a mesma em outros referencias.

Iniciaremos o estudo das ondas pelo caso mais simples, onde as ondas se propaguem apenas ao longo de uma direção, para isso utilizaremos as ondas transversais em uma corda. A figura 21 representa um pulso em uma corda para um período de tempo $t = 0$. Sua forma nesse instante pode ser representada por uma função do tipo do tipo $y = f(x)$.

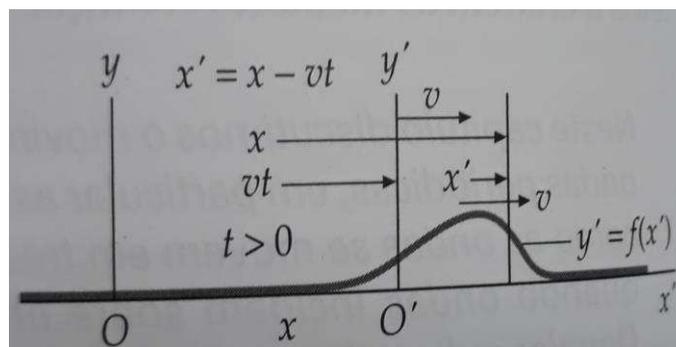
Figura 21 – Pulso de onda em uma corda para $t = 0$



Fonte: Tipler vol. 1

Para um tempo posterior (Figura 22), esse pulso estar mais adiante, na corda. Para um novo sistema de coordenadas, com origem O' , que se move para a direita com a mesma rapidez do pulso, estar estacionário.

Figura 22 – Pulso de onda em uma corda para $t \neq 0$



Fonte: Tipler vol. 1

Para esse referencial, a função que descreve esse pulso é dado por $f(x')$ em todos os tempos.

A relação entre esses dois referenciais é dada por uma transformação de Galileu

$$x' = x - vt \text{ e } y = y \quad (3.1)$$

e, portanto $f(x') = f(x - vt)$. Logo, no referencial original a forma da corda é

$$y = f(x - vt) \quad (3.2)$$

Onda se movendo no sentido de $+x$

O mesmo raciocínio é válido para um pulso que se move para a esquerda, desse modo

$$y = f(x + vt) \quad (3.3)$$

Onda se movendo no sentido de $-x$

A expressão (3.2) é chamada função de onda. Para as ondas em uma corda, a função de onda representa o deslocamento transversal da corda.

3.2.2 EQUAÇÃO DAS ONDAS UNIDIMENSIONAIS

A equação (3.2) é uma solução de uma equação diferencial bem conhecida, chamada equação da onda. Nessa equação é relacionada à segunda derivada parcial de y em relação à variável x com a segunda derivada parcial em relação a t . Isso pode ser obtido a partir da equação (3.2) utilizando a regra da cadeia. Seja $\alpha = (x - vt)$ e considerando qualquer função de onda

$$y = f(x - vt) = y(\alpha)$$

Utilizando y' para a derivada de y em relação à α . Fazendo o uso da regra da cadeia para as derivadas,

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{dy}{d\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x} = y' \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad e \quad \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{dy}{d\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = y' \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

Como

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{\partial(x - vt)}{\partial x} = 1 \quad e \quad \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial(x - vt)}{\partial t} = -v$$

Temos

$$\frac{\partial y}{\partial x} = y' \quad e \quad \frac{\partial y}{\partial t} = -vy'$$

Tomando a segunda derivada, obtemos

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = y'' \quad e \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -v \frac{\partial y'}{\partial t} = -v \frac{\partial y'}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = +v^2 y''$$

Reagrupando os termos teremos que

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Ou

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3.4)$$

Esta é uma equação de ondas unidimensionais. Qualquer função $y(x, t)$ que tenha as propriedades de uma onda descritas acima satisfaz essa equação. O mesmo resultado da Eq. (3.4) pode ser obtido para qualquer função de $x + vt$.

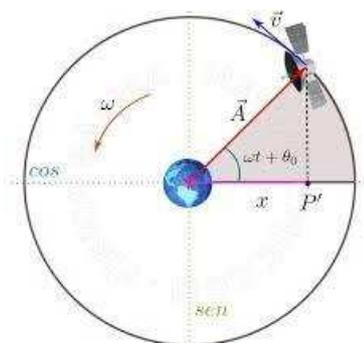
3.3 Movimento MHS e sistema massa-mola

Algumas características dos fenômenos ondulatórios periódicos podem ser descritas mediante os conceitos de velocidade da onda, amplitude, comprimento de onda, frequência e período. Para isso, faz-se necessário uma descrição mais detalhada das posições e dos movimentos das partículas individualmente em função do tempo de propagação. Para esse caso, é interessante analisar as ondas senoidais, para qualquer que seja a partícula que execute um movimento harmônico simples (MHS).

Todo movimento que se repete em intervalos de tempo iguais é chamado de periódico ou harmônico. Mais precisamente, poderíamos dizer que, no movimento periódico, o móvel ao ocupar, sucessivamente, a mesma posição na trajetória, apresentar sempre a mesma velocidade e aceleração e que o intervalo de tempo para que ele se encontre duas vezes nessa posição, é sempre o mesmo.

O Movimento Harmônico torna-se bastante simples quando partimos do Movimento Circular e Uniforme (MCU). Para isso, vamos considerar uma partícula descrevendo um movimento circular sob um disco de raio A , conforme a figura 23 adiante.

Figura 23: Movimento Circular e Uniforme



Seja ω a sua velocidade angular. O ângulo φ estabelece a posição da partícula e é denominado fase do movimento, sendo dado por:

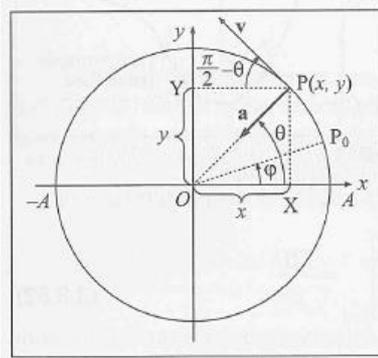
$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0 \quad (3.5)$$

onde t é o tempo do movimento numa dada posição;

φ_0 é a fase inicial do movimento.

Agora podemos projetar a posição da partícula sobre o eixo Ox , paralelo ao diâmetro da trajetória. Com isso é possível que a partícula se desloca sucessivamente desde o ponto O até o ponto O' , ou seja, da abscissa $-A$ à abscissa A , de acordo com as figuras 24 adiante.

Figura 24: Círculo de referência



Fonte: Moysés Vol.2

Percebam que a projeção sobre o eixo X nos dá que a variação da posição pode ser descrita pelo cateto do triângulo retângulo sombreado, isto nos dá:

$$x = A \cos \varphi \quad (3.6)$$

Uma vez que o ângulo φ varia conforme a equação (3.6), então a posição pode ainda ser reescrita como:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3.7)$$

Observem que quando o ângulo φ for nulo, extremidade do movimento, a amplitude é máxima.

Através da equação da posição, podemos derivá-la com respeito ao tempo e desta forma encontrarmos a expressão correspondente a sua velocidade. Sendo expressa respectivamente por:

$$v(t) = -\omega A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (3.8)$$

Percebemos pela expressão acima, que a velocidade pode ter seu valor máximo quando a partícula estiver sob o ponto central da trajetória, sendo definida por $v = \omega A$.

Derivando-se novamente, desta vez a velocidade, encontramos uma expressão similar para a aceleração.

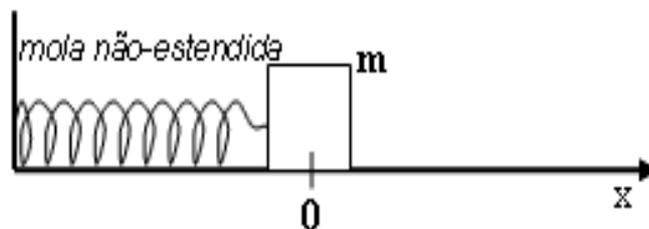
$$a(t) = -\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3.9)$$

Diferentemente da velocidade, esta expressão mostra claramente que a aceleração atinge seu valor máximo não no ponto central, mas nos pontos de inversão do movimento que corresponde à $a = -\omega^2 A$.

Um oscilador que obedece a esse princípio é o sistema massa-mola. Esse sistema é formado por um bloco de massa m em repouso, num plano horizontal sem atrito, preso a uma mola cuja constante elástica chamamos de K . Essa constante determina a capacidade da mola ser alongada.

A figura 25 mostra um sistema massa-mola em sua posição de equilíbrio, nessa situação a força resultante sobre ele é nula.

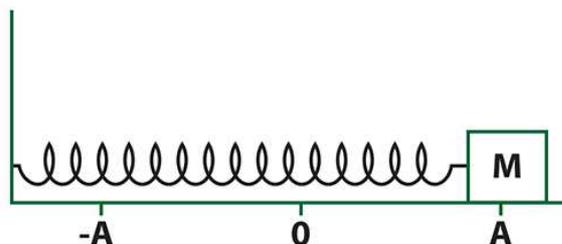
Figura 25: Sistema massa-mola em equilíbrio



Fonte: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/MHS/massamola.php>

Afastemos o bloco de sua posição de equilíbrio até uma certa posição A e o abandonarmos logo ali, conforme a figura 26. Nessa situação ideal, sem a resistência do ar, o bloco executará um movimento oscilatório e periódico entre as posições de $X = A$ e $X = -A$.

Figura 26: Sistema massa mole alongado



Fonte: <http://www.universiaenem.com.br/sistema/faces/pagina/publica/conteudo/texto-html.xhtml?redirect=56216278258001373738385942540>

Nesse movimento, a elongação é a própria deformação da mola, e, além disso, a força elástica é a força resultante sobre o bloco. Sabendo que a força elástica é proporcional à deformação da mola, a força resultante tem o seguinte aspecto:

$$F = -Kx \quad (3.10)$$

O sinal negativo indica que a força é oposta ao movimento e sendo um sistema sem interferência de outras forças que resistem ao movimento, podemos caracterizar esse Movimento Harmônico Simples como uma situação de um sistema conservativo.

Tratando-se de um MHS, vale ressaltar que a frequência angular ω está relacionada à constante da mola e sendo expresso pela seguinte equação:

$$\omega^2 = \frac{K}{m} \quad (3.11)$$

Nessa condição temos que o período do movimento é dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (3.12)$$

Note que a equação acima nos informa que o período não depende da amplitude do movimento, ou seja, o período é independente da posição onde o bloco é abandonado para oscilar, desde que oscile das condições ideais consideradas.

3.3.1 Alguns parâmetros das ondas

- **FREQUÊNCIA, NÚMERO DE ONDA E FREQUENCIA ANGULAR**

A frequência é o número de oscilações completas em um intervalo de tempo.

Definimos a frequência como sendo:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.13)$$

O número de onda k representa uma contagem em unidade de comprimento de onda. É definido como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.14)$$

No Movimento Harmônico Simples, a frequência angular é denotada como sendo:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3.15)$$

No SI a frequência angular é dada por radiano por segundo.

▪ **AMPLITUDE E FASE**

A **amplitude** da onda (A) é sempre o módulo do deslocamento máximo dos elementos a partir da posição de equilíbrio. Como para a amplitude é usado o módulo, sempre será uma grandeza positiva.

A **fase** da onda é representada pelo argumento ($\omega t + \varphi$) da Eq. (3.7). Quando a onda passa por um elemento de posição x sua fase varia linearmente com o tempo t .

No próximo capítulo iremos utilizar os conceitos apresentados anteriormente para fazermos um estudo físico sobre a ola mexicana.

“Uma manifestação comum das torcidas em estádios de futebol é a ola mexicana. Os espectadores de uma linha, sem sair do lugar e sem se deslocarem lateralmente, ficam de pé e se sentam sincronizados com os da linha adjacente. O efeito coletivo se propaga pelos espectadores do estádio, formando uma onda progressiva [...]”.

(ENEM 2013, caderno azul, questão 65)

4.1 Compreendendo o fenômeno da ola mexicana

Um dos efeitos visuais mais fascinantes que envolve o fenômeno ondulatório certamente é a famosa “Ola”. Basicamente se trata de um movimento coletivo e organizado em sincronia onde as pessoas, geralmente durante alguns eventos esportivos, costumam levantar em pequenos conjuntos erguendo os braços e logo em seguida sentam-se novamente. Visualmente temos a impressão visual que há uma grande onda humana percorrendo a arquibancada.

Esse fenômeno representa um movimento organizado em que os espectadores se levantam em alguns pequenos conjuntos levantando os braços e se sentam logo em seguida, isso dá a impressão de uma imensa onda humana que vai percorrendo toda a arquibancada. Nesse caso, assim como nas ondas, não há transporte de matéria, já que o movimento é vertical e oscila em torno de um ponto de equilíbrio.

Figura27 – Coreografia da ola



Fonte: <http://www.spanishdict.com/answers/247103/la-palabra-del-da-mexicano>

Não se sabe ao certo a sua origem, mas há hipóteses de que essa coreografia tenha surgido no Canadá, durante a disputa do National Hockey League, em 1980. No entanto se

tornou mundialmente famosa durante a disputa da Copa do Mundo de Futebol em 1986 na cidade do México, daí o nome de “Ola mexicana”.

Vale ressaltar que esta coreografia acontece sempre de forma espontânea, ou seja, os torcedores não combinam antes ou durante o jogo. Basicamente as pessoas se deixam levar pela emoção durante os jogos. Isso ocorre, pois, “[...] elas são estimuladas de forma inconsciente pelo meio em que se encontram”. (COPA DAS CONFEDERAÇÕES, 2005).

De acordo com FERRONI (2002), a pesquisa mais recente sobre este assunto foi desenvolvida pelo professor de Física Tamas Vicsek, da Universidade húngara Eotvos, e publicada na revista britânica Nature. Na sua pesquisa, o professor Vicsek e seus pesquisadores filmaram 14 olas em estádios de futebol contendo cerca de 50 mil pessoas e a partir desse estudo puderam tirar algumas considerações.

A conclusão mais trivial desta pesquisa foi que há enormes chances de uma ola ser formada se cerca de 25 a 35 pessoas iniciarem o movimento. Ainda de acordo com Ferroni (2002), uma ola,

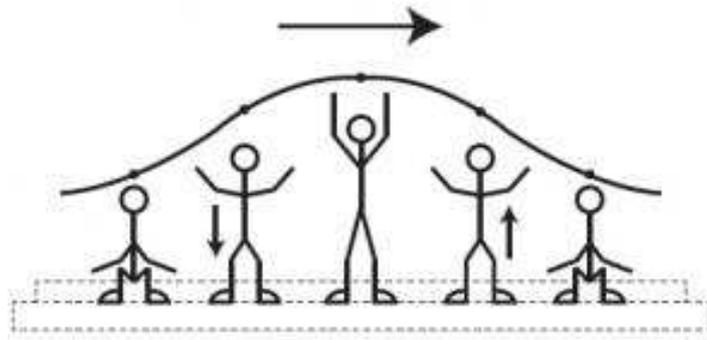
[...] em geral se move no sentido horário, tem largura de 6 a 12 metros (o equivalente a 15 assentos) e velocidade de 12 metros (ou 20 assentos) por segundo. Depois de formada, ela se espalha pela multidão e adquire formato estável, quase linear. Amante do futebol e, em especial, do Brasil, Vicsek jura que o estudo ajuda a entender o comportamento da multidão. (FERRONI, 2002).

Outras pesquisas já haviam sido feitas antes acerca do mundo dos jogos, como por exemplo, a do matemático Henry Stott, da Universidade de Warwick (Inglaterra), que aliou a imprevisibilidade de algumas seleções e criou um modelo estatístico da Copa do Mundo para fazer previsões com grandes precisões.

4.2 Utilizando o modellus para modelar a ola

Nesta seção iremos descrever como utilizamos o software Modellus para modelar o fenômeno ondulatório da ola mexicana. De fato tornar-se-ia bastante árduo tentarmos analisar uma situação real do fenômeno da ola, assim como fez o professor Tamas Vicsek, no entanto para efeito de análise utilizando o software Modellus, vamos tornar o comportamento da ola um fenômeno bastante simples, considerando para isso, que ela apresente amplitude constante e uma direção de propagação bem definida, tal como indicado na figura a seguir.

Figura 28 – Ilustração de uma ola ideal



Fonte: www.ufsm.br

Para efeito de análise, precisamos definir alguns valores para algumas grandezas necessárias. Considerando que a onda é formada por um conjunto de pessoas, vamos aqui utilizar os dados obtidos pela pesquisa do professor Tamas Vicsek. Assim sendo:

A propagação de uma onda humana envolve em média 15 assentos, e estes por sua vez são separados por cerca de 80 cm, então podemos concluir que o comprimento de onda corresponde à:

$$\lambda = 15 \times 0,80$$

$$\lambda = 12 \text{ metros}$$

Vale lembrar que de acordo com as pesquisas do professor Tamas Vicsek, no geral a onda provocada por uma ola se propaga com aproximadamente 12m/s, o que equivale aproximadamente a 43,2 Km/h.

Considerando que em média um indivíduo possua estatura de 1,70m podemos montar a seguinte tabela com os valores das grandezas

Tabela 01: Grandezas e seus valores

GRANDEZA	SÍMBOLO	VALOR NUMÉRICO
Velocidade de propagação	v	12 m/s
Comprimento de onda	λ	12 m
Amplitude da onda	A	1,70 m

4.3 Modelando a ola mexicana

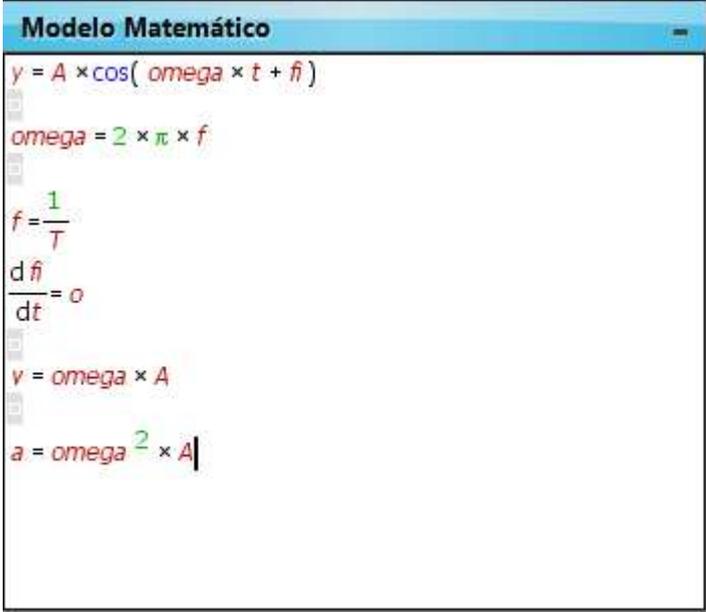
Nesse item serão descritos os passos da simulação do fenômeno da ola mexicana através do software Modellus. Esta simulação abrange conceitos da Física ondulatória em especial o conteúdo de Movimento Harmônico Simples. O objetivo dessa simulação é mostrar as relações entre alguns conceitos ondulatórios e o fenômeno da ola mexicana, além disso, poderemos descrever seu movimento, velocidade, aceleração, frequência.

Salientamos que alguns dos dados apresentados nessa simulação como a amplitude e a posição dos espectadores foram retirados do trabalho do professor de Física Tamas Vicsek, da Universidade húngara Eotvos, e que foi publicada na revista britânica Nature.

1º PASSO

Inicialmente na janela “modelo matemático” será inserida as equações (3.7) para a obtenção da posição, (3.15) nos dará a frequência angular, (3.13) para a frequência, e as equações (3.8) e (3.9) calcularemos a velocidade e a aceleração respectivamente desse movimento.

Figura 29: Modelo matemático para a ola mexicana



The screenshot shows a window titled "Modelo Matemático" with the following equations displayed:

$$y = A \times \cos(\omega \times t + \phi)$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = 0$$

$$v = \omega \times A$$

$$a = \omega^2 \times A$$

Fonte: Acervo pessoal do autor

2º PASSO

Após inserir as equações é necessário clicar na aba “modelo” e selecionar a opção interpretar, se a equação contiver algum erro o programa não irá gerar a simulação. Como mostra a figura abaixo o modelo estar certo.

Figura 30: Modelo matemático correto

Modelo Matemático

$$y = A \times \cos(\omega \times t + \phi)$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = 0$$

$$v = \omega \times A$$

$$a = \omega^2 \times A$$

Modelo: OK ✓

Fonte: Acervo pessoal do autor

3º PASSO

Em seguida na aba “parâmetros” serão inseridos alguns valores ao qual a simulação se dará. Nesse caso foram inseridos os parâmetros para a amplitude (A) e período (T).

Figura 31: Parâmetros para a simulação

	Início	Variável Independente	Modelo	Parâmetros	Condições Iniciais	Tabela	Gráfico	Objectos	Notas
A =	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/> Iguais
T =	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/> Iguais

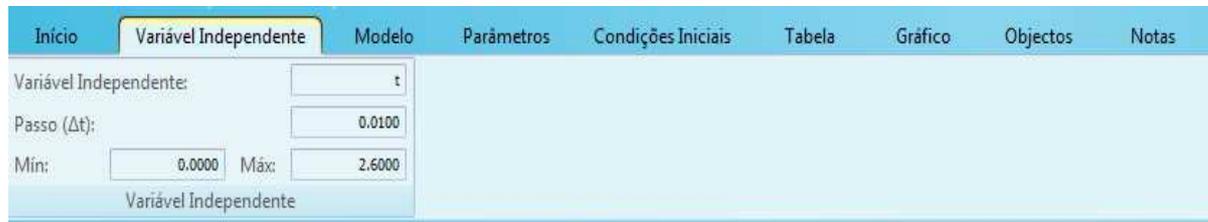
Parâmetros

Fonte: Acervo pessoal do autor

4º PASSO

Na aba “variável independente” o programa já seleciona nossa variável independente e definimos apenas o passo ao qual o movimento evolui e o tempo de simulação. No nosso caso o passo ficou em 0.0100 e o tempo de simulação englobou um intervalo de tempo entre 0.0000s e 2.6000s.

Figura 32: Variável independente da simulação



Fonte: Acervo pessoal do autor

5º PASSO

Seguindo, ao clicarmos na aba “objetos” escolheremos algum objeto que simulará nosso fenômeno.

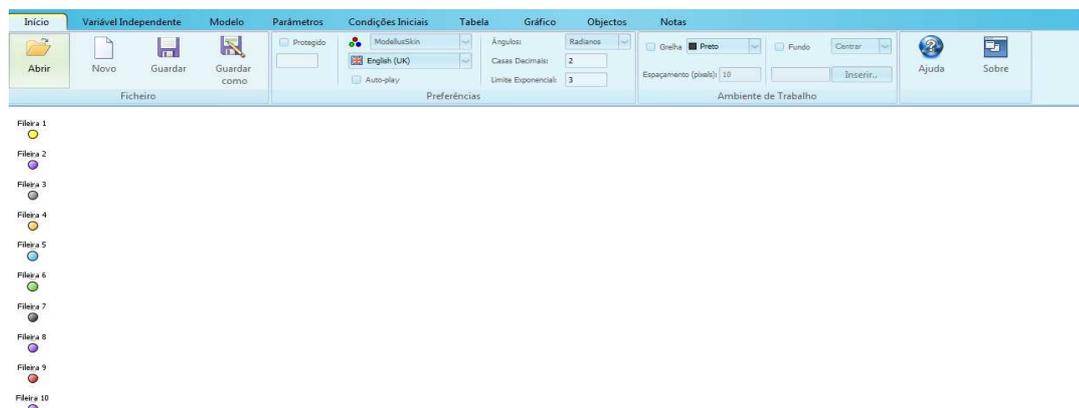
Figura 33: Objetos da simulação



Fonte: Acervo pessoal do autor

Para nossa simulação selecionamos o objeto “partícula”, nesse caso optou-se por colocar 10 partículas cada uma representando uma fileira de assentos de um estádio.

Figura 34: Arranjo de objetos da simulação



Fonte: Acervo pessoal do autor

6º PASSO

Ao clicar na partícula abrirá a seguinte janela com algumas opções que podemos adicionar ao objeto trabalhado.

Figura 35: Janela animação



Fonte: Acervo pessoal do autor

Nesse caso como se estar trabalhando com 10 partículas cada uma foi renomeada com o nome fileira indo de 1 a 10, como também mudamos suas características como cor. Para essa situação escolhemos o eixo horizontal para representar a variável do tempo e a vertical representando à variável y. Outra opção que foi mudada foi em relação às escalas que nesse caso ficaram em 500.000 pra o eixo horizontal e 20.000 para o eixo vertical, isso influencia na simulação, pois em uma escala menor ou um pouco maior dos representados anteriormente não seria possível observa a simulação.

7º PASSO

Para o último passo clicamos na função player e a simulação começará e irar durar o intervalo de tempo escolhido no 4º passo.

Figura 36: Animação da ola mexicana



Fonte: Acervo pessoal do autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a simulação do trabalho apresentado utilizamos conceitos ondulatórios e especificamente os conceitos de Movimento Harmônico Simples para analisar o comportamento de uma Ola Mexicana. A partir de alguns dados retirados do trabalho do professor Tamas Vicsek da Universidade húngara Eotvos, e que também foi publicada na revista científica Nature, conseguiu-se a obtenção de novas características desse fenômeno. A publicação do professor nos trás a velocidade de propagação da onda, seu comprimento de onda e a amplitude dessa onda. Com isso, foram encontradas novas características como mostra a figura abaixo.

Tabela 2: Resultados da animação da ola mexicana

t	y	A	F	ω	T	v	λ
0.00	1.43	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.01	1.37	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.02	1.29	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.03	1.21	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.04	1.12	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.05	1.03	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.06	0.93	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.07	0.83	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.08	0.72	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.09	0.61	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.10	0.50	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.11	0.38	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.12	0.27	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.13	0.15	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.14	0.03	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.15	-0.09	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.16	-0.21	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.17	-0.33	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.18	-0.45	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.19	-0.56	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.20	-0.67	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.21	-0.78	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.22	-0.89	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.23	-0.99	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.24	-1.08	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.25	-1.17	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73
0.26	-1.26	1.70	1.12	7.06	0.89	12.00	84.73

Fonte: Acervo pessoal do autor

A partir da tabela 2 apresentada anteriormente é possível ver que com o passar do tempo a posição dessa onda varia entre um ponto de equilíbrio, variando entre valores negativos e positivos, o que é uma característica do MHS ao qual utilizamos na simulação.

Com os resultados da animação pode-se constatar inicialmente que a velocidade que a onda se propaga e que foi trazida no artigo do professor Tamas Vicsek como sendo 12 m/s foi a mesma obtida a partir da simulação. Além disso, a aceleração dessa onda é cerca de 84.73 m/s². Para esse cálculo foram utilizadas as equações (3.8) e (3.9) que tratam especificamente da velocidade e a aceleração no MHS respectivamente.

Além demais, utilizando as equações (3.13) e (3.15) foi possível obter a frequência com que essa onda se propaga que foi de 1.12 Hz e também a frequência angular dessa onda, que foi de 7.06 rad/s. Por fim com a equação (3.13) obtemos o período de 0.89 s desse fenômeno ondulatório.

O uso de simulações computacionais na Física é muito importante para se trabalhar alguns fenômenos, o software Modellus é um bom exemplo disso, a partir da incorporação de dados iniciais foi possível obter resultados para várias características do fenômeno estudado, sendo possível manipular esses resultados e também transformá-los em animação, o que torna o processo mais compreensível para quem o estuda.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, I. S; BRANDÃO, R.V; VEIT, E.A. A modelagem científica de fenômenos físicos e o ensino de física, Física na Escola, São Paulo, v. 9, n. 1, 2008.

ARAÚJO, Ives Solano. Um estudo sobre o desempenho de alunos de Física usuários da ferramenta computacional Modellus na interpretação de gráficos em cinemática. 2002. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2002.

BONJORNO, R. A; BONJORNO, J.R; BONJORNO, V.: RAMOS, C. M. Física Completa. Vol. Único. 2. Ed. São Paulo: FTD, 2001.

BORGES, Patrícia Duro. **Apostila de física**. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/caiovasconcelos/downloads/ensino-medio/ondas-optica-e-acustica-ufsm>>. Acesso em 02 de Novembro de 2018.

CARVALHO JUNIOR, João Hermano Torreiro de. O Software Modellus aliado a estratégias de ensino: um estudo comparativo do desempenho dos alunos do Ensino Médio nas aulas de Física. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso C. Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações. 3. Ed. São Paulo: Editora do Autor, 2010.

DORNELLES, R F. T; ARAUTO, I. S; VEIT, E. A. Simulação e modelagem computacional no auxílio à aprendizagem significativa de conceitos básicos de eletricidade: Parte 1 - Circuitos elétricos simples. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 487-496, set. 2006.

DRAKE, Nadia; GRESHKO, Michael. **Ondas gravitacionais: o que são, de onde vêm e o que têm de importante?**. disponível em <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/espaco/2017/10/ondas-gravitacionais-o-que-sao-de-onde-vem-e-o-que-tem-de-importante>>. Acesso em 28 de Novembro de 2018.

FERRONI, M. **Caixinha de Surpresas**. Revista ISTOÉ, Edição N° 2533 05/07. Disponível em:<https://istoe.com.br/25631_CAIXINHA+DE+SURPRESAS/>. Acesso em: 12 de Julho de 2018.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. Fundamentos de Física. V.1, 2 e 3. 8. Ed. LTC, 2009.

MCKELVEY, John P; GROTCHE, Howard. **Física 2**. ed. São Paulo: Harper e Row do Brasil, 1979. Vol. 2.

MENDES, Janduí Farias. O uso do Software Modellus na integração entre conhecimentos teóricos e atividades experimentais de tópicos de mecânica sob a perspectiva da aprendizagem significativa. 2009. 185 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Ciências) - Universidade de Brasília-UNB, Brasília, 2009.

NATURE. **Mexican waves in an excitable medium**. Vol. 419. 12 Setembro 2002.
Disponível em <www.nature.com/natur>.

NOVAIS, Pedro Anísio Ferreira; SIMIÃO, Lucélio Ferreira. Aplicações da Modelagem Computacional no Ensino de Funções Utilizando o Software de Simulações Modellus. Anais... Encontro de Iniciação Científica - ENIC, v. 1, n. 3, 2011.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica 1: Mecânica**, 4a edição, Editora Edgard Blücher, 2002.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**, 4a edição, Editora Edgard Blücher, 2002

OLIVEIRA. R. L. J. Problemas de Curvas de Perseguição no Ensino Médio: Usando o Modellus como Ferramenta Interativa. 2011. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PASTANA, Claudionor de Oliveira. "**A utilização do software Modellus para o ensino de Funções Trigonométricas por meio do Movimento Harmônico Simples**". 2017. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ensino de Ciências Exatas, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 21 fev. 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10737/1568>>. Acesso em: 11 de Julho de 2018.

SANTOS, A. C. F.; AGUIAR. **Ondas e terremotos**. Scientific American Brasil: Aula Aberta 7, v. 12, p. 1-5, 2012. Slide Player. **Perturbações e ondas: conceito de onda**. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/2915052/>>. Acesso em: 02 de Novembro de 2018.

TIPLER, Paul A.; LEWELLYN, Ralph A.. **Física Moderna**, Editora LTC, terceira edição, Rio de Janeiro (2001).

TIPLER, Paul A.; MOSCA, G. Física para Cientistas e Engenheiros: mecânica, oscilações e ondas termodinâmicas. v. 1, 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

TORRESAN, Daniela de Cássia Moraes. O uso do software de simulação Modellus na conceitualização de derivada: experiências de ensino-aprendizagem com base em vergnaud. 2008. 175 f. Dissertações (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Luterana do Brasil – UBRA, Canoas, 2008.

UFABC. **Ondas** Disponível em: <http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Quantica_anexo_1_Ondas_texto_5_EM.pdf>. Acesso em 02 de novembro de 2018.

UFSC. Ondas mecânicas. disponível em <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/view.php?id=504285&chapterid=2652>>. Acesso em 28 de Novembro de 2018.

VEIT, E. A.; TEODORO, V. D. Modelagem no ensino/aprendizagem de física e os novos parâmetros curriculares para o ensino médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 87-96, jun. 2002.

VICSEK, Tamás; et al. **Mexican wave**. Disponível em: <<http://angel.elte.hu/wave/>>. Acesso em 10 de outubro de 2018.