

Mecânica Clássica e Quântica

Gustavo Benitez Alvarez

Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia
Universidade Federal Fluminense

2026 - Notas de Aula: Aula 1

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 Mecânica Newtoniana
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 Mecânica Newtoniana
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Ementa e Objetivos

- Disciplina Obrigatória do Curso MCCT.
- Número de Créditos 4, Carga Horária 60 horas.

- 1 **Formulação Newtoniana:** Leis de Newton, Conservação do momentum linear, Conservação do momentum angular, Conservação da energia.

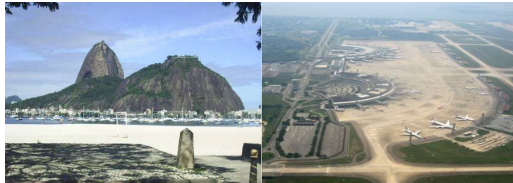
Ementa:

- 2 **Formulação Variacional:** Princípios variacionais, Equações de Euler-Lagrange, Equações de Hamilton, Transformações canônicas.
- 3 **Mecânica Quântica:** Introdução à mecânica quântica, Ferramentas matemáticas da mecânica quântica, Postulados da mecânica quântica, Sistemas de dois níveis, Oscilador harmônico simples.

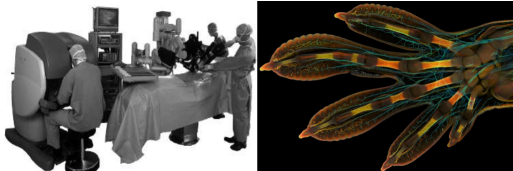
Por que esta disciplina no PPG-MCCT?

Problemas de Nosso Cotidiano: Macro e Micro Mundo.

A **Mecânica Newtoniana** e a **Mecânica Clássica** modelam o Macro Mundo.



A **Mecânica Quântica** modela o Micro Mundo.



Objetivos Fundamentais

- 1 **Aperfeiçoar o conhecimento sobre a Mecânica Newtoniana** (modela o Macro Mundo).
- 2 **Aprender e/ou aperfeiçoar o conhecimento sobre a Mecânica Clássica para usar na modelagem computacional** (modela o Macro Mundo).
- 3 **Aprender e/ou aperfeiçoar o conhecimento sobre a Mecânica Quântica para usar na modelagem computacional** (modela o Micro Mundo e em teoria também modela o Macro Mundo).

Tópicos

- 1 **Apresentação da disciplina**
 - Ementa
 - **Bibliografia**
- 2 Mecânica Newtoniana
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Livros de Texto e Material Didático

- 1 - H. Goldstein, Classical Mechanics, Addison-Wesley (1957).
- 2 - C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, And F. Laloe, Quantum Mechanics, John Wiley & Sons (1977).
- 3 - Notas de Aulas.
- 4 - Material Complementar.

Método de Avaliação

- 1 - Trabalhos individuais e/ou em grupos com apresentação em forma de seminários.
- 2 - Provas Escritas.
- 3 - Nota final calculada como a media.
- 4 - Frequência mínima de 75% de presença.

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 Mecânica Newtoniana
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Postulados de Newton para o movimento de corpos submetidos a forças.

Formalismo de Isaac Newton apresentado no livro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687).

Primeira Lei (Inércia): Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta (movimento retilíneo uniforme = velocidade constante), a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças (força resultante externa) aplicadas sobre ele. (Sistema de referência Inercial)

Segunda Lei (Dinâmica): A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção de linha reta na qual aquela força é aplicada.

Força resultante $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$, onde $\vec{p} = m\vec{v}$ é o momento linear, m é a massa da partícula, $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ é a velocidade linear, t é o tempo, $\frac{d\phi}{dt}$ é a derivada de uma função ϕ com respeito ao tempo, $\vec{r}$ é o vetor posição da partícula e $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$ é a aceleração da partícula.

Massa, comprimento e tempo são grandezas fundamentais cujas unidade de medição no Sistema Internacional de Unidades são quilograma (kg), metro (m) e segundo (s). A unidade de medição da força (grandeza derivada) é o Newton: $1\text{N} = 1 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}$.

Terceira Lei (Ação e Reação): A toda ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade: as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos

Outros Conceitos Complementares.

Note que a Segunda Lei pode ser escrita como $\vec{F} dt = \frac{d\vec{p}}{dt} dt = d\vec{p}$ que implica em

$$\Delta\vec{p} = \int_{t_1}^{t_2} d\vec{p} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt =: \vec{I}.$$

Impulso ($\vec{I}$): é a variação do momento linear devido à força que atua no intervalo temporal Δt .

Força e aceleração são vetores paralelos, e podem ser decompostos como a soma da componente tangencial (F_t , a_t paralelos à velocidade) e normal (F_n , a_n perpendiculares à velocidade). Logo, $\vec{a} = a_t \hat{e}_t + a_n \hat{e}_n$ e $\vec{F} = F_t \hat{e}_t + F_n \hat{e}_n$, onde $\hat{e}_t$ e $\hat{e}_n$ são os vetores unitários tangencial e normal em cada instante de tempo, $a_t = \frac{d|\vec{v}|}{dt}$, $a_n = \frac{|\vec{v}|^2}{R}$ e R é o raio da curvatura da trajetória em cada instante de tempo.

Corpo Rígido: objeto com tamanho não desprezível que não deforma. Seu movimento pode ser decomposto em movimento do centro de massa e movimento em torno do centro de massa.

Centro de Massa: ponto geométrico $\vec{R} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^N m_i}$ para um conjunto de N partículas pontuais de massa m_i e posição $\vec{r}_i$ ou $\vec{R} = \frac{\int_{\Omega} \rho(\vec{r}) \vec{r} d\Omega}{\int_{\Omega} \rho(\vec{r}) d\Omega}$ para um objeto contínuo com formato Ω e densidade $\rho(\vec{r})$ na posição $\vec{r}$.

Outros Conceitos Complementares.

Momento Angular ($\vec{L}$): de uma partícula com respeito ao ponto $\vec{r}_0$ é $\vec{L} = \vec{r}_0 \times \vec{p}$, onde $\times$ denota o produto vetorial. Se o ponto de referência é a origem, então $\vec{r}_0 = \vec{r}$.

Torque ($\vec{\tau}$): $\vec{\tau} = \vec{r}_0 \times \vec{F} = \frac{d\vec{L}}{dt}$ é análoga à Segunda Lei de Newton para corpos em rotação.

Energia Cinética (E_c): $E_c = \frac{1}{2} m |\vec{v}|^2 = \frac{1}{2} m \left| \frac{d\vec{r}}{dt} \right|^2$ para uma partícula pontual.

Espaço (básico): conjunto de pontos geométricos que são absolutos, homogêneos e isotrópicos. A distância entre dois pontos é medida com uma régua padrão, e não depende do observador, nem da posição absoluta desses dois pontos, nem de sua orientação. No Sistema Internacional de Unidades: metro (m).

Tempo (básico): considerado absoluto e uniforme. O intervalo de tempo entre dois eventos é medido com um relógio padrão, e não depende do observador. No Sistema Internacional de Unidades: segundo (s).

Massa (básico): é a quantidade de matéria, e depende da densidade e do volume do corpo. No Sistema Internacional de Unidades: quilograma (kg).

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 **Mecânica Newtoniana**
 - Leis de Newton
 - **Leis de Conservação**
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Conservação do Momento Linear.

Um sistema Isolado (não troca matéria com seu exterior e não existem forças externas) conserva seu momento linear (constante no tempo).

Suponha um sistema de duas partículas de massa m_1 e m_2 . Pela Segunda Lei de Newton $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$ segue que

$$\vec{F}_{2 \rightarrow 1} + \vec{F}_{externa} = \frac{d\vec{p}_1}{dt} = \frac{d(m_1 \vec{v}_1)}{dt} \text{ e } \vec{F}_{1 \rightarrow 2} + \vec{F}_{externa} = \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \frac{d(m_2 \vec{v}_2)}{dt}.$$

Como não existem forças externas $\vec{F}_{externa} = 0$.

$$\text{Logo, } \frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_{2 \rightarrow 1} + \vec{F}_{1 \rightarrow 2}.$$

Pela Terceira Lei $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$, implicando em $\frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = 0 = \frac{d\vec{P}}{dt}$, ou seja, o momento linear total $\vec{P} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ é constante no tempo.

$m_1 \vec{v}_{1a} + m_2 \vec{v}_{2a} = m_1 \vec{v}_{1d} + m_2 \vec{v}_{2d}$, onde v_{1a} e v_{2a} são as velocidades das partículas 1 e 2 antes da interação entre elas, e v_{1d} e v_{2d} são as velocidades das partículas 1 e 2 depois da interação.

Este resultado é usado para estudar choques ou colisões, é válido para sistemas com mais de duas partículas.

Conservação do Momento Angular e Energia.

Se o **Torque Externo Total** for zero, então o **Momento Angular Total** do sistema de partículas se conserva (constante no tempo). Isto é, $\frac{d\vec{L}_T}{dt} = 0$.

Considere uma partícula com massa m que descreve uma trajetória $\vec{r}(t)$ devido à força $\vec{F}$ que atua sobre ela. O **Trabalho** (W) realizado por esta força $\vec{F}$ entre os pontos $\vec{r}_1 = \vec{r}(t_1)$ e $\vec{r}_2 = \vec{r}(t_2)$ desta trajetória é definido como $W = \oint_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F} \cdot d\vec{r}$, onde $d\vec{r} = \vec{v}dt$ e $\oint$ é a integral de linha calculada ao longo da trajetória.

Se diz que uma força $\vec{F}$ é conservativa se é irrotacional $\vec{\nabla} \times \vec{F} = \vec{0}$, onde $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k}$. Neste caso $\vec{F} = -\vec{\nabla}U$, onde U é um escalar chamado de **Energia Potencial**. Toda força que depende apenas da posição $\vec{r}$ é conservativa. Isto é, se $\vec{F}$ não depende da velocidade $\vec{v}$, nem do tempo t é sempre conservativa.

A **Energia Mecânica Total** (E) é definida como a soma da **Energia Cinética Total** (T) com a **Energia Potencial Total** do sistema: $E = T + U$.

Se todas as **forças** que atuam sobre um sistema são **conservativas**, então a **Energia Mecânica Total** se conserva (constante no tempo). Isto é, $\frac{dE}{dt} = 0$.

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 **Mecânica Newtoniana**
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - **Forças Fundamentais**
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Forças ou Interações Fundamentais Conhecidas: existem quatro.

Gravitacional: força que causa atração mútua entre todos os corpos que têm massa. É a mais fraca de todas ($\approx 10^{38}$ vezes menos intensa que a Nuclear Forte, $\approx 10^{36}$ vezes menos intensa que a Eletromagnética e $\approx 10^{29}$ vezes menos intensa que a Nuclear Fraca). Tem pouca influência no nível das partículas subatômicas, e é determinante para corpos em escala macroscópica (planetas, estrelas, galáxias).

Existem duas abordagens, a Lei da gravitação universal de Newton e a Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

Lei da gravitação universal de Newton: $\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}|^2} \hat{r}$, G é a constante gravitacional $6.674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$. Esta forma é irrotacional $\vec{\nabla} \times \vec{F} = \vec{0}$, logo $\vec{F} = -\vec{\nabla} U$ e

$$U = -G \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}|}.$$

Teoria da Relatividade Geral: a gravidade não é descrita como uma força. É a *curvatura do espaço-tempo*, devido à massa, causando o movimento dos corpos ao longo de *linhas geodésicas*.

Forças ou Interações Fundamentais Conhecidas: existem quatro.

Eletromagnética: forças que causam atração e repulsão entre corpos que têm carga elétrica (campo elétrico), e estes corpos carregados e campos magnéticos. Muitos fenômenos do cotidiano são consequência do eletromagnetismo. É uma teoria macroscópica de campos que tem como fundamento a força de Lorentz e as equações de Maxwell, e pode ser dividida em eletrostática e eletrodinâmica. É aplicável quando se tem um número muito grande de partículas e distâncias grandes comparadas com as dimensões destas partículas. Não descreve corretamente os fenômenos atômicos e moleculares, o que motivou o surgimento da eletrodinâmica quântica.

Eletrostática: fenômenos associados a corpos carregados em repouso. Lei de Coulomb para duas cargas pontuais q_1 e q_2 que se atraem ou repelem $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}|^2} \hat{r}$, onde ϵ_0 é a permissividade elétrica. A carga elemental (a mais pequena conhecida) é a do elétron. No Sistema Internacional de Unidades a carga elétrica é medida em culômbio (C) definido como a quantidade de carga transportada num segundo por uma corrente elétrica com intensidade de um ampere (A) $1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s} \approx 6,25 \cdot 10^{18}$ elétrons.

Magnetostática: quando a força magnética não muda com o tempo. Para uma carga q com velocidade $\vec{v}$ que passa por um campo magnético $\vec{B}$ a força magnética é $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$.

Força de Lorentz: $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, onde $\vec{E}$ é a intensidade do campo elétrico.

Forças ou Interações Fundamentais Conhecidas: existem quatro.

Nuclear Fraca: interação entre partículas subatômicas que é responsável pelo decaimento radioativo de átomos. Um exemplo desta interação é o decaimento beta radioativo, que transforma um nêutron em um próton, um elétron, e um antineutrino do elétron. Outro exemplo é a fusão do hidrogênio em hélio. O alcance desta força é em torno de 10^{-17} a 10^{-16} m, alcance muito curto, menor do que o diâmetro de um próton.

Nuclear Forte: Os núcleos atômicos são formados por prótons e nêutros. Devido à repulsão elétrica dos prótons o núcleo deveria se desintegrar, mas como isso não ocorre, então se postulou a existência de uma nova força muito mais forte que a eletromagnética. Os efeitos desta força são notados em distâncias muito pequenas (tamanho dos núcleos atômicos), e por isso é chamada de força de curto alcance. As forças gravitacionais e eletromagnéticas são de longo alcance. Atualmente, os nucleones (*prótons* e *nêutrons*) não são considerados partículas elementares, e a força forte se divide em duas escalas espaciais: entre ≈ 1 a $3 \cdot 10^{-15}$ m interação com mésons *pi* que mantem unidos os nucleones no núcleo atômico, e $\approx$ menores que $0,8 \cdot 10^{-15}$ m (raio do nucleón) interação que mantem unidas as partículas (*quarks*) que formam um nucleón.

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 Mecânica Newtoniana
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - **Previsão da Teoria Física**
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Importância da Teoria Física.

- **Teoria Física:** conjunto de ideias organizadas seguindo alguma lógica que forma um modelo conceitual para descrever algum fenômeno físico ou conjunto de fenômenos físicos.
- Usa hipóteses, idealizações, informação obtida em experimentos físicos, e portanto deve ter limitações. Logo, não deve ser absolutizada ou perpetuada.
- Permite sintetizar e/ou relacionar o conhecimento que se tem sobre o fenômeno.
- Permite introduzir novas ideias na análise do fenômeno.
- Permite fazer previsões sobre o fenômeno antes de serem observadas experimentalmente.
- A Teoria Física e o Experimento Físico formam uma dualidade necessária para conhecer melhor um fenômeno.

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 Mecânica Newtoniana
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - **Observação Experimental Física**
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Importância do Experimento Físico.

- **Experimento Físico:** conjunto de ideias organizadas seguindo alguma lógica para montar um arranjo instrumental que permita observar algum fenômeno físico ou conjunto de fenômenos físicos.
- Usa Teoria Física, hipóteses, idealizações, informação obtida em outros experimentos físicos, e portanto deve ter limitações, além do erro que sempre existe em qualquer medição física.
- Permite verificar e/ou relacionar o conhecimento que se tem sobre o fenômeno.
- Permite introduzir novas ideias na análise do fenômeno.
- Permite fazer previsões sobre o fenômeno antes de serem observadas experimentalmente.
- Deve existir uma correspondência entre os resultados do Experimento Físico e da Teoria Física. Caso contrário, mais pesquisa teórica e experimental deve ser realizada.

Tópicos

- 1 Apresentação da disciplina
 - Ementa
 - Bibliografia
- 2 Mecânica Newtoniana
 - Leis de Newton
 - Leis de Conservação
 - Forças Fundamentais
- 3 Teoria Física e Experimento Físico
 - Previsão da Teoria Física
 - Observação Experimental Física
 - Arte de Marcelo Borges - Março 2026

Arte do Mestrando Marcelo Borges - Março 2026.

