

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM COMBUSTÃO E PROPULSÃO**

---

---

**Coordenadora Acadêmica do Curso**

Ana Maria Ambrosio

**Coordenador da Área de Concentração**

Rodrigo Intini Marques

**Docentes Permanentes**

Fernando de Souza Costa, Ph.D., Univ. Michigan, USA, 1995  
Fernando Fachini Filho, Doutor, Univ. Politec. Madri, Espanha, 1992  
Gilberto Marrega Sandonato, Doutor, ITA, Brasil, 1993  
Marcio Teixeira de Mendonça, Univ. Pennsylvania, USA, 1997  
Rodrigo Intini Marques, Ph.D, Univ. de Southampton – Inglaterra, 2009.  
Roman Ivanovitch Savonov, Doutor, ITA, Brasil, 2011  
Turibio Gomes Soares Neto, Doutor, Unicamp, Brasil, 1998  
Wilson Fernando Nogueira dos Santos, Ph.D., Univ. Maryland, USA, 2001  
Wladimir Mattos da Costa Dourado, Doutor, ITA, Brasil, 2003

**Docentes Colaboradores**

Denize Kalempa, Doutora, Univ. Federal do Paraná, Brasil, 2009

**CURSO DE  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM COMBUSTÃO E PROPULSÃO**

---

---

**Adaptação**

**Obrigatórias para o mestrado**

PCP-020-0	Elementos de Matemática
PCP-021-0	Termodinâmica Clássica

**1º Período Letivo**

**Obrigatórias para o mestrado**

PCP-203-3	Matemática I
PCP-204-3	Mecânica dos Fluidos I
PCP-205-3	Combustão I

**2º Período Letivo**

**Obrigatórias para o mestrado**

PCP-306-3	Matemática II
PCP-307-3	Mecânica dos Fluidos II
PCP-311-3	Escoamento Compressível

**3º Período Letivo e Seguintes**

**Obrigatória para a linha de pesquisa: Combustão**

PCP-400-3	Combustão II
-----------	--------------

**Obrigatória para a linha de pesquisa: Propulsão**

PCP-401-3	Propulsão
-----------	-----------

**Obrigatória para a linha de pesquisa: Catálise**

PCP-304-3	Catálise
PCP-305-3	Cinética Química

**Eletivas**

PCP-310-3	Técnicas Exp. em Combustão e Propulsão
PCP-312-3	Chamas Laminares: Chamas de Difusão
PCP-314-3	Tópicos Avançados em Combustão
PCP-315-3	Tópicos Avançados em Propulsão
PCP-402-3	Teoria Cinética dos Gases
PCP-403-3	Mecânica Analítica

PCP-404-3	Instabilidade de Escoamentos Laminares
PCP-406-3	Termodinâmica Racional
PCP-408-3	Mecânica e Termodinâmica Estatística
PCP-415-3	Métodos Computacionais em Combustão e Propulsão
PCP-416-3	Simulação Direta de Escoamento Rarefeito
PCP-417-3	Mecânica de Fluidos Magnéticos
PCP-418-3	Combustão Turbulenta

No terceiro período o aluno de mestrado deverá escolher, de acordo com a sua linha de pesquisa, pelo menos uma das disciplinas eletivas oferecidas.

**EMENTAS DAS DISCIPLINAS DA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM  
COMBUSTÃO E PROPULSÃO**

**PERÍODO DE ADAPTAÇÃO**

<b>PCP-020-0</b>	<b>Elementos de Matemática</b>
------------------	--------------------------------

**Obrigatória**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 60 horas

Álgebra linear: matrizes, autovalores e autovetores. Equações diferenciais ordinárias: propriedades das equações lineares; soluções linearmente independentes, Wronskiano; soluções de equações com coeficientes constantes; soluções com coeficientes variáveis; método de Frobenius. Equações diferenciais parciais. Problema do valor inicial e de contorno. Equações diferenciais elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Análise vetorial. Aplicações na mecânica dos fluidos. Gradiente, divergente e rotacional.

**Bibliografia**

KAPLAN, W. Advanced Calculus. Addison Wesley, 1959.

WYLIE, C.R. Advanced Engineering Mathematics. McGraw-Hill, 1961.

INCE, E.L. Ordinary Differential Equations. Dover, 1956.

ROSS, S.L. Differential Equations. Bladell, 1964.

<b>PCP-021-0</b>	<b>Termodinâmica Clássica</b>
------------------	-------------------------------

**Obrigatória**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 60 horas

Resultados gerais da termodinâmica: leis da termodinâmica, funções termodinâmicas, potencial químico, função de Helmholtz, função de Gibbs, equações fundamentais da termodinâmica química; relações de Maxwell; Reações químicas: análise da primeira e da segunda leis com reações químicas, calor de formação, energia de combustão, combustíveis, poder calorífico, temperatura de chama adiabática. Introdução ao equilíbrio de fases e químico: equilíbrio entre duas fases de uma substância pura, equilíbrio de sistemas multi-componentes, regra das fases de Gibbs, equilíbrio químico, reações simultâneas e ionização.

**Bibliografia**

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. Fundamentals of Classical Thermodynamics. Wiley, 4<sup>th</sup> Ed, 1993.

SEARS, F.W., SALINGER, G.L. Thermodynamics, Kinetic Theory and Statistical Thermodynamics, 3<sup>rd</sup> Ed, Addison Wesley, 1975.

ABOTT, M.M., VAN NESS, H. C. Termodinâmica, McGraw-Hill, Portugal 1992.

**EMENTAS DAS DISCIPLINAS DA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
EM COMBUSTÃO E PROPULSÃO**

**1º PERÍODO LETIVO**

<b>PCP-203-3</b>	<b>Matemática I</b>
------------------	---------------------

**Obrigatória**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Análise vetorial: operador nabla, divergente, rotacional e gradiente. Teoremas integrais. Equações diferenciais ordinárias: equações lineares de ordem arbitrária, soluções por séries infinitas de potências, sistemas de equações de ordem 1, algumas equações e funções especiais (de Legendre, de Bessel, etc.). Introdução à análise tensorial.

**Bibliografia**

POWERS, D. L. Boundary-Value Problems. HBJ-Academic Press, 1987.  
ARFKEN, G. Mathematical Methods for Physicists. Academic Press, 1970.  
BRAND, L. Differential and Difference Equations. Wiley, 1966.  
SOKOLNIKOFF & REDHEFFER Mathematics of Physics and Modern Engineering. McGraw-Hill, 1966.  
KAPLAN, W. Advanced Calculus. Addison Wesley, 1959.

<b>PCP-204-3</b>	<b>Mecânica dos Fluidos I</b>
------------------	-------------------------------

**Obrigatória**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Introdução: revisão de álgebra de vetores e tensores, cinemática do campo de escoamento, relações constitutivas, propriedades de transporte, equação de estado, propriedades termodinâmicas. Equações de conservação: introdução, teorema da divergência, conservação de massa, equação da continuidade, equações de quantidade de movimento, funções de fluxo, equação da vorticidade, conservação da energia, equação da entropia, condições em fronteiras, parâmetros adimensionais. Soluções exatas das equações de conservação: introdução e classificação das soluções, soluções exatas para escoamento potencial, escoamento de Poiseuille e Couette permanente, escoamento em cilindros rotativos, escoamento em tubos, Primeiro e Segundo problemas de Stokes, problema de Couette transiente, vórtice de Lamb, escoamento transiente em tubos, soluções por similaridade, soluções em escoamento compressível. Escoamentos com baixo número de Reynolds: equações simplificadas do movimento, escoamentos ao redor de corpos, transferência de calor.

**Bibliografia**

WHITE, F. M. Viscous Fluid Flow. McGraw-Hill, 2a. Ed., 1991.  
Aris, Rutherford, Vectors, Tensors, and the Basic Equations of Fluid Mechanics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1962.  
PANTON, R. L. Incompressible Flow. John Wiley & Sons, 1984.  
SCHLICHTING, H. Boundary Layer Theory. McGraw-Hill, 7a. Ed., 1979.  
KUNDU, P. Fluid Mechanics. Academic Press. Inc, 1990  
CURRIE, I. G. Fundamental Mechanics of Fluids. McGraw Hill, 2<sup>nd</sup> ed, 1993

<b>PCP-205-3</b>	<b>Combustão I</b>
------------------	--------------------

**Obrigatória****Pré-requisito:** não há**Carga horária:** 45 horas

Revisão de termodinâmica química: leis da termodinâmica, conservação das espécies, calores de reação, combustão e formação. Temperatura de chama adiabática. Constante de equilíbrio. Energia livres de Gibbs e Helmholtz. Revisão de cinética química: taxas de reação, equações de Arrhenius, limites de explosão: sistemas  $H_2-O_2$  e  $CO-O_2$ . Equações de transporte para misturas de gases perfeitos com reação, formulação de Schvab-Zeldovich, condições de conservação numa interface, relações de Rankine-Hugoniot (derivação das equações, a dificuldade da região de contorno fria, detonação e deflagração). Chamas pré-misturadas: teoria de Mallard e Le Chatelier, teoria de Semenov, análise assintótica para grandes energias de ativação, velocidade de chama, auto-valores, propriedades das chamas pré-misturadas, limites de flamabilidade.

**Bibliografia**

TURNS, S. R. An Introduction to Combustion, Concepts and Applications, McGraw-Hill, 1996.

GLASSMANN, I. Combustion, 2<sup>nd</sup> Ed., Academic Press, 1987.WILLIAMS, F. A. Combustion Theory. 2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley, 1988.

KUO, K. K. Principles of Combustion. John Wiley &amp; Sons, 1986.

LEWIS B.; VON ELBE, G. Combustion, Flames and Explosions of Gases 2<sup>a</sup>Ed., Ass. Press, 1961.

ZELDOVICH, Y. A.; BARENBLATT, G.I.; LIBROVICH, V.B.; MAKHVILADZE, G.M. The Mathematical Theory of Combustion and Explosions, Plenum Publishing Corporation, 1985.

**EMENTAS DAS DISCIPLINAS DA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM  
COMBUSTÃO E PROPULSÃO****2º PERÍODO LETIVO**

<b>PCP-306-3</b>	<b>Matemática II</b>
------------------	----------------------

**Obrigatória****Pré-requisito:** PCP-203-3**Carga horária:** 45 horas

Séries de funções numa base ortogonal: problema de Sturm-Liouville. Equações diferenciais parciais. Classificação: equações elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Algumas das propriedades e soluções, principalmente por separação de variáveis, das equações de Laplace, de onda e de difusão, aplicação de transformadas de Laplace e Fourier. Introdução aos métodos numéricos.

**Bibliografia**

POWERS, D. L. Boundary-Value Problems. HBJ-Academic Press, 1987.

ARFKEN, G. Mathematical Methods for Physicists. Academic Press, 1970.

BRAND, L. Differential and Difference Equations. Wiley, 1966.

SOKOLNIKOFF &amp; REDHEFFER Mathematics of Physics and Modern Engineering. McGraw-Hill, 1966.

KAPLAN, W. Advanced Calculus. Addison Wesley, 1959.

<b>PCP-307-3</b>	<b>Mecânica dos Fluidos II</b>
------------------	--------------------------------

**Obrigatória****Pré-requisito:** PCP-204-3**Carga horária:** 45 horas

Camadas limites laminares: introdução, equação da camada limite, soluções exatas por similaridade, soluções aproximadas, camadas limites térmicas, camada limite em convecção livre, camadas limites tri-dimensionais, camadas limites transientes. Estabilidade de escoamentos laminares: ondas em fluidos, aproximação de escoamento paralelo, teoria de estabilidade linear, efeitos paramétricos em estabilidade, transição para a turbulência. Escoamentos turbulentos incompressíveis: introdução, descrição de escoamentos turbulentos, decomposição de Reynolds, equações com médias de Reynolds, escoamento turbulento em tubos e canais, camada limite turbulenta, jatos e esteira turbulentas. Camada limite compressível: introdução, equações da camada limite compressível, soluções por similaridade.

### **Bibliografia**

WHITE, F. M. Viscous Fluid Flow. McGraw-Hill, 2a. Ed., 1991.  
SHERMAN, F. S. Viscous Flow, McGrawHill, New York, 1990.  
SCHETZ, J. Boundary Layer Analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.  
PANTON, R.L. Incompressible Flow. John Wiley & Sons, 1984.  
SCHLICHTING, H. Boundary Layer Theory. McGraw-Hill, 7a. Ed., 1979.  
CEBECI, T.; SMITH, A. M. O. Analysis of Turbulent Boundary Layers, Academic Press, Orlando, FL, 1974.

<b>PCP-311-3</b>	<b><i>Escoamento Compressível</i></b>
------------------	---------------------------------------

### **Obrigatória**

**Pré-requisito:** PCP-204-3

**Carga horária:** 45 horas

Definições e conceitos fundamentais. Equações de conservação. Escoamento isentrópico. Ondas de choque normais. Ondas de choque oblíquas. Ondas de expansão. Escoamento unidimensional com atrito. Escoamento unidimensional com troca de calor. Escoamento linearizado. Método das características.

### **Bibliografia**

SAAD, M. A. Compressible Fluid Flow. Prentice-Hall Inc., 2a ed., 1993.  
ANDERSON, J. D., Modern Compressible Flow, McGrawHill, New York, 1990.  
ZUCROW, M.J., HOFFMAN, J.D., Gas Dynamics, Vols. I e II, Wiley, 1976.  
OOSTHUIZEN, P. H., CARSCALLEN, W.E. Compressible Fluid Flow, McGraw Hill International Editions, 1997.  
LIEPMANN, H. W., ROSHKO, A. Elements of Gas Dynamics. John Wiley & Sons, 1957.  
SHAPIRO, A. H. The Dynamics and Thermo dynamics of Compressible Fluid Flow. Ronald Press, 1954.

## **EMENTAS DAS DISCIPLINAS DA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM COMBUSTÃO E PROPULSÃO**

### **3º PERÍODO LETIVO**

<b>PCP-304-3</b>	<b>Catálise</b>
------------------	-----------------

### **Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Catálise heterogênea: adsorção de gases, mecanismos de adsorção, métodos de estudo da adsorção, aplicação das medidas de adsorção. Preparação de catalisadores sólidos: troca iônica, precipitação, impregnação sem interação e com interação, tratamentos térmicos. Caracterização de catalisadores: textural, superfície ativa, tamanho de partículas de catalisadores suportados e acidez em catalisadores.

#### **Bibliografia**

LE PAGE, J.F., Catalyse de Contact. Inst. Français du Pétrole, 1978.  
ANDERSON, J.R. Structure of Metallic Catalysts. Academic Press, 1975.  
BOND, G.C. Catalysis by Metals. Academic Press, New York, 1962.

<b>PCP-305-3</b>	<b>Cinética Química</b>
------------------	-------------------------

#### **Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Fundamentos: termodinâmica versus cinética química, definição de velocidade de reação, classificação das reações, variáveis que afetam a velocidade de reação, reações simples e múltiplas, molecularidade e ordem da reação, constantes de velocidade  $k$  e de equilíbrio  $K$ , velocidade de reação em função da temperatura, teoria das colisões, teoria do estado de transição, energia de ativação, mecanismo reacional. Cinética da catálise heterogênea: conceitos e definições, princípio de Sabatier, noção de sítio, etapas de reação, etapa elementar, seqüência reacional, edv, ciclo catalítico, seletividade, velocidade de rotação, velocidade espacial horária, tempo de contato, IRPA, reações catalíticas, reações globais, definição de AEQS, relação de Tenkin, isoterma de Langmuir, ordens fracionárias. Determinação experimental da velocidade de reação: tipos de reatores, micro-reator em regime dinâmico diferencial, determinação da velocidade inicial, mecanismos de destivação, ordem e energia de ativação da reação, regime difusional inter e intra-partículas, relações empíricas, módulo de Thiele e número de Peclet. Exemplos: decomposição e síntese do  $\text{NH}_3$ . Aulas práticas: montagem e operação de uma unidade de avaliação de catalisadores.

#### **Bibliografia**

BOUDART, M., DJÉGA-MARIADASSOU Cinétique des Réactions en Catalyse Hétérogène. Masson, Paris, 1992.

<b>PCP-310-3</b>	<b>Técnicas Experimentais em Combustão e Propulsão</b>
------------------	--

#### **Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Medidas de vazão: placas de orifício, rotâmetros, medidores tipo turbina. Medidas de pressão: manômetros, sensores piezoelétricos. Medidas de temperatura: termopares, bulbos de resistência, métodos óticos (LIF, espalhamento Rayleigh, espectroscopia de emissão, espectroscopia de absorção com laser, CARS). Visualização de escoamentos: Schlieren, shadowgraph, interferometria. Medidas de Velocidade: espalhamento Rayleigh/Mie, lasers, fotodetores, velocimetria laser doppler. Medidas de concentração de espécies: analisadores de gases, métodos óticos (espectroscopia, tomografia de chamas), incandescência induzida por laser. Medida de tamanho de gotas e particulados.

#### **Bibliografia:**

HOLMAN, J. P. Experimental Methods for Engineers, 7a ed., Mc-Graw-Hill, 2001.

KOHSE- HÖINGHAUS, ), K.; JEFFRIES, J. Applied Combustion Diagnostics (Combustion: An International Series, Taylor and Francis, 2002.  
ECKBRETH, A. Laser Diagnostics for Combustion, Temperature and Species (Energy and Engineering Science), Abacus Press, 1988.  
Laser Applications in Combustion and Combustion Diagnostics, L.C. Liou; Ed. Proc. SPIE, vol. 1862, 1993.  
HERZBERG, G. Molecular Spectra and Molecular Structure, vol. 1, Spectra of Diatomic Molecules, Van Nostrand, New York, 2a ed., 1950.

<b>PCP-312-3</b>	<b>Chamas Laminares: Chamas de Difusão</b>
------------------	--

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Formulação Matemática na Ciência da Combustão. Modelo Generalizado de Shvab-Zeldovich para um Combustível. Modelo Generalizado de Shvab-Zeldovich para uma mistura de Combustíveis. Modelos Assimptóticos para a Estrutura das Chamas de Difusão. Simulação Numérica de Chamas com Cinética de Reação Simplificada. Alguns Problemas Transientes.

**Bibliografia**

WILLIAMS, F. A. Combustion Theory, The Benjamin. Cummings Publishing Company, Inc, 1985.  
LIÑÁN, A .; WILLIAMS, F. A. Fundamental Aspects of Combustion. Oxford University Press, Oxford Engineering Sciences Series 34, 1993.  
ZELDOVICH, YA. B.; BARENBLATT, G. I.; LIBROVICH, V. B.; MAKHILADZE, G. M. The Mathematical Theory of Combustion and Explosions. Consultants Bureau, 1985.  
CHUNG, T. J. Numerical Modeling in Combustion, Taylor & Francis, 1993.  
LIÑÁN, A. The Asymptotic Structure of Counterflow Diffusion Flame for Large Activation Energy, Acta Astronautica, 1, 1007-1039, 1975.  
CRESPO, A.; LIÑÁN, A. Unsteady Effects in Droplet and Combustion, Droplet, Combustion Science and Technology, 11, 9-18, 1975.  
LIÑÁN, A.; CRESPO, A. Asymptotic Analysis of Unsteady Flames for Large Activation Energy. Combustion Science and Technology, 14, 95-117, 1976.  
LINAN, A. El Papel de la Mecanica de Fluidos em los Processos de Combustio. Discurso e a Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales, Madri, Espanha, 1991.

<b>PCP-314-3</b>	<b>Tópicos Avançados em Combustão</b>
------------------	---------------------------------------

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Abordam-se tópicos avançados em Combustão.

**Bibliografia**

Artigos de revistas especializadas no assunto.

<b>PCP-315-3</b>	<b>Tópicos Avançados em Propulsão</b>
------------------	---------------------------------------

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Abordam-se tópicos avançados em Propulsão. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

### **Bibliografia**

Artigos de revistas especializadas no assunto.

<b>PCP-400-3</b>	<b>Combustão II</b>
------------------	---------------------

#### ***Eletiva***

***Pré-requisito:*** PCP-205-3

***Carga horária:*** 45 horas

Chamas de difusão: queima de jatos difusivos, teoria de Burke-Schumann, queima de gotas e de sprays. Queima de sólidos. Modelos computacionais simplificados de sistemas reativos. Camadas limites reativas, conceito de elementos de chama (flamelets), chamas de difusão em um ponto de estagnação, efeitos do números de Lewis em chamas difusivas. Chamas planas pré-misturadas, análise assintótica com alta energia de ativação. Escalas e regimes de combustão turbulenta em chamas pré-misturadas, mecanismos de instabilidade de chamas pré-misturadas, modelos estatísticos de chamas turbulentas.

#### **Bibliografia**

TURNER, S.R. An Introduction to Combustion, Concepts and Applications, McGraw-Hill, 1996.

GLASSMANN, I. Combustion, 2<sup>nd</sup> Ed., Academic Press, 1987.

WILLIAMS, F. A. Combustion Theory. 2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley, 1988.

KUO, K.K. Principles of Combustion. John Wiley & Sons, 1986.

LEWIS B., VON ELBE, G. Combustion, Flames and Explosions of Gases 2<sup>a</sup>Ed., Ass. Press, 1961.

ZELDOVICH, Y.A., BARENBLATT, G.I., LIBROVICH, V.B., MAKHVILADZE, G.M. The Mathematical Theory of Combustion and Explosions, Plenum Publishing Corporation, 1985.

<b>PCP-401-3</b>	<b>Propulsão</b>
------------------	------------------

#### ***Eletiva***

***Pré-requisito:*** PCP - 308-3

***Carga horária:*** 45 horas

Classificação dos sistemas propulsivos. Definições e fundamentos. Teoria das tuberias e relações termodinâmicas. Transferência de calor na propulsão de foguetes. Definição de missões e desempenho em vôo. Análise do desempenho dos foguetes a propulsão química. Fundamentos dos foguetes a propulsão líquida. Propelentes líquidos e sua combustão. Motores de foguetes a propelentes líquidos. Fundamentos dos foguetes a propelente sólido. Propelentes sólidos e sua combustão. Componentes dos foguetes a propelentes sólidos. Testes de foguetes.

#### **Bibliografia**

SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. Rocket Propulsion Elements, 7<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons, 2000.

BROWN, C. D. Spacecraft Propulsion, AIAA Education Series, 1995.

WILLIAMS, F. A. BARRERE, M.; HUANG, H.C. Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets. AGARDograph n<sup>o</sup> 116, 1969.

BARRERE, M.; JAUMOTTE, A.; DE VEUBEKE, B. D.; VAN DEN KERCKHOVE, J. Rocket Propulsion Elsevier Publishing, Company, 1960.

HUZEL, D. K.; HUANG, D. H. Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines. AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, vol 147, 1992.

<b>PCP-402-3</b>	<b>Teoria Cinética dos Gases</b>
------------------	----------------------------------

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Definições básicas. Função de distribuição. Valores médios e fluxos de grandezas extensivas. Efusão. Definição da pressão e da temperatura. Constante de Boltzmann. Número de Avogadro. Energia, entalpia e calores específicos. Estimativa do percurso livre médio e da frequência colisional. Teoria ultrasimplificada dos fenômenos de transporte. Distribuição de Maxwell. Dinâmica dos encontros entre partículas. Equação de Boltzmann. Equilíbrio e a tendência ao equilíbrio. Seção de espalhamento. Percurso livre médio e frequência colisional (abordagem perigosa). Obtenção das equações da gasdinâmica da equação de Boltzmann. Modelo BGK.

**Bibliografia**

VINCENT, W.G.; KRUGER, C. H. Introduction to Physical Gas Dynamics. John Wiley, 1965.

PRESENT, R. D. Kinetic Theory of Gases. McGraw-Hill, 1958.

SIELAWA, J. T. Teoria Cinética dos Gases e Plasmas. Apostila, ITA, 1983.

<b>PCP-403-3</b>	<b>Mecânica Analítica</b>
------------------	---------------------------

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Mecânica newtoniana em seus aspectos básicos no casosistemas de massa. Movimento translacional e rotacional. Sistema de coordenadas em movimento. Quantidade de movimento linear e angular, energia. Vínculos e coordenadas generalizadas. Equações de movimento de Lagrange. Sistemas holômanos ou não holônomos. conservativos ou não conservativos. Sistemas com vínculos dependentes de tempo. Multiplicadores de Lagrange. Teoria de oscilações através da formulação lagrangeana. Dinâmica de corpos rígidos. Tensor ( diádica) de inércia. Órbitas. Aplicação ao contínuo. Equações de movimento de Hamilton. Princípio de Hamilton.

**Bibliografia**

GOLDSTEIN, H. Classical Mechanics. 2ª ed., Addison Wesley, 1980.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. Mecânica. Hemus, s.d..

MARION, J. B. Classical Dynamics of Particles and Systems. Academic Press. 1965.

SIELAWA, J. T. Mecânica Analítica. Segundo, Apostila, São José dos Campos, INPE, 1985.

<b>PCP-404-3</b>	<b>Instabilidade de Escoamentos Laminares</b>
------------------	---

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Revisão de propagação de ondas. Números complexos. Conceito de instabilidade. Formulação. Classificação (convectiva e absoluta, temporal e espacial, local e global). Teoremas fundamentais (Rayleigh e Fjortoft). Equação de Rayleigh. Instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Projeto número 1 – programa de cálculo de instabilidade invíscida. Equação de Orr-Sommerfeld e ondas de Tollmien-

Schlichting. Orr-Sommerfeld tridimensional e teorema de Squires. Projeto número 2 – programa de cálculo de instabilidade de Tollmien-Schlichting. Instabilidade térmica e células de convecção de Bernard. Vórtices de Taylor – instabilidade de escoamento entre dois cilindros concêntricos. Vórtices de Görtler – instabilidade de camada limite sobre superfícies côncavas. Projeto número 2 – programa de cálculo de instabilidade sobre superfícies côncavas. Efeitos não lineares e não paralelos. Parabolized Stability Equations –PSE. Projeto número 3 – estudo de efeitos não lineares e não paralelos utilizando PSE. Transição para regime turbulento.

#### **Bibliografia**

DRAZIN, P. G.; REID, W. H. Hydrodynamic Stability. Cambridge University Press, 1981.  
BETCHOV, R.; CRIMINALE, W. O. Stability of Parallel Flows. Academic Press, 1967.  
CHANDRASEKHAR, S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Oxford University Press, 1961.  
KOSCHMIEDER, E. L. Bernard Cells and Taylor Vortices. Cambridge University Press, 1993.  
HENNINGSON, D. S.; SCHMID, P. J. Stability and Transition in Shear Flows. Springer Verlag, Vol 142 – Applied Math. Sciences, 2001.

<b>PCP-406-3</b>	<b>Termodinâmica Racional</b>
------------------	-------------------------------

#### **Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Críticas à termodinâmica clássica. Termodinâmica dos processos homogêneos. Processos dissipativos na Mecânica dos Fluidos. Princípios da “Termodinâmica Racional” de acordo com Truesdell. Tratamento da termodinâmica no estilo da Mecânica Analítica. Definição de variáveis de estado como coordenadas generalizadas. Meios lineares e não-lineares. Termodinâmica dos fluidos newtonianos.

#### **Bibliografia**

TRUESDELL, C. Rational Thermodynamics. McGraw-Hill, 1969.  
SIELAWA, J. T. Termodinâmica Racional. Apostila do Curso MEC-300, ITA, 1979

<b>PCP-408-3</b>	<b>Mecânica e Termodinâmica Estatística</b>
------------------	---

#### **Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Introdução à Mecânica Estatística; Micro e Macro Estados; Estatísticas de Fermi-Dirc; Bose-Einstein e Boltzmann; Teoria Cinética dos Gases fora do Equilíbrio; Equação de Boltzmann; Momentos da Equação de Boltzmann; Dinâmica das Colisões Binárias; Seções Retas de Colisão; Teorema dos H; Solução de Chapman-Enskog da Equação de Boltzmann; Modelo BGK; Equação dos 13 Momentos; Hierarquia de BBGKY e Equação de Liouville. Introdução a Processos Estocásticos, Equação de Vlasov. Equações de MHD.

#### **Bibliografia**

VINCENTI, W. G.; KRUGER, C. H. Introduction to Physical Gas Dynamics 1975, John Wiley & Sons Inc. NY.  
PRESENT, R. D. Kinetic Theory of Gases, Mc Graw Hill Book Co. NY, 1958.  
CHAPMAN, S. The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases, 2nd Ed., 1970.  
WAX, N. Selected Papers on Noise and Stochastic Processes. Dover Publications NY, 1954.

<b>PCP-415-3</b>	<b>Métodos Computacionais em Combustão e Propulsão</b>
------------------	--

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Determinação de raízes; Integração numérica; Solução de sistemas algébricos lineares; Solução de EDOs: diferenças finitas, estabilidade, consistência e convergência, método do “shooting”; Solução de EDPs: classificação (parabólicas, elípticas e hiperbólicas), diferenças finitas: ordem, série de Taylor, erro de dispersão e dissipação, métodos implícitos e explícitos, diferenças centradas e “upwind”; Volumes finitos: métodos de volumes finitos via diferenças finitas, volume de controle centrados no nó e na célula, esquemas centrados, esquemas “upwind”; Solução de equações de Laplace e Poisson; Aplicações a equações da mecânica dos fluidos.

**Bibliografia**

ANDERSON JR, J. D. Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications. McGraw-Hill, 1995.  
CHUNG, T. J. Computational Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 2002.  
FORTUNA, A. O. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos. Conceitos Básicos e Aplicações. Editora USP, ISBN 85-314-0526-2.  
CUNHA.M. C. C. Métodos Numéricos. Editora da Unicamp, 2000.

<b>PCP-416-3</b>	<b>Simulação Direta de Escoamento Rarefeito</b>
------------------	---

**Eletiva**

**Pré-requisito:** PCP204-3 e PCP-307-3

**Carga horária:** 45 horas

**Pré-requisito:**

Definições e conceitos fundamentais. Modelo molecular de gases. Colisões binárias elásticas. Elementos de teoria cinética. Propriedades de um gás em equilíbrio. Colisões inelásticas. Características de escoamento livre de colisões. Principais aspectos da simulação direta. Simulação direta de um gás homogêneo. Simulação de escoamento permanente unidimensional. Simulação de escoamento transiente unidimensional. Simulação de escoamento permanente bidimensional. Simulação de escoamento permanente axissimétrico.

**Bibliografia**

BIRD, G. A., Molecular Gas Dynamics and Direct Simulation of Gas Flows, Oxford Science Publications, Oxford, 1994.  
SHEN, C., Rarefied Gas Dynamics: Fundamentals, Simulations and Micro Flows, Springer-Verlag, Berlin, 2005.,  
Vincent, W. G. and KRUGER, C. H., Introduction to Physical Gas Dynamics, John Wiley, 1965.  
GOMBOSI, T, I., Gaskinetic Theory, Cambridge University Press, 1994.

<b>PCP-417-3</b>	<b>Mecânica de Fluidos Magnéticos</b>
------------------	---------------------------------------

**Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Definição de campo magnético, Equações de Maxwell, Tensor de Maxwell, Densidade de energia do campo eletromagnético, Superparamagnetismo, Relaxação magnética, Viscosidade efetiva de um fluido magnético, Equação de Bernoulli para um fluido magnético e Equação de Navier-Stokes generalizada.

### **Bibliografia**

R. E. Rosensweig, Ferrohydrodynamics, Dover Publications, 1997;  
J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, Wiley, 1999;  
JOHN R. REITZ, FREDERICK J. MILFORD, ROBERT W. CHRISTY, Fundamentos da Teoria Eletromagnética, Campus, 1982.

<b>PCP-418-3</b>	<b>Combustão Turbulenta</b>
------------------	-----------------------------

### **Eletiva**

**Pré-requisito:** não há

**Carga horária:** 45 horas

Rápida introdução em termoquímica e cinética química, Processos de transporte, equações governantes para escoamentos reativos e turbulência, Chamas de difusão laminar e turbulenta, Chamas de pré-mistura laminar e turbulenta, Modelamento de combustão turbulenta (Equações de transporte para espécies e entalpia; Escalas em combustão turbulenta; Tipos de combustão e os diversos regimes), Modelos de extinção por vórtices (*Eddy breakup*, EBU), Modelos de dissipação por vórtices (*Eddy dissipation* models, EDM), Combustão turbulenta não pré-misturada (Exemplos; Fração de mistura; Modelos de combustão; Interação química-turbulência), Combustão turbulenta pré-mistura (Exemplos; Velocidade de queima; Regimes de combustão; Modelo de Bray-Moss-Libby (BML); Outros modelos), Exemplos de aplicação em motores foguetes, queimadores de biomassa, turbinas à gás, motores de combustão interna.

### **Bibliografia**

Glassman, I., "Combustion," 3<sup>rd</sup> Ed., Academic Press, 1996.  
Kuo, K. K., "Principles of Combustion," John Wiley & Sons, 1986.  
Peters, N., "Turbulent Combustion," Cambridge Univ. Press, 2000.  
Bai, X. S., "Turbulent Combustion," Lecture Notes, Lunds Universitet – Dept. of Fluid Mechanics, 2005.  
Pope, S. B., "Turbulent Flows," Cambridge Univ. Press, 2000.  
Poinsot, T. And Veynante, D., "Theoretical and Numerical Combustion," Edwards, 2001.  
Borghi, R. Destriau, M. et de Soete, G., "La Combustion et les Flamme," Éditions Technip, Paris, 1995.  
Borghi, R. et Champion, M., "Modelisation et Théorie des Flamme," Ed. Technip, Paris, 2000.  
Libby, P. A. and Williams, F. A., "Turbulent Reacting Flows," Academic Press, London, 1994.

Os trabalhos auxiliares ou finais do programa de Pós-Graduação serão identificados na forma abaixo indicada:

<b>PCP-730</b>	<b>Pesquisa de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/PCP*</b>
----------------	---

### **Obrigatória**

**Créditos:** 0

<b>PCP-750</b>	<b>Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/PCP</b>
----------------	---

**Obrigatória**  
**Créditos: 12**

<b>PCP-780</b>	<b>Pesquisa de Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/PCP *</b>
----------------	---

**Obrigatória**  
**Créditos: 0**

<b>PCP-800</b>	<b>Tese de Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/PCP</b>
----------------	---

**Obrigatória**  
**Créditos: 36**

\*Atividade *Obrigatória*, em cada período letivo, para todo aluno em fase de Pesquisa, definida pela oficialização de seu Orientador de Pesquisa que avaliará o desempenho do aluno nesta atividade. *Obrigatória*, também, antes da oficialização citada, para o aluno que não esteja matriculado em alguma disciplina; neste caso, a orientação e avaliação deverá ser feita por Docente aprovado pelo Coordenador Acadêmico do Curso.

Catálogo aprovado pelo CPG em 06/12/2016.