**Título:** Um modelo de momentos para a dinâmica de plasmas a colisionalidades arbitrárias

Resumo alargado em Português

A fusão nuclear é o processo no qual dois ou mais núcleos atómicos se juntam de modo a produzir um ou mais núcleos diferentes. Caso a massa dos produtos da reação seja menor do que a massa combinada dos núcleos iniciais, a reação de fusão resulta numa libertação de energia. Este tipo de energia, que alimenta o Sol e outras estrelas, é considerada como uma alternativa viável às energias utilizadas hoje em dia, tendo como principais vantagens o facto de ter um combustível de fácil obtenção e em grande quantidade (no caso da reação de deutério-trítio), e de ser um processo mais seguro e que produz menos resíduos radioativos que o da fissão nuclear.

Ao longo dos anos foram propostas várias abordagens de modo a atingir as condições necessárias para produzir energia através de reações de fusão nuclear, sendo para isso necessário confinar o plasma no interior do reator durante tempo suficiente para obter um ganho de energia final. Esta tese tem como objeto o estudo da fusão nuclear por confinamento magnético. Atualmente, as máquinas de fusão deste tipo com maior progresso teórico e experimental são o tokamak e o stellarator. Ambos têm geometria toroidal, com um campo magnético criado apenas por bobines externas no caso do stellarator, tendo o tokamak uma contribuição adicional para campo magnético total proveniente de uma corrente induzida no plasma. O maior tokamak em operação neste momento é o JET, onde se obteve o maior rácio Q entre a potência de fusão gerada por reações nucleares e a potência externa aplicada de Q=0.7. Esta e outras conquistas significativas abriram caminho para a construção do tokamak ITER, onde se espera que produza o primeiro plasma em 2025, com o objetivo último de obter Q=10 e de mostrar a viabilidade de fusão por confinamento magnético como fonte de energia. O sucesso do programa de fusão nuclear depende diretamente da nossa capacidade de prever o comportamento do plasma no interior da máquina.

Apesar de nas últimas décadas se ter verificado um desenvolvimento significativo nesta área, ainda não foi concebido um modelo capaz de descrever a região periférica de máquinas de fusão por confinamento magnético, estendendo-se desde o bordo até à scrape-off layer. Esta região desempenha um papel extremamente importante no desempenho da máquina, dado que estabelece as condições de fronteira para o núcleo do plasma, controla a dinâmica das impurezas, o reabastecimento de plasma e é responsável pela remoção de impurezas. Além disso, a região periférica é caracterizada pela presença de flutuações turbulentas a escalas espaciais muito distintas, compreendidas entre o raio de Larmor e a dimensão da máquina, pela presença de fortes fluxos de plasma, por componentes de equilíbrio e flutuantes de amplitude comparável, e por uma ampla gama de regimes colisionais. O desenvolvimento de um modelo é crucial para prever o fluxo de calor na parede de máquinas de fusão futuras, a transição L-H, e a dinâmica de ELMs, tendo a ausência de um modelo adequado posto em causa a nossa habilidade para simular corretamente a dinâmica do plasma nesta região. Estas são algumas das questões mais importantes no caminho para um reator de fusão.

Na presente tese, um modelo de deriva-cinética e um modelo girocinético capazes de descrever a dinâmica do plasma na periferia do tokamak são desenvolvidos, levando em conta flutuações eletrostáticas a todas as escalas relevantes, permitindo componentes de equilíbrio e flutuantes de amplitude comparável. Enquanto o modelo de deriva-cinética é utilizado para modelar a dinâmica do plasma na scrape-off layer, onde a variação espacial das flutuações tem um comprimento típico muito superior ao raio de Larmor, o modelo girocinético inclui flutuações ao nível do raio de Larmor, tendo assim um regime de aplicação válido para toda a região periférica.

Tendo em conta a ampla gama de densidades e temperaturas presentes numa máquina de fusão nuclear, ambos os modelos aqui desenvolvidos implementam um operador de colisão de Coulomb completo, sendo assim válidos para regimes de colisionalidade arbitrária. Além disso, a presença de estruturas (tal como ELMs) a temperaturas bastante mais elevadas do que a temperatura do plasma na periferia requer uma descrição cinética válida a colisionalidades arbitrárias, ao contrário de uma descrição de fluido válida a colisionalidades elevadas. Assim, combinando a simplicidade de um modelo de fluido e o regime de aplicação de um modelo cinético, a equação cinética obtida é projetada numa base polinomial de Hermite-Laguerre no espaço das velocidades, obtendo assim uma hierarquia de momentos, permitindo uma implementação numérica eficiente dos modelos de deriva cinética e girocinético. O uso de polinómios de Hermite e de Laguerre está relacionado com a ortogonalidade destes em relação à função peso Gaussiana, o que permite uma descrição de fluido simplificada caso a função de distribuição de equilíbrio seja caracterizada pela função de distribuição de Maxwell-Boltzmann.

O tratamento de colisionalidades arbitrárias é feito expressando o operador de colisão de Coulomb em coordenadas de centro-guia e de girocentro, fornecendo assim uma fórmula fechada para a sua média de giração em termos de momentos da função de distribuição, colmatando assim uma lacuna de longa data na literatura. O uso de fechos sistemáticos para truncar a equação de hierarquia de momentos, tais como o fecho semi-colisional, permite uma seleção imediata do conteúdo de física cinética contida no modelo. Num regime eletrostático de alta colisionalidade, o nosso modelo reduz-se a um conjunto melhorado de equações de deriva reduzidas de Braginskii, que têm sido amplamente utilizadas em simulações da scrape-off layer.

Os primeiros estudos numéricos baseados no nosso modelo são apresentados, levando assim à compreensão de alguns pontos essenciais sobre a interação entre mecanismos não colisionais e colisionais, utilizando um operador de colisão de Coulomb adequado. Em particular, estudamos a dinâmica de ondas de plasma eletrónicas e a instabilidade de ondas de deriva a colisionalidades arbitrárias. Uma comparação é feita com o limite não colisional e operadores de colisão simplificados utilizados em códigos de simulação atuais, tais como os operadores de colisão de Lenard-Bernstein, de Dougherty, e de eletrão-ião.

No caso de ondas de plasma eletrónicas, o estudo da evolução temporal da densidade perturbada mostra diferenças importantes na taxa de amortecimento entre diferentes operadores de colisão. Além disso, verifica-se que a dinâmica a altas colisionalidades é dominada pelo modo de entropia, um modo puramente amortecido com uma taxa de amortecimento menor do que a taxa de Landau. É também obtida uma relação de dispersão analítica para o modo entropia que reproduz com precisão os resultados obtidos numericamente. O espetro de modos próprios do sistema é comparado com o espetro obtido utilizando diferentes operadores de colisão, mostrando diferenças significativas com os operadores de colisão de Lenard-Bernstein e de Dougherty.

Finalmente, no caso da instabilidade de ondas de deriva, a taxa de crescimento e o espetro de modos próprios do sistema são encontrados para diferentes valores de colisionalidade e números de onda paralelos e perpendiculares ao campo magnético de fundo. Aqui, mostra-se que o modelo desenvolvido nesta tese é particularmente eficiente para o estudo de plasmas magnetizados, e que diferenças até cinquenta por cento nas taxas de crescimento são encontradas entre diferentes operadores de colisão. Estas diferenças são especialmente importantes a níveis de colisionalidade relevantes para máquinas de confinamento magnético presentes e futuras.