

Fusão Termonuclear

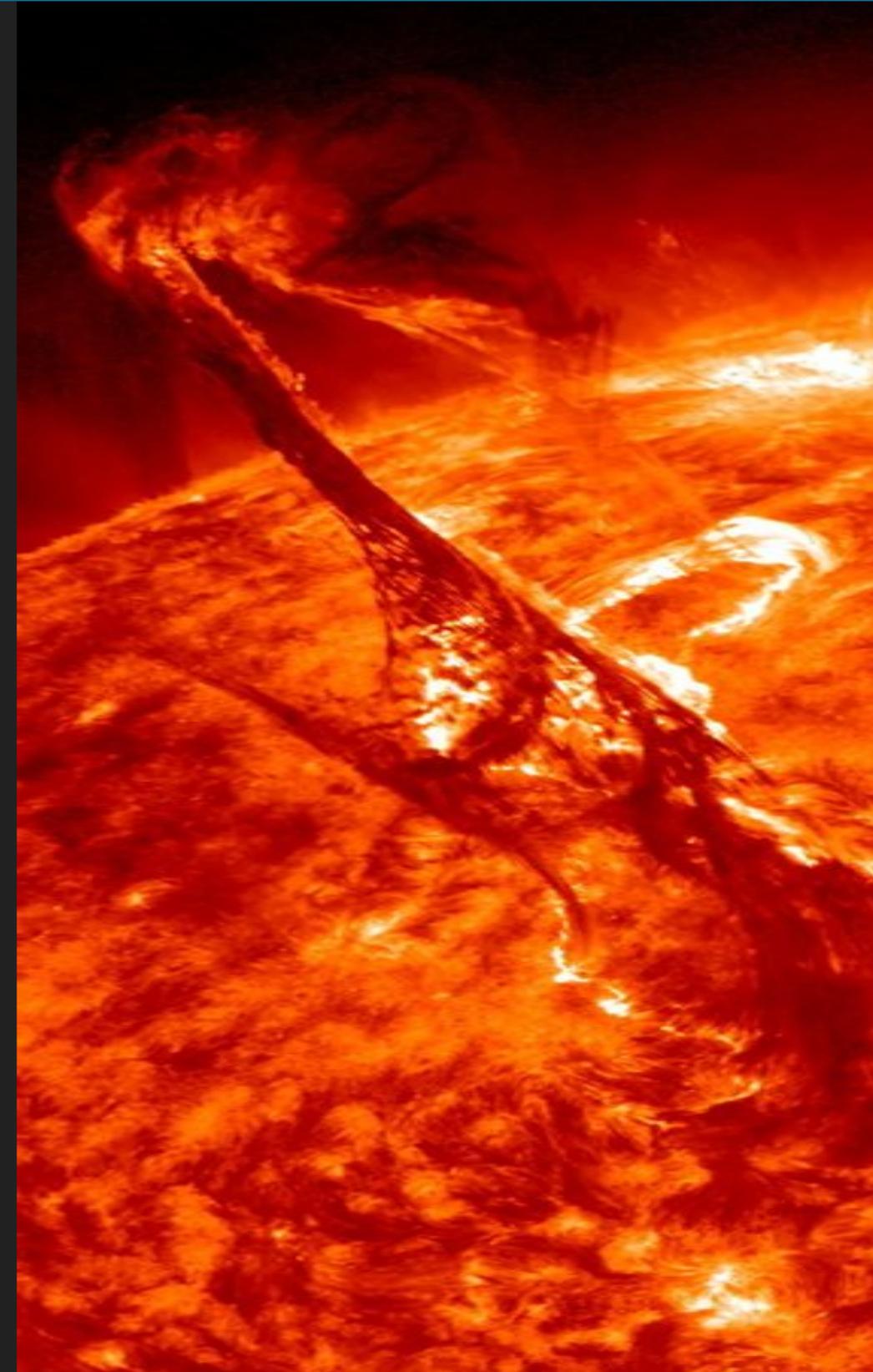
Fusão Termonuclear em Estrelas

A fusão termonuclear é o **principal mecanismo de geração de energia no universo**. Por meio do processo de fusão, núcleos atômicos leves (como hidrogênio e seus isótopos) fundem-se sob condições extremas, liberando quantidades colossais de energia e formando elementos mais pesados (como hélio).

Condições Essenciais para a Fusão:

1. **Temperaturas Extremas** (10 - 15 milhões de graus K):
Necessárias para superar a repulsão eletrostática entre núcleos atômicos, permitindo que se aproximem o suficiente para a interação nuclear forte atuar.
2. **Confinamento do Plasma** (gás ionizado):
O plasma deve ser mantido em uma região do espaço para que as reações de fusão ocorram. Nas estrelas, isso é garantido pela **gravidade intensa**, que comprime o plasma.

 por Jose Helder Severo



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Fusão Termonuclear

Fusão Termonuclear em Laboratório



Confinamento

Campos magnéticos intensos para confinar e restringir o movimento das partículas.



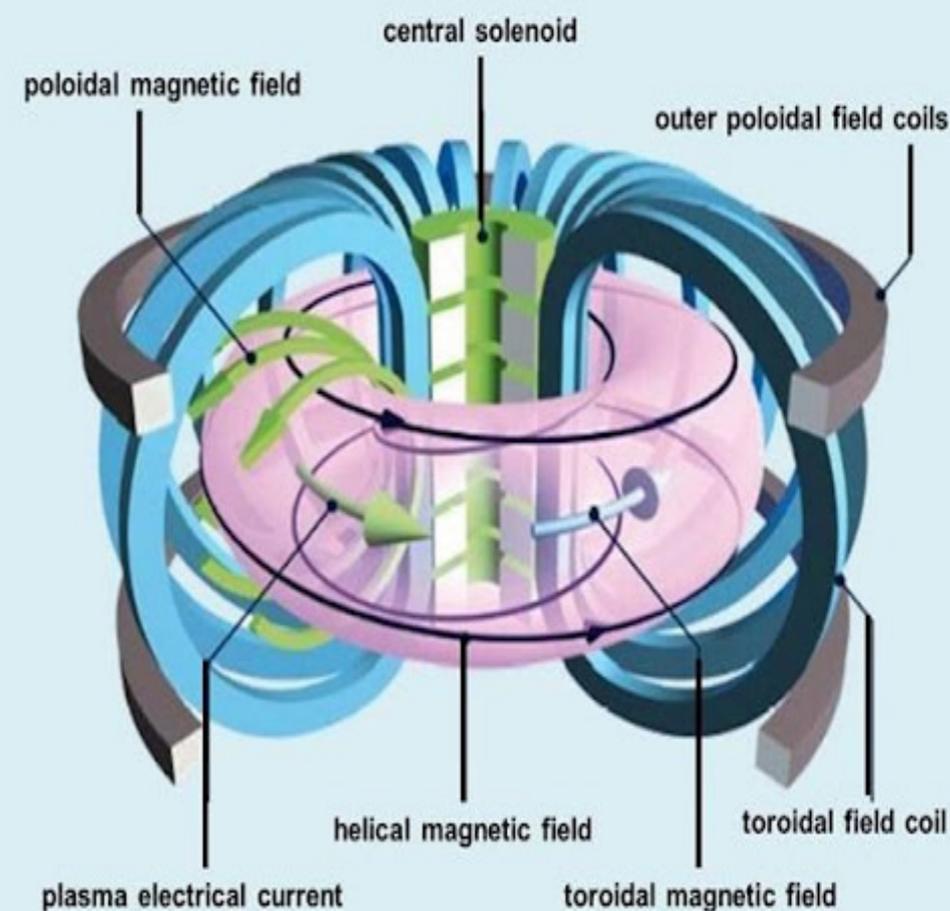
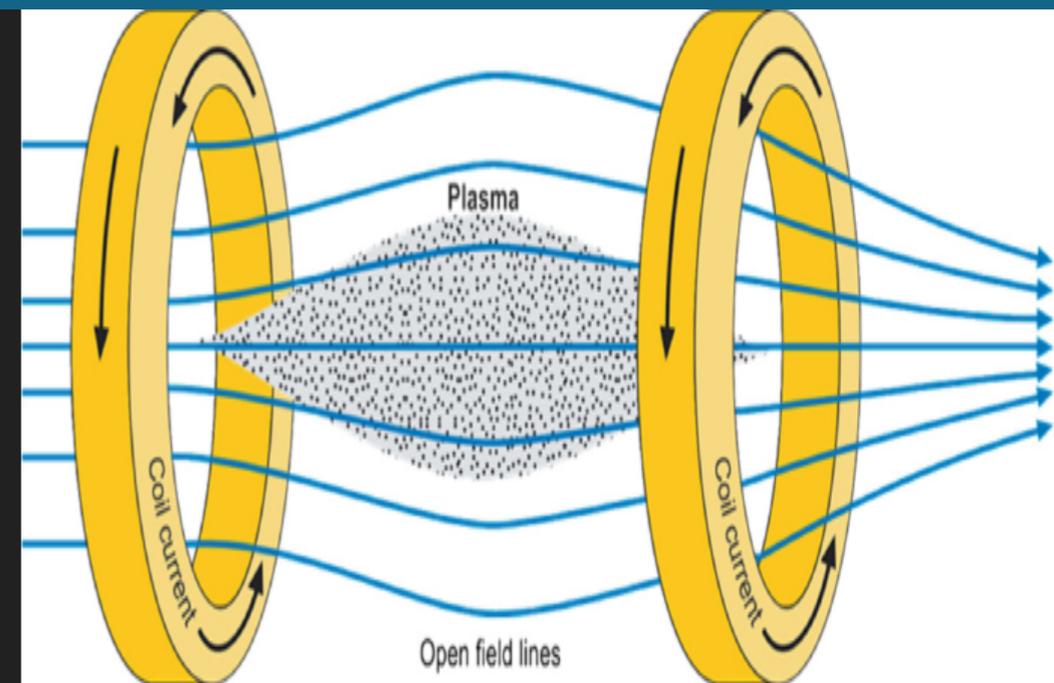
Aquecimento

Se dá por efeito Joule com a passagem de uma corrente elétrica pelo gás. A temperatura do gás pode atingir algumas dezenas de milhões de graus. São necessárias fontes alternativas para aquecer o plasma a temperatura de 100 milhões de graus



Objetivo da Pesquisa em Fusão Termonuclear

Reproduzir em laboratórios as mesmas reações nucleares que acontecem no interior das estrelas.



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Fusão Termonuclear

Condições para Fusão em Laboratório



Nas estrelas, o confinamento é realizado por um campo gravitacional enorme. A temperatura no interior do Sol é de 10 - 15 milhões K.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Fusão Termonuclear

Confinamento Magnético

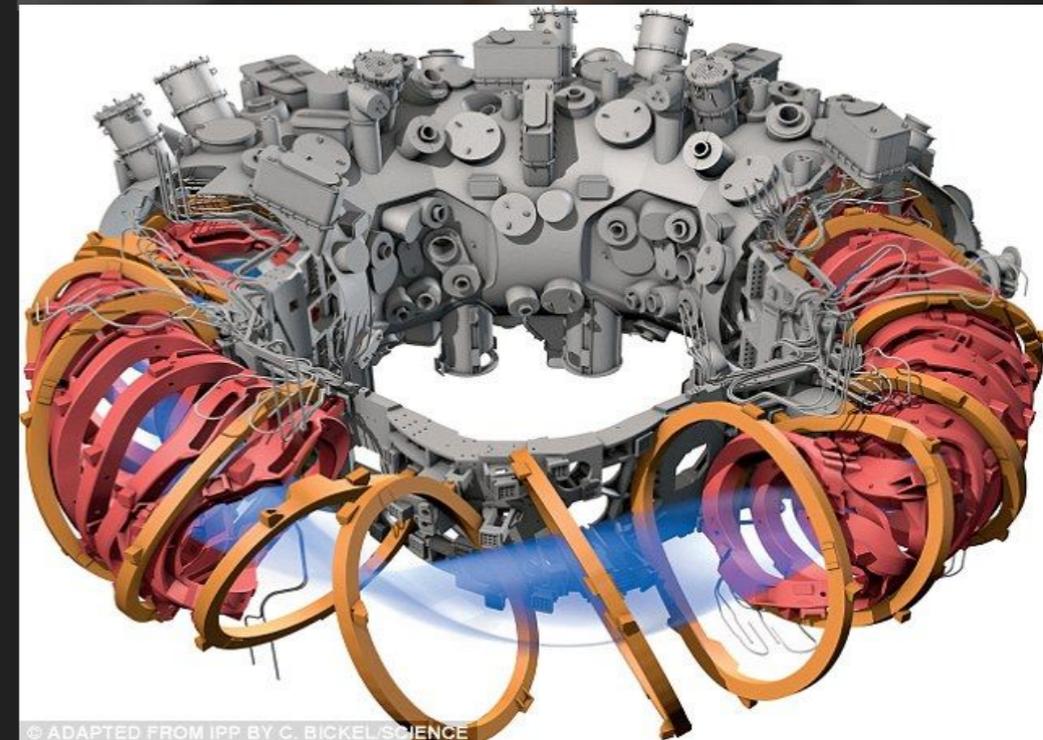
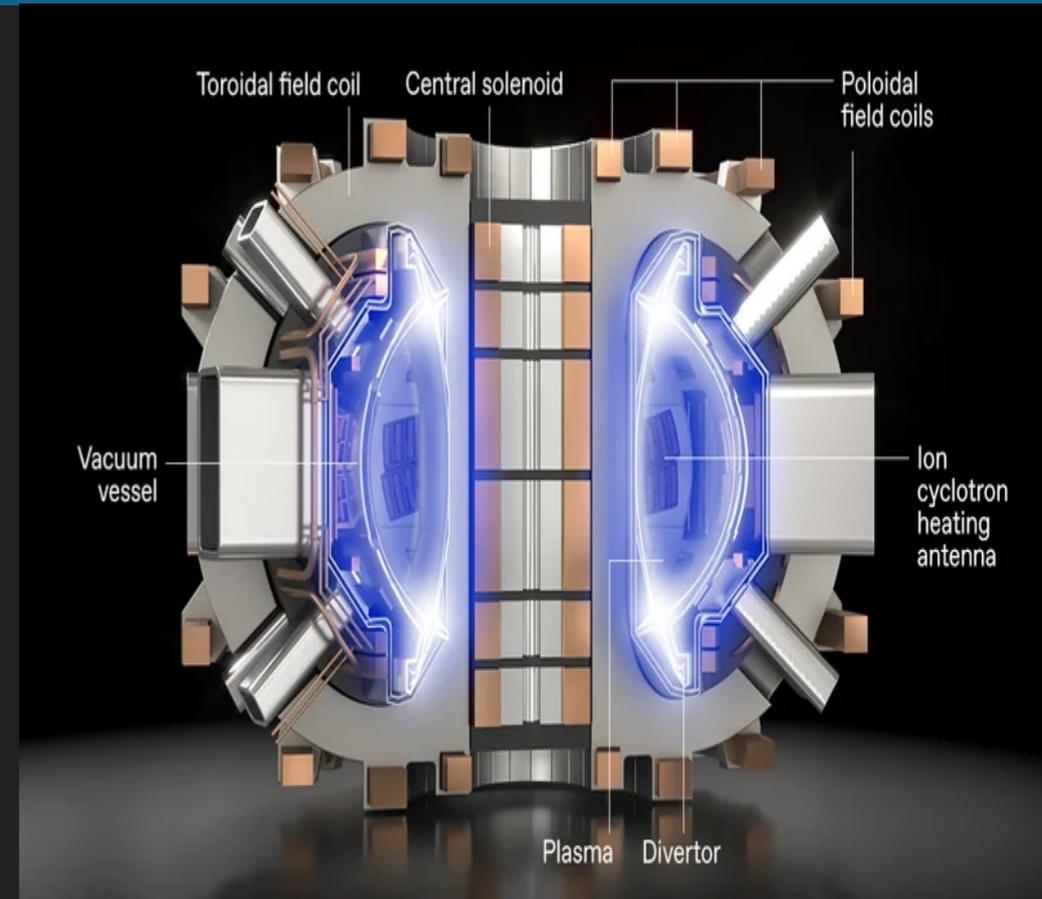
Em laboratórios, o confinamento de plasma é realizado através de **campos magnéticos**, com duas configurações principais utilizadas para confinar e aquecer o material: os **Tokamaks** (que operam com correntes elétricas induzidas) e os **Stellarators** (que possuem bobinas magnéticas toroidais complexas). Ambas as tecnologias buscam estabilizar o plasma em altíssimas temperaturas, simulando as condições necessárias para a fusão termonuclear controlada.

Tokamak

Dispositivo de confinamento magnético **toroidal** (formato de câmara de pneu) que utiliza **correntes elétricas no plasma** e campos magnéticos externos para conter o plasma em altas temperaturas. É o design mais comum em reatores experimentais de fusão nuclear (ex: ITER).

Stellarator

Dispositivo toroidal que **dispensa correntes no plasma**, usando bobinas magnéticas **complexamente torcidas** para gerar campos magnéticos 3D. Oferece estabilidade superior em operação contínua, porém com construção mais desafiadora.



© ADAPTED FROM IPP BY C. BICKEL/SCIENCE

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB



O Tokamak TCABR e a Pesquisa em Fusão Nuclear



Objetivo da Pesquisa

Dominar a tecnologia para reproduzir em ambiente controlado na Terra as **reações de fusão nuclear que alimentam as estrelas**, visando desenvolver uma **fonte de energia revolucionária**: limpa (sem emissões de carbono), intrinsecamente segura e com potencial para suprir demandas energéticas globais de forma sustentável por milênios. Esse esforço científico, busca oferecer uma alternativa definitiva à dependência de combustíveis fósseis e à fissão nuclear convencional.



Tokamaks

Dispositivos de configuração toroidal que empregam **campos magnéticos controlados** para confinar plasmas — um estado da matéria composto por **gás ionizado em altíssimas temperaturas** (da ordem de milhões de graus Celsius). Projetados para simular as condições de fusão nuclear, esses reatores experimentais combinam **engenharia de precisão e física avançada**, sendo fundamentais para pesquisas em energia limpa e estável, como a fusão termonuclear controlada.



Tokamak TCABR

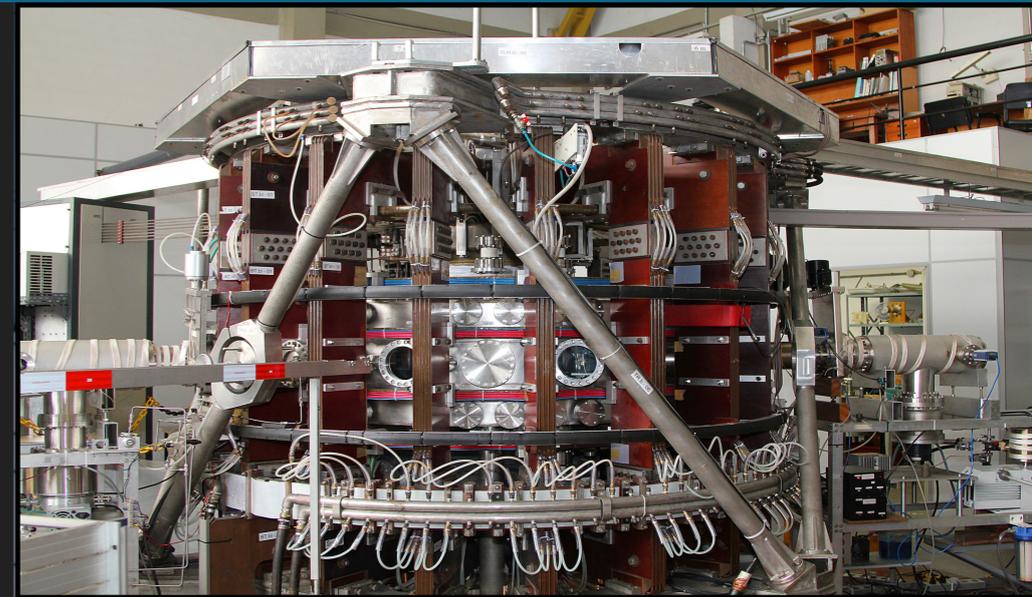
O Tokamak TCABR, operado pelo Instituto de Física da USP, é hoje considerado uma instalação de pequeno porte, mas destaca-se como uma plataforma versátil para estudos avançados em física de plasmas. Sua flexibilidade operacional e simplicidade estrutural permitem a realização de pesquisas inovadoras de forma acessível, contribuindo para o entendimento de fenômenos fundamentais nessa área.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Fusão Termonuclear

Tokamaks no Brasil

Características	TCABR	ETE	Nova
Raio maior	0,61 m	0,30 m	0,30 m
Raio menor	0,18 m	0,20 m	0,06 m
Duração do pulso	100 ms	20 ms	10 ms
Campo toroidal	1,1 T	0,80 T	0,80 T
Corrente de plasma	100 kA	440 kA	10 kA



Fusão Termonuclear

Medidas de Rotação de Plasma no TCABR

Medição da Velocidade de Rotação do Plasma

A medição da velocidade de rotação do plasma é realizada por meio de técnicas espectroscópicas baseada na medição do deslocamento Doppler de linhas espectrais de impurezas



Modelagem

Comparação com modelos teóricos;
Ajuste de parâmetros;
Identificação de discrepâncias entre dados experimentais e os modelos propostos.

Aprimoramento

Simulações numéricas → Comparação com deslocamentos Doppler medidos;
Análise de resíduos para refinar modelos

Fusão Termonuclear

Deslocamento Doppler de Linhas Espectrais



Emissão de luz

Impurezas no plasma emitem linhas espectrais características



Deslocamento espectral

$\Delta\lambda/\lambda = v/c$ devido à velocidade de deriva iônica



Medições precisam ser bem precisas

Para $\lambda = 530\text{nm}$ e $v = 5\text{km/s}$: $\Delta\lambda \approx 0,009\text{nm}$

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Fusão Termonuclear

Objetivo do Experimento



Medição Experimental

Obter perfis de velocidade de rotação do plasma



Perfil de Temperatura

Buscar um perfil localizado dentro do intervalo de confiança



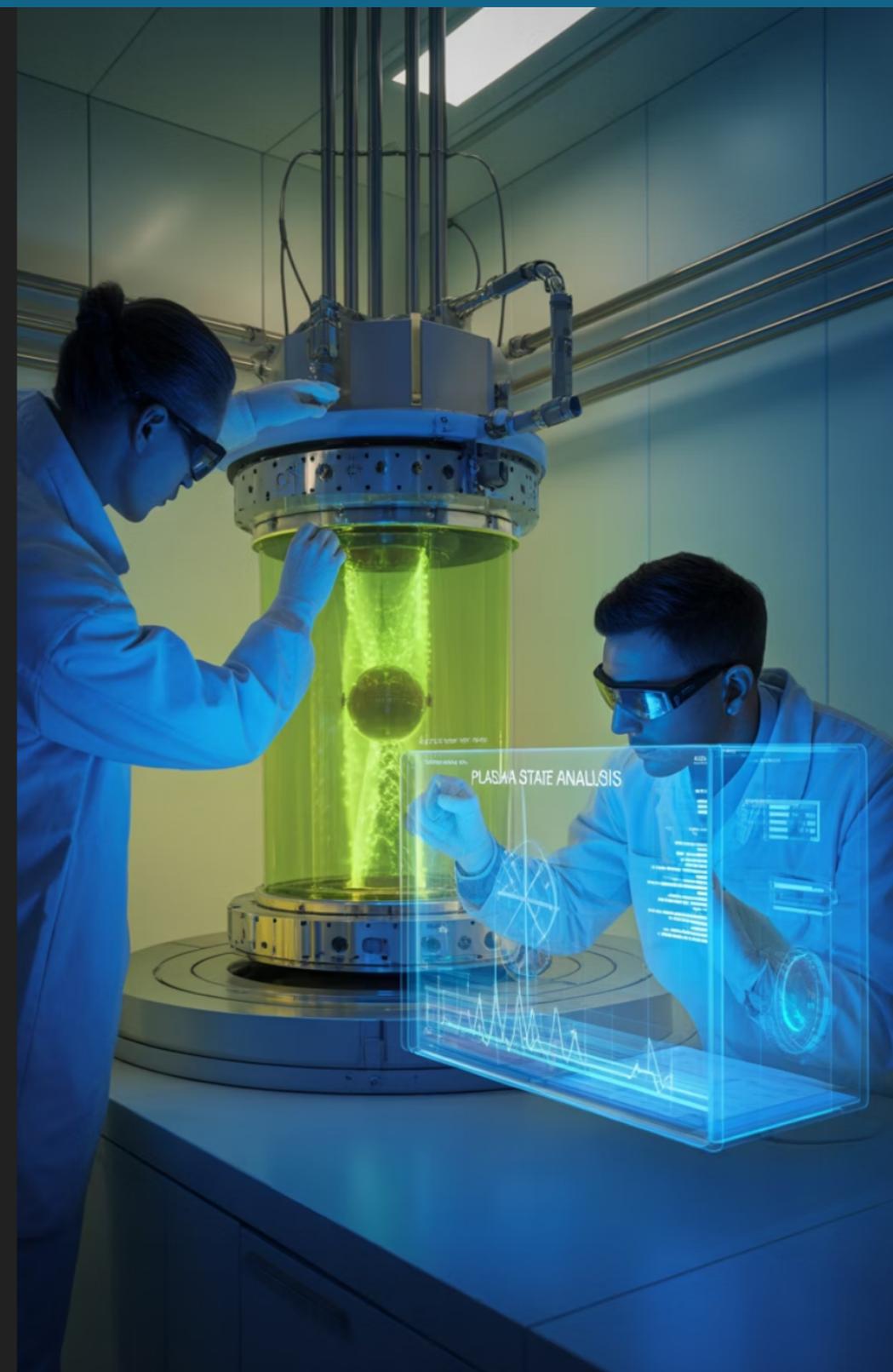
Comparação com Modelo

Minimizar a diferença entre velocidade experimental e prevista pelo modelo de Helander



Validação Teórica

Confirmar a precisão do modelo teórico com dados reais



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

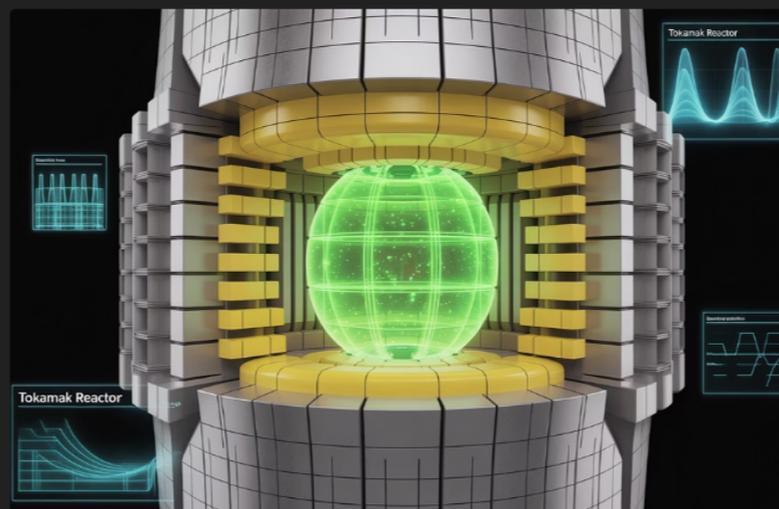
Fusão Termonuclear

Conclusões e Importância da Pesquisa



Avanço Científico

A pesquisa em fusão busca reproduzir em laboratório o processo energético das estrelas.



Tecnologia de Confinamento

Tokamaks como o TCABR são fundamentais para o desenvolvimento da fusão controlada.



Energia do Futuro

A fusão termonuclear representa uma potencial fonte de energia limpa e abundante.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

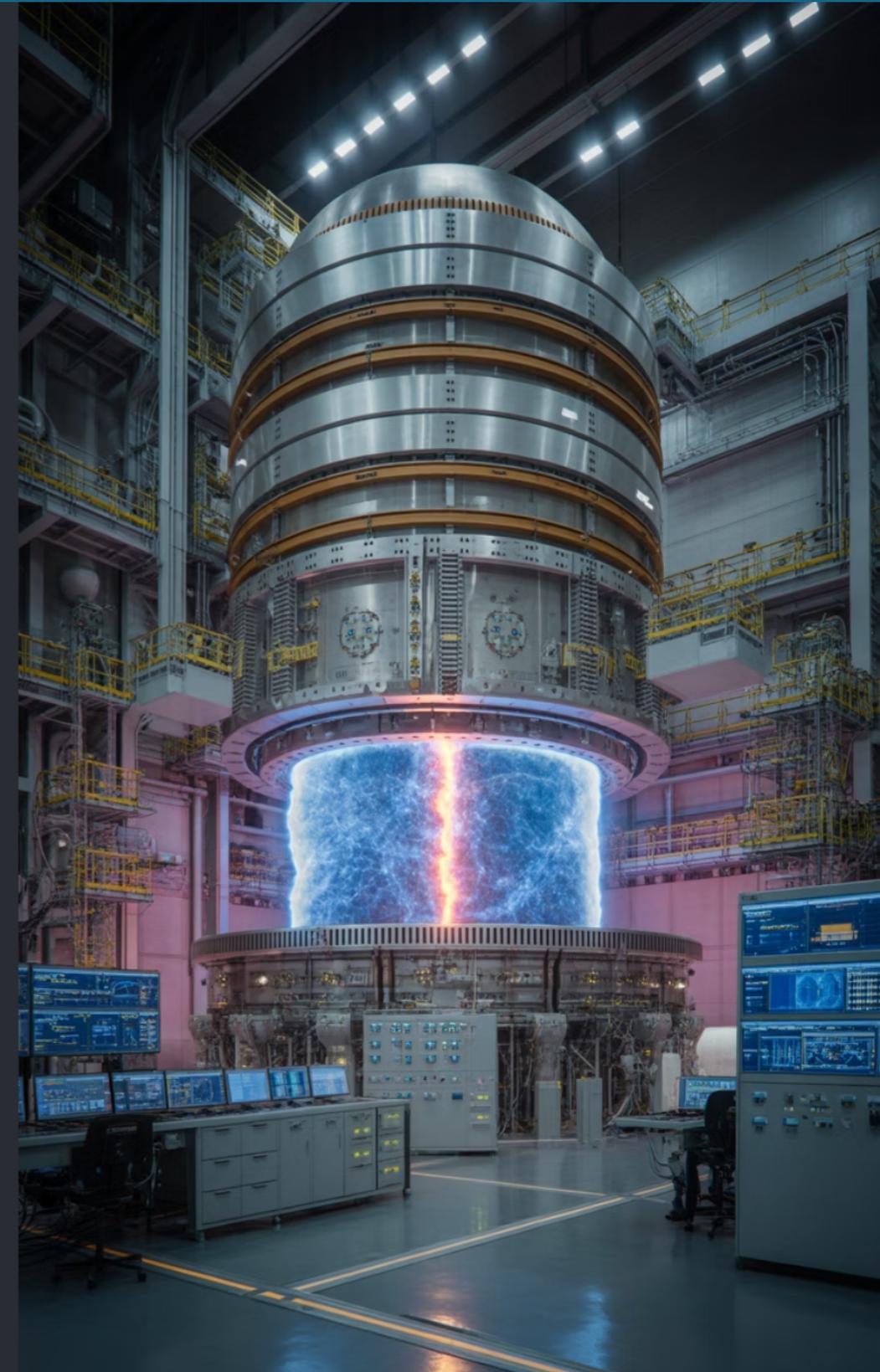
Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Análise de Rotação de Plasma no Tokamak TCABR

Neste estudo, exploraremos os conceitos fundamentais, métodos de análise e a física por trás da rotação intrínseca do plasma em dispositivo de fusão nuclear chamado tokamak.

Vamos examinar como extrair informações relevantes de medições experimentais, aplicar técnicas de ajuste de curvas e comparar os dados experimentais com modelos teóricos, especificamente com o modelo de Helander para rotação intrínseca. Esta análise de dados nos permitirá compreender melhor os mecanismos físicos que governam a rotação de plasma no tokamak TCABR.

 por Jose Helder Severo



Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Importância da Rotação do Plasma

Rotação Espontânea ou Intrínseca

O estudo dos mecanismos físicos que causam a rotação espontânea do plasma (poloidal e toroidal) é uma linha de pesquisa destacada no TCABR.

A compreensão dessa rotação é fundamental para melhorar o confinamento magnético e o desempenho geral dos dispositivos de fusão.

Dados do TCABR

Os dados do TCABR são cruciais para a formulação e validação de modelos e leis de escala em física de plasma.

Apresenta parâmetros de plasma comparáveis à borda de grandes tokamaks, permitindo extrapolações valiosas para dispositivos de maior porte.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Experimento de Laboratório

Trabalho com Dados Reais

O experimento oferece a oportunidade de trabalhar com dados reais do TCABR, aplicando técnicas de análise para investigar hipóteses específicas sobre a rotação do plasma.

Análise de Dados

Foca na análise de dados como ferramenta essencial: extrair informações relevantes de medições ruidosas para testar e refinar modelos teóricos.

Validação de Modelos

Permite a comparação direta entre previsões teóricas e observações experimentais, contribuindo para o avanço do conhecimento em física de plasmas.



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Ajuste de Curvas: Fundamentação da Modelagem

Objetivo

Encontrar uma função matemática (um "*modelo*") que represente a tendência subjacente ou a relação física oculta em dados experimentais discretos e ruidosos.

Propósitos

Resumir dados em uma forma compacta (parâmetros da função), interpolar valores entre pontos medidos e transformar dados discretos em uma representação contínua para manipulação matemática.

Princípio dos Mínimos Quadrados

Método mais utilizado para encontrar a "*melhor*" curva. Busca minimizar a soma dos quadrados de todos os resíduos, penalizando desvios maiores mais significativamente.

Regression Analysis

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Resíduos e Qualidade do Ajuste



Os resíduos são a diferença vertical entre um ponto de dado experimental e o valor previsto pela curva ajustada. Eles quantificam o erro do modelo para cada ponto e são fundamentais para avaliar a qualidade do ajuste.

O coeficiente de determinação (R^2) mede a proporção da variabilidade total nos dados experimentais que é "*explicada*" pelo modelo. Varia de 0 a 1, onde $R^2 = 1$ significa que o modelo explica perfeitamente a variabilidade, enquanto $R^2 = 0$ indica que o modelo não explica nada.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Descrição da Velocidade: Ajuste Polinomial

$f(x)$

Uso de Polinômios

Modelos empíricos utilizados quando a forma funcional exata da relação física é desconhecida ou complexa.



Grau do Polinômio

Determina a complexidade e flexibilidade. Grau maior permite ajustar variações mais complexas, mas cria risco de "sobreajuste".



Aplicação no TCABR

Ajuste de dados de velocidade de rotação toroidal (**Vphi_Exp**) a polinômios de 4º e 5º graus.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB



Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Coeficiente de Determinação (R^2)

$$R^2 = 1$$

Ajuste Perfeito

O modelo explica perfeitamente a variabilidade dos dados.

$$R^2 = 0$$

Ajuste Ruim

O modelo não explica nada (tão bom quanto usar a média dos dados).

$$0 < R^2 < 1$$

Ajuste Parcial

O modelo explica uma fração da variabilidade total nos dados.

O coeficiente R^2 é calculado como: $R^2 = 1 - SS_{res} / SS_{tot}$, onde SS_{res} (Soma dos Quadrados dos Resíduos) representa a variabilidade não explicada pelo modelo, e SS_{tot} (Soma Total dos Quadrados) representa a variabilidade total nos dados.

É importante notar que R^2 é uma medida relativa da qualidade do ajuste. Comparar R^2 entre modelos de diferentes famílias funcionais (ex: polinomial vs. não-linear) requer cautela.

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Modelagem da Temperatura: Ajuste Não-Linear com Base Física

Perfil Canônico

Utiliza-se uma função "canônica" específica inspirada em observações e modelos teóricos de perfis de temperatura em tokamaks.

Otimização

Utiliza algoritmos de otimização numérica iterativa (**lsqcurvefit** no MATLAB) para minimizar a soma dos quadrados dos resíduos.



Parâmetros Físicos

$T_{i,max}$ (temperatura máxima no centro),
 $T_{i,min}$ (temperatura mínima na borda),
 n (expoente que controla a forma do perfil).

Vantagens

Usar um modelo com base física permite que os parâmetros ajustados forneçam insights sobre os processos físicos subjacentes.

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Avaliação da Qualidade do Ajuste e Incertezas



RMSE

Raiz do Erro Quadrático Médio, expressa nas mesmas unidades que a variável dependente, fornecendo uma ideia direta da magnitude típica do erro.



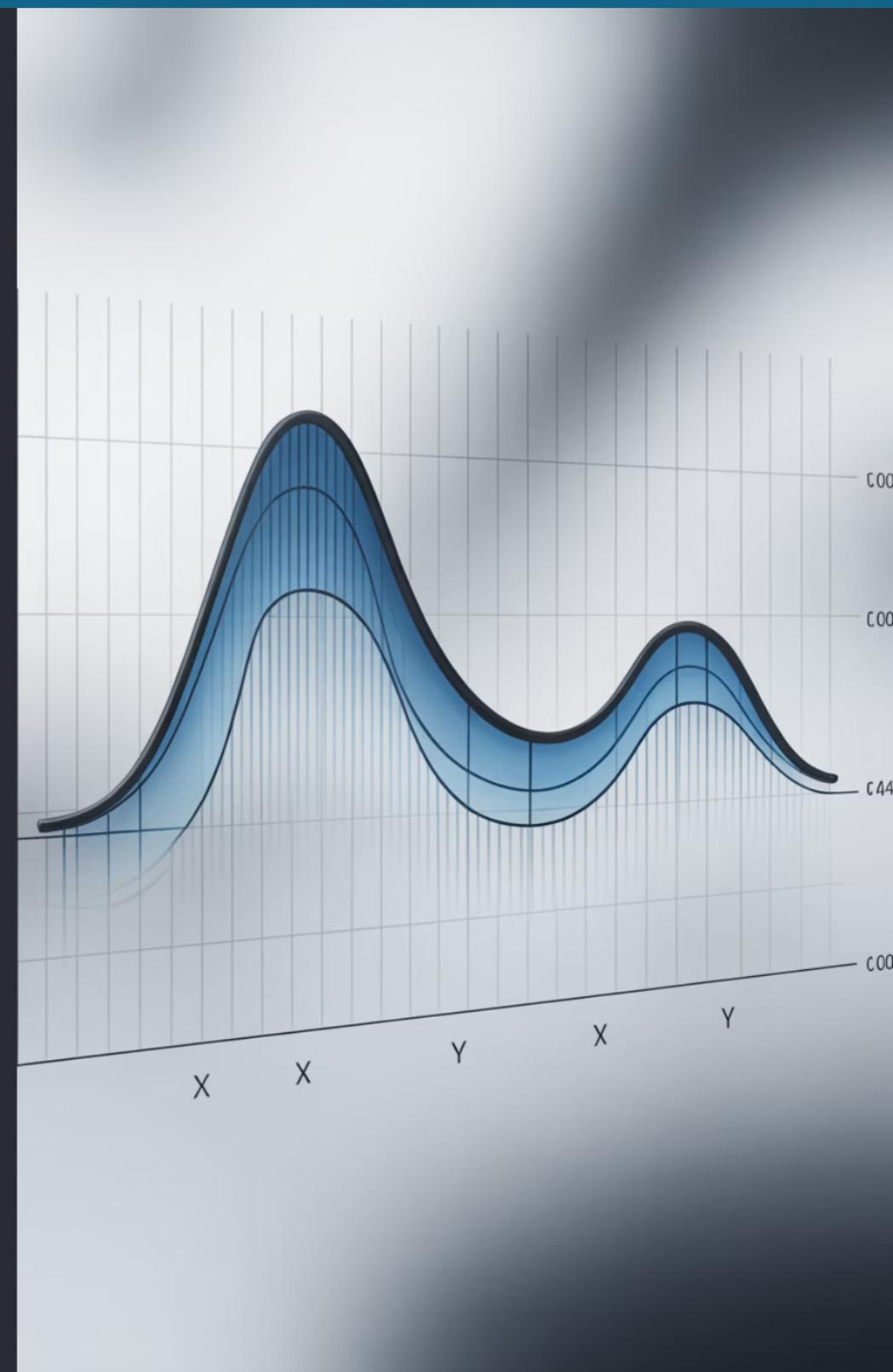
Intervalos de Confiança

Quantificam a incerteza associada à própria curva ajustada, definindo uma faixa com 95% de probabilidade.



Fontes de Incerteza

Dispersão dos dados, incerteza das medições, incerteza nos parâmetros ajustados e sensibilidade do modelo.



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

A Física da Rotação Intrínseca

Rotação do Plasma

Plasmas confinados não são estáticos; exibem rotação toroidal e poloidal. A rotação, especialmente o cisalhamento (variação rápida com o raio), pode suprimir turbulência, levando a melhor confinamento de energia e partículas.

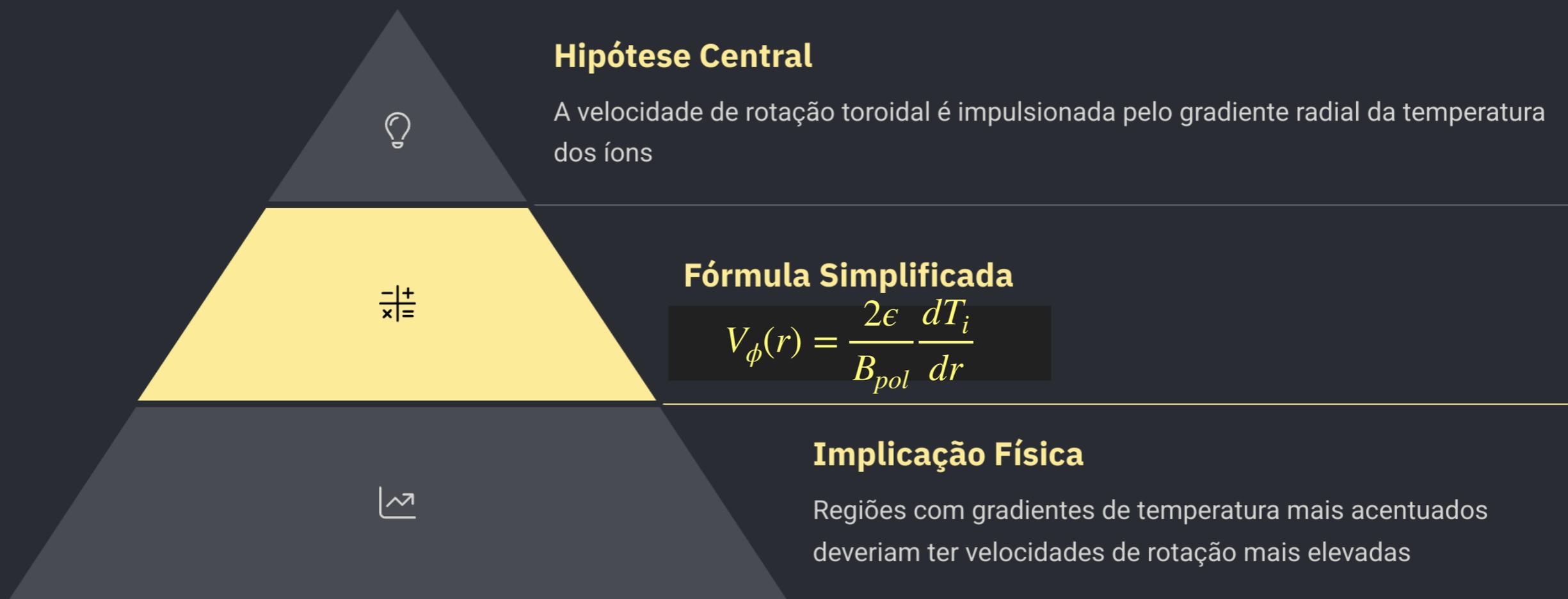
Rotação Intrínseca

Rotação observada mesmo na ausência de fonte externa óbvia de momento angular. Deve surgir de processos internos ao plasma. Compreender sua origem é crucial para futuros reatores (ex: ITER).

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

O Modelo de Helander



O modelo de Helander propõe que a rotação intrínseca do plasma é impulsionada principalmente pelo gradiente de temperatura iônica. A fórmula relaciona a velocidade de rotação toroidal (\mathbf{V}_{ϕ}) com o gradiente radial da temperatura (dT_i/dr), a intensidade do campo magnético poloidal (\mathbf{B}_{pol}) e a razão de aspecto inversa ($\epsilon = a/R_{centr}$).

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Componentes do Modelo de Helander



dT_i/dr

Gradiente radial da temperatura iônica – a "força motriz" neste modelo. Calculado a partir do ajuste da função canônica aos dados de temperatura.



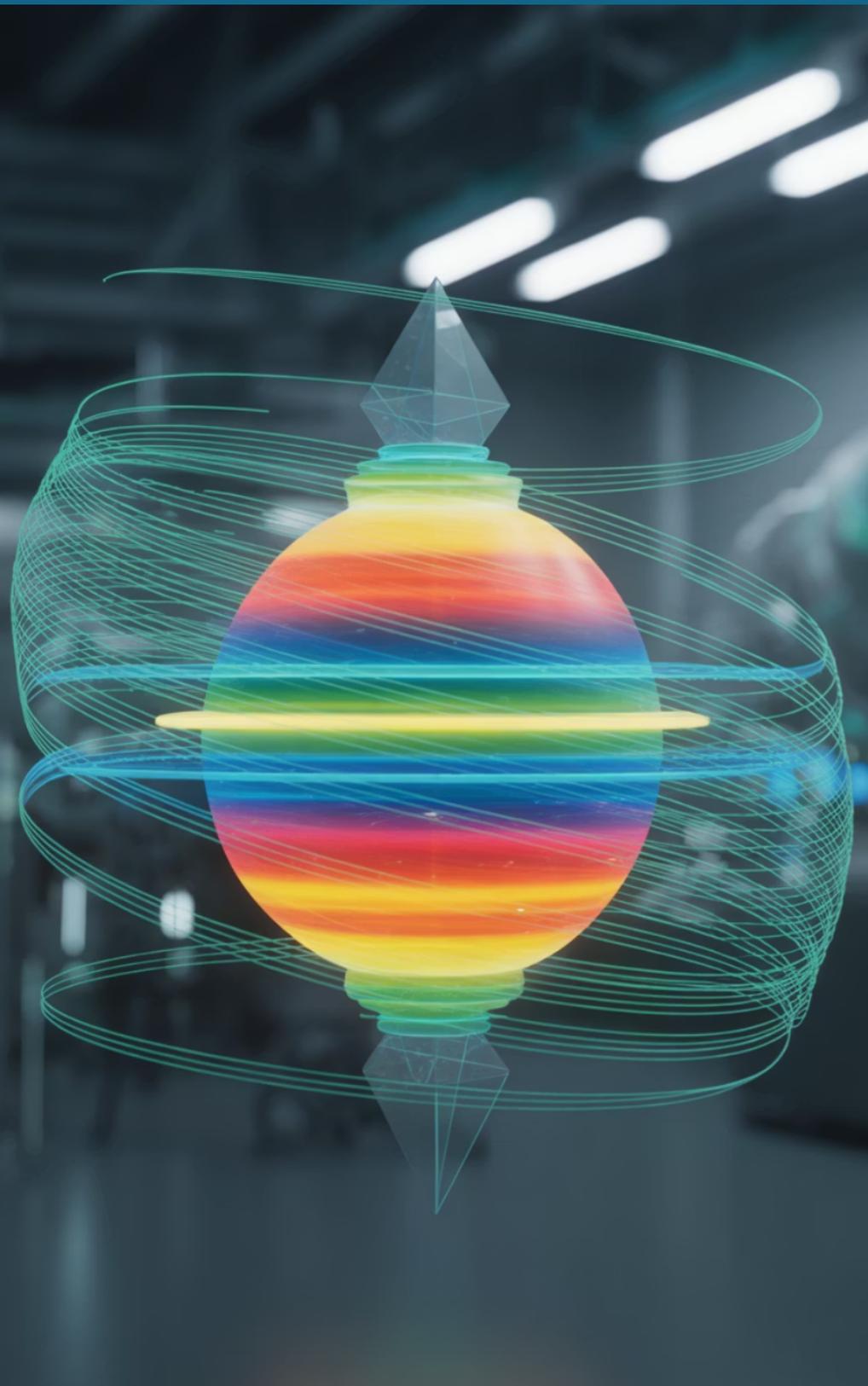
$B_{pol}(r)$

Intensidade do campo magnético poloidal no raio r . Afeta o transporte de momento. Sua fórmula depende da corrente de plasma (I_P), raio menor (a) e posição radial (r).



$\epsilon = a/R_{centr}$

Razão de aspecto inversa – um fator geométrico que influencia as trajetórias das partículas no plasma toroidal.



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Base Teórica e Limitações

Base Teórica (Simplificada)

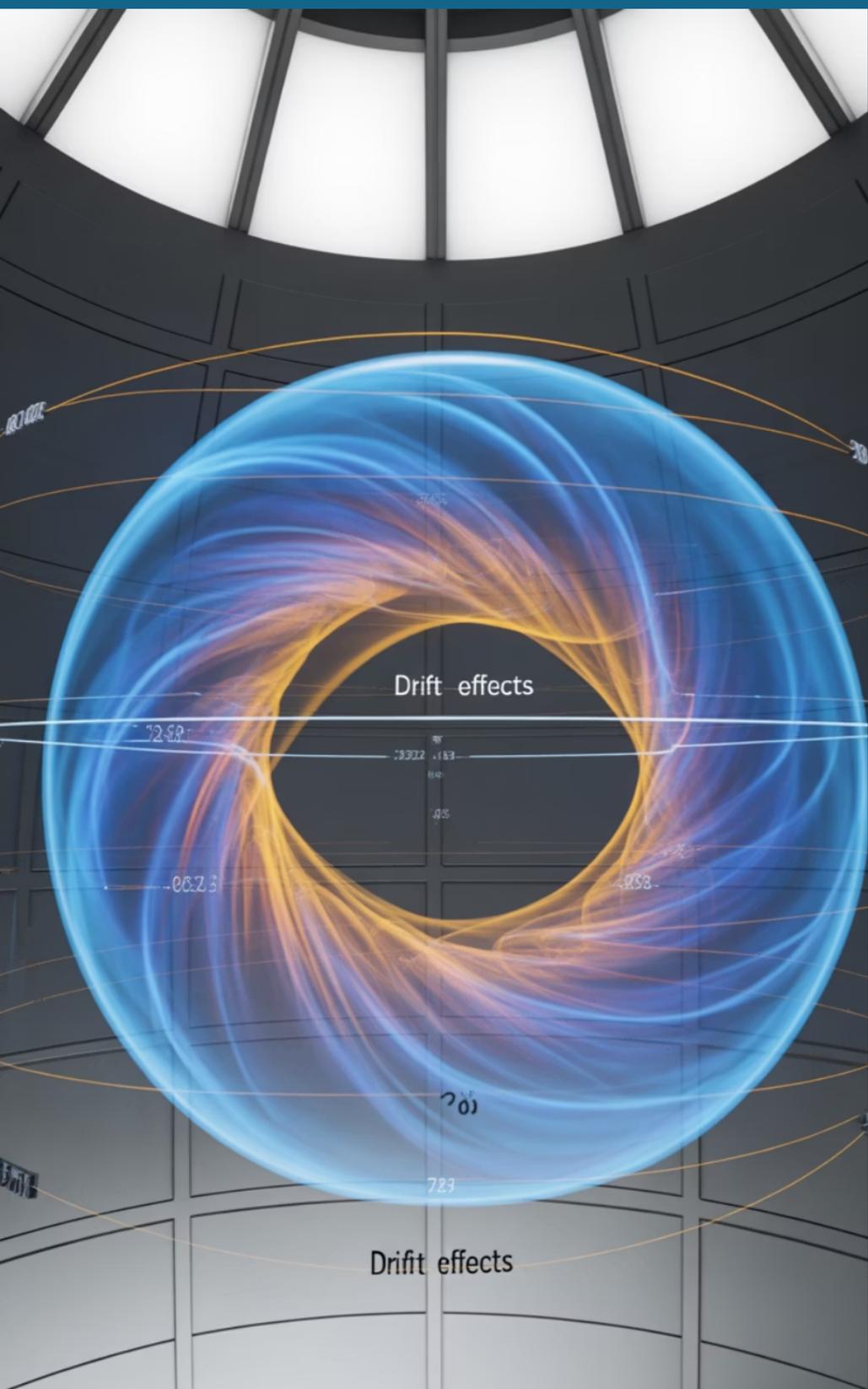
Íons com diferentes energias em um gradiente de temperatura experimentam efeitos ligeiramente diferentes devido a drifts e colisões na geometria toroidal. Isso pode gerar um fluxo líquido de momento toroidal proporcional ao gradiente de temperatura.

Limitações do Modelo

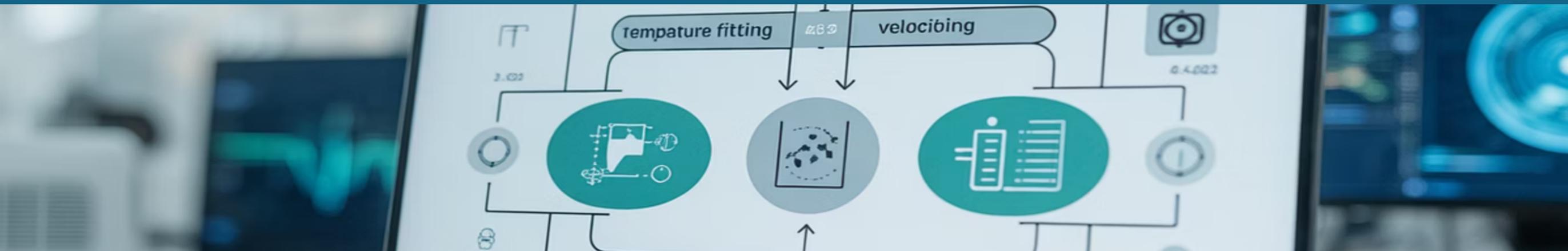
O modelo de Helander foca em um mecanismo específico. A rotação intrínseca é multifacetada, com outros mecanismos importantes como estresse de Reynolds turbulento, efeitos de ondas de RF, perda de órbita de íons e efeitos neoclássicos mais complexos.

Aplicabilidade

A importância relativa dos diferentes mecanismos varia com as condições do plasma. O modelo pode ser mais ou menos adequado dependendo do regime de operação do tokamak.



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB



Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Do Ajuste de Temperatura à Previsão de Velocidade



Ajuste da Temperatura

Aplicação da função canônica aos dados experimentais de temperatura iônica.



Cálculo do Gradiente

Derivação analítica da função ajustada para obter dT_i/dr .



Aplicação do Modelo

Inserção dos perfis de dT_i/dr , $B_{pol}(r)$ e ϵ na fórmula de Helander.



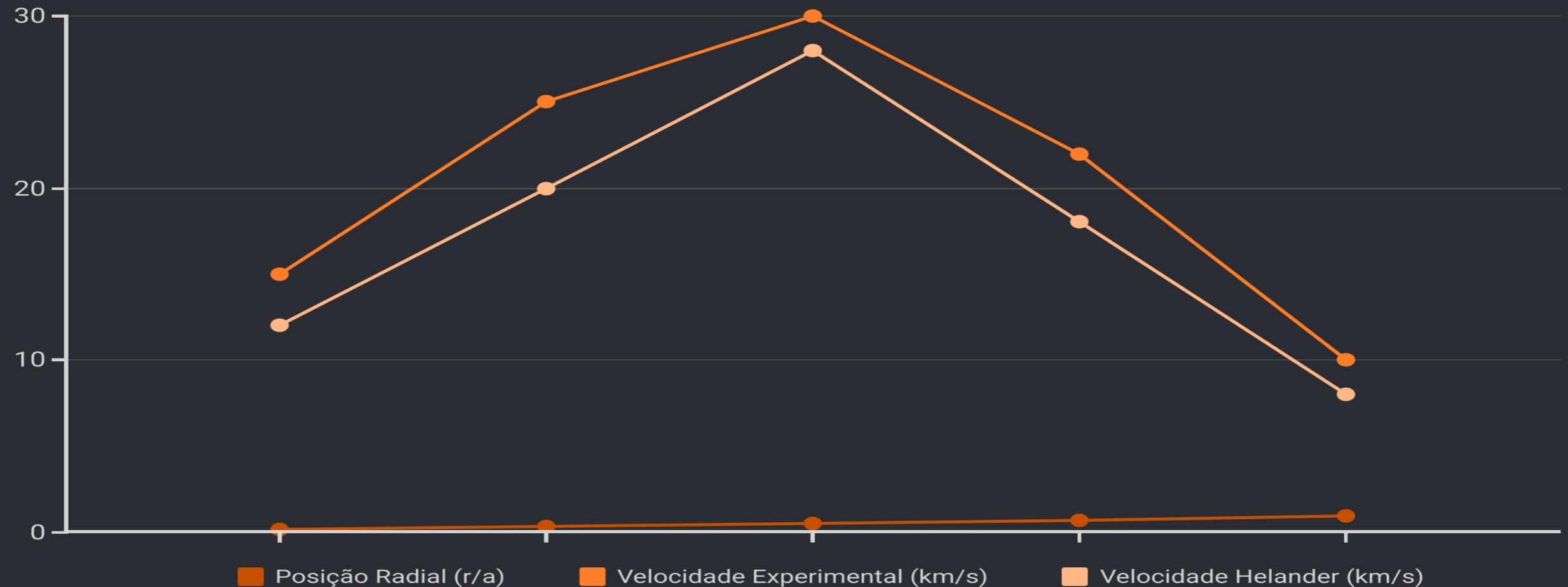
Comparação com Experimento

Confronto entre a velocidade prevista e os dados experimentais.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Comparação Teoria vs. Experimento



A comparação entre a velocidade prevista pelo modelo de Helander e os dados experimentais de velocidade é o cerne da investigação. Avaliamos esta comparação tanto visualmente, através de gráficos, quanto quantitativamente, calculando métricas como o R^2 para Helander e a razão de aderência.

O R^2 para Helander quantifica a fração da variabilidade nos dados de velocidade explicada pela previsão derivada dos dados de temperatura. A razão de aderência mede a porcentagem de pontos na curva de Helander que caem dentro do intervalo de confiança de 95% do ajuste polinomial empírico.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Interpretação das Discrepâncias



Mecanismos Alternativos

Se o R^2 for baixo e/ou a razão de aderência for baixa, sugere que outros mecanismos físicos além do gradiente de temperatura podem ser mais importantes para a rotação toroidal observada.



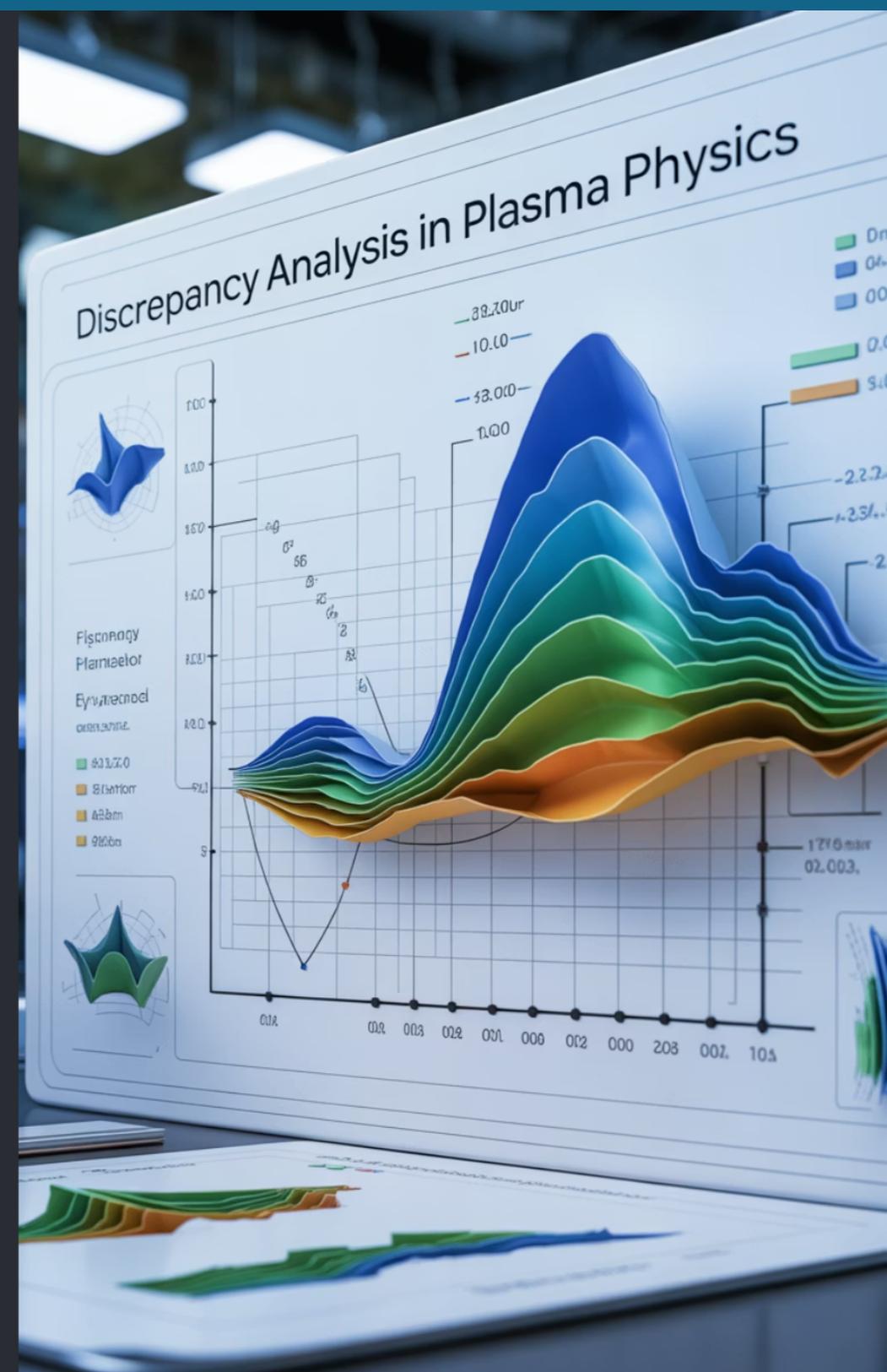
Condições Específicas

As condições específicas do TCABR podem não se enquadrar perfeitamente nas suposições do modelo simplificado de Helander.



Imprecisões nas Medições

Discrepâncias podem ser devido a imprecisões nas medições de temperatura ou no ajuste que se propagaram através do cálculo do gradiente e da aplicação do modelo.



MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Análise de Sensibilidade via Monte Carlo



Perturbação dos Dados

O conjunto de dados de temperatura é perturbado aleatoriamente várias vezes (ex: 1000 iterações), adicionando ruído baseado nas barras de erro experimentais.



Re-ajuste e Recálculo

Para cada conjunto perturbado, a função canônica é re-ajustada, e o perfil de velocidade de Helander correspondente é recalculado.



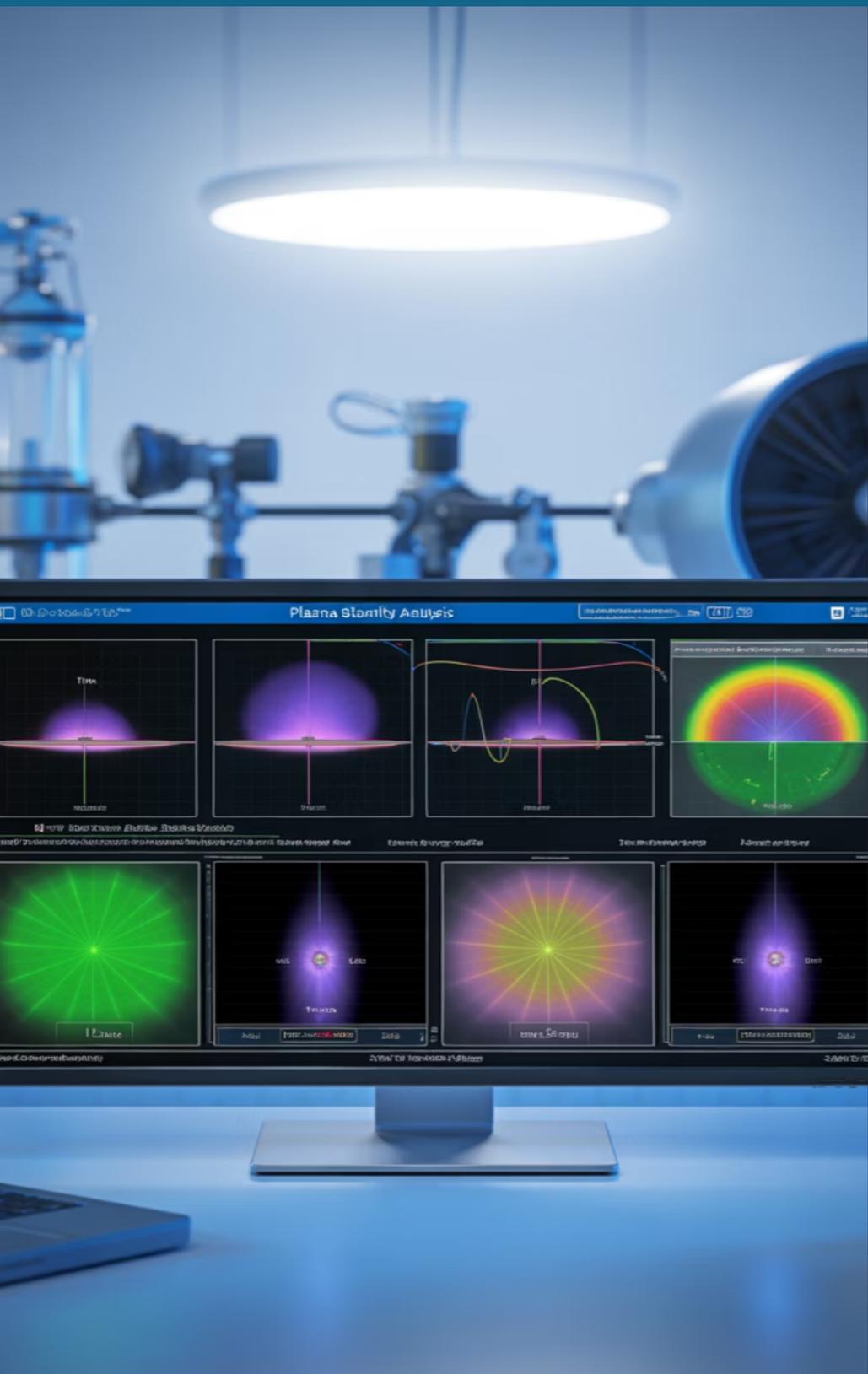
Otimização

A simulação busca a realização que produz um perfil de velocidade de Helander mais próximo possível do perfil de velocidade empírico.

4

Análise de Resultados

Comparação dos parâmetros iniciais com os "otimizados" para avaliar a sensibilidade do modelo às incertezas experimentais.



Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Interpretação da Análise de Monte Carlo

Plausibilidade

O Monte Carlo testa se é plausível obter uma melhor concordância entre o modelo de Helander e os dados de velocidade simplesmente devido ao ruído experimental nos dados de temperatura.

Se a concordância for ruim mesmo após essa "otimização", reforça que o modelo pode ser inadequado ou incompleto para as condições específicas do experimento.

Sensibilidade

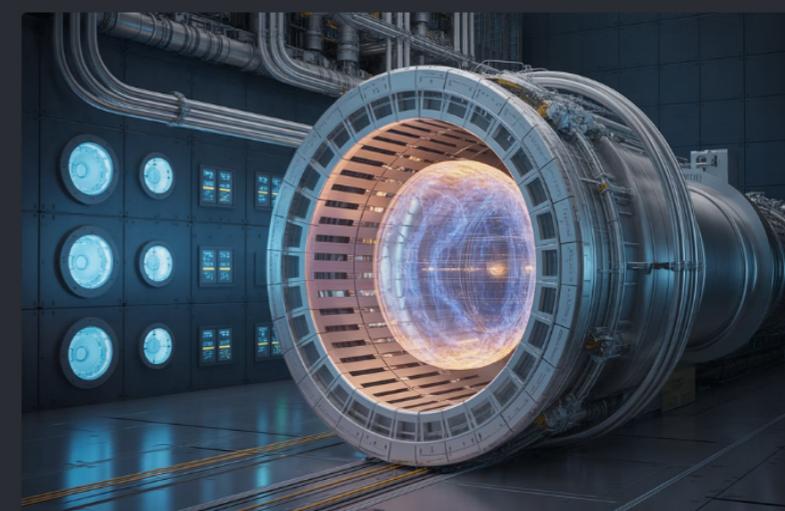
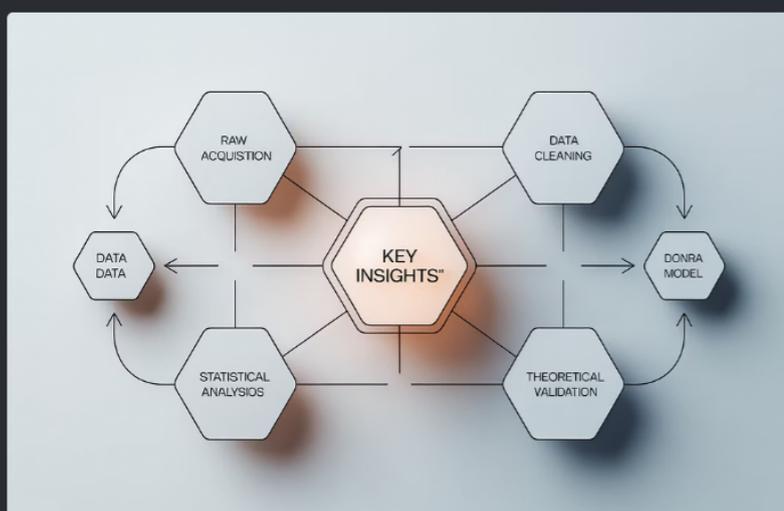
Comparar os parâmetros iniciais de temperatura com os parâmetros "otimizados" pelo Monte Carlo revela quão sensível é o ajuste da temperatura a pequenas perturbações nos dados.

Da mesma forma, comparar os perfis de velocidade inicial e otimizado mostra a sensibilidade da previsão de Helander às incertezas na entrada (temperatura). Uma alta sensibilidade torna a previsão menos robusta.

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE PERFIS DE PLASMAS EM MATLAB

Modelagem e Validação de Perfis de Plasmas

Conclusão Geral do Experimento



Fluxo de Trabalho Científico

O exercício demonstra um fluxo de trabalho representativo da análise de dados científicos: dados brutos → ajuste de curvas → avaliação de qualidade → cálculo de quantidades derivadas → aplicação de modelo físico → comparação com dados → análise de sensibilidade.

Interação Teoria-Experimento

Ilustra a interação fundamental entre teoria, experimento e análise de dados na pesquisa científica. As conclusões sobre a aplicabilidade do modelo de Helander no TCABR devem ser baseadas nos resultados quantitativos obtidos.

Contribuição para o Conhecimento

Independentemente do grau de concordância, o processo é essencial para testar rigorosamente hipóteses e modelos, refinar teorias e construir uma compreensão completa dos fenômenos complexos de plasmas de fusão.