

Simulação do Controlo Magnético do Tokamak: Aplicações para o JT-60SA e Operação do ISTTOK

Nome: Lilia Doménica Corona Rivera

Doutoramento em Engenharia Física Tecnológica

Orientador: Doutor Horácio João Matos Fernandes

Co-orientadores: Doutor Nuno Sérgio Castelo Branco da Cruz e Doutor Alfredo Pironti

Resumo

O controlo magnético de plasmas de fusão é uma das principais tarefas a ser desenvolvida em dispositivos de confinamento magnético como os tokamaks. O controlo magnético é uma ferramenta que permite controlar a posição e a forma do plasma nos tokamaks, seja para conduzir a posição do plasma a uma referência pré-estabelecida ou para rejeitar perturbações que possam ocorrer e manter a forma do plasma num determinado equilíbrio. Estes objectivos são alcançados variando-se as correntes impostas às bobines de campo poloidal (PF coils em inglês) 2 em função da monitorização de vários diagnósticos, os quais permitem a reconstrução da corrente do plasma, da posição deste e da última superfície fechada de fluxo (LFCS em inglês) num sistema de aquisição de dados em tempo-real e de controlo em laço fechado.

Nesta tese é apresentada uma descrição completa dos sistemas de controlo e alguns dos principais conceitos da engenharia de controlo usados nos tokamaks, assim como as melhorias e atualizações realizadas para dois tokamaks: o JT-60SA (Japão) e o ISTTOK (Portugal). Estes dois dispositivos dependem do controlo ativo das bobines de campo poloidal para controlar a forma e posição do plasma. O JT60-SA é um tokamak supercondutor que ainda se encontra em construção e será o maior tokamak existente no mundo ao iniciar a operação em finais de 2020. O ISTTOK é um pequeno tokamak de elevada razão de aspecto que tem estado em operação desde há cerca de 30 anos e é caracterizado pela sua operação em modo de corrente alternada (AC) e pela sua flexibilidade em geral.

Em conjunto com a apresentação dos resultados de controlo atingidos para os dois dispositivos nesta tese, um dos principais objectivos é também que o trabalho de simulação feito para o JT60-SA possa ser confirmado experimentalmente no ISTTOK.

O trabalho desenvolvido para o JT60-SA nesta tese consiste numa série de simulações usando dois controladores diferentes para a forma do plasma e métodos para obter a última superfície fechada de fluxo na presença de distintas perturbações e de uma mudança na referência da forma do plasma assim como a comparativa dos resultados obtidos destes dois controladores e das medidas de fluxo da última superfície fechada de fluxo. A implementação deste controladores é possível por meio dum equilíbrio

teórico dado na forma dum modelo linear em espaço de estados do comportamento magnético do tokamak.

O trabalho feito para o JT60-SA nesta tese consiste numa série de simulações usando dois controladores diferentes para a forma do plasma e métodos para obter a última superfície fechada de fluxo na presença de distintas perturbações e mudando a referência da forma do plasma em conjunto como a comparativa dos resultados obtidos através destes dois controladores e das medidas de fluxo da última superfície fechada de fluxo. As melhorias destes dois controladores foram atingidas usando modelos lineares do plasma e das bobinas de campo poloidal.

A implementação deste controladores é possível por meio dum equilíbrio teórico dado na forma dum modelo linear em espaço de estados do comportamento magnético do tokamak.

O trabalho desenvolvido no ISTTOK consistiu na aplicação de diferentes conceitos físicos e ferramentas computacionais para obter um novo controlador ótimo e uma reconstrução do centróide da corrente do plasma em tempo real. O recentemente atualizado hardware faz integração numérica dos sinais das sondas magnéticas, as quais são adquiridas em tempo-real, constituindo este fato uma peça chave no desenvolvimento desta parte da tese.

Cada um dos tokamaks é abordado para diferentes objectivos e sob uma luz diferente nesta tese. O trabalho feito para o JT60-SA compara as ferramentas magnéticas de modelização CREATE com as ferramentas oficiais QST, o que abre a possibilidade de se considerar as ferramentas CREATE como uma reserva para otimizar o controlo na operação do JT60-SA. O trabalho desenvolvido no ISTTOK demonstra que o uso da estrutura informática MARTe e da arquitetura de hardware ATCA, em conjunto com a implementação do novo hardware para integração numérica, proporciona um conjunto de ferramentas adequadas para desenvolver controladores e reconstruir a posição do centróide da corrente do plasma em tempo-real.

Palavras-chave: Controlo em tempo real, corrente do plasma, posição do centróide da corrente do plasma, controlo da forma do plasma, sonda magnética, bobina de campo poloidal(PF coil), última superfície fechada de fluxo(LCFS), integração numérica.

Tokamak Magnetic Control Simulation: Applications for JT-60SA and ISTTOK Operation

Abstract

Magnetic control for fusion plasmas is one of the main engineering tasks to be solved in magnetically confined devices like tokamaks. Magnetic control is the tool that allows to control the plasma position and shape in a tokamak, whether for steering the plasma position to a given set point or rejecting disturbances which may occur and maintain the plasma shape in a certain equilibrium. Such goals are achieved by varying the currents that are driven on the Poloidal Field (PF)¹ coils while monitoring several diagnostics that allow the reconstruction of the plasma current, position and its last closed flux surface (LCFS) in a real-time feedback acquisition and control system.

This thesis presents a comprehensive overview of control systems and some of the main control engineering concepts used in tokamaks along with the assessments and upgrades performed for two tokamaks: JT-60SA (Japan) and ISTTOK (Portugal). These two devices rely in the active control of the PF coils to control the plasma shape and position. JT-60SA is an under construction superconductive tokamak that will become the largest one built so far and will start operating in late 2020. ISTTOK is a large aspect ratio tokamak operating for 30 years and it is characterized by its AC operation mode and flexibility.

Along with presenting the achieved control assessments for both devices in this thesis, one of the main objectives is also that the simulation work done for JT-60SA can be confirmed in an experimental sense in ISTTOK.

The JT-60SA work done in this thesis consists in a series of simulations testing two different shape controllers and approaches for obtaining the LCFS in the presence of several disturbances and a change of the reference plasma shape, along with the comparison of results obtained from both controllers and the flux data from the LCFS. The assessment of these two controllers has been carried out by using control-oriented linear models of the plasma and the surrounding coils.

The work developed in ISTTOK consisted in the application of several physics concepts and computational tools in order to have a novel optimal controller and a plasma centroid position reconstruction implemented on real-time. Recently upgraded hardware numerically integrates the magnetic probes signals which are acquired on real-time, being this fact a key point for the development of this part of the thesis .

¹ Sometimes the name PF coils is used to refer to both the equilibrium field coils and the ohmic heating coils for generating plasma current.

Each tokamak is addressed for different aims and under a different scope in this work. The JT-60SA work benchmarks the CREATE magnetic modeling tools against the official QST tools, which opens up the possibility of considering the CREATE tools as a possible backup to support the optimization of the controller for JT-60SA operation. ISTTOK work demonstrates that the used MARTe framework and ATCA hardware architecture, along with the new numerically integration hardware implementation, provide a set of adequate tools for developing the ISTTOK tokamak real-time control and plasma centroid position reconstruction.

Keywords:Real-time control, plasma current, plasma current centroid position, shape control, magnetic probe, PF coil, last closed flux surface(LCFS), numerical integration.

Simulação do Controlo Magnético do Tokamak: Aplicações para o JT-60SA e Operação do ISTTOK

Resumo alargado em Português

O controlo magnético para plasmas de fusão nuclear é um dos principais problemas a ser desenvolvidos em dispositivos de confinamento magnético como os tokamaks. Um dos principais objetivos de usar controlo magnético em tokamaks é controlar a posição e a forma do plasma, seja para levar a posição do plasma a uma dada referência ou para rejeitar as perturbações que possam chegar o ocorrer e manter a forma do plasma num determinado equilíbrio pré-definido. Isto é possível variando as correntes e tensões das bobines de campo poloidal (PF coils em inglês), através de processamento dos sinais gerados pelas sondas magnéticas ou bobinas de Mirnov com o fim de reconstruir a posição do centroide de corrente do plasma ou a última superfície fechada de campo magnético (LCFS em inglês).

Esta tese apresenta uma descrição geral dos sistemas de controlo e os principais conceitos da engenharia de controlo usados nos tokamaks assim como as avaliações e melhorias realizadas para dois tokamaks: o JT60-SA (Japão) e o ISTTOK (Portugal). Estes dois dispositivos dependem do controlo ativo das bobines de campo poloidal para controlar a forma e posição do plasma. O JT60-SA é um tokamak supercondutor que ainda se encontra em construção e será o maior tokamak existente no mundo que iniciará operações no fim de 2020. O ISTTOK é um tokamak com uma razão de aspecto grande que tem estado em operação por mais de 30 anos e é característico pela sua operação em modo de corrente alternada (AC) e a sua flexibilidade em geral.

O capítulo introdutório da tese permite ao leitor compreender porque é precisa uma forma toroidal para confinar magneticamente o plasma, o papel dos campos magnéticos na interação com o plasma, a forma em que é gerada a corrente do plasma, as razões pelas quais um tokamak precisa de ter bobines de campo poloidal e por que é que estas precisam de ter controlo ativo com o fim de estabilizar o plasma. Explicam-se ainda as forças experimentadas por uma partícula carregada na presença dum campo toroidal até chegar às expressões do balanço de forças toroidais. Finalmente este capítulo expõe numa maneira simples como funciona o controlo em tokamaks e como é que se foi desenvolvendo ao longo do tempo e apresenta ao leitor como é que está conformada a tese capítulo por capítulo.

No capítulo 2 os sistemas de controlo para plasmas são vastamente descritos, dando destaque ao framework MARTe, o qual será amplamente usado e referido nos seguintes capítulos, assim como os códigos de equilíbrio usados em alguns tokamaks com o fim de reconstruir parâmetros do plasma usados para atingir o controlo da posição, forma e corrente do plasma. A parte final deste capítulo está centrada nos conceitos básicos dos sistemas lineares e invariantes no tempo assim como o desenho de

sistemas de controlo, os quais são amplamente usados nos capítulos a seguir, como por exemplo os sistemas em espaço de estados, controladores PID e filtros de Kalman.

No início de capítulo 3 o JT60-SA é descrito assim como o cenário sobre o qual se baseiam as simulações realizadas, tal como os seus valores de equilíbrio. De seguida descrevem-se as ferramentas de modelização do plasma CREATE e como estas estabelecem um sistema em espaço de estados para descrever o plasma ao redor de certo equilíbrio. Posteriormente aborda-se o desenho dos controladores da forma e corrente do plasma com dois enfoques diferentes: usando descritores de posição chamados gaps (do inglês para espaçamento) ou superfícies de fluxo magnético. Nas simulações deste capítulo usam-se dois controladores diferentes: o controlador desenvolvido pela equipa do QST (Japan National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology) e o eXtreme Shape Controller (XSC) aplicado ao JT-60SA no âmbito do trabalho desta tese, onde o JT60-SA é simulado através do modelo CREATE que reconstrói o equilíbrio do cenário. Neste capítulo é também apresentada a validação realizada ao método utilizado pelo QST para reconstruir a última superfície fechada de campo magnético, utilizando um código chamado CCS pelo seu nome em inglês Cauchy Condition Surface. A comparação entre estes dois controladores e dos fluxos magnéticos obtidos usando o modelo CREATE e o código CCS para reconstruir a forma do plasma é realizada na presença de diferentes perturbações tais como os ELMs e com uma selecção de número de pontos a controlar distinta para cada caso. Cada um dos controladores parece ter a suas próprias vantagens e desvantagens. Com o fim de testar a flexibilidade do controlador XSC uma simulação adicional foi realizada, que consiste em mudar a referência da forma do plasma na parte superior do tokamak durante a simulação com um tempo de transferência duma forma do plasma à outra de 1.5 segundos.

O capítulo 4 começa com uma exaustiva descrição do ISTTOK: breve história do tokamak, os diagnósticos, os atuadores e a geometria dele. Posteriormente aprofunda-se a descrição da corrente do plasma no ISTTOK e as transições que ela tem entre corrente positiva e negativa, sem perder a ionização do plasma quando a corrente é praticamente zero, atingindo assim uma descarga muito mais comprida com corrente de plasma AC. A seguir são descritas as novas implementações de hardware feitas pela equipa do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) as quais consistem na adição de integradores numéricos, os quais permitem integrar os sinais provenientes das sondas magnéticas em tempo-real antes destes serem digitalizados e processados no framework MARTE. Esta implementação é fundamental para reconstruir em tempo real a posição do centroide da corrente de plasma. Depois de condicionar o sinal com o fim de remover offsets foi implementado através de uma modelização experimental um algoritmo para subtrair das medidas integradas das sondas magnéticas a contribuição da corrente de plasma. Desta forma é possível dividir dos sinais medidos a contribuição magnética do plasma daquela que é gerada pelas bobinas de campo poloidal. Posteriormente é usado um modelo de multi-filamentos para modelar o plasma a partir dos sinais limpos das sondas com o fim de obter a posição do centroide da corrente do plasma em tempo real. Os modelos baseados em

multi-filamentos para descrever o plasma têm sido amplamente usados e estudados ao longo do tempo. Finalmente é feita uma comparação da forma como com a nova implementação da reconstrução da posição do centroide do plasma é possível ter transições bem-sucedidas entre plasma negativo e positivo.

Finalmente no capítulo 5 os resultados obtidos das novas implementações de controlo em tempo real são mostradas e analisadas. Começa-se por descrever rapidamente como é que a implementação de algoritmos de controlo interactiva com o framework MARTe assim como explicar como o ciclo de controlo é fechado desde que os sinais das sondas magnéticas são adquiridos até que os sinais de controlo em corrente são injetados nas fontes de tensão das bobinas de campo poloidal. Dadas as características reais geométricas e de construção do ISTTOK existem atualmente poucas possibilidades de ter um modelo linear e teórico a relacionar a posição do centroide com as correntes nas bobinas de campo poloidal. Este facto além de ser um impedimento para desenvolver um controlador Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) foi um incentivo para procurar outras alternativas. No ISTTOK optou-se por fazer uso das ferramentas computacionais atuais e usar um modelo MIMO reconstruído a partir de dados experimentais. A partir deste modelo foi possível programar no framework MARTe um controlador ótimo em conjunto com uma série de controladores PID, os quais foram sintonizados empiricamente. No fim deste capítulo uma série de descargas de plasma no ISTTOK são comparadas. Nelas compara-se o desempenho dos controladores PIDs e do controlo ótimo MIMO em termos da posição do centroide do plasma e da quantidade de corrente requerida pelas fontes de poder das bobinas de campo poloidal.

Juntamente com as melhorias de controlo atingidas para os dois tokamaks, nesta tese, um dos principais objetivos é que as simulações feitas para o JT60-SA possam ser verificadas num sentido experimental no ISTTOK.