**Sumário**

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, bem seja pra 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 certo equilíbrio dado. Isto é possível variando as correntes e voltagens das bobinas de campo poloidal (PF coils em inglês) e também a través de procesamiento 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 engenheria 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 bobinas de campo poloidal para controlar a forma e posição do plasma. O JT60-SA é um tokamak supercondutor que ainda encontra-se em construção e será p maior tokamak que exista no mundo e 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 alterna (AC) e a sua flexibilidade em geral.

O capítulo introdutório da tese leva ao leitor a compreender porque é precisa uma forma toroidal para confinar magneticamente o plasma, o papel dos campos magnéticos na interacção com o plasma, a forma em que é gerada a corrente do plasma e a razões pelas quais um tokamak precisa de ter bobinas de campo poloidal e por que é que estas precisam de ter controlo ativo com o fim de estabilizar o plasma. Explicam-se as forças experimentadas por uma partícula carregada na presença dum campo toroidal até chegar às expressões do balance de forças toroidais. Finalmente este capítulo expõe duma maneira simples como funciona o controlo em tokamaks e como é que foi se 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, fazendo énfasis no 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 escenario para o qual as simulações feitas vão se basear com os seus respectivos valores de equilíbrio. Acto seguido descrevem se as ferramentas de re-construção magnética CREATE e como estas estabelecem um sistema em espaço de estados a 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 ou superfícies de fluxo magnético. Nas simulações deste capítulo usam-se dois controladores diferentes: o controlador desenvolvido pela equipa do QST e o eXtreme Shape Controller (XSC), igualmente, além das ferramentas CREATE que reconstroem o equilíbrio do escenario, é testado um método extra para reconstruir a última superfície fechada de campo magnético chamada CCS pelo seu nome em inglês Cauchy Condition Surface. A comparativa entre estes dois controladores e métodos para reconstruir a forma do plasma são comparados na presença de diferentes perturbações tais como como os ELMs e com uma selecção de número de pontos a controlar distinta entre 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 adicionada, ela 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: a história do tokamak, os diagnósticos, os atuadores e a geometria dele. Posteriormente aprofunda-se na 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 praticamente na adição de integradores numéricos os quais permitem integrar os sinais provenientes das sondas magnéticas em tempo-real antes destes ser adquiridos na base de dados de framework MARTe. Está implementação é fundamental para reconstruir em tempo real a posição do centróide 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 magnẽticas a contribuição nelas unicamente da corrente de plasma, isto é, é possível dividir dos sinais medidos a contribuição magnética do plasma de aquela 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 describir o plasma têm sido amplamente usados e estudados ao longo do tempo. Finalmente é feita uma comparativa de 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 interactua com o framework MARTe assim como explicar como o ciclo de control é fechado desde que os sinais das sondas magnéticas são adquiridos até que os sinais de control em corrente são injetados as fontes de poder 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 centróide com as correntes nas bobinas de campo poloidal, este fato 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 topo do 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 melhoras 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.