Il sistema di controllo magnetico per plasmi per la fusione nucleare è uno dei sistemi principali necessario per il funzionamento delle macchine tokamak sin dalle prime operazioni. In particolare, questo sistema ha l’obiettivo di controllare la posizione e la forma del plasma, in maniera robusta sia nei confronti delle incertezze di modello che nei confronti di disturbi esterni. Tale obiettivo è raggiunto da parte del sistema di controllo andando a regolare le correnti all’interno degli avvolgimenti di campo poloidale, sulla base delle misure provenienti delle sonde magnetiche, le quali vengono utilizzate per ricostruire i parametri di plasma d’interesse, come la posizione del centroide della corrente di plasma o la frontiera del plasma stesso. In macchine che operano con plasmi elongati, un sistema di controllo e di forma efficace è necessario non solo per migliorare le prestazioni, ma anche per stabilizzare verticalmente il plasma.

Questa tesi si occupa del sistema di controllo magnetico, ed in particolare del controllo di forma e posizione, per due diversi tokamak: la macchina giapponese JT60-SA e il reattore sperimentale portoghese ISTTOK. In particolare, JT60-SA è un tokamak superconduttore che è ancora in costruzione e, una volta completato, sarà il più grande tokamak esistente al mondo. E’ stato progettato per lavorare con plasmi elongati e l’inizio delle sue operazioni è previsto per la fine del 2020.

ISTTOK, invece, è un tokamak molto flessibile, che opera con plasmi circolari ed è caratterizzato da un grande rapporto R/a. ISTTOK è in funzione da più di 30 anni ed è tra le poche macchine ad operare in regime di corrente alternata.

Questo lavoro di tesi è così strutturato: il primo capitolo capitolo è un’introduzione alla fusione termonucleare a confinamento magnetico. In particolare verranno illustrata la necessità di utilizzare geometrie toroidali per confinare magneticamente il plasma, il ruolo dei campi magnetici nell'interazione con il plasma, il modo in cui viene generata la corrente del plasma, i motivi per i quali un tokamak deve avere bobine di campo poloidale e la necessità di un controllo attivo per stabilizzare il plasma.

Il capitolo 2 è dedicato ad alcuni aspetti tecnologici e metodologici relativi al controllo dei plasmi in macchine da fusione. In particolare viene descritto il framework software MARTe che rappresenta uno dei possibili strumenti software per l’implementazione di sistemi di controllo real-time in macchine da fusione. MARTe è lo strumento adottato nell’ambito di questa tesi per implementare la soluzione di controllo proposta per il tokamak ISTTOK. Questo capitolo presenta anche i codici di equilibrio che verranno utilizzati per generare dei modelli semplificati (lineari) del comportamento del plasma, da utilizzare per la progettazione e la validazione di sistemi di controllo. La parte finale di questo capitolo si concentra proprio sulle tecniche di progetto model-based per sistemi di controllo. Com detto, tali tecniche si basano sulla disponibilità di modelli lineari e tempo invarianti (LTI) dell’impianto da controllare. In particolare verranno introdotti i concetti di base relativi all’analisi e al progetto di sistemi di controllo LTI rappresentati nello spazio di stato.

Il capitolo 3 è dedicato a JT-60SA. Nella parte iniziale, il capitolo presenta un’architettura del sistema di controllo magnetico per questo tokamak, il quale include vari algoritmi di controllo. Successivamente vengono presentate le tecniche di progettazione per due algoritmi multi-input-multi-output (MIMO) proposti per il controllo di forma: in particolare verrà presentato un approccio del tipo isoflusso adottato dall’ente giapponese QST, ed un altro basato sul controllo dei gap (distanze tra la frontiera del plasma e la prima parete) proposto in Europa. La disponibilità di controllori e di codici di validazione diversi ha permesso sia di validare l’approccio proposto da QST, che di avere soluzioni alternative da utilizzare come backup durante le prime operazioni del tokamak JT-60SA. Tutte le tecniche di controllo considerate per JT-60 sono basate su un approccio model-based, che sfrutta la disponibilità di un modella lineare della risposta del plasma per poter progettare i guadagni dell’algoritmo di controllo.

Il capitolo 4 descrive nel dettaglio il tokamak ISTTOK ed in particolare la politica adottata per gestire i cambi di segno della corrente di plasma quando il tokamak opera in modalità AC. Infatti, durante tale modalità di funzionamento, il tokamak ISTTOK permane in un regime di gas ionizzato anche quando la corrente è praticamente nulla consentendo, in questa modalità operativa, di avere scariche molto più lunghe. In questo capitolo vengono anche descritti delle nuove schede hardware di acquisizione che sono state installate, le quali includono una nuova tipologica di integratori numerici per l'integrazione in hardware dei segnali provenienti dalle sonde magnetiche, prima che questi segnali vengano digitalizzati. Questo nuovo sistema consente di migliorare la ricostruzione in real-time della posizione del centroide della corrente do plasma, andando a separare l’effetto del plasma da quello dei coil esterni, sulla misura. In particolare, per poter effettuare questa compensazione è stato utilizzato un modello multi-filamento per descrivere il comportamento del plasma. Le nuove stime della posizione del centroide sono state poi utilizzate per migliorare le prestazioni del sistema di controllo. Come illustrato nel Capitolo 5.

Infatti, nel capitolo 5 vengono mostrati e analizzati i risultati ottenuti a valle di una nuova progettazione dei controllori di posizione di ISTTOK. In questo capitolo vengono anche illustrati i passi necessari per implementare le logiche di controllo mediante il framework MARTe. Differentemente da quanto proposto per JT-60SA per il quale sono stati utilizzati approcci model-based per la progettazione dei controllori, nel caso di ISTTOK, dato il regime di funzionamento fortemente non lineare (modalità AC) e l’effetto non trascurabile di svariate fonti di incertezza nella modellazione, si è preferito identificare un insieme di modelli (nei diversi regimi di funzionamento) a partire dai dati sperimentali. A partire da questi modelli è stato possibile progettare diverse soluzioni di controllo che sono state poi testate sperimentalmente. L’analisi dei risultati ottenuti viene discussa nella parte finale del capitolo 5.