

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. PROLEGÔMENOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência, considerando seu desempenho a pequenas perturbações, é um aspecto operativo fundamental. Técnicas de modelagem e controle de sistemas de potência são discutidas em (Kundur e Wang, 2002), (Gibbard et al., 2001), (Kundur, 2004), (IEEE PES, 1994) e (CIGRE, 2000). A importância dos estudos utilizando modelos de pequenas perturbações e a necessidade de ferramentas de controle inovadoras são destacadas em (Kundur e Wang, 2002).

A estabilização de sistemas de potência é um tema tratado há muitas décadas; duas referências que reúnem as principais técnicas utilizadas em modelagem, estabilização e controle de sistemas de potência são (Kundur, 1994) e (Anderson e Fouad, 1994). Estabilidade de um sistema de potência pode ser entendida como a propriedade deste sistema em se manter num estado de equilíbrio operativo após sofrer alguma espécie de distúrbio ou perturbação (Kundur, 1994). Como os geradores são máquinas síncronas, uma condição necessária para a operação satisfatória do sistema é preservar o sincronismo, que é influenciado pelo comportamento dinâmico dos ângulos dos rotores dos geradores, além das relações entre potência e ângulo (Kundur, 1994).

A estabilidade do ângulo do rotor é a capacidade de máquinas síncronas interconectadas permanecerem em sincronismo. O problema de estabilidade envolve o estudo das oscilações eletromecânicas no sistema de potência. Um aspecto fundamental deste problema é o modo como as potências geradas pelas máquinas síncronas são afetadas pelas oscilações dos seus rotores (Kundur, 1994).

O processo através do qual várias máquinas síncronas interconectadas mantêm sincronismo entre si pode ser entendido como uma seqüência de forças de restauração, que atuam onde houver tendências à aceleração ou desaceleração de uma ou mais máquinas em relação às

outras máquinas. Em condições estacionárias, há equilíbrio entre o torque mecânico de entrada e o torque elétrico de saída de cada máquina e, dessa forma, a velocidade angular do rotor da máquina mantém-se constante. Se o sistema sofre uma perturbação, o equilíbrio é perdido, e o(s) rotor(es) de uma ou mais máquinas sofre aceleração ou desaceleração. Acima de um certo limite, contudo, um aumento na separação angular entre geradores é acompanhado de uma diminuição na transferência de potência; isso aumenta ainda mais a separação angular e leva à instabilidade. A estabilidade do sistema depende do surgimento de torques de restauração como resultado de desvios nas posições angulares dos rotores das máquinas (Kundur, 1994).

A perda de sincronismo pode ocorrer entre uma máquina e o restante do sistema ou entre grupos de máquinas. No último caso, o sincronismo pode ser mantido dentro de cada grupo de máquinas após sua separação do restante do sistema (Kundur, 1994).

Nos sistemas de potência, as modificações do torque elétrico de uma máquina síncrona, após a ocorrência de uma perturbação, podem ser decompostas em duas componentes: uma delas está em fase com a perturbação no ângulo do rotor, sendo denominada torque sincronizante; a outra componente está em fase com o desvio de velocidade, sendo denominada torque de amortecimento. A estabilidade do sistema dependerá da existência das duas componentes do torque para cada máquina síncrona. A ausência de torque sincronizante resulta em instabilidade advinda de um viés aperiódico no ângulo do rotor. Por outro lado, a ausência de torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória. Em geral, classifica-se o fenômeno da estabilidade do ângulo do rotor em duas categorias: a estabilidade a pequenas perturbações e a estabilidade transitória (Kundur, 1994). Iremos estudar apenas a primeira categoria, à qual nosso trabalho está diretamente relacionado.

Uma característica importante dos sistemas de potência é a sua resposta a perturbações, que podem ocorrer na forma de variações de cargas em algumas barras, saídas de linhas de transmissão, ou ainda combinações de eventos sucessivos. Na ocorrência de perturbações desse tipo, o sistema robusto mantém-se estável e ainda apresenta um amortecimento satisfatório de seus modos em malha fechada. Em geral, sistemas de potência multimáquinas sem Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP's) devidamente ajustados não são robustos, devido aos ganhos dos reguladores de tensão, podendo inclusive perder a estabilidade no caso de ocorrer uma pequena perturbação. Assim, um dos principais objetivos da inclusão de ESP's

em sistemas de potência é fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas que ocorrem na presença de perturbações externas. O projeto de ESP's que garantam a estabilidade e o desempenho satisfatório de sistemas elétricos de potência em um ou mais pontos de operação já é feito atualmente, com algumas limitações. Contudo, o projeto de ESP's de estrutura fixa que garantam a estabilidade e o desempenho do sistema em vários pontos de operação através das Desigualdades Matriciais Lineares ainda é um tema a ser explorado, não havendo uma solução consagrada para o problema. Alguns resultados, embora promissores, utilizam controladores robustos com ordem idêntica à do sistema de potência (Ramos, Martins e Bretas, 2005), o que constitui uma restrição à implementação prática desses controladores, já que os ESP's de estrutura fixa são as ferramentas utilizadas atualmente para controle e estabilização dos sistemas de potência.

A estabilidade a pequenas perturbações é a capacidade do sistema de potência de manter o sincronismo quando submetido a pequenas perturbações. Essas perturbações ocorrem com frequência no sistema, devido a pequenas variações nas cargas e na geração. As perturbações são consideradas suficientemente pequenas para que as equações dinâmicas que descrevem o sistema possam ser linearizadas em torno de um certo ponto de operação. A instabilidade pode ocorrer de duas formas: aumento no ângulo do rotor devido à ausência de torque sincronizante suficiente, ou oscilações de amplitude crescente no rotor devido à ausência de torque de amortecimento suficiente. A natureza da resposta do sistema a pequenas perturbações depende de alguns fatores, tais quais as condições iniciais e o tipo de controle de excitação utilizado nos geradores. Nos sistemas de potência modernos, a estabilidade a pequenas perturbações é um problema relacionado à ausência de amortecimento suficiente para as oscilações eletromecânicas. É importante assegurar a estabilidade dos seguintes tipos de oscilação (Kundur, 1994):

- Modos Locais – estão associados às oscilações de uma ou mais máquinas de uma estação geradora com relação ao restante do sistema de potência. O termo local é utilizado porque as oscilações estão localizadas numa estação (ou seja, numa pequena parte) do sistema;
- Modos Interárea – estão associados às oscilações de muitas máquinas em uma parte do sistema contra máquinas em outras partes. Eles são ocasionados por dois ou mais grupos de máquinas acopladas interconectados por ligações fracas;

- Modos de Controle – estão associados às unidades geradoras e outros controles. Dispositivos HVDC (*High Voltage Direct Current*) e SVC (*Static Var Compensators*, ou Compensadores Estáticos de Reativos) são as causas mais comuns da instabilidade desses modos;
- Modos Torsionais – estão associados aos componentes rotacionais do sistema turbina – gerador. A instabilidade desses modos pode ser causada por interações com controles de excitação, dispositivos HVDC e linhas equipadas com capacitor série.

A função básica dos ESP's é aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas do rotor através do controle da excitação do gerador. Esse controle é realizado por meio de um sinal estabilizante auxiliar. Para gerar amortecimento, o ESP deve produzir um componente do torque elétrico em fase com os desvios de velocidade do rotor. Em geral, o ESP contribui com o amortecimento das oscilações numa faixa de frequências definida (esta faixa vai de 0.1 Hz a 2 Hz) (Kundur, 1994). Para que um ESP seja devidamente projetado e ajustado, deve-se elaborar um modelo matemático do sistema de potência.

A elaboração de modelos matemáticos de sistemas elétricos de potência deve considerar a representação dos seguintes componentes:

- Máquinas síncronas e sistemas de excitação associados a elas;
- Linhas de Transmissão;
- Cargas estáticas e dinâmicas;
- Outros dispositivos como HVDC's e SVC's.

O modelo matemático do sistema de potência consiste em um conjunto de equações diferenciais (que descrevem a dinâmica do sistema, como máquinas síncronas e sistemas de excitação) e algébricas (que descrevem as componentes estáticas do sistema, como as linhas de transmissão). Tendo sido elaborado o modelo matemático do sistema, pode-se aplicar técnicas de controle robusto para projetar ESP's.

O controle robusto de sistemas de potência utilizando modelos de pequenas perturbações é tema de muitas pesquisas realizadas durante os últimos anos. O Controle  $H_{\infty}$  é aplicado a um

sistema máquina contra o barramento infinito em (Taranto e Chow, 1995), enquanto que a síntese  $\mu$  foi utilizada para realizar estabilização e controle robustos de sistemas de potência em (Djukanovic, Khammash e Vittal, 1999). Técnicas como LQG / LTR (Linear Quadratic Gaussian / Loop Transfer Recovery) também já foram exploradas (Son e Park, 2000). Entretanto, a técnica mais versátil em termos de combinar diferentes requisitos é constituída pelas Desigualdades Matriciais Lineares – *Linear Matrix Inequalities* (LMI's). LMI's têm sido utilizadas em muitas aplicações de controle (veja (Boyd et al., 1994), por exemplo), e exemplos de aplicações de LMI's em sistemas de potência estão presentes em (Rao e Sen, 2000), (Werner, Korba e Yang, 2003), (Pal et al., 2000) e (Ramos, Martins e Bretas, 2005). Nesses artigos, contudo, o controlador gerado pelos algoritmos LMI tem ordem idêntica à do sistema de potência; a questão do ajuste dos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP's) com estrutura pré-definida, embora seja importante do ponto de vista prático, é tratada somente em (Scavoni et al., 2001).

Em (Majumder et al., 2005), é utilizada a técnica de controle robusto  $H_\infty$  conhecida como *loop shaping* (para mais detalhes desta técnica, ver (Skogestad e Postlethwaite, 2005)) conjuntamente com alocação de pólos para projetar controladores robustos num sistema de 16 máquinas. Para combinar as especificações no domínio da frequência com as especificações no domínio do tempo, são utilizadas as LMI's. Estratégia de controle semelhante é utilizada em (Majumder et al., 2006), mas neste artigo o controlador é validado através de simulações em tempo real.

A técnica  $H_\infty$  *loop shaping* aplicada através de LMI's também é realizada em (Pal, 2002), onde é utilizado ainda um dispositivo conhecido como UPFC (*unified power flow controller*) conectado ao sistema de potência. Assim, são obtidos controladores robustos para um sistema de potência de quatro máquinas. Outro artigo que utiliza LMI's para resolver problemas de controle robusto com requisitos  $H_\infty$  e de alocação de pólos é (Liu, Vittal e Elia, 2005). Neste caso, são obtidos controladores para um sistema de quatro máquinas, além de ser utilizado no sistema de potência um dispositivo conhecido como TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), que auxilia no amortecimento de oscilações eletromecânicas no sistema. Nesses artigos, são gerados controladores com a mesma ordem do modelo nominal do sistema.

Em (Xue, Zhang e Godfrey, 2006), é realizada a realocação de pólos do sistema de potência utilizando LMI's, sendo obtidos controladores robustos para aumentar o amortecimento do

sistema às oscilações eletromecânicas. Para linearizar o problema original, é utilizada uma parametrização semelhante àquela proposta em (de Oliveira, Geromel e Bernussou, 2000). A desvantagem dessa parametrização é que ela origina controladores da mesma ordem do sistema nominal. A técnica é aplicada a um sistema máquina contra o barramento infinito e um outro sistema composto de quatro máquinas, ambos com múltiplos pontos de operação.

Um artigo que descreve uma técnica para obtenção de controladores robustos de ordem reduzida é (Befekadu e Erlich, 2006). Utilizando LMI's e algumas parametrizações linearizantes, é proposto um problema de otimização  $H_\infty$  para originar controladores robustos descentralizados. A aplicação do método proposto para um sistema de quatro máquinas gera controladores que aumentam o amortecimento dos autovalores do sistema; contudo, isso nem sempre é garantido, devido ao fato de que no algoritmo de otimização não são utilizadas restrições de alocação de pólos, e desse modo somente a estabilidade é garantida.

Em (Okada, Watanabe e Yasuda, 2002), é proposto um método para projetar controladores robustos de estrutura pré-determinada. O problema de otimização desenvolvido é um problema BMI (*Bilinear Matrix Inequalities*), ou seja, de desigualdades matriciais bilineares. O problema BMI é então resolvido através de um algoritmo de aproximações sucessivas. Contudo, devido ao fato de não haver restrições de alocação de pólos no método proposto, o controlador garante apenas a estabilidade do sistema; não é garantido, assim, um amortecimento mínimo para os modos do sistema. A formulação de controle robusto proposta é baseada no controle  $H_\infty$ . O método desenvolvido é aplicado a um sistema simples.

Outro artigo que utiliza BMI's para obter controladores robustos é (Chen e Zhang, 2006). Neste trabalho, ESP's e controladores associados a HVDC's são obtidos através de uma abordagem baseada na síntese  $\mu$ , que é utilizada para inicializar os controladores descentralizados. O modelo do sistema é então transformado num problema BMI, que é resolvido através do método homotópico. O algoritmo de controle é aplicado a um sistema de quatro máquinas. Garante-se somente a estabilidade do sistema em malha fechada; não são usadas restrições de alocação de pólos e, portanto, não é garantido um amortecimento mínimo para o sistema.

Nos artigos (Chilali, Gahinet e Apkarian, 1999) e (Chilali e Gahinet, 1996), são apresentadas aplicações de LMI's à alocação de pólos em sistemas dinâmicos, mas os controladores

gerados têm ordem igual à do modelo do sistema dinâmico e, além disso, a formulação não permite que a estrutura do controlador seja definida pelo usuário. Em (Ramos, Martins e Bretas, 2005), a alocação robusta de pólos é feita conjuntamente com controle  $H_\infty$  através de LMI's, utilizando controladores com ordem igual à do modelo do sistema de potência. Isso apresenta a desvantagem de que, quando utilizamos modelos mais sofisticados de sistemas de potência, a ordem do controlador fica muito elevada, assim como ocorre com outras técnicas de controle robusto (síntese  $\mu$ ). Em (Scavoni et al., 2001), LMI's são aplicadas à estabilização de sistemas de potência, e o controlador gerado possui ordem pré-definida, além de ter seus pólos fixos (os resultados apresentados utilizam um sistema máquina contra o barramento infinito). O método de controle aplicado utiliza resultados de (Crusius e Trofino, 1999).

Por outro lado, estratégias de controle centralizado também têm sido exploradas em alguns trabalhos recentes. Utilizando PMU's (ou *Phasor Measurement Units*), é possível integrar informações vindas de diversos sistemas de potência dispersos geograficamente. Desse modo, pode-se estabelecer uma central de controle que integre informações vindas de vários geradores. Essa central recebe e processa as informações e, posteriormente, gera estratégias de controle centralizado para atingir um objetivo determinado (por exemplo, aumentar o amortecimento do sistema). Sistemas de controle centralizado já foram descritos, por exemplo, em (Decker et al., 2006). Nesses sistemas, o atraso de transmissão de informações por telemetria deve ser levado em consideração no projeto dos controladores, pois ele pode afetar o desempenho do sistema em malha fechada. Um estudo sobre como o atraso nos sistemas de transmissão de dados pode afetar o desempenho e a estabilidade do sistema de potência no projeto de controladores robustos é detalhado em (Wu, Ni e Heydt, 2002). Neste artigo, são utilizadas aproximações de Padé para representar os atrasos, e conclui-se que o atraso de tempo nas transmissões de informação pode degradar o desempenho do sistema de potência com controlador robusto centralizado, sendo utilizado nos testes um sistema de quatro máquinas. É proposto também um método para o projeto de controladores robustos centralizados através de LMI's considerando os atrasos na transmissão de informações.

Outro artigo que propõe um método para o projeto de controladores robustos centralizados considerando atrasos nas transmissões de dados no sistema é (Quanyuan, Zhenyu e Yijia, 2005). A técnica proposta utiliza LMI's para projetar os controladores estabilizantes. Os controladores obtidos são conhecidos como TCSC's (*Thyristor Controlled Series Compensator*), e é apresentada a aplicação do método proposto para o sistema New England.

(Okou, Dessaint e Akhrif, 2005) propõem um esquema de controle centralizado hierarquizado baseado na integração de duas camadas de controle: a primeira consiste em controladores descentralizados que utilizam apenas sinais locais, e a segunda é formada pelo controlador centralizado, que integra sinais remotos vindos de todas as unidades geradoras do sistema. O objetivo do controlador é assegurar a estabilidade robusta do sistema de potência, aumentando o amortecimento das suas oscilações eletromecânicas. O método é aplicado à estabilização de um sistema de grande porte.

Em (Chen et al., 2006), é proposto um outro método para o projeto de controladores robustos centralizados (o controle centralizado utiliza sinais locais e remotos para realimentação); contudo, neste método não são considerados os atrasos na transmissão de dados no sistema de potência para o projeto dos controladores, o que constitui uma limitação da técnica proposta. A abordagem utiliza LMI's para definir um problema de otimização  $H_2 / H_\infty$  com restrições de alocação de pólos, e o objetivo principal é aumentar o amortecimento do sistema. São apresentados testes para um sistema de quatro barras.

No artigo (Hu e Milanovic, 2007), desenvolve-se um método para obter um controlador supervisor cujo objetivo é aumentar o amortecimento do sistema de potência; este controlador recebe como entradas medições fornecidas por um sistema integrado de PMU's. O método para obtenção do controlador centralizado robusto agrupa restrições  $H_\infty$  e de alocação de pólos utilizando LMI's. O controlador é validado num sistema de quatro máquinas. O principal problema deste método é que ele gera controladores de ordem elevada, sendo necessário aplicar algoritmos de redução de ordem nos controladores ao fim do processo.

## **1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES**

O objetivo desta tese é criar um método que possibilite posicionar os autovalores de um sistema de potência em malha fechada numa região adequada do plano complexo através de LMI's, utilizando controladores descentralizados, dinâmicos e com estrutura pré-definida, de modo a melhorar o desempenho dinâmico (ou amortecimento das oscilações eletromecânicas) do sistema de potência. Simultaneamente, restringe-se a norma da matriz de ganhos estáticos do controlador, para que os parâmetros dos ESP's não sejam inviáveis na prática. Assim,



pode-se estabelecer um compromisso entre baixos ganhos e alto fator de amortecimento através da minimização da norma da matriz de ganhos estáticos do controlador para um valor desejado do fator de amortecimento. Os controladores gerados são robustos, ou seja, melhoram o desempenho do sistema de potência para um conjunto de pontos de operação, além de terem uma estrutura fixa. De acordo com o método proposto, pode-se alterar a estrutura do controlador, deixando-o com quantos pólos e zeros forem necessários para o problema em questão. Essa flexibilização da estrutura do controlador, combinada com as restrições de alocação de pólos, ainda não foi explorada em outros trabalhos. Posteriormente à implementação do controlador descentralizado e de estrutura fixa (cujo projeto é realizado através de duas novas técnicas), exploramos ainda o controle centralizado, com o objetivo de aumentar ainda mais o desempenho já alcançado através do controle descentralizado. Convém lembrar que o controle centralizado depende da transmissão eficiente de dados entre várias unidades geradoras, integrando as informações dentro do sistema de potência. O novo método proposto para o projeto de controladores centralizados, que considera os atrasos de transmissão de informação no sistema de potência, utiliza duas técnicas de modo integrado: em primeiro lugar, é aplicada a técnica descrita na primeira parte da tese para projeto de controladores descentralizados; na segunda etapa, é utilizada outra técnica para projetar controladores centralizados com atrasos de transmissão da informação. Assim, forma-se um controlador hierarquizado composto de duas camadas: a camada de controle descentralizado, que utiliza apenas informações locais, e a camada de controle centralizado, que utiliza informações remotas que chegam com atrasos. A consideração dos atrasos de transmissão da informação no projeto dos controladores centralizados constitui outra inovação no presente trabalho, sendo justificada pelo fato de que o uso de telemetria através de GPS e PMU's é passível de diferentes atrasos na chegada da informação em diversos pontos do sistema de potência.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

No capítulo 2, faremos uma breve introdução às LMI's, mostrando alguns conceitos básicos e aplicações elementares. No capítulo 3, é apresentado o modelo dinâmico de um sistema de potência multimáquinas genérico; este equacionamento é todo feito visando a modelagem no espaço de estados, muito adequada a problemas de controle em geral. No capítulo 4,

apresentamos nossa contribuição propriamente dita, descrevendo uma formulação matemática para posicionamento de pólos de sistemas numa região especificada do plano complexo através de LMI's e controladores de estrutura fixa, considerando vários pontos de operação (o que caracteriza o controle robusto). São desenvolvidas duas metodologias inovadoras para posicionamento de pólos com restrição de ganho do controlador. Ao final, também são desenvolvidos algoritmos para projetar controladores centralizados considerando atrasos de transmissão de informação no sistema de potência. No capítulo 5, os resultados numéricos são apresentados e discutidos - são apresentadas aplicações dos métodos de controle robusto a três sistemas: um sistema de nove máquinas (New England – New York), um sistema de 16 máquinas e um sistema de 9 máquinas utilizando modelos de termogeradores, além de algumas simulações não-lineares, cuja finalidade é validar os algoritmos propostos e mostrar sua viabilidade. São utilizados diversos modelos para os sistemas, alguns mais sofisticados que outros. O capítulo 6 traz as conclusões deste trabalho.